

(一財)日本建設情報総合センター研究助成事業実績報告書

ドローン・機械学習・3次元構造解析・  
信頼性理論の融合による  
劣化 RC 橋梁の健全度の自動判定

令和5年12月

早稲田大学理工学術院

## 要旨

鉄筋腐食は、鉄筋コンクリート (RC) 構造物における主要な劣化要因の一つである。塩害環境下にある RC 構造物は、鋼材腐食に伴いかぶりコンクリートに腐食ひび割れを生じる。腐食ひび割れは他のひび割れ要因と異なり、鉄筋の断面欠損に起因するため、観測されたときには RC 構造物の耐荷力低下が懸念される。このとき、補修や補強の判断のため、構造物の残存耐荷力を精度良く評価する必要がある、そのためには部材内部の鉄筋腐食率の大きさとその分布を推定することが求められる。腐食ひび割れ幅は、鉄筋腐食率を推定する貴重な情報となる一方で、構造諸元やコンクリートの品質などの多くのパラメータが介在することにより、その予測には大きなばらつきを伴う。

本研究では、異なる構造諸元 (細目) を持つ腐食劣化 RC 部材を対象に、点検・検査によって得られる腐食ひび割れ幅分布情報から RC 部材内部の鉄筋の腐食率分布を予測し、劣化 RC 部材の残存耐荷力を評価することを目的とする。本研究の特徴は、ドローンにより撮影した画像から得られる腐食ひび割れ幅分布情報と機械学習 (pix2pix)・非線形有限要素解析 (Non-FEA)・モンテカルロシミュレーション (MCS) を用いて、鉄筋腐食率分布の予測と確率論的耐荷力評価を行った点、その結果から腐食ひび割れ幅の取得精度が耐荷力推定に及ぼす影響を調査した点、さらに、鉄筋腐食率分布を予測する機械学習の構築に必要なデータベースの作成において、X 線画像とデジタル画像処理によって可視化した腐食生成物をモデル化することで、腐食ひび割れ幅の再現精度を向上させた点にある。

本研究では、まず 3 本の軸方向鉄筋を有する小型 RC はりの腐食実験を行い、軸方向の鉄筋間隔、鉄筋径、電流密度が鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係に及ぼす影響を調査した。実験結果として、鉄筋の間隔が狭い供試体では同程度の鉄筋腐食率において腐食ひび割れ幅が小さい傾向があること、鉄筋径が大きい供試体では同程度の鉄筋腐食率において腐食ひび割れ幅が大きい傾向にあること、鉄筋腐食率が 10%~15% においては電流密度が高い方が、腐食ひび割れ幅が大きくなることを示した。

次に、実験結果に基づき、腐食ひび割れ幅分布から鉄筋腐食率分布を予測する機械学習用のデータベースを作成した。実験結果から取得した鉄筋腐食率分布の相関性に関するパラメータを用いて、Spectral Representation Method (SRM) により疑似的に 2 次元鉄筋腐食率分布を多数発生させた。そして、腐食実験条件の違いが腐食生成物に及ぼす影響を考慮した腐食生成物モデルを用いて疑似腐食生成物厚さに変換した。腐食生成物モデルは、X 線画像とデジタル画像処理を用いて腐食生成物を可視化し、その厚さを測定することでモデル化

した。そして、疑似腐食生成物厚さと Non-FEA を用いて疑似腐食ひび割れ幅分布を算出した。次に、機械学習用データベースを用いて pix2pix モデルを構築した。この pix2pix モデルでは、腐食ひび割れ幅分布だけでなく構造諸元（細目）も入力情報とすることで、1つのモデルで様々な構造諸元（細目）を持つ RC 部材の 2次元鉄筋腐食率分布を推定できるようにした。

最後に、実構造物を見据えた大型の RC はりを対象に、ドローン撮影で得られた腐食ひび割れ幅分布から鉄筋腐食率分布を予測し、検証用データに対する pix2pix のモデル誤差、実験結果に対する pix2pix のモデル誤差、耐荷力を算出する Non-FEA のモデル誤差を定量化した上で、MCS を用いて予測された鉄筋腐食率分布および算出された耐荷力に組み込むことで、確率論的に耐荷力を評価した。その際、近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅分布から推定される耐荷力分布および大型 RC はりの曲げ載荷試験で得られた降伏荷重の実験結果と比較することで、腐食ひび割れ幅の取得精度が耐荷力推定に及ぼす影響を調査した。その結果、錆汁を伴う腐食ひび割れが観測される劣化 RC 部材の耐荷力を評価するためには、近接撮影と同程度の画質の腐食ひび割れ画像の取得が必要であることが示された。

本研究の意義は、腐食ひび割れ幅分布と機械学習を用いて劣化 RC 部材の耐荷力を確率論的に評価する手法を基に、ドローンによって腐食ひび割れ画像を撮影し、腐食ひび割れ幅分布の取得から耐荷力分布の取得、そして構造物の診断までを自動化する実用的な手法に拡張する第一歩として、腐食ひび割れ幅の取得方法に着目し、耐荷力評価に必要な腐食ひび割れ幅の取得精度を調査した点にある。この取得精度は、錆汁を伴う腐食ひび割れが観測される RC 部材の点検・検査時にドローンやデジタルカメラ等の撮影機器を使用する際に撮影機器の性能を判断する指標になると期待される。

# 目次

1.	はじめに	1
1.1	序論	1
1.2	報告書の構成	3
	参考文献	5
2.	既往の研究とその課題	8
2.1	RC 構造物に生じる鉄筋腐食のメカニズム	8
2.1.1	鉄筋腐食のメカニズム	8
2.1.2	鉄筋腐食の空間変動性	8
2.2	腐食ひび割れと鉄筋腐食率の関係	9
2.2.1	腐食ひび割れ情報に基づく鉄筋腐食率の推定	9
2.2.2	構造諸元の違いが腐食ひび割れと鉄筋腐食率の関係に及ぼす影響	10
2.2.3	腐食ひび割れと鉄筋腐食率の関係に介在する不確定性	10
2.3	鉄筋腐食の生じた RC 部材の構造性能評価	11
2.3.1	劣化 RC 部材の構造性能評価（実験的研究）	11
2.3.2	劣化 RC 部材の構造性能評価（解析的研究）	12
2.3.3	劣化 RC 部材の構造性能評価に介在する不確定性	14
2.4	機械学習	15
2.4.1	ANN	15
2.4.2	RNN	15
2.4.3	CNN	16
2.4.4	GAN	16
2.4.5	構造工学分野における機械学習の利用	17
2.5	インフラ点検の現状	18
2.6	本研究の位置づけ	19
	参考文献	20
3.	ドローンにより撮影した腐食ひび割れ幅分布情報と機械学習モデルを用いた塩害劣化 RC 部材の確率論的耐荷力推定フロー	25
3.1	概説	25
3.2	劣化 RC 部材の確率論的耐荷力推定フロー	25
3.3	ドローンを用いた腐食ひび割れ幅分布情報の取得	26

3.4	腐食実験	27
3.5	機械学習用データベースの作成	27
3.5.1	疑似腐食供試体の作成に必要な確率場パラメータの同定	27
3.5.1.1	RC はりの電食実験	27
3.5.1.2	2次元確率場・Spectral Representation Method (SRM)の概要	27
3.5.1.3	SRM を用いた疑似腐食供試体の作成	29
3.5.2	腐食生成物厚さのモデル化	29
3.5.3	劣化 RC 部材の3次元非線形有限要素モデル	29
3.5.4	データベースの作成	29
3.6	機械学習 (pix2pix)	30
3.7	劣化 RC 部材の確率論的耐荷力評価	30
	参考文献	31
4.	RC はりの電食実験	33
4.1	概説	33
4.2	RC はりの電食実験用供試体	33
4.2.1	データベースの作成に用いる RC はり	33
4.2.2	ドローンによる腐食ひび割れの撮影と耐荷力推定に用いる RC はり	34
4.3	実験手法	34
4.3.1	電食実験	34
4.3.2	デジタルノギス測定による鉄筋断面損失率の推定	36
4.3.3	デジタル画像処理による腐食ひび割れ幅の推定	37
4.4	実験結果および考察	39
4.4.1	鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係	39
4.4.1.1	鉄筋間隔の影響	40
4.4.1.2	電流密度の影響	41
4.4.1.3	鉄筋径の影響	42
4.4.2	腐食ひび割れ幅の測定精度	42
4.4.2.1	ドローンによる撮影	42
4.4.2.2	デジタルカメラによる近接撮影	43
4.4.2.3	撮影方法による違いが腐食ひび割れ幅の測定精度に及ぼす影響	43
4.4.3	腐食 RC はりの曲げ試験	45

4.4.3.1	4.4.3.2	4.4.3.3	参考文献	45
				45
				46
				47
5.	機械学習用データベースの作成と機械学習を用いた腐食ひび割れ情報に基づく鉄筋腐食率分布の予測			100
5.1	概説			100
5.2	疑似腐食供試体の作成に必要な確率場パラメータ			101
5.2.1	鉄筋腐食の空間変動の再現に必要なパラメータの同定			101
5.2.1.1	鉄筋腐食率の統計的性質			101
5.2.1.2	鉄筋腐食率分布の部材軸方向の相関性評価			102
5.2.1.3	鉄筋腐食率分布の部材軸直角方向の相関性評価			103
5.2.2	SRM を用いた疑似鉄筋腐食率分布のシミュレーション			105
5.3	腐食実験条件の違いを考慮した腐食生成物厚さのモデル化			106
5.4	劣化 RC 部材の 3 次元非線形有限要素モデル			110
5.4.1	圧縮を受けるコンクリート要素のモデル化			110
5.4.1.1	材料劣化のない場合			110
5.4.1.2	材料劣化のある場合			111
5.4.2	引張を受けるコンクリート要素のモデル化			113
5.4.2.1	材料劣化のない場合			113
5.4.2.2	材料劣化のある場合			114
5.4.3	鉄筋要素のモデル化			114
5.4.3.1	材料劣化のない場合			114
5.4.3.2	材料劣化のある場合			116
5.5	腐食生成物モデルと有限要素解析を用いた腐食ひび割れ幅の再現性			117
5.5.1	小型 RC はりの実験結果を用いた検証			117
5.5.1.1	既往モデルを用いた場合			118
5.5.1.2	提案モデルを用いた場合			120
5.5.2	大型 RC はりの実験結果を用いた検証			122
5.5.2.1	既往モデルを用いた場合			122
5.5.2.2	提案モデルを用いた場合			122

5.5.3	腐食ひび割れ幅の予測精度改善に向けた考察.....	122
5.6	機械学習用データベースの作成.....	125
5.7	機械学習モデル (pix2pix) .....	125
5.8	機械学習を用いた腐食ひび割れ情報に基づく鉄筋腐食率分布の予測結果...	127
5.9	pix2pix に介在するモデル誤差 .....	128
5.9.1	検証用データを用いたモデル誤差の定量化.....	129
5.9.2	実験結果に基づく鉄筋腐食率分布の補正.....	130
	参考文献 .....	132
6.	モンテカルロシミュレーションを用いた劣化 RC 部材の確率論的耐荷力推定.....	206
6.1	概説 .....	206
6.2	耐荷力推定の計算手順.....	206
6.2.1	腐食ひび割れ幅の取得.....	206
6.2.2	pix2pix を用いた鉄筋腐食率の予測 .....	206
6.2.3	3次元非線形有限要素解析を用いた耐荷力の計算 .....	207
6.3	3次元非線形有限要素解析による劣化 RC 部材の荷重-変位関係の再現 .....	207
6.3.1	解析モデル.....	207
6.3.2	実験結果との比較.....	208
6.3.3	3次元非線形有限要素解析に介在するモデル誤差の定量化 .....	209
6.4	ケーススタディ.....	210
6.4.1	想定する構造諸元と腐食ひび割れ情報.....	210
6.4.2	解析結果および考察.....	210
6.4.2.1	ドローンによる撮影画像を用いた耐荷力推定 .....	210
6.4.2.2	近接撮影画像を用いた耐荷力推定 .....	212
6.4.2.3	腐食ひび割れ幅の測定精度の違いが耐荷力推定に及ぼす影響 .....	213
	参考文献 .....	215
7.	今後の展開 .....	241
7.1	疑似腐食供試体を用いた機械学習用データベースの改善.....	241
7.2	劣化 RC 部材の耐荷力推定に必要なカメラの性能.....	242
7.3	電食実験で生じる鉄筋腐食生成物の理解.....	242
7.4	載荷実験途中で得られる情報を用いた劣化 RC 部材耐荷力の更新.....	243
	参考文献 .....	244

8. 結論 .....	245
-------------	-----

## 表目次

表 4-1	小型 RC はりの供試体一覧	49
表 4-2	小型 RC はりのパラメーター一覧	49
表 4-3	小型 RC はりのコンクリートの示方配合	50
表 4-4	小型 RC はりのコンクリートの物性値	50
表 4-5	大型 RC はりの供試体一覧	51
表 4-6	大型 RC はりのパラメーター一覧	51
表 4-7	大型 RC はりのコンクリートの示方配合	51
表 4-8	大型 RC はりのコンクリートの物性値	52
表 4-9	鉄筋の物性値	52
表 4-10	ノギス測定により推定した平均鉄筋断面損失率と平均質量減少率の比較	53
表 4-11	デジタル画像処理により推定した平均腐食ひび割れ幅と Image Pro で測定した平均腐食ひび割れ幅の比較	53
表 4-12	本研究で使用したドローンの概要	54
表 4-13	Skydio によるひび割れの計測精度 <sup>4-13)</sup>	54
表 4-14	各撮影方法で使用したカメラの性能	54
表 4-15	Image Pro による測定値を用いて算出した各撮影方法の RMSE	55
表 4-16	各供試体の破壊モード	55
表 5-1	コルモゴロフ・スミルノフ検定テストの結果	136
表 5-2	鉄筋腐食率分布の相関係数	137
表 5-3	データベースの概要	138
表 5-4	輝度値に対応する各パラメータ値の範囲	138
表 5-5	検証用データを用いて算出した RMSE	139
表 5-6	実験データを用いて算出した RMSE	139
表 6-1	降伏荷重の実験結果と再現解析結果の比較	216
表 6-2	Non-FEA の計算に伴うモデル誤差の統計量	216
表 6-3	ケーススタディで想定した構造諸元	217
表 6-4	各撮影方法で得られた平均腐食ひび割れ幅	218
表 6-5	各撮影方法での撮影距離とカメラ分解能および視認可能な腐食ひび割れ幅の比較	218

## 図目次

図 3-1	ドローンにより撮影した腐食ひび割れ幅分布情報と機械学習モデルを用いた塩害劣化 RC 部材の確率論的耐荷力推定フロー.....	32
図 4-1	小型 RC はりの断面図 (単位 : mm) .....	57
図 4-2	小型 RC はりの側面図 (単位 : mm) .....	58
図 4-3	大型 RC はりの断面図 (単位 : mm) .....	59
図 4-4	大型 RC はりの側面図 (単位 : mm) .....	59
図 4-5	小型 RC はりの電食実験概要.....	60
図 4-6	大型 RC はりの電食実験概要.....	60
図 4-7	デジタルノギスにより測定する鉄筋の残存径.....	60
図 4-8	腐食ひび割れ幅の測定フロー.....	61
図 4-9	Image Pro とデジタル画像処理によって得られた腐食ひび割れ幅分布の比較 .....	64
図 4-10	小型 RC はりの鉄筋腐食率分布.....	69
図 4-11	小型 RC はりの各鉄筋下に生じた腐食ひび割れ幅分布.....	74
図 4-12	小型 RC はりの鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係.....	79
図 4-13	大型 RC はりの鉄筋腐食率分布.....	81
図 4-14	大型 RC はりの各鉄筋下に生じた腐食ひび割れ幅分布.....	83
図 4-15	大型 RC はりの鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係.....	84
図 4-16	鉄筋間隔の異なる供試体における平均腐食ひび割れ幅と平均鉄筋腐食率の関係 .....	85
図 4-17	小型 RC はりと大型 RC はりにおける平均腐食ひび割れ幅と平均鉄筋腐食率の関係 .....	85
図 4-18	電流密度の異なる供試体における平均腐食ひび割れ幅と平均鉄筋腐食率の関係 .....	86
図 4-19	鉄筋径の異なる供試体における平均腐食ひび割れ幅と平均鉄筋腐食率の関係 .....	86
図 4-20	各撮影方法により取得された腐食ひび割れ幅分布.....	89
図 4-21	大型 RC はりの荷重 - 変位関係.....	90
図 4-22	大型 RC はりの曲げひび割れ性状 (供試体左端から 2000mm~4000mm 区間) .....	92
図 5-1	平均鉄筋腐食率と標準偏差の関係.....	140
図 5-2	各鉄筋腐食率分布の自己相関距離.....	140
図 5-3	オートスペクトル密度関数の近似曲線.....	141
図 5-4	各供試体のコヒーレンス関数の近似曲線.....	143

図 5-5	コヒーレンス関数の比較.....	144
図 5-6	疑似鉄筋腐食率分布と実験結果の比較 ( $RS = 57\text{mm}$ ) .....	145
図 5-7	疑似鉄筋腐食率分布と実験結果の比較 ( $RS = 95\text{mm}$ ) .....	146
図 5-8	X線画像およびデジタル画像処理による腐食生成物厚さ推定の概要 ...	147
図 5-9	電食実験における鉄筋腐食率と断面ごとの平均腐食生成物厚さの関係 ...	150
図 5-10	乾湿繰返し実験における鉄筋腐食率と断面度との平均腐食生成物厚さの 関係 .....	151
図 5-11	電食実験における観察角度ごとの平均腐食生成物厚さ $MT_{cp\theta}$ (単位 : mm) .....	154
図 5-12	乾湿繰返し試験における観察角度ごとの平均腐食生成物厚さ $MT_{cp\theta}$ (単位 : mm) .....	155
図 5-13	腐食生成物厚さ・形状のモデル化.....	156
図 5-14	電食実験の断面ごとの腐食生成物厚さの近似曲面.....	156
図 5-15	乾湿繰返し実験の断面ごとの平均腐食生成物厚さの近似曲線.....	156
図 5-16	各実験方法による角度パラメータの近似曲線.....	157
図 5-17	コンクリートの応カーひずみ関係.....	158
図 5-18	鉄筋の引張挙動.....	159
図 5-19	テンションスティフニング効果を考慮したコンクリート中の鉄筋の 応カーひずみ関係.....	159
図 5-20	付着応カーすべり関係.....	160
図 5-21	小型 RC はりの 3 次元 Non-FE モデルの断面図.....	161
図 5-22	3 次元 Non-FE モデルの全体図 .....	162
図 5-23	鉄筋に生じる不均一腐食のモデル化 (既往モデル) <sup>5-7)</sup> .....	162
図 5-24	腐食ひび割れ幅分布の実験結果と再現解析結果の比較 (小型 RC はり) .	168
図 5-25	再現解析結果の平均腐食ひび割れ幅と実験結果の平均腐食ひび割れ幅の 絶対誤差.....	169
図 5-26	平均鉄筋腐食率に対する平均腐食ひび割れ幅の再現解析結果と実験結果の 絶対誤差.....	169
図 5-27	電食実験における鉄筋腐食率と鉄筋各断面における平均膨張量の関係 ..	172
図 5-28	乾湿繰返し実験における鉄筋腐食率と鉄筋各断面における平均膨張量の 関係 .....	173
図 5-29	大型 RC はりの 3 次元 Non-FE モデルの断面図 ( $RS = 95\text{mm}$ , $RD = D19$ ) .	174
図 5-30	腐食ひび割れ幅分布の実験結果と再現解析結果の比較 (大型 RC はり) .	177
図 5-31	再現解析結果の平均腐食ひび割れ幅と実験結果の平均腐食ひび割れ幅の 絶対誤差.....	178
図 5-32	平均鉄筋腐食率に対する平均腐食ひび割れ幅の解析結果と実験結果の	

	絶対誤差.....	178
図 5-33	断面寸法検証用の小型 RC はりの 3 次元 Non-FE モデルの断面図 ( $RS = 95\text{mm}$ , $RD = D19$ ) .....	179
図 5-34	異なる断面寸法を持つ RC はりの解析結果で得られた腐食ひび割れ幅分布の 比較 .....	180
図 5-35	Y 軸方向に生じたひずみコンター図の比較 .....	181
図 5-36	大型 RC はりの Y 軸方向に生じた応力コンター図.....	182
図 5-37	断面寸法検証用小型 RC はりの Y 軸方向に生じた応力コンター図.....	182
図 5-38	腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係の比較.....	183
図 5-39	pix2pix の概要 <sup>5-34</sup> ) .....	184
図 5-40	画像変換手順.....	185
図 5-41	検証用データを用いた pix2pix による鉄筋腐食率分布の予測結果例....	188
図 5-42	実験結果を用いた pix2pix による鉄筋腐食率分布の予測結果.....	194
図 5-43	実験結果の平均鉄筋腐食率と予測結果の平均鉄筋腐食率の絶対誤差....	195
図 5-44	腐食ひび割れ幅の再現解析結果と実験結果の絶対誤差と鉄筋腐食率の 実験結果と予測結果の絶対誤差の関係.....	195
図 5-45	検証用データに対する pix2pix のモデル誤差の PDF .....	196
図 5-46	pix2pix のモデル誤差の平均の PDF.....	196
図 5-47	検証用データに対する pix2pix のモデル誤差の標準偏差と正解データの 平均鉄筋腐食率の関係.....	197
図 5-48	実験結果に対する実験結果と予測結果の平均鉄筋腐食率の絶対誤差....	197
図 5-49	予測結果に対する実験結果と予測結果の平均鉄筋腐食率の絶対誤差....	198
図 5-50	実験結果に対する pix2pix のモデル誤差.....	198
図 5-51	平均鉄筋腐食率と平均腐食ひび割れ幅の関係.....	199
図 5-52	実験結果に対する pix2pix のモデル誤差を用いて補正した鉄筋腐食率分布 .....	205
図 6-1	耐荷力評価フロー.....	219
図 6-2	3 次元 Non-FE モデルの概要 .....	220
図 6-3	荷重－変位関係の実験結果と再現解析結果の比較.....	221
図 6-4	C2 で観測された腐食ひび割れ幅分布 .....	222
図 6-5	C3 で観測された腐食ひび割れ幅分布 .....	223
図 6-6	C4 で観測された腐食ひび割れ幅分布 .....	224
図 6-7	Skydio により撮影した腐食ひび割れ幅分布から予測された鉄筋腐食率分布 .....	227
図 6-8	ANAFI により撮影した腐食ひび割れ幅分布から予測された鉄筋腐食率分布	230
図 6-9	ドローン撮影画像を用いた耐荷力評価結果.....	231

図 6-10	近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅から予測された鉄筋腐食率分布 . . . .	234
図 6-11	実験結果に対する平均鉄筋腐食率の実験結果と予測結果の絶対誤差 . . . .	235
図 6-12	補正後の鉄筋腐食率分布 . . . . .	238
図 6-13	近接撮影画像を用いた耐荷力評価結果 . . . . .	239
図 6-14	撮影方法の違いによる耐荷力評価結果の比較 . . . . .	240

## 写真目次

写真 4-1	スターラップ位置直下の RC はり底面に生じた腐食ひび割れの例(供試体 C1)	93
写真 4-2	ドローン撮影の様子	94
写真 4-3	Skydio で撮影された腐食ひび割れ画像例 (供試体 C3 : 電食終了後)	95
写真 4-4	ANAFI で撮影された腐食ひび割れ画像例 (供試体 C3 : 電食終了後)	96
写真 4-5	近接で撮影された腐食ひび割れ画像例 (供試体 C3 : 電食終了後)	97
写真 4-6	各撮影方法で得られた画像による腐食割れ幅箇所の見え方の違い (供試体 C3 : 電食終了後)	98
写真 4-7	大型 RC はりの曲げ試験の様子 (供試体 C2)	99

## 1. はじめに

### 1.1 序論

海洋環境や凍結防止剤を散布する地方にある鉄筋コンクリート（RC）構造物は、塩化物イオンの作用により鉄筋腐食が生じることがある<sup>1-1),1-2)</sup>。鉄筋腐食はRC構造物の耐荷力や変形能の低下に直結するため、鉄筋腐食が生じたRC構造物は、基本的な要求性能、例えば使用性や安全性を満足できない可能性があることから、その腐食の状態を慎重に評価し、必要な対策を講じる必要がある。しかし、鋼構造と異なり、コンクリート内にある鉄筋の腐食は目視により確認することができず、その量を直接測定できないため、腐食RC構造物の構造性能評価は極めて難しい状況にある。一方、コンクリート表面に生じる腐食ひび割れは、その位置にある鉄筋の腐食生成物の膨張に伴う引張力により生じていることから、腐食ひび割れ幅と腐食量には正の相関があると考えられ、両者の関係について、多くの研究者が実験的、あるいは解析的な検討を行っている<sup>1-3), 1-4), 1-5), 1-6), 1-7)</sup>。

しかしながら、実験結果から得られる腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の関係には、大きな不確定性（ばらつき）が存在し、ある程度の幅を有する腐食ひび割れ幅が観察されても、その位置のコンクリート内の鉄筋腐食量を予測することは困難である。筆者らは、この問題を理解するために、X線画像とデジタル画像処理により、コンクリート部材内の鉄筋腐食の成長と腐食ひび割れ幅の変化について実験的な検討を継続的に行ってきた<sup>1-8), 1-9), 1-10), 1-11), 1-12), 1-13)</sup>。その結果、軸方向鉄筋の腐食は、断面内だけでなく、部材軸方向に極めて不均一に発生し、鉄筋腐食量の分布は空間的に大きく変動すること（空間変動性）、また、その変動は部材軸方向および軸直角方向に相関性を有し、確率場として表現できること、その結果として、ある軸方向鉄筋の直下に生じている腐食ひび割れの大きさは、その位置の軸方向鉄筋の腐食量のみには依存しないこと、を明らかにした。さらに、軸方向鉄筋が複数本ある場合、例えば、3本の軸方向鉄筋があり、左右の鉄筋に腐食が生じると、腐食生成物の膨張圧の作用をその中央に位置する鉄筋周辺のコンクリートが受けるため、中央に位置する鉄筋に腐食が生じたとしても、引張ひずみが生じ難い。そのため、中央の鉄筋の下に現れる腐食ひび割れ幅は、左右の鉄筋の下に現れる腐食ひび割れ幅より小さくなるなど、鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅の関係には、配筋や鉄筋のあきなど、構造細目の影響も受ける可能性を指摘してきた。

上記の状況に鑑み、劣化RC部材から腐食ひび割れ幅の分布が入手できたとしても、解析的に部材内部に生じている鉄筋腐食量の分布を同定することは難しいと判断し、筆者らは、Artificial Neural Network (ANN)や Long Short-Term Memory (LSTM)、あるいは pix2pix などの

機械学習のアプローチを用い、さらに、非線形有限要素解析 (Non-FEA) とモデル誤差を考慮した Monte Carlo シミュレーション (MCS) を行うことにより、腐食ひび割れ幅の情報から、対象とする劣化 RC はりの曲げ耐力の確率密度関数を算定する一連の手法を提示した<sup>1-14), 1-15), 1-16)</sup>。

この手法の中で核となるのが、機械学習用のデータベース (鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅分布の組み合わせ) の構築である。予算および時間の制約から、多数の RC 部材を腐食させ、その実験結果からデータベースを構築するのは極めて困難である。そこで、参考文献<sup>1-17)</sup>では、3本の軸方向鉄筋を有する RC はりの電食試験を行い、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係を持つデータベースの作成にあたって、その実験結果に基づいた鉄筋腐食率の相関性に関するパラメータの設定や Non-FEA モデルのキャリブレーションを行うことで、実験結果と同様の性質を持つデータベースの作成を可能にした。データベースの作成の際には、鉄筋腐食率分布の部材軸方向および部材軸直角方向における異なる拡散の性質をモデル化することができる数理的な手法である Spectral Representation Method (SRM)<sup>1-20)</sup>を用いている。また、画像間の関係を学習する機械学習モデルである pix2pix を用いて、入力画像に構造諸元を組み込むことにより、複数本の鉄筋を有する RC はりを対象として、腐食ひび割れ幅分布だけでなく構造諸元 (細目) を考慮した鉄筋腐食率分布の予測を可能にした。

参考文献<sup>1-17)</sup>の耐荷力評価手法を用いることで、複数本の鉄筋を有する RC はりの構造諸元 (細目) と腐食ひび割れ幅分布の情報から、劣化 RC はりの曲げ耐力を推定することが可能となった。この手法を実造物に適用することを見据えると、点検時の腐食ひび割れ幅を取得する技術についての検討が必要である。例えば、道路橋の点検においては、平成 26 年 6 月に「道路橋定期点検要領」<sup>1-18)</sup>が示され、人による近接目視が求められている。しかし、技術者が近接目視でひび割れをスケッチし、データを記録するのは膨大な時間とコストがかかる。さらに、河川をまたぐ橋梁などでは、足場を組む必要があり、コストだけでなく安全面にも課題を抱えている。このような背景から、この点検要項を改訂<sup>1-19)</sup>し、近接目視と同等の健全性の評価ができる方法による点検が認められた。そこで本研究では、ドローンを用いた点検と、著者らがこれまでに提案してきた耐荷力評価手法を一体化し、ドローンによって腐食ひび割れ画像を撮影することで、腐食ひび割れ幅の取得から耐荷力の推定までを一貫して行うことができる実用的なフローに拡張する。そして、ドローン撮影で得られた腐食ひび割れ幅分布から推定される耐荷力と近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅分布から推定される耐荷力を、それぞれ実験で得られた耐荷力と比較することで、耐荷力推定に必要な腐食ひび割れ幅の測定精度について調査した。

また、参考文献<sup>1-17)</sup>で耐荷力評価の有効性の検証に用いた RC 部材は、データベースの作成に用いた RC 部材と同一のものであり、他の RC 部材への適用に関する検討は不十分であった。提案手法を実構造物に適用することを見据え、データベースの作成に用いていない大型の RC 部材を対象に提案手法を用いて耐荷力を推定し、提案する耐荷力評価手法の有効性を示すことを試みる。

さらに、参考文献<sup>1-17)</sup>では、鉄筋腐食率を予測する機械学習モデルの構築に必要なデータベースの作成において、腐食ひび割れ幅を過大に評価していた。そして、過大評価している腐食ひび割れ幅に対して正規乱数を用いた補正を行っていたが、その補正では鉄筋腐食率の大きさに依らずにばらつかせており、実際の鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅のばらつきを十分に再現できていない点に課題を残していた。機械学習モデルを用いて鉄筋腐食率分布を精度良く予測するには、腐食ひび割れ幅の再現性を向上させる必要がある。参考文献<sup>1-17)</sup>において、腐食ひび割れ幅の推定に用いていた腐食生成物モデルは、電食実験より腐食性生物が塩水に流れ出す影響が少ない乾湿繰返し実験から取得した腐食生成物厚さをモデル化しており、電食により腐食した RC はりの腐食ひび割れ幅の推定に用いると、腐食ひび割れ幅を過大評価する。つまり、腐食生成物をモデル化には腐食実験条件の違いを考慮する必要がある。そこで本研究では、先行研究<sup>1-10), 1-13)</sup>の実験結果を用いて、供試体内部を映した X 線画像とデジタル画像処理技術により腐食生成物を可視化した。そして、腐食生成物の厚さを測定することで鉄筋腐食率と腐食生成物厚さの関係を調査し、腐食実験条件の違いを考慮した腐食生成物厚さのモデル化に取り組む。また、腐食生成物厚さモデルを用いた Non-FEA から算出された腐食ひび割れ幅の解析値と実験で得られた腐食ひび割れ幅を比較することで、提案する腐食生成物厚さモデルの有用性を示す。

## 1.2 報告書の構成

本報告書の構成を以下に示す。

第 1 章では、研究の背景、目的について論じる。

第 2 章では、RC 部材に生じる腐食の空間変動性、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係に介在する不確定性、劣化 RC 部材の構造性能評価に介在する不確定性、機械学習に関する既往の研究について論じる。

第 3 章では、ドローンにより撮影した腐食ひび割れ幅分布情報と機械学習モデルを用いた塩害劣化 RC 部材の確率論的耐荷力推定フローを提案する。

第4章では、RCはりの電食試験結果を基に構造諸元（軸方向鉄筋の間隔，電流密度，鉄筋径）が鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係に及ぼす影響について論じる。

第5章では、SRMと腐食生成物モデル，さらに3次元Non-FEAを用いて実験結果に基づく機械学習用データベースの作成を行い，機械学習（pix2pix）を用いた腐食ひび割れ幅分布情報に基づく鉄筋腐食率分布の予測と機械学習モデルの評価を行う。

第6章では，ケーススタディを行う．提案フローに従い，ドローンにより取得された腐食ひび割れ幅を用いて得られた耐荷力評価の結果と近接撮影によって取得された腐食ひび割れ幅を用いて得られた耐荷力評価の結果をそれぞれ実験結果と比較する．

第7章では，今後の展開について述べる．

第8章では，結論について述べる．

## 参考文献

- 1-1) Akiyama, M., Soliman, M., Biondini, F. and Frangopol, D.M.: Structural Deterioration Mechanisms, Chapter 1 in Life-Cycle Assessment, Design, and Maintenance of Structures and Infrastructure System (Edited by Biondini, F. and Frangopol D.M.), American Society of Civil Engineers, pp. 1-31, 2019.
- 1-2) 古玉悟, 田邊俊郎, 横田弘, 濱田秀則, 岩波光保, 日々智也: 棧橋の維持補修マネジメントシステムの開発, 港湾空港技術研究所資料, No.1001, 2001.
- 1-3) Mullard, J.A. and Stewart, M.G.: Corrosion-induced cover cracking: New test data and predictive models, *ACI Structural Journal*, Vol.108, pp.71-79, 2011.
- 1-4) Zhang, R., Castel, A. and François, R.: Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process. *Cement and Concrete Research*, Vol.40, No.3, pp.415-425, 2010.
- 1-5) Alonso, C., Andrade, C., Rodriguez, J. and Diez, J.M.: Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion, *Material and Structures*, Vol.31, No.7, pp.435-441, 1998.
- 1-6) 弄路寛, 関博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, No. 669/V-50, pp.161-171, 2001.
- 1-7) Khan, I., François, R. and Castel, A.: Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams, *Cement and Concrete Research*, Vol.56, pp.84-96, 2014.
- 1-8) 秋山充良, 中嶋啓太, 小森谷隆: X線撮影を用いたRC部材内の鉄筋腐食成長過程の可視化に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.35-45, 2011.
- 1-9) Lim, S., Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling,

*Engineering Structures*, Vol. 127, pp. 189-205, 2016.

- 1-10) Lim, S., Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Jiang, H.: Experimental investigation of the spatial variability of the steel weight loss and corrosion cracking of RC members: Novel X-ray and digital image processing techniques, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 118-134, 2017.
  
- 1-11) Zhang, M., Song, H., Lim, S., Akiyama, M., and Frangopol, D.M.: Reliability estimation of corroded RC structures based on spatial variability using experimental evidence, probabilistic analysis and finite element method, *Engineering Structures*, Vol.192, pp.30-52, 2019.
  
- 1-12) Zhang, M., Nishiya, N., Akiyama, M., Lim, S. and Masuda, K.: Effect of the correlation of steel corrosion in the transverse direction between tensile rebars on the structural performance of RC beams, *Construction and Building Materials*, Vol. 264, No.120678, 2020.
  
- 1-13) Xin, J., Akiyama, M., Miyazato, S., Frangopol, D.M., Lim, S., Xu, Z., and Li, A.: Effects of galvanostatic and artificial chloride environment methods on the steel corrosion spatial variability and probabilistic flexural capacity of RC beams, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.18(10-11), pp.1506-1525, 2022.
  
- 1-14) 新谷美菜, 秋山充良, 張明陽, 辛寄語 : LSTM を用いた腐食ひび割れを有する RC 部材の残存耐荷力推定に関する確率論的考察, AI・データサイエンス論文集, 第 1 巻, J1 号, pp.117-121, 2020.
  
- 1-15) 山田大樹, 新谷美菜, 辛寄語, 秋山充良 : pix2pix と腐食ひび割れ情報を用いた劣化 RC 部材内の 2 次元鉄筋腐食分布の推定および残存耐荷力の確率論的評価, AI・データサイエンス論文集, 第 2 巻, J2 号, pp.47-54, 2021.
  
- 1-16) Zhang, M., Akiyama, M., Shintani, M., Xin, J. and Frangopol, D.M.: Probabilistic estimation of flexural loading capacity of existing RC structures based on observational

corrosion-induced crack width distribution using machine learning, *Structural Safety*, Vol.91, No.102098, 2021.

- 1-17) 中村智, 山田大樹, 新谷美菜, Supasit Srivaranun, 秋山充良 : 機械学習用データベースの拡充および腐食ひび割れ情報を用いた劣化 RC 部材の耐荷力推定, AI・データサイエンス論文集, 第 3 巻, J2 号, pp.117-127, 2022.
- 1-18) 国土交通省道路局 : 道路橋定期点検要領 (平成 26 年 6 月), <https://www.mlit.go.jp/common/001044574.pdf>, 2014.
- 1-19) 国土交通省道路局 : 道路橋定期点検要領 (平成 31 年 2 月), [https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4\\_1.pdf](https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo4_1.pdf), 2019.
- 1-20) Srivaranun, S., Akiyama, M., Bocchini, P., Christou, V., Frangopol, D.M., Fukushima, H. and Masuda, K.: Effect of the interaction of corrosion pits among multiple tensile rebars on the reliability of RC structures: Experimental and numerical investigation, *Structural Safety*, Vol.93, pp.1-18, 2021.

## 2. 既往の研究とその課題

### 2.1 RC 構造物に生じる鉄筋腐食のメカニズム

#### 2.1.1 鉄筋腐食のメカニズム

鉄筋腐食は、RC 構造物における主要な劣化要因の一つとなる。特に、海岸線近くに存在する RC 構造物は、飛来する塩化物イオンによる部材内部の鋼材腐食(塩害)が生じやすく、周囲を海に囲まれている本国では大きな問題となっている。

塩害による構造物の劣化過程は以下のⅣ期からなる<sup>2-1)</sup>。

第Ⅰ期(潜伏期)：塩化物イオンがかぶりコンクリート中を浸透し、鋼材付近に蓄積される過程で、塩化物イオンのコンクリート中での拡散速度に支配される。

第Ⅱ期(進展期)：鋼材が塩化物により腐食し始め、腐食生成物が蓄積され、その膨張圧によってかぶりコンクリートにひび割れが入る過程で、主として酸素と水分の供給量およびコンクリートの電気抵抗に支配される。

第Ⅲ期(加速期)：軸方向ひび割れの発生によって、腐食速度が促進され、かぶりコンクリートの剥離、剥落が生じる過程で、荷重作用などの影響も受ける。軸方向ひび割れが生じて静的な耐荷力は低下しないが、孔食などにより高い応力の繰返し荷重が作用する場合などでは、耐荷力および靱性の低下が生じ始める。

第Ⅳ期(劣化期)：鋼材腐食が進み、断面積の減少が顕著となり、耐荷力の低下が明らかとなる過程である。

したがって、腐食ひび割れが見られる RC 構造物では、その構造性能が供用開始時に比べ低下している、もしくは今後低下していく可能性が高く、補修や補強の要否を判断するために残存耐荷力を適切に評価する必要がある。また、かぶりコンクリート表面に現れる腐食ひび割れの幅は、一般に腐食が進むほど大きくなるとされており<sup>2-2)</sup>、耐荷力を推定する上で重要な指標になると考えられる。

#### 2.1.2 鉄筋腐食の空間変動性

部材内の軸方向鉄筋に生じる腐食は、部材軸方向に空間的なばらつき(空間変動性)を有している<sup>2-3),2-4)</sup>。このばらつきは、軸方向に沿った鉄筋位置ごとの鉄筋質量減少率を分布として取得した実験結果から、平均鉄筋腐食率が増加するほど大きくなる傾向があることが報告されている<sup>2-3)</sup>。Non-FEA を用いた腐食劣化 RC はりの曲げ載荷実験の再現解析において、特に鉄筋腐食率の標準偏差が大きいときには、この空間変動性を考慮することで、部材全長に一樣腐食を仮定した場合に比べて終局荷重を精度よく再現できることも示されている

る<sup>2-6)</sup>。すなわち、腐食による構造性能の低下を適切に評価するためには、腐食の空間変動性を考慮する必要がある。

この空間変動性は各鉄筋位置に対してランダムなものではなく、部材軸方向に相関性を有している<sup>2-4)</sup>。さらに、部材内に複数本の軸方向鉄筋が配筋された場合は、部材軸方向だけでなく部材軸直角方向にも相関性を有することが示されている<sup>2-7)</sup>。Zhang et al.<sup>2-7)</sup>の研究では、複数本の軸方向鉄筋を有する腐食劣化 RC はりの曲げ載荷実験の再現解析において、3次元 Non-FEA を用いて軸直角方向のばらつきを考慮することにより、構造性能を精度よく評価できることを示した。また、軸直角方向の相関を考慮した場合と考慮しない場合の2種類の鉄筋腐食率分布群を発生させ、終局荷重を算出した MCS の結果から、各鉄筋間の鉄筋腐食率分布の相関が強くなると、終局荷重のばらつきが大きくなることを示した。これより、腐食による構造性能の低下を適切に評価するためには、鉄筋腐食率分布の相関性を考慮する必要があるといえる。

また、RC 構造物内における鉄筋腐食率分布は様々なパラメータの影響を受け、分布の性質が異なる。以下に既往の実験<sup>2-3)</sup>、<sup>2-4)</sup>から得られた、1本の軸方向鉄筋を有する RC はりに生じる腐食率分布に影響を与えるパラメータの例を示す。

- ・ スターラップの間隔が狭くなるほど腐食速度が遅くなる<sup>2-3)</sup>。
- ・ 電食試験を行った供試体では、電流密度が低い ( $50\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下) 方が電流密度の高い ( $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以上) 場合に比べて鉄筋腐食率分布が不均一になる<sup>2-4)</sup>。
- ・ 鉄筋径が小さい供試体の場合、かぶりが小さいほど鉄筋腐食率の標準偏差は大きくなるが、鉄筋径が大きい供試体では概ね等しい<sup>2-4)</sup>。
- ・ 鉄筋径が大きいとき、鉄筋径が小さい場合に比べてより均一な腐食になる<sup>2-4)</sup>。

## 2.2 腐食ひび割れと鉄筋腐食率の関係

### 2.2.1 腐食ひび割れ情報に基づく鉄筋腐食率の推定

腐食ひび割れ幅は、点検時に観測情報として得られやすいこと、一般的に鉄筋腐食率の増加に応じて増加すること等の理由から、供用中の腐食劣化 RC 構造物において、鉄筋腐食率を推定する重要な指標になりうる。既往の研究では、腐食ひび割れ幅を用いた鉄筋腐食率の予測手法が数多く提案されてきた。ここでは例として、参考文献<sup>2-8)</sup>で紹介されている3つの予測式について概説する。Rodriguez et al.<sup>2-9)</sup>は実験結果に基づき、以下に示す腐食ひび割れ幅  $w$  と腐食浸透深さ  $x$  の関係式を提案した。

$$w = 0.05 + \beta(x - x_0) \quad (2-1)$$

ここで、 $\beta$  は鉄筋の位置に関する係数、 $x_0$  は腐食ひび割れ発生時の腐食浸透深さを表し、 $x_0$  は鉄筋径と腐食浸透深さに関するパラメータ（均一腐食と局部腐食で値が異なる）等から求められる。

Vidal et al.<sup>2-10)</sup>は自然に腐食させた RC はりのデータに基づき、腐食ひび割れのプロセスは発生と進展の2段階に分けられるとした上で、以下に示す腐食ひび割れ幅  $w$  と断面損失  $\Delta A_s$  の関係式を提案した。

$$w = K(\Delta A_s - \Delta A_{s0}) \quad (2-2)$$

ここで、 $K=0.0575$ 、 $\Delta A_{s0}$  は腐食ひび割れ発生時の断面損失であり、かぶり、鉄筋径、腐食浸透深さに関するパラメータ（均一腐食と局部腐食で値が異なる）等から求められる。

Zhang et al.<sup>2-11)</sup>はスターラップの位置によって分けられた 200mm ごとの区間の平均断面損失  $\Delta A_{sm}$  に着目し、腐食ひび割れ幅  $w$  との関係について、以下の経験式を提案した。

$$w = 0.1916\Delta A_{sm} + 0.164 \quad (2-3)$$

## 2.2.2 構造諸元の違いが腐食ひび割れと鉄筋腐食率の関係に及ぼす影響

腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係には、構造諸元（軸方向鉄筋の間隔やスターラップ）が影響を及ぼす。以下に既往の実験<sup>2-3), 2-4), 2-5)</sup>から得られた構造諸元が腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率に与える影響を示す。

- ・スターラップがない RC はりの方が鉄筋腐食率および腐食ひび割れ幅が早く進展する<sup>2-3)</sup>。
- ・スターラップの間隔が狭くなると腐食ひび割れ幅の進展速度が上がる<sup>2-3)</sup>。
- ・3本の軸方向鉄筋を有する RC はりでは、軸方向鉄筋の間隔が狭いほど腐食ひび割れ幅が進展しにくい。これは、鉄筋腐食による膨張圧が鉄筋間に圧縮応力として作用し、腐食ひび割れ幅を抑制している<sup>2-5)</sup>。
- ・鉄筋径が大きいほど同程度の腐食率における腐食ひび割れ幅が大きくなる<sup>2-4)</sup>。

構造諸元は腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係に大きく影響している。

## 2.2.3 腐食ひび割れと鉄筋腐食率の関係に介在する不確定性

2.1.1 で述べた通り、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の間には一定の相関が見られ、一般に鉄筋腐食率が増加すると腐食ひび割れ幅も増加する。そのため、2.2.1 のように腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食率を予測する研究が数多く存在する。しかしその一方で、両者の関係には極めて大きな不確定性が存在する<sup>2-3), 2-4), 2-7)</sup>。同一部材内の同一鉄筋であっても、多数のパラメータが複雑に影響を及ぼすことにより、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係は大きく

ばらついている。例えば、同一部材であっても、鉄筋腐食率分布が部材内で不均一に進展することや、コンクリートの品質が不均一であること等からばらつきが生じていると考えられる。この不確定性により、腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食率を予測することは非常に困難なものとなっている。

また、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係には、構造諸元の他に、水セメント比や電流密度等のパラメータも影響を及ぼす。以下に既往の実験<sup>2-3),2-4)</sup>から得られた、1本の軸方向鉄筋を有するRCはりにおいて、パラメータが腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率に与える影響に関する知見をまとめる。

- ・平均鉄筋腐食率が大きくなると鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅のばらつきが増加する<sup>2-3)</sup>。
- ・水セメント比(W/C)が低いほど腐食ひび割れは進展しやすい<sup>2-3)</sup>。
- ・スターラップがないRCはりの方が鉄筋腐食率および腐食ひび割れ幅が早く進展する<sup>2-3)</sup>。
- ・スターラップの間隔が狭くなると腐食ひび割れ幅の進展速度が上がる<sup>2-3)</sup>。
- ・平均鉄筋腐食率が小さく腐食ひび割れが発生する時期においては、電流密度が低い(50 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下)と部材軸方向全長にわたってひび割れが発生せず、電流密度が高い(100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以上)と全長にわたってひび割れが生じる<sup>2-4)</sup>。
- ・平均鉄筋腐食率が大きくなり腐食ひび割れ幅が進展する時期においては、電流密度が高い(100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以上)と電流密度が低い場合(50 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下)に比べて同程度の腐食率における腐食ひび割れ幅が大きくなる。しかし、電流密度が1000 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ の供試体では腐食ひび割れ幅が大きくならなかった<sup>2-4)</sup>。

このように、鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係には様々なパラメータが関係している。

## 2.3 鉄筋腐食の生じたRC部材の構造性能評価

### 2.3.1 劣化RC部材の構造性能評価(実験的研究)

腐食劣化したRC部材は、鉄筋断面積の減少や付着劣化等により、構造性能が低下する。以下に、劣化RC部材の構造性能評価に関する実験的研究の例を示す。参考文献<sup>2-12)</sup>では、3, 10, 30%の様な鉄筋腐食を目標とした電食試験を行い、その後曲げ載荷試験を行った。載荷試験により荷重変位関係と、鉄筋を曲げおよびせん断スパンごとに切断し、それぞれの質量減少率を求めた。これより質量減少率が大きくなるにつれ、最大荷重比のばらつきが大きくなることが示された。また、最大荷重はおおむね鉄筋の平均断面減少率によって評価できることが述べられている。

加藤ら<sup>2-13)</sup>は、局所的に30~60%ほどの鉄筋腐食をさせたRCはりの曲げ載荷試験を行い、荷重変位関係と、腐食鉄筋を50mmごとに切断することにより単位長さあたりの質量減少

率を算出した。一般的に耐荷性を評価する際、質量減少率は純曲げ区間の平均を用いるが、一様に腐食させた RC はりと比較すると、局所的に鉄筋腐食が生じたはりについては降伏荷重や最大荷重の低下が顕著であった。また変形性の面からみた場合、最大断面減少率による影響が大きいことが記されている。

村上ら<sup>2-14)</sup>は、定着フックを設けない場合の腐食した単鉄筋 RC はりの曲げ耐力について載荷試験を行った。このとき、RC はりの曲げ耐力は大幅に低下する。主な要因としては、鉄筋とコンクリートの付着性状や、断面減少率、ひび割れ発生領域といった腐食ひび割れ性状である。村上らも局所的に腐食が生じている領域が存在すると、その領域の断面欠損が構造物全体の挙動に影響を及ぼすとしている。また、従来のように鉄筋の断面減少率や付着応力のみに着目するのではなく、腐食ひび割れについても考慮する必要があると述べている。

村松ら<sup>2-15)</sup>は、軸方向鉄筋端部の定着が良好であれば、付着劣化はひび割れの分散性を低下させるものの、曲げ耐力に及ぼす影響は少ないとしている。

また、村上ら<sup>2-16)</sup>は軸方向鉄筋の付着劣化により支点外側の領域まで荷重伝達がなされ、軸方向鉄筋定着部に損傷を受けている場合には、軸方向鉄筋の断面減少以上に耐荷力の低下を生じる場合があると述べている。また、曲げ破壊が先行する RC はりではせん断補強鉄筋が残存する場合、軸方向鉄筋の付着損失が抑制される傾向にある。せん断補強鉄筋が過度に腐食、消失した場合にはアーチ耐荷機構が形成され、このときの RC はりの破壊モードや最大荷重は定着性能に依存する。定着状態が不良であれば付着割裂破壊、定着状態が良好であれば、曲げあるいはせん断破壊となり、せん断耐荷力の低下は大幅に抑制される、とされている。

### 2.3.2 劣化 RC 部材の構造性能評価（解析的研究）

腐食劣化 RC 部材における構造性能の低下を解析上で再現することで、実構造物において構造性能の低下を評価しようとする研究も多数存在する。腐食による部材の劣化要因は、鉄筋断面積の減少や付着の劣化、かぶりコンクリートの劣化など多岐にわたる。その複雑さゆえに、Non-FEA を用いた研究が盛んである。以下に、劣化 RC 部材の構造性能評価に関する解析的研究の例を示す。

橘ら<sup>2-17)</sup>は、腐食 RC 構造物の安全性評価に関する研究として、さびの程度と劣化挙動や耐力低下との関係の解明を試みた。まず実験的研究において、外部から電流を流して腐食させた RC はりを用いて載荷試験および鉄筋の付着試験を実施し、その劣化挙動に対する検討を行った。その結果、腐食 RC はりが劣化挙動を示す要因として、鉄筋の最大付着力の低下、腐食生成物による膨張力で生じる内部応力の発生や軸方向鉄筋に沿うひび割れ、およびそ

れに伴う鉄筋への応力伝達の欠如が挙げられた。この各要因が劣化挙動に及ぼす影響を調べるため、解析的手法として有限要素弾塑性解析を用いて各要因に対する検討を行い、腐食 RC はりの解析モデルと劣化機構について考察した。結果として、鉄筋とコンクリートとの間の付着せん断応力の伝達の欠如をモデル化した解析で劣化挙動を表現できた。この付着せん断応力の伝達の欠如は、腐食生成物の膨張力の影響で RC はり側面に到達した縦ひび割れ面によって生じることが実験で確認された。また縦ひび割れが RC はり側面に到達していない状態でも内部応力の生じる縦ひび割れ部分が弱点部となり、付着せん断応力の伝達を欠如させる可能性を示した。なお、この研究はスターラップを有しない RC はりに対するものである。

李ら<sup>2-18)</sup>は、鉄筋が腐食した RC 構造部材の耐力低下の原因として、鉄筋の断面減少によるその力学的性能の低下および鉄筋とコンクリートとの間の付着性能の低下を挙げている。また、鉄筋の腐食程度を変数として各材料要素の構成則を導き出せば、有限要素法を用いて腐食 RC 構造部材の耐力低下機構を明確にできると提案し、鉄筋が腐食した RC はりの耐荷性能を有限要素解析によって予測できる手法を開発した。まず鉄筋および鉄筋とコンクリートとの付着要素の構成則を得るために、鉄筋の引張試験および引き抜き付着試験を行い、その結果より得られた質量減少率を変数とする鉄筋要素および付着要素の構成則を作成した。そして鉄筋腐食 RC はりの載荷実験結果とその有限要素解析の結果を比較検討し、各材料構成則の妥当性を検証している。

高橋<sup>2-19)</sup>は、破壊の局所化が起きるような激しい腐食を受けた RC はりの適切なモデル化や構成則について検討するため、破壊の局所化をとまなう腐食 RC はりの実験結果に対して有限要素解析を実施した。対象は松下ら<sup>2-20)</sup>の腐食 RC はりの曲げ試験で、鉄筋の質量減少率が高く局所的な破壊を呈した S1630 供試体とし、載荷後 100mm 毎に質量減少率を、また破壊断面付近においては 3D スキャナーにより 1mm ピッチで詳細な断面積を計測した。一方で、解析において、劣化は鉄筋断面減少と付着劣化のみをモデル化の対象とした。付着モデルは島式をもとにした多直線で腐食による付着強度低下<sup>2-21)</sup>を考慮し、付着軟化のないモデルと、軟化を考慮し強度低下に伴い剛性が低下するモデルおよび軟化開始が早くなるモデルを用いている。その結果として、付着軟化が破壊位置と終局変位の評価に影響すること、積分型非局所理論<sup>2-22)</sup>により終局変位の評価を改善できるという結論を得た。

田中ら<sup>2-23)</sup>は、日本海沿岸で 80 年間供用され、塩害による鋼材腐食が進行していた RC 橋梁から試験桁を切り出し、破壊試験を行った。対象とした橋梁には、重ね継手が配置されており、継ぎ手が有効に機能した桁では、耐力低下は腐食率と同程度だったが、継ぎ手の定着

性能が低下していた桁では、腐食率に比べて耐力低下が大きかった。有限要素解析を実施し、実験との比較を行ったところ、定着・付着が確保されている場合には、軸方向の平均腐食率を考慮することで構造性能を適切に評価することが確認された。一方、腐食の進行によって、定着や付着の性能低下が顕著な場合には、鉄筋一本一本の付着・定着性能を適切に評価しなければ、部材全体の構造性能が予測できないことが明らかとなった。

武田ら<sup>2-24)</sup>は、日本海沿岸部で約 35 年間塩害環境下に曝され、鋼材腐食が生じたプレテンション桁を対象として載荷試験を行ったところ、橋桁によって PC 鋼材の腐食状況が異なっていたために、破壊形式や耐荷性能も異なる結果となった。次に、有限要素解析により載荷試験の再現解析を行った。その結果、PC 鋼材の腐食状況を解析上で精緻に表現し、適切な材料モデルを適用することで、有限要素解析により耐荷性能を比較的精度よく推定可能であることが示された。一方、外観のひび割れ状況から PC 鋼材の腐食状況を間接的に推定した場合には、評価の精度が落ちることが示された。

Coronelli and Gambarova<sup>2-25)</sup>は、腐食を受けた RC はりの構造性能およびその挙動を再現するための解析フローを開発し、実験データと比較して検証した。この研究の目的は二点ある。既存構造物のひび割れ、鉄筋降伏、付着劣化等の損傷に関する理解を深めること、および、実際の安全性レベルを適切に評価することである。構造解析には非線形有限要素解析が用いられ、腐食の影響は鉄筋とコンクリートとの断面積を縮小すること、および、その構成則を変更することによってモデル化される。限界状態は次の 5 点が用いられた。1) 引張硬化による剛性低下、2) せん断の影響の増加に伴うひび割れ進展、3) 曲げとせん断による材料強度低下、4) 曲げによる圧縮破壊、5) 付着すべりによる損傷、の 5 点である。この研究より、付着劣化のモデルを導入することは、構造物のリダンダンシーを評価するために最も重要であると考察された。

### 2.3.3 劣化 RC 部材の構造性能評価に介在する不確定性

観測情報を用いて腐食劣化 RC 部材の構造性能評価を試みる場合、例えば、腐食ひび割れ幅情報から鉄筋腐食率を予測し、予測された鉄筋腐食率からさらに Non-FEA 等を用いて残存耐荷力を算出することが考えられる<sup>2-8)</sup>。しかし、腐食ひび割れ幅から構造性能を精度よく推定することは大変困難である。これは、腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食率を予測する際の不確定性、および鉄筋腐食率から耐荷力を算出する際の不確定性が存在するためである。

2.2.2 で述べた通り、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係は本質的にばらついており、2つの部材で同じ腐食ひび割れ幅分布が観測されたとしても、部材内部の鉄筋腐食率分布が同じであるとは限らない。そのため、鉄筋腐食率の予測にあたっては、いかに高精度な予測モ

デルを用いる場合でも、モデル誤差が生じることは避けられないといえる。また、鉄筋腐食率から部材耐力を算出する際にも、Non-FEA による再現解析結果は実験結果を完全に再現することはできていない<sup>2-6), 2-7)</sup>のが現状であり、ここにもモデル誤差が存在している。

そこで、先行研究である Zhang et al.<sup>2-26)</sup>や中村ら<sup>2-5)</sup>の既往研究では、これらのモデル誤差を信頼性理論により定量化し、耐荷力評価に組み込んだ。具体的には以下の2つのステップにより、MCS を用いてモデル誤差を考慮しながら、腐食ひび割れ幅から耐荷力を評価している。

- (1) 腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食率を推定する際には、腐食ひび割れ幅分布から予測された1つの鉄筋腐食率分布にモデル誤差を加えることで、生じ得る鉄筋腐食率分布群を多数作成する。
- (2) 鉄筋腐食率から耐荷力を推定する際には、(1)の鉄筋腐食率分布群からMCSにより算出された多数の耐荷力に対し、Non-FEAのモデル誤差を乗じることで、耐荷力を確率密度分布として評価する。

このように確率論的に耐荷力評価を行うことで、不確定性を取り込みながら、定量的に構造物の状態を評価することができる。

## 2.4 機械学習

### 2.4.1 ANN

人工ニューラルネットワーク (Artificial Neural Network: ANN) は、目的変数と説明変数の非線形な関係を捉えることができ、幅広い分野で活用されている。ANN は、重みを持ったネットワークを介して相互に作用するユニットやノードの集合であり、入力層、1つ以上の隠れ層、出力層で構成される。ニューラルネットワークは学習データから関係性を学習し、状況の変化に適応する能力を持っている。ANN は、誤差逆伝播法 (Back Propagation) と呼ばれるアルゴリズムを用いて実装される。このアルゴリズムはフォワードパスとバックワードパスから構成される。フォワードパスでは、与えられた入力層データと重みから出力層データの計算を行う。バックワードパスでは、出力に関してネットワークのエラーを計算し、エラーの値はネットワークの重みを変更するために使用される<sup>2-27), 2-28)</sup>。

### 2.4.2 RNN

ANN を応用することにより画像認識、音声認識、機械翻訳など幅広い問題に適用可能となる。応用モデルの1つに、再帰的ニューラルネットワーク (Recurrent Neural Network: RNN) と呼ばれるニューラルネットワークモデルがある。RNN は、動画や音声、テキストなどの

系列データの意味理解のために用いられる。RNN は連続した要素を入力層に入れることができる。これは、RNN は過去の出力が次のステップの隠れ層への入力となるため、入出力データの相関関係を学習するだけでなく、その履歴を学習することができるためである<sup>2-29)</sup>。

また、RNN において長期にわたる記憶を実現できるようにするための手法として、RNN の中間層のニューロンが LSTM (Long Short-Term Memory) ブロックで構成される、LSTM と呼ばれるモデルがある。LSTM ブロックは 1 つの入力に対して 1 つの出力をする通常のニューラルネットワークのニューロンと異なり、4 つの入力に対して 1 つの出力となる。追加された 3 つの入力値は入力ゲート、出力ゲート、忘却ゲートに入力され、入出力および記憶のコントロールに使用される。メモリセルの値が 1 時刻を隔ててメモリセル自身に帰還することで履歴を学習する<sup>2-30)</sup>。

### 2.4.3 CNN

CNN (Convolutional Neural Network)<sup>2-31)</sup>は、画像認識分野に広く用いられる機械学習モデルである。画像の局所的な特徴を抽出する畳み込み層と、畳み込み層で得られた局所ごとの特徴をまとめるプーリング層を有する構造が特徴である。一般には、画像の入力に対して、畳み込み層とプーリング層を繰り返したのち、全結合層を経て画像の分類結果が出力される<sup>2-32), 2-33)</sup>。また近年では、画像の分類だけでなく物体検出にも応用されており、構造工学分野では構造物のひび割れ検出等に用いられている<sup>2-33)</sup>。

### 2.4.4 GAN

敵対的生成ネットワーク (Generative Adversarial Network: GAN)<sup>2-34)</sup>は、訓練データを学習し、与えたデータと似たような新しいデータを生成する生成モデルと呼ばれるネットワークで、画像の生成に多く用いられている。生成器 (Generator) と識別器 (Discriminator) の 2 つのネットワークで構成され、Generator はランダムなノイズを入力として正解データと見分けのつきづらい生成データを作成するように学習をする一方で、Discriminator は生成データと正解データを正しく識別するように学習をする。このように、Generator と Discriminator が敵対的に学習をすることで精度の良い画像を生成する手法である<sup>2-34)</sup>。

GAN を拡張させたネットワークに、条件付き敵対的生成ネットワーク (conditional GAN: cGAN) と呼ばれるモデルがある。通常、GAN はランダム値から画像データを生成する。しかし、cGAN では入力にランダム値だけではなく条件ラベルを付加させている。したがって、条件に応じた画像のみを生成することができる<sup>2-35)</sup>。

#### 2.4.5 構造工学分野における機械学習の利用

機械学習は、複雑で不確定性の大きな問題に対処することができるため、多分野でその重要性が高まっており、構造工学分野においても活用が進んでいる。本研究では、腐食ひび割れ幅分布と鉄筋腐食率分布の関係を機械学習モデルに学習させ、高精度な腐食率予測モデルの構築を試みることにした。以下に、構造工学分野における機械学習活用の例を示す。

鈴木ら<sup>2-30)</sup>は、主に音声やテキストなどの系列データの意味理解に用いられる RNN を用いて、材料構成則のモデリングを行った。入力層には 1 質点系モデルが地震動を受けた場合の変位波形、出力層には同様の場合の力の時刻歴波形を設定し、バイリニアモデルの同定を行った。

奥田ら<sup>2-36)</sup>は、舗装の点検時系列データを用いて、RNN によって舗装劣化予測を行った。その際、時刻方向にデータを分割することによって、つまり学習データと試験データを時系列方向に分離することによって、実運用に近い形で精度を評価するタイムスライスクロスバリデーション手法を提案した。

野村ら<sup>2-37)</sup>は、畳み込みニューラルネットワークによる GAN の一種である DCGAN (Deep convolutional GAN) を利用して、コンクリート構造物のひび割れ検出に用いる教師データを生成し、検出精度の向上を確認した。また、画像や動画に対して高速に物体検出を行うことができる YOLO と呼ばれるアルゴリズムを用いることで、構造物の表面損傷個所の検出を実時間で行えるようになる可能性を示した。

光谷ら<sup>2-38)</sup>は、レーダ画像から GAN を利用してコンクリート内部の欠陥の位置・角度情報を推定・可視化した。実験により欠陥の位置・寸法・角度をパラメータとしたレーダ画像を取得し、GAN の一種である pix2pix を用いることでレーダ画像から欠陥を含む断面画像の推定・可視化を可能とした。

Zhang et al.<sup>2-26)</sup>は、1 本の軸方向鉄筋を有する RC 部材に対し、腐食ひび割れ幅から機械学習を用いて鉄筋腐食率を予測し、MCS を用いて耐荷力の確率密度分布を取得する確率論的構造性能評価フローを提案した。腐食ひび割れ幅を用いた鉄筋腐食率の予測にあたっては、実験データに基づき、Non-FEA と確率場を用いて解析的にデータベースを作成した。機械学習モデルについては、ANN と LSTM を比較し、LSTM を用いると鉄筋腐食率分布が精度よく予測できることを示した。

中村ら<sup>2-5)</sup>は、3 本の軸方向鉄筋を有する RC 部材に対し、腐食ひび割れ幅から pix2pix を用いて鉄筋腐食率を予測し、MCS を用いて耐荷力の確率密度分布を取得する確率論的構造性能評価フローを提案した。3 本の鉄筋を有する RC 部材の鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の

関係には、構造諸元（細目）が影響することを実験的に示した上で、腐食ひび割れ幅分布と構造諸元（細目）から鉄筋腐食率分布を予測する pix2pix モデルを提案した。この pix2pix モデルでは、画像のカラーチャンネル（R, G, B）にそれぞれ腐食ひび割れ幅、鉄筋間隔、スターループ間隔を入力することで、構造諸元（細目）の影響を考慮している。

## 2.5 インフラ点検の現状

RC 構造物において、目視点検によってひび割れの性状や進展度合いを把握し、修繕・補修をすることは、長寿命化にとって極めて重要である。また、老朽化したインフラ構造物の数は年々増加している一方で、少子高齢化による技術者不足や財源不足のため、効率よく維持管理することが求められている。そこで、目視に置き換わる方法として、遠隔からデジタルカメラで撮影した画像を用いてコンクリート表面の劣化状況を判断する方法の研究やドローンによる撮影画像を用いたコンクリートのひび割れ点検手法の開発が行われている。

堀口ら<sup>2-39)</sup>は、人が容易に立ち入れない場所での点検を見据えて、ドローンを活用し、高精細な画像が撮影できる撮影機材の開発を進めてきた。三脚に固定したカメラで撮影した画像と同程度の画質を取得できることを目的とし、高精度カメラの搭載だけでなく、LED 照明や超音波測距器を搭載し、被写体と一定間隔を保ち、焦点のあった明るい画像の撮影を可能にした。ここでは、撮影画像の空間分解能 0.6mm/画素程度に対して、幅 0.15mm 以上のひび割れが検出できている。

木本ら<sup>2-40)</sup>は、画像を用いた効率的な点検を見据え、コンクリート表面のひび割れ幅をカメラで画素分解能を変化させつつ確認し、性能の異なるカメラ及び画素分解能と視認可能な最小ひび割れ幅の関係性について検証した。画像を用いたコンクリート構造物の点検では、抽出すべきひび割れ幅の約 3~5 倍の画素分解能を持つ画像の撮影が必要であることを示した。

藤田ら<sup>2-41)</sup>は、ひび割れ抽出の自動化を目的として、様々な条件下で撮影された、影や汚れがあるコンクリート表面のひび割れ幅画像に対して、ひび割れを抽出する画像処理方法を提案した。メディアンフィルタを用いた差分処理とヘッセ行列を用いた多重スケール線強調処理を行ったうえで、確率的弛緩法によりひび割れ領域を抽出し、局所的な閾値処理を段階的に施すことによって、画素ごとに閾値を最適化し、ノイズの発生を防止した。

里村ら<sup>2-42)</sup>は、UAV（無人航空機のこと、一般的にはドローンと呼ばれる）や AI 等の技術を活用することで点検診断を効率化・高度化することを目的として、UAV 点検診断システムを開発している。その中で、浮棧橋の画像から錆汁、鉄筋露出、その他の錆をアノテー

ション（画像のタグ付け）し、深層学習による画像処理手法の一つである、物体検出が可能な YOLOX-L を用いて、変状の検出を可能にした。

## 2.6 本研究の位置づけ

- (1) 観測情報である腐食ひび割れ幅分布から塩害劣化 RC 部材の構造性能評価まで、一連の手法を提案する。腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食率を予測する研究や、鉄筋腐食率から構造性能を評価する研究は多いが、それらを繋ぐ研究は少ない。腐食ひび割れ幅分布情報から構造性能を推定する手法を確立することで、実際の構造物の点検結果に基づいて、補修・補強の可否を判断することが可能になると考える。
- (2) 中村ら<sup>2-5)</sup>と本研究においては、複数本の鉄筋を有し、構造諸元の異なる RC 部材に対して機械学習 (pix2pix) を用いた腐食率予測モデルを提案する。機械学習は構造工学分野でも活用が進められているものの、RC 部材の腐食に適用した研究は少ない。また、腐食率予測においても、複数本の鉄筋を有する RC 部材に対するアプローチを提案した研究は少ない。
- (3) Zhang et al.<sup>2-26)</sup>および中村ら<sup>2-5)</sup>の先行研究で示された耐荷力推定手法を基に、ドローンによる腐食ひび割れ画像の撮影とデジタル画像処理による腐食ひび割れ幅分布の取得を加え、点検を見据えた実用的なフローに拡張する。また、曲げ載荷実験を行った結果に基づき、耐荷力推定に必要な腐食ひび割れ幅の測定精度を検証する。
- (4) 鉄筋腐食率を予測する機械学習モデル (pix2pix) を、異なる構造諸元（細目）を持つ疑似腐食 RC 供試体から構築することで、1つのモデルで様々な構造諸元をもつ RC はりに対する鉄筋腐食率分布の予測を可能にした。
- (5) RC はりの電食試験結果から、腐食実験条件が鉄筋腐食率と腐食生成物厚さの関係に及ぼす影響を調査し、腐食生成物厚さをモデル化する。これを、Non-FE モデルに反映させることで、腐食生成物の流れ出しの影響を考慮した腐食ひび割れ幅を再現する。
- (6) 腐食生成物のモデル化の際には、X 線画像とデジタル画像処理により、RC 部材内部の腐食生成物を可視化し、ピクセル単位で測定可能にした。

## 参考文献

- 2-1) 大即信明, 片脇清士, 友沢史紀, 宮川豊章, 樫野紀元, 小林明夫, 梶田佳寛: 「塩害<2>(コンクリート構造物の耐久性シリーズ)」, 技法堂出版, 1991.
- 2-2) 大即信明, 片脇清士, 宮川豊章, 樫野紀元, 小林明夫: 「塩害<1>(コンクリート構造物の耐久性シリーズ)」, 技法堂出版, 1986.
- 2-3) Lim S., Akiyama M., Frangopol, D.M. and Jiang H.: Experimental investigation of the spatial variability of the steel weight loss and corrosion cracking of reinforced concrete members: novel X-ray and digital image processing techniques, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.13, pp.118-134, 2017.
- 2-4) Zhang, M., Song, H., Lim, S., Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Reliability estimation of corroded RC structures based on spatial variability using experimental evidence, probabilistic analysis and finite element method, *Engineering Structures*, Vol.192, pp.30-52, 2019.
- 2-5) 中村智, 山田大樹, 新谷美菜, Supasit Srivaranun, 秋山充良: 機械学習用データベースの拡充および腐食ひび割れ情報を用いた劣化 RC 部材の耐荷力推定, AI・データサイエンス論文集, 第3巻, J2号, pp.117-127, 2022.
- 2-6) Lim, S., Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling, *Engineering Structures*, Vol.127, pp.189-205, 2016.
- 2-7) Zhang, M., Nishiya, N., Akiyama, M., Lim, S. and Masuda, K.: Effect of the correlation of steel corrosion in the transverse direction between tensile rebars on the structural performance of RC beams, *Construction and Building Materials*, Vol.264, pp.1-8, 2020.
- 2-8) Khan, I., Francois, R. and Castel A.: Prediction of reinforcement corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams, *Cement and Concrete Research*, Vol.56, pp.84-96, 2014.

- 2-9) Rodriguez, J., Ortega, L.M., Casal, J. and Diez, J.M.: Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures, *Durab. Build. Master. Compon.* 7(1), pp.117-126, 1996.
- 2-10) Vidal, T., Castel, A. and François, R.: Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.165-74, 2004.
- 2-11) Zhang, R., Castel, A. and François, R.: Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process, *Cement and Concrete Research*, Vol.40, pp.415-425, 2010.
- 2-12) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 71，2006.
- 2-13) 加藤絵万，濱田洋志，岩波光保，横田弘：局所的に生じた鉄筋腐食が RC はりの構造性能に及ぼす影響，港湾空港技術研究所報告，第 47 巻第 1 号，p59-82，2008.
- 2-14) 村上祐貴，木下哲秀，鈴木修一，福本幸成，大下英吉：鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究，コンクリート工学論文集，第 17 巻第 1 号，p61-74，2006.
- 2-15) 村松真伍，小林豊，下村匠：鉄筋腐食の空間的不均一性が鉄筋コンクリート部材の耐荷性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, p1345-1350, 2009.
- 2-16) 村上祐貴，董衛，大下英吉，鈴木修一，堤知明：鉄筋腐食により定着不良を生じた RC はり部材の耐荷性状評価，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.67, No.4, p605-624, 2011.
- 2-17) 橘吉宏，梶川康男，川村満紀：鉄筋腐食によって損傷を受けた RC はりの挙動に関する考察，土木学会論文集，第 402 号，Vol.10, pp.105-114, 1989.
- 2-18) 李翰承，野口貴文，友澤史紀：引張主筋の腐食した RC 梁の有限要素法による耐力

- 性能評価に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.506, pp.43-50, 1998.
- 2-19) 高橋良輔：破壊の局所化を伴う腐食 RC はりの曲げ挙動 FEM 解析, 土木学会第 66 回年次学術講演会, V-169, pp.337-338, 2011.
- 2-20) 松下綾太, 高橋良輔, 斉藤成彦：鉄筋腐食した RC はりの曲げ変形性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1483-1488, 2010.
- 2-21) 斉藤成彦, 高橋良輔, 檜貝勇：鉄筋の腐食分布が RC はり部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.4, pp.601-611, 2008.
- 2-22) Bazant, Z.P. and Planas, J.: Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials, *CRC Press*, pp.489-526, 1998.
- 2-23) 田中泰司, 山口貴幸, 下村匠：塩害劣化により鉄筋腐食が進行した RC 橋桁の耐荷試験と数値解析, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, pp.466-482, 2010.
- 2-24) 武田健太, 田中泰司, 下村匠, 山口貴幸, 陸賢, 井林康, 村上祐貴：塩害劣化したプレテンション式 PC 桁の載荷試験と解析による耐力評価手法の検討, 土木学会論文集 E2, Vol.71, No.4, pp.303-322, 2015.
- 2-25) Coronelli, D. and Gambarova, P.: Structural Assessment of Corroded Reinforced Concrete Beams : Modeling Guidelines, *Journal of Structural Engineering*, Vol.130, No.8, pp.1214-1224, 2004.
- 2-26) Zhang, M., Akiyama, M., Shintani, M., Xin, J. and Frangopol, D.M.: Probabilistic estimation of flexural loading capacity of existing RC structures based on observational corrosion-induced crack width distribution using machine learning, *Structural Safety*, Vol.91, No.102098, 2021.
- 2-27) Oreta, A. and Kawashima, K.: Neural network modeling of confined compressive strength and strain of circular concrete columns, *Journal of Structural Engineering*, Vol.129, pp.554-

561, 2003.

- 2-28) Inel, M.: Modeling ultimate deformation capacity of RC columns using artificial neural networks, *Engineering Structures*, Vol.29, pp.329-335, 2007.
- 2-29) 林泰弘, 岩本伸一: 長期電力需要想定への改良型リカレントニューラルネットワークの適用, *電気学会論文誌 B*, Vol.113, No.11, pp.1203-1212, 1993.
- 2-30) 鈴木琢也, 松岡康友, 竹中工務店: リカレントニューラルネットワークによる材料構成則モデリングの試み, *人工知能学会*, pp.4-7, 2017.
- 2-31) LeCun, Y., Boser, B., Denker, J.S., Henderson, D., Howard, R.E., Hubbard, W. and Jackel, L.D.: Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition, Vol.1, No.4, pp.541-551, 1989.
- 2-32) 中山英樹: 深層畳み込みニューラルネットワークによる画像特徴抽出と転移学習, *信学技報*, Vol.115, No.146, pp.55-59, 2015.
- 2-33) 全邦釘, 井後敦史, 南免羅雄治, 黒木航汰, 大窪和明: 車載カメラにより撮影された舗装画像からのディープラーニングによるひび割れ率評価, *土木学会論文集 E1 (舗装工学)*, Vol.73, No.3 (舗装工学論文集第 22 巻), I\_97\_105, 2017.
- 2-34) Ian, J., Jean, P., Mehdi, M., Bing, X., David, W., Sherjil, O., Aaron, C. and Yoshua, B.: Generative Adversarial Nets, arXiv:1406.2661v1, pp.1-9, 2014.
- 2-35) Mirza, M. and Osindero, S.: Conditional Generative Adversarial Nets, arXiv:1411.1784v1, pp.1-7, 2014.
- 2-36) 奥田知之, 鈴木康豊, 神武直彦: 将来予測精度を考慮した舗装劣化予測モデルの精度評価手法の提案と検証, *土木学会論文集 E1(舗装工学)*, Vol.73, No.3, 2017.
- 2-37) 野村泰稔, 重村知輝: 深層学習に基づく物体検出と生成モデルを用いた構造表面損

傷の実時間検出技術の開発, 材料, Vol68, No.3, pp.250-257, 2019.

- 2-38) 光谷和剛, 山本佳士, 園田潤, 木本智幸: レーダ画像およびGANを用いたコンクリート内部欠陥の幾何学情報推定, AI・データサイエンス論文集, 第1巻, J1号, pp.117-121, 2020.
- 2-39) 堀口賢一, 本澤昌美, 岡部成行, 富山潤: ドローンによる撮影画像を用いたコンクリートのひび割れ点検, コンクリート工学, 第57巻, 9号, pp.687-692, 2019.
- 2-40) 木本啓介, 松田浩: デジタル画像の画素分解能とコンクリートの視認可能なひび割れ幅に関する検証, 土木構造・材料論文集, 第35号, 2019.
- 2-41) 藤田悠介, 中村秀明, 浜本義彦: 画像処理によるコンクリート構造物の高精度なひび割れ自動検出, 土木学会論文集F, Vo.66, No.3, pp.459-470, 2010.
- 2-42) 里村大樹: AIによる海面等の推定と錆汁・鉄筋露出の検出—港湾の施設の点検診断効率化を目指して—, AI・データサイエンス論文集, 第3巻, J2号, pp.360-371, 2022.

### 3. ドローンにより撮影した腐食ひび割れ幅分布情報と機械学習モデルを用いた塩害劣化 RC 部材の確率論的耐荷力推定フロー

#### 3.1 概説

本章では、図 3-1 に示すドローンにより撮影した腐食ひび割れ幅分布情報と機械学習モデルを用いた塩害劣化 RC 部材の確率論的耐荷力評価フローを提案する。提案フローは、ドローンにより撮影された画像から取得される腐食ひび割れ幅分布情報と電食実験の結果に基づいて構築された機械学習モデルから RC 部材の耐荷力を推定することを目的としている。3.2 では、フローの全体像、3.3 では図 3-1 のIIにあたるドローンを用いた腐食ひび割れ幅分布情報の取得について、3.4 では図 3-1 のIIにあたる腐食実験について、3.5 では図 3-1 のIIIにあたる機械学習用データベースの作成について、3.6 では図 3-1 のIVにあたる機械学習 (pix2pix) モデルの構築について、3.7 では図 3-1 のVにあたる劣化 RC 部材の確率論的耐荷力評価について概説する。なお本研究では、RC 部材の降伏荷重を耐荷力とする。また本研究では、鉄筋が腐食した割合を鉄筋腐食率と表現し、実験で得られる鉄筋腐食率はデジタルノギスで測定したある位置での鉄筋の断面積の減少率、すなわち鉄筋断面損失率を指すものとする。

#### 3.2 劣化 RC 部材の確率論的耐荷力推定フロー

本節では、フローの概要について述べる。図 3-1 に示したフローの大きな流れは、I:ドローンを用いた腐食ひび割れ幅分布情報の取得、II:腐食実験、III:機械学習用データベースの作成、IV:機械学習 (pix2pix)、V:劣化 RC 部材の確率論的耐荷力評価となっている。このフローに従うことにより、腐食ひび割れ幅分布情報から劣化 RC 部材の残存耐荷力を推定することが可能となる。

腐食ひび割れ幅分布情報から残存耐荷力を評価するにあたり、まず、RC 部材底面に生じた腐食ひび割れ幅分布を取得する必要がある。本研究では、ドローンを用いて腐食ひび割れ幅を撮影し、デジタル画像処理により腐食ひび割れ幅分布情報を取得する。そして、2次元の連続性を考慮することができる機械学習モデルの pix2pix を用いて、腐食ひび割れ幅分布から鉄筋腐食率分布を予測する。機械学習モデルの構築にあたっては、多数の腐食ひび割れ幅分布と鉄筋腐食率分布のデータセット (データベース) が必要となる。しかし、予算的・時間的制約上、腐食実験の供試体を増やすことは困難である。そこで提案フローでは、限られた実験データに基づき、部材軸方向と軸直角方向の 2 次元に相関性を持つ鉄筋腐食率分布を確率場として表現可能な Spectral Representation Method (SRM)を用いることで、様々

な鉄筋腐食率分布を持つ疑似腐食供試体を多数作成し、それに対応する Non-FEA により腐食ひび割れ幅分布を得ることで、データベースを作成している。ここで、腐食ひび割れ幅分布を計算する Non-FEA において、膨張圧の要因となる腐食生成物厚さを強制変位として入力している。この腐食生成物厚さは、鉄筋腐食率と腐食生成物厚さの関係を実験に基づいてモデル化することで、鉄筋腐食率から計算することができる。つまり、本研究において機械学習モデルを構築する際には、腐食生成物厚さ分布と腐食ひび割れ幅分布の関係を学習することとなる。腐食実験では、構造諸元（鉄筋径、鉄筋間隔）や電流密度の異なる供試体を作成し、それらの影響を調査した上で、実験結果を SRM で用いられるパラメータの推定や Non-FE モデルの検証に用いた。実験データに基づいて確立した解析モデルを用いることで、実際の現象を再現するデータベースの作成を可能にした。そして、機械学習用データベースを用いて pix2pix を構築する。pix2pix は、任意の画像ペアの変換を学習する機械学習モデルである。本研究では、入力画像を画像の色を表す R, G, B (赤, 緑, 青) の 3 チャンネルに腐食ひび割れ幅分布、鉄筋径、鉄筋間隔をそれぞれ与え、構造諸元（細目）を考慮した腐食生成物厚さ分布の予測が可能なモデルとした。最後に、構築された pix2pix とドローンにより撮影された腐食ひび割れ幅分布情報を用いて腐食生成物厚さ分布を予測し、腐食生成物厚さモデルの逆関数によって鉄筋腐食率分布が求まる。そして、予測された鉄筋腐食率を用いて Non-FEA によって耐荷力を推定した。その際、MCS を用いて鉄筋腐食率分布の予測に伴う pix2pix のモデル誤差と降伏荷重の計算に伴う Non-FEA のモデル誤差を考慮することで、耐荷力を確率密度分布の形で確率論的に推定した。

### 3.3 ドローンを用いた腐食ひび割れ幅分布情報の取得

劣化 RC 構造物の点検を見据え、ドローンを用いて耐荷力推定の際に入力となる腐食ひび割れ幅分布情報を取得する。

RC 構造物の点検現場を再現するために、電食実験により腐食劣化した大型の RC 供試体をクレーンで吊り上げ、供試体底面に生じた腐食ひび割れ幅をドローンによって撮影した (I-1)。そして、画像の鮮鋭化や二値化といったデジタル画像処理によって、腐食ひび割れ幅を測定する。このとき、画像の色を表す RGB 値を基準として腐食ひび割れを判定することで、半自動的に腐食ひび割れ幅分布を取得する (I-2)。また、ドローンによって取得された腐食ひび割れ幅分布の測定精度を検証するために、供試体底面を横に向け、デジタルカメラにより近接で撮影して得られた腐食ひび割れ幅分布と比較を行う。

### 3.4 腐食実験

3本の軸方向鉄筋を有する小型のRCはりを用いて電食実験を行い、データベースを作成する基となる鉄筋腐食率分布と腐食ひび割れ幅分布を取得する。なお、この小型RCはりとはドローンを用いて腐食ひび割れ幅を取得する大型RCはりとは異なる。

電食試験では、軸方向鉄筋の間隔、鉄筋径、電流密度、目標腐食率の異なる供試体を作成することで、構造諸元（細目）が腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率に与える影響を調査する（II-1）。電食試験後、デジタルノギスを用いて、供試体からはつり出した各軸方向鉄筋の鉄筋断面損失率を測定する（II-2）。また、供試体底面の各鉄筋下に生じた腐食ひび割れ幅をデジタル画像処理により測定する（II-3）。

### 3.5 機械学習用データベースの作成

腐食実験で得られた小型RCはりの実験結果に基づき、実験と同様の性質を持つように機械学習用データベースを作成する。はじめに、鉄筋腐食率分布の空間変動性を再現するために、SRMを用いて疑似的に鉄筋腐食率分布を発生させる。そして、鉄筋腐食率分布から腐食生成物モデルを用いて、腐食生成物厚さ分布を算出する。最後に、3次元Non-FEモデルを用いて腐食ひび割れ幅分布が得られる。以下に、データベースの作成に必要な各手順の概要を示す。

#### 3.5.1 疑似腐食供試体の作成に必要な確率場パラメータの同定

##### 3.5.1.1 RCはりの電食実験

鉄筋腐食率は空間的に大きく変動し、その変動は部材軸方向および軸直角方向に相関性を有している。データベースの作成にあたり、このような鉄筋腐食率分布の空間変動性を確率場として表現する。そこで、3.4における電食実験から得られた鉄筋腐食率分布を用いて、鉄筋腐食率分布の空間変動性の再現に必要な平均・標準偏差・相関性を表すパラメータを同定する（III-1）。

##### 3.5.1.2 2次元確率場・Spectral Representation Method (SRM)の概要

Spectral Representation Method (SRM) は、ガウス分布および非ガウス分布の確率場、また一変量 (univariate:UV)、多変量 (multivariate: MV) および多次元の確率場の発生に用いることができる汎用性の高い手法である<sup>3-1), 3-2), 3-3), 3-4), 3-5)</sup>。鉄筋腐食率分布は軸方向と軸直角方向の両方に相関性を有するが、軸方向鉄筋が連続して存在する軸方向の相関と鉄筋同士がコンクリートを隔てて存在する軸直角方向の相関は性質が異なると考えられる。本研究

では、そのような相関における異なる性質を同時に扱うことができる SRM が 2 次元鉄筋腐食率分布の発生に有用であると考え、Srivaranun et al.<sup>3-6)</sup>を参考に、多変量確率場を発生させる SRM を用いて、疑似鉄筋腐食率分布を発生させることとした。

SRM では、まず、空間的相関性をモデル化するクロススペクトル密度マトリクス (cross-spectral density matrix : CSDM) を作成する。ガウス分布のクロススペクトル密度マトリクス  $S(\kappa)$  は、以下の式で表せる<sup>3-4)</sup>。

$$S(\kappa) = \begin{bmatrix} S_{11}(\kappa) & S_{12}(\kappa) & \cdots & S_{1m}(\kappa) \\ S_{21}(\kappa) & S_{22}(\kappa) & \cdots & S_{2m}(\kappa) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1}(\kappa) & S_{m2}(\kappa) & \cdots & S_{mm}(\kappa) \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

ここで、 $m$  は最終的に得られる確率場の成分の個数、すなわち、本章では RC はり内の鉄筋の本数を表す。 $\kappa$  は波数、 $S_{ij}(\kappa)$  は以下に示すクロススペクトル密度関数 (cross-SDF) を表す<sup>3-5)</sup>。

$$S_{ij} = \gamma_{ij}(\kappa) \sqrt{S_{ii}(\kappa) S_{jj}(\kappa)} \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (3-2)$$

ここで、 $S_{ii}(\kappa), S_{jj}(\kappa)$  はオートスペクトル密度関数 (auto-SDF)、 $\gamma_{ij}(\kappa)$  はコヒーレンス関数を表す。これらの関数は、 $i$  番目と  $j$  番目の各鉄筋における軸方向の相関、 $i$  番目と  $j$  番目の鉄筋間における軸直角方向の相関をそれぞれ表しており、実験結果に基づいて推定された。この詳細は 5.2.2 に示す。

また、 $\kappa$  については以下の式が成り立つ。

$$\Delta\kappa = \frac{\kappa_u}{N} \quad (3-3)$$

$$\kappa = n\Delta\kappa \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3-4)$$

ここで、 $\kappa_u$  は高域遮断周波数 (upper cutoff frequency)、 $N$  は波数領域における分割数であり、 $N$  は以下の式を満たすように設定される。

$$M \geq 2N \quad (3-5)$$

ここで、 $M$  は生成される鉄筋腐食率分布における分割数を表す。

式(3-1)で示されたガウス分布のクロススペクトル密度マトリクス  $S(\kappa)$  を用いて、2次元の相関性を有する標準正規乱数行列  $Y$  を発生させる。計算手順の詳細は参考文献<sup>3-5)</sup>に示されている。

最後に、Srivaranun et al.の研究<sup>3-6)</sup>では、鉄筋腐食率分布は対数正規分布に従うとした。その場合、 $a$  行  $b$  列の疑似鉄筋腐食率分布  $X$  の各要素  $X(a,b)$  は以下の式で表せる。

$$X(a,b) = \exp(m' + v'Y(a,b)) \quad (3-6)$$

ここで、 $m'$ 、 $v'$ は対数正規分布のパラメータを示し、生成される鉄筋腐食率分布の平均  $MRw$  と標準偏差  $\sigma_{Rw}$  を用いて以下の式で求められる。

$$v' = \sqrt{\ln\left(1 + \left(\frac{\sigma_{Rw}}{MRw}\right)^2\right)} \quad (3-7)$$

$$m' = \ln(MRw) - 0.5v'^2 \quad (3-8)$$

### 3.5.1.3 SRM を用いた疑似腐食供試体の作成

3.5.1.1 の電食実験で得られた軸方向および軸直角方向の相関性を表すパラメータと 3.5.1.2 の SRM を用いて、疑似鉄筋腐食率を持つ疑似腐食供試体を多数作成する (III-2)。これより、実験で得られた鉄筋腐食率分布の空間変動性を考慮した鉄筋腐食率分布のシミュレーションが可能となる。

### 3.5.2 腐食生成物厚さのモデル化

腐食ひび割れが生じる原因となる鉄筋腐食に伴う膨張圧を、腐食生成物厚さを用いてモデル化する。まず、X 線撮影とデジタル画像処理を用いることで腐食生成物を可視化した。そして、鉄筋腐食率と腐食生成物厚さの関係を調査した上で、腐食実験手法や電流密度の違いを考慮した腐食生成物厚さとその形状をモデル化した。腐食生成物厚さ・形状のモデル化の詳細は 5.3 に示される。

### 3.5.3 劣化 RC 部材の 3 次元非線形有限要素モデル

腐食劣化 RC はりの腐食ひび割れ幅分布を算出する 3 次元 Non-FE モデルを作成する。3.5.2 で鉄筋腐食率分布から計算された腐食生成物厚さを強制変位として Non-FE モデル内の鉄筋周りのコンクリート要素に与えることで、腐食による腐食ひび割れ性状を再現する。実験で得られた鉄筋腐食率分布から Non-FE モデルを用いて算出した腐食ひび割れ幅の再現解析結果を実験結果と比較することにより、Non-FE モデルの精度検証を行う (III-3)。Non-FE モデルの詳細は、5.4 に示される。

### 3.5.4 データベースの作成

3.5.1.3 の SRM で発生させた疑似鉄筋腐食率分布から 3.5.2 の腐食生成物厚さモデルを用いて算出された疑似腐食生成物厚さ分布と、3.5.3 で決定された Non-FE モデルを用いて

疑似腐食ひび割れ幅分布を取得する。多数作成された疑似腐食生成物厚さ分布とそれに対応する疑似腐食ひび割れ幅分布がデータベースとなる (III-4)。

### 3.6 機械学習 (pix2pix)

機械学習用データベースを用いて、腐食ひび割れ幅分布と構造諸元（鉄筋径，鉄筋間隔）から腐食生成物厚さ分布を予測する pix2pix モデルを構築する。pix2pix モデルに学習させるため、データベースの数値情報を画像に変換する。入力情報である腐食ひび割れ幅分布，鉄筋径，鉄筋間隔はそれぞれカラー画像を構成する R，G，B（赤，緑，青）の3つのチャンネルに与え、供試体につき1枚のカラー画像に変換した。出力情報である腐食生成物厚さ分布はグレースケール画像に変換した。どちらの画像も縦横 64 pixel で 8bit の画像とした (IV-1)。

画像変換で得られた画像を用いて、pix2pix モデルの構築を行う。データベースを学習用データと検証用データに分け、検証用データを用いて平均平方二乗誤差 (RMSE) を算出することで、モデルの学習精度を評価する。また、実験結果を用いて、鉄筋腐食率分布の実験値と pix2pix による予測値を比較することで、機械学習モデルの予測精度を検証する (IV-2)。

### 3.7 劣化 RC 部材の確率論的耐荷力評価

機械学習 (pix2pix) モデルと信頼性理論を用いて、大型 RC はりの観測情報として得られた腐食ひび割れ幅分布から耐荷力評価を行う。構築された pix2pix モデルを用いて、腐食ひび割れ幅分布と構造諸元（細目）から腐食生成物分布を予測する。さらに、3.5.2 でモデル化した腐食生成物厚さモデルの逆関数により鉄筋腐食率分布を計算する (V-1)。

予測された鉄筋腐食率分布に検証用データに対する pix2pix のモデル誤差および実験結果に対する pix2pix のモデル誤差を考慮することで、与えられた腐食ひび割れ幅分布から生じる可能性のある鉄筋腐食率分布群を作成する。鉄筋腐食率分布群から Non-FEA を用いて耐荷力を算出する MCS を行い、耐荷力の確率密度分布を得る。次に、Non-FEA のモデル誤差を考慮して、耐荷力の確率密度分布を更新する (V-2)。

## 参考文献

- 3-1) Yamazaki, F. and Shinozuka, M.: Digital Generation of Non-Gaussian Stochastic Fields., *Journal of Engineering Mechanics.*, 114, pp.1183–1197, 1998.
- 3-2) Popescu, R., Deodatis, G. and Prevost, J.H.: Simulation of homogeneous nonGaussian stochastic vector fields, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 13, pp.1–13, 1998.
- 3-3) Deodatis, G.: Simulation of ergodic multivariate stochastic processes, *Journal of Engineering Mechanics*, 122, pp.778–787, 1996.
- 3-4) Bocchini, P.: Probabilistic approaches in civil engineering: generation of random fields and structural identification with genetic algorithms., alma, 2008.
- 3-5) Christou, V. and Bocchini, P.: An Efficient Methodology That Simulates a Multi-Dimensional Non-Gaussian Field to Evaluate the Effect of the Spatial Distribution of Corrosion in a Steel Structures Congress, VA: American Society of Civil Engineers, pp.1059–69, 2014.
- 3-6) Srivaranun, S., Akiyama, M., Bocchini, P., Christou, V., Frangopol, D.M., Fukushima, H. and Masuda, K.: Effect of the interaction of corrosion pits among multiple tensile rebars on the reliability of RC structures: Experimental and numerical investigation, *Structural Safety*, Vol.93, pp.1-18, 2021.

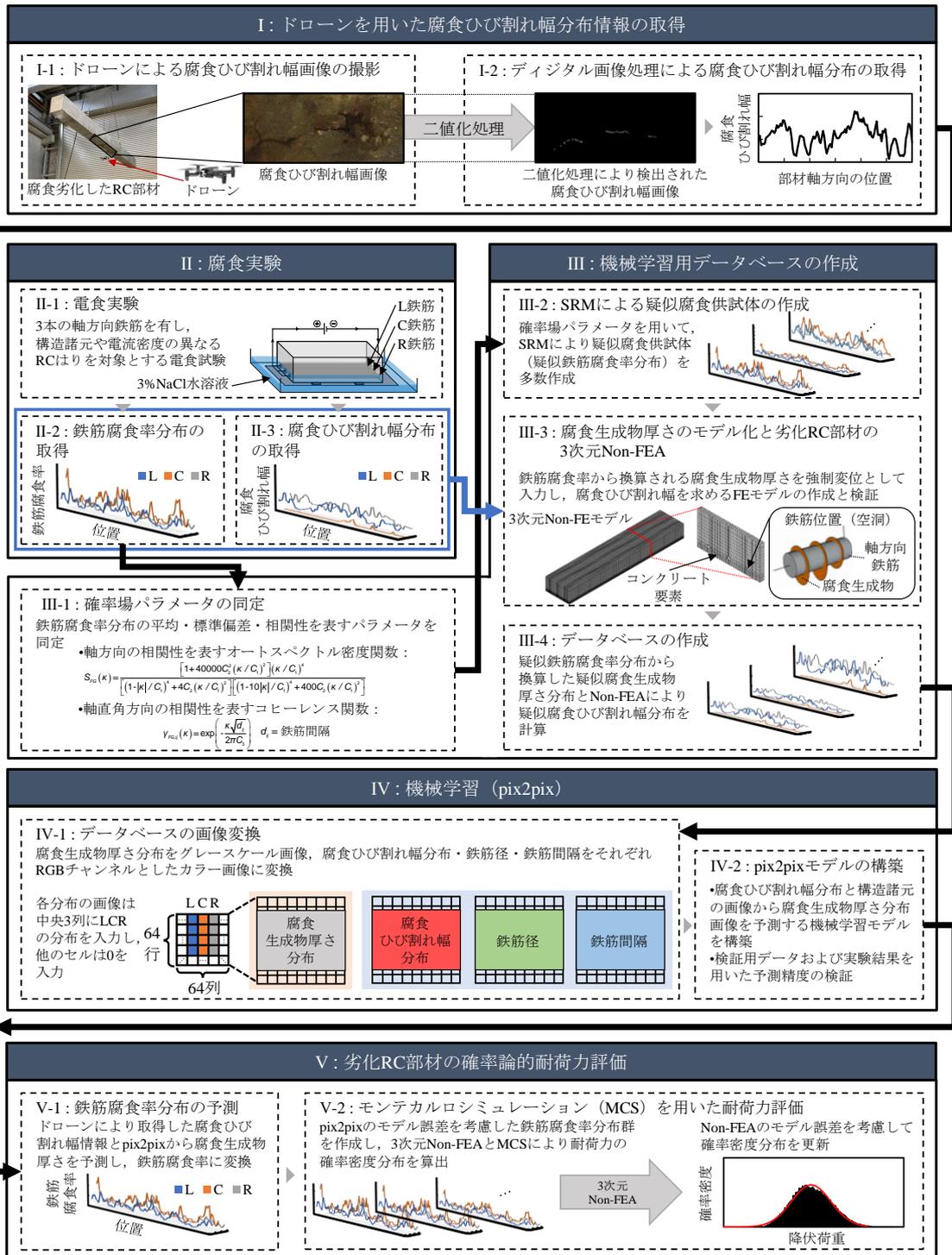


図 3-1 ドローンにより撮影した腐食ひび割れ幅分布情報と機械学習モデルを用いた塩害劣化 RC 部材の確率論的耐荷力推定フロー

## 4. RC はりの電食実験

### 4.1 概説

本章では、図 3-1 に示したフローのIにあたるドローンによる腐食ひび割れ幅の撮影と耐荷力推定の対象となる RC はり（以降、大型 RC はりと呼ぶ）の電食実験とフローのIIにあたる鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係を表すデータベースの作成に使用する RC はり（以降、小型 RC はりと呼ぶ）の電食実験を行う。

小型 RC はりの電食実験では、鉄筋腐食率分布から腐食ひび割れ幅分布を推定する Non-FEA の検証を行うために、鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係、および鉄筋間隔、電流密度や鉄筋径が両者に与える影響を調査する。これを調査することにより、実験結果に基づいた鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係を持つデータベースの作成を行うことが可能となる。

大型 RC はりの電食実験では、デジタルカメラを用いた近接撮影によって得られた腐食ひび割れ幅とドローン撮影によって得られた腐食ひび割れ幅を比較することにより、撮影方法の違いによるひび割れ幅の測定精度を調査する。また、腐食後に曲げ試験も合わせて行い、得られた降伏荷重の値を、ケーススタディにおいて、実験結果の腐食ひび割れ幅分布から、pix2pix, MCS, Non-FEA 等を用いて推定された降伏荷重の確率密度分布と比較し、確率論的耐荷力評価手法の有効性を検証する。そして、ドローン撮影によって取得した腐食ひび割れ幅分布と近接撮影によって取得した腐食ひび割れ幅から推定された降伏荷重を比較し、撮影方法の違いが耐荷力推定に及ぼす影響を調査する。

### 4.2 RC はりの電食実験用供試体

#### 4.2.1 データベースの作成に用いる RC はり

データベースの作成に用いる小型 RC はりの供試体の一覧を表 4-1 に、各供試体のパラメータの一覧が表 4-2 に示される。供試体名は、例えば A1-13-100-10 のように 4 つのパラメータの特徴から構成される名前とした。A と B は鉄筋間隔がそれぞれ 95mm と 57mm であることを、続く 1 と 2 はスターラップの間隔がそれぞれ 100mm と 50mm であることを示す。13 と 19 は軸方向鉄筋が D13 と D19 であること、100 と 500 は電流密度がそれぞれ  $100\mu\text{A}/\text{cm}^2$  と  $500\mu\text{A}/\text{cm}^2$  であること、末尾の 10 と 20 は目標腐食率がそれぞれ 10% と 20% であることを示している。なお、本研究では、目標腐食率のみ異なり、構造諸元が同一である供試体は、例えば A1-13-100 シリーズのように、総称してシリーズと呼ぶこととする。

小型 RC はり供試体の断面図が図 4-1、RC はり供試体の側面図が図 4-2 に示される。寸法は、幅×高さ×全長=300×160×1460mm とし、軸方向鉄筋は D13 を引張側のみに 3 本、

スターラップは D6 をせん断区間において間隔が 50mm もしくは 100mm になるよう配筋する。3 本の軸方向鉄筋を識別するために、供試体左端から見て左側に配筋される軸方向鉄筋を L 鉄筋，中央に配筋される鉄筋を C 鉄筋，右側に配筋される鉄筋を R 鉄筋と称する。コンクリートの配合を表 4-3 に，コンクリートの物性値を表 4-4 に，鉄筋の物性値を表 4-9 に示す。ここで，A1-13-100 シリーズ，A2-13-100 シリーズ，B1-13-100 シリーズは，中村ら<sup>4)</sup>の実験で使用されたものであり，鉄筋腐食率分布の統計的性質や構造諸元の影響を考慮したデータベースを作成している。本研究では，そこに B1-13-500 シリーズと B1-19-100 シリーズを追加して，電流密度や鉄筋径が鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係に及ぼす影響を調査する。

#### 4.2.2 ドローンによる腐食ひび割れの撮影と耐荷力推定に用いる RC はり

ドローンによる腐食ひび割れ幅の撮影と耐荷力推定に用いる大型 RC はりの供試体の一覧を表 4-5 に，各供試体のパラメータの一覧が表 4-6 に示される。供試体名は，例えば C1 のように腐食期間の特徴から構成される名前とした。1, 2, 3, 4 は数字が大きくなるにつれて目標最大腐食ひび割れ幅が大きくなっていることを示している。なお，実験当初は，小型 RC はりの実験と同様に目標腐食率をパラメータとしていたが，電食途中に腐食区間を変更したことで，腐食率を基準とした管理が困難になったことから，最大ひび割れ幅を基準とした腐食区間を変更した理由については，4.3.1 で述べる。

大型 RC はり供試体の断面図が図 4-3，RC はり供試体の側面図が図 4-4 に示される。寸法は，幅×高さ×全長=370×450×6000mm とし，軸方向鉄筋は引張側のみに 3 本，スターラップは D10 をせん断区間において間隔が 200mm になるよう配筋する。小型 RC はりと同様に，供試体左端から見て左側に配筋される軸方向鉄筋から L 鉄筋，C 鉄筋，そして R 鉄筋と称する。

コンクリートの配合を表 4-7 に，コンクリートの物性値を表 4-8 に，鉄筋の物性値を表 4-9 に示す。なお，コンクリートは 28 日の気中養生を行っている。

### 4.3 実験手法

#### 4.3.1 電食実験

小型 RC はりの電食試験の概要を図 4-5 に示す。RC はりを引張鉄筋の高さを超えるように 3%の NaCl 水溶液に浸け，内部の引張鉄筋を導線により並列につないだ上で，直流電流を印加して引張鉄筋全長を腐食させた。供試体内の引張鉄筋を直流安定化電源の陽極側，銅板を陰極側に接続した後に通電した。陰極となる銅板は，供試体を支持するために使用され

る木製スペーサーの下に敷いた。それぞれの供試体を目標の腐食率（10%、20%）に到達させるため、電食試験における腐食速度の推定が必要となる。本実験では、田森ら<sup>42)</sup>による積算電流量と鉄筋腐食率の関係式から必要な腐食時間を算出した。

軸方向鉄筋の間隔が広い A1-13-100 シリーズ、A2-13-100 シリーズに対しては、側面のかぶりが小さいことによる側面での腐食ひび割れの発生を防ぐために、エポキシ樹脂系充填接着剤を 3 回供試体側面および断面のおよそ下半分に塗布した<sup>43)</sup>。また、全供試体に対してスターラップのおよそ下半分に絶縁テープを巻き付け、スターラップの腐食を防いだ。

次に、大型 RC はりの電食試験の概要を図 4-6 に示す。大型 RC はりは全長が 6000mm であるため、全長を腐食させることが困難であり、曲げ区間のみを腐食させることとした。局所的な鉄筋腐食を生じさせるため、秋山ら<sup>44)</sup>のスポンジを用いた腐食方法を参考とし、陰極として使用した銅板の上に給水スポンジを積み上げ、これを RC はり下面に密着させることで、所定の範囲に電流が流れるように制御した。電流密度はすべての供試体で  $500\mu\text{A}/\text{cm}^2$  となるように通電した。ここで、スポンジを用いてコンクリートに NaCl 水溶液を供給させる場合、スポンジの吸水性・保水性が重要となる。今回の実験から、ポリウレタンフォーム性のスポンジに比べ、ポリビニルアルコール（PVA）性のスポンジが吸水性・保水性に優れていることがわかった。また、全供試体に対してスターラップに絶縁テープを巻き付け、スターラップの腐食を防いだ。

大型 RC はりについて、電食開始当初はスパン中央部の 1000mm 区間を曲げ区間として電食実験を行っていたが、電食試験途中の観察時に、写真 4-1 のように電食区間内のスターラップ直下の RC はり底面で軸直角方向にひび割れが入り、軸方向にはひび割れが進展しない現象がみられた。スターラップ位置下の RC はり底面で生じた軸直角方向ひび割れが軸方向のひび割れ進展に影響しないように、スターラップが配筋されていない位置へ腐食区間を変更している。C1、C2 は電食期間が 35 日の時点で腐食区間をスターラップが含まれないスパン中央部の 800mm 区間に変更をした。また、スターラップ位置で軸直角方向にひび割れが生じ、その位置で腐食生成物が流れ出していたため、供試体 C1 を用いて軸方向鉄筋をはつり出し、電食区間内で鉄筋腐食が進んでいるかを確認めた。その結果、電食区間内で鉄筋腐食が進んでいることが確認された。なお、時間の関係上、腐食を速めるために途中で電流密度を  $1000\mu\text{A}/\text{cm}^2$  に上げており、他の供試体と実験条件が異なってしまうため、C1 は腐食ひび割れの撮影と耐荷力推定には用いないこととする。

C3、C4 は上記の結果を受けて、腐食区間はスパン中央部の 800mm 区間から電食を開始した。しかし、その後の電食途中において、C1、C2 のスターラップ位置で生じていたひび割

れから腐食生成物の流れ出しが観測され、軸方向の腐食ひび割れの進展具合が小さかったため、さらに腐食区間を短くし、すべての供試体でスパン中央部の 400mm 区間（供試体左端から 2800mm～3200mm の位置）とした。それに伴い、曲げ区間もスパン中央部の 400mm 区間に変更している。腐食区間を 400mm に変更した後は、軸方向の腐食ひび割れの進展がみられたが、腐食区間を短くする前に生じていたひび割れ位置から腐食生成物が流れ出ししていた。

今回のスターラップ位置直下で軸直角方向にひび割れが生じた原因として、スターラップの鉄筋径を D10 にしたことによるかぶりの減少が考えられる。小型 RC はりの実験条件と揃えるため、かぶりを 20mm と設定していたが、スターラップの鉄筋径は供試体寸法に合わせて、D6 から D10 に変更した。そのため、スターラップ位置のかぶりが小さくなり、スターラップのない位置に比べてひび割れが生じやすくなってしまったと考えられる。今後、供試体寸法の異なる電食実験を行う場合は、スターラップの鉄筋径やスターラップ位置のかぶりの大きさがどれだけ腐食ひび割れに影響するか等、検証する必要がある。

#### 4.3.2 デジタルノギス測定による鉄筋断面損失率の推定

曲げ載荷実験が終了した後に供試体から鉄筋をはつり出し、10%のクエン酸水素二アンモニウム水溶液に 3～4 日間つけて鉄筋に付着する腐食生成物を除去する<sup>45)</sup>。そして、田中ら<sup>46)</sup>と同様にデジタルノギスを用いて軸方向鉄筋の最小径とそれに直交する径を測定し、その平均値を直径とする真円の断面積を算定した。ここで、腐食した鉄筋断面の模式図とデジタルノギスにより計測する残存径を図 4-7 に示す。算定した腐食後の鉄筋断面積が腐食前の鉄筋断面積から減少した割合を算出することで鉄筋断面減少率を推定する。なお、曲げ載荷実験時に破断した鉄筋については、破断以前を想定し、鉄筋をつなぎ合わせた上でリブのある位置を測定することとした。

鉄筋腐食率の計測は、各鉄筋において配筋時にかぶり逆側にあるリブの位置ごとに行った。鉄筋径が D13 の鉄筋の場合、腐食前鉄筋のリブ間隔を計測した結果の平均値から、リブの間隔は一様に 7.8mm であるとし、部材軸方向に 7.8mm 間隔の鉄筋腐食率データを得た。そして、Non-FE モデルの部材軸方向の要素サイズ (10mm) に合わせて、10mm ごとに区切った領域で平均値をとった。例えば供試体左端から 50mm の位置での鉄筋断面減少率は、45mm～55mm で測定された鉄筋断面減少率の平均となる。なお、区間にデータが 1 つしかない場合はそのデータを直接用いることとした。一方で、鉄筋径が D19 の場合、リブ間隔は 12.5mm であり、Non-FE モデルの要素サイズ (10mm) ごとに区切った領域で平均値をと

ると計測されない位置が出てきてしまうため、はり底面に最も近い位置、およびその 180° 離れた位置の両方のリブで計測し、片側のリブ間隔 (12.5mm) の半分の間隔 (6.25mm) で鉄筋腐食率データを得た。

このようにデータ処理を行い、小型 RC はりでは、各鉄筋で供試体左端から 50mm～1410mm の位置に、大型 RC はりでは、供試体左端から 2800mm～3200mm の位置に 10mm 間隔のデータを持つ鉄筋腐食率分布を取得した。

デジタルノギスによって推定された鉄筋断面減少率を腐食前と腐食後の鉄筋の質量比から算出した鉄筋質量減少率と比較することで測定結果の精度を検証する。表 4-10 にそれぞれの鉄筋で測定された平均鉄筋断面損失率と平均鉄筋質量減少率の比較結果を示す。両者の差の絶対値は 0.1%～4.9%の範囲であった。これは、Lim et al.<sup>47)</sup>が X 線撮影により質量減少率を推定した際の測定誤差と概ね等しく、精度良く測定できたと考えられる。

#### 4.3.3 デジタル画像処理による腐食ひび割れ幅の推定

電食実験終了後、供試体底面に生じた腐食ひび割れ幅の測定を行う。測定のフローを図 4-8 に示す。図 4-8 に示されている測定フローに関して、以下に各項目の説明を記す。

##### (1) 画像の鮮鋭化

腐食ひび割れ幅の画像は、腐食生成物によりコンクリート表面が茶色くなっており、撮影されたままの画像からではひび割れ部分の検出が困難である。そこで、画像の鮮鋭化処理を行う。アンシャープマスクと呼ばれる、画像を意図的に平滑化し、原画像との差分像を原画像に加算することにより画像の鮮鋭化を行う処理によって、腐食ひび割れ部分を強調する。

##### (2) 白黒画像に変換

撮影した写真を鮮鋭化した後、カラー画像内の各画素の色を表す RGB 値を基準に、Python を用いてひび割れ箇所を白、それ以外を黒とした白黒画像に変換する。本フローでは、R 値、G 値、B 値がすべて 30 未満である場合、そのピクセルをひび割れに分類することを基本とした。なおドローン撮影で得られた画像では、R 値、G 値、B 値が 30 未満を基準とするとノイズが多く発生するものがあつたため、この基準値を画像に応じて変化させている。また、鉄筋の中間線を境界として供試体底面を 3 つのエリアに分け、全てのひび割れを L, C, R 鉄筋に生じたひび割れにそれぞれ分類することとした。

##### (3) ノイズの消去

本研究では、周囲と比較して色が暗く、部材軸方向に伸びている線をひび割れと定義

した。しかし、RGB 値の基準のみでは、ひび割れとそれ以外の部分を完璧に分けることができない。そこで、(2)でひび割れと判断された白黒画像の白色の部分において、以下の記述の何れかにあてはまるものをノイズとし、Photoshop の画像処理ツールを用いてこれを除去した。

- ・線状でないもの（コンクリートの剥離等）
- ・部材軸方向に伸びていないもの（ひび割れ線の角度が部材軸方向を基準として±45°以内に収まらないもの）

また、供試体左端から等距離の位置で、各鉄筋下に生じるひび割れが複数存在する場合は、最も大きなひび割れのひび割れ幅のみを測定するものとした。

#### (4) ひび割れと判断されたピクセル数のカウント

ノイズを除去したのち、最終的にひび割れと判断された白いピクセルを画像の上下方向、すなわち部材軸直角方向にカウントする。

#### (5) 数値変換

近接撮影による画像は、画像内のメジャーを利用して1ピクセルあたりの実寸長さを算出し、ピクセル数で表された腐食ひび割れ幅を実寸長さに変換する。一方で、ドローン撮影の場合は、実際の点検現場を想定し、供試体にメジャーを取り付けていない。そこで、取得可能な情報である供試体寸法（幅 = 370mm）を用いて、腐食ひび割れ幅をピクセル数から実寸長さに変換した。

#### (6) 腐食ひび割れ幅分布の取得

部材軸方向に1ピクセル間隔で測定されたひび割れ幅を、Non-FEAの部材軸方向の要素サイズ（10mm）に合わせて、10mmごとに区切った領域で平均値をとった。最終的に、小型RCはりには供試体左端から50mm～1410mmの位置に、大型RCはりには供試体左端から2800mm～3200mmの位置に10mm間隔のデータを持つ腐食ひび割れ幅分布を取得した。

近接で撮影された画像を用いて、デジタル画像処理によって推定された腐食ひび割れ幅を Zhang et al.<sup>4,8)</sup>が行った Image-Pro を用いた手法によって測定した腐食ひび割れ幅と比較することで、測定結果の精度を検証する。表 4-11 にそれぞれの手法で測定された平均腐食ひび割れ幅の比較結果を示す。両者の絶対誤差は 0.01mm～0.09mm の範囲であった。全供試体で、デジタル画像処理を用いた測定方法の方が Image Pro を用いた場合に比べて平均腐食ひび割れ幅が小さくなっている。この理由は、腐食ひび割れ幅を測定した後のデータ処理の違いにあると考えられる。図 4-9 に示す、各測定方法で取得した腐食ひび割れ幅分

布を用いて考察する。本手法で得られた腐食ひび割れ幅分布は、Image Pro を用いて得られた腐食ひび割れ幅分布の形状を概ねとらえている一方で、腐食ひび割れ幅を小さく推定している傾向にある。Image Pro を用いた手法では、10mm ごとに測定を行い、その結果を各位置での腐食ひび割れ幅としているが、本手法では 1 ピクセルごとに測定し 10mm ごとに区切った領域で平均値をとっているため、本手法の方が小さく測定されたと考えられる。各位置では Image Pro によって測定される腐食ひび割れ幅の方が正確な値であるが、本手法の方がピクセル単位で測定しているため、より多くのデータを参照した値となっていると考えられる。

本手法では、RGB 値による二値化と目視によるノイズの消去により半自動的に腐食ひび割れ幅を測定した。一方で、二値化処理を行う閾値は画像によって異なる等、汎用的でないという課題がある。今後は、より効率的かつ高精度に腐食ひび割れ幅を測定するために、機械学習等を用いて、自動的に腐食ひび割れを測定する手法の開発を目指す必要がある。また、供試体の軸直角方向のピクセル数をカウントしているため、軸方向にわずかに斜めに進展しているひび割れ幅（部材軸方向を基準として $\pm 45^\circ$ 以内に収まるもの）は正確に測定できていない。今後、こうした斜めに進展している腐食ひび割れ幅に対してもひび割れ進展方向の直角方向にひび割れ幅を測定可能な手法を確立していく必要がある。

## 4.4 実験結果および考察

### 4.4.1 鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係

本項では、鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の關係に着目し、特に小型 RC はりについて、供試体ごとに变化させた構造諸元（鉄筋間隔、鉄筋径）や電流密度が両者に与える影響について考察する。鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の關係について述べる前に、実験で得られた鉄筋腐食率分布と腐食ひび割れ幅分布の結果について述べる。

まず、**図 4-10** に小型 RC はりで得られた鉄筋腐食率分布を、**図 4-11** に腐食ひび割れ幅分布を示す。**図 4-10** より、鉄筋腐食率分布は空間変動性を有していることが分かる。この空間変動性を再現するために必要な鉄筋腐食率分布の統計的性質や軸方向および軸直角方向の相関性の評価については、5.2.1 で述べることにする。**図 4-11** より、鉄筋腐食率と同様に、腐食ひび割れ幅分布も空間変動性を有していることが分かる。また、腐食ひび割れ幅分布の大きさの違いに着目すると、C 鉄筋下の腐食ひび割れ幅が他の鉄筋下に比べて小さくなっている傾向がある。これは、L 鉄筋と R 鉄筋に生じる腐食生成物に応じた膨張圧が C 鉄筋との間にもたらす圧縮応力が原因であることが既往研究の Non-FEA により解明されている<sup>49)</sup>。一方で、B1-13-500 シリーズでは、C 鉄筋下の腐食ひび割れ幅が L 鉄筋と R 鉄筋

に比べて大きい結果となった。特に、C 鉄筋下での腐食ひび割れが大きい位置で L 鉄筋と R 鉄筋下の腐食ひび割れ幅が小さい。これは、C 鉄筋の腐食が L 鉄筋と R 鉄筋に比べて速く発生し、L 鉄筋と R 鉄筋の腐食ひび割れ幅を抑制したと考えられる。ただし、鉄筋腐食発生のタイミングやその後の腐食ひび割れの定期的な観測はできていない。そのため、各鉄筋の腐食発生のタイミングがその後の腐食ひび割れ幅に及ぼす影響については追加の実験の中で検証する必要がある。

このように、複数本の鉄筋を有する RC はりの場合、同一供試体内の鉄筋同士が腐食膨張圧により影響し合う結果として、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係はより複雑なものとなっている。したがって、複数本の軸方向鉄筋を有する RC はりを対象に鉄筋腐食率を腐食ひび割れ幅から予測する際には、各鉄筋で別々に予測を行うのではなく、供試体内にある全ての鉄筋の鉄筋腐食率と供試体底面にあらわれる全ての腐食ひび割れ幅の関係を考慮する必要があるといえる。

続いて、小型 RC はりの鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係について述べる。図 4-12 に示す供試体ごとの鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅のプロットをみると、その関係は大きくばらついている。既往の実験<sup>47),48),410)</sup>でも見られるこのばらつきには、コンクリートの品質や腐食環境など多くの要素が介在しており、これにより、腐食ひび割れ幅を用いた鉄筋腐食率の精緻な予測は非常に困難なものになっているのである。本研究は、このような不確実性が存在する事象に対して、不確実性を取り込みながら事象を定量的に評価することを目的とし、確率論的な耐荷力推定のアプローチを行うものである。

次に、図 4-13 に大型 RC はりで得られた鉄筋腐食率分布を、図 4-14 に腐食ひび割れ幅分布を示す。鉄筋腐食率分布および腐食ひび割れ幅分布は小型 RC はりの実験結果と同様に、空間変動性を有している。また、腐食ひび割れ幅分布は小型 RC はりの実験結果と同じく、C 鉄筋下の腐食ひび割れ幅が他の鉄筋下に比べて小さくなっている。

続いて、図 4-15 に大型 RC はりの供試体ごとの鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅のプロットを示す。小型 RC はりと同様、両者の関係は大きくばらついていることが分かる。

#### 4.4.1.1 鉄筋間隔の影響

図 4-16 に示すように、小型 RC はりの鉄筋間隔の異なる A1-13-100 シリーズ ( $RS=95\text{mm}$ ) と B1-13-100 シリーズ ( $RS=57\text{mm}$ ) を比較すると、A1-13-100 シリーズよりも B1-13-100 シリーズの方が同程度の平均鉄筋腐食率において平均腐食ひび割れ幅が小さい。つまり、鉄筋の間隔が小さいほど腐食ひび割れ幅が進展しにくい。Cheng et al.<sup>411)</sup>の解析的研究では、FEA

を用いて鉄筋の間隔が異なる RC 断面の腐食をモデル化し、鉄筋の間隔が狭くなると、周囲の鉄筋から生じる膨張圧によって腐食ひび割れ幅が小さくなることが示されている。これより、鉄筋の間隔が狭くなると腐食ひび割れ幅が小さくなる原因は鉄筋間の圧縮応力の大きさの違いであると考えられる。

一方で、図 4-17 に示すように、小型 RC はりの B1-19-100 シリーズ ( $RS = 57\text{mm}$ ) と大型 RC はりの C2, C3, C4 ( $RS = 95\text{mm}$ ) を比較すると、鉄筋の間隔が小さい B1-19-100 シリーズの方が同程度の平均腐食率において平均腐食ひび割れ幅が大きい結果となり、前述した結果と反対の傾向を示した。B1-19-100 シリーズと C2, C3, C4 の違いは、電流密度と供試体の寸法であり、これらが鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係に影響を及ぼしていると考えられる。4.4.1.2 で電流密度の影響を実験的に調査し、供試体の寸法による影響を 5.5.3 で解析的に調査した。

#### 4.4.1.2 電流密度の影響

まず、小型 RC はりにおいて、電流密度の違いが鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係に及ぼす影響を調査する。図 4-18 に示すように、電流密度の異なる B1-13-100 シリーズ ( $I_{corr} = 100\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) と B1-13-500 シリーズ ( $I_{corr} = 500\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) を比較すると、次のような傾向がみられる。一つは、平均鉄筋腐食率が 10%~15% の場合、電流密度が高い B1-13-500-10 の方が電流密度の低い B1-13-100-10 よりも平均腐食ひび割れが大きいことである。電流密度が高く腐食速度が速いほど腐食生成物が空隙および細孔に侵入する速度と比較して鉄筋周辺における腐食生成物の生成速度が大きいと考えられるため、同程度の鉄筋腐食率における鉄筋周辺の膨張圧が大きくなり、腐食ひび割れ幅が大きくなったと推察される。これは、Zhang et al.<sup>4,8)</sup>の実験でも同等の傾向がみられている。一方で、平均鉄筋腐食率が 20%~30% の場合、電流密度の異なる供試体間 (B1-13-100-20 と B1-13-500-20) で平均腐食ひび割れ幅の大きさに明確な違いはみられなかった。また、電流密度が  $500\mu\text{A}/\text{cm}^2$  の B1-13-500-10 と B1-13-500-20 を比較すると、平均鉄筋腐食率が大きいほど平均腐食ひび割れ幅が小さい結果となった。1本の引張鉄筋を有する RC はりの電食実験の結果<sup>4,8)</sup>と比べて、3本の引張鉄筋を有する RC はりを対象とした本実験では、鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係に及ぼす電流密度の影響は明確にならなかった。複数本の鉄筋が配筋される場合、電流密度による影響に比べて、腐食生成物の膨張圧が鉄筋間に圧縮応力を生じさせる影響の方が優位にはたらいしている可能性がある。電流密度による影響が鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係に及ぼす影響が小さいため、4.4.1.1 で述べた、大型 RC はりの方が鉄筋間隔が広いにもかかわらず、

小型 RC はりに比べて腐食ひび割れ幅が小さくなった要因は供試体寸法にあると推察した。河村ら<sup>4)12)</sup>の実験的研究では、断面寸法が異なる RC 部材のひび割れの進展挙動を調査し、断面寸法が大きくなると、コンクリート表面に生じるひび割れ幅が小さくなること示されている。これより、大型 RC はりの方が小型 RC はり比べて腐食ひび割れ幅が小さくなる原因は供試体断面の大きさの違いであると考えられるが、本研究においても、Non-FEA を用いてこれを確かめた。この詳細は 5.5.2 に示す。

#### 4.4.1.3 鉄筋径の影響

図 4-19 に示すように、鉄筋径の異なる B1-13-100 シリーズ ( $RD=D13$ ) と B1-19-100 シリーズ ( $RD=D19$ ) を比較すると、平均鉄筋腐食率が同程度の場合、鉄筋径の大きい方が大きい平均腐食ひび割れ幅が生じている。これは、腐食生成物による膨張圧の大きさの違いが原因であると考えられる。同じ鉄筋腐食率の場合、鉄筋径、すなわち鉄筋断面積の大きい方が多くの鉄筋腐食が発生し、腐食生成物量も多くなる。つまり、鉄筋径が大きい方が腐食生成物による膨張圧が大きくなり、結果として、大きな腐食ひび割れ幅が生じたと推察される。

#### 4.4.2 腐食ひび割れ幅の測定精度

本項では、大型 RC はりを対象に、ドローンにより撮影された腐食ひび割れ幅画像から 4.3.3 で示したデジタル画像処理手法を用いて測定される腐食ひび割れ幅とデジタルカメラにより近接で撮影された腐食ひび割れ幅画像から測定される腐食ひび割れ幅を比較し、撮影方法の違いが腐食ひび割れ幅の測定精度に及ぼす影響を検証する。なお、比較をする際の基準として、近接の撮影で得られた腐食ひび割れ画像から Zhang et al.<sup>4)8)</sup>が行った Image-Pro を用いた手法によって測定した腐食ひび割れ幅を正とする。

##### 4.4.2.1 ドローンによる撮影

写真 4-2 にドローンによる腐食ひび割れ画像の撮影の様子を示す。大型 RC はりをクレーンで吊り上げ、供試体底面に生じた腐食ひび割れ幅をドローンのカメラを 90°上に向けた状態で、機体を移動させながら撮影を行った。本研究で使用したドローンは 2 種類であり、それぞれの概要を表 4-12 に、カメラの性能を表 4-14 に示す。この 2 種類のドローンはそれぞれ、Skydio と ANAFI と呼ぶこととする。これらのドローンの違いは主にカメラの性能にある。Skydio は、対象物に対し約 0.45m まで接近可能な性能を有しているのに対し、ANAFI は対象物まで約 1m 以下になると焦点を合わせることが困難になる。なお、ANAFI は市販

のドローンである一方で、Skydio は橋梁をはじめとする構造物のひび割れや変状の撮影など、点検現場に使用されている実績あり、その性能が認められている<sup>4-13)</sup>。Skydio のひび割れ幅計測精度を表 4-13 に示す。ひび割れ幅が 0.2mm 以上のひび割れに対する計測誤差は 0mm~0.06mm であり、精度よく計測できているといえるが、0.1mm 以下のものに対しては、計測誤差が 0.10~0.12mm と大きく、正確に測ることはできていない。

写真 4-3 に Skydio で撮影した腐食ひび割れ画像の一例を、写真 4-4 に ANAFI で撮影した腐食ひび割れ画像の一例を示す。どちらの画像も腐食ひび割れが確認することができる。一方で、画像全体としてぼやけており、不鮮明な画像となっている。これは、ドローンの性能と撮影環境に要因があると考えられる。まず、ドローンの性能について、供試体に近づくと機体が安定しない現象が確認された。これは、ドローンが供試体底面に近づいた際に、プロペラから発生する風が供試体に反射することで、機体が揺れてしまったと考えられる。次に撮影環境について、ドローン撮影の場合、供試体の下側から撮影するため、供試体の影となることで暗くなる。暗い撮影環境では、画像内にノイズが多くなるため、不鮮明な画像になったと考えられる。

#### 4.4.2.2 デジタルカメラによる近接撮影

デジタルカメラによる近接撮影では、地面上で大型 RC はりの底面が側面を向く様に回転させ、カメラと供試体の距離を約 0.45m に保ちながら撮影を行った。

表 4-14 にカメラの性能を、写真 4-5 にデジタルカメラによる近接撮影で得られた腐食ひび割れ画像の一例を示す。写真 4-3、写真 4-4 に示す、ドローンによって得られた腐食ひび割れ画像に比べて、鮮明な画像であることが分かる。鮮明な画像が得られた理由として、近接撮影では、撮影時のカメラは三脚で固定しているためぶれることがないこと、供試体底面を横側から撮影しているため供試体の影になることがなく十分な照度であったことが考えられる。

以上の違いを踏まえ、4.4.2.3 で腐食ひび割れ幅画像から測定した腐食ひび割れ幅の測定精度を比較する。

#### 4.4.2.3 撮影方法による違いが腐食ひび割れ幅の測定精度に及ぼす影響

4.4.2.1 でドローンによって撮影された画像と 4.4.2.2 でデジタルカメラによって近接で撮影された腐食ひび割れ画像から 4.3.3 に示したデジタル画像処理手法を用いて算出された腐食ひび割れ幅を近接撮影された画像から Image Pro を用いて手動で測定した腐食

ひび割れ幅の値を正として比較する。図 4-20 にドローン撮影および近接撮影された画像からデジタル処理を用いて得られた腐食ひび割れ幅分布と近接撮影された画像から Image Pro を用いて手動で測定した腐食ひび割れ幅分布を示す。

まず、近接撮影とデジタル画像処理で得られた腐食ひび割れ幅分布の測定精度について述べる。近接撮影とデジタル画像処理によって得られた腐食ひび割れ幅分布は、Image Pro を用いて測定した腐食ひび割れ幅分布の大きさと形状を概ね再現することができている。一方で、近接撮影とデジタル画像処理によって得られた腐食ひび割れ幅の方が Image Pro で得られた腐食ひび割れ幅に比べて小さくなっている部分は、4.3.3 で述べたように、腐食ひび割れ幅を測定した後のデータ処理の違いにあると考えられる。

次に、ドローン撮影とデジタル画像処理によって得られた腐食ひび割れ幅分布の測定精度について述べる。図 4-20 に示すように、ドローン撮影で得られる腐食ひび割れ幅はドローンの種類にかかわらず、近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅に比べて小さく測定された。図 4-20 (a-1)、図 4-20 (a-3) の様に腐食ひび割れ幅が 0.3mm を超えるような大きいひび割れは計測できているが、それ以外ひび割れ幅は検出されていない、もしくは実際より小さく計測されている。Skydio については、表 4-13 に示す計測精度と比べると、本研究での撮影の測定精度の方が低いことが分かる。これは、腐食ひび割れ幅はひび割れ周辺に錆汁が付着しており、ひび割れの検出が困難であるためと考えられる。4.4.2.1 で示した通り、ドローンによって撮影すると、暗く、ぶれた画像になってしまうため、写真 4-6 に示すように、近接画像ではひび割れが視認できるのに対し、ドローン画像では腐食ひび割れ周辺に付着した錆汁と腐食ひび割れの区別が困難である。このような位置ではデジタル画像処理で腐食ひび割れが検出されないため、腐食ひび割れ幅が小さく測定されたと考えられる。

測定精度を定量的に評価するために、Image Pro によって測定された腐食ひび割れ幅分布を正として、以下の式(4-1)で与えられる平均平方二乗誤差 (RMSE) を算出する。なお、RMSE は 0 に近づくほど測定精度が高いことを表す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4-1)$$

ここで、 $n$  は腐食ひび割れ幅の全データ数、 $x_i$ 、 $y_i$  はそれぞれ  $i$  番目の要素における腐食ひび割れ幅の正解値と画像処理による腐食ひび割れ幅の測定値である。

近接撮影された画像から Image Pro を用いて手動で測定した腐食ひび割れ幅の値を正として、近接撮影およびドローン撮影とデジタル画像処理によって測定された腐食ひび割れ幅分布から算出した RMSE を表 4-15 に示す。これをみると、全供試体において、近接撮影

によって取得された場合が最も RMSE が小さくなっており、ドローン撮影に比べて測定精度が高いといえる。また、ドローンの種類の違いによる RMSE の大きさの違いはみられなかった。つまり、今回のドローン撮影においては、2つのドローンの測定精度は同程度であり、ドローンの性能の違いが腐食ひび割れ幅の測定精度に及ぼす影響は小さかったといえる。

このように、撮影方法の違いによって、腐食ひび割れ幅の測定精度は大きく異なる。特に、本研究で用いたドローン撮影の場合は、RC はり下部でドローンを飛行させた状態で撮影するという撮影環境、供試体に近づくとぶれてしまうドローンの性能、そしてカメラの性能により、腐食ひび割れと錆汁の判断が難しく、腐食ひび割れ幅を過小に推定した。本研究では、腐食ひび割れ幅を入力情報として鉄筋腐食率分布を予測し、耐荷力を推定するため、腐食ひび割れ幅の取得精度は非常に重要である。実構造物の点検に本研究の提案フローを適用することを考えると、耐荷力を推定するのに必要な腐食ひび割れ幅の測定精度を定量的に示しておく必要がある。本研究では、6.4 で、ドローン撮影で得られた腐食ひび割れ幅と近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅情報から耐荷力を推定し、実際の耐荷力と比較することで、撮影方法が耐荷力推定に及ぼす影響、および耐荷力推定に求められる腐食ひび割れ幅の測定精度について述べる。

#### 4.4.3 腐食 RC はりの曲げ試験

##### 4.4.3.1 载荷方法

大型 RC はり全ての供試体について、支点間距離 5500mm に対して、純曲げ区間 400mm、せん断スパン 2550mm とし、写真 4-7 に示すような対称 2 点一方向単調曲げ载荷試験を実施した。せん断スパン比  $a/d$  は 6.0 である。载荷試験中は、载荷荷重とスパン中央での部材変位を測定すると同時に、側面のひび割れの進展の様子を記録する。荷重はロードセルで、変位はレーザ変位計で測定した。変位を測定するためのアルミ製プレートの設置位置は、供試体の高さ中央部とした。なお、载荷は最大荷重以降までを目標とし、目視によるコンクリートの圧壊や軸方向鉄筋の破断音が確認された場合はその時点で終了した。

##### 4.4.3.2 荷重-変位関係

供試体 C1, C2, C3, C4 に対する曲げ载荷試験によって得られた荷重とスパン中央変位の関係を図 4-21 に示す。各供試体に対する破壊モードが表 4-16 に示される。平均鉄筋腐食率が 30%以下の C1, C2, C3 では、軸方向鉄筋の降伏後に供試体上部のコンクリートが圧壊し

て終局、平均鉄筋腐食率が 30%以上の C4 で軸方向鉄筋（L 鉄筋）が破断し、脆性的な破壊を生じる結果となった。なお、軸方向鉄筋の破断は、純曲げ区間内部の鉄筋腐食率が局所的に大きい位置（図 4-13(d)の供試体左端から 3070mm 付近）で発生した。

図 4-21 をみると、平均鉄筋腐食率の大きい C4 の方が、平均鉄筋腐食率が小さい C1 に比べて、降伏荷重、最大荷重、変形能が低下しており、腐食が進行するほど構造性能が低下する傾向がみられた。

また、本研究では、RC はりの耐荷力として降伏荷重に着目する。降伏荷重を初期ひび割れ発生後の荷重-変位関係から近似した傾きを用いて計算される荷重と実際の荷重の差が急激に変化する（差が 5kN を超える）点での荷重と定義して、荷重-変位関係のグラフから表のように求めた。この定義で決定された降伏荷重は実際の曲げ載荷実験における 1 本目の鉄筋降伏時の荷重に近い値を取ると予想される。そこで、6.3 で行った Non-FEA による曲げ載荷実験の再現解析においても、1 本目の鉄筋降伏時の荷重を降伏荷重と定義し、実験結果と比較することとした。なお、今回は降伏荷重に着目することから、破壊モードの違いは考慮する必要はない。

#### 4.4.3.3 曲げひび割れ性状

供試体 C1, C2, C3, C4 に対する曲げ載荷試験後のひび割れ性状を図 4-22 に示す。なお、曲げひび割れ幅が顕著に発生・進展していた RC はり左端から 2000mm~3000mm の範囲を示している。図中の赤い線は曲げひび割れを表し、黒く塗りつぶされた部分は、コンクリートの剥落や曲げひび割れ幅が極めて大きくなっていた領域や圧壊領域であることを示す。

図 4-22 に示す通り、C1, C2, C3 は純曲げ区間に発生した 2 本の曲げひび割れが同程度のひび割れ幅で進展した。一方で、C4 については、供試体左端から 3070mm 付近に生じた 1 本の曲げひび割れが卓越していた。これは、図に示される鉄筋腐食率分布から分かる局所的な腐食が生じた位置（供試体左端から 3070mm 付近）と一致しており、局所的な腐食が曲げひび割れ性状に影響を及ぼしているといえる。

## 参考文献

- 4-1) 中村智, 山田大樹, 新谷美菜, Supasit Srivaranun, 秋山充良: 機械学習用データベースの拡充および腐食ひび割れ情報を用いた劣化 RC 部材の耐荷力推定, AI・データサイエンス論文集, 第3巻, J2号, pp.117-127, 2022.
- 4-2) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋元親典: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.505-510, 1998.
- 4-3) 松村卓郎, 金津努, 西内達雄: 海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法, 土木学会論文集, Vol.45, No.634, pp.303-314, 1999.11.
- 4-4) 秋山充良, 中嶋啓太, 小森谷隆: X線撮影を用いた RC 部材内の鉄筋腐食成長過程の可視化に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.35-45, 2011.
- 4-5) 土木学会: 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ 85, 2009.
- 4-6) 田中泰司, 山口貴幸, 下村匠: 塩害劣化により鉄筋腐食が進行した RC 橋桁の耐荷試験と数値解析, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, pp.466-482, 2010.
- 4-7) Lim, S., Akiyama, M., Frangopol, D.M. and Jiang, H.: Experimental investigation of the spatial variability of the steel weight loss and corrosion cracking of reinforced concrete members: novel X-ray and digital image processing techniques, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.13, pp.118-134, 2017.
- 4-8) Zhang, M., Song, H., Lim, S., Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Reliability estimation of corroded RC structures based on spatial variability using experimental evidence, probabilistic analysis and finite element, *Engineering Structures*, Vol.192, pp.33, 2019.

- 4-9) 山田大樹, 新谷美菜, 辛寄語, 秋山充良 : pix2pix と腐食ひび割れ情報を用いた劣化 RC 部材内の 2 次元鉄筋腐食分布の推定および残存耐荷力の確率論的評価, AI・データサイエンス論文集, 第 2 巻, J2 号, pp.47-54, 2021.
- 4-10) Zhang, M., Nishiya, N., Akiyama, M., Lim, S. and Masuda, K.: Effect of the correlation of steel corrosion in the transverse direction between tensile rebars on the structural performance of RC beams, *Construction and Building Materials*, Vol.264, pp.1-8, 2020.
- 4-11) Cheng, X., Su, Q., Ma, F., Liu, X. and Liang, X.: Investigation on crack propagation of concrete cover induced by non-uniform corrosion of multiple rebars, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.201, pp.366-384, 2018.
- 4-12) 河村圭亮, Kim, T.K., 中村光, 国枝稔 : 鉄筋腐食に伴うコンクリート表面および内部ひび割れ進展挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010.
- 4-13) 国土交通省 : 点検支援技術性能カタログ (橋梁・トンネル) 令和 4 年 9 月, 技術番号 BR010043-V0022, 2022.

表 4-1 小型 RC はりの供試体一覧

供試体名	供試体寸法 幅×高さ×全長 (mm)	かぶり (mm)	軸方向鉄筋	軸方向鉄筋本数 (本)	スターラップ
A1-13-100-10	300×160×1460	20	D13	3	D6
A1-13-100-20					
A2-13-100-10					
A2-13-100-20					
B1-13-100-10					
B1-13-100-20					
B1-13-500-10					
B1-13-100-20					
B1-19-100-10			D19		
B1-19-100-20					

表 4-2 小型 RC はりのパラメーター一覧

供試体名	軸方向鉄筋の間隔 (mm)	鉄筋径	電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	スターラップの間隔 (mm)	目標腐食率 (%)		
A1-13-100-10	95	D13	100	100	10		
A1-13-100-20					20		
A2-13-100-10				50	10		
A2-13-100-20					20		
B1-13-100-10	57		100	100	100	10	
B1-13-100-20						20	
B1-13-500-10						500	10
B1-13-500-20							20
B1-19-100-10		D19	100		100	10	
B1-19-100-20						20	

表 4-3 小型 RC はりのコンクリートの示方配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				AE剤 (mL/m <sup>3</sup> )
			W	C	S	G	
20	50	44.3	181	362	754	961	2715

表 4-4 小型 RC はりのコンクリートの物性値

供試体名	材齢28日における 圧縮強度 (MPa)	空気量 (%)	スランプ (cm)
A1-13-100-10	42.44	3.2	23
A1-13-100-20	47.46	3.7	21
A2-13-100-10	45.79	1.5	21
A2-13-100-20	47.46	3.7	21
B1-13-100-10	42.44	3.2	23
B1-13-100-20	47.35	3.1	19
B1-13-500-10	50.11	4.8	16
B1-13-500-20	45.47	5.7	17
B1-19-100-10	45.79	1.5	21
B1-19-100-20	45.63	4.2	24

表 4-5 大型 RC はりの供試体一覧

供試体名	供試体寸法 幅×高さ×全長 (mm)	かぶり (mm)	軸方向鉄筋	軸方向鉄筋本数 (本)	スターラップ
C1	370×450×6000	20	D19	3	D10
C2					
C3					
C4					

表 4-6 大型 RC はりのパラメーター一覧

供試体名	軸方向鉄筋の間隔 (mm)	鉄筋径	電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	スターラップの間隔 (mm)	目標最大腐食ひび割れ幅 (mm)
C1	95	D19	500 (途中で1000に変更)	200	0.0~0.3
C2			500		0.3~0.6
C3					0.6~0.9
C4					0.9~1.2

表 4-7 大型 RC はりのコンクリートの示方配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )				
			W	C	S	G	AD剤
20	42.5	39.4	198	466	624	1015	4.66

表 4-8 大型 RC はりのコンクリートの物性値

供試体名	材齢28日における 圧縮強度 (MPa)	載荷日における 圧縮強度 (MPa)	空気量 (%)	スランプ (cm)
C1	41.72	41.38	2.7	19
C2	41.72	41.38	2.7	19
C3	38.64	38.71	5.2	21
C4	38.64	38.71	5.2	21

表 4-9 鉄筋の物性値

供試体	軸方向鉄筋			スターラップ		
	鉄筋径	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	鉄筋径	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
小型RCはり	D13	393	538	D6	381	606
	D19	393	590			
大型RCはり	D19	412	573	D10	398	561

表 4-10 ノギス測定により推定した平均鉄筋断面損失率と平均質量減少率の比較

供試体名	鉄筋位置	ノギス測定によって推定した 平均断面損失率 (%)	平均質量減少率 (%)	差の絶対値 (%)
C1	L	13.3	15.2	2.0
	C	15.2	18.4	3.3
	R	14.7	17.7	3.0
C2	L	15.5	17.5	2.0
	C	22.1	19.5	2.6
	R	15.4	16.9	1.5
C3	L	12.5	15.6	3.1
	C	14.6	16.8	2.2
	R	15.2	14.4	0.8
C4	L	16.0	18.1	2.1
	C	19.2	18.6	0.6
	R	17.9	16.5	1.4

表 4-11 デジタル画像処理により推定した平均腐食ひび割れ幅と Image Pro で測定した平均腐食ひび割れ幅の比較

供試体名	鉄筋位置	デジタル画像処理によって推定した 平均腐食ひび割れ幅 (mm)	Image Proによって推定した 平均腐食ひび割れ幅 (mm)	誤差 (mm)
C2	L	0.20	0.24	0.04
	C	0.03	0.02	0.01
	R	0.08	0.14	0.06
C3	L	0.16	0.17	0.01
	C	0.03	0.04	0.01
	R	0.13	0.17	0.04
C4	L	0.17	0.26	0.09
	C	0.00	0.01	0.01
	R	0.23	0.26	0.03

表 4-12 本研究で使したドローンの概要

ドローン名称	Skydio	ANAFI
イメージ		
長さ×幅×高さ (mm)	223×273×74	175×238×63
重量 (g)	775	320
最大飛行時間 (分)	23	25
撮影可能範囲 (上下方向)	-90°～+90°	-90°～+90°

表 4-13 Skydio によるひび割れの計測精度<sup>4-13)</sup>

ひび割れ幅 (mm)	計測精度 (mm)
0.05	0.10
0.10	0.12
0.20	0.06
0.30	0.06
1.00	0.00

表 4-14 各撮影方法で使したカメラの性能

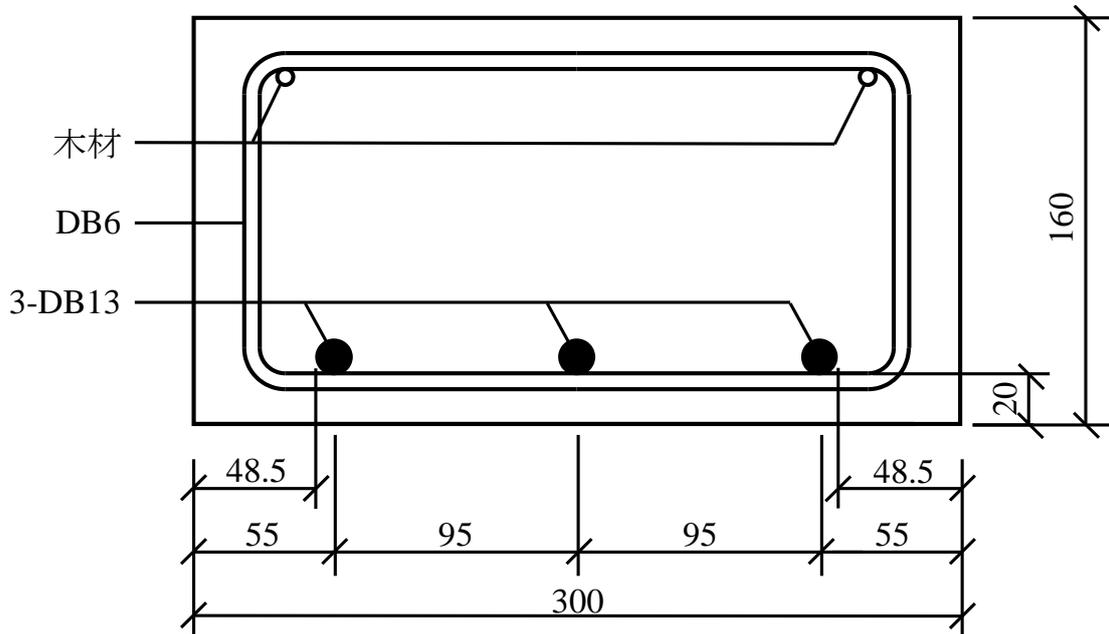
撮影方法	近接撮影	ドローン撮影	
		Skydio	ANAFI
センサ	1/2.93 インチ IMX315	Sony IMX577 1/2.3インチ CMOS	1/2.4インチ CMOS
センササイズ	4.8mm×3.6mm	6.2mm×4.7mm	5.7mm×4.3mm
画像解像度	3024×4032 1200万画素	3040×4056 1230万画素	3456×4608 1590万画素
焦点距離* (mm) *35mm換算	28	23	20
f値	f/1.8	f/2.8	f/2.4

表 4-15 Image Proによる測定値を用いて算出した各撮影方法のRMSE

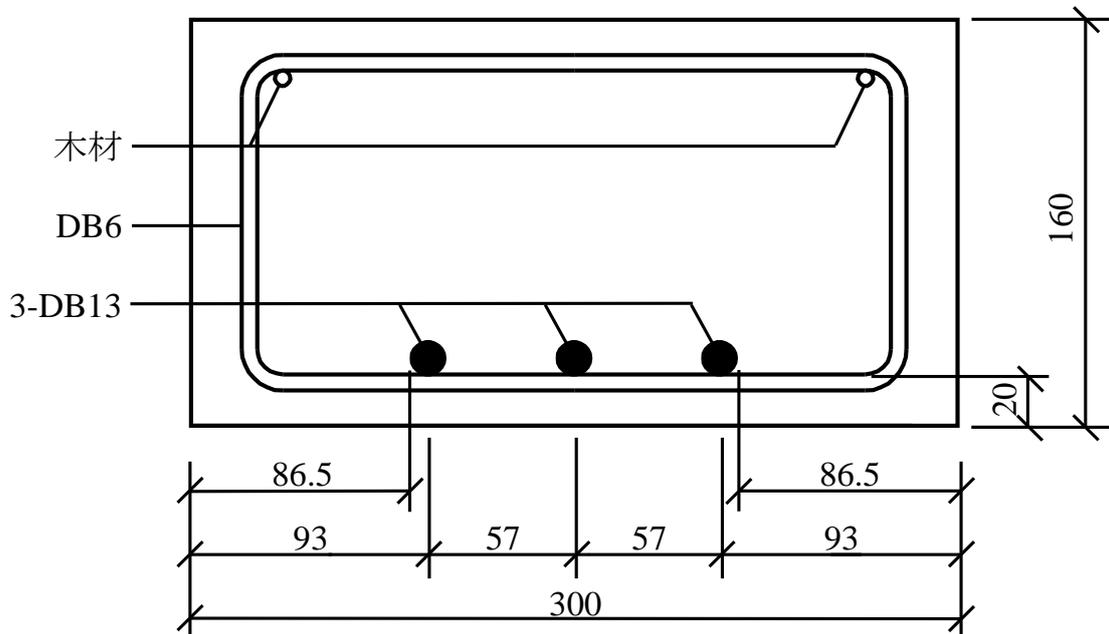
供試体名		Image Proによる測定値を正として算出したRMSE		
		近接撮影 (画像処理)	ドローン撮影 (Skydio)	ドローン撮影 (ANAFI)
C2	L鉄筋	0.133	0.170	0.166
	C鉄筋	0.111	0.170	0.173
	R鉄筋	0.092	0.137	0.122
C3	L鉄筋	0.064	0.128	0.131
	C鉄筋	0.027	0.055	0.055
	R鉄筋	0.095	0.142	0.135
C4	L鉄筋	0.136	0.209	0.208
	C鉄筋	0.035	0.038	0.039
	R鉄筋	0.166	0.232	0.279

表 4-16 各供試体の破壊モード

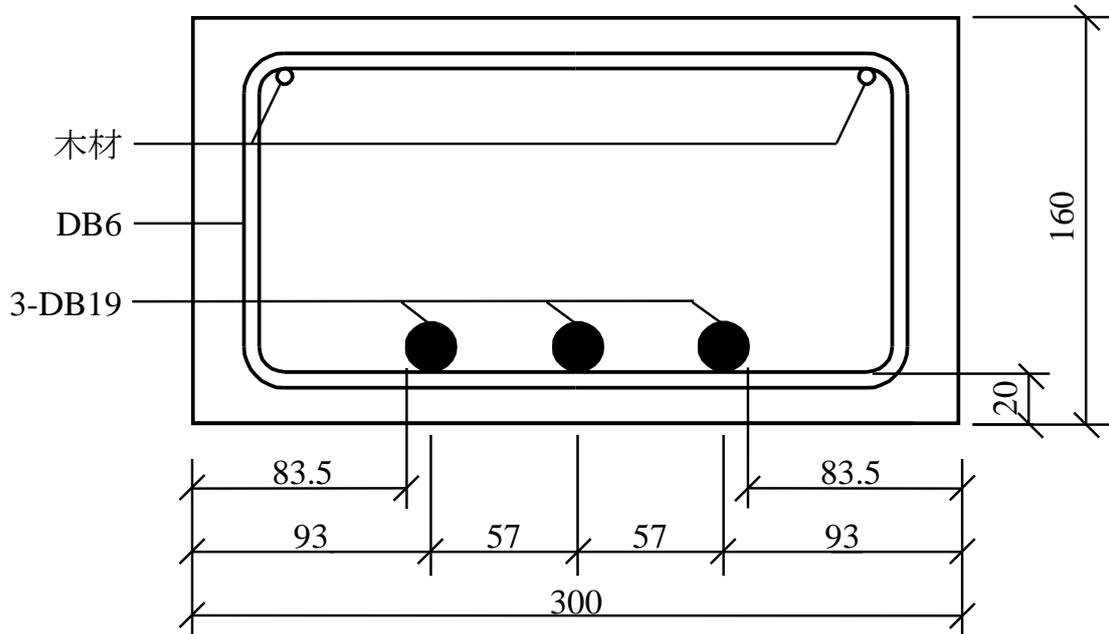
供試体名	破壊形態	降伏荷重 (kN)	平均鉄筋腐食率 (%)
C1	曲げ破壊 (コンクリート圧壊)	78.3	21.2
C2	曲げ破壊 (コンクリート圧壊)	76.4	23.0
C3	曲げ破壊 (コンクリート圧壊)	64.0	27.1
C4	曲げ破壊 (鉄筋降伏後L鉄筋破断)	58.4	32.6



(a) A1 シリーズ, A2 シリーズ

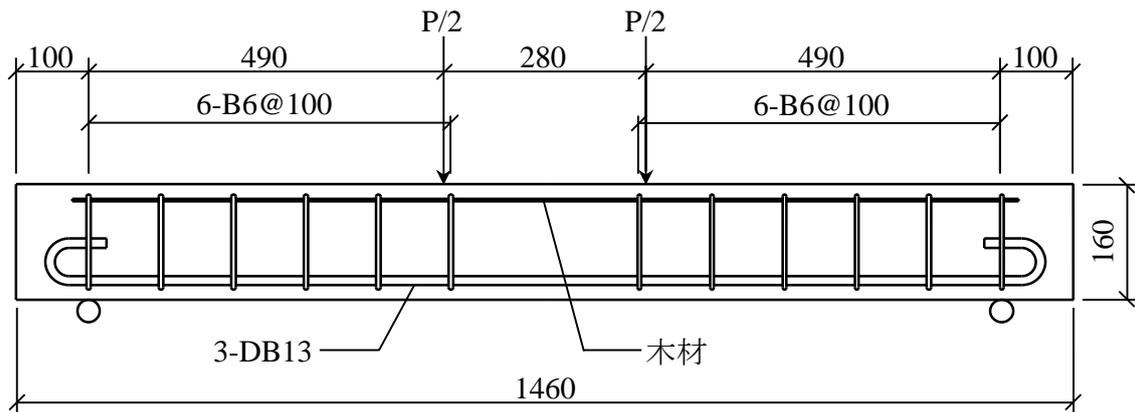


(b) B1-13 シリーズ

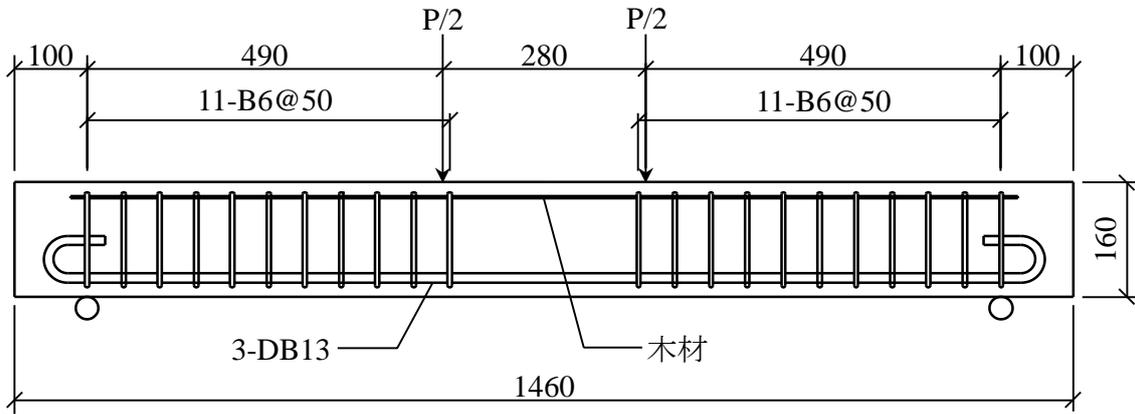


(c) B1-19 シリーズ

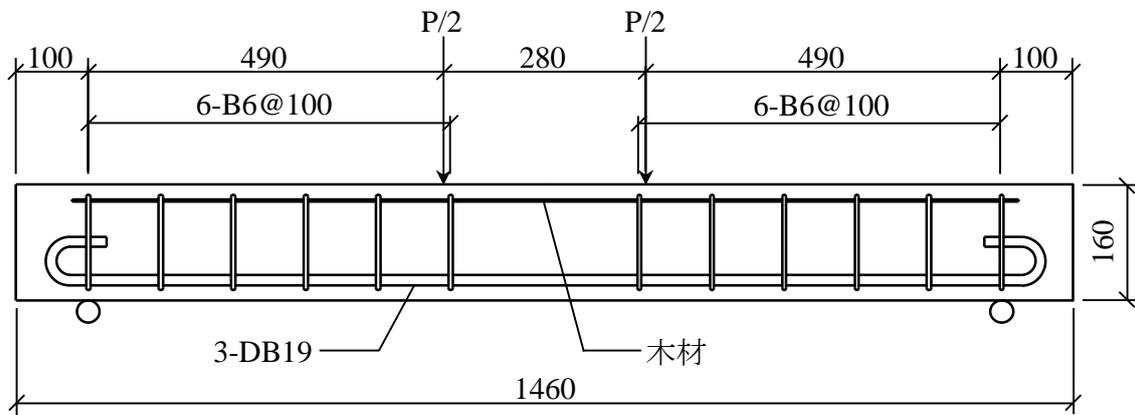
図 4-1 小型 RC はりの断面図 (単位 : mm)



(a) A1-13-100 シリーズ, B1-13-100 シリーズ, B1-13-500 シリーズ



(b) A2-13-100 シリーズ



(c) B1-19-100 シリーズ

図 4-2 小型 RC はりの側面図 (単位 : mm)

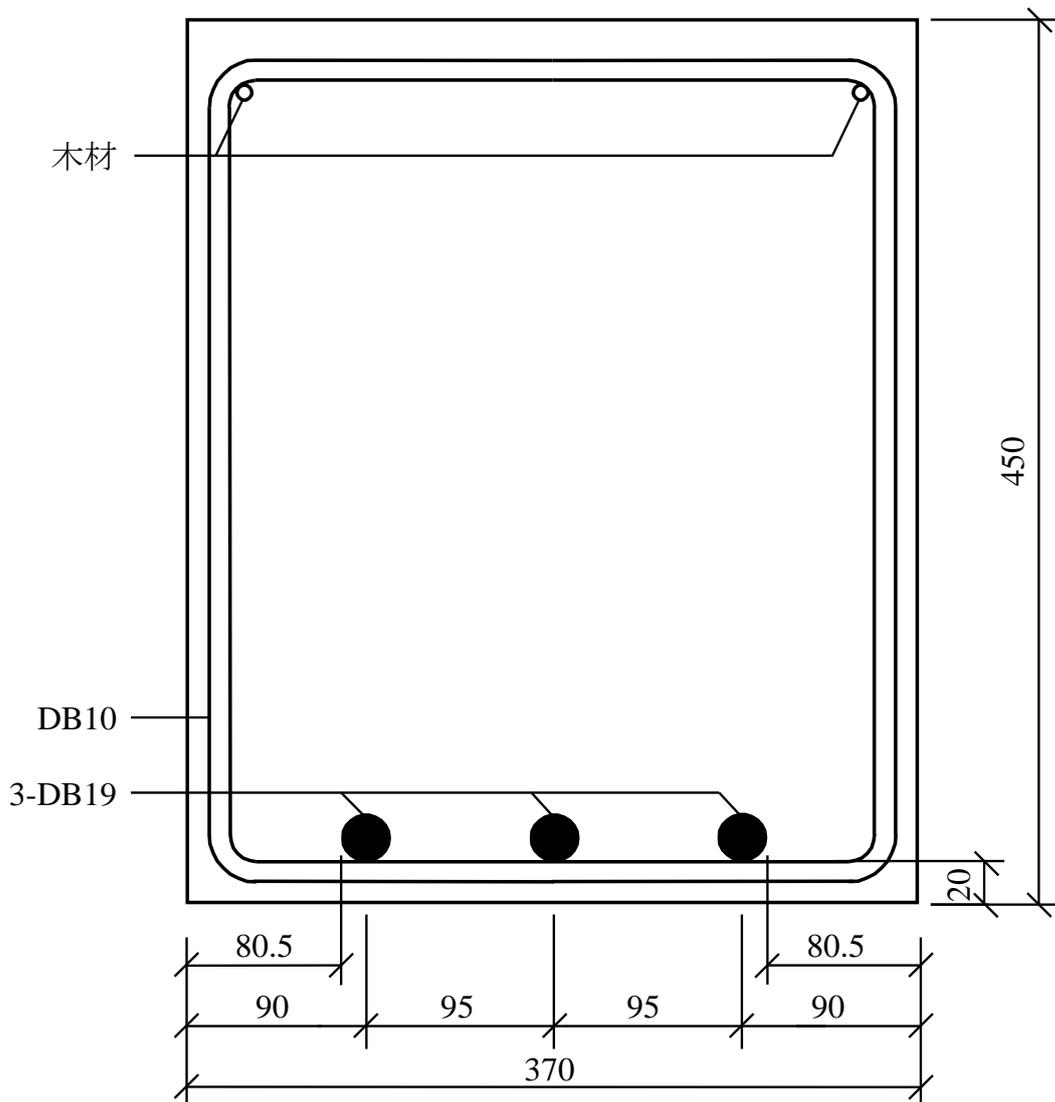


図 4-3 大型 RC はりの断面図 (単位 : mm)

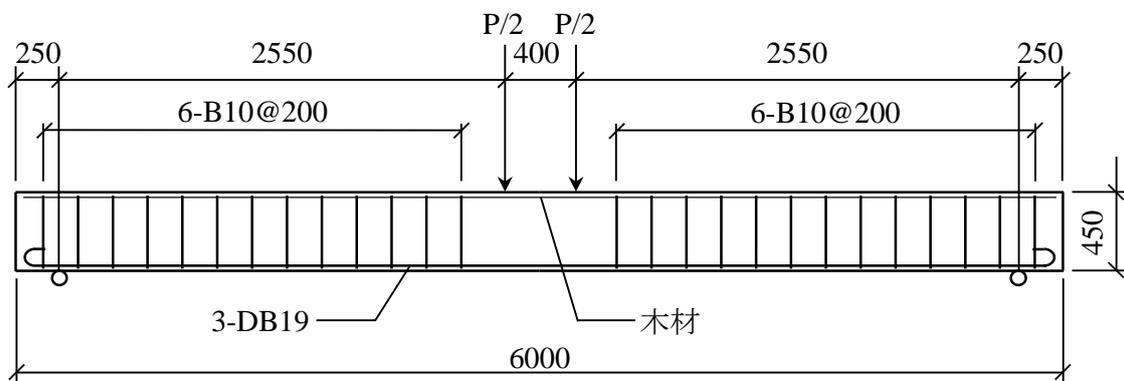


図 4-4 大型 RC はりの側面図 (単位 : mm)

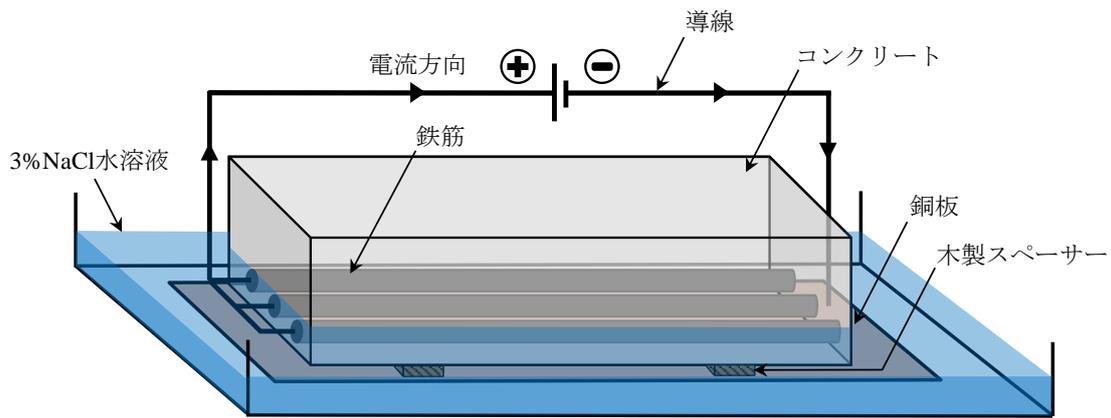


図 4-5 小型 RC はりの電食実験概要

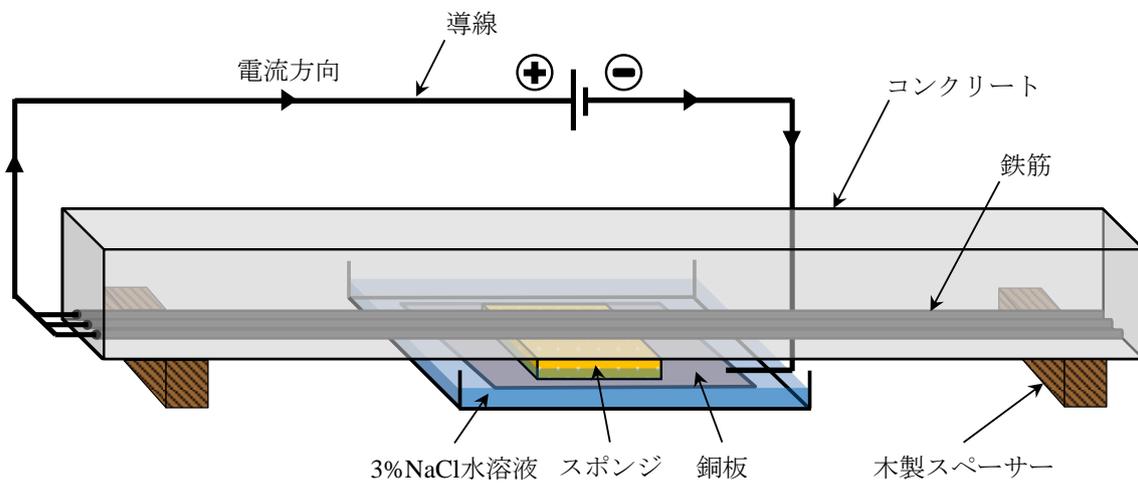


図 4-6 大型 RC はりの電食実験概要

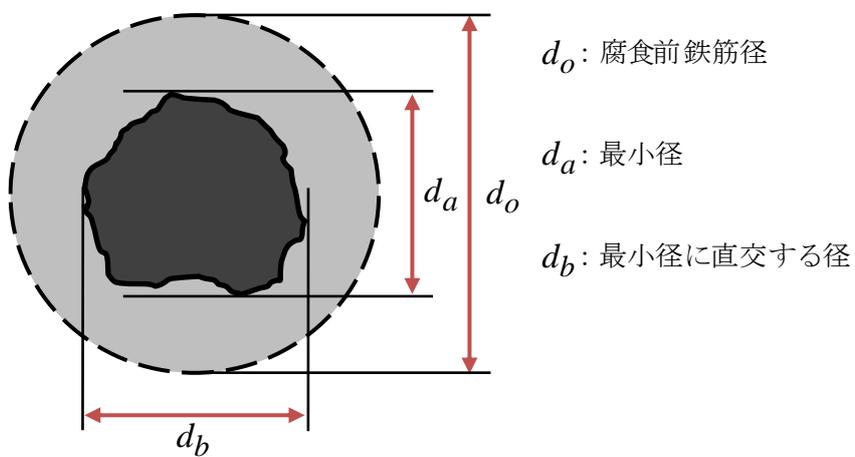


図 4-7 デジタルノギスにより測定する鉄筋の残存径

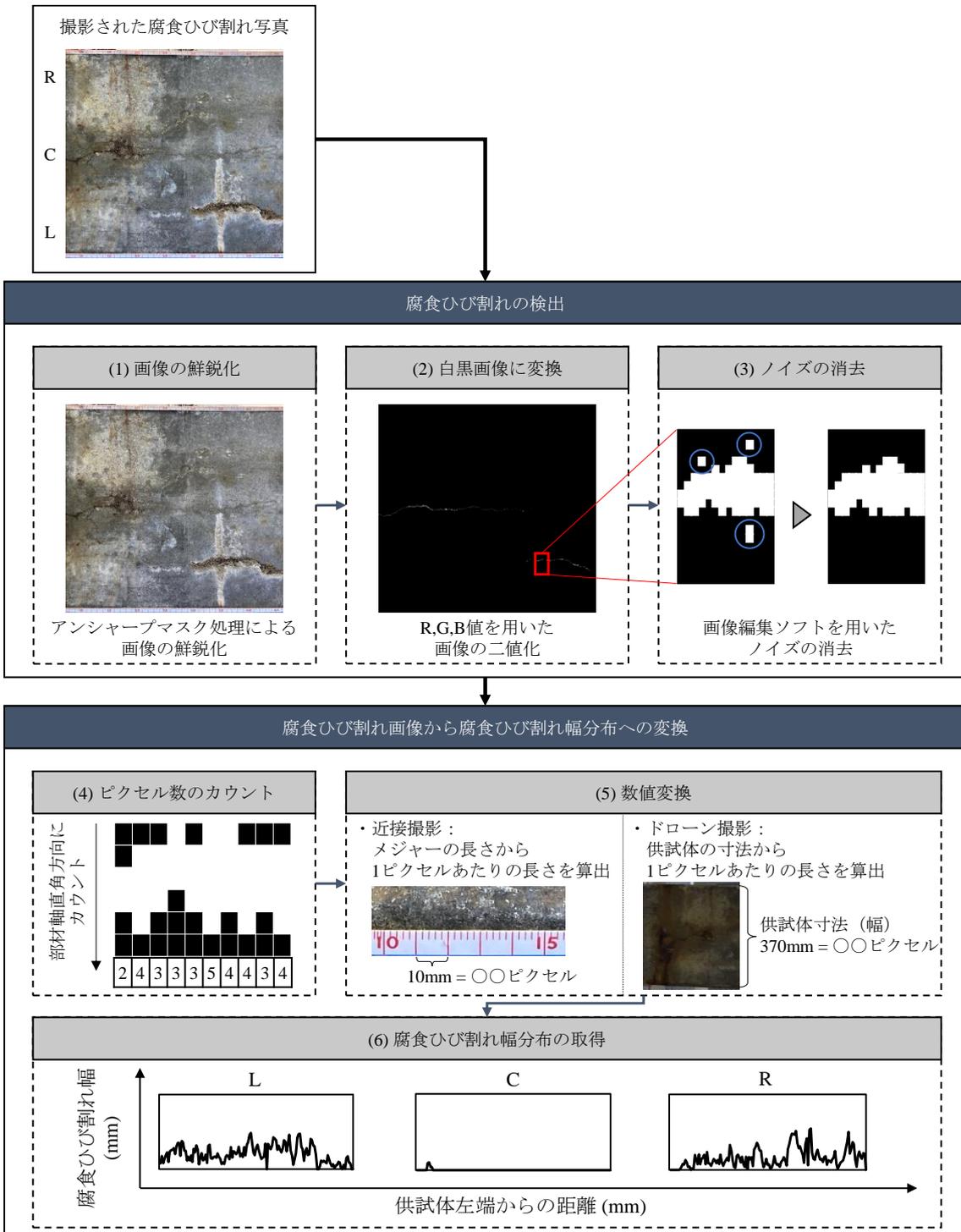
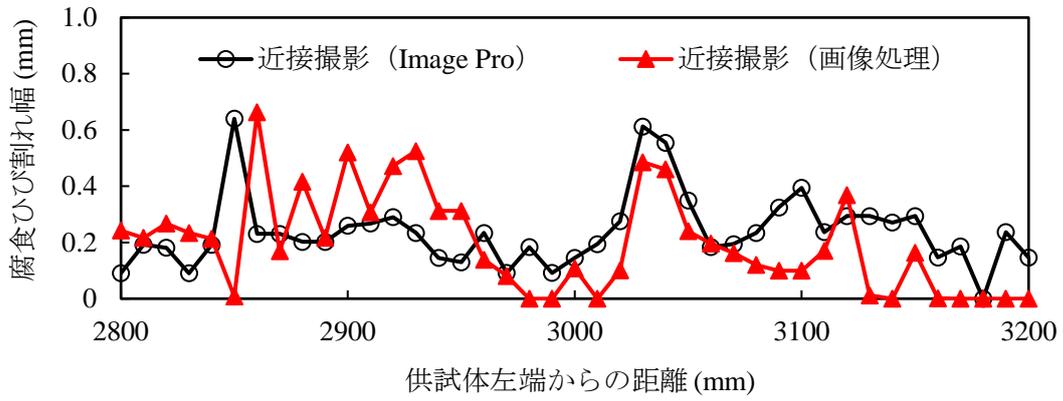
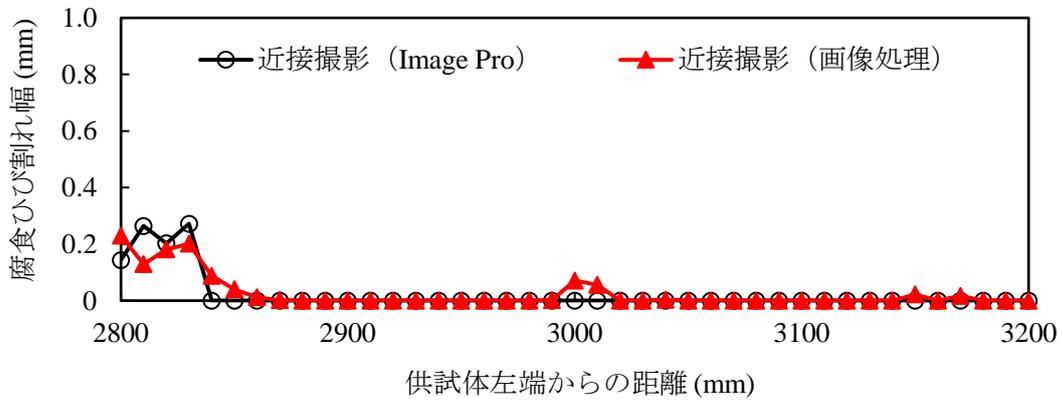


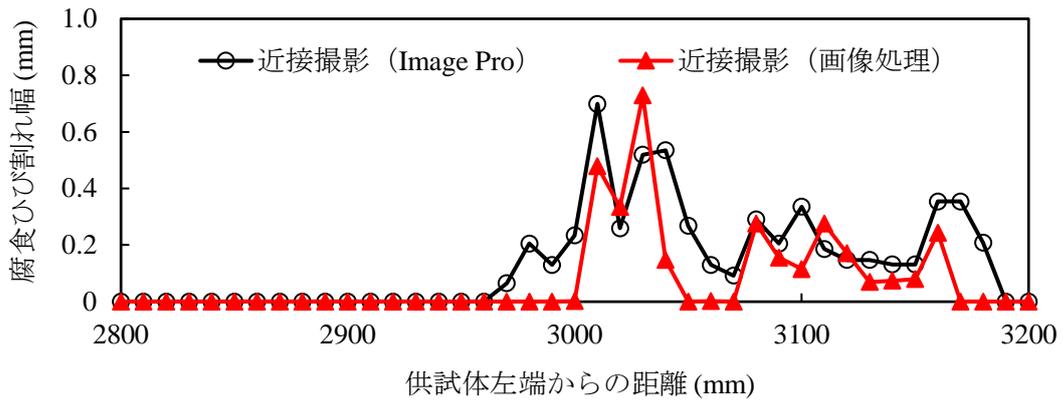
図 4-8 腐食ひび割れ幅の測定フロー



(a-1) L 鉄筋

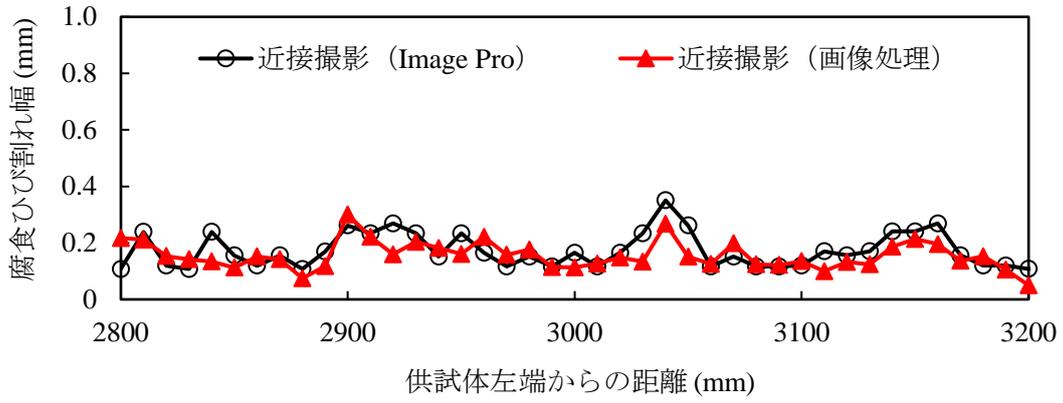


(a-2) C 鉄筋

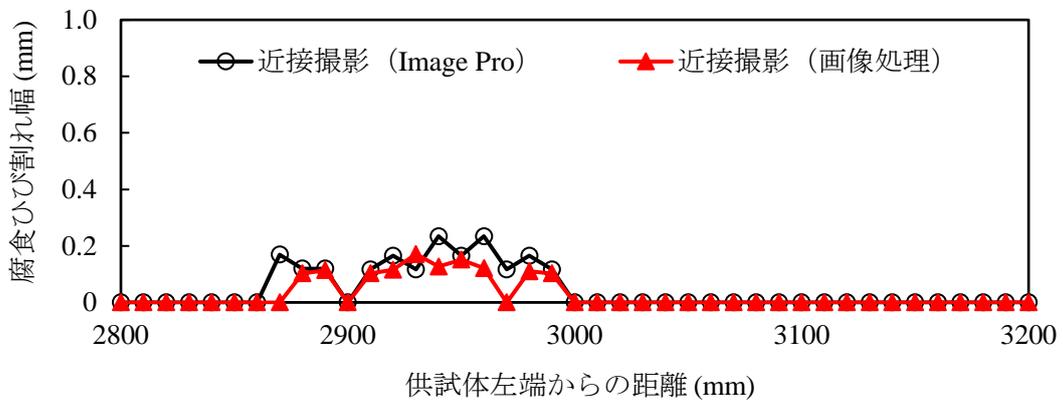


(a-3) R 鉄筋

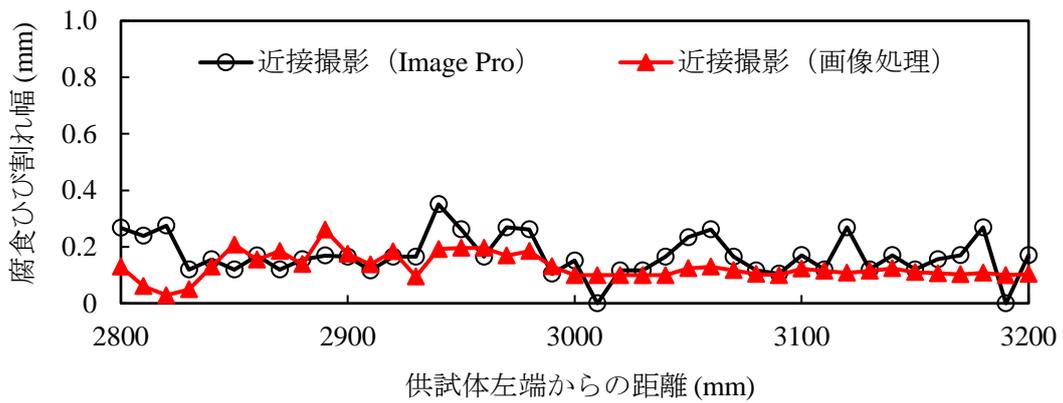
(a) C2



(b-1) L 鉄筋

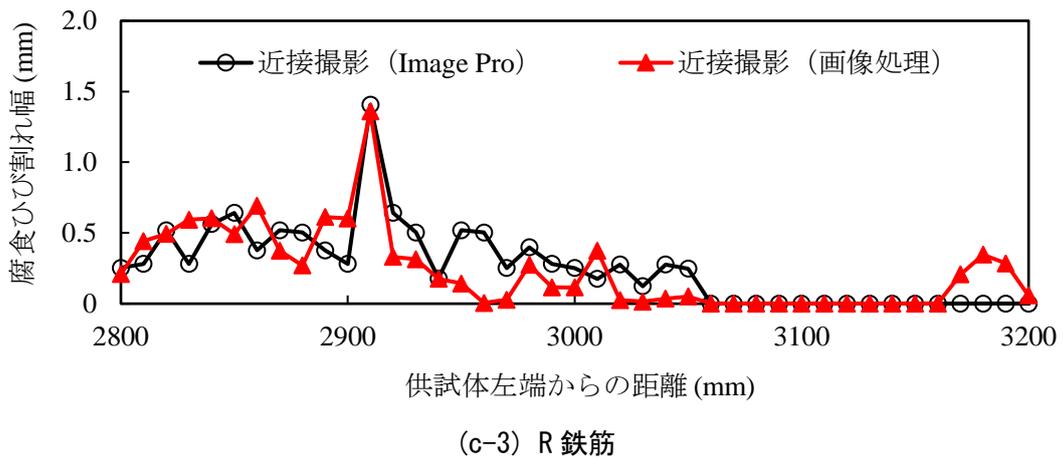
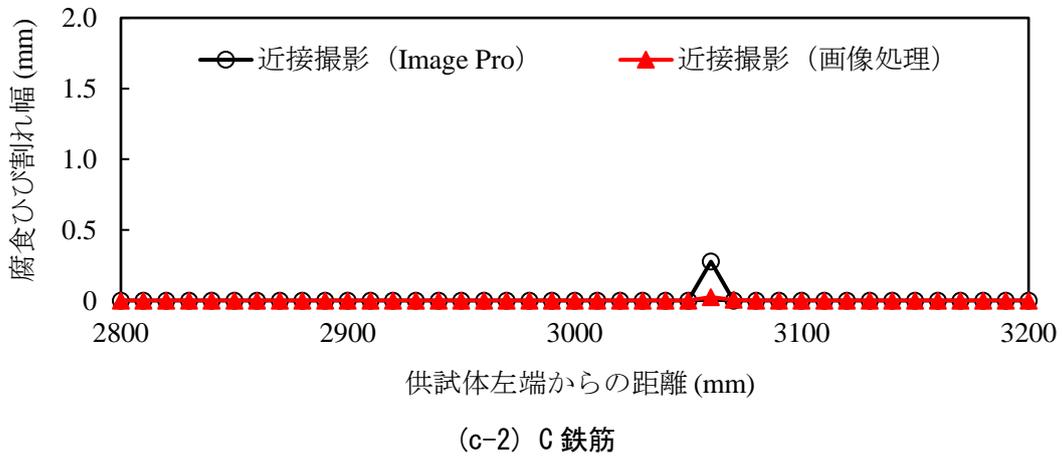
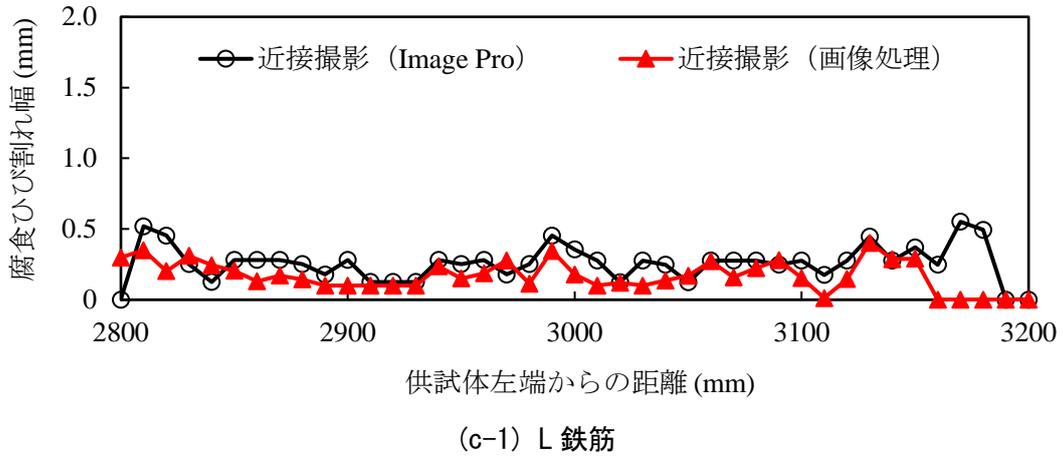


(b-2) C 鉄筋



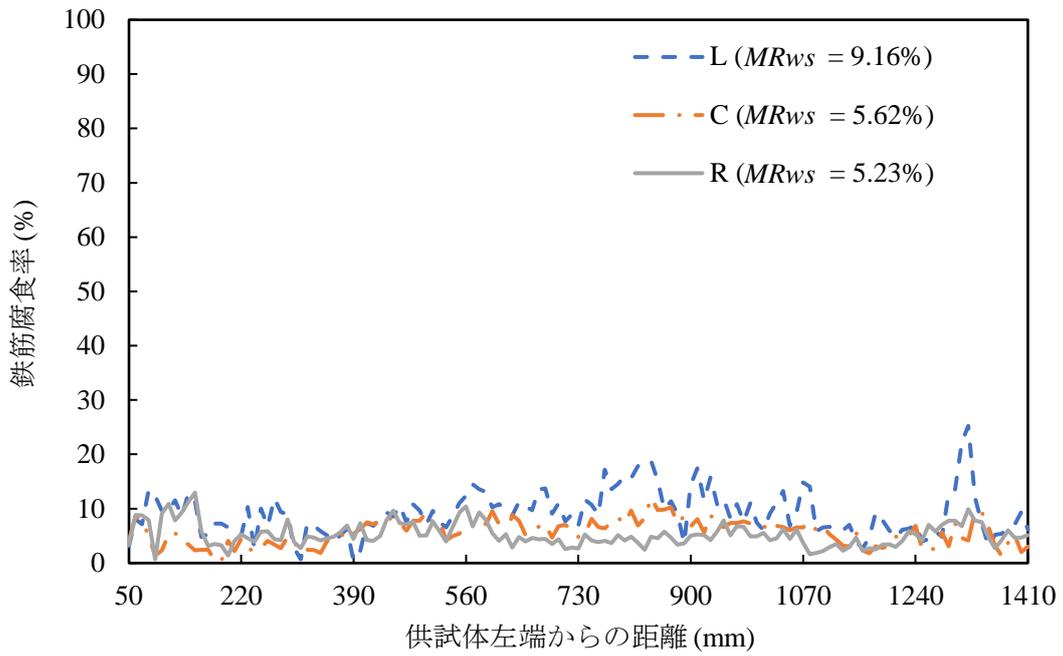
(b-3) R 鉄筋

(b) C3

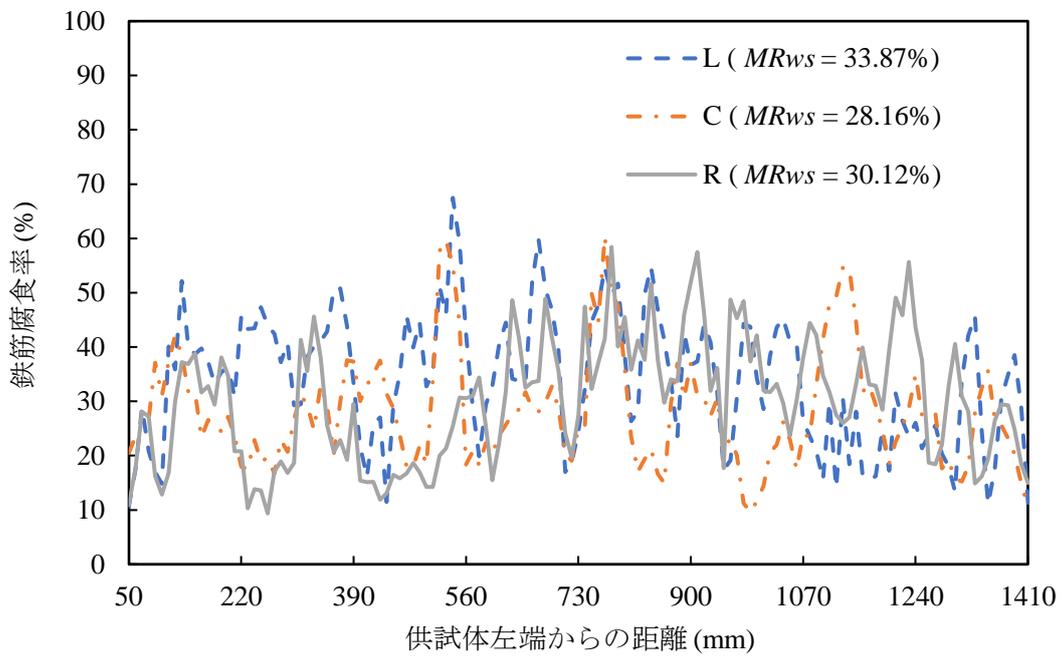


(c) C4

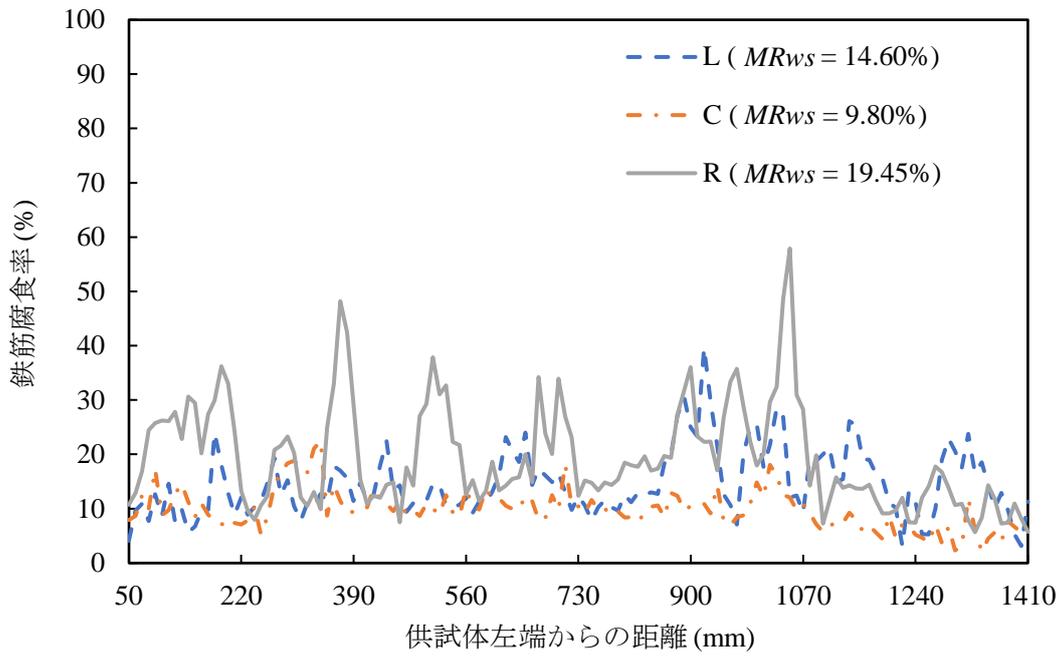
図 4-9 Image Pro とデジタル画像処理によって得られた腐食ひび割れ幅分布の比較



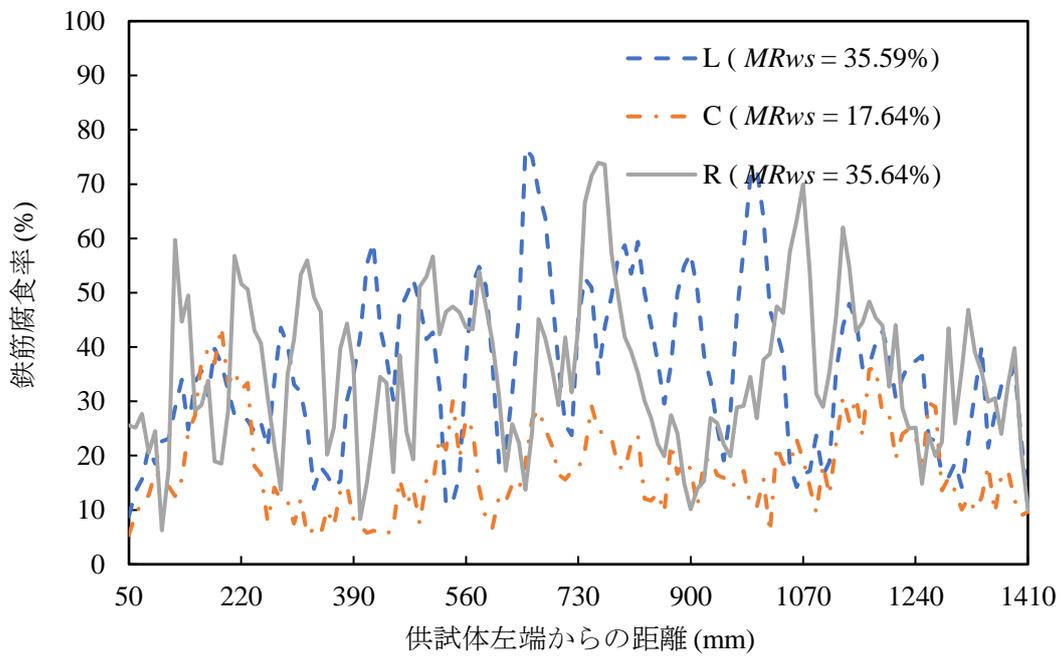
(a) A1-13-100-10



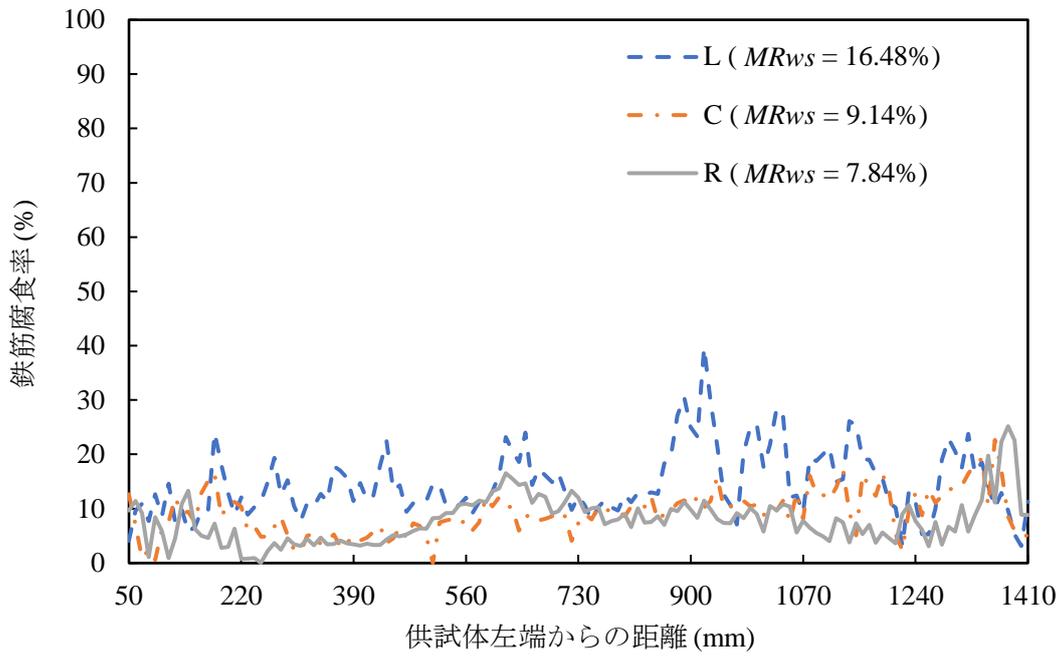
(b) A1-13-100-20



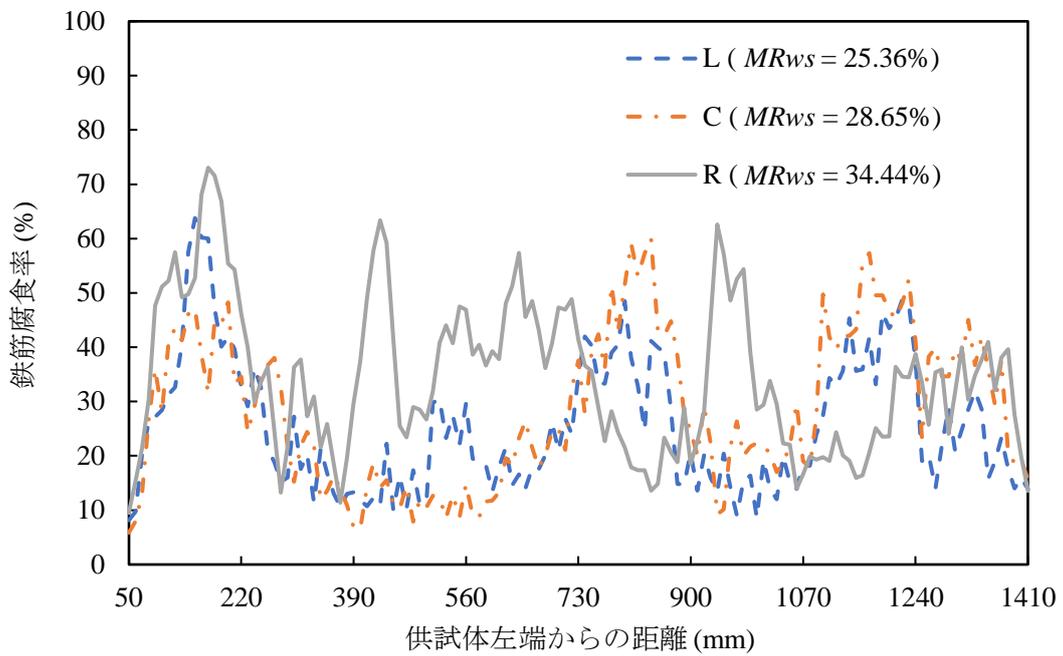
(c) A2-13-100-10



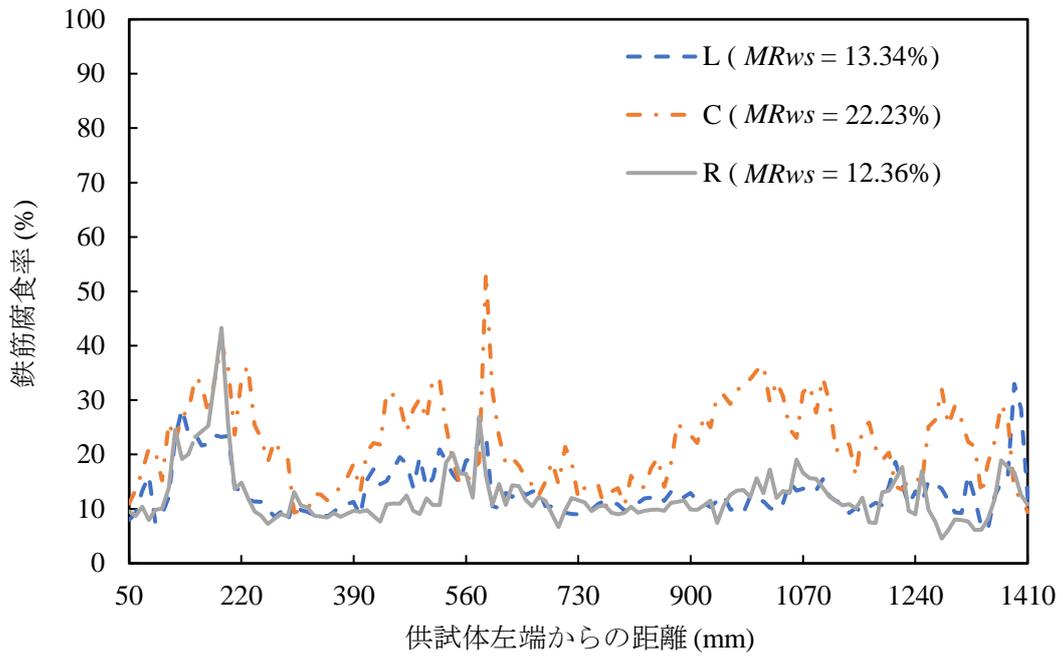
(d) A2-13-100-20



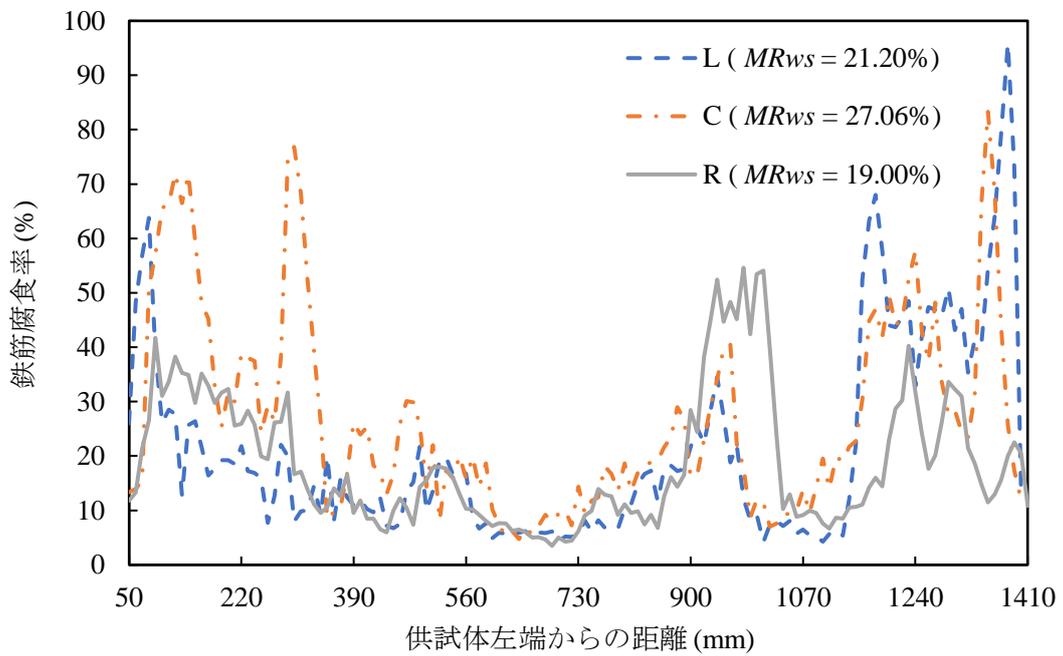
(e) B1-13-100-10



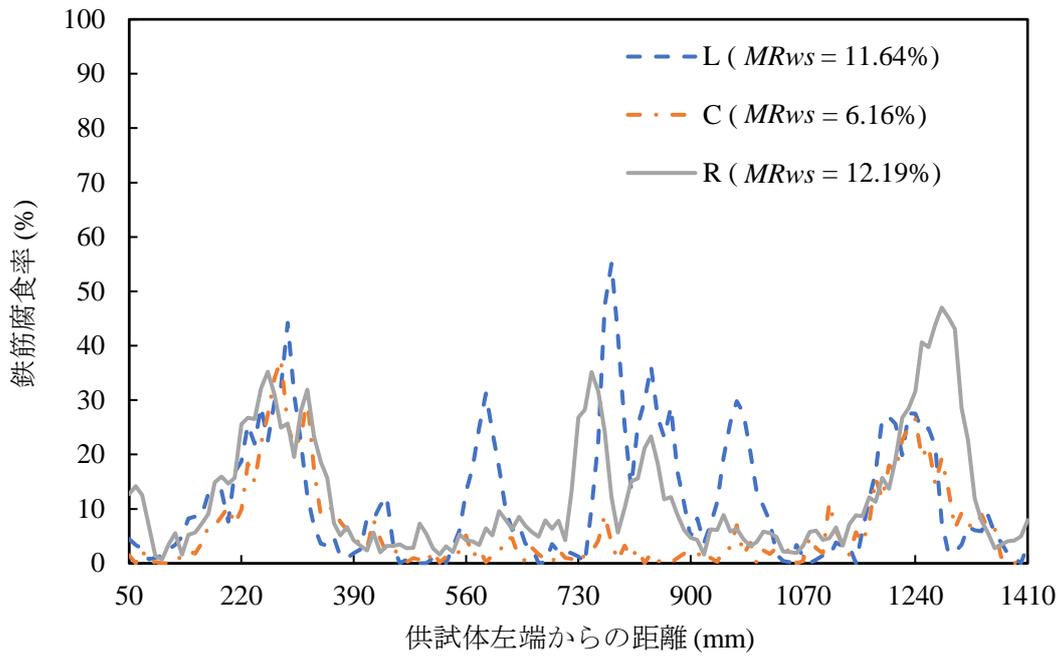
(f) B1-13-100-20



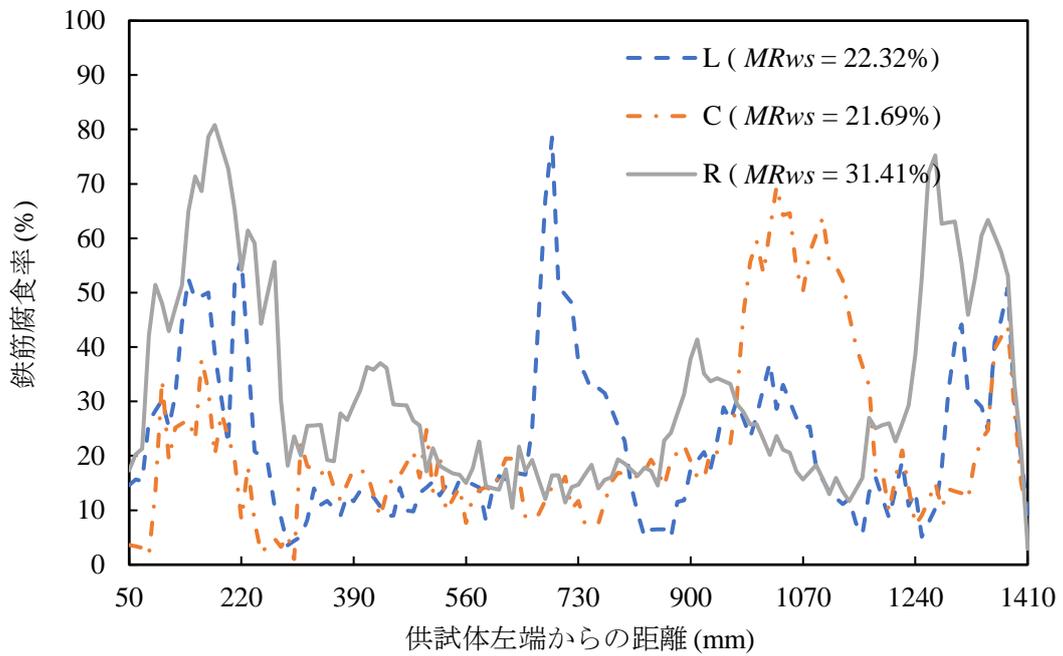
(g) B1-13-500-10



(h) B1-13-500-20

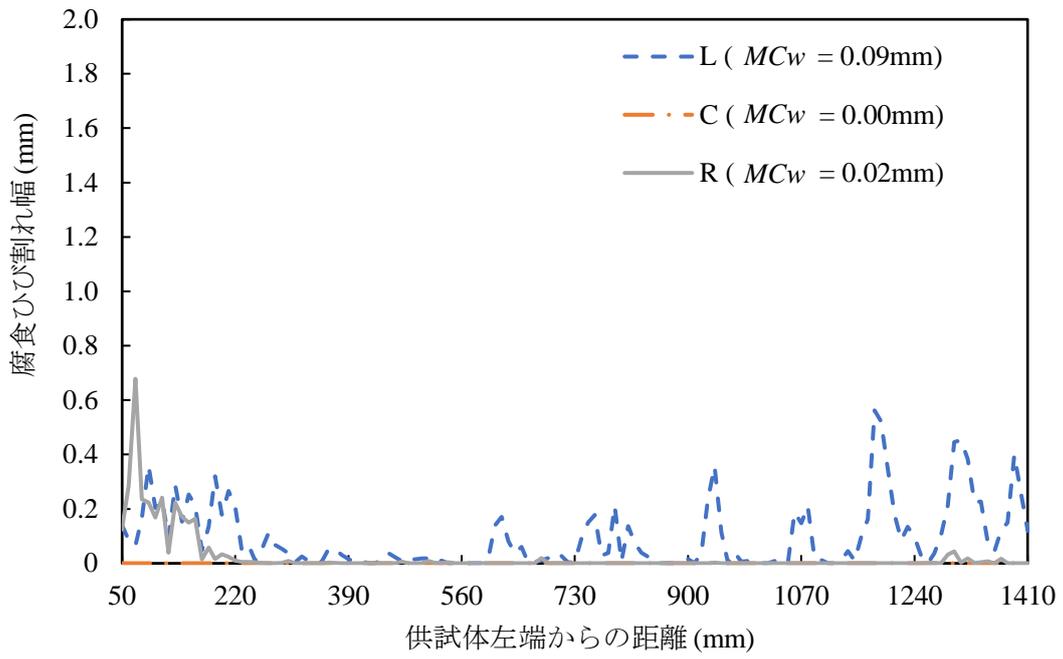


(i) B1-19-100-10

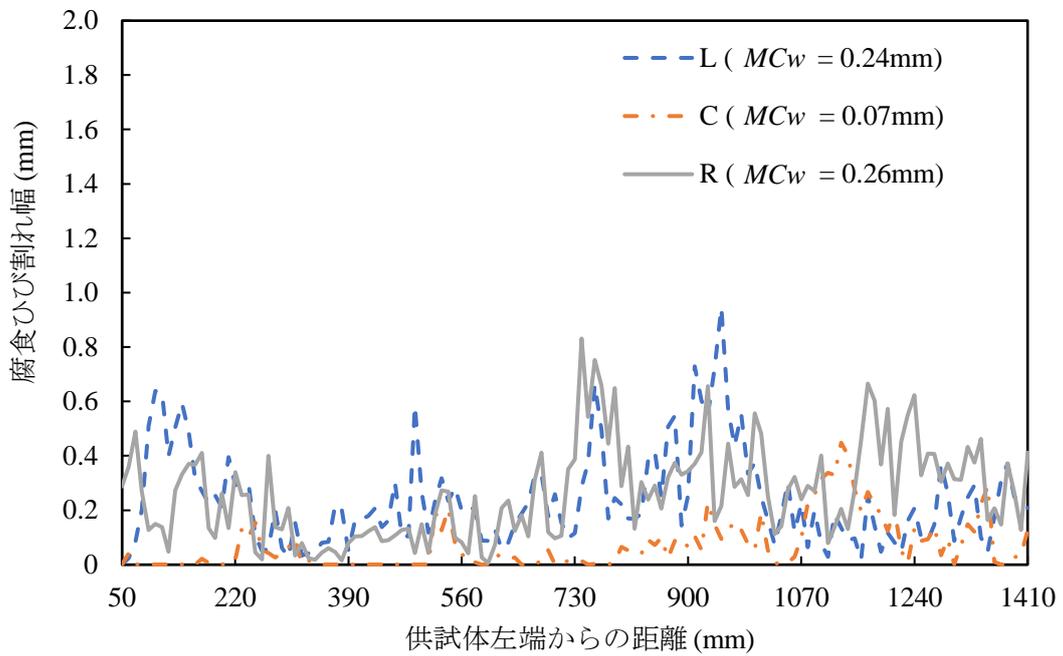


(j) B1-19-100-20

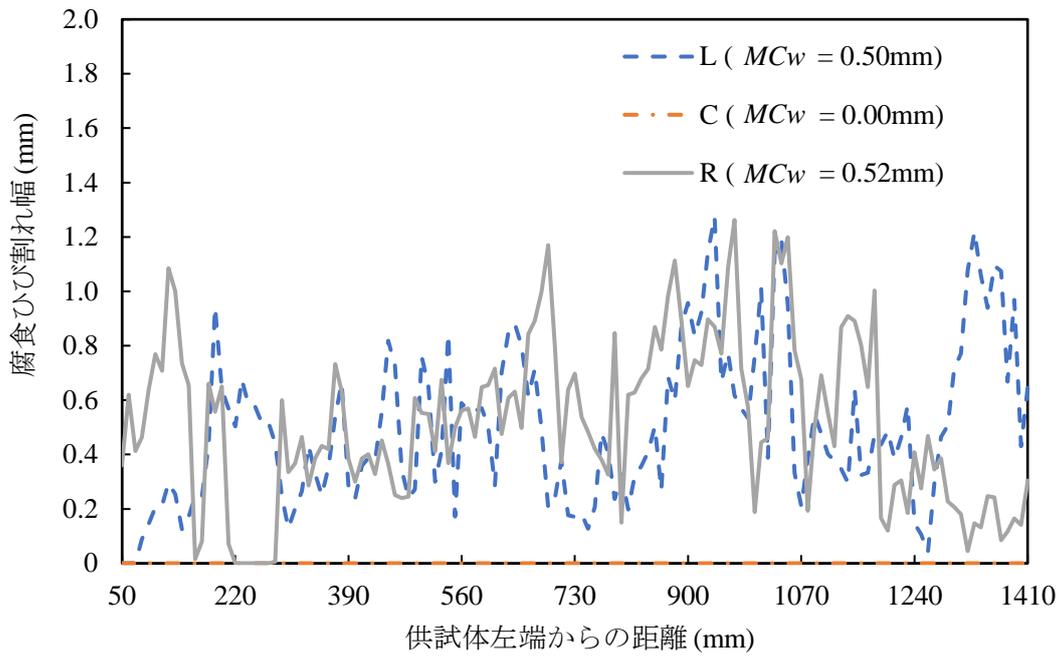
図 4-10 小型 RC はりの鉄筋腐食率分布



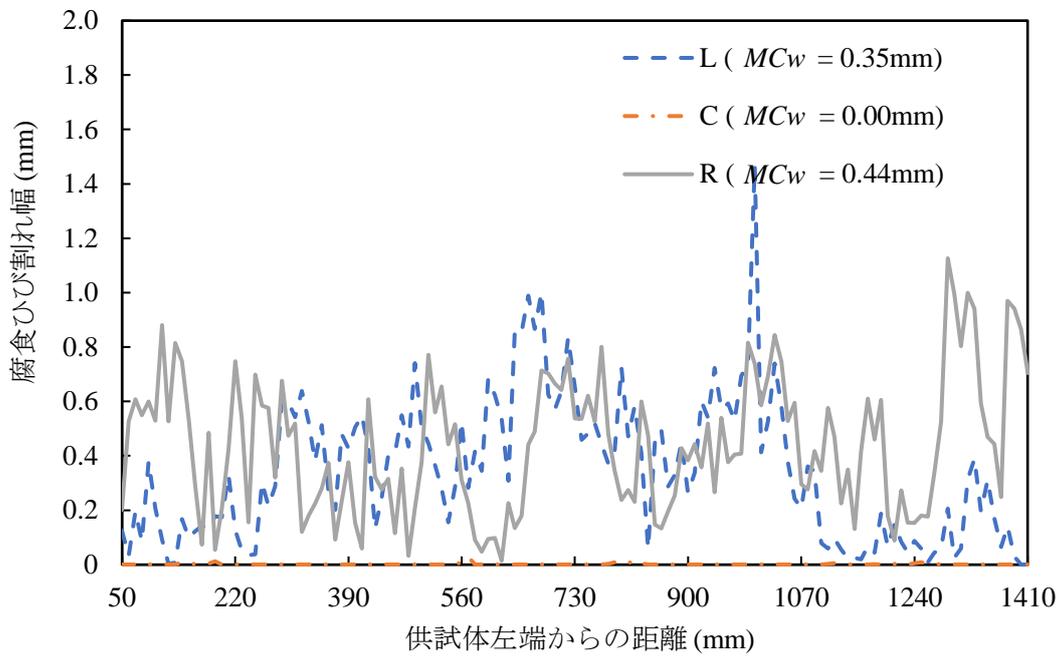
(a) A1-13-100-10



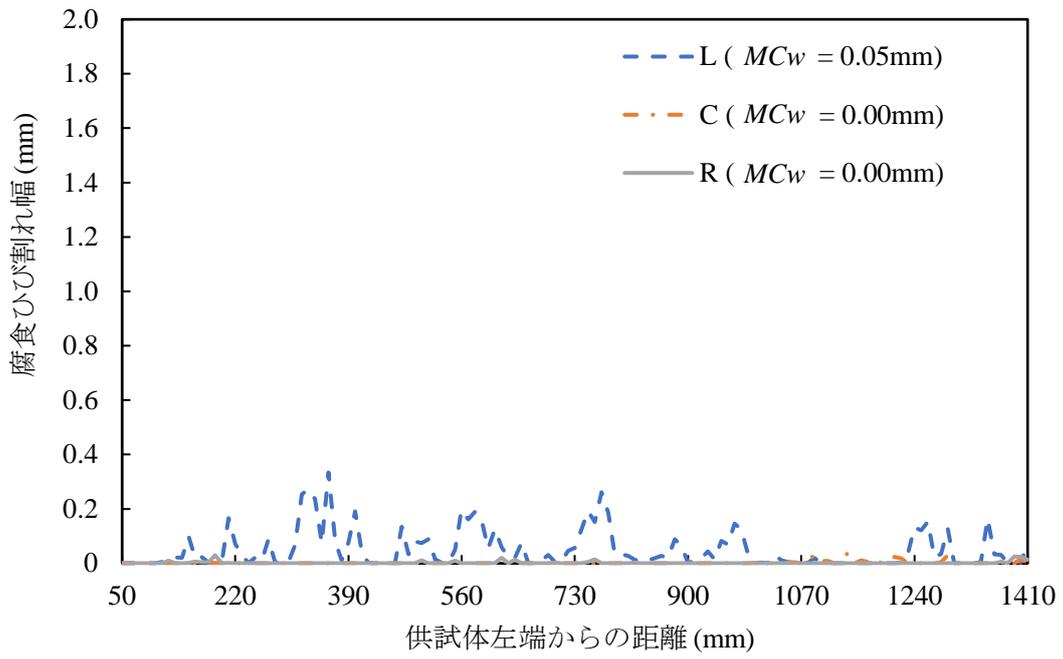
(b) A1-13-100-20



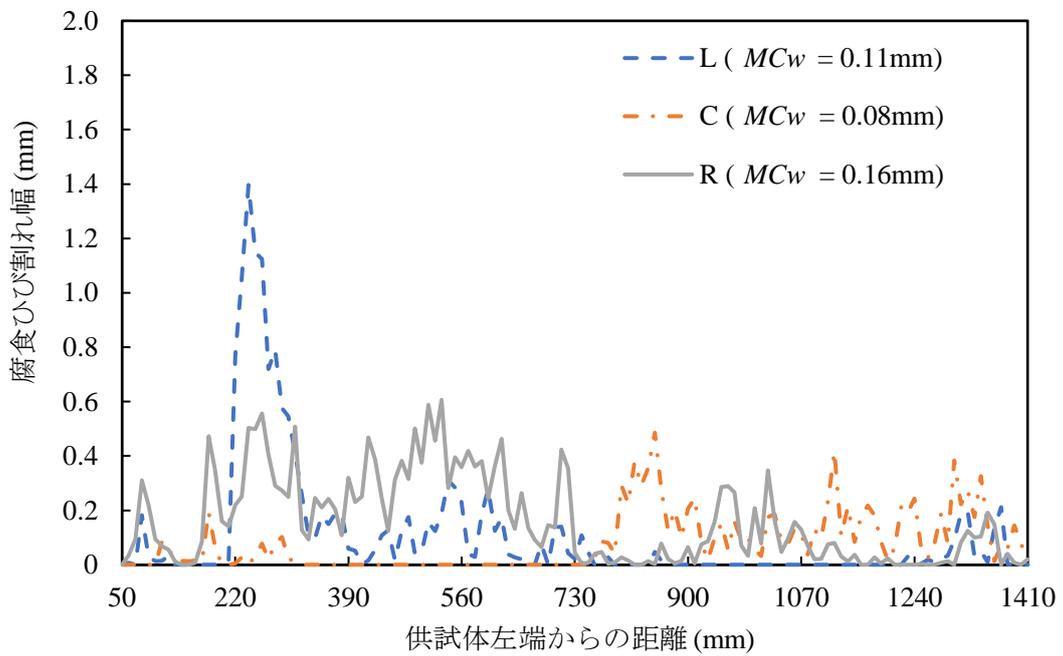
(c) A2-13-100-10



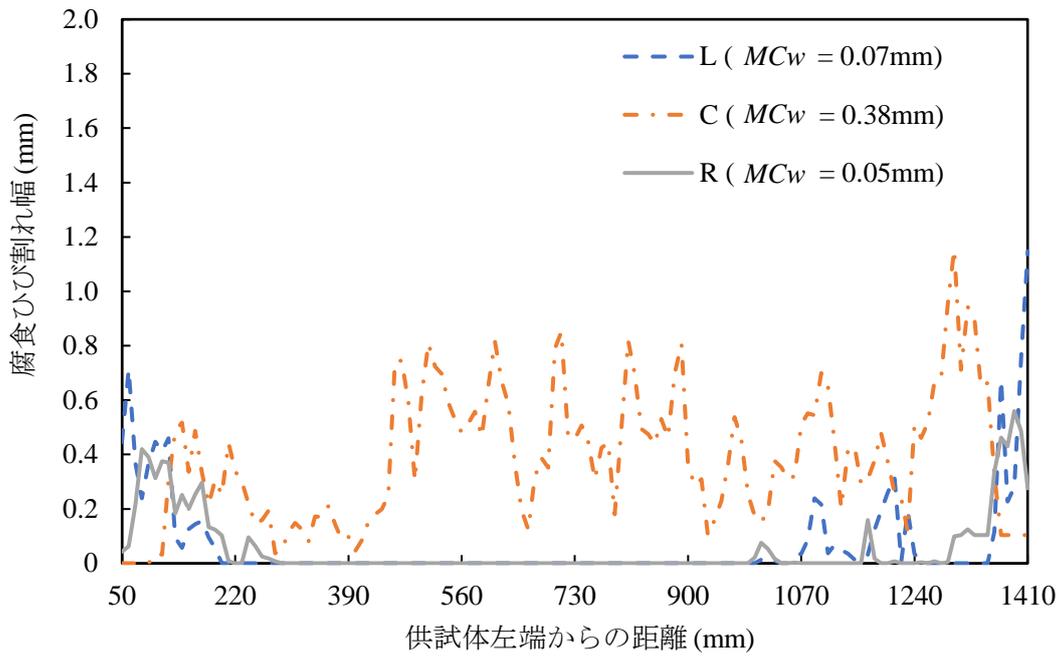
(d) A2-13-100-20



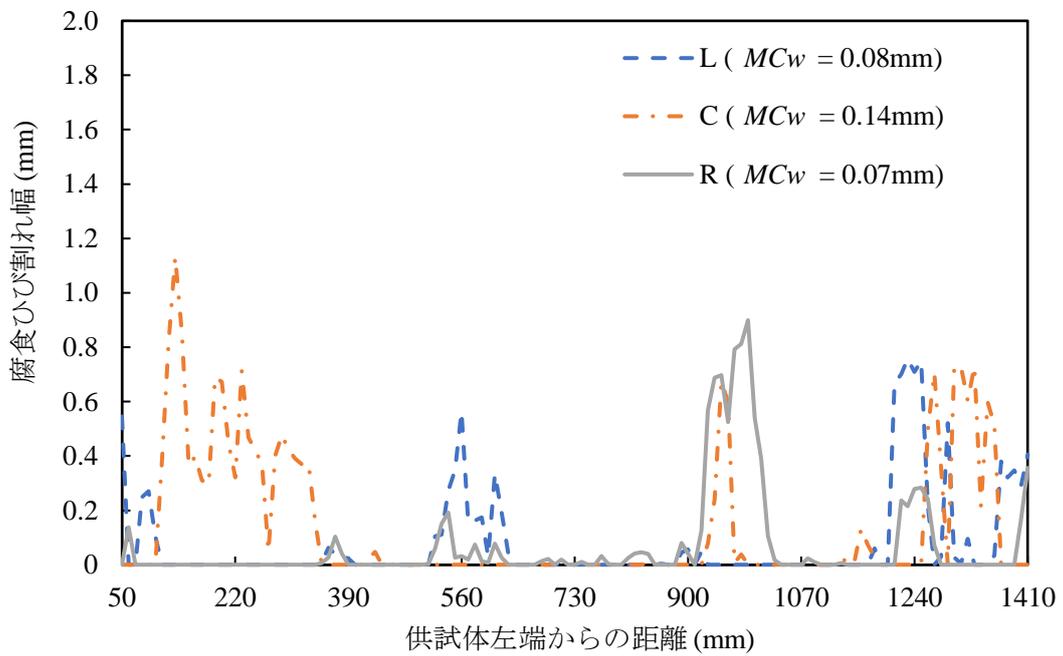
(e) B1-13-100-10



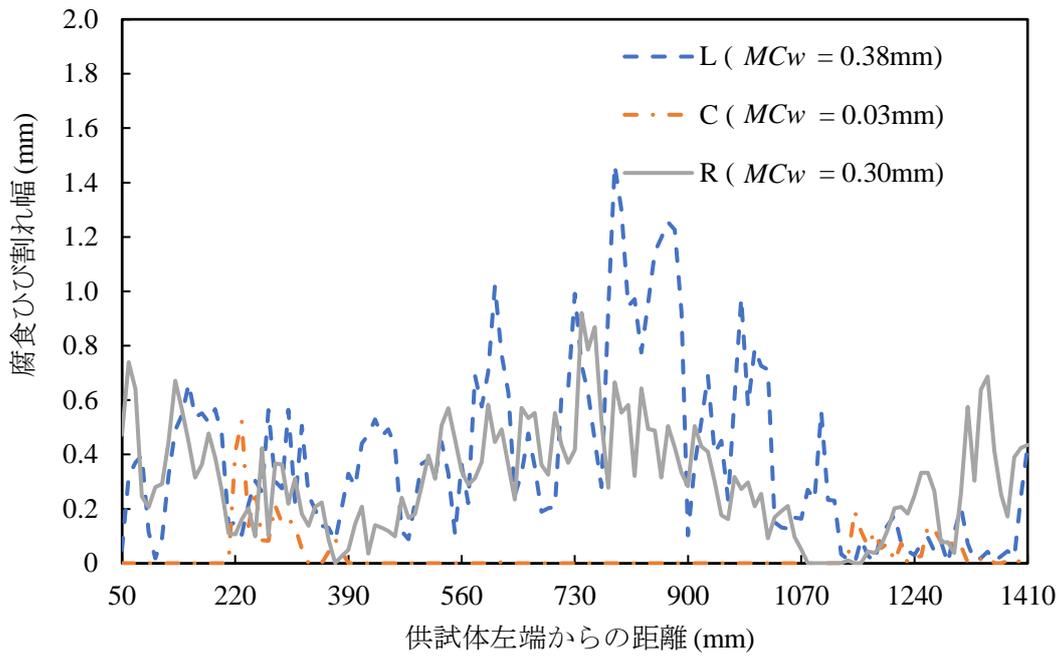
(f) B1-13-100-20



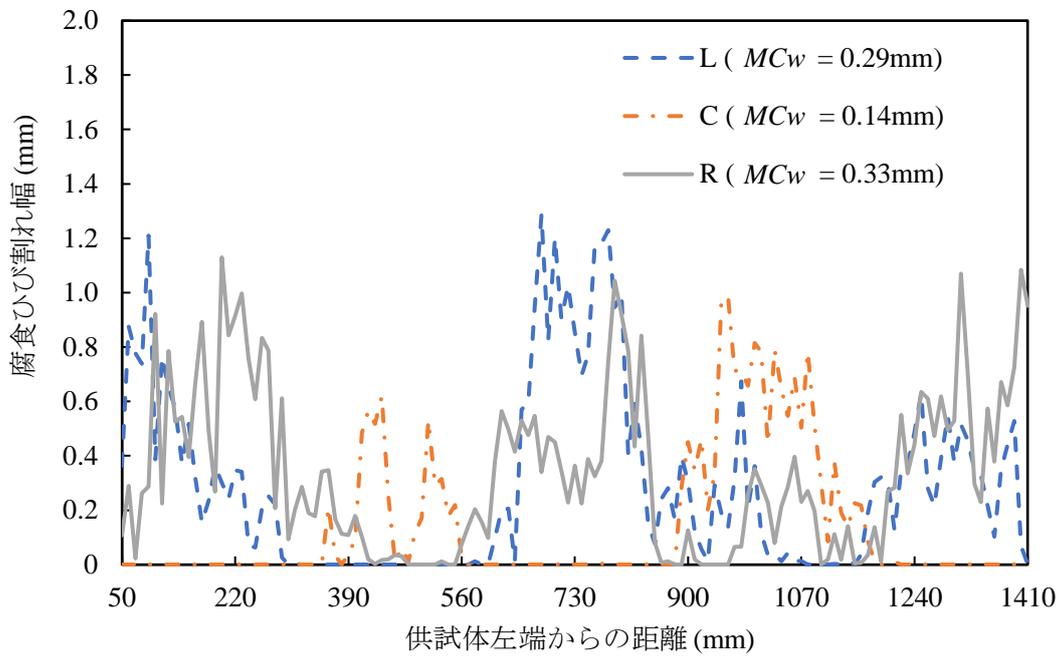
(g) B1-13-500-10



(h) B1-13-500-20

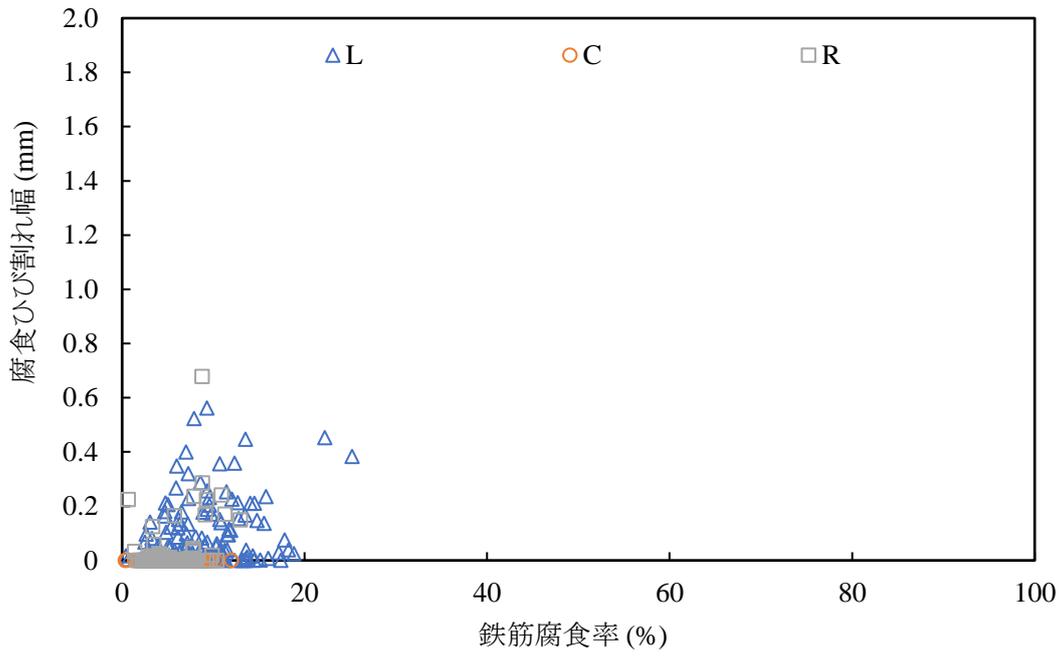


(i) B1-19-100-10

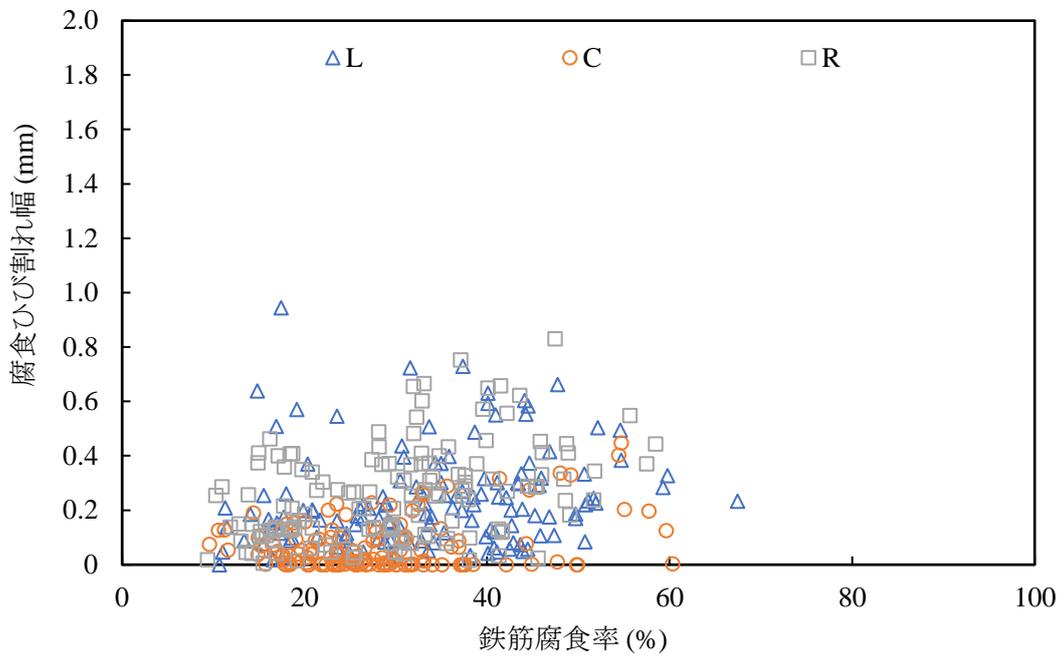


(j) B1-19-100-20

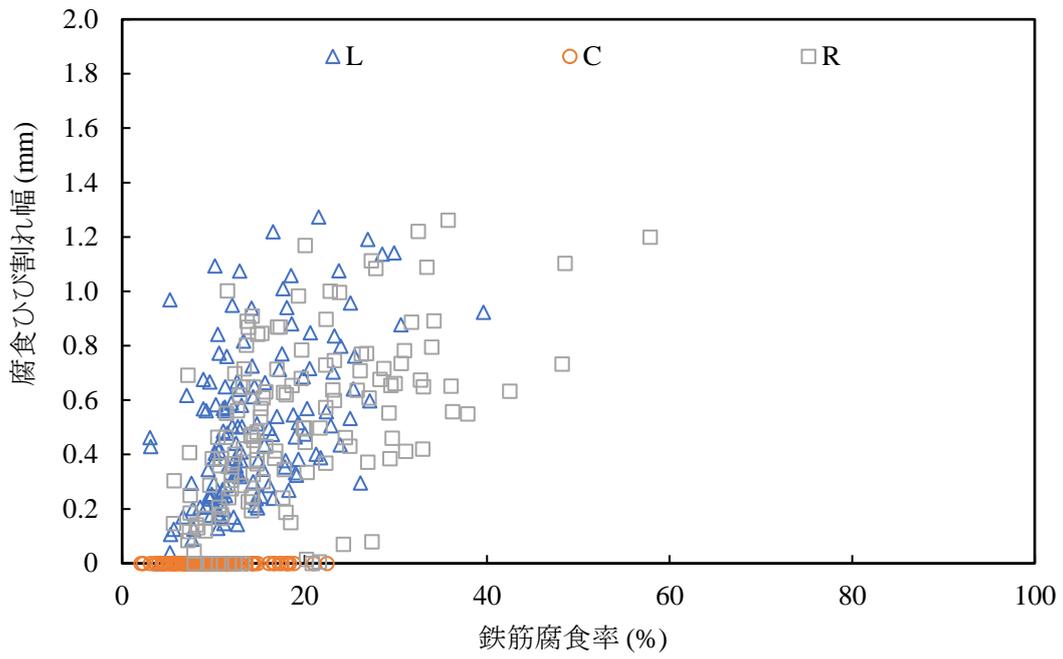
図 4-11 小型 RC はりの各鉄筋下に生じた腐食ひび割れ幅分布



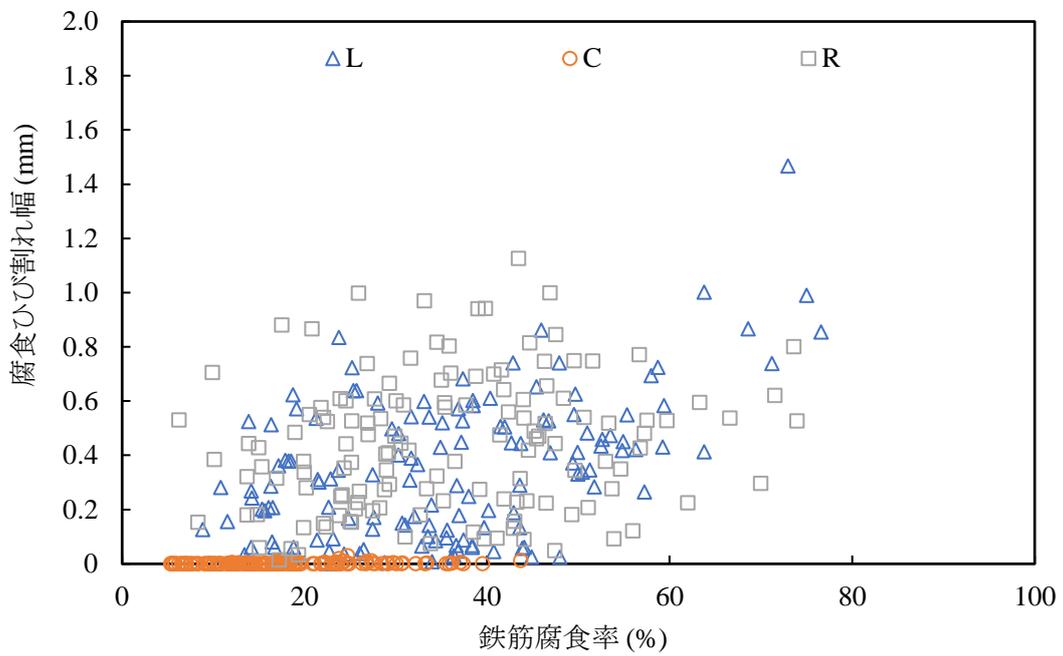
(a) A1-13-100-10



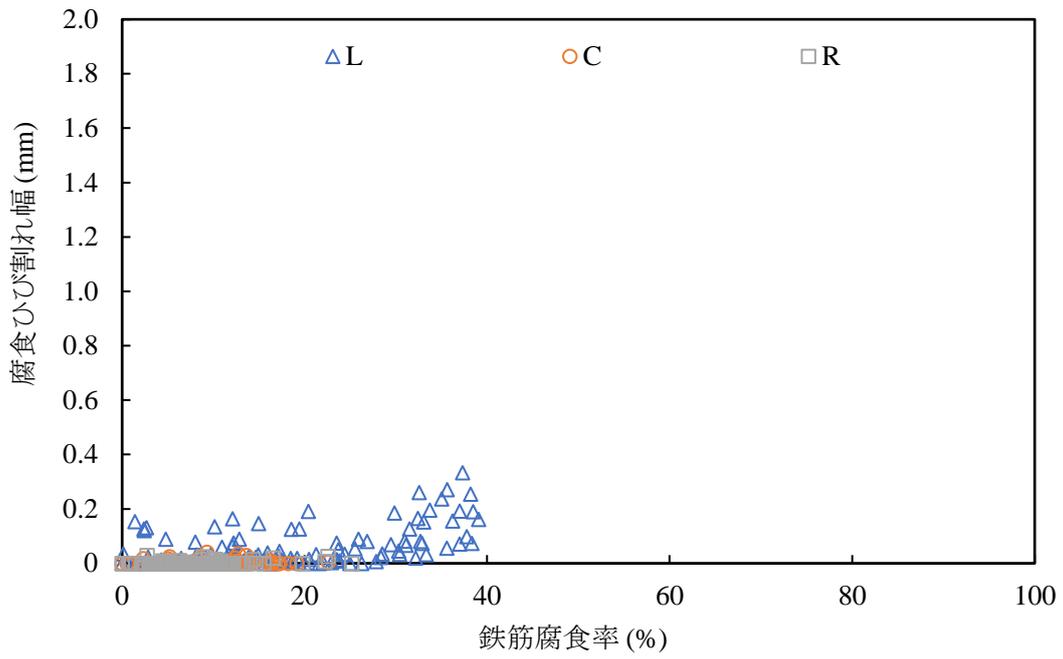
(b) A1-13-100-20



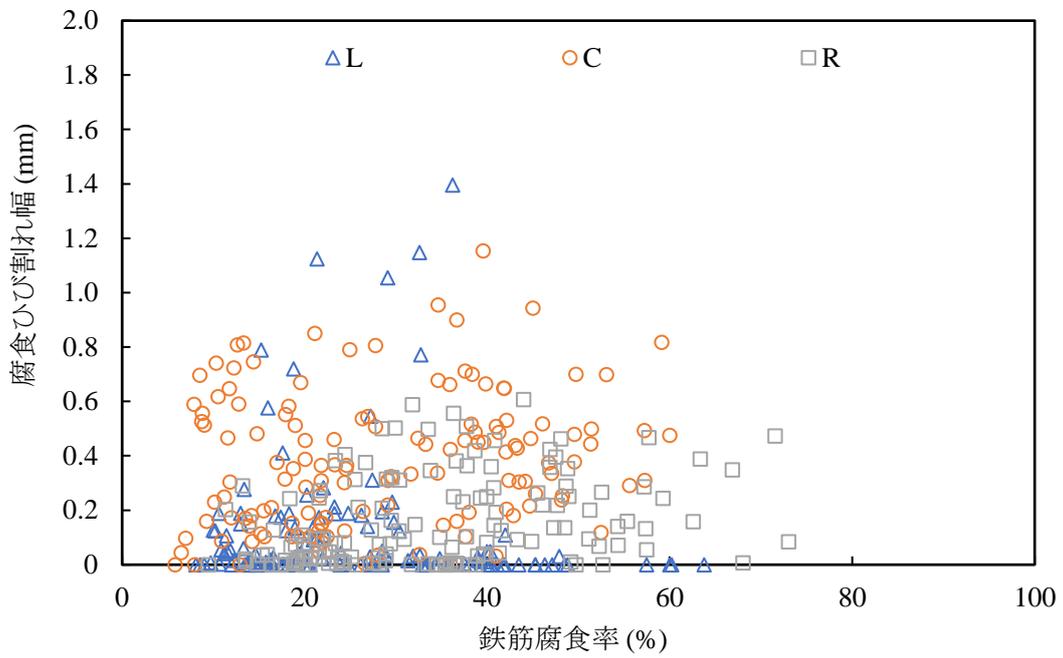
(c) A2-13-100-10



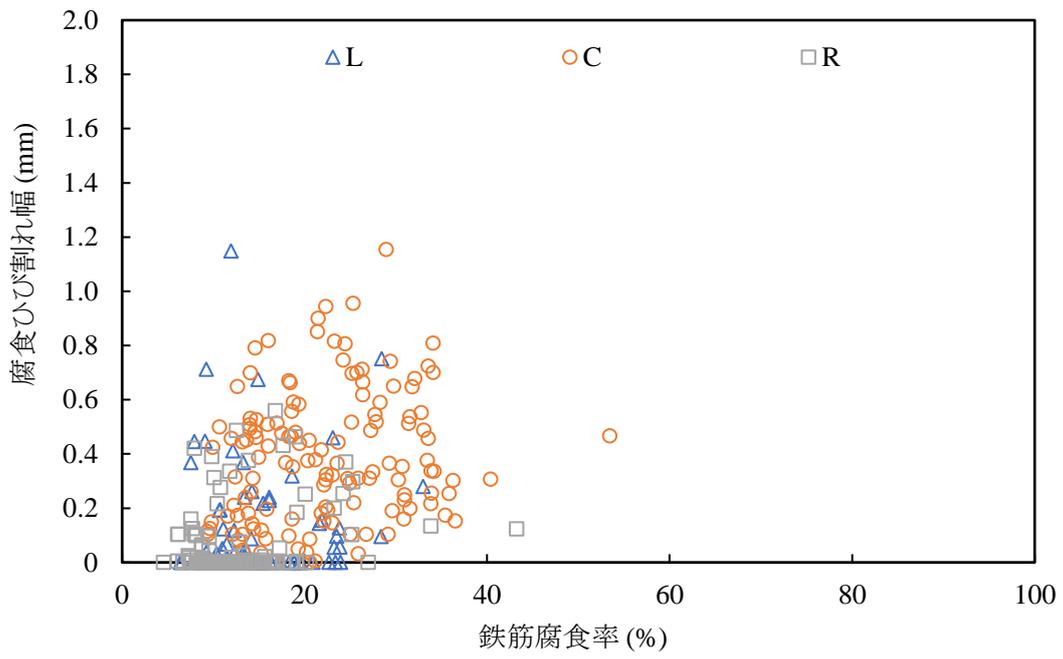
(d) A2-13-100-20



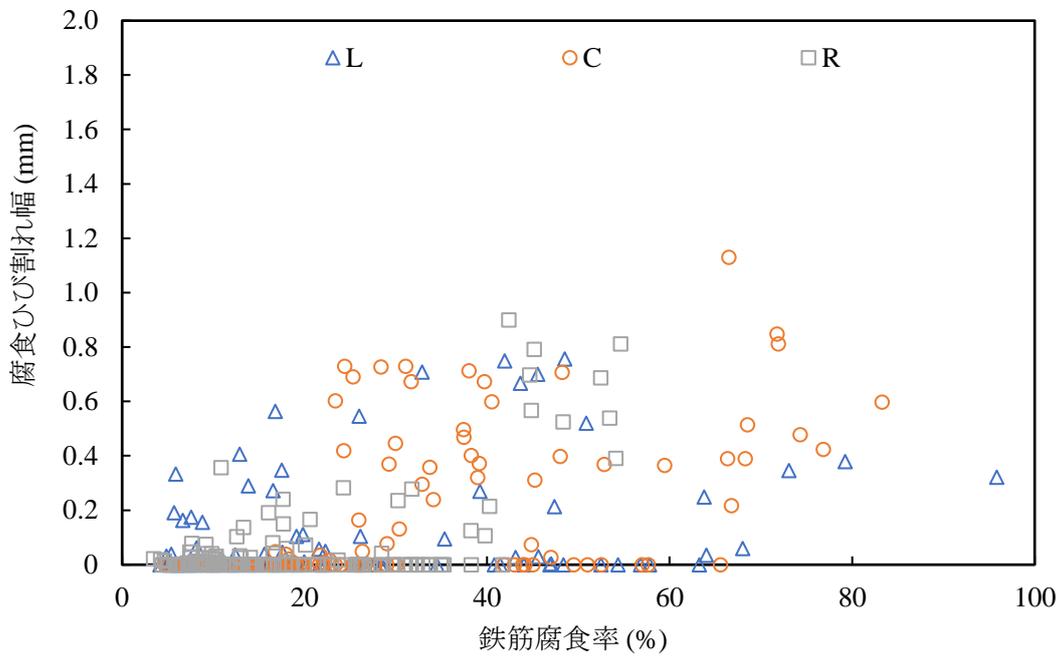
(e) B1-13-100-10



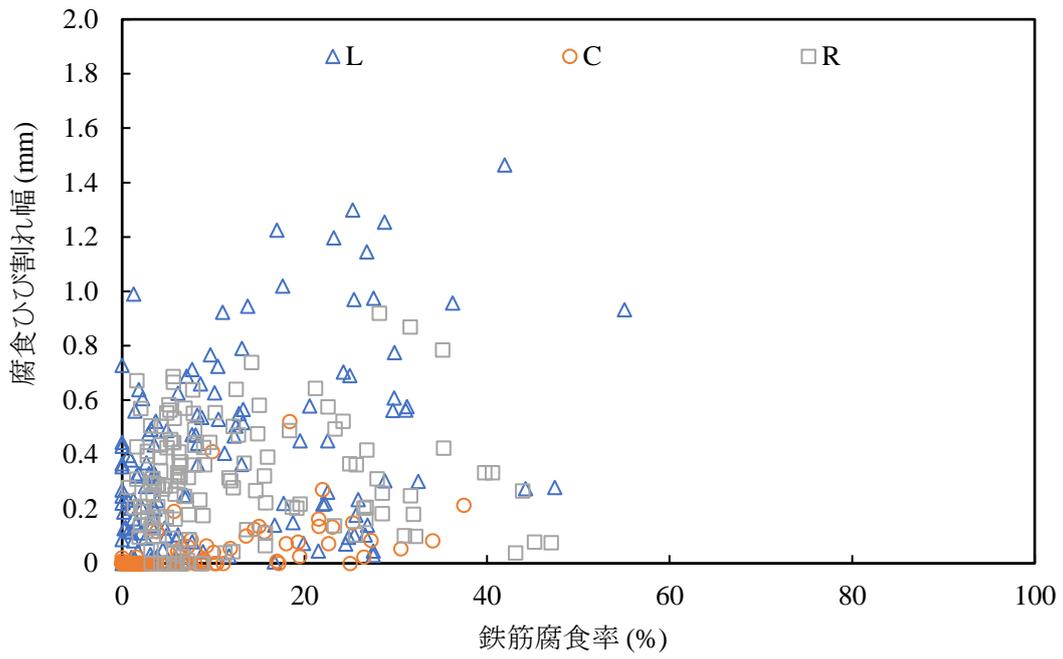
(f) B1-13-100-20



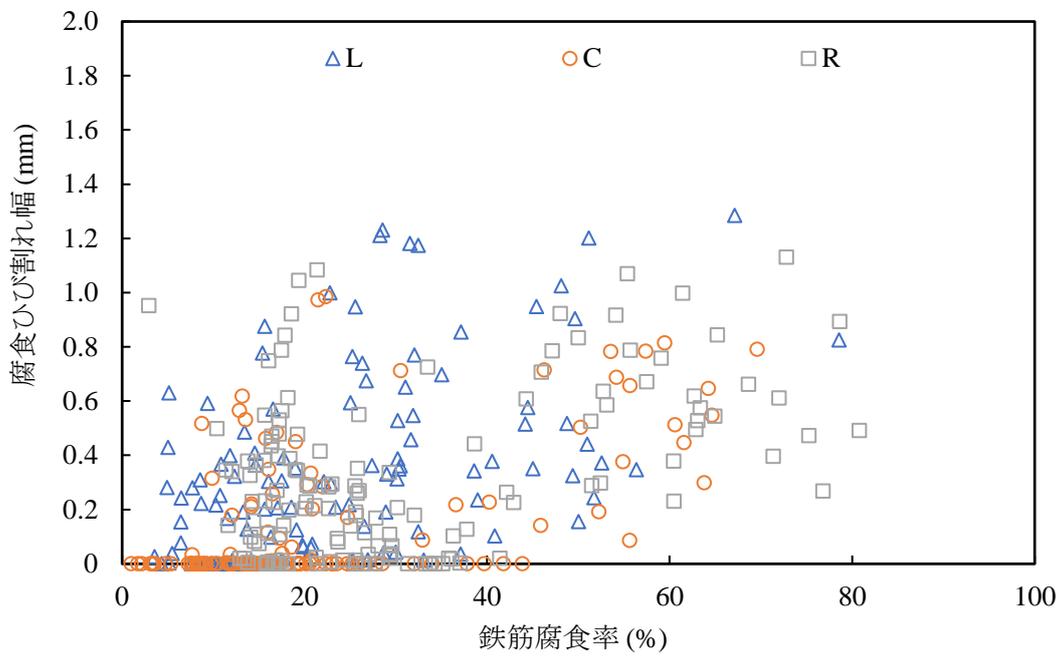
(g) B1-13-500-10



(h) B1-13-500-20

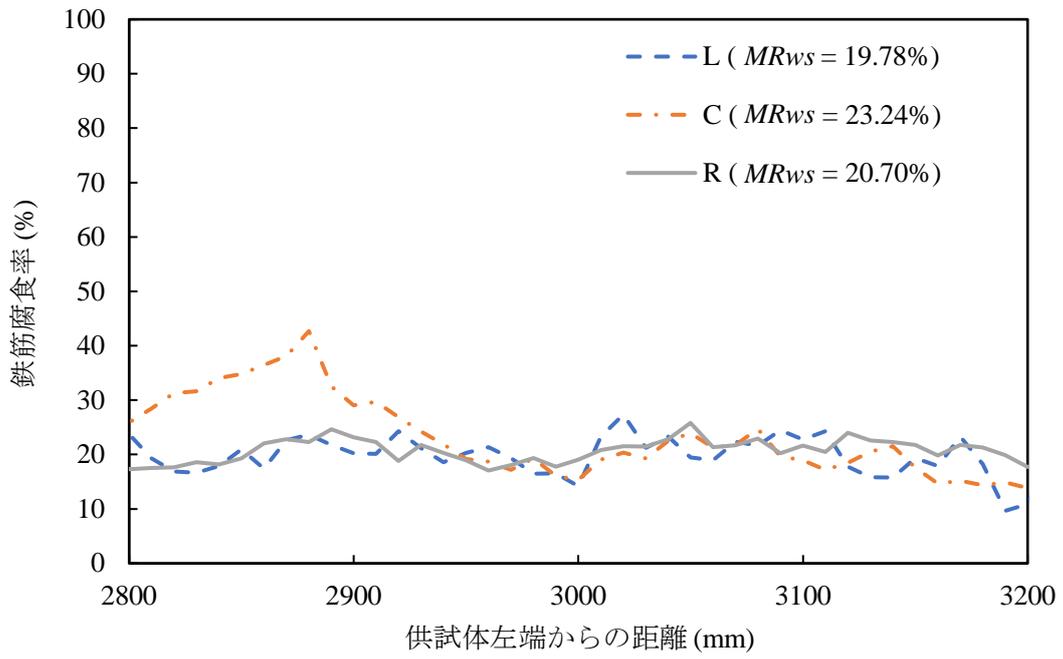


(i) B1-19-100-10

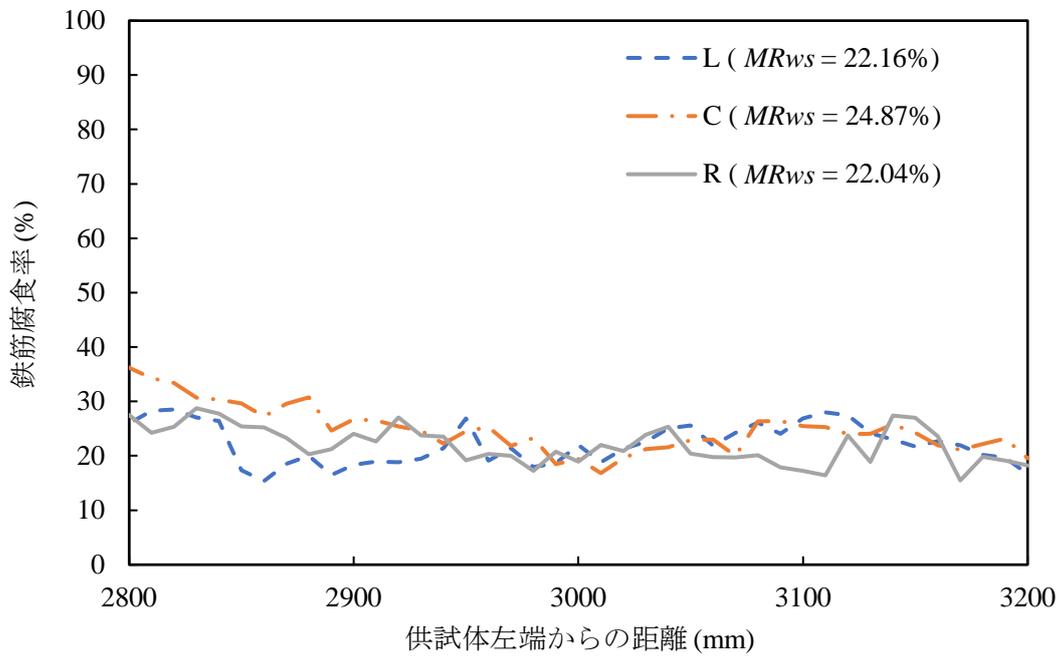


(j) B1-19-100-20

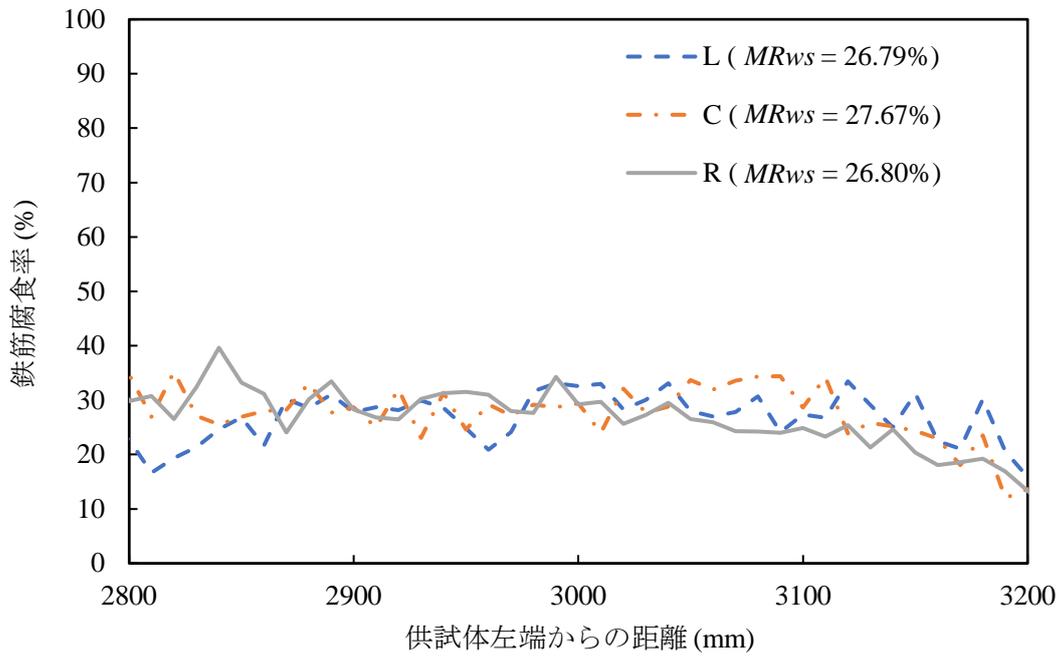
図 4-12 小型 RC はりの鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係



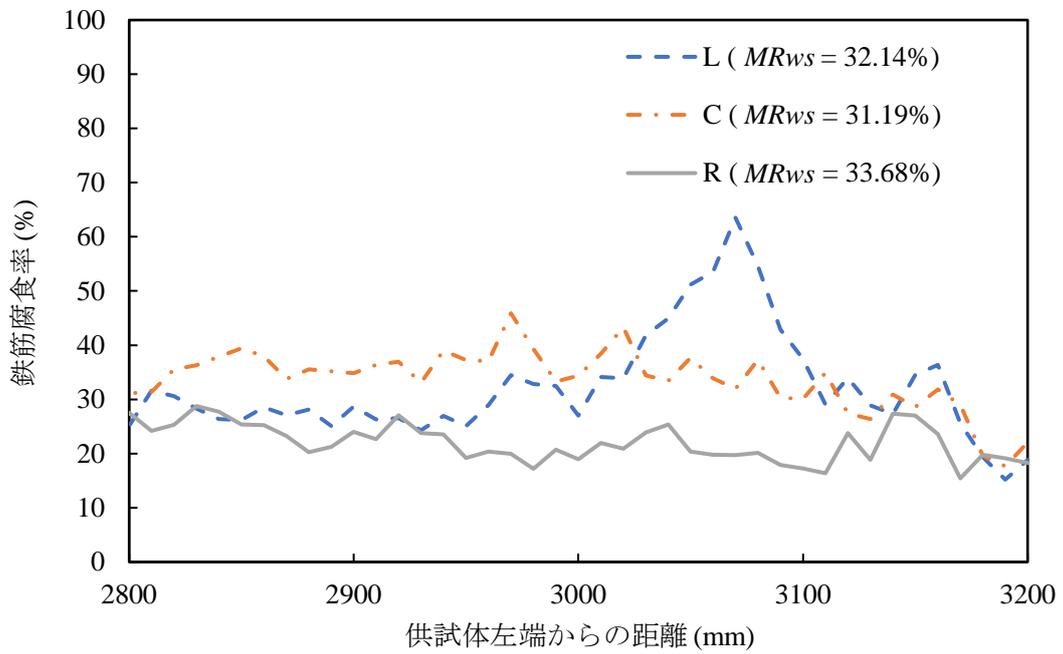
(a) C1



(b) C2

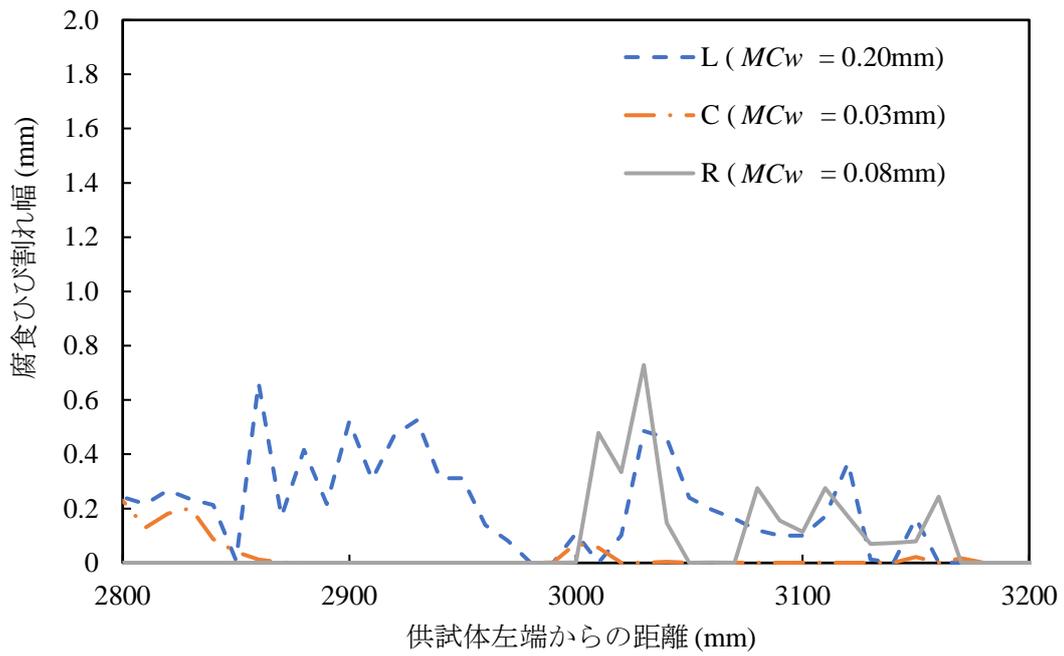


(c) C3

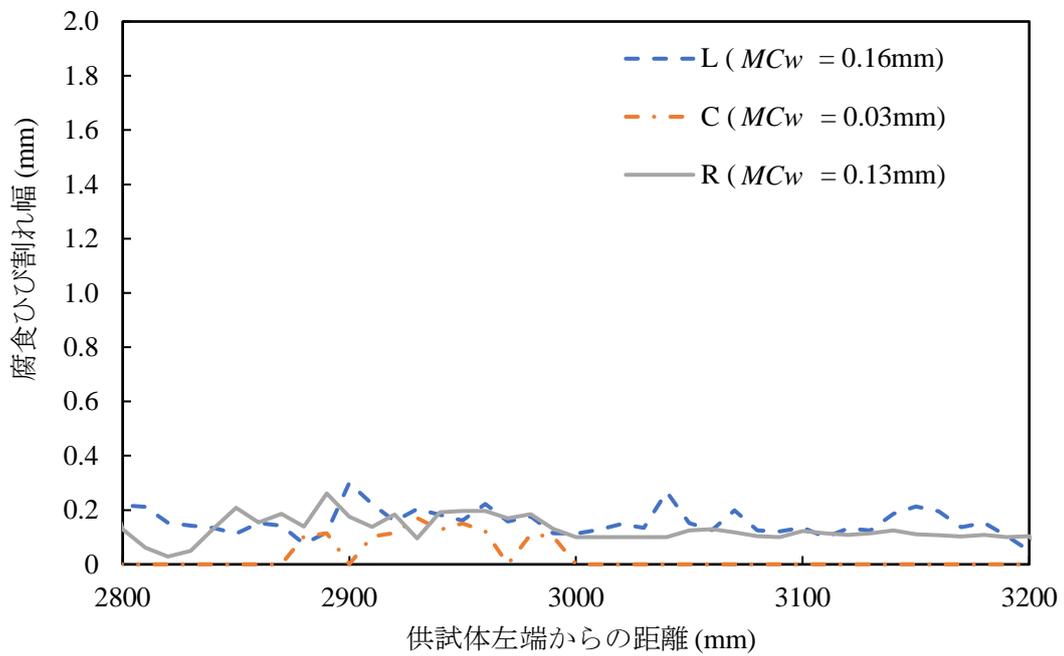


(d) C4

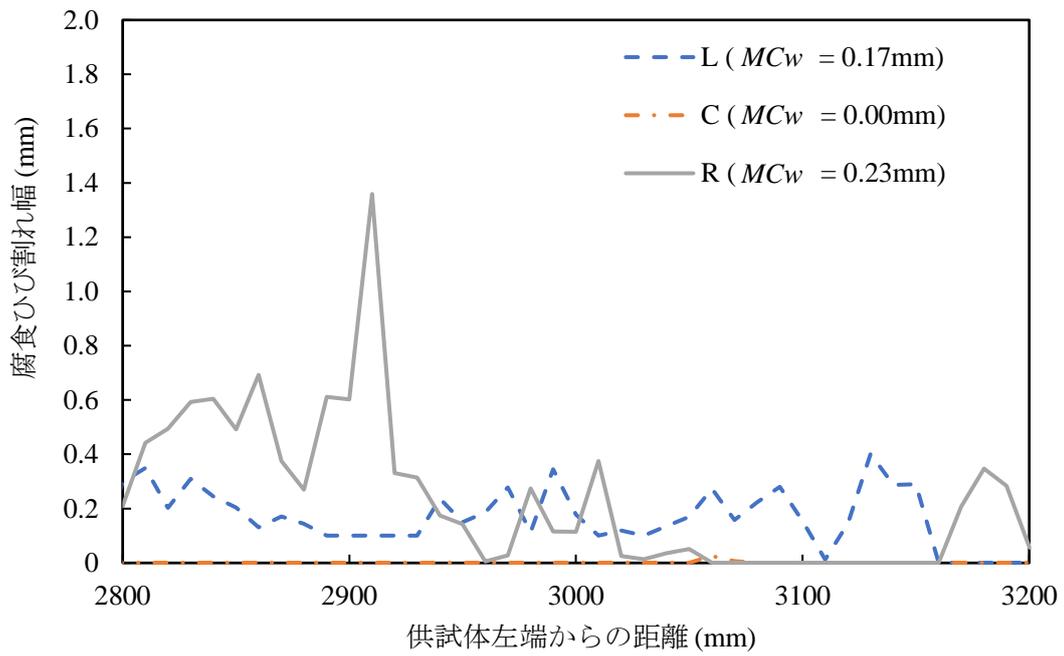
図 4-13 大型 RC はりの鉄筋腐食率分布



(a) C2

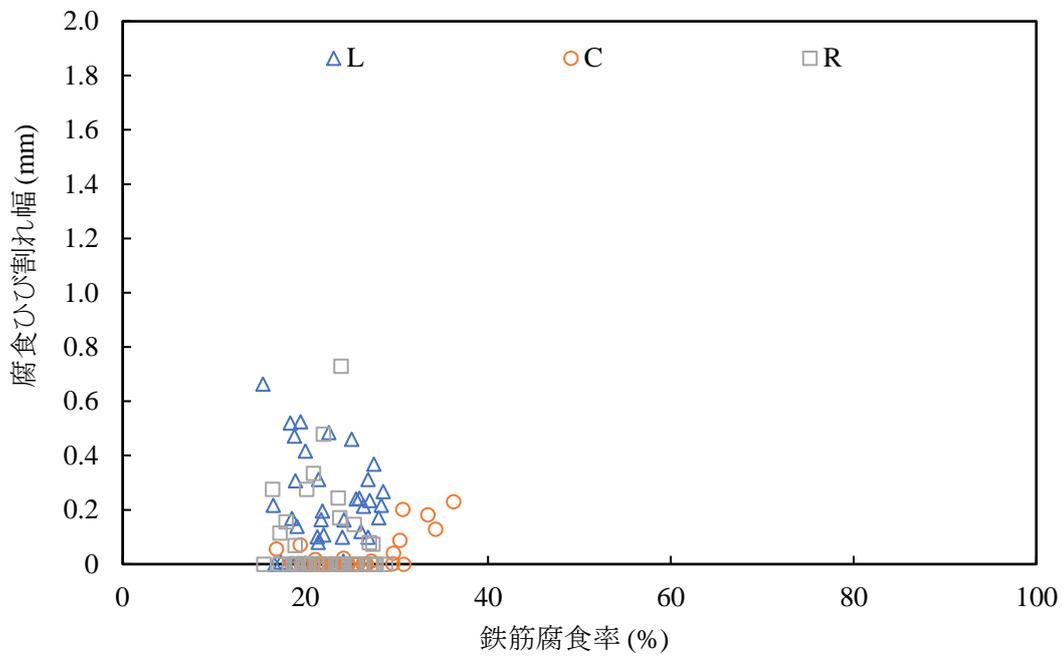


(b) C3

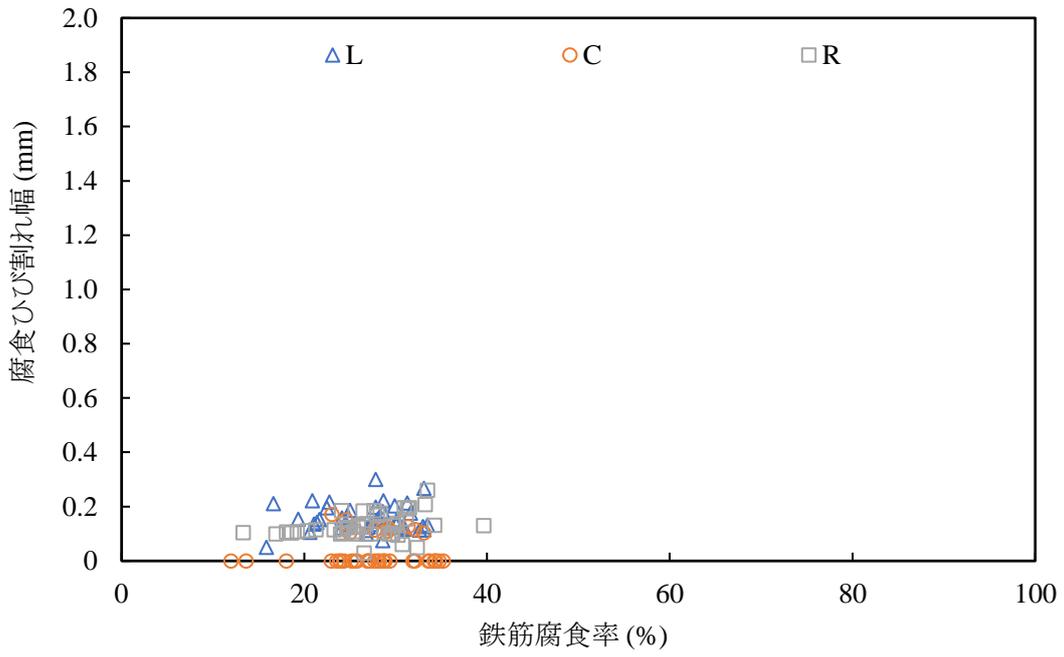


(c) C4

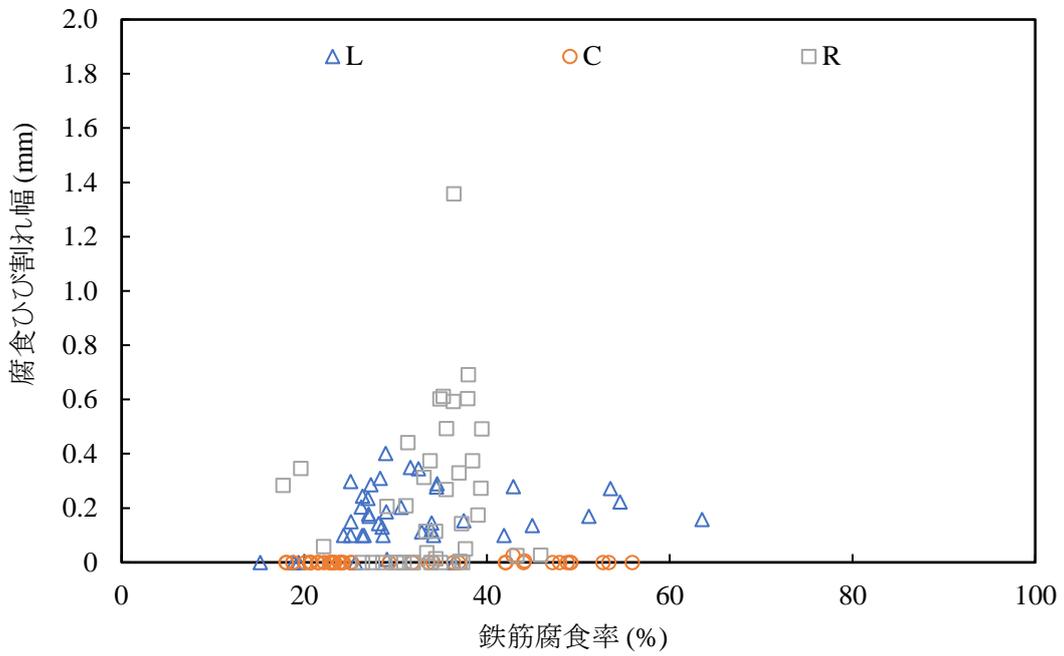
図 4-14 大型 RC はりの各鉄筋下に生じた腐食ひび割れ幅分布



(a) C2



(b) C3



(c) C4

図 4-15 大型 RC はりの鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係

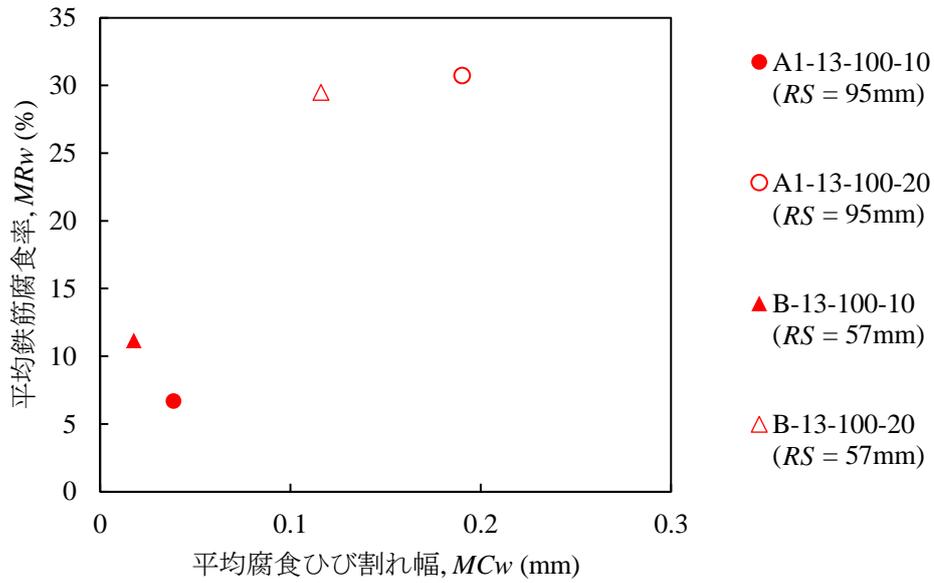


図 4-16 鉄筋間隔の異なる供試体における平均腐食ひび割れ幅と平均鉄筋腐食率の関係

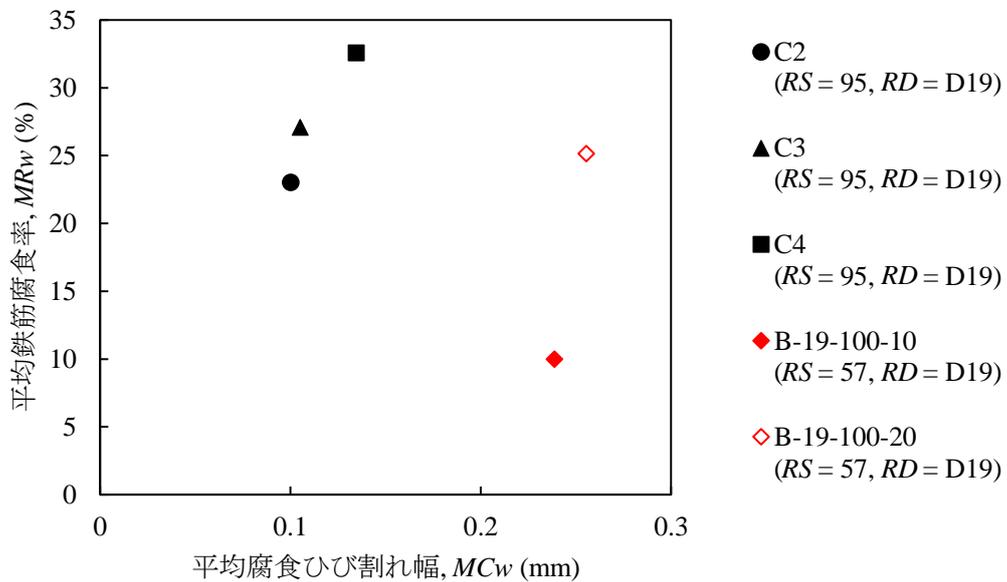


図 4-17 小型 RC はりと大型 RC はりにおける平均腐食ひび割れ幅と平均鉄筋腐食率の関係

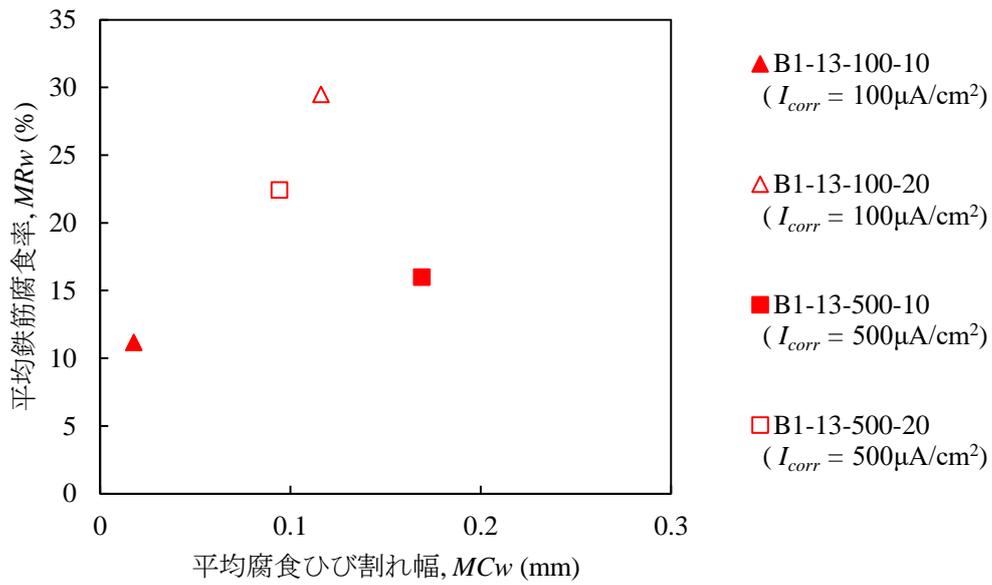


図 4-18 電流密度の異なる供試体における平均腐食ひび割れ幅と平均鉄筋腐食率の関係

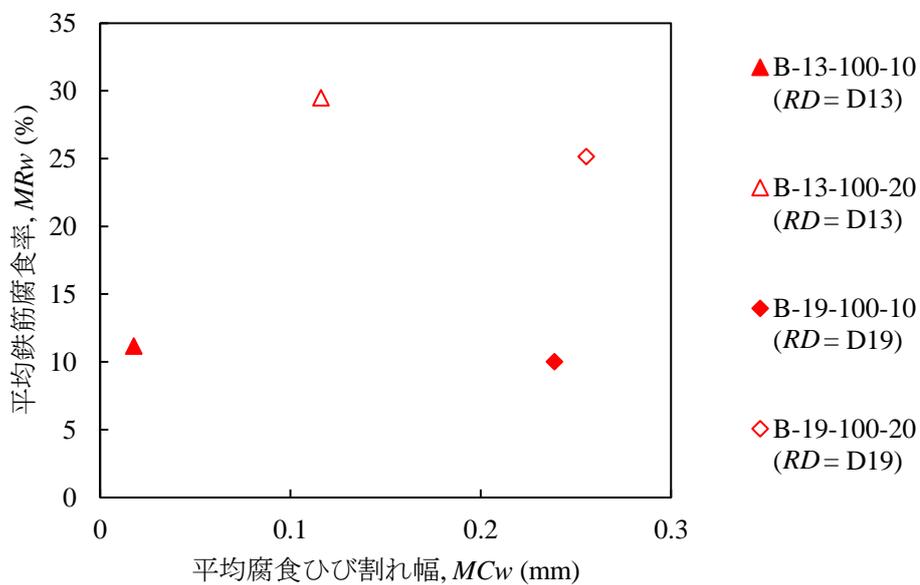
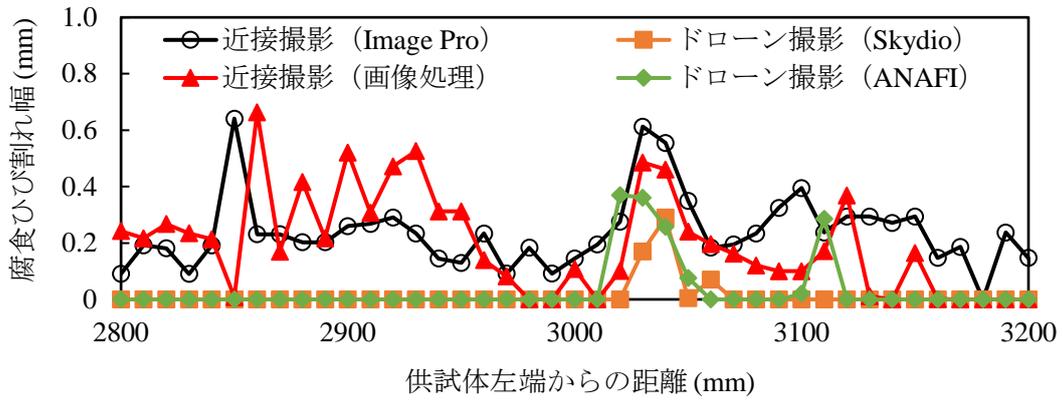
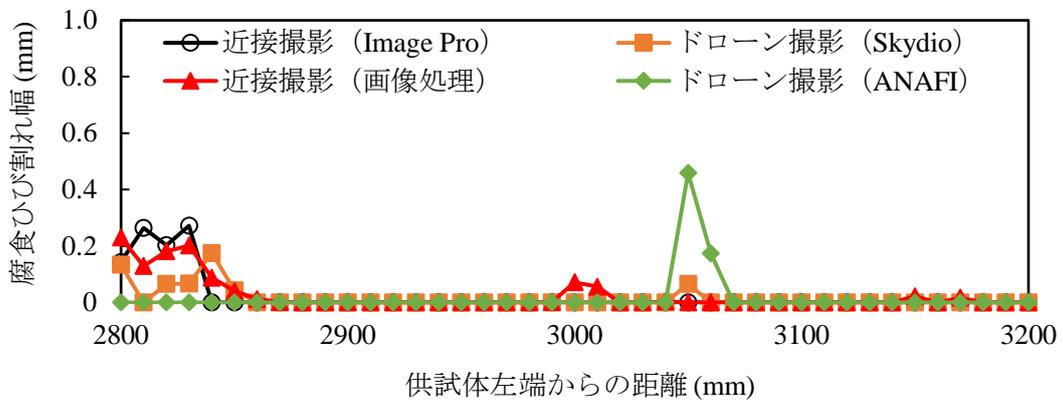


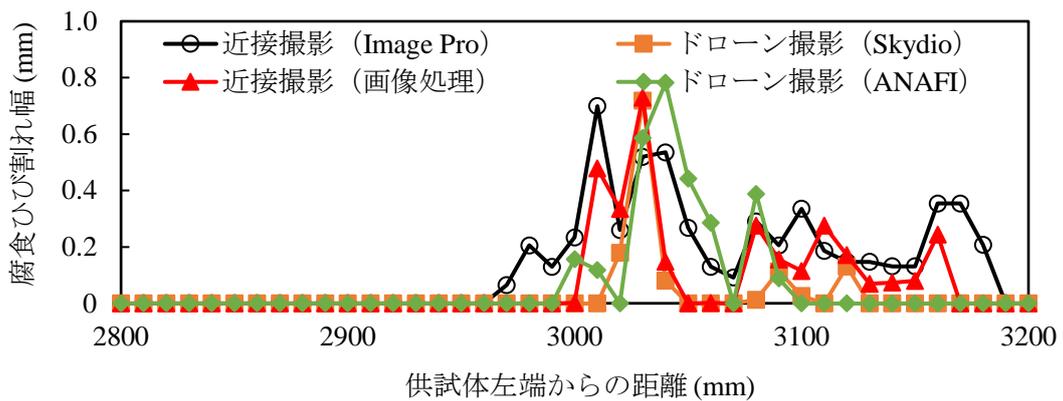
図 4-19 鉄筋径の異なる供試体における平均腐食ひび割れ幅と平均鉄筋腐食率の関係



(a-1) L 鉄筋

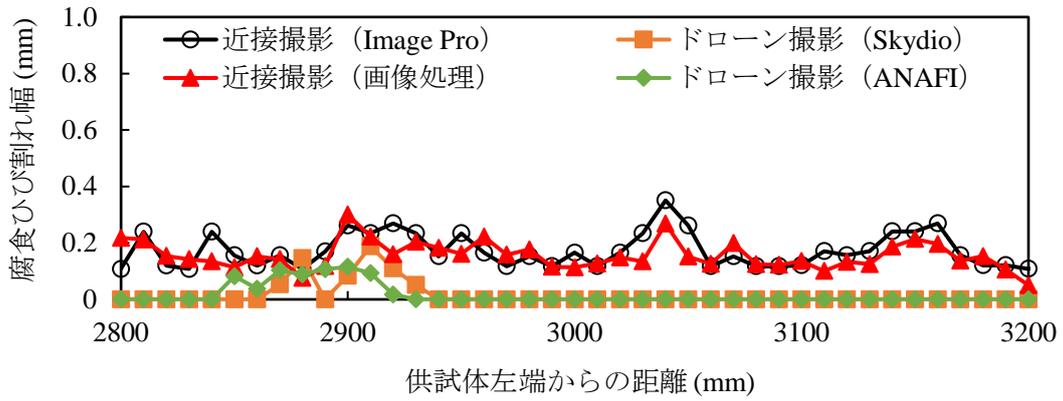


(a-2) C 鉄筋

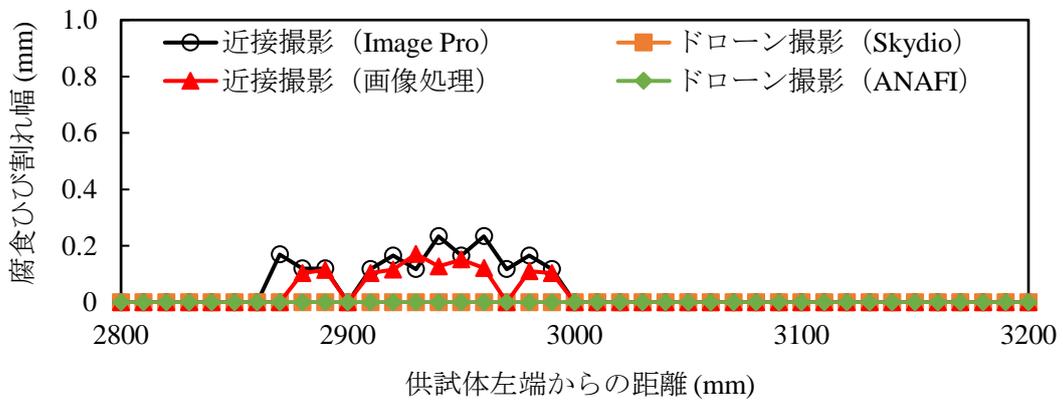


(a-3) R 鉄筋

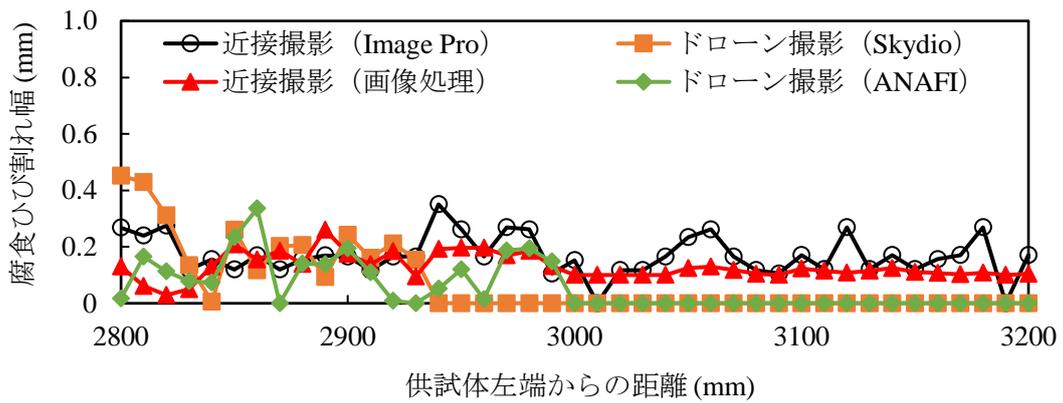
(a) C2



(b-1) L 鉄筋

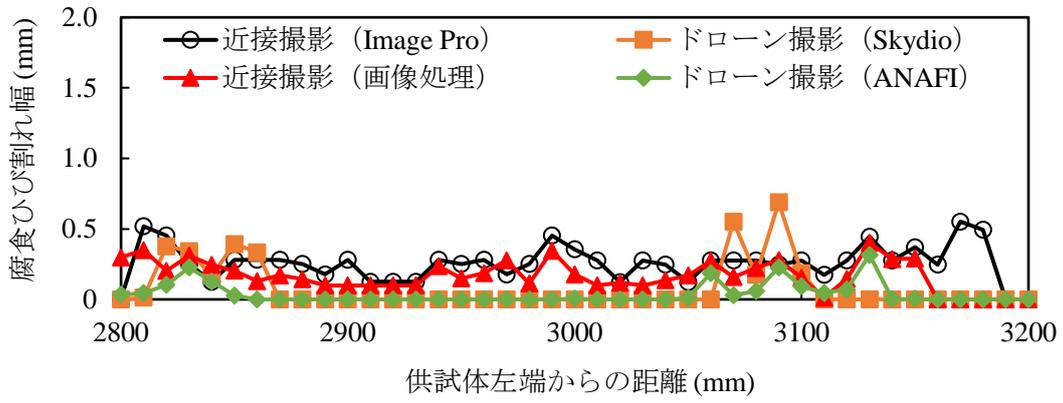


(b-2) C 鉄筋

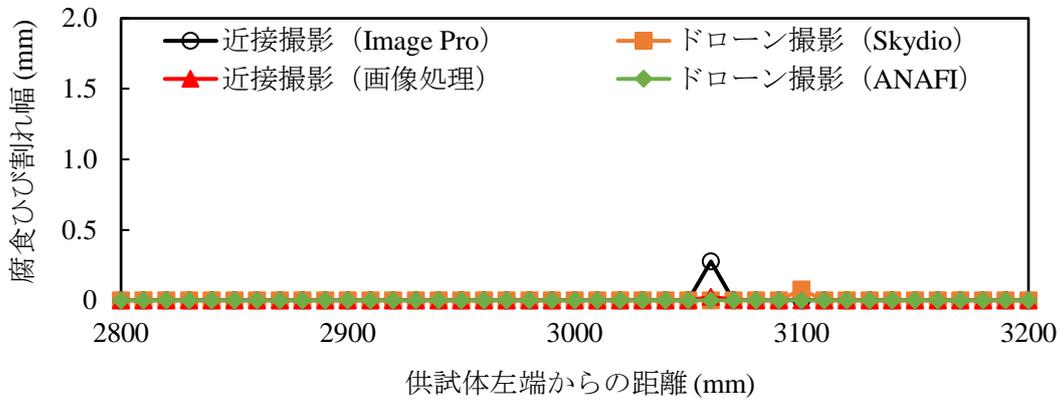


(b-3) R 鉄筋

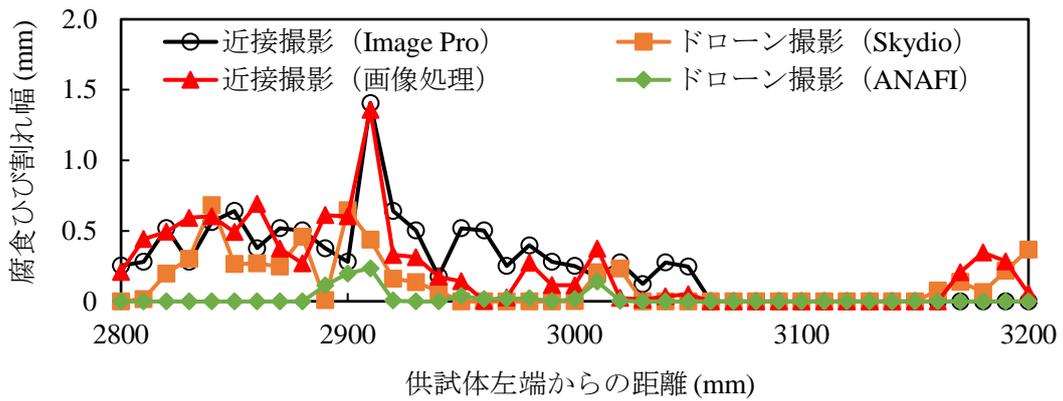
(b) C3



(c-1) L 鉄筋



(c-2) C 鉄筋



(c-3) R 鉄筋

(c) C4

図 4-20 各撮影方法により取得された腐食ひび割れ幅分布

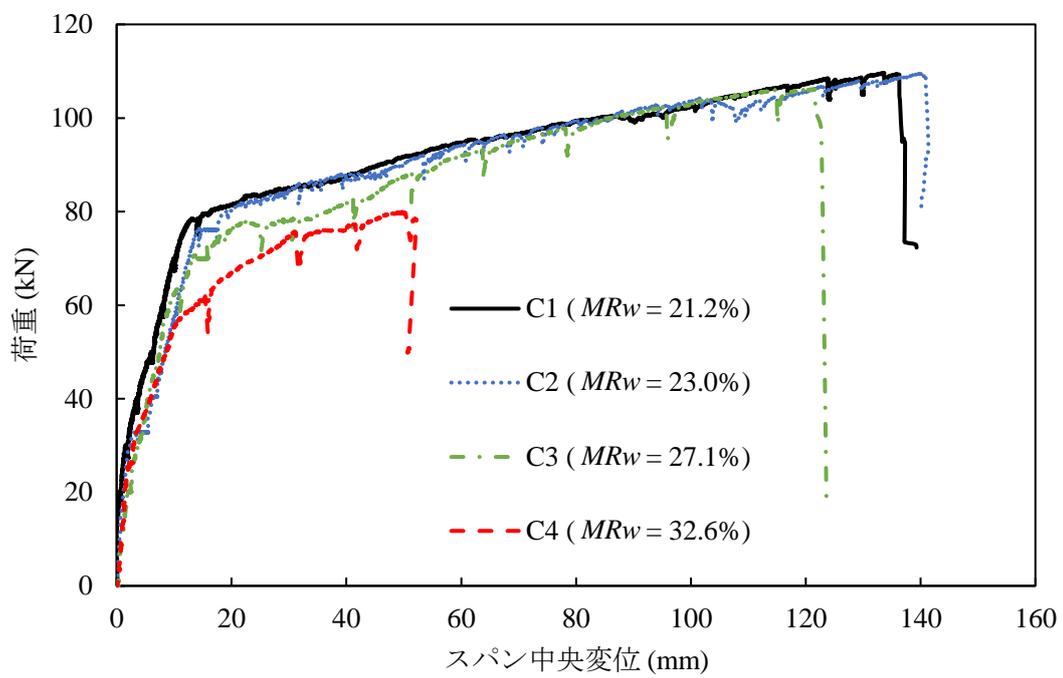
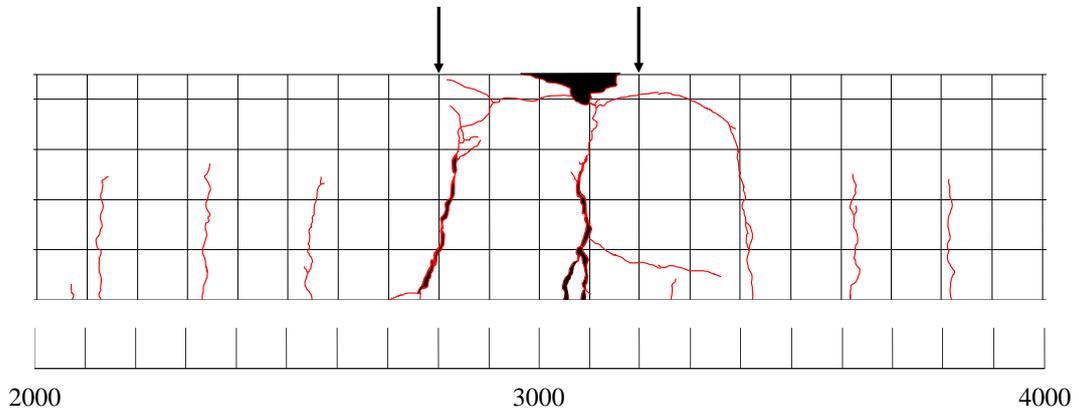
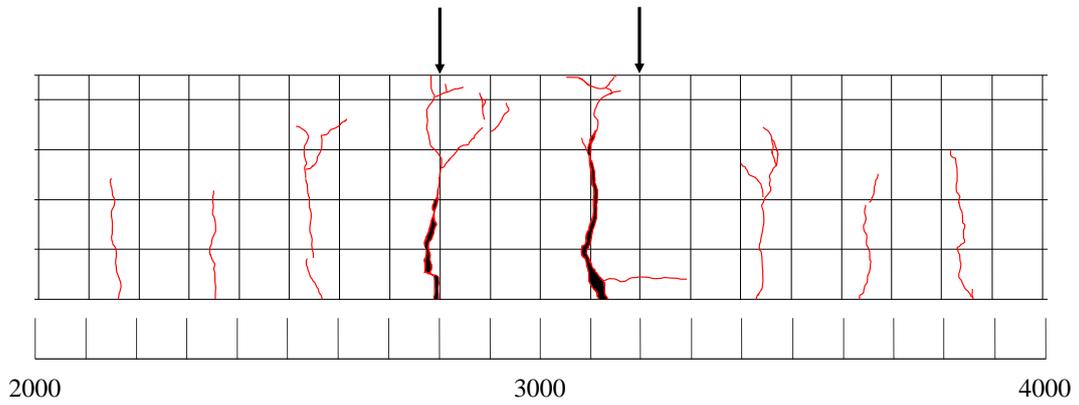


図 4-21 大型 RC はりの荷重-変位関係



(a) C1 (終局後)



(b) G2 (終局後)

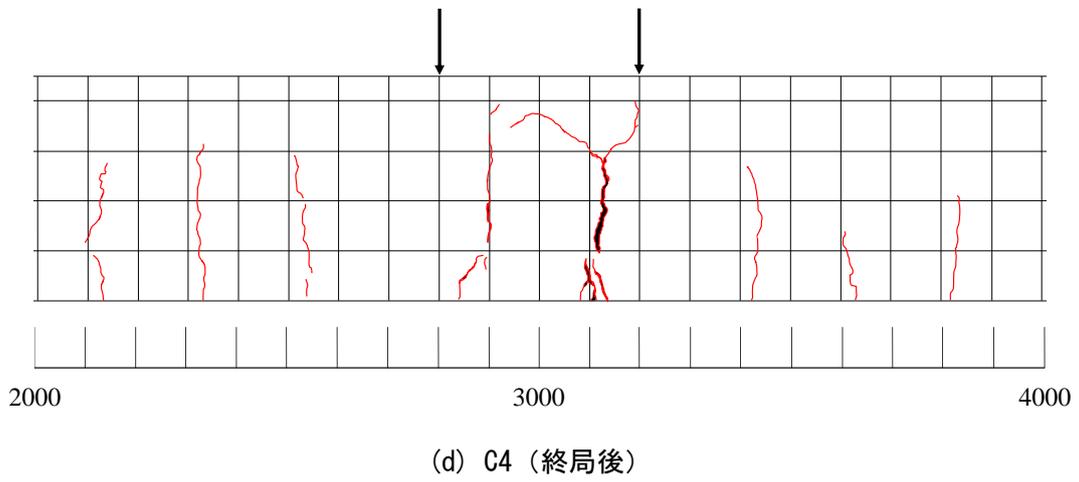
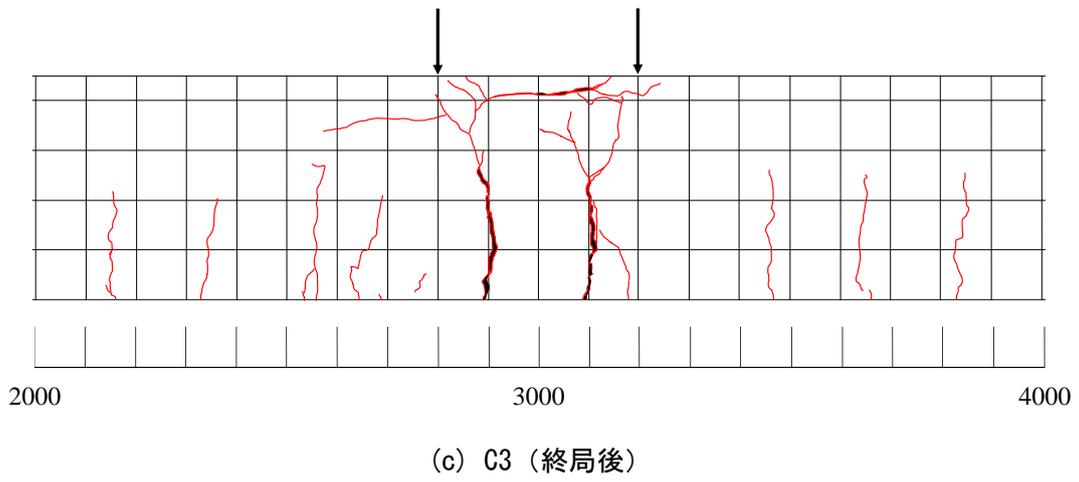


図 4-22 大型 RC はりの曲げひび割れ性状 (供試体左端から 2000mm~4000mm 区間)



写真 4-1 スターラップ位置直下の RC はり底面に生じた腐食ひび割れの例（供試体 C1）

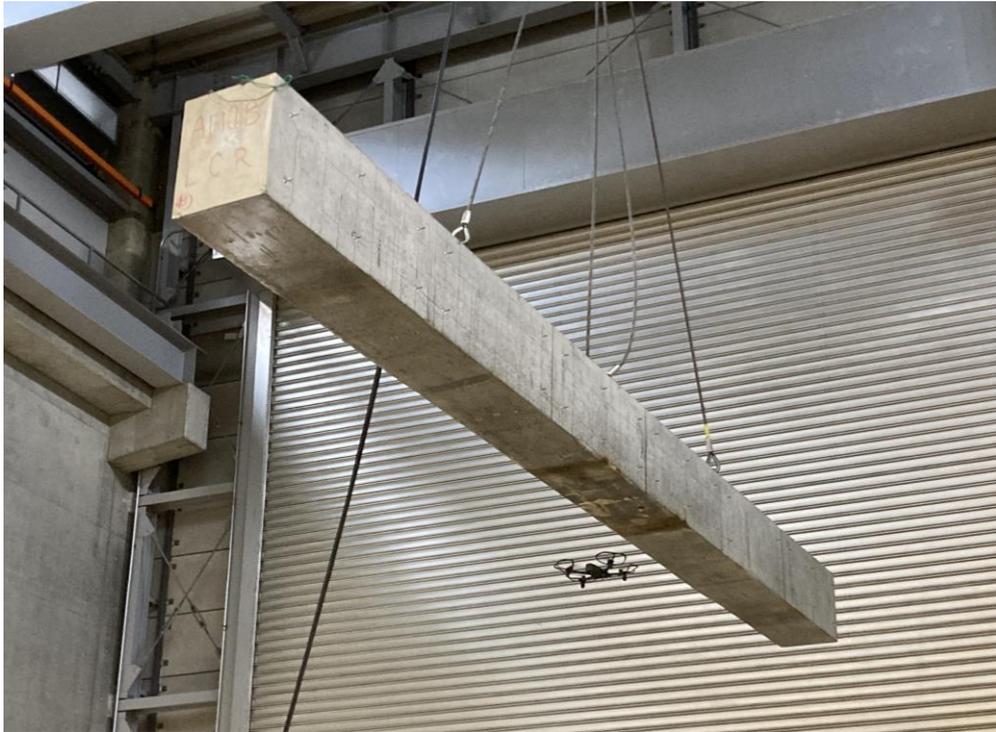


写真 4-2 ドローン撮影の様子



写真 4-3 Skydio で撮影された腐食ひび割れ画像例（供試体 C3：電食終了後）



写真 4-4 ANAFI で撮影された腐食ひび割れ画像例（供試体 C3：電食終了後）



写真 4-5 近接で撮影された腐食ひび割れ画像例（供試体 C3：電食終了後）



(a) 近接撮影画像



(b) ドローン撮影画像 (Skydio)



(c) ドローン撮影画像 (ANAFI)

写真 4-6 各撮影方法で得られた画像による腐食割れ幅箇所の見え方の違い  
(供試体 C3 : 電食終了後)

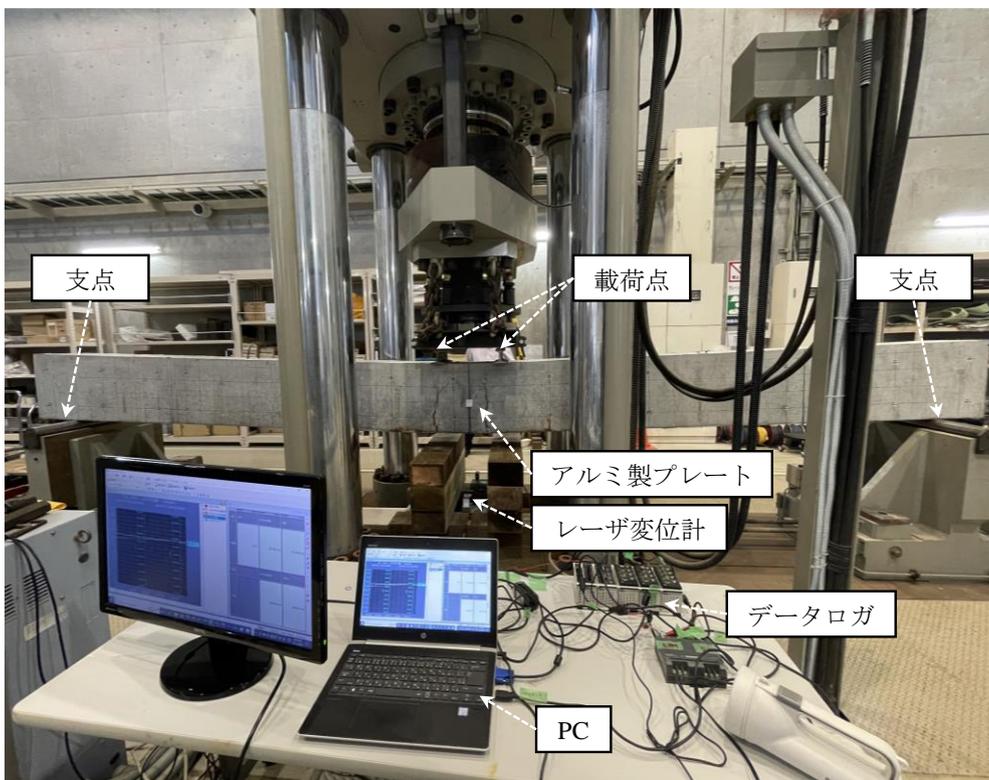


写真 4-7 大型 RC はりの曲げ試験の様子 (供試体 C2)

## 5. 機械学習用データベースの作成と機械学習を用いた腐食ひび割れ情報に基づく鉄筋腐食率分布の予測

### 5.1 概説

本章では、図 3-1 に示したフローのIIIにあたる、機械学習用データベースの作成とフローのIVにあたる、機械学習 (pix2pix) の構築を行う。本章の目的は以下の2つである。

1つ目は、4. の電食実験で得られた鉄筋腐食率分布の特性および鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係に基づいてデータベースを作成することである。機械学習モデルの構築には大量のデータベースが必要であるが、時間や予算の制約上、多数の腐食 RC 供試体を作成することは困難である。そこで、SRM および腐食生成物モデルを用いた 3 次元 Non-FEA により、疑似的に腐食 RC 供試体を作製し、鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係 (データベース) を作成することとした。また、SRM や Non-FEA でも実験と同様の性質が得られるように、実験データを用いて SRM のパラメータの同定や Non-FEA の検証を行う。

データベースの作成手順は、以下に示す3段階からなる。

- (1) SRM を用いて多数の疑似鉄筋腐食率分布を発生させる。その際、実験の鉄筋腐食率分布に基づいて、統計的性質 (平均, 標準偏差) や部材軸および部材軸および部材軸直角方向の相関性を定める。SRM に必要なパラメータの同定は 5.2 に、SRM による疑似鉄筋腐食率のシミュレーションは 5.2.2 で説明する。
- (2) 既往の実験<sup>5-1)</sup>に基づいて、腐食生成物厚さおよび形状をモデル化し、疑似鉄筋腐食率分布から疑似腐食生成物厚さ分布に変換する。モデル化の際には、X 線画像とデジタル画像処理を用いることで腐食生成物厚さを測定した。そして、腐食実験手法や電流密度の違いが生成物厚さおよび形状に与える影響を踏まえて、腐食実験条件の違いを考慮した腐食生成物厚さモデルを提案した。腐食生成物のモデル化の詳細は 5.3 で示す。
- (3) 3 次元 Non-FEA を用いて、疑似腐食生成物厚さを強制変位としてコンクリート要素に与えることで、疑似腐食ひび割れ幅分布を取得する。これにより、疑似鉄筋腐食率分布に対応する疑似腐食ひび割れ幅分布が得られることになる。腐食生成物厚さと 3 次元 Non-FEA による腐食ひび割れ幅の再現性の検証を 5.5 で述べ、5.6 でデータベースを作成する。

2つ目は、作成したデータベースを用いて腐食ひび割れ幅分布から鉄筋腐食率分布を予測する機械学習モデルを構築することである。4. の実験結果から、3 本の軸方向鉄筋 (L, C, R) を有する RC はりにおいて、鉄筋間にはたらく圧縮応力により、各鉄筋下の腐食ひび割

れ幅は各鉄筋の腐食のみによる現象ではなく、鉄筋同士で影響を及ぼし合う結果として得られること、鉄筋の間隔等の構造諸元が鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の係に影響を及ぼすことが示されている。この結果から、機械学習モデルを構築するにあたっては、腐食ひび割れ幅分布と鉄筋腐食率分布の部材軸方向の連続性だけでなく、部材軸直角方向も含めた2次元的な連続性を考慮する必要があるといえる。すなわち、面的なデータ（画像）を用いるべきである。さらに、構造諸元（鉄筋径、鉄筋間隔）が両者の係に影響していたことを踏まえ、腐食ひび割れ幅情報のみから予測するのではなく、構造諸元（細目）を入力情報として与えることで、精度向上を目指した。そこで、入力画像をRGBの3チャンネルを持つカラー画像とし、R、G、Bチャンネルにそれぞれ腐食ひび割れ幅分布、鉄筋径、鉄筋間隔を与えることとした。

## 5.2 疑似腐食供試体の作成に必要な確率場パラメータ

### 5.2.1 鉄筋腐食の空間変動の再現に必要なパラメータの同定

既往の実験<sup>5-1)</sup>で示されている通り、鉄筋腐食率分布は鉄筋の全長にわたって一様ではなく、大きくばらついている（空間変動性を有している）。また、そのばらつきはランダムなものではなく、部材軸方向と部材軸直角方向に相関性を有している。本項では、実験結果に基づいた疑似鉄筋腐食率分布を作成するため、4.の電食実験で得られた小型RCはりの実験結果から、鉄筋腐食率分布の空間変動性の再現に必要なパラメータを同定する。具体的には、5.2.1.1では平均と標準偏差を用いて鉄筋腐食率のばらつきについて述べ、5.2.1.2と5.2.1.3では、鉄筋腐食率分布の軸方向および軸直角方向の相関性をそれぞれ自己相関距離と相関係数を用いて述べることとする。また、3.5.1.2で述べたSRMで必要となるオートスペクトル密度関数（auto-SDF）とコヒーレンス関数に含まれるパラメータを実験結果に基づいて同定する。

#### 5.2.1.1 鉄筋腐食率の統計的性質

図5-1に軸方向鉄筋1本ごとの鉄筋腐食率の平均 $MR_{ws}$ と標準偏差 $\sigma_{Rws}$ の係を示す。なお、 $MR_{ws}$ と標準偏差 $\sigma_{Rws}$ は以下の式で表すことができる。

$$MR_{ws} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(i) \quad (5-1)$$

$$\sigma_{Rws} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y(i) - \mu)^2} \quad (5-2)$$

ここで、 $N$ は総データ数、 $y(i)$ は1本の鉄筋において、部材軸方向に沿って鉄筋腐食率が距離 $\Delta x$ ごとに観測されたときの $i$ 番目の観測点における鉄筋腐食率である。

図 5-1 より、平均鉄筋腐食率が大きくなると標準偏差も大きくなることが分かる。また、この実験結果に基づいて近似を行うと、両者の関係は次式で表せる。

$$\sigma_{Rws} = 0.4937MRws \quad (5-3)$$

疑似的に鉄筋腐食率を発生させる際には、上記の式を用いて鉄筋腐食率の平均値から標準偏差を求めることとした。

また、任意の確率分布に対して標本の適合度を検定するコルモゴロフ・スミルノフ検定<sup>5-2)</sup>を用いて、実験で得られた各鉄筋腐食率分布が対数正規分布に従っているかを検証した。なお、本検定には実験で得られた各鉄筋腐食率分布の上位 80%のデータ 110 個を使用した。このとき、標本が優位水準 5%で対数正規分布に従うという帰無仮説に対し、検定統計量 $D_{110}$ が臨界値 $D_{110,0.05}$ より小さければ棄却されない。臨界値は参考文献<sup>5-2)</sup>に基づいて定められた。表 5-1 に、検定統計量 $D_{110}$ の結果を示す。帰無仮説が棄却された鉄筋腐食率分布があるものの、鉄筋腐食率分布は対数正規分布に従う傾向にあることがわかる。本研究では、データベースの作成にあたり、鉄筋腐食率分布は対数正規分布に従うものとした。

### 5.2.1.2 鉄筋腐食率分布の部材軸方向の相関性評価

鉄筋腐食率分布の結果をもとに、RC 部材における鉄筋腐食の空間的相関を評価する。部材軸方向には1本の鉄筋が連続して存在するため、任意の2点を選んでその相関性を評価する際に、様々な距離を取ることができる。そこで、各供試体のL、C、R鉄筋についてそれぞれ自己相関関数を求めることで部材軸方向の相関性を評価する。以下に、自己相関距離を算出する手順を示す。

離散的なデータ $y(i)$ の自己相関関数 $R(j)$ は、 $j$ がラグを表すとして、以下の式(5-4)により表される。

$$R(j) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} (y(i) - \mu)(y(i+j) - \mu) \quad j=0,1,2,\dots,N \quad (5-4)$$

式(5-4)において、 $j=0$ のとき相関が最も大きく、 $R(j)$ は最大値を取る。ここで、式(5-4)を $R(0)$ で割ることにより無次元化する。

$$R(j) = \frac{1}{R(0) \cdot N-j} \sum_{i=1}^{N-j} (y(i) - \mu)(y(i+j) - \mu) \quad j=0,1,2,\dots,N \quad (5-5)$$

これにより、 $j=0$ 、つまりラグが0のときに自己相関関数の値は1となり、ラグが増加して相関が小さくなるに従ってその値が0に近づく。

以下に式(5-5)の自己相関関数の式を鉄筋腐食率分布に適用した式を記す。横軸の単位を距離にした自己相関関数  $R'(\Delta x \cdot j)$  を以下の式(5-6)で表す。

$$R'(\Delta x \cdot j) = R(j) \quad j=0,1,2,\dots,N \quad (5-6)$$

式(5-6)に従って求めた自己相関関数を以下の指数モデルで近似する<sup>5-3)</sup>。

$$R'(x) = \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) \quad (5-7)$$

残差平方和が最小になるように近似した際の  $\alpha$  を部材軸方向の自己相関距離(mm)と呼ぶ。図 5-2 に、各軸方向鉄筋からそれぞれ求めた自己相関距離を示す。これをみると自己相関距離に、鉄筋位置 (L, C, R) や平均鉄筋腐食率等の条件の違いによる明確な傾向は見られなかった。そのため、疑似鉄筋腐食率分布を作成する際には、部材軸方向の相関性は鉄筋位置や腐食率等に依らず同様なものとして扱うこととする。

以上の結果を受けて、SRM に必要なパラメータのうち、軸方向の相関性を表すオートスペクトル密度関数のパラメータを同定する。鉄筋腐食率分布の部材軸方向の相関性は鉄筋位置や鉄筋腐食率に拠らないとして、実験結果から求められたオートスペクトル密度関数の平均値に対して、参考文献<sup>5-4)</sup>で経験的に求められたオートスペクトル密度関数を用いて最小二乗法により近似した。経験的に求められたオートスペクトル密度関数は以下の式(5-8)で表される。

$$S_{FG}(\kappa) = \frac{[1 + 40000C_2^2(\kappa/C_1)^2](\kappa/C_1)^4}{[(1 - |\kappa|/C_1)^4 + 4C_2(\kappa/C_1)^2][(1 - 10|\kappa|/C_1)^4 + 400C_2(\kappa/C_1)^2]} \quad (5-8)$$

ここで、 $\kappa$  は波数、 $C_1$ 、 $C_2$  はパラメータを表す。小型 RC はりの実験で得られた鉄筋腐食率分布を用いて近似を行った結果を図 5-3 に示す。図 5-3 をみると、実験値に対し、精度よく近似できているといえる。近似を行った結果、パラメータはそれぞれ  $C_1=0.003$ 、 $C_2=10.05$  と推定された。

### 5.2.1.3 鉄筋腐食率分布の部材軸直角方向の相関性評価

部材軸直角方向では、隣り合う鉄筋の鉄筋間隔あるいは両側の鉄筋の鉄筋間隔でのデータしか存在しない。よって、自己相関関数におけるプロット数が極端に少ないため、相関性を正確に評価することが困難である。そこで、部材軸直角方向では相関係数を用いて相関性を評価する。2つの鉄筋腐食率分布  $y$  と  $z$  の相関係数  $\gamma$  は以下の式(5-9)により表される。

$$\gamma = \frac{\sum (y(i) - \mu_y)(z(i) - \mu_z)}{\sqrt{\sum (y(i) - \mu_y)^2 \sum (z(i) - \mu_z)^2}} \quad (5-9)$$

表 5-2 に、供試体内における鉄筋腐食率分布同士の相関係数を示す。表内では、L 鉄筋と C 鉄筋の鉄筋腐食率分布間の相関係数を L-C のように表記した。

相関係数全体を見ると、ほとんどの鉄筋腐食率分布同士は正の弱い相関を有しており、各鉄筋において局所腐食が起こる位置は集中する可能性があることを示している。

1つの供試体内での相関係数の関係（L-C, C-R, L-R）に着目すると、ほぼ全ての供試体で隣り合う鉄筋同士の相関係数（L-C または C-R）が最も大きくなっている。これより、隣り合う鉄筋同士の方が、両側の鉄筋同士に比べて局所腐食が発生する位置が一致しやすいと考えられる。一方で、B1-13-500-10, B1-19-100-20 では両側鉄筋同士（L-R）の相関係数が最も大きくなっている。これは、腐食ひび割れ性状に原因があると推察される。RC はりにおいては、腐食の進行に伴って腐食ひび割れが生じ、腐食ひび割れから塩化物イオンが侵入することでさらに鉄筋腐食が進行する。B1-13-500-10 では、図 4-11(g)を見ると C 鉄筋下での腐食ひび割れ幅が支配的になっている。その結果として、図 4-10(g)に示すように、C 鉄筋の鉄筋腐食率が L 鉄筋と R 鉄筋に比べて大きくなり、両側鉄筋同士（L-R）の相関係数が大きくなった可能性がある。また、B1-19-100-20 では、図 4-11(j)を見ると L 鉄筋下と R 鉄筋下での腐食ひび割れ分布において、局所的にひび割れが生じている部分（供試体左端から 50mm～100mm と 1300mm 付近）が一致している。その結果、図 4-10(j)のようにその位置で L 鉄筋と R 鉄筋に局所腐食が生じ、両側鉄筋同士（L-R）の相関係数が大きくなったと考えられる。また、平均腐食率や電流密度、鉄筋径による相関係数の傾向の違いは見られなかった。

2つの供試体を除く 8つの供試体で隣り合う鉄筋同士の相関係数（L-C または C-R）が最も大きくなっていること、さらに、コンクリート中の塩化物イオンの拡散現象<sup>5-5)</sup>を踏まえると、鉄筋腐食の相関性は距離に応じて減少していくと考えられることから、本研究では、疑似鉄筋腐食率分布を作成する際には、軸直角方向では、鉄筋間隔が狭いほど相関が強くなるとして扱うこととする。

次に、SRM に必要なパラメータのうち、軸直角方向の相関性を表すコヒーレンス関数のパラメータを同定する。なお、軸方向には 1本の鉄筋内で生じる 1次元の腐食分布の相関を考慮するのに対して、軸直角方向には RC はりの軸方向鉄筋は連続しておらず、コンクリートを介して相関を有することになるため、軸方向とは異なるモデル化が必要となる。この

ように、SRM では、空間的に相関しつつも不均一である（または周波数の内容が異なる）現象をモデル化できるという利点がある。

鉄筋腐食率分布の部材軸直角方向の相関性は鉄筋間隔が狭いほど相関が強くなるとして、実験結果から求められたコヒーレンス関数に対して、参考文献<sup>5-4)</sup>で経験的に求められたコヒーレンス関数を用いて最小二乗法により近似した。以下に、経験的に求められたコヒーレンス関数を示す。

$$\gamma_{FG,ij}(\kappa) = \exp\left(-\frac{\kappa\sqrt{d_{ij}}}{2\pi C_3}\right) \quad (5-10)$$

ここで、 $d_{ij}$  は  $i$  番目と  $j$  番目の鉄筋の間隔、 $C_3$  はパラメータを表す。

図 5-4 に、各供試体の鉄筋腐食率分布から式(5-10)より近似されたコヒーレンス関数の結果を示す。図 5-4 をみると、実験値をよく近似されているとはいえない。この原因として、コヒーレンス関数を求める際のエイリアシング処理<sup>5-4)</sup>において、処理される領域が多く、近似に使用されるプロット数が少ないことがあげられる。エイリアシング処理が適用される範囲は、軸方向鉄筋の間隔に応じて決定され、鉄筋間隔が狭いほど適用範囲も狭くなる。つまり、今後は鉄筋間隔が狭い供試体を対象とした実験的検討から、鉄筋腐食率分布の軸直角方向の相関性をより理解できると考えられる。

本研究では、軸直角方向の相関性は、平均鉄筋腐食率等の違いによってコヒーレンス関数のパラメータ  $C_3$  の傾向が変わらなかったことから、全供試体の平均値としてパラメータ  $C_3$  を求め、 $C_3=0.031$  と推定した。推定されたパラメータ  $C_3$  を用いて鉄筋の間隔  $d_{ij}$  の異なるコヒーレンス関数を算出した結果の例を図 5-5 に示す。コヒーレンス関数の値が強いほど相関が強いことを表すため、図 5-5 は鉄筋の間隔が近い方が相関が強くなることを示している。

## 5.2.2 SRM を用いた疑似鉄筋腐食率分布のシミュレーション

5.2.1 で同定したパラメータを用いて、3.5.1.2 に示した SRM により 10mm 間隔に 41 点の値を持つ疑似鉄筋腐食率分布を発生させた。図 5-6 および図 5-7 に鉄筋間隔が異なる疑似鉄筋腐食率分布の例を示す。同程度の平均鉄筋腐食率を持つ実験結果と比較すると、部材軸方向および部材軸直角方向の相関性、平均値のばらつき等が概ね精度よく再現できていると考えられる。このようにして発生させた多数の疑似鉄筋腐食率分布を用いて、鉄筋腐食率分布から腐食生成物厚さ分布に変換し、さらに Non-FEA を行い、疑似腐食ひび割れ幅分布を算出することで機械学習用データベースが作成される。

### 5.3 腐食実験条件の違いを考慮した腐食生成物厚さのモデル化

腐食ひび割れ幅は腐食生成物による膨張圧が鉄筋周辺のコンクリートに作用することによって発生・進展するため、腐食生成物厚さは腐食ひび割れ幅を推定する上で有用な情報となる。一方で、既往研究<sup>5-6)</sup>で用いられていた腐食生成物厚さのモデル<sup>5-7)</sup>は、乾湿繰返し試験で得られた腐食生成物をモデル化しており、腐食生成物の流れ出しが多い電食実験で腐食をさせた RC はりに対してその腐食生成物モデルを適用した Non-FEA を用いて再現解析を行うと、腐食ひび割れ幅を過大評価した。つまり、腐食実験条件が腐食生成物のでき方に影響を及ぼし、その結果、腐食ひび割れ幅にも影響を及ぼすと考えられる。そこで本節では、X 線撮影とデジタル画像処理によって腐食生成物を可視化し、腐食実験条件の違いが鉄筋腐食率と腐食生成物および腐食ひび割れ幅の関係に及ぼす影響を調査した。そして、その影響を踏まえて腐食生成物の厚さ・形状をモデル化する。

以下に、腐食生成物厚さのモデル化の手順を示す。

- (1) 電食実験と乾湿繰返し試験により鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係を調査した既往の研究の実験結果<sup>5-1)</sup>を用いて、X 線画像とデジタル画像処理によって鉄筋腐食率と腐食生成物厚さを測定し、両者の関係を調査する。
- (2) (1)の結果に基づいて、腐食実験条件の違いが鉄筋腐食率と腐食生成物厚さの関係に及ぼす影響を考慮した腐食生成物の厚さ・形状のモデルを作成する。腐食生成物の厚さおよび形状は、電食実験と乾湿繰返し実験ごとにモデル化を行った。また、腐食生成物厚さは、電食実験における腐食実験条件の違いとして電流密度をパラメータとした。

まず、(1)の既往研究<sup>5-1)</sup>で行われた電食実験と乾湿繰返し実験の結果を用いて、X 線画像とデジタル画像処理による腐食生成物厚さの測定を行う。なお、対象となる供試体は、参考文献<sup>5-1)</sup>に示される、電食実験を行った 5 体 (CD-10, CD-50, CD-100, CD-200, CD-500 : 以下、CD シリーズと称する) と乾湿繰返し試験を行った 2 体 (WD-1, WD-2 : 以下、WD シリーズと称する) である。図 5-8 に示す手順で、撮影された X 線画像とデジタル画像処理によって腐食生成物厚さを測定した。なお、本研究では、各鉄筋断面における腐食後の鉄筋外縁の座標と腐食生成物とコンクリートの境界の座標との差を軸方向に 5mm ごとに平均した値を腐食生成物厚さ  $T_{cp}$  とした。

腐食生成物厚さ  $T_{cp}$  を鉄筋断面ごとに平均した値を平均腐食生成物厚さ  $MT_{cp_i}$  とし、図 5-9 と図 5-10 に、それぞれ電食実験と乾湿繰返し実験における鉄筋腐食率と断面ごとの平均腐食生成物厚さの関係を示す。なお、平均腐食生成物厚さ  $MT_{cp_i}$  は撮影角度  $30^\circ \sim 330^\circ$  に

における8点の腐食生成物厚さ  $T_{cp}$  を平均した値であり、断面ごとに異なる値をとる。図 5-9、図 5-10 に示す通り、電食実験と乾湿繰返し実験では、鉄筋腐食率と腐食生成物の関係が異なり、同程度の鉄筋腐食率における腐食生成物厚さは、WD シリーズの方が CD シリーズに比べて大きいことがわかる。この理由としては、以下の2点が考えられる。1つ目は、電食実験では、乾湿繰返し実験と比較して腐食生成物が流れ出しやすいため<sup>5-8)</sup>、腐食生成物の厚さが小さくなったと考えられる。2つ目は、乾湿繰返し実験では、電食実験と比較して腐食速度が遅く、体積膨張率の大きな結晶質が生成されやすいため<sup>5-9), 5-10)</sup>、コンクリートに寄与する膨張圧も大きくなり、腐食ひび割れ幅が大きくなったと考えられる。

このように、腐食実験の手法により、鉄筋腐食率と腐食生成物の関係は異なるため、これらの違いを考慮したモデル化が必要である。また、CD シリーズ同士を比較した場合、電流密度の違いにより、鉄筋腐食率 8% を境に異なる傾向が認められた。まず、鉄筋腐食率および平均鉄筋腐食率が 8% 未満の領域における腐食生成物厚さの違いについて述べる。図 5-9 をみると、電流密度と腐食生成物厚さとの間に明確な傾向が認められず、全ての RC はりで鉄筋腐食率と腐食生成物厚さとの関係が概ね比例関係であることがわかる。平均鉄筋腐食率が 8% 以上の領域では、腐食速度が最も遅い CD-10 の断面ごとの平均腐食生成物厚さは、乾湿繰返し実験の結果と比較すると腐食生成物の流れ出しの影響により腐食生成物厚さが小さいものの、高電流密度で腐食させた RC はりの結果と比較して腐食生成物厚さが大きくなった。電流密度が低く腐食速度が遅い場合は、腐食速度が速い場合に比べて体積膨張倍率の大きな結晶質の腐食生成物が生成されたと推察される。

次に、鉄筋断面における腐食生成物の平均的な形状を調査するため、腐食生成物厚さ  $T_{cp}$  を観察角度ごとに平均した観察角度ごとの平均腐食生成物厚さ  $MT_{cp\theta}$  を用いる。図 5-11 と図 5-12 に、それぞれ電食実験と乾湿繰返し実験における各供試体における観察角度ごとの平均腐食生成物厚さを示す。ただし、撮影角度 60°, 120°, 240°, 300° における腐食生成物厚さの実験値は存在しないため、これらの位置では隣接する 2 つの撮影角度における撮影角度ごとの平均腐食生成物厚さの平均値を図示している。図 5-11 と図 5-12 に示す通り、電食実験と乾湿繰返し実験では腐食生成物の形状が異なる。まず、観察角度ごとの平均腐食生成物厚さと観察角度の関係について述べる。平均鉄筋腐食率が 4% 未満の領域では CD シリーズの観察角度ごとの平均腐食生成物厚さと観察角度との間に明確な傾向は認められない。一方で、WD シリーズの観察角度ごとの平均腐食生成物厚さははり底面側の観察角度 330°, 0°, 30° において最大となる。この傾向は、楕円モデルの作成元となる腐食ひび割れ発生前の乾湿繰返し実験結果<sup>5-7)</sup>と整合性がある。次に、平均鉄筋腐食率が 4% 以上の領域では、

CD シリーズの観察角度ごとの平均腐食生成物厚さがはり底面側の観察角度 330°, 0°, 30° において最大となる一方, WD シリーズの観察角度ごとの平均腐食生成物厚さは観察角度に関わらず概ね一定の値に近づく傾向が認められた. 腐食実験手法の違いが腐食生成物の形状に影響を及ぼした理由として, 電食実験では銅メッシュに近い側の鉄筋の抵抗値が小さく, かつ水分が多いため, はり底面側の鉄筋表面における電流密度が高くなり, かぶり逆側と比較して腐食速度が速くなった可能性がある. 一方で, 乾湿繰り返し実験では RC はりのかぶり側を上面に向けて NaCl 水溶液を連続的に流下させたことにより, はり底面側とそれから 180° 離れた側の水分量および塩化物イオン濃度が同程度であった可能性がある.

Zhao et al.<sup>5-11)</sup>は, 本研究における NaCl 水溶液の散布条件と異なり, NaCl 水溶液を散布する時間を 3 日間の乾湿繰り返しサイクルのうち 4 時間に限定した結果, 鉄筋腐食率にかかわらず腐食生成物厚さがかぶり側に集中することを示した. すなわち, 乾湿繰り返し実験の場合, NaCl 水溶液の散布時間および塩化物イオン濃度により腐食生成物の形状が変化すると推察される. 今後は, NaCl 水溶液の散布時間を供試体間で変更するとともに, 腐食実験中に軸方向鉄筋付近における塩化物イオン濃度を測定し, 塩化物イオン濃度の違いが腐食生成物の形状に及ぼす影響について考察する必要がある. また, 図 5-11 に示す通り, 電食実験により腐食させた CD シリーズ同士を比較した場合, 腐食生成物の形状と電流密度との関係には明確な傾向が認められなかった. 腐食実験条件の違いが腐食生成物厚さ・形状に与える影響についてのまとめを以下にまとめる.

- ・乾湿繰り返し実験の方が電食実験に比べて, 同程度の鉄筋腐食率における腐食生成物厚さは大きくなる.
- ・電食実験の場合, 鉄筋腐食率が 8%以上の場合で違いが生じ, 電流密度が最も低い場合 ( $I_{corr} = 10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), 電流密度が高い場合に比べて同程度の鉄筋腐食率における腐食生成物厚さは大きくなる.
- ・乾湿繰り返し実験の場合, 平均腐食率が 4%以上になると腐食生成物厚さは角度に依らず, 断面は真円に近い形状になる.
- ・電食実験の場合, 平均腐食率が 4%以上になると腐食生成物の断面形状ははり底面側にピークを有する半楕円形になり, 電流密度の大きさに依る形状の違いは認められなかった.

以上の結果から, 腐食生成物の厚さ・形状は腐食実験条件の違いが大きく影響していることがわかる. そこで, 腐食実験条件の違いが鉄筋腐食率と腐食生成物厚さの関係に及ぼす影響を考慮した腐食生成物の厚さ・形状をモデル化する. まず, 鉄筋腐食率と断面ごとの平均

腐食生成物厚さ  $MTcp_l$  との関係腐食実験手法ごとに近似し、腐食生成物の厚さをモデル化する。このとき、電食実験の場合は電流密度をパラメータとする。次に、観察角度ごとの平均腐食生成物厚さ  $MTcp_\theta$  を平均腐食生成物厚さ  $MTcp$  で除した値を腐食実験手法ごとにし、腐食生成物の形状をモデル化する。この近似値を角度パラメータ  $\alpha(\theta)$  とする。なお、腐食生成物厚さが十分に大きく腐食生成物の形状が腐食ひび割れ性状に影響を及ぼす可能性がある平均鉄筋腐食率 4%以上の領域を近似の対象とする。最後に、角度パラメータ  $\alpha(\theta)$  と断面ごとの平均腐食生成物厚さ  $MTcp_l$  の積を腐食生成物厚さ  $Tcp(\theta)$  と定義することで、鉄筋腐食率に対する腐食生成物の厚さおよび形状をモデル化する（図 5-13 参照）。

実験結果から得られた鉄筋腐食率と断面ごとの平均腐食生成物厚さ  $MTcp_l$  との関係近似した結果を以下に示す。図 5-14 に電食実験に対する、鉄筋腐食率と断面ごとの平均腐食生成物厚さ  $MTcp_l$  と関係の近似曲面を示し、式(5-11)にその近似式を示す。

$$MTcp_l = (2.873 \times 10^{-2} - 2.372 \times 10^{-5} I_{corr}) R_w \quad (5-11)$$

ここで、 $I_{corr}$  は電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )、 $R_w$  は各位置の鉄筋腐食率 (%) である。

また、図 5-15 に乾湿繰返し実験に対する、鉄筋腐食率と断面ごとの平均腐食生成物厚さ  $MTcp_l$  と関係の近似曲線を示し、式(5-12)にその近似式を示す。

$$MTcp_l = 8.773 \times 10^{-2} R_w \quad (5-12)$$

鉄筋腐食率  $R_w$  は各撮影角度における鉄筋の体積減少率の平均値に等しいため、式(5-13)に示す腐食前の鉄筋径  $R$  (mm) と腐食後の鉄筋径  $R'$  (mm) の関数として表される。したがって、式(5-11)と式(5-12)の右辺を腐食前の鉄筋径  $R$  と腐食後の鉄筋径  $R'$  の関数となるように変換すると、式(5-11)と式(5-12)はともに式(5-14)で表せる。さらに、式(5-14)中の係数  $n$  は腐食による鉄筋径の減少量を腐食生成物厚さに変換するパラメータであり、電食実験の場合は式(5-15)で、乾湿繰返し実験の場合は式(5-16)で表せる。

$$R_w = \frac{R^2 - R'^2}{R^2} \times 100 \quad (5-13)$$

$$MTcp_l = n(R - R') \quad (5-14)$$

$$n = \frac{(R + R')}{R^2} \times (2.873 - 2.372 \times 10^{-3} I_{corr}) \quad (5-15)$$

$$n = \frac{(R + R')}{R^2} \times 8.773 \quad (5-16)$$

次に、角度パラメータ  $\alpha(\theta)$  を近似した結果を以下に示す。図 5-16 に電食実験に対する、角度パラメータ  $\alpha(\theta)$  の近似曲線を示し、式(5-17)にその近似式を示す。

$$\alpha(\theta)=1.884 \times \exp\left\{-\left(\theta / 1.600\right)^2\right\}+0.1241 \quad (5-17)$$

ここで、 $\theta$ は観察角度(rad)であり、 $-\pi < \theta \leq \pi$ である。なお、式(5-17)において $\theta$ を度数表記からラジアン表記に変換する際、 $0 \leq \theta \leq 180$  (°)の場合はラジアン表記後の $\theta$ が正値を、 $180 < \theta \leq 360$  (°)の場合はラジアン表記後の $\theta$ が負の値を取ることに注意されたい。

また、図 5-16 に乾湿繰返し実験に対する、角度パラメータ $\alpha(\theta)$ の近似曲線を示し、式(5-18)にその近似式を示す。

$$\alpha(\theta)=1 \quad (5-18)$$

以上のように近似された腐食生成物厚さと角度パラメータの関数を用いて、提案する腐食生成物モデルは以下の式(5-19)で表される。

$$T_{cp}(\theta)=\alpha(\theta) \cdot M T_{cp_i} \quad (5-19)$$

## 5.4 劣化 RC 部材の 3 次元非線形有限要素モデル

### 5.4.1 圧縮を受けるコンクリート要素のモデル化

#### 5.4.1.1 材料劣化のない場合

一般的にコンクリート構造物の設計は、コンクリートシリンダーにおける圧縮試験で決められる圧縮強度 $f_{ck}$ の特性値に対応するコンクリートの等級に基づく<sup>5-12)</sup>コンクリート特性のシミュレーションおよび推定を目的として、圧縮強度の平均値 $f_{cm}$ (MPa)が必要とされる際は、次の式より算定される<sup>5-12)</sup>。

$$f_{cm}=f_{ck}+8 \quad (5-20)$$

コンクリートの初期挙動は線形弾性構成モデルを用いてモデル化されるが、これはヤング係数およびポアソン比により定義される。コンクリートのヤング係数は応力-ひずみ曲線の初期剛性として定義されるものであり、圧縮強度および骨材の種類に依存する。標準重量コンクリートに対して、ヤング係数 $E_c$ は次の式から算定される<sup>5-12)</sup>。

$$E_c=E_{co} \times\left(f_{cm} / f_{cmo}\right)^{1 / 3} \quad (5-21)$$

ここで、 $E_{co}=2.15 \times 10^4$ (MPa)、 $f_{cmo}=10$ (MPa)である。

ポアソン比は 0.1~0.2 で変動するものであり、本研究におけるポアソン比は 0.2 とする。圧縮応力を受けるコンクリートの応力-ひずみ曲線は、応力の増大に伴って内部の微小破壊が徐々に進行するため非線形となり、また圧縮強度到達後では、ひずみ軟化挙動を示すため勾配が負となる。コンクリートの圧縮軟化挙動は実験における境界条件および供試体の寸法に強く依存する。本研究におけるコンクリートの圧縮軟化は、圧縮破壊エネルギー $G_c$ に

よって表される。圧縮破壊エネルギーは圧縮強度に非線形な関係で増加し、次の式で表される<sup>5-13)</sup>。

$$G_c = 8.8 \times (f_{cm})^{1/2} \quad (5-22)$$

コンクリート要素の圧縮挙動には放物線状の等価応力-等価ひずみ曲線を用いた。この曲線は、以下の式で表される<sup>5-14)</sup>。

$$f = -f_{cm} \frac{1}{3} \frac{\alpha_j}{\alpha_{c/3}} \quad \alpha_{c/3} < \alpha_j \leq 0 \quad (5-23)$$

$$f = -f_{cm} \frac{1}{3} \left[ 1 + 4 \times \left( \frac{\alpha_j - \alpha_{c/3}}{\alpha_c - \alpha_{c/3}} \right) - 2 \times \left( \frac{\alpha_j - \alpha_{c/3}}{\alpha_c - \alpha_{c/3}} \right)^2 \right] \quad \alpha_c < \alpha_j \leq \alpha_{c/3} \quad (5-24)$$

$$f = -f_{cm} \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_j - \alpha_c}{\alpha_u - \alpha_c} \right)^2 \right] \quad \alpha_u < \alpha_j \leq \alpha_c \quad (5-25)$$

$$f = 0 \quad \alpha_j \leq \alpha_u \quad (5-26)$$

ここで、 $\alpha_{c/3}$ は最大圧縮強度 $f_{cm}$ の1/3に達する時のひずみであり、次の式で表される。

$$\alpha_{c/3} = -\frac{1}{3} \frac{f_{cm}}{E_c} \quad (5-27)$$

また、 $\alpha_c$ は最大圧縮強度 $f_{cm}$ に達する時のひずみであり、次の式で表される。

$$\alpha_c = -\frac{5}{3} \frac{f_{cm}}{E_c} = 5\alpha_{c/3} \quad (5-28)$$

ここに、 $\alpha_u$ は材料が圧縮において完全に軟化されるとき終局ひずみであり、次の式で表される。

$$\alpha_u = \alpha_c - \frac{3}{2} \frac{G_c}{h \times f_{cm}} \quad (5-29)$$

圧縮挙動を示すコンクリート要素の応力-ひずみ関係を図 5-17(a)に示した。

#### 5.4.1.2 材料劣化のある場合

腐食生成物の拡大はコンクリートのひび割れや剥落を引き起こす。その結果として、腐食により劣化したコンクリート領域は、劣化していないコンクリート領域に比べて低下した構造性能を示す。かぶりコンクリートにおける腐食劣化は、Coronelli and Gambarova<sup>5-15)</sup>より提唱されるように、有限要素モデルにおけるコンクリートの応力-ひずみ関係を修正する

ことにより考慮されるが、圧縮強度の低下は軸方向の微小ひび割れを引き起こす軸直角方向における平均引張ひずみの大きさに依存し、Vecchio and Collins<sup>5-16)</sup>によるモデルを用いて算定される。腐食の影響を受ける鉄筋を有するはりにおいて、低減されたコンクリートの圧縮強度の値は次のように表される。

$$f'_{cd} = \frac{f'_c}{[1 + k \times (\varepsilon_1 / \varepsilon_0)]} \quad (5-30)$$

ここで、 $f'_{cd}$  は腐食したコンクリートの圧縮強度(MPa)、 $f'_c$  は腐食していないコンクリートの圧縮強度(MPa)、 $k$  は鉄筋の粗さや直径に関連する係数で、 $k = 0.1$  と提案される。 $\varepsilon_0$  は圧縮強度  $f'_c$  におけるひずみ、 $\varepsilon_1$  は腐食ひび割れによる横方向における平均分布引張ひずみで、断面内の腐食した軸方向鉄筋の本数やさびの体積的な拡大、平均的な塩害浸透の関数である。低減された圧縮強度の値が、劣化したコンクリート要素に適用される。 $\varepsilon_1$  は次のように表現される。

$$\varepsilon_1 = (b_f - b_0) / b_0 \quad (5-31)$$

ここで、 $b_0$  は腐食ひび割れのない元の状態における断面幅(mm)、そして  $b_f$  は腐食ひび割れにより増加するはりの幅(mm)である。はりの幅の増加の近似が次の式より与えられる。

$$(b_f - b_0) = n_{bars} \times w_{cr} \quad (5-32)$$

ここで、 $n_{bars}$  は軸方向鉄筋の本数、 $w_{cr}$  は与えられる腐食レベルにおけるトータルひび割れ幅(mm)である。トータルひび割れ幅は、腐食による鉄筋の周の長さの増加分に等しいとして、以下の式を用いて算定される<sup>5-17)</sup>。

$$w_{cr} = 2\pi \times (v_{rs} - 1) \times X_d \quad (5-33)$$

ここで、 $v_{rs}$  は、元の材料に対する酸化物の体積拡大の比率であり、本研究では  $v_{rs}=2$  とした<sup>5-17)</sup>。 $X_d$  は腐食浸透深さ(mm)であり、Vidal et al.<sup>5-18)</sup>により提案される次の式を用いて算定される。

$$X_d = (\varphi_0 / \alpha) \times \left\{ 1 - (1 - MRw / 100)^{1/2} \right\} \quad (5-34)$$

ここで、 $\varphi_0$  は腐食前の鉄筋直径(mm)、 $\alpha$  は腐食集中係数であり、本研究では  $\alpha=2$  とした<sup>5-18)</sup>。

## 5.4.2 引張を受けるコンクリート要素のモデル化

### 5.4.2.1 材料劣化のない場合

本研究で行われる有限要素解析では、引張強度の特性値は CEB-FIP model code の関連式により推定する<sup>5-12)</sup>。コンクリートの引張強度 $f_{cm}$ および引張破壊エネルギー $G_f$ は次の式で示される。

$$f_{cm} = 0.3 \times (f_{ck})^{2/3} \quad (5-35)$$

$$G_f = 73 \times f_{cm}^{0.18} \quad (5-36)$$

コンクリート要素の引張挙動には、Hordijk モデル<sup>5-19)</sup>を用いた。引張応力を受けるコンクリートの特徴的な応力-ひび割れ開口変位曲線を考える引張応力下におけるコンクリートの応力-ひび割れ開口変位関係は、ひび割れの発生に伴って局所的にひずみが増加するため、引張強度以降では応力が低下する軟化材料として一般にモデル化される。この応力-ひび割れ開口変位関係を得るための直接的な方法として、変位制御の一軸引張試験がある。Hordijk et al.<sup>5-19), 5-20)</sup>の実験データを用いてひび割れ幅 $\Delta u_{n,ult}$ において応力が0となる応力-ひび割れ開口変位関係を提示している。その関係は以下の式で表される。

$$\frac{\sigma(\Delta u_n)}{f_{cm}} = \left[ 1 + \left( c_1 \frac{\Delta u_n}{\Delta u_{n,ult}} \right)^3 \right] \exp \left( -c_2 \frac{\Delta u_n}{\Delta u_{n,ult}} \right) - \frac{\Delta u_n}{\Delta u_{n,ult}} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad 0 < \Delta u_n < \Delta u_{n,ult} \quad (5-37)$$

$$\frac{\sigma(\Delta u_n)}{f_{cm}} = 0 \quad \Delta u_{n,ult} < \Delta u_n < \infty \quad (5-38)$$

ここで $c_1 = 3$ ,  $c_2 = 6.93$ であり、終局時のひび割れ開口変位は次のように定義される。

$$\Delta u_{n,ult} = 5.136 \times \frac{G_f}{f_{cm}} \quad (5-39)$$

また、応力-ひび割れ開口変位関係から応力-ひずみ関係に変換するために、ひび割れバンド $h$ で割った式が以下に示される<sup>5-21)</sup>。なお、ここに示されるのは、ひび割れひずみ $\varepsilon_{nm,ult}^{cr}$ において応力が0となるモデルである。

$$\frac{\sigma(\varepsilon_{nm}^{cr})}{f_{cm}} = \left[ 1 + \left( c_1 \frac{\varepsilon_{nm}^{cr}}{\varepsilon_{nm,ult}^{cr}} \right)^3 \right] \exp \left( -c_2 \frac{\varepsilon_{nm}^{cr}}{\varepsilon_{nm,ult}^{cr}} \right) - \frac{\varepsilon_{nm}^{cr}}{\varepsilon_{nm,ult}^{cr}} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad 0 < \varepsilon_{nm}^{cr} < \varepsilon_{nm,ult}^{cr} \quad (5-40)$$

$$\frac{\sigma(\varepsilon_{nm}^{cr})}{f_{cm}} = 0 \quad \varepsilon_{nm,ult}^{cr} < \varepsilon_{nm}^{cr} < \infty \quad (5-41)$$

ここで $c_1 = 3$ ,  $c_2 = 6.93$ であり、終局ひずみは次のように定義される。

$$\Delta u_{n,ult} = 5.136 \times \frac{G_f}{h \times f_{cm}} \quad (5-42)$$

引張挙動を示すコンクリート要素の応力-ひずみ関係を図 5-17 (b) に示した。

#### 5.4.2.2 材料劣化のある場合

劣化コンクリートの引張挙動のモデルは、5.4.2.1 と同様のプロセスで与えられるが、劣化コンクリートの圧縮強度の低減に伴って引張強度も低減される。

### 5.4.3 鉄筋要素のモデル化

#### 5.4.3.1 材料劣化のない場合

材料が塑性変形を開始する応力の組み合わせを降伏条件といい、本研究の耐荷力の計算に用いるモデルには、Von Mises の降伏条件を適用した。Von Mises の降伏条件は降伏関数  $f$  と合わせて以下の式で表される<sup>5-22)</sup>。

$$f = J_2 - k^2 = 0 \quad (5-43)$$

ここで、 $J_2$  は偏差応力の 2 次不変量であり、主応力を  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  とすると、 $J_2$  は以下の式で表される。

$$J_2 = \frac{1}{6} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\} = k^2 \quad (5-44)$$

ここで、 $k$  は単純せん断における降伏応力を示す。さらに、単軸試験を行った場合、降伏応力を  $\sigma_y$  とすると、 $\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0$  であるから、 $J_2$  は以下のように表される。

$$J_2 = \frac{\sigma_y^2}{3} \quad (5-45)$$

降伏後、さらに負荷を続けると、硬化を生じながら塑性変形が進行する。降伏関数  $f$  からなる曲線を降伏曲線といい、降伏曲線の形が塑性変形に伴って変形する法則を硬化則という。本研究では、降伏曲線の中心が固定され大きさのみが変化する等方硬化理論に基づく硬化則を用いた。図 5-18 に示すように、弾性係数を  $E_s$  とすると、塑性領域のひずみ硬化係数は  $E_s/100$  と設定した。

続いて、鉄筋周りの付着要素について述べる。腐食していない RC はりに対し、Kemp and Wilhem<sup>5-23)</sup> は実験に基づいて、スターラップを有する RC はりの異形鉄筋の最大付着応力を決定するための式を提案した。最大付着応力  $\tau_{max,v}$  は付着強度に対するコンクリートの寄与

$\tau_{concrete}$  およびスターラップの寄与  $\tau_{stirrup}$  により構成されるとして、以下の式(5-46)、式(5-47)、式(5-48)を最大付着応力の算出式とした。

$$\tau_{max\ v} = \tau_{concrete} + \tau_{stirrup} \quad (5-46)$$

$$\tau_{concrete} = [0.55 + 0.24 \times (c_c / d_b)] \times \sqrt{f_{cm}} \quad (5-47)$$

$$\tau_{stirrup} = 0.191 \times (A_t f_{yt} / s_s d_b) \quad (5-48)$$

ここで、 $C_c$ はかぶりコンクリート厚さ(mm)、 $d_b$ は鉄筋径(mm)、 $f_{cm}$ はコンクリート圧縮強度(MPa)、 $A_t$ はスターラップの断面積(mm<sup>2</sup>)、 $f_{yt}$ はスターラップの降伏強度(MPa)、 $S_s$ は隣り合うスターラップ同士の間隔(mm)を指す。

本研究の腐食ひび割れ幅の計算に用いるモデルでは、スターラップをスターラップとその周辺のコンクリート要素を有限要素内に一様に分散させる方法でモデル化した(分散型モデル)。ここで、鉄筋とコンクリートは完全付着となるため、付着の影響は応力-ひずみ曲線により考慮される。ひび割れ発生後もひび割れ間のコンクリートが引張力を負担するテンションスティフニング効果により、コンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は鉄筋単体の挙動と引張剛性が異なる<sup>5-24)</sup>。テンションスティフニング効果を考慮したコンクリート中の鉄筋の応力-ひずみ曲線は図 5-19 のようにモデル化される<sup>5-25)</sup>。

$$\bar{\sigma}_s = \begin{cases} E_s \bar{\varepsilon}_s & (\bar{\varepsilon}_s \leq \bar{\varepsilon}_y) \\ \bar{f}_y + \left( \frac{\bar{f}_{sh1} - \bar{f}_y}{\bar{\varepsilon}_{sh1} - \bar{\varepsilon}_y} \right) (\bar{\varepsilon}_s - \bar{\varepsilon}_y) & (\bar{\varepsilon}_y \leq \bar{\varepsilon}_s \leq \bar{\varepsilon}_{sh1}) \\ \bar{f}_{sh1} + \left( \frac{\bar{f}_{sh2} - \bar{f}_{sh1}}{\bar{\varepsilon}_{sh2} - \bar{\varepsilon}_{sh1}} \right) (\bar{\varepsilon}_s - \bar{\varepsilon}_{sh1}) & (\bar{\varepsilon}_{sh1} \leq \bar{\varepsilon}_s \leq \bar{\varepsilon}_{sh2}) \\ \bar{f}_{sh2} + \left( \frac{\bar{f}_u - \bar{f}_{sh2}}{\bar{\varepsilon}_u - \bar{\varepsilon}_{sh2}} \right) (\bar{\varepsilon}_s - \bar{\varepsilon}_{sh2}) & (\bar{\varepsilon}_{sh2} \leq \bar{\varepsilon}_s \leq \bar{\varepsilon}_u) \end{cases} \quad (5-49)$$

コンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は以下の式から算出される<sup>5-25)</sup>。

$$\bar{\varepsilon}_y = \bar{f}_y / E_s \quad (5-50)$$

$$\bar{f}_y = (1.0 - 0.5k_1) f_y \quad (5-51)$$

$$\bar{\varepsilon}_{sh1} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \varepsilon_y \quad (5-52)$$

$$\overline{f_{sh1}} = \overline{f_y} + (f_y - \overline{f_y})\alpha_4 \quad (5-53)$$

$$\overline{\varepsilon_{sh2}} = (\varepsilon_{sh2} - \overline{\varepsilon_u})/2.5 \quad (5-54)$$

$$\overline{f_{sh2}} = 1.02 \left[ \overline{f_{sh1}} + \left\{ 1 - \exp\left(\frac{\overline{\varepsilon_{sh1}} - \overline{\varepsilon_{sh2}}}{k_5}\right) \right\} \cdot (1.01f_u - \overline{f_{sh1}}) \right] \quad (5-55)$$

$$\overline{\varepsilon_u} = \overline{\varepsilon_{sh1}} - k_5 \cdot \ln\left(1 - \frac{\overline{f_u} - \overline{f_{sh1}}}{1.01f_u - \overline{f_{sh1}}}\right) \quad (5-56)$$

$$\overline{f_u} = (0.993 - 0.22k_1^2k_4^{-3})f_u \quad (5-57)$$

ここで、 $f_y$  は鉄筋単体の降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $f_u$  は鉄筋単体の引張強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $E_s$  は鉄筋単体のヤング率(N/mm<sup>2</sup>)、 $\varepsilon_y$  は鉄筋単体の降伏ひずみ、 $\varepsilon_{sh}$  は鉄筋単体のひずみ硬化開始ひずみである。各パラメータはコンクリート標準示方書の関連式<sup>5-25)</sup>により算出される。

#### 5.4.3.2 材料劣化のある場合

腐食した RC はりに対しては、Saifuash and Clark<sup>5-26)</sup>は実験に基づき、鉄筋腐食により引き起こされる付着強度の変化を予測するための実験的係数  $R$  を提案した。この係数は、腐食ひび割れ前の付着の初期増加、および平均鉄筋腐食率  $MR_w$  の増加に伴う付着の低下を予測するものである。

$$R = A_1 + A_2 \times MR_w \quad (5-58)$$

ここで、 $A_1$  と  $A_2$  の値は、腐食を誘発するために用いられる電流密度に依存しており、Maaddawy et al.<sup>5-27)</sup>より与えられる。

一般的に、スターラップの付着強度への寄与は、軸方向鉄筋で引き起こされる腐食レベルに無関係であると仮定した。したがって、腐食した RC はりの最大付着応力  $\tau_{\max}$  は以下の式で与えられる。

$$\tau_{\max} = R \times \tau_{\text{concrete}} + \tau_{\text{stirrup}} \quad (5-59)$$

$$\tau_{\max} = (A_1 + A_2 MR_w) \times \left( 0.55 + 0.24 \times \frac{c_c}{d_b} \right) \sqrt{f'_{cd}} + 0.191 \times \frac{A_s f_{yt}}{s_s d_b} \quad (5-60)$$

ここで、 $f'_{cd}$  は腐食劣化したコンクリート圧縮強度(MPa)を表す。

付着応力とすべり量の関係は、軸方向鉄筋に対する塩害浸透量およびスターラップからの拘束量によって支配される。ここでは Harajli et al.<sup>5-28)</sup>により提案された局所的な付着応力-すべり関係を適用する。付着強度の 70%までの曲線の初期部分は式(5-33)により与えられる。図 5-20 に示すように、この点を超えると、付着強度に一致するピーク値に到達するまで、剛性が低下しつつ付着応力は上昇し続ける。すべり  $S_2=0.35C_0$  (mm)まで、付着応力の線形ポストピーク低下が仮定される。付着剛性が変化するとき、また付着強度が修正されるときすべり量が、それぞれ式(5-62)、式(5-63)より与えられる。

$$\tau = \tau_1 \times (S / S_1)^{0.3} \quad (5-61)$$

$$S_\alpha = S_1 \times (\alpha \times \tau_{\max} / \tau_1)^{1/0.3} \quad (5-62)$$

$$S_{\max} = S_1 \exp[(1/0.3) \times \log(\tau_{\max,D} / \tau_1)] + S_0 \times \log(\tau_1 / \tau_{\max,D}) \quad (5-63)$$

ここで  $\alpha=0.7$ ,  $\tau_1=2.75 \times (f'_{cd})^{0.5}$  (MPa),  $S_1=0.15 \times C_0$  (mm),  $C_0$  (mm)はリブの間隔, 無筋コンクリートとせん断補強鉄筋を有するコンクリートに対して, それぞれ  $S_0=0.15$  (mm),  $S_0=0.4$ (mm)である。

以上より、鉄筋腐食が生じて劣化した場合における、コンクリートと鉄筋の付着応力-すべり関係の構成則を図 5-20 に示した。

## 5.5 腐食生成物モデルと有限要素解析を用いた腐食ひび割れ幅の再現性

本節では、5.3 でモデル化した腐食生成物モデルと 3 次元 Non-FEA を用いて算出した腐食ひび割れ幅の再現性を検証する。検証の際には、既往研究で使用していた腐食生成物モデル<sup>5-7)</sup> (以降、既往モデルと呼ぶ) と Non-FEA を用いて計算される腐食ひび割れ幅分布の解析値、および 5.3 でモデル化した腐食生成物モデル (以降、提案モデルと呼ぶ) と Non-FEA を用いて計算される腐食ひび割れ幅分布の解析値を、それぞれ実験で得られた腐食ひび割れ幅分布と比較する。5.5.1 で小型 RC はりの実験結果を用いた検証を、5.5.2 では、大型 RC はりの実験結果を用いた検証を行う。また、5.5.3 では、腐食生成物モデルと Non-FEA を用いた腐食ひび割れ幅の再現解析結果を受けて、腐食生成物モデルの改善点を考察する。さらに、4.4 で考察した断面寸法が腐食ひび割れ幅に及ぼす影響について解析的に調査した。

### 5.5.1 小型 RC はりの実験結果を用いた検証

本項では、小型 RC はりの実験結果を用いて、3 次元 Non-FEA による腐食ひび割れ幅の再現解析を行う。なお、小型 RC はりの実験結果を用いた検証では、データベースの作成に

使用する A1-13-100 シリーズ, B1-13-500 シリーズ, B1-19-100 シリーズを対象とした。

腐食ひび割れの計算に用いる 3 次元 Non-FE モデルのコンクリート要素には 8 節点ソリッド要素が適用される。コンクリート要素のメッシュサイズは、部材軸方向に幅が 10mm となるように要素分割を行った。鉄筋周りのより詳細な解析を行うため、鉄筋周りでは概ね 10mm 以下となるように定めた。要素分割を行ったモデルの断面図を図 5-21, 全体図を図 5-22 に示す。コンクリート要素のひび割れモデルは固定ひび割れモデルとし、圧縮挙動および引張挙動は 5.4.1 および 5.4.2 で述べた図 5-17 のモデルとした。せん断挙動は線形であるとした。また、この Non-FE モデルでは軸方向鉄筋はモデル化せず、腐食生成物による膨張圧によって生じる、鉄筋周りのコンクリートの変位を考慮した。これにより、腐食した鉄筋が与えるコンクリートへの影響をモデルに組み込んだ。なお、本研究で行われた全ての Non-FEA には、DIANA FEA 社の汎用非線形構造解析システム DIANA10.5 が用いられる。

#### 5.5.1.1 既往モデルを用いた場合

既往研究では、Yuan et al.<sup>5-7)</sup>のモデルを用いて、腐食生成物による膨張圧によって生じる、鉄筋周りのコンクリートの変位を考慮した。図 5-23 に既往モデルにおける鉄筋断面内における腐食の広がりを示す。 $R$  は鉄筋の半径(mm),  $u_1$  は鉄筋のかぶりに最も近い部分での腐食厚さ(mm),  $u_2$  は鉄筋のかぶり逆側での腐食厚さ(mm),  $S_1$  は腐食生成物による膨張断面積( $\text{mm}^2$ ),  $S_2$  は鉄筋の腐食断面積( $\text{mm}^2$ )を表す。ここで、鉄筋の腐食率  $\rho(\%)$  は次の式で表せる。

$$\rho = \frac{V_s}{\pi R^2} \times 100 \quad (5-64)$$

ここで、 $V_s$  は単位長さ当たりの鉄筋の腐食総体積( $\text{mm}^2$ )である。

単位長さ当たりの腐食生成物総体積を  $V_r$  ( $\text{mm}^2$ ) とすると、 $V_s$  と  $V_r$  の関係は以下のように示される。

$$V_r = nV_s \quad (5-65)$$

ここで、 $n$  は 2 から 4 までの定数であり、本研究では  $n=2$  とする。

腐食の初期段階では空隙に腐食生成物が広がるため、コンクリートに圧力を与えないが、腐食が更に進行すると腐食生成物がコンクリートに圧力を与えるようになる。ここでは、腐食生成物の体積をコンクリートに圧力を与え始める前後で 2 段階に分けて考える。

$$V_r = V_{r1} + V_{r2} \quad (5-66)$$

ここで、空隙に腐食生成物が広がっていく段階を腐食の自由拡張段階と呼び、 $V_{r1}$  は自由拡張段階での単位長さ当たりの腐食生成物の体積( $\text{mm}^2$ )を表す。 $V_{r2}$  はコンクリートに圧力を与える段階での単位長さ当たりの腐食生成物の体積( $\text{mm}^2$ )を表す。

同様に、腐食によって減少した鉄筋の体積もコンクリートに圧力を与える前後で 2 段階に分けて考える。

$$V_s = V_{s1} + V_{s2} \quad (5-67)$$

ここで、 $V_{s1}$  は自由拡張段階での単位長さ当たりの減少した鉄筋の体積(mm<sup>2</sup>)、 $V_{s2}$  はコンクリートに圧力を与える段階での単位長さ当たりの減少した鉄筋の体積(mm<sup>2</sup>)を表す。

次に、自由拡張段階での腐食生成物の体積  $V_{r1}$  は以下のように表せる。

$$V_{r1} = V_{il} + V_{s1} = 2\pi\delta_0 + V_{s1} \quad (5-68)$$

ここで、 $\delta_0$  は鉄筋とコンクリートの境界面厚さ(mm)、 $V_{il}$  は単位長さ当たりの鉄筋とコンクリートの界面層の体積(mm<sup>2</sup>)を表す。

コンクリートに圧力を与える段階での腐食生成物の体積  $V_{r2}$  は次の式で表せる。

$$V_{r2} = V_c + V_{s2} = \frac{1}{2}\pi R(u_1 + 3u_2) + V_{s2} \quad (5-69)$$

ここで、 $V_c$  は単位長さ当たりの鉄筋周りのコンクリートの膨張体積(mm<sup>2</sup>)である。

式(5-64)～式(5-70)を用いて、腐食率  $\rho$  は次のように表せる。

$$\rho = \frac{4\delta_0 + u_1 + 3u_2}{2(n-1) \cdot R} \times 100\% \quad (5-70)$$

また、コンクリート表面に最も近い部分での鉄筋の腐食厚さ  $u_1$  と最も遠い側での鉄筋の腐食厚さ  $u_2$  の関係は以下のように示される。

$$\frac{u_2}{u_1} = m \quad (5-71)$$

ここで、 $m$  は  $\frac{1}{30}$  から  $\frac{1}{20}$  までの定数であり、本研究では  $m = \frac{1}{30}$  とする。

また、角度  $\theta$  での腐食厚さ、すなわちコンクリートの変位  $u_\theta$  (mm)は、 $u_1, u_2, R, \theta$  を用いて次の式で表せる。

$$u_\theta = \begin{cases} u_2 & (0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ) \\ \frac{(R+u_1) \cdot (R+u_2)}{\sqrt{(R+u_1)^2 \cos^2 \theta + (R+u_2)^2 \sin^2 \theta}} - R & (180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ) \end{cases} \quad (5-72)$$

式(5-70)、式(5-71)を用いて、コンクリート表面に最も近い部分での鉄筋の腐食厚さ  $u_1$  と最も遠い側での鉄筋の腐食厚さ  $u_2$  を求める。更に、式(5-72)を用いることで、任意の角度におけるコンクリートの変位を求めることができる。このようにして腐食率  $\rho$  と鉄筋径  $R$  から求めたコンクリートの変位を、Non-FE モデル内のコンクリート要素に与え、腐食ひび割れ幅を算出した。この膨張圧による腐食ひび割れ幅は、コンクリート要素に生じる塑性ひずみと各要素の等価長さ（体積の 3 乗根）の積として算出された<sup>5-29), 5-30)</sup>。

既往モデルを用いた 3 次元 Non-FEA による再現解析結果を図 5-24 に示す。再現解析結果と実験結果の腐食ひび割れ幅分布全体を比較すると、再現解析結果の方が大きな値を示す傾向にある。この原因としては、1 つ目に、電食実験中に腐食生成物の一部が腐食ひび割れ幅を通して水槽内に落下し、腐食生成物の全てが膨張圧をコンクリートに与えるわけではないため、その分、鉄筋腐食量に対する腐食ひび割れ幅が小さくなることがあげられる<sup>5-27)</sup>。既往モデルでは、乾湿繰り返し試験の結果をもとに腐食生成物厚さをモデル化しており、腐食生成物の流れ出しの影響は考慮されていないため、腐食生成物厚さを過大に評価したと考えられる。2 つ目として、コンクリートの打設後、鉄筋下面側でコンクリートとの界面に空隙が生じやすく、腐食生成物の膨張圧を吸収することが考えられる。本解析において、Non-FE モデルのコンクリート要素には腐食生成物を剛体と仮定して、腐食生成物の厚さを強制変位として与えている。一方で、電食実験で生じる腐食生成物の全てが結晶化されているわけではないため、膨張圧に寄与する腐食生成物の量が過大評価され、腐食ひび割れ幅が実際よりも大きく算出されたと考えられる。

#### 5.5.1.2 提案モデルを用いた場合

5.3 で提案した腐食生成物厚さモデルを用いた 3 次元 Non-FEA による再現解析を行う。対象としている小型 RC はりはすべて電食実験で腐食させているため、5.3 の式(5-19)で提案したモデル式のうち、角度パラメータは式(5-17)、断面ごとの平均腐食生成物厚さは式(5-11)を使用する。提案モデルを用いた腐食ひび割れ幅分布の再現解析結果を図 5-24 に示す。既往モデルを用いた場合に比べて、実験値を再現することができている。腐食ひび割れ幅の推定精度を比較するために、解析結果の平均腐食ひび割れ幅と実験結果の平均腐食ひび割れ幅の絶対誤差を用いる。この差は、0 に近いほど解析結果の推定精度がよく、0 より大きければ解析結果が過大評価、0 より小さければ過小評価していることを表す。図 5-25 に示すように、ほとんどの供試体で提案した腐食生成物モデルは既往のモデルを用いた場合に比べて、腐食ひび割れ幅の再現性が向上した。実験条件の違いを考慮して腐食生成物をモデル化することで、既往モデルよりも膨張圧に寄与する腐食生成物をとらえることができたといえる。一方で、提案モデルを用いた場合でも、A1-13-100 シリーズ、B1-13-500-20、B1-19-100-20 では腐食ひび割れ幅が過大評価されている。これは、既往モデルを用いた Non-FEA と同様に、Non-FE モデルにおいて、腐食生成物を剛体と仮定して、腐食生成物の厚さを強制変位として与えているため、膨張圧に寄与する腐食生成物の量が過大評価され、腐食ひび割れ幅が実際よりも大きく算出されたと考えられる。

また、B1-19-100-10 と A1-13-20 では、既往モデルに比べて再現性が低下した。B1-19-100-10については、図 5-25 に示す通り、解析値が過小評価している。これは、提案モデルのモデル化の際に鉄筋径の影響を考慮していないためと推察される。Zhang et al.が、鉄筋径が大きい場合、同程度の鉄筋腐食率における腐食生成物量が増加し、その結果として腐食ひび割れ幅が大きくなることを示した<sup>5-31)</sup>ことを考慮すると、D13 である RC はりのみを用いて腐食生成物モデルを作成した結果として、より鉄筋径が大きい RC はりの腐食ひび割れ幅を過小評価したと推察される。

A1-13-100-20 は、他の供試体と比べても解析値が極端に過大評価している。図 5-26 に示す、各供試体の平均鉄筋腐食率と絶対誤差の関係をみると、特に平均鉄筋腐食率が大きい場合に、絶対誤差が大きいことが分かる。これは腐食率が大きくなるほど、腐食生成物厚さと腐食生成物の膨張量（腐食生成物の外縁と腐食前の鉄筋の外縁との差）の差が大きくなり、膨張圧を過大評価するためと考えられる。膨張圧を過大評価した理由を考察するため、腐食生成物のモデル化に用いた RC はりの実験結果を用いて、腐食による鉄筋の断面ごとの平均的な膨張量を意味する量である断面ごとの平均膨張量  $ME_l$  (mm)を以下の式(5-28)で定量化した。

$$ME_l = \begin{cases} \frac{R' + 2 \times MTcp_l - R}{2} & (R' + 2 \times MTcp_l - R > 0) \\ 0 & (R' + 2 \times MTcp_l - R \leq 0) \end{cases} \quad (5-28)$$

ここで、 $R'$ は腐食後の鉄筋径(mm)、 $R$ は腐食前の鉄筋径(mm)、 $MTcp_l$ は断面ごとの平均腐食生成物厚さ(mm)である。腐食後の鉄筋径  $R'$ (mm)は平均鉄筋腐食率  $MRw$ (%)を用いて式(5-29)で表せる。

$$R' = R \sqrt{1 - \frac{Rw}{100}} \quad (5-29)$$

図 5-27 と図 5-28 に平均鉄筋腐食率と断面ごとの平均膨張量の関係をそれぞれ示す。図 5-27 に示すように、特に電食実験では、鉄筋腐食率の増加に伴って厚さが増大していく腐食生成物厚さに比べて、膨張量は増加しないことが分かる。つまり、X線撮影により観測可能な腐食生成物の全てが膨張圧に寄与しているとは限らない。鉄筋腐食率が高くなるにつれて提案モデルで推定される腐食生成物厚さは膨張量を過大に評価するため、平均腐食率の高い A1-13-100-20 は解析値が過大になったと考えられる。

### 5.5.2 大型 RC はりの実験結果を用いた検証

本項では、大型 RC はりの実験結果を用いて、3次元 Non-FEA による腐食ひび割れ幅の再現解析を行う。Non-FE モデルのコンクリート要素の構成則やメッシュサイズは小型 RC はりと同様であり、断面寸法のみ異なる。要素分割を行ったモデルの断面図を図 5-29 に示す。

#### 5.5.2.1 既往モデルを用いた場合

既往モデルを用いた 3次元 Non-FEA による再現解析結果を図 5-30 に示す。再現解析結果と実験結果の腐食ひび割れ幅分布全体を比較すると、小型 RC はりの場合と同様に、再現解析結果の方が大きな値を示した。この原因としては、腐食生成物の流れ出しや膨張圧がコンクリートの空隙に吸収される影響が考慮できていないためと考えられる。

#### 5.5.2.2 提案モデルを用いた場合

提案モデルを用いた 3次元 Non-FEA による再現解析結果を図 5-30 に示す。図 5-31 に、解析結果の平均腐食ひび割れ幅と実験結果の平均腐食ひび割れ幅の絶対誤差を示す。提案モデルを用いた場合の方が既往モデルを用いた場合に比べて、腐食ひび割れ幅の再現性が向上した。一方で、提案モデルを用いた場合でも、解析値の方が過大評価している。これは、小型 RC はりの場合と同様に、Non-FE モデルにおいて、腐食生成物を剛体と仮定していることが原因であると考えられる。

次に、平均鉄筋腐食率と絶対誤差の関係についてみると、図 5-32 に示す通り、鉄筋腐食率の増加に伴って、絶対誤差が大きくなっていることが分かる。5.5.1.2 で示した通り、鉄筋腐食率と腐食生成物厚さの関係と鉄筋腐食率と膨張量の関係が異なり、腐食率が高いほど、腐食ひび割れ幅の解析値が過大評価すると考えられる。

### 5.5.3 腐食ひび割れ幅の予測精度改善に向けた考察

本節では、5.5.1 と 5.5.2 の結果を受けて、腐食ひび割れ幅の予測精度改善に向けた考察を行う。さらに、4.4.1 で言及した断面寸法が腐食ひび割れ幅に及ぼす影響についても合わせて考察した。

まず、5.5.1.2 と 5.5.2.2 で示した通り、提案モデルでは腐食生成物の流れ出しを考慮できていると考えられ、既往モデルに比べて腐食ひび割れ幅の再現性が向上した。一方で、提案モデルを使用した場合でも過大評価する傾向にあった。これは、Non-FEA において、腐

食生成物を剛体として仮定しており、膨張圧に寄与する腐食生成物量を過大評価しているためと考えられる。今後、腐食生成物の元素分析<sup>5-10)</sup>やナノインデンテーション試験<sup>5-32)</sup>等による腐食生成物の弾性的性質を調査することにより、腐食生成物による膨張圧をより精度よく評価できると考えられる。ただ一方で、腐食生成物による膨張圧がコンクリートの空隙に吸収される等、膨張圧を正確に定量化することは困難であると考えられる。そこで、腐食生成物厚さのうち膨張圧に寄与する割合を表すパラメータを腐食ひび割れ幅の再現解析結果と実験結果との比較から定量化することで、腐食ひび割れ幅の再現性が向上していくと考えられる。

次に、提案モデルでは、モデル化の際に鉄筋径の影響を考慮していないため、鉄筋径が異なる RC はりに対しては再現精度が低下したものがあつた。鉄筋径が大きいほど同じ鉄筋腐食率に対する腐食生成物量は多くなると考えられるため、鉄筋腐食率(%)ではなく鉄筋腐食量(断面損失量や体積損失量)と腐食生成物厚さとの関係を調査することや、異なる鉄筋径を持つ RC はりを対象に入れて、モデル化を行っていく必要がある。

また、提案した腐食生成物モデルと Non-FEA を用いて計算を行うと、平均鉄筋腐食率が高い場合に腐食ひび割れ幅を過大評価することがわかつた。この理由として、提案モデルを用いて推定される腐食生成物厚さが、実際の腐食生成物の膨張圧を過大評価している点にあると考察した。提案モデルでは、X 線画像を用いて腐食生成物の外縁と腐食後の鉄筋の外縁の差を腐食生成物厚さとしてモデル化しているが、実際に腐食ひび割れに寄与すると考えられる膨張量(腐食生成物の外縁と腐食前の鉄筋の外縁との差)を計測するなど、腐食による鉄筋径の減少を考慮することで、腐食ひび割れ幅の予測精度は改善できると考えられる。

最後に、RC はりの断面寸法が鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係に及ぼす影響について解析的に検証する。本研究の解析で用いている大型 RC はりの Non-FE モデルと、鉄筋径および鉄筋間隔を大型 RC はりと同一とし、断面サイズのみ小型 RC はりに合わせた断面寸法検証用の小型 RC はりにそれぞれ同様の鉄筋腐食率を与えて、Non-FEA により算出された腐食ひび割れ幅を比較した。図 5-33 に要素分割を行った断面寸法検証用の小型 RC はりの Non-FE モデルの断面図を示す。本解析では、鉄筋軸方向および円周方向に 0.1mm の変位を鉄筋位置のコンクリート要素に与えた。Non-FEA により算出した腐食ひび割れ幅分布を図 5-34 に示す。L 鉄筋下と R 鉄筋下に生じる腐食ひび割れ幅は小型 RC はりに比べて大型 RC はりの方が小さいことが分かる。C 鉄筋下では、どちらもほとんどひび割れが生じていないが、これは鉄筋間に生じる圧縮応力により抑制されたと考えられる。L 鉄筋および R 鉄筋

下で、大型 RC はりの方が腐食ひび割れ幅が小さくなる理由について、RC はり断面に生じるひずみや応力に着目する。大型 RC はりおよび断面寸法検証用の小型 RC はりの Y 軸方向に生じたひずみコンター図を図 5-35 に示す。なお、図中のひずみは引張が正である。図 5-35 より、大型 RC はりに比べて小型 RC はりの方が L 鉄筋および R 鉄筋から RC はり側面に向かって Y 軸方向の引張ひずみが生じる領域が短いことが分かる。つまり、小型 RC はりでは、鉄筋から RC はり側面方向に伸びるひび割れが抑制されている。これは、河村らの既往研究<sup>5-33)</sup>においても、断面寸法が小さい場合、鉄筋から RC はり側面方向に生じるひび割れの進展長さは制限されることが実験的に確認されている。この原因を、応力コンター図を用いて考察する。大型 RC はりおよび断面寸法検証用の小型 RC はりの Y 軸方向に生じた応力コンター図をそれぞれ図 5-36、図 5-37 に示す。なお、図中の応力は引張が正である。鉄筋位置と同程度の高さの RC はり側面に圧縮応力がはたらいっていることが分かる。これは、両側の鉄筋から鉄筋直下の RC はり底面に向かってコンクリート表面が広がるようなひび割れが生じ、さらに RC はり側面方向にひび割れが進展していくことで、両側鉄筋より側面側かつ底面側のかぶりコンクリートが底面側に変形し、RC はり側面に圧縮力がはたらくと考えられる。RC はり側面に圧縮応力がはたらくことで、側面方向に進展するひび割れが抑制され、RC はり側面側のかぶりが小さい小型 RC はりの方が側面方向のひび割れ長さが短くなる。RC はり底面側のかぶりが同じ場合、かつ、同じ膨張圧がはたらいっている場合、RC はり側面方向のひび割れが抑制されている方が、両側鉄筋より側面側かつ底面側のかぶりコンクリートが底面側に変形する量が大きくなるため、その分、鉄筋直下に生じるひび割れ幅も大きくなると考えられる。これより、断面寸法の小さい小型 RC はりの方が大型 RC はりに比べて腐食ひび割れ幅が大きくなったと推察される。

このように、断面寸法、特に側面側のかぶりが鉄筋直下に生じる腐食ひび割れ幅に影響を及ぼす可能性があるため、腐食ひび割れ幅を算出する Non-FEA では、断面寸法を考慮したモデルを用いる必要があると考えられる。一方で、本研究では、断面寸法の違いが腐食ひび割れ幅に及ぼす影響の解析的な検討が不十分であったことから、データベースの作成では断面寸法の影響を考慮していない。今後は、様々な断面寸法の RC はりを対象に Non-FEA による解析を行い、断面寸法の違いがどれほど腐食ひび割れ幅の大きさに影響するのかを実験的・解析的に調査した上で、データベースに寸法効果の影響を含めるべきかを検証する必要がある。

## 5.6 機械学習用データベースの作成

5.2.2 で発生させた疑似鉄筋腐食率分布から 5.3 で提案した腐食生成物モデルを用いて換算された疑似腐食生成物厚さ分布と、5.5 で示した Non-FEA によって算出した疑似腐食ひび割れ幅分布の関係を多数作成した。本研究では、疑似鉄筋腐食率分布から式(5-14)を用いて計算される断面ごとの平均腐食生成物厚さ分布と、それに対応する疑似腐食ひび割れ幅分布をデータベースとする。5.7 で腐食ひび割れ幅分布から腐食生成物厚さ分布を予測する機械学習モデルを構築する。

表 5-3 にデータベースの概要を示す。大型 RC はりに適用するため、データベースの作成に用いる RC はりは、大型 RC はりの持つ構造諸元（鉄筋径、鉄筋間隔）を網羅できる RC はりを想定する。また、異なる構造諸元（鉄筋径、鉄筋間隔）を持つ RC はりをまとめて 1 つのデータベースとすることで、様々な構造諸元を持つ RC はりに対応可能な機械学習モデルの構築を目指す。なお、断面寸法は小型 RC はりと同一のものとする。

D13 または D19 の鉄筋径と、57mm または 95mm の鉄筋間隔を持つ 3 種類の RC はりを想定して、各供試体 50 サンプルずつデータを取得した。なお、鉄筋腐食率分布から腐食ひび割れ幅分布を算出する際、Non-FEA に用いるコンクリートの圧縮強度は、実験供試体の材齢 28 日でのコンクリート圧縮強度（表 4-4 参照）の平均値から、全てのケースで 45MPa とした。また、各 RC はりにおける腐食生成物厚さ分布と腐食ひび割れ幅分布のデータのうち、40 個を機械学習モデルの学習用、10 個を学習済み機械学習モデルの検証用として用いた。

最後に、実験結果の鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅関係とデータベース作成に用いた鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係を図 5-38 に示す。鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅のばらつき方は実験結果をよく再現できているといえる。一方で、同程度の鉄筋腐食率における腐食ひび割れ幅はデータベースの方が大きくなっている傾向にある。これは、5.5 で述べた通り、腐食ひび割れ幅を算出する Non-FEA において、膨張圧に寄与する腐食生成物を過大評価しており、腐食ひび割れ幅が過大に計算されるモデルとなっていたことが原因であると考えられる。本研究では、このデータベースを用いて、腐食ひび割れ幅から腐食生成物厚さ分布および鉄筋腐食率を予測する機械学習モデルの構築を行う。

## 5.7 機械学習モデル (pix2pix)

本節では、pix2pix の概要および本研究における pix2pix モデルについて述べる。本研究では、画像変換問題に対応する汎用的な機械学習モデルである pix2pix<sup>5-34)</sup>を用いる。画像を用

いる理由については、腐食ひび割れ幅分布と鉄筋腐食率分布の関係における 2 次元の連続性を考慮するためである。

pix2pix<sup>5-34)</sup>とは、条件付き敵対的生成ネットワーク (cGAN) の一種であり、**図 5-39** に示すように任意の画像のペアの変換を学習するネットワークである。敵対的生成ネットワーク (GAN) とは、用意された訓練データに似た新たなデータを作成する画像生成モデルであり、生成器 (Generator:  $G$ ) と識別器 (Discriminator:  $D$ ) という 2 つのネットワークで構成されている。生成器  $G$  では、ノイズベクトルから偽の画像  $G(x)$  を生成し、識別器  $D$  で真の画像  $y$  か生成された偽の画像  $G(x)$  かを判定する。そして、生成器  $G$  は、真の画像  $y$  と見分けがつかない偽の画像  $G(x)$  を生成するように学習し、一方、識別器  $D$  は真偽を正しく判定するように学習する。生成器  $G$  と識別器  $D$  が敵対的に学習することで、より本物らしい画像を生成することができる<sup>5-35)</sup>。通常の GAN では、ランダムに生成したノイズベクトルを入力とするが、cGAN ではノイズベクトルだけでなく条件データも入力とすることができる。pix2pix では条件データを画像として入力し、ノイズはドロップアウトという形でモデルに組み込んでいる。つまり、入力画像  $x$  と真の画像  $y$  の組み合わせにより、画像間の変換方法を学習させる。

pix2pix の生成器  $G$  には U-Net と呼ばれるネットワークを用いている。U-Net は、データから特徴量を抽出する際、局所的な情報だけでなく、位置情報も保持することができ、質の高い画像を得ることができる。一方、識別器  $D$  には Patch GAN を用いている。Patch GAN は、識別する際に画像を小さな領域に分け、各領域に対して判定することで画像の詳細を捉えることができる<sup>5-34)</sup>。

pix2pix を構築するにあたり、データベースである構造諸元 (細目)、腐食ひび割れ幅分布および鉄筋腐食率分布から計算される腐食生成物分布を画像に変換する。その手順を**図 5-40** に示す。まず、部材軸方向に 10mm ごと 41 要素の値を持つ腐食ひび割れ幅分布と腐食生成物分布をそれぞれ L 鉄筋、C 鉄筋、および R 鉄筋の順に並べた 3 行 41 列の行列とする。それを**図 5-40** のようにそれぞれ 64 行 64 列の行列中央に回転させて配置し、値を持たない位置は 0 を与えた。鉄筋径と軸方向の鉄筋間隔については、供試体ごとに 1 つの値を持つため、それぞれ 64 行 64 列の行列に与えた。そして、実験結果の最小値と最大値が収まる範囲 (**表 5-4** 参照) を輝度の範囲 (0~255) となるように数値変換を行う。最後に、腐食ひび割れ幅分布、鉄筋径、鉄筋間隔をそれぞれ R, G, B チャンネルとして与えた 8bit の RGB 画像 (64×64×3pixel) と平均腐食生成物厚さ分布の 8bit グレースケール画像 (64×64×1pixel) を得る。

pix2pix の計算では、MATLAB Deep Learning Toolbox にある pix2pix (<https://github.com/matlab-deep-learning/pix2pix>) を利用し、エポック数は 50 に設定した。各 RC はり 50 個の腐食ひび割れ幅分布と平均腐食生成物厚さ分布のうち、40 個を学習用データ、10 個を精度確認用の検証用データとした。なお、学習データについては、画像変換の際、軸方向を対称に反転させた画像を加えて、80 セットの画像を学習に用いることとした。

## 5.8 機械学習を用いた腐食ひび割れ情報に基づく鉄筋腐食率分布の予測結果

まず、検証用データを用いて、pix2pix モデルから予測された鉄筋腐食率分布と正解値の比較の一例を図 5-41 に示す。pix2pix の出力は断面ごとの平均腐食生成物厚さであるため、鉄筋腐食率に変換する必要がある。pix2pix モデルの出力は 8bit のグレースケール画像であるため、輝度値 (0~255) が腐食生成物厚さ (0~表 5-4 に示す最大値) となるように数値変換を行い、式(5-14)でモデル化した関数を用いて腐食生成物厚さから鉄筋腐食率に換算している。これをみると、正解値に対して概ね精度の良い予測ができています。予測精度を定量的に評価するために、RMSE を算出する。

供試体ごとに、正解となる 10 個のテストデータと予測された鉄筋腐食率分布を用いて RMSE を算出した結果を表 5-5 に示す。既往の研究の pix2pix のモデルと比較すると、RMSE は大きいものの、ケース間で RMSE の大きさに違いはみられないため、1 つの pix2pix モデルで、異なる構造諸元 (細目) をもつ RC はりに対応できる汎用的なモデルになったといえる。一方で、本研究で使用した pix2pix モデルは、腐食ひび割れ幅分布、鉄筋径、鉄筋間隔をそれぞれ R、G、B チャンネルとして与えており、これ以上の構造諸元を入力として考慮することができない。鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係には多くのパラメータが影響しているため、今後は、3 つ以上のパラメータを考慮可能な機械学習モデルを構築する必要がある。

次に、小型 RC はり実験結果を用いて、腐食ひび割れ幅分布の実験値から pix2pix モデルにより予測された鉄筋腐食率分布を図 5-42 に示す。また、図 5-43 に、実験結果の平均鉄筋腐食率と予測結果の平均鉄筋腐食率の絶対誤差を示す。腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率に極めて大きい不確実性が存在することを踏まえると、実験結果の鉄筋腐食率分布と比べると、概ね精度の良い予測結果であるといえる。一方で、A1-13-100-20 では予測結果が過小評価する結果となった。この原因として、データベース作成において、鉄筋腐食率が高い場合に腐食ひび割れ幅を過大評価していたことがあげられる。5.5 で述べたように、本研究で用いた腐食生成物モデルと Non-FEA では、平均鉄筋腐食率が高い場合に腐食ひび割れ幅を過

大に評価するモデルとなっていたため、ある鉄筋腐食率に対する腐食ひび割れ幅が実験結果よりも大きいデータベースを用いて pix2pix を構築していた。つまり、今回の pix2pix では、実験結果の腐食ひび割れ幅を入力すると実験結果の鉄筋腐食率よりも小さく予測されるモデルとなっていると考えられる。

図 5-44 に Non-FEA を用いた腐食ひび割れ幅の再現結果と実験結果の絶対誤差に対する pix2pix を用いた鉄筋腐食率の実験結果と予測値の絶対誤差を示す。図 5-44 をみると、Non-FEA による腐食ひび割れ幅の解析値が過大評価しているほど、pix2pix による鉄筋腐食率の予測値は小さい傾向にあることが分かる。つまり、データベースの作成において、腐食ひび割れ幅の予測精度を向上させることで機械学習モデルの予測精度が改善されるといえる。また、供試体ごとに、実験結果と予測された鉄筋腐食率分布を用いて RMSE を算出した結果を表 5-6 に示す。表 5-5 に示す検証用データを用いて算出した RMSE に比べて大きい傾向にある。これは、データベースが実験の鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係を完全にはモデル化できていない（図 5-38 参照）ため、検証用データより実験結果を用いた場合の方が鉄筋腐食率の予測精度が下がったと考えられる。この影響を 5.9 で説明する実験結果に基づく補正を行うことで考慮する。

### 5.9 pix2pix に介在するモデル誤差

5.8 で示した通り、pix2pix を用いた鉄筋腐食率の予測には誤差が伴う。この予測に伴う誤差として、2つのモデル誤差が考えられる。1つ目は、検証用データに対する pix2pix のモデル誤差である。このモデル誤差が小さいほど、機械学習モデルがデータベースの入力と出力の関係をよく学習できていることを表す。2つ目は、実験結果に対する pix2pix のモデル誤差である。実験結果に対する pix2pix のモデル誤差が小さいほど、データベースが実験結果をよく再現できていることを表す。

既往の研究<sup>5-6)</sup>では、耐荷力を推定する際に、検証用データに対する pix2pix のみを考慮した MCS により、鉄筋腐食率分布群を多数作成していた。しかし、検証用データに対する予測精度が高くても、データベース以外のデータを同じような精度で予測できるとは限らない。そこで、本研究では、検証用データに対する pix2pix のモデル誤差だけでなく、実験結果に対する pix2pix のモデル誤差も考慮することにより、pix2pix により予測された鉄筋腐食率分布から、実際に起こり得る鉄筋腐食率分布群を作成することとした。

耐荷力の推定にモデル誤差を考慮するにあたり、予測された鉄筋腐食率分布に対してどのように誤差が生じているのかを定量的に表現する必要がある。そこで本節では、モデル誤

差の定量化を行う。5.9.1では、検証用データを用いて検証用データに対する pix2pix のモデル誤差を定量化し、5.9.2では、小型 RC はりの実験結果を用いて実験結果に対する pix2pix のモデル誤差を定量化する。

### 5.9.1 検証用データを用いたモデル誤差の定量化

本項では、検証用データを用いて算出したモデル誤差に対して、分布の形状や特性値について分析を行った。

本研究では、検証用データに対する pix2pix のモデル誤差  $\varepsilon_{Test}$  を以下の式で定義する。

$$\varepsilon_{Test} = R_{w_{Test}} - R_{w_{pix2pix}} \quad (6-2)$$

ここで、 $R_{w_{Test}}$  は正解値である検証用データの鉄筋腐食率、 $R_{w_{pix2pix}}$  は検証用データの腐食ひび割れ幅から pix2pix で予測された鉄筋腐食率である。3本の軸方向鉄筋がそれぞれ41点の鉄筋腐食率データを持っているテストデータ30個を用いて算出された、合計3690点のモデル誤差の確率密度分布(PDF)を図5-45に示す。また、図中にモデル誤差の平均と標準偏差から算出した正規分布を重ねて示した。モデル誤差が小さいときは多少形状が異なるものの、左右の裾の部分にあたるモデル誤差が大きいときには、精度よく正規分布に従っているといえる。そのため、本研究では pix2pix のモデル誤差  $\varepsilon_{Test}$  は以下の式のように正規分布に従うものとする。

$$\varepsilon_{Test} = \mu_{Test} + \sigma_{Test} \cdot r \quad (6-3)$$

ここで、 $\mu_{Test}$  はモデル誤差  $\varepsilon_{Test}$  の平均、 $\sigma_{Test}$  はモデル誤差  $\varepsilon_{Test}$  の標準偏差、 $r$  は正規乱数を表す。

続いて、モデル誤差  $\varepsilon_{Test}$  の平均  $\mu_{Test}$  と標準偏差  $\sigma_{Test}$  について述べる。検証用データの RC はりごと(1個当たり3本の鉄筋が各41点のデータを持つ)にモデル誤差の平均と標準偏差を算出し、分析を行った。図5-46にモデル誤差の平均の確率密度分布(PDF)を示す。これをみると、モデル誤差の平均はばらつきを持っていることが分かる。そこで、モデル誤差  $\varepsilon_{Test}$  の平均  $\mu_{Test}$  は平均値-1.87%、標準偏差2.89%の正規分布に従うとして、鉄筋腐食率分布群を発生させるときには、1つの RC はりの1サンプルごとに毎回異なる値を取ることとした。次に、図5-47に示すように、標準偏差は正解値であるテストデータの平均鉄筋腐食率が大きくなるほど大きくなる傾向が見られた。以下にモデル誤差  $\varepsilon_{Test}$  の標準偏差  $\sigma_{Test}$  と正解データの平均鉄筋腐食率  $MR_w$  の関係式を示す。

$$\sigma_{Test} = 0.6912MR_w \quad (6-4)$$

しかし、実際に鉄筋腐食率分布を予測する際には、正解データの平均鉄筋腐食率は既知ではない。そこで本研究においてモデル誤差の標準偏差を算出する際は、予測された鉄筋腐食率分布の平均にモデル誤差の平均を加えたものを正解の平均鉄筋腐食率として、式(6-4)を用いることとした。

### 5.9.2 実験結果に基づく鉄筋腐食率分布の補正

本項では、小型 RC はりの実験結果を用いて算出したモデル誤差に対して分析を行った。本研究では、実験結果に対する pix2pix のモデル誤差  $\varepsilon_{Exp}$  を以下の式で定義する。

$$\varepsilon_{Exp} = R_{W_{Exp}} - R_{W_{pix2pix}} \quad (6-2)$$

ここで、 $R_{W_{Exp}}$  は正解値である実験結果の鉄筋腐食率、 $R_{W_{pix2pix}}$  は小型 RC はりの実験結果の腐食ひび割れ幅から pix2pix で予測された鉄筋腐食率である。まず、モデル誤差の傾向を把握するため、実験結果の平均鉄筋腐食率と予測結果の平均鉄筋腐食率の絶対誤差を用いる。図 5-48 に、実験結果の平均鉄筋腐食率と絶対誤差の関係を示す。平均鉄筋腐食率が高い場合に絶対誤差が大きくなっていることが分かる。これは、5.5 で述べたように、データベースの作成において、鉄筋腐食率が高い場合に腐食ひび割れ幅を過大に計算する腐食生成物厚さモデルおよび Non-FE モデルを用いていたため、実験結果の腐食ひび割れ幅を入力とすると、鉄筋腐食率は小さく予測され、絶対誤差が大きくなる。その結果、図 5-49 に示す、実験結果の腐食ひび割れ幅から pix2pix で予測された鉄筋腐食率と絶対誤差の関係をみると、予測結果の鉄筋腐食率が小さい場合に絶対誤差が大きくなる傾向にある。

そこで本研究では、鉄筋腐食率が高いのにも関わらず、予測された鉄筋腐食率が小さくなり絶対誤差が大きくなる影響を、予測結果に対して各点の鉄筋腐食率から算出したモデル誤差を足し合わせることで考慮することとした。図 5-50 に、与条件となる腐食ひび割れ幅およびその腐食ひび割れ幅に対する鉄筋腐食率の予測結果に対するモデル誤差のプロットを示す。入力した実験結果の腐食ひび割れ幅が大きいが、予測結果の鉄筋腐食率が小さい場合にモデル誤差が大きい傾向がみられる。これは上記で述べた、鉄筋腐食率が高い場合に腐食ひび割れ幅が大きいデータベースになっていたことが原因であると考えられる。そこで、モデル誤差を入力となる腐食ひび割れ幅と予測される鉄筋腐食率をパラメータとして、以下の式(6-3)で近似した。図 5-50 にはその近似曲面が示されている。

$$\varepsilon_{Exp} = 15.16 + 20.39C_{W_{input}} - 0.8727R_{W_{pix2pix}} \quad (6-3)$$

ここで、 $C_{Winput}$  は与条件となる腐食ひび割れ幅、 $R_{W_{pix2pix}}$  は腐食ひび割れ幅  $C_{Winput}$  から  $pix2pix$  で予測された鉄筋腐食率である。

一方で、式(6-3)の近似式では、腐食ひび割れ幅が小さい場合の実験結果に対するモデル誤差のばらつきが大きいことから、腐食ひび割れ幅がほとんど発生していない RC はりに対し、予測された腐食率が低くモデル誤差も小さいにもかかわらず、過大に腐食しているように補正をしてしまう。例えば、全く腐食していない RC はり、つまり、腐食ひび割れ幅  $C_{Winput} = 0\text{mm}$  かつ  $R_{W_{pix2pix}} = 0\%$  の場合、モデル誤差  $\varepsilon_{Exp}$  は 15% となり、最終的に 15% 腐食しているように予測してしまう。そこで、本研究では、腐食ひび割れ幅  $C_{Winput}$  に基準を設けることで、この影響を考慮することとした。図 5-51 に示すように、小型 RC はりの実験では、平均鉄筋腐食率が 10% 未満と低い場合には腐食ひび割れ幅は 0.1mm 未満に収まっている一方で、平均腐食率が 10% 以上の場合には、平均腐食ひび割れ幅は単調には増加せず、0.1mm～0.3mm の範囲にあることが分かる。このように、鉄筋腐食率の増加量に対する腐食ひび割れ幅の増加量は小さいといえる。鉄筋腐食率が 30% 以上の高い場合にモデル誤差は大きくなるが（図 5-48 参照）、平均鉄筋腐食率が 10% を超えると平均腐食ひび割れ幅に違いはみられない。そこで、平均腐食ひび割れ幅が 0.1mm を基準とし、これを超える場合にモデル誤差を用いた補正を行うこととした。

図 5-52 に、式を用いて、予測結果に対してモデル誤差を足し合わせることで補正した鉄筋腐食率分布を示す。平均腐食ひび割れ幅が 0.1mm 未満であった A1-13-100-10 は補正されない。特にモデル誤差の大きかった A1-13-100-20 は実験値に近づくように補正されていることが分かる。

## 参考文献

- 5-1) Lim S., Akiyama M., Frangopol, D.M., and Jiang H.: Experimental investigation of the spatial variability of the steel weight loss and corrosion cracking of reinforced concrete members: novel X-ray and digital image processing techniques, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.13, pp.118-134, 2017.
- 5-2) Frank, J.: The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit, *Journal of the American Statistical Association*, 46:253, pp.68-78, 1951.
- 5-3) 高阪宏行: クリギングとその地理的応用, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, No.34, pp.27-35, 1999.
- 5-4) Srivaranun, S., Akiyama, M., Bocchini, P., Christou, V., Frangopol, D.M., Fukushima, H. and Masuda, K.: Effect of the interaction of corrosion pits among multiple tensile rebars on the reliability of RC structures: Experimental and numerical investigation, *Structural Safety*, Vol.93, pp.1-18, 2021.
- 5-5) 松島学, 松井邦人, 関博, 堤知明: Fick の拡散方程式の係数の同定, 土木学会論文集, No.520, Vol.28, pp.269-272, 1995.
- 5-6) 中村智, 山田大樹, 新谷美菜, Supasit Srivaranun, 秋山充良: 機械学習用データベースの拡充および腐食ひび割れ情報を用いた劣化 RC 部材の耐荷力推定, AI・データサイエンス論文集, 第3巻, J2号, pp.117-127, 2022.
- 5-7) Yuan, Y. and Ji, Y.: Modeling corroded section configuration of steel bar in concrete structure, *Construction and Building Materials*, Vol.23, pp.2461-2466, 2009.
- 5-8) Yuan, Y., Ji, Y. and Shah, S.P.: Comparison of two accelerated corrosion techniques for concrete structures, *ACI Structural Journal*, Volume 104, Issue.3, pp.344-347, 2007.
- 5-9) Dai, K. Y., Liu, C., Lu, D. G., and Yu, X. H. : Experimental investigation on seismic behavior of corroded RC columns under artificial climate environment and electrochemical chloride

- extraction: A comparative study, *Construction and Building Materials*, Volume.242, Article. 118014, 2020.
- 5-10) 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章 : コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造) , Vol. 69, No. 2, pp. 154-165, 2013.
- 5-11) Zhao, Y., Ren, H., Dai, H. and Jin, W. Composition and expansion coefficient of rust based on X-ray diffraction and thermal analysis, *Corrosion Science*, Volume.53, Issue.5, pp.1646-1658, 2011.
- 5-12) CEB-FIP.: CEB-FIP Model Code 1990, Comit'e Euro-International du B'eton, 1993.
- 5-13) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Seminar on post-peak behavior of RC structures subjected to seismic loads, Vol.2, pp.259-272, 1995.
- 5-14) Feenstra, P.H.: Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and Reinforced Concrete, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1993.
- 5-15) Coronelli, D. and Gambarova, P.: Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modelling guidelines, *Journal of Structural Engineering*, Vol.130, No.8, pp.1214-1224, 2004.
- 5-16) Vecchio, F. and Collins, M.P.: The Modified Compression-Field Theory for reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, *ACI Journal.*, Proceedings Vol.83, No.2, pp.219-231, 1986.
- 5-17) Molina, F.J., Alonso, C. and Andrade, C.: Cover cracking as a function of rebar corrosion, Part 2-Numerical model, *Materials and Structures*, Vol.26, No.9, pp.532-548, 1993.

- 5-18) Vidal, T., Castel, A. and Francois, R.: Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, No.1, pp.165-174, 2004.
- 5-19) Hordijk, D.A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, 1991.
- 5-20) Cornelissen, H.A.W., Hordijk, D.A. and Reinhardt H.W.: Experimental determination of crack softening characteristics of normal-weight and light-weight concrete, *Heron*, Vol.31, No.2, pp.45-56, 1986.
- 5-21) Manie, J. and Kikstra, W.P.: DIANA Finite Element Analysis User's Manual Material Library Release 10.2, DIANA FEA BV, Delftechpark 19a, 2628 XJ Delft, The Netherlands, 2017.
- 5-22) 井上達雄：固体力学入門，4. 降伏条件と弾塑性構成式，pp163-169，1979.
- 5-23) Kemp, E.L. and Wilhelm, W.J.: Investigation of the Parameters Influencing Bond Cracking, *ACI Journal Proceedings*, Vol. 76, No.1, pp. 47-72, 1979.
- 5-24) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートにおける非線形有限要素解析，土木学会論文集，Vol.3, No.360, pp.1-10, 1985.
- 5-25) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 設計編，丸善出版，pp.459-467，2012.
- 5-26) Saifullah, M. and Clark, L.A.: Effect of Corrosion Rate on the Bond Strength of Corroded Reinforcement, Seventh International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, pp.591-602, 1994.
- 5-27) Maaddawy, T., Soudki, K. and Topper, T.: Analytical Model to Predict Non-Linear Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams, *Aci Structural Journal*, 2005.

- 5-28) Harajli, M.H., Hamad, B.S. and Rteil A.A.: Effect of confinement on bond strength between steel bars and concrete, *ACI Structural Journal*, Vol.101, No.5, pp.595-603, 2004.
- 5-29) 車谷麻緒, 小林賢司, 案蔵尚, 岡崎慎一郎, 廣瀬壮一: 損傷モデルによる内部ひび割れを有する鉄筋コンクリート中の塩化物イオン濃度の定量的評価, 土木学会論文集 A2, Vol.72, No.2, pp.I\_313-I\_322, 2016.
- 5-30) 鈴木三馨, 福浦尚之, 丸屋剛: 塩害による腐食劣化予測に対する構造・鋼材腐食錬成解析手法の構築, 土木学会論文集 E2, Vol.18, No.3, pp.301-319, 2014.
- 5-31) Zhang, M., Song, H., Lim, S., Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Reliability estimation of corroded RC structures based on spatial variability using experimental evidence, probabilistic analysis and finite element, *Engineering Structures*, Vol.192, pp.33, 2019.
- 5-32) Zhao, Y., Dai, H., and Jin, W.: A study of the elastic moduli of corrosion products using nano-indentation techniques, *Corrosion Science*, Vol.65, pp.163-168, 2012.
- 5-33) 河村圭亮, Kim, T.K., 中村光, 国枝稔: 鉄筋腐食に伴うコンクリート表面および内部ひび割れ進展挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010.
- 5-34) Isola, P., Zhu, J., Zhou, T. and Efros, A. : Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks, arXiv:1611.07004v3, 2018.
- 5-35) Goodfellow, I.J., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Courville, A. and Bengio, Y.: Generative Adversarial Nets, 27th International Conference on Advances in Neural Information Processing Systems(NIPS'14), PP.2672-2680, 2014.

表 5-1 コルモゴロフ・スミルノフ検定テストの結果

供試体名	鉄筋位置	検定統計量 $D_{110}$	臨界値 $D_{110,0.05}$
A1-13-100-10	L	0.07	0.13
	C	0.11	
	R	0.12	
A1-13-100-20	L	0.07	
	C	0.09	
	R	0.07	
A2-13-100-10	L	0.12	
	C	0.08	
	R	0.10	
A2-13-100-20	L	0.04	
	C	0.06	
	R	0.08	
B1-13-100-10	L	0.12	
	C	0.04	
	R	0.07	
B1-13-100-20	L	0.10	
	C	0.12	
	R	0.06	
B1-13-500-10	L	0.11	
	C	0.07	
	R	0.18	
B1-13-500-20	L	0.14	
	C	0.09	
	R	0.11	
B1-19-100-10	L	0.11	
	C	0.18	
	R	0.16	
B1-19-100-20	L	0.13	
	C	0.19	
	R	0.09	

表 5-2 鉄筋腐食率分布の相関係数

供試体名	各鉄筋同士の相関係数		
	L - C	C - R	L - R
A1-13-100-10	0.40	0.15	0.24
A1-13-100-20	0.14	0.08	0.14
A2-13-100-10	0.08	0.24	0.16
A2-13-100-20	0.12	0.24	-0.01
B1-13-100-10	-0.21	0.19	0.07
B1-13-100-20	0.71	-0.12	0.16
B1-13-500-10	0.33	0.36	0.62
B1-13-500-20	0.48	0.39	0.27
B1-19-100-10	0.44	0.68	0.40
B1-19-100-20	0.24	0.07	0.33

表 5-3 データベースの概要

ケース名	鉄筋径 (mm)	鉄筋 間隔 (mm)	電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	供試体寸法 幅×高さ×全長 (mm)	サンプル数 (学習データ)	サンプル数 (検証用データ)
A1-13-100	D13	95	100	300×160×1460	80	10
B1-13-500		57	500		80	10
B1-19-100	D19		100		80	10

表 5-4 輝度値に対応する各パラメータ値の範囲

パラメータ		画像変換の範囲	
		最小値	最大値
腐食生成物厚さ (mm)	電流密度=100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0	2.6
	電流密度=500 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0	1.7
腐食ひび割れ幅 (mm)		0	2.0
鉄筋径 (mm)		0	100
鉄筋の間隔 (mm)		0	100

表 5-5 検証用データを用いて算出した RMSE

ケース名	RMSE
A1-13-100	14.6
B1-13-500	15.4
B1-19-100	12.4

表 5-6 実験データを用いて算出した RMSE

供試体名	RMSE
A1-13-100-10	5.5
A1-13-100-20	25.0
B1-13-500-10	19.2
B1-13-500-20	19.3
B1-19-100-10	16.9
B1-19-100-20	19.2

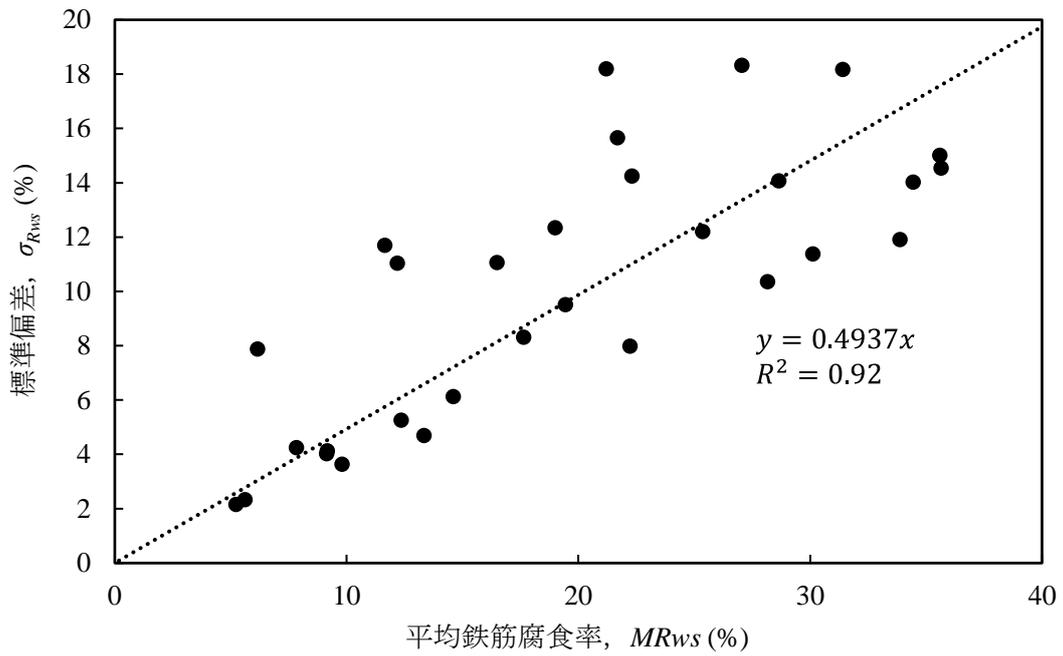


図 5-1 平均鉄筋腐食率と標準偏差の関係

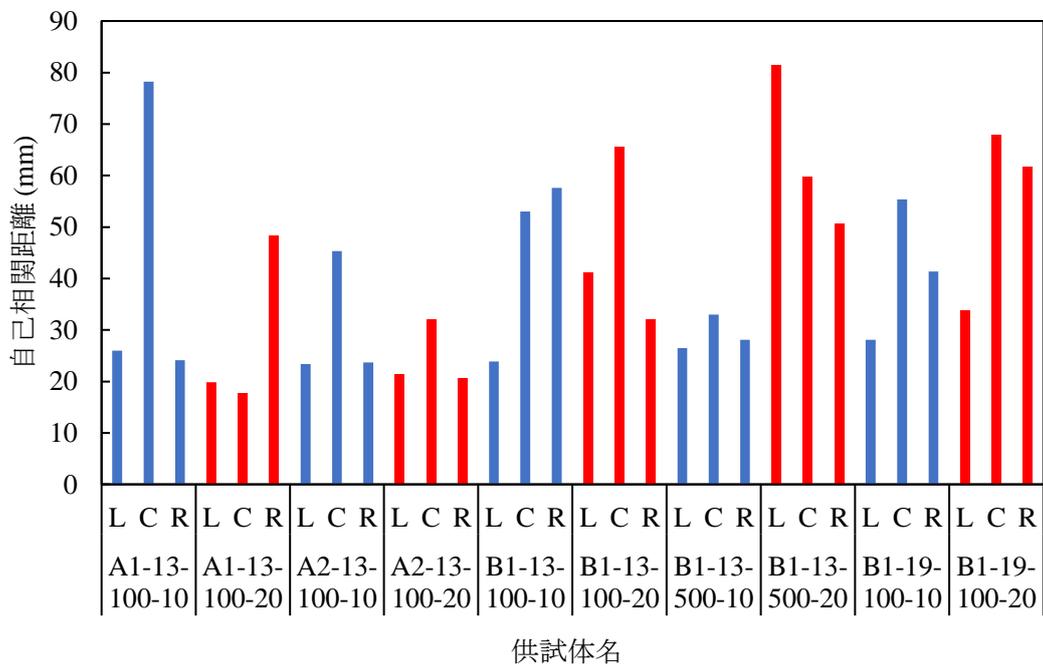


図 5-2 各鉄筋腐食率分布の自己相関距離

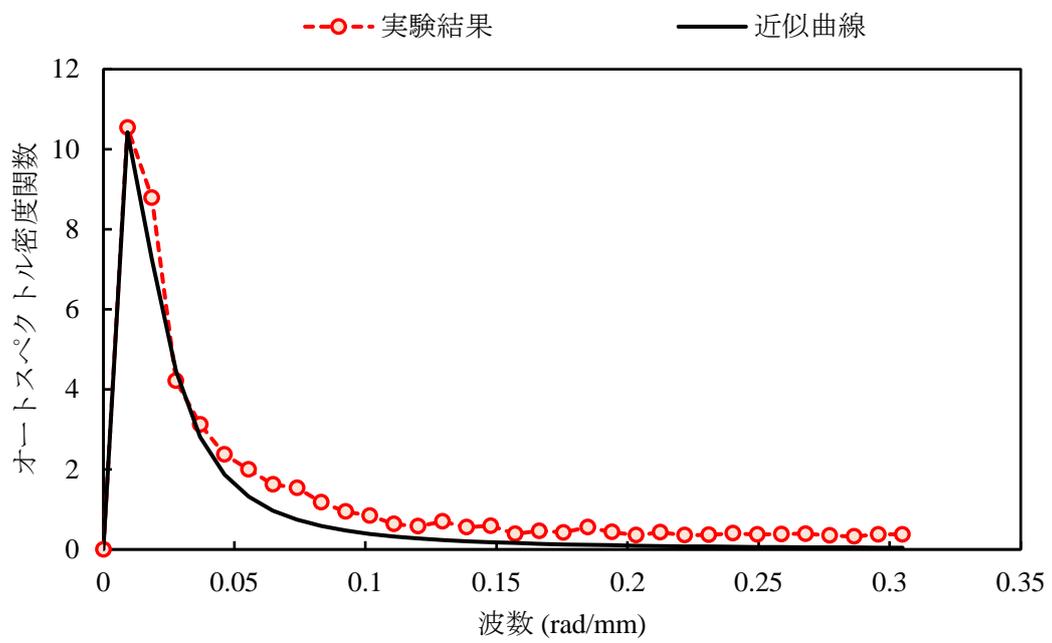
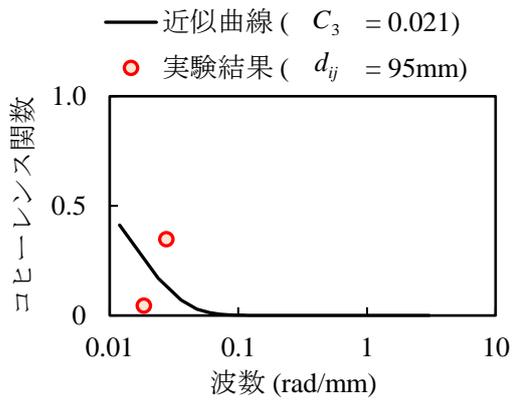
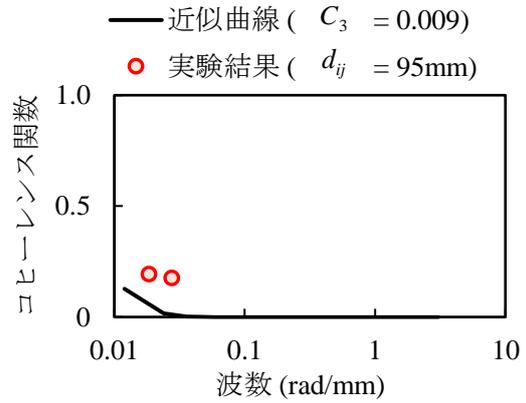


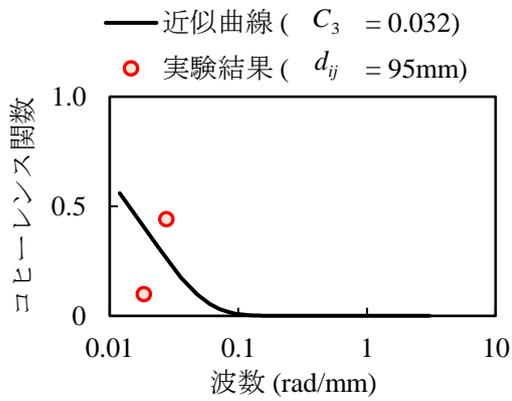
図 5-3 オートスペクトル密度関数の近似曲線



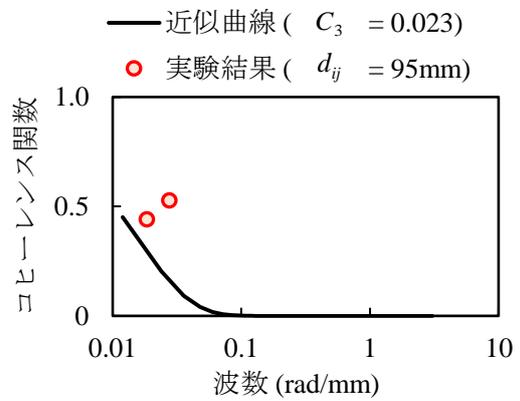
(a) A1-13-100-10



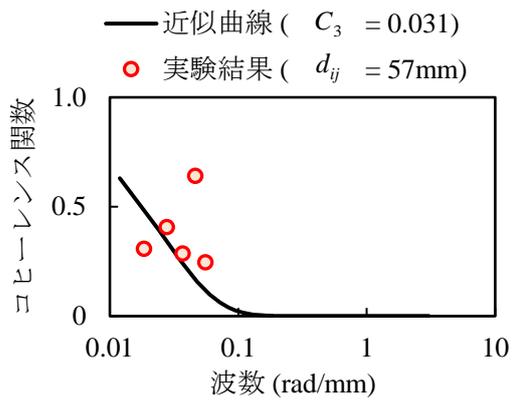
(b) A1-13-100-20



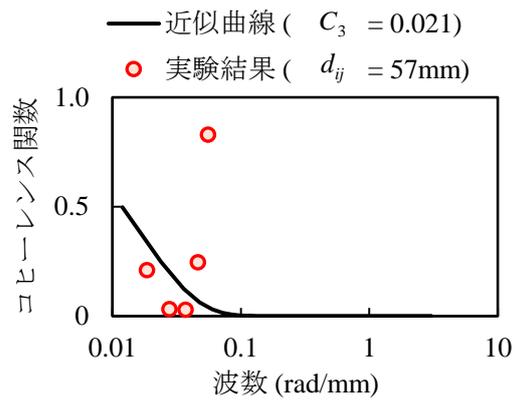
(c) A2-13-100-10



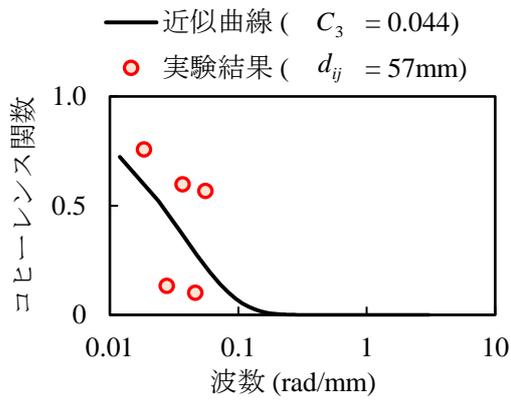
(d) A2-13-100-20



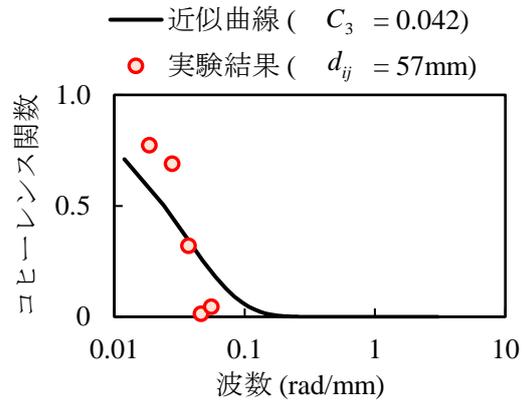
(e) B1-13-100-10



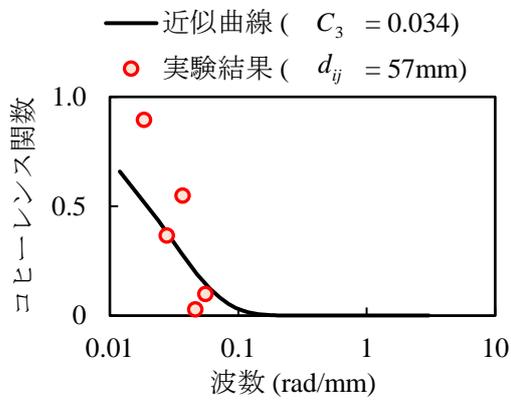
(f) B1-13-100-20



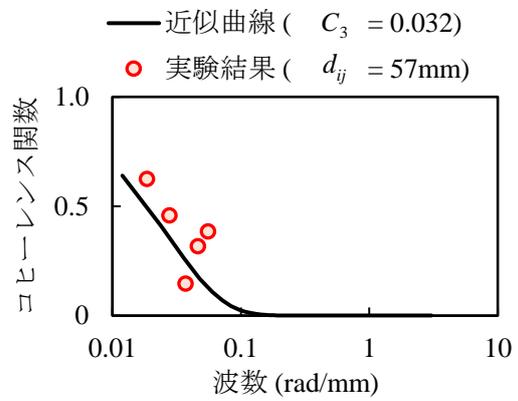
(g) B1-13-500-10



(h) B1-13-500-20



(i) B1-19-100-10



(j) B1-19-100-20

図 5-4 各供試体のコヒーレンス関数の近似曲線

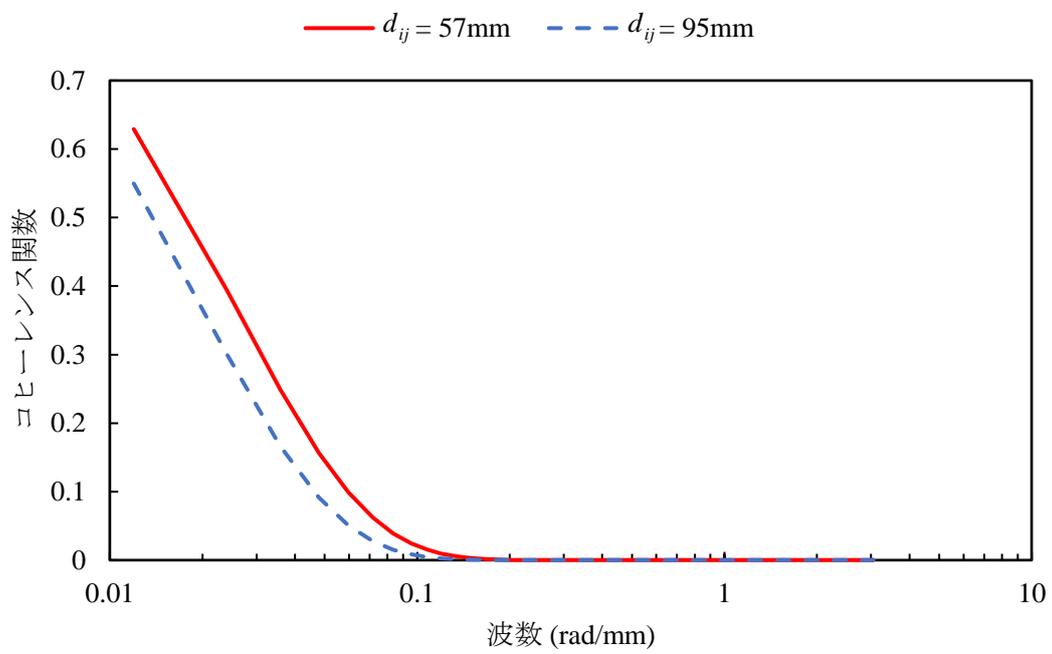
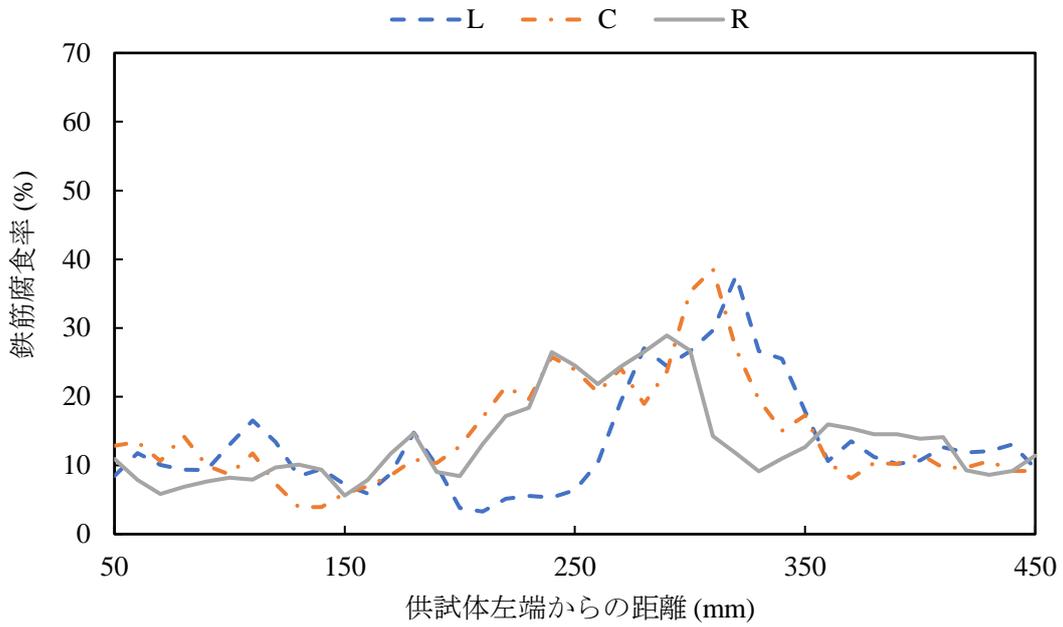
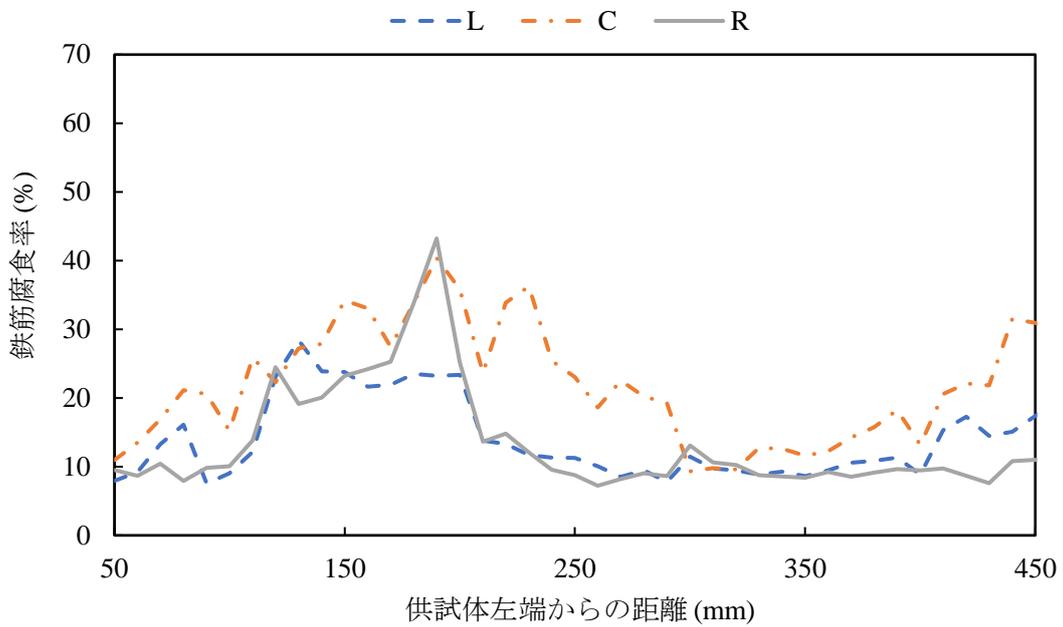


図 5-5 コヒーレンス関数の比較

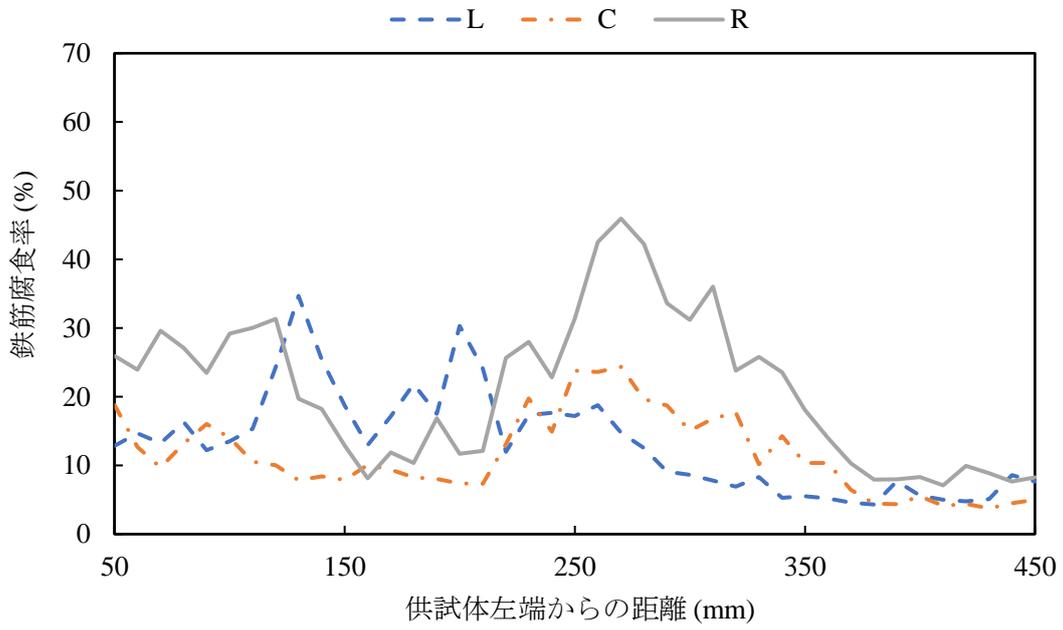


(a) 疑似鉄筋腐食率分布の例 ( $RS = 57\text{mm}$ )

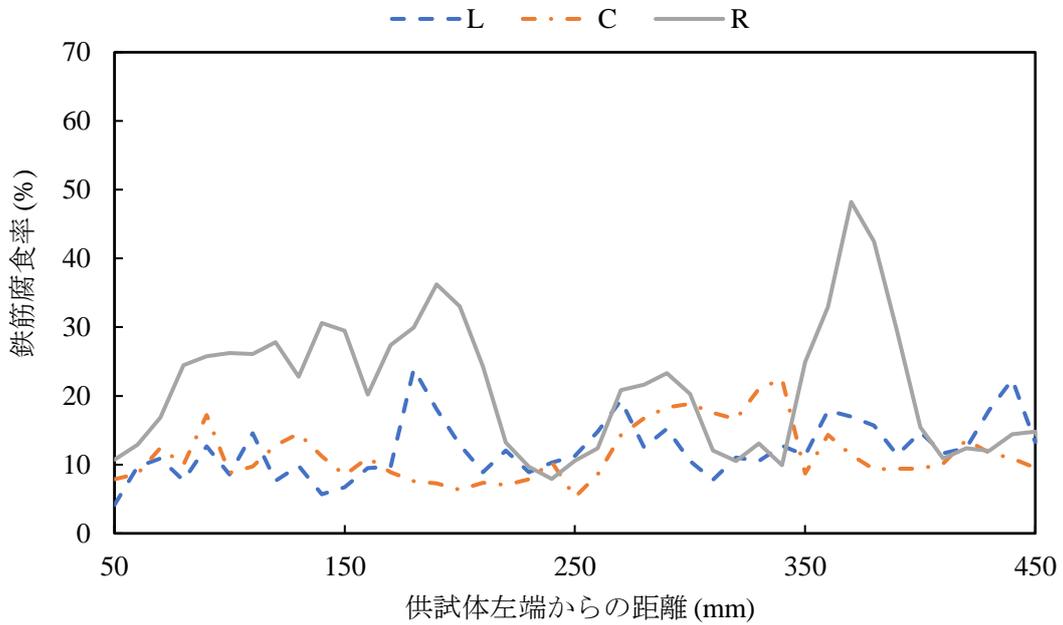


(b) 実験で得られた鉄筋腐食率分布 (B1-13-500-10)

図 5-6 疑似鉄筋腐食率分布と実験結果の比較 ( $RS = 57\text{mm}$ )



(a) 疑似鉄筋腐食率分布の例 ( $RS = 95\text{mm}$ )



(b) 実験で得られた鉄筋腐食率分布 (A2-13-100-10)

図 5-7 疑似鉄筋腐食率分布と実験結果の比較 ( $RS = 95\text{mm}$ )

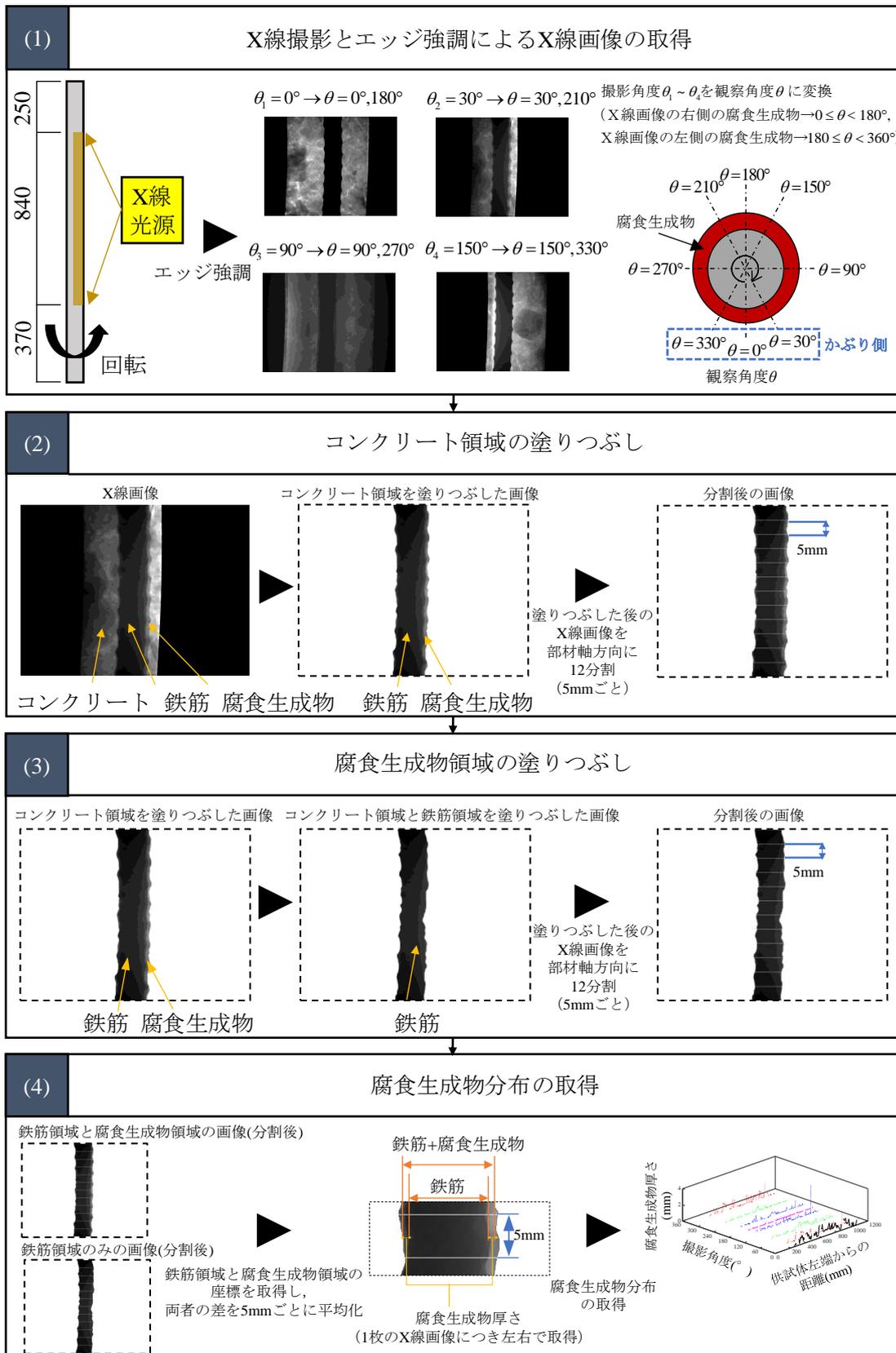
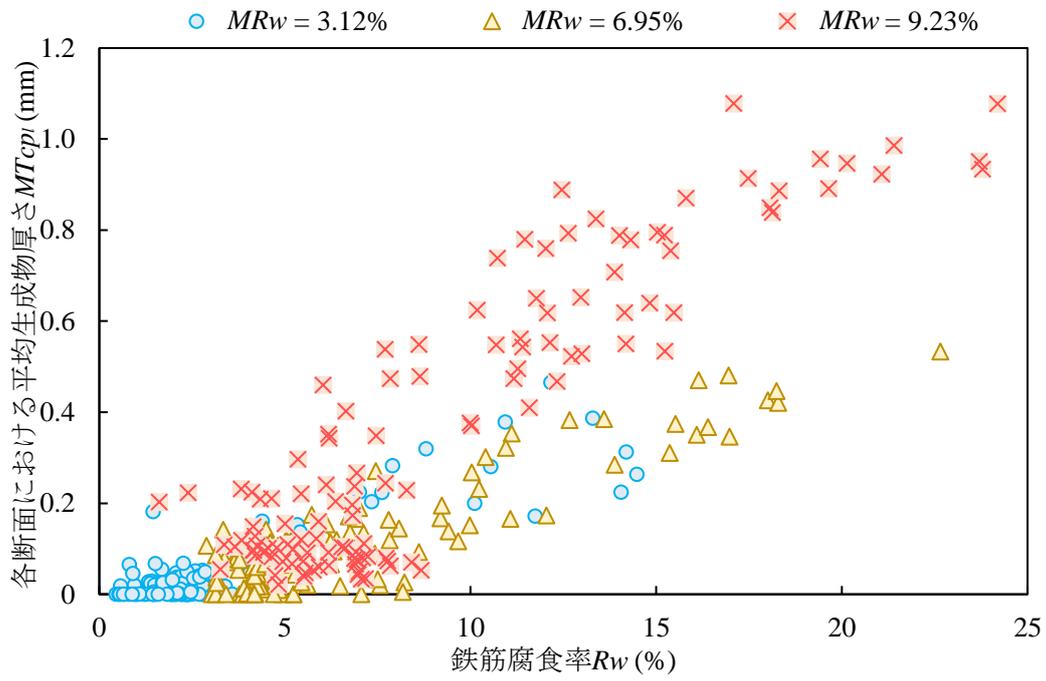
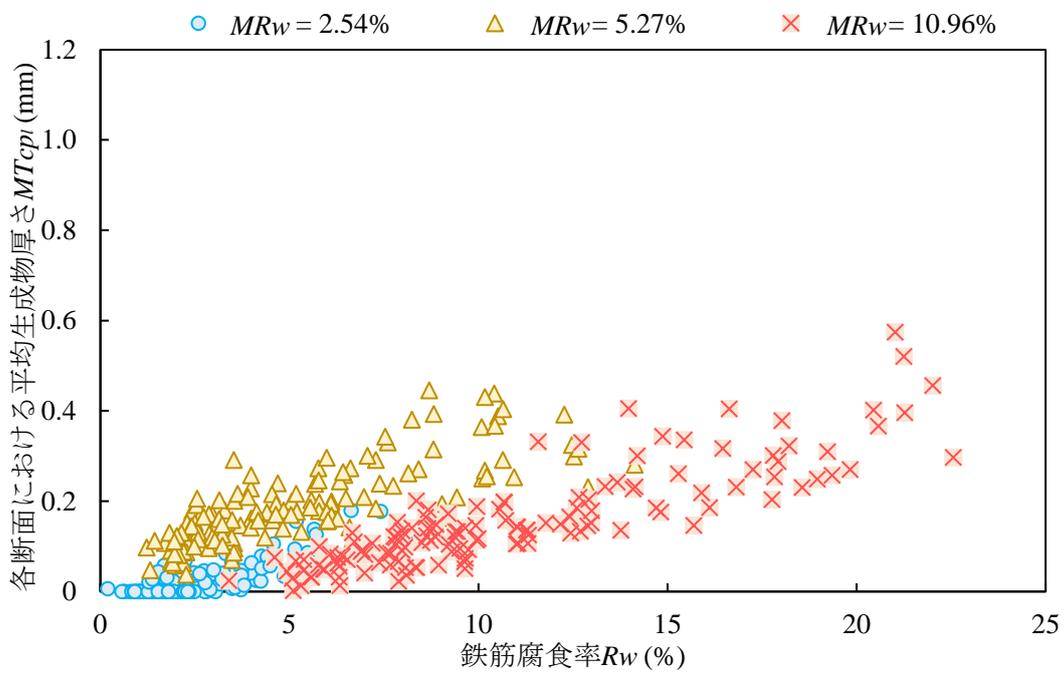


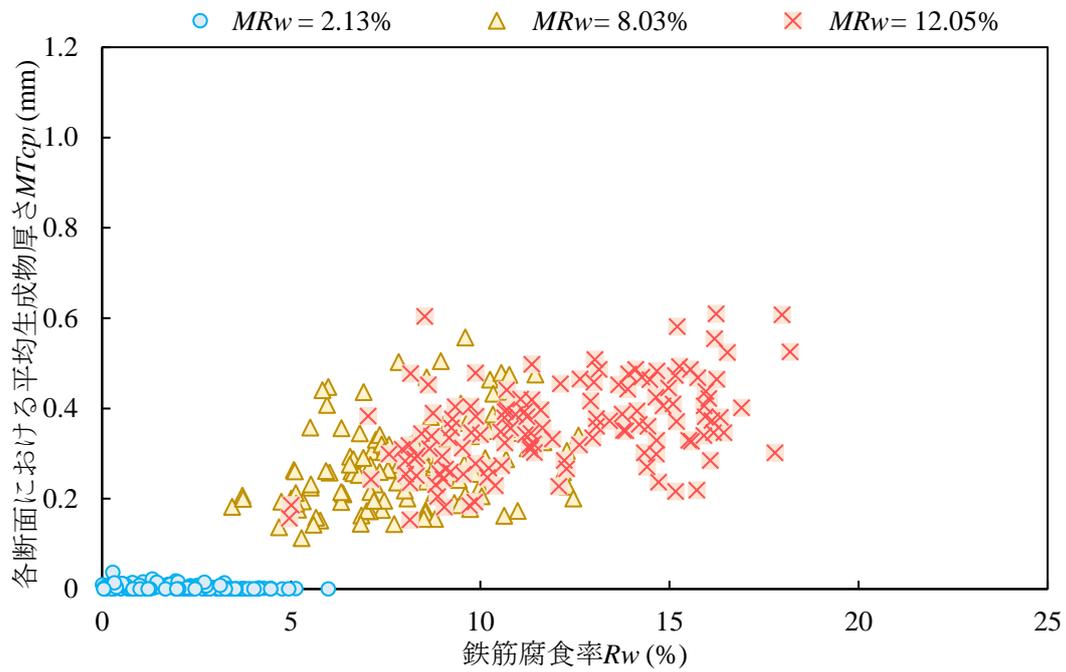
図 5-8 X線画像およびデジタル画像処理による腐食生成物厚さ推定の概要



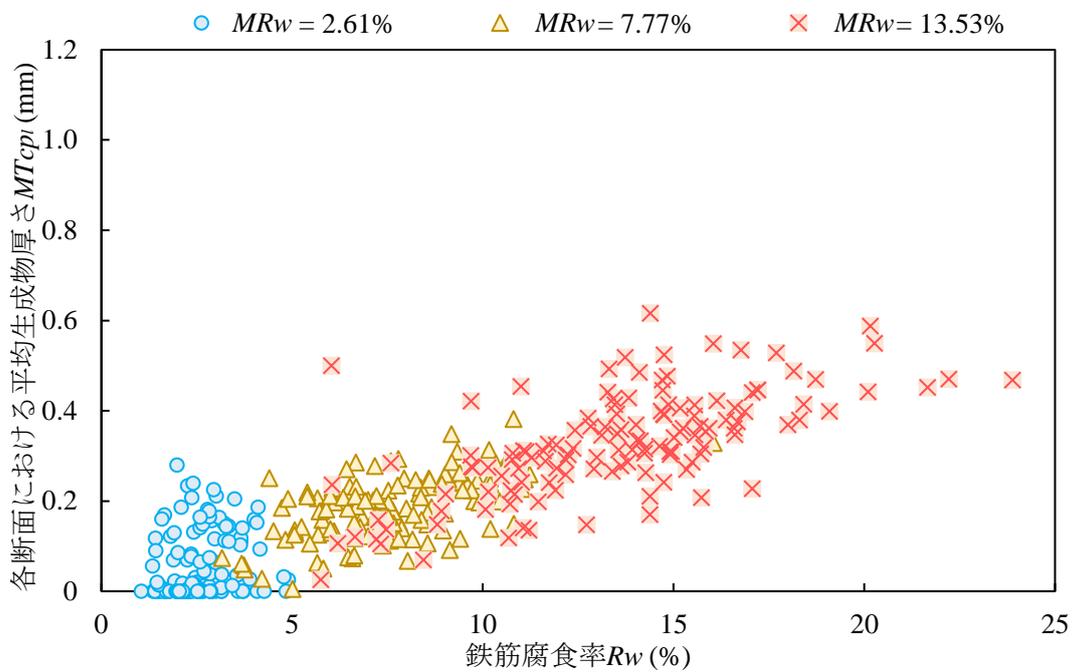
(a) CD-10



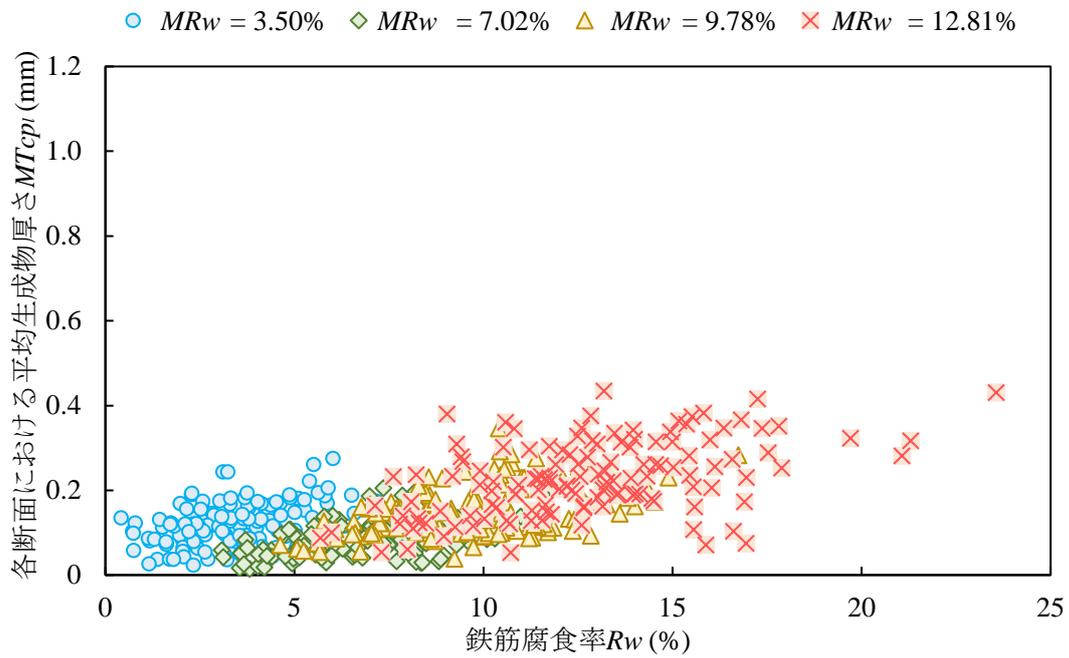
(b) CD-50



(c) CD-100

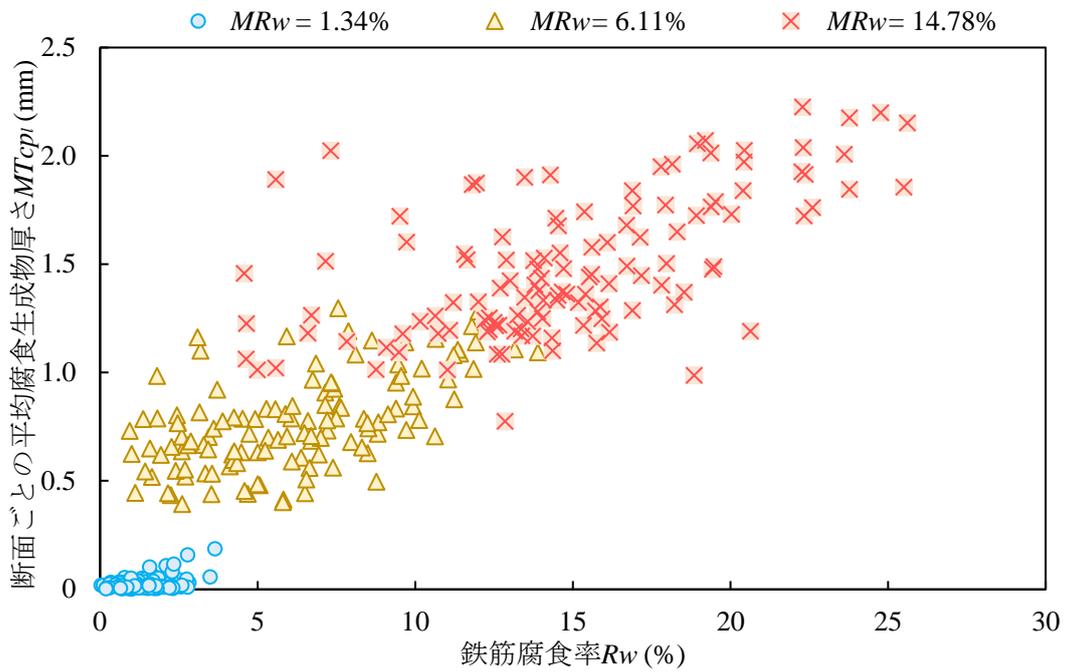


(d) CD-200

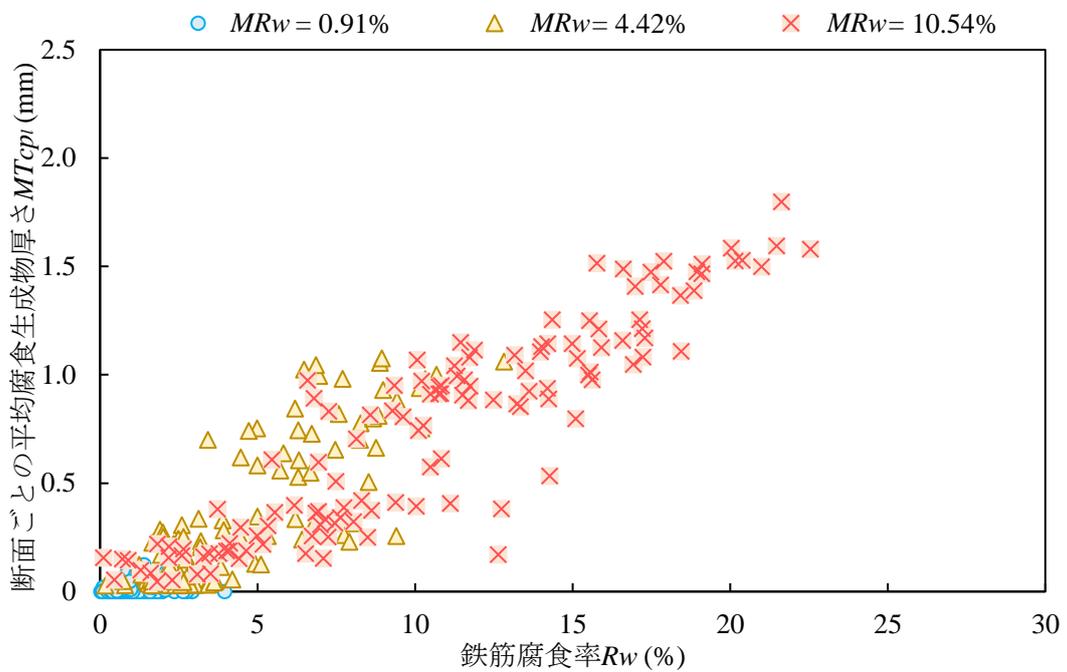


(e) CD-500

図 5-9 電食実験における鉄筋腐食率と断面ごとの平均腐食生成物厚さの関係

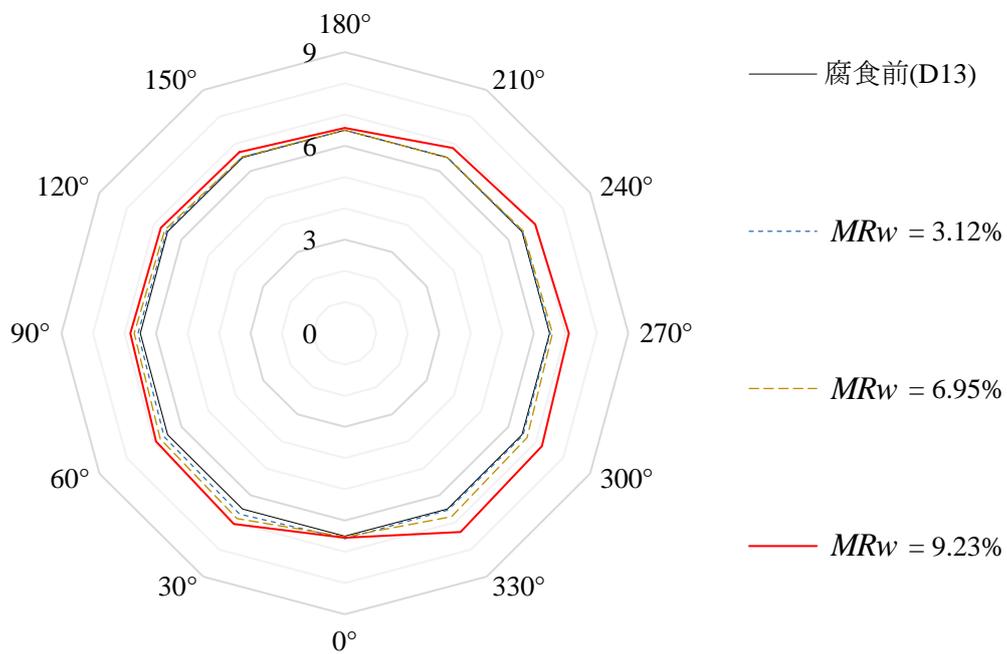


(a) WD-1

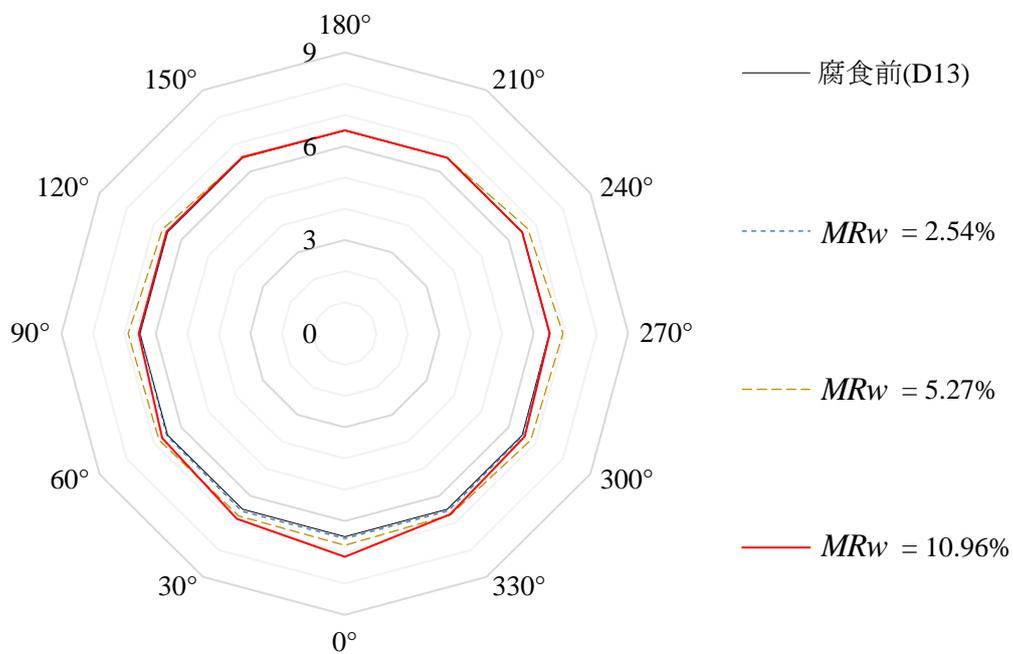


(b) WD-2

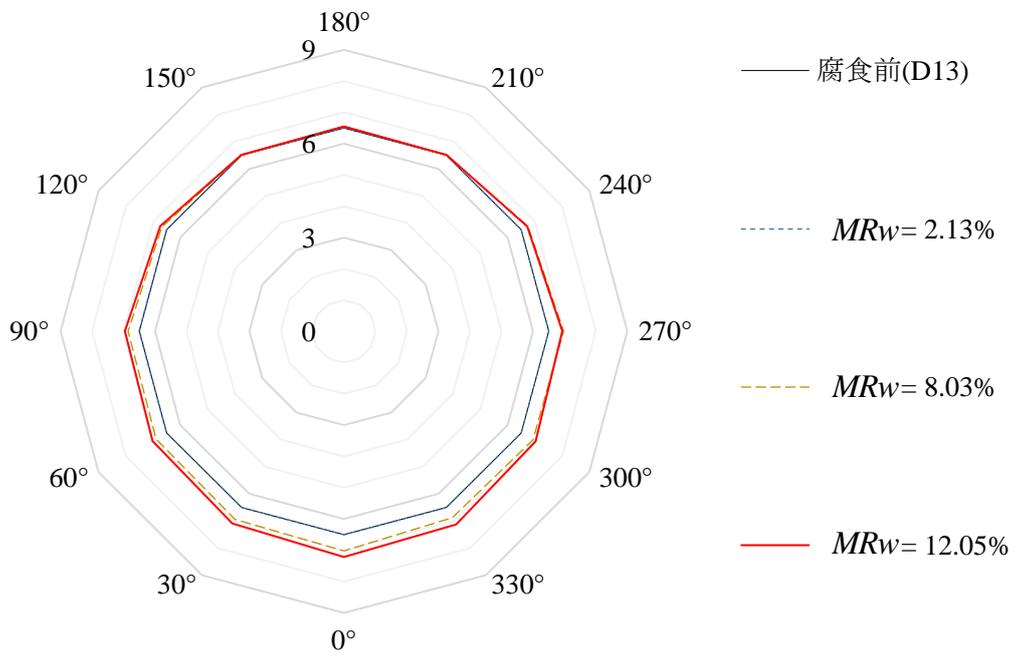
図 5-10 乾湿繰返し実験における鉄筋腐食率と断面度との平均腐食生成物厚さの関係



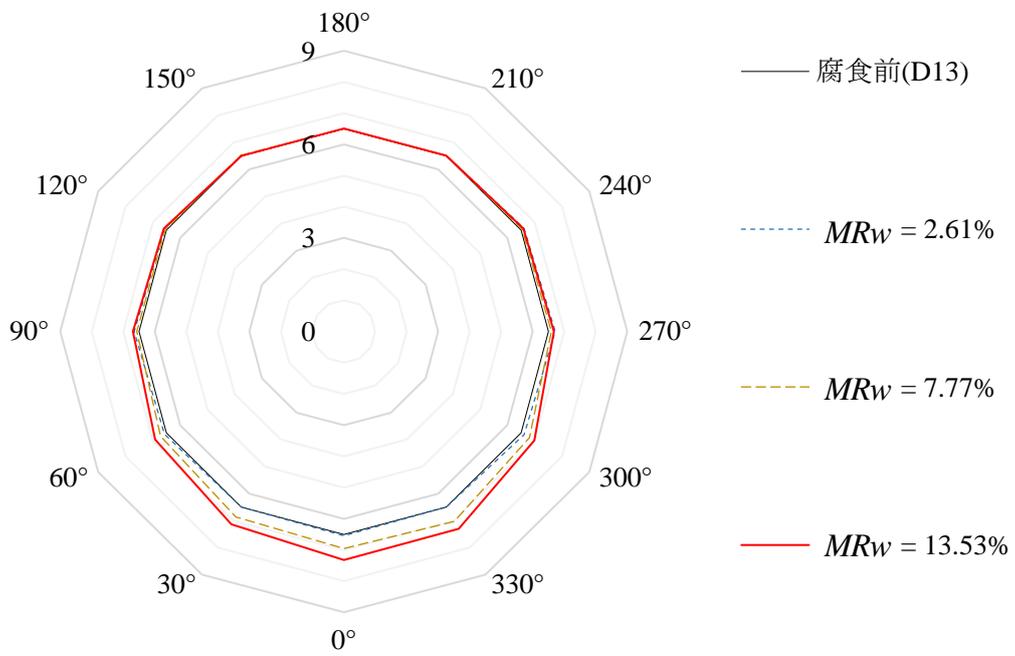
(a) CD-10



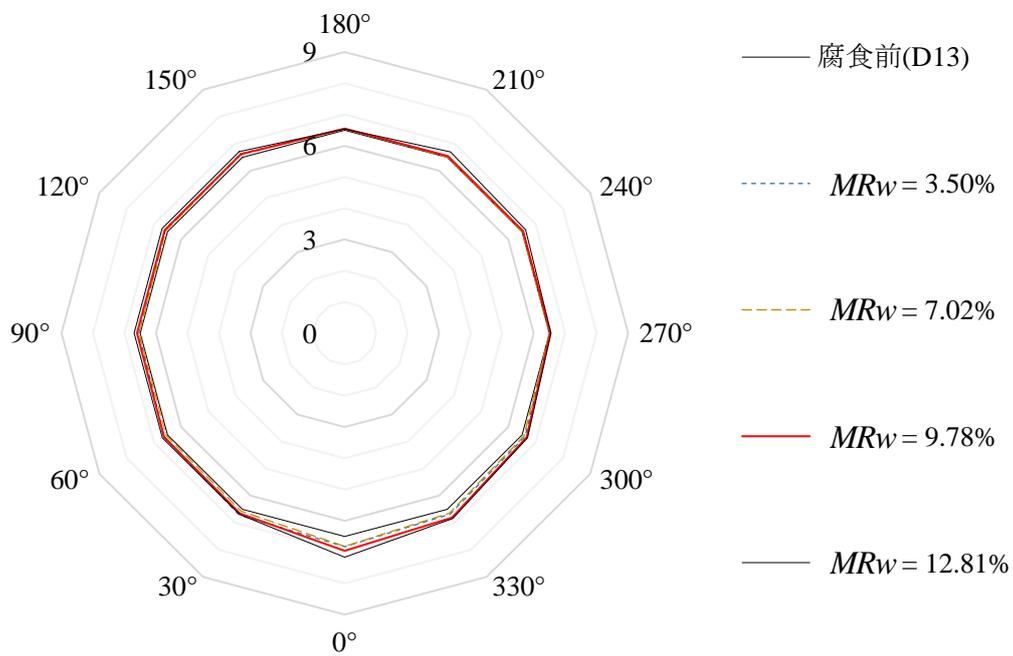
(b) CD-50



(c) CD-100

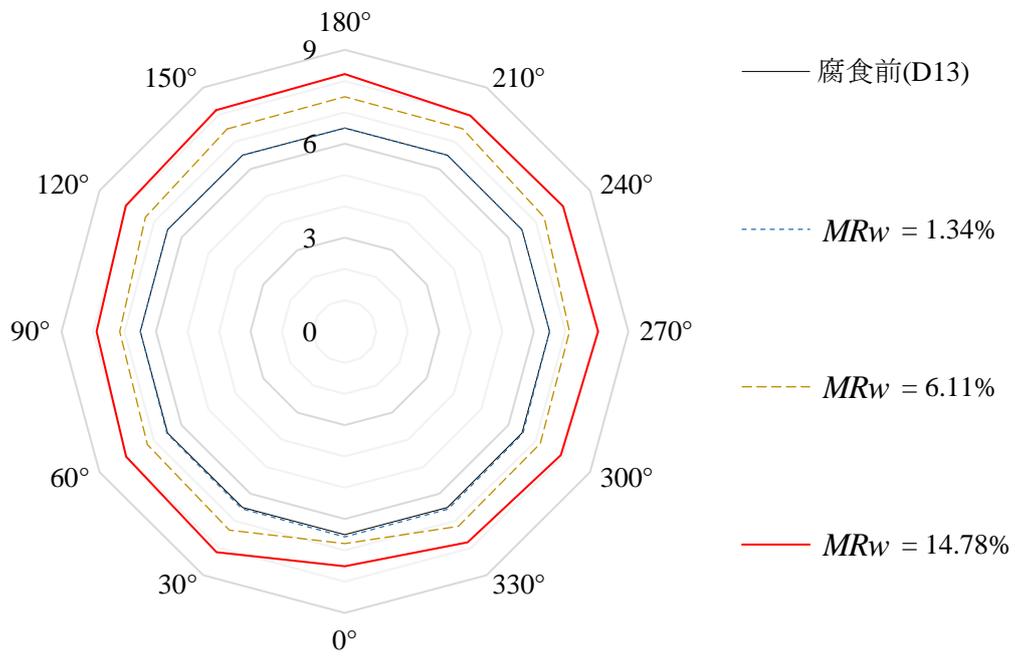


(d) CD-200

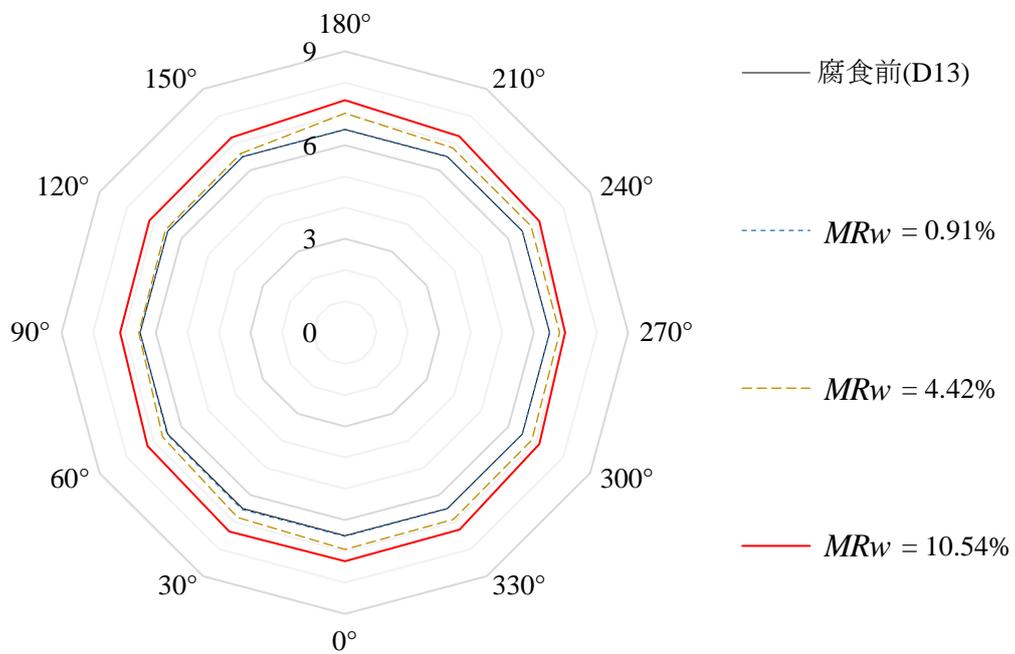


(e) CD-500

図 5-11 電食実験における観察角度ごとの平均腐食生成物厚さ  $MT_{cp0}$  (単位 : mm)



(a) WD-1



(b) WD-2

図 5-12 乾湿繰返し試験における観察角度ごとの平均腐食生成物厚さ  $MT_{cp\theta}$  (単位 : mm)

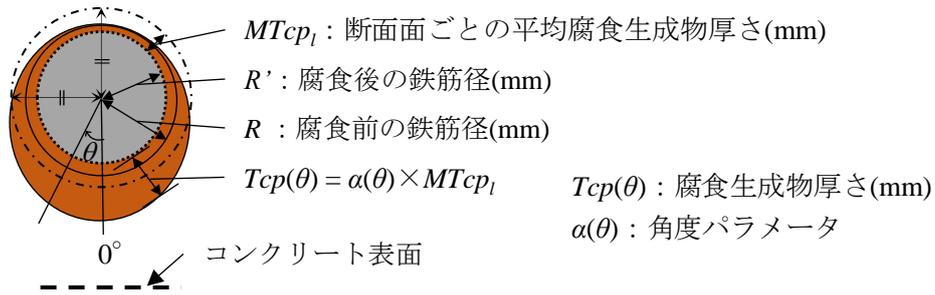


図 5-13 腐食生成物厚さ・形状のモデル化

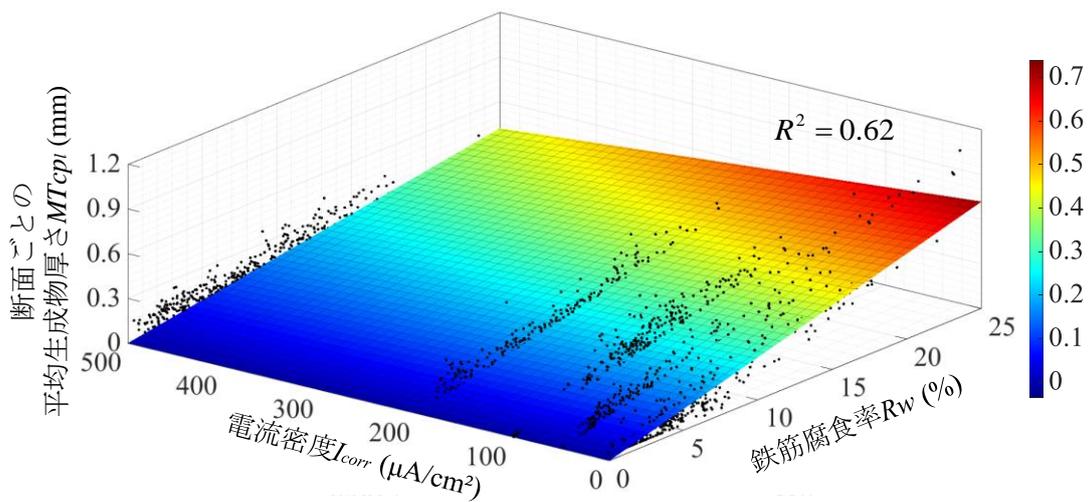


図 5-14 電食実験の断面ごとの腐食生成物厚さの近似曲面

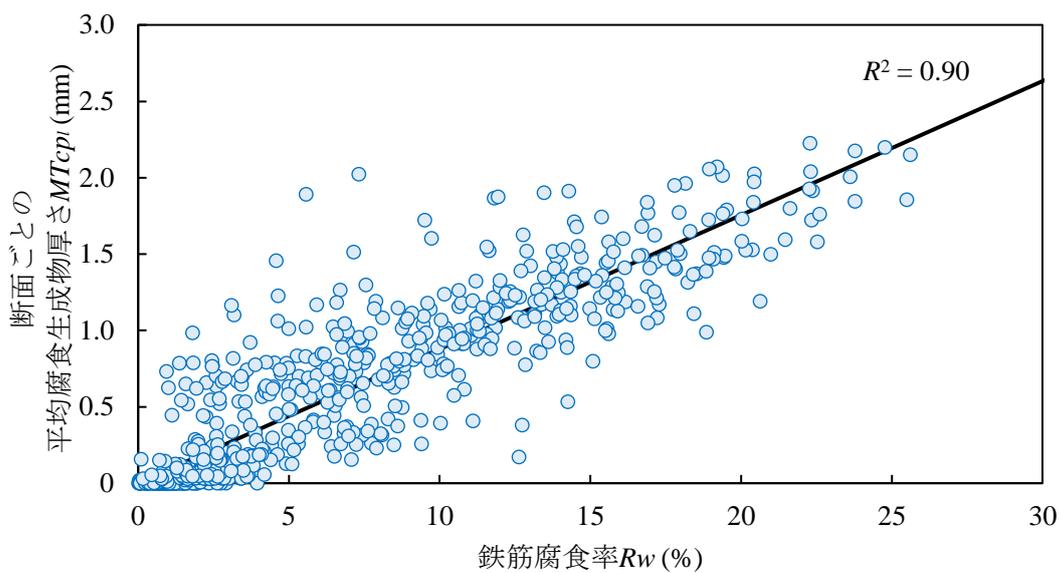
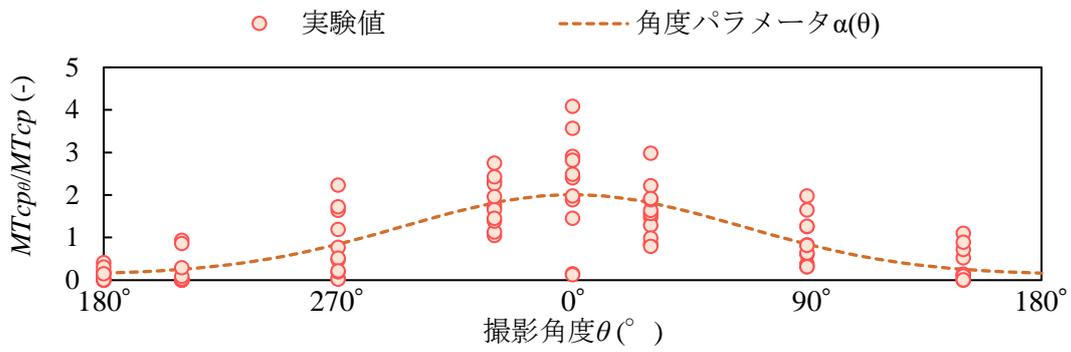
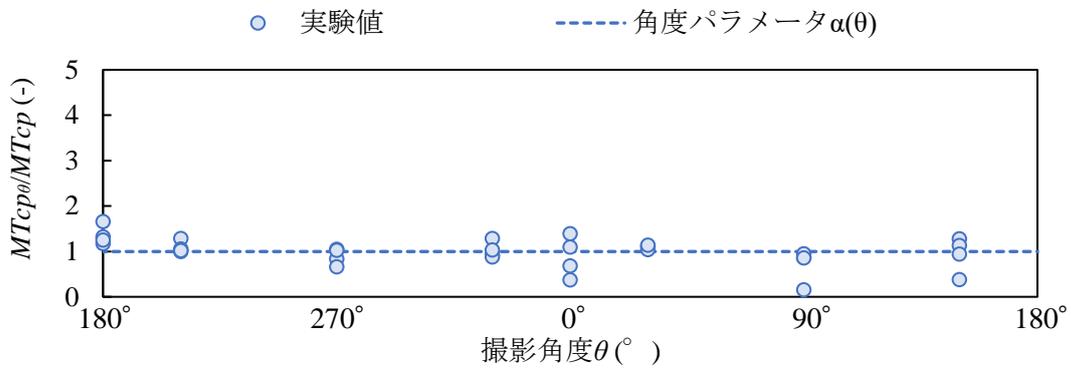


図 5-15 乾湿繰返し実験の断面ごとの平均腐食生成物厚さの近似曲線

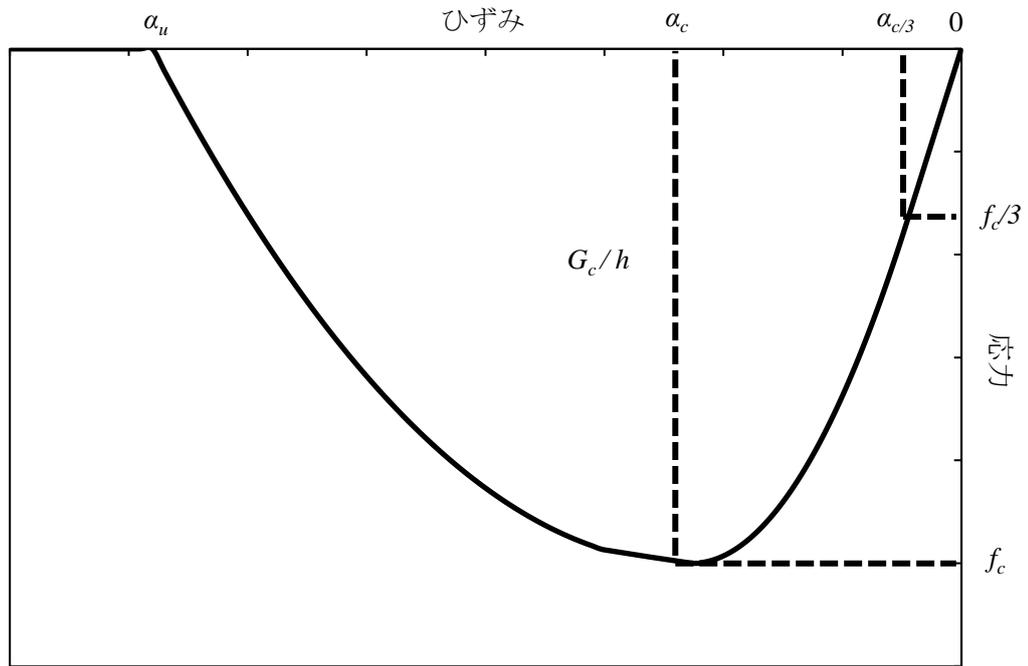


(a) 電食実験 (CD シリーズ)

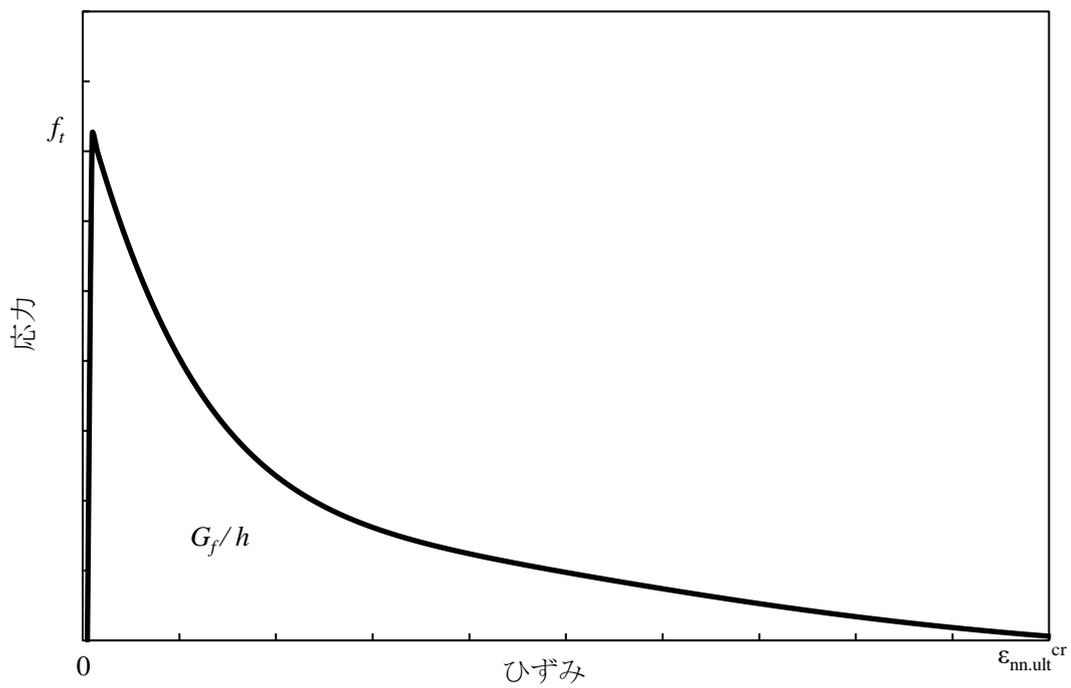


(b) 乾湿繰返し実験 (WD シリーズ)

図 5-16 各実験方法による角度パラメータの近似曲線



(a) コンクリートの圧縮挙動



(b) コンクリートの引張挙動

図 5-17 コンクリートの応力-ひずみ関係

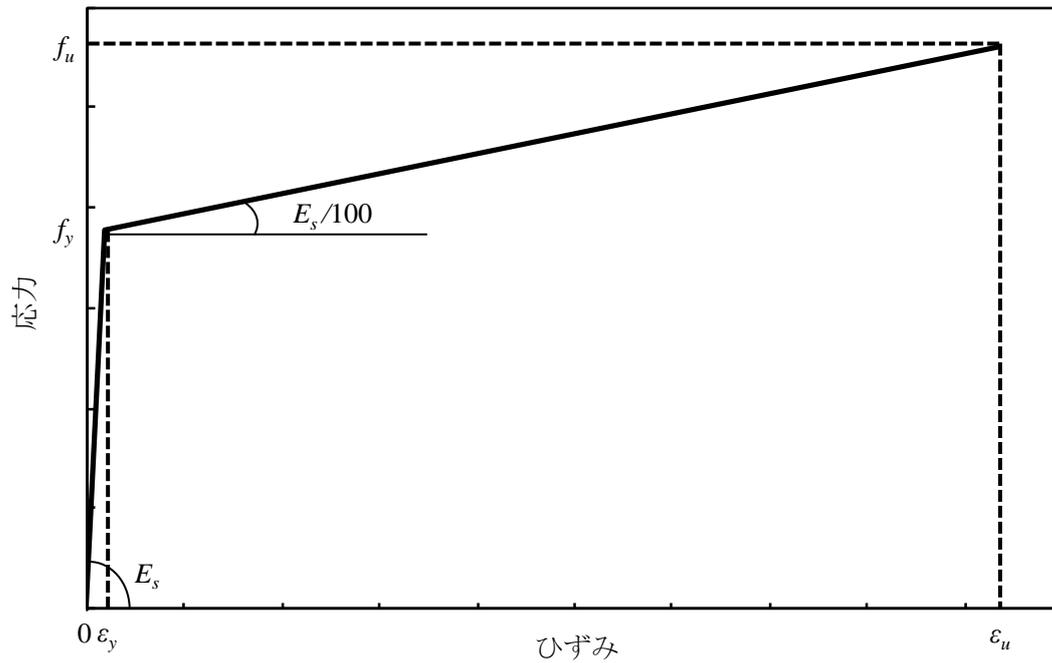


図 5-18 鉄筋の引張挙動

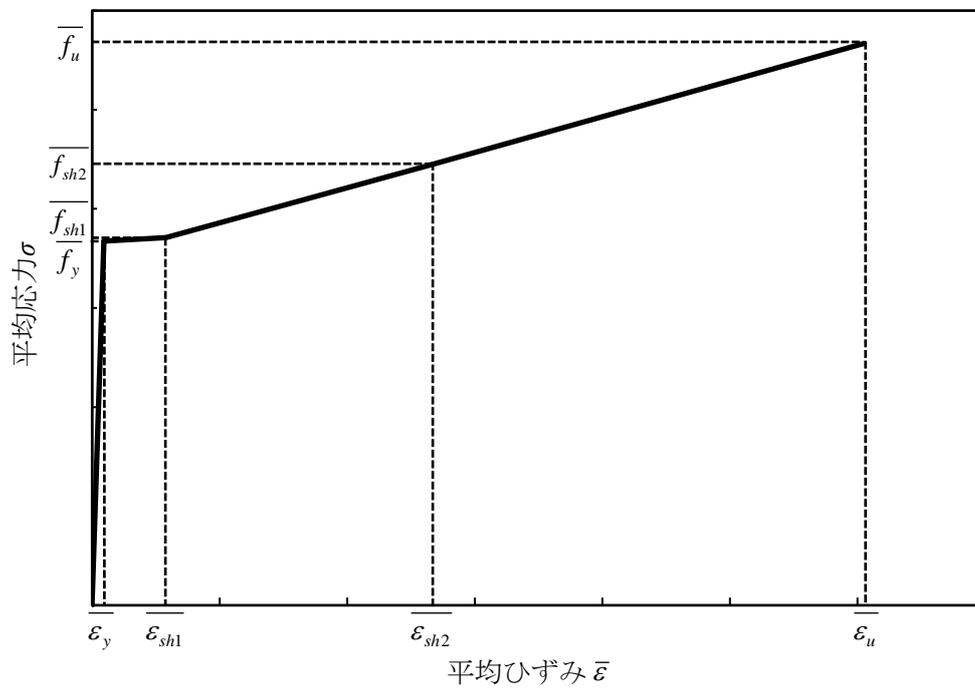


図 5-19 テンションスティフニング効果を考慮したコンクリート中の鉄筋の  
応力-ひずみ関係

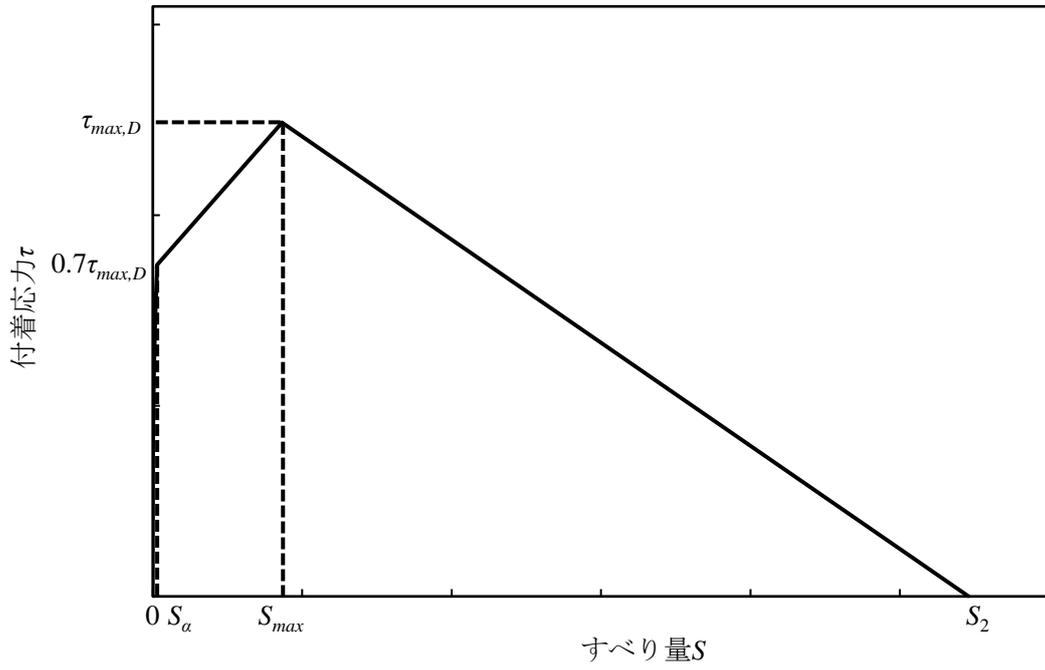
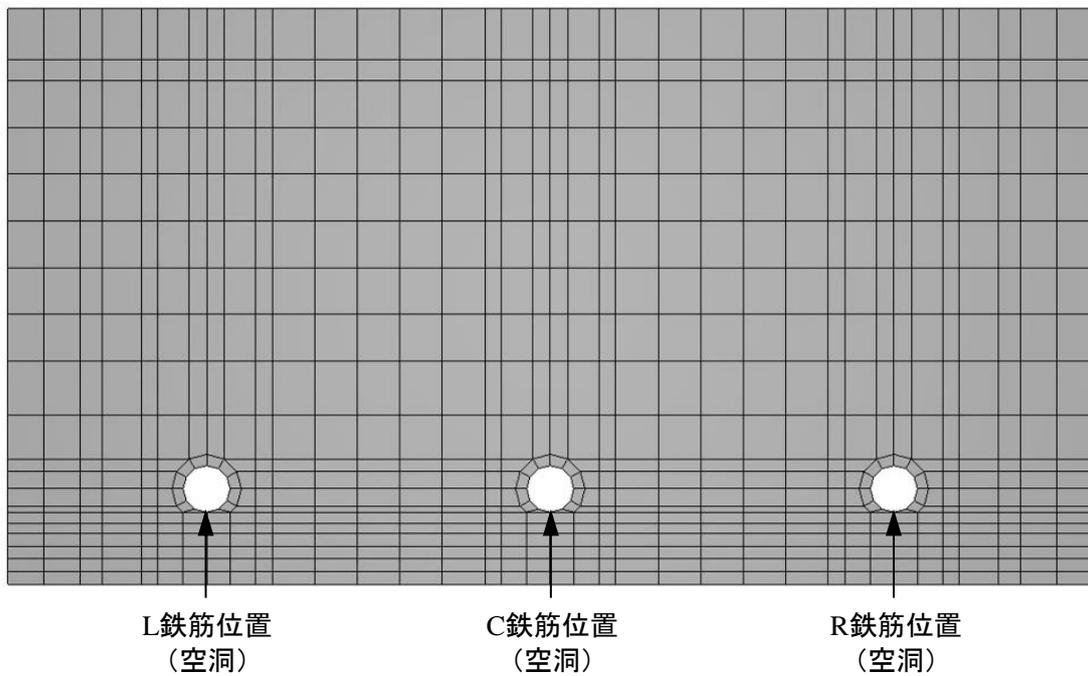
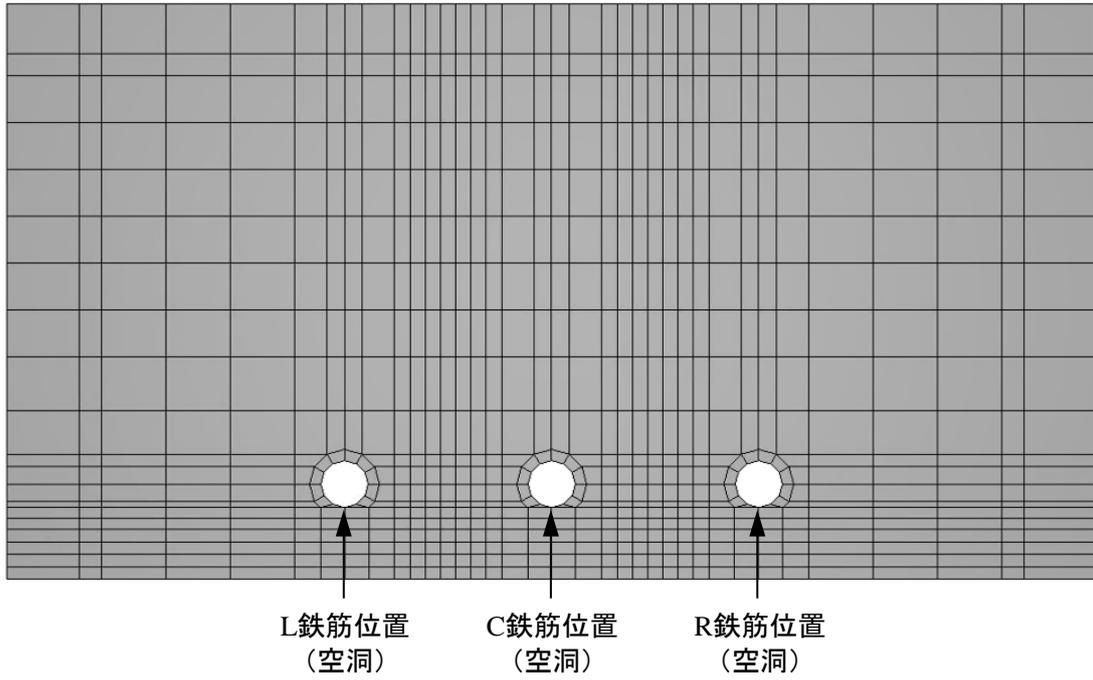


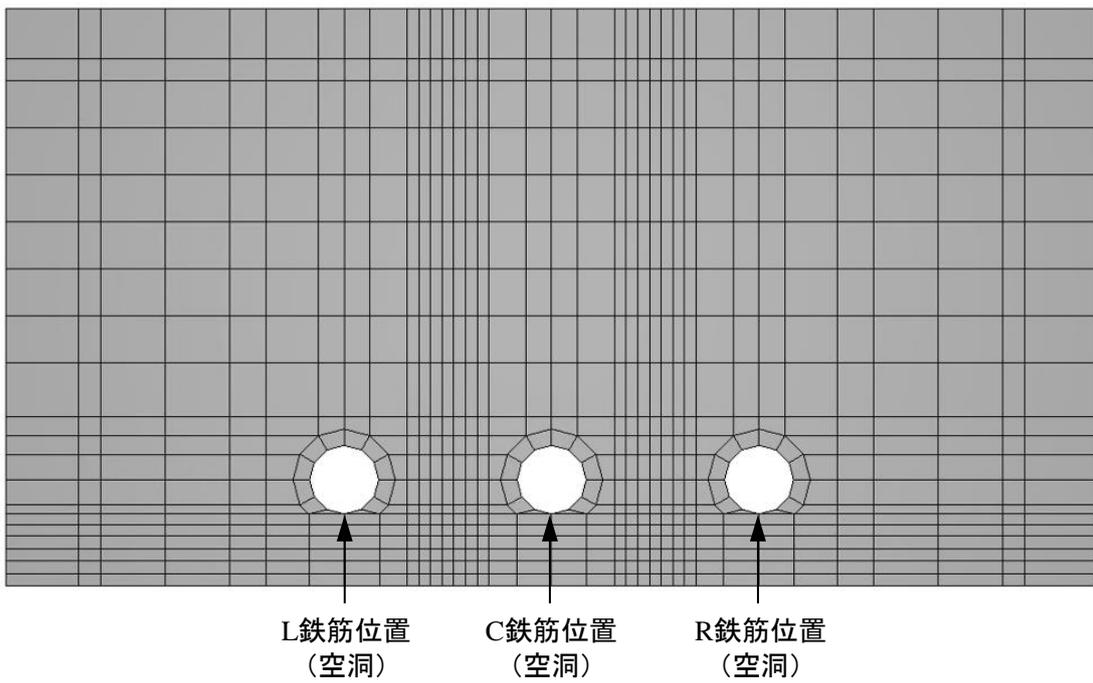
図 5-20 付着応力-すべり関係



(a) A1-13-100 シリーズ ( $RS = 95\text{mm}$ ,  $RD = D13$ )



(b) B1-13-500 シリーズ ( $RS = 57\text{mm}$ ,  $RD = D13$ )



(c) B1-19-100 シリーズ ( $RS = 57\text{mm}$ ,  $RD = D19$ )

図 5-21 小型 RC はりの 3 次元 Non-FE モデルの断面図

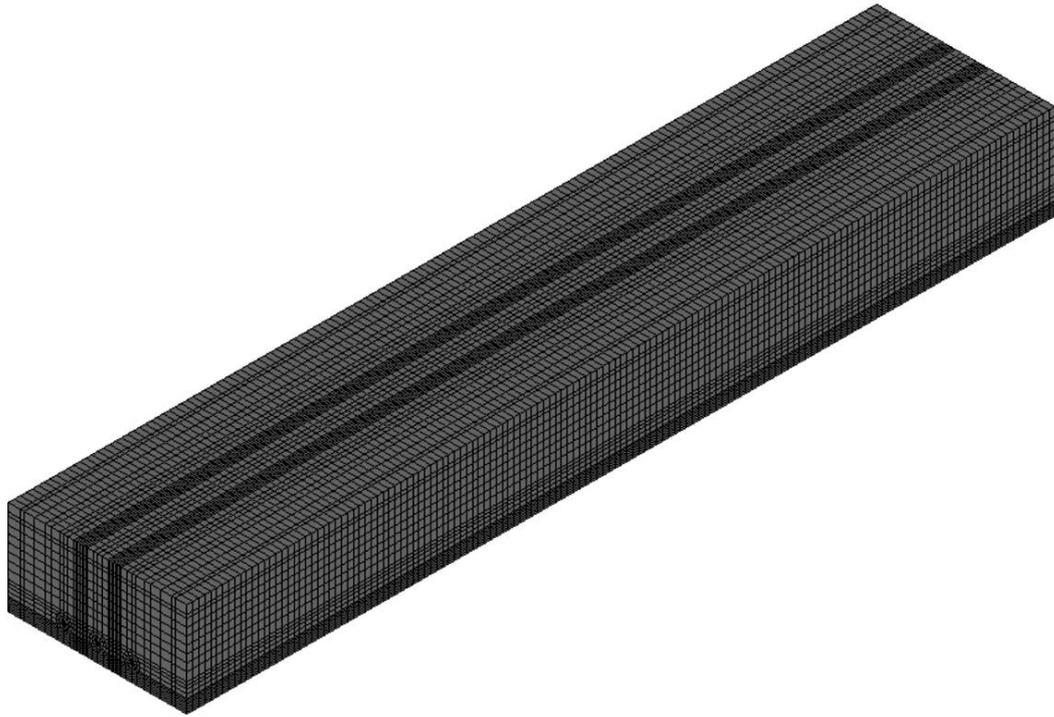


図 5-22 3次元 Non-FE モデルの全体図

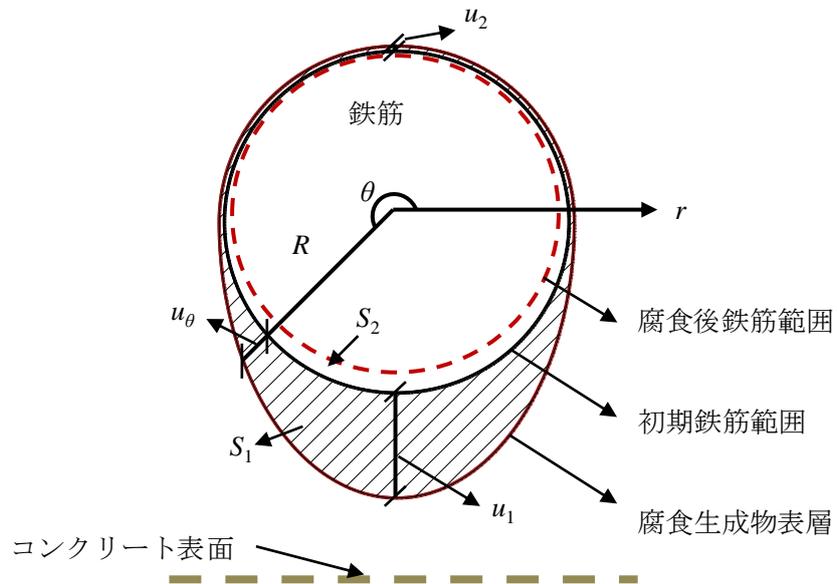
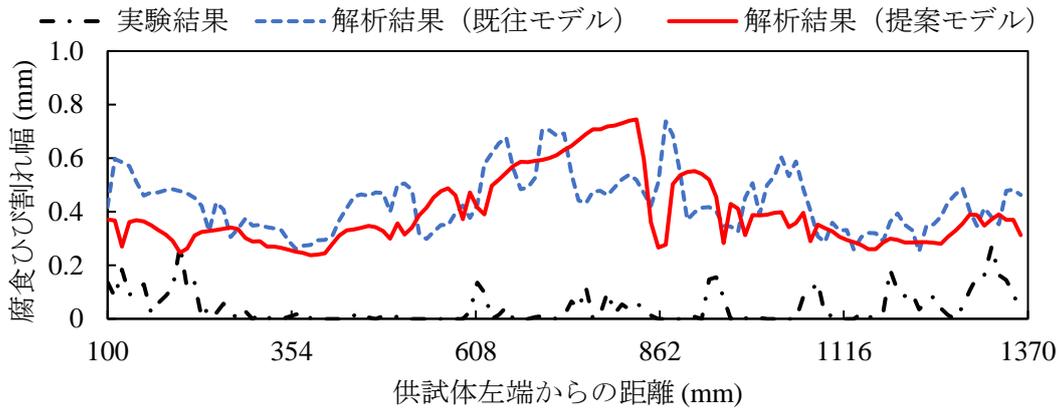
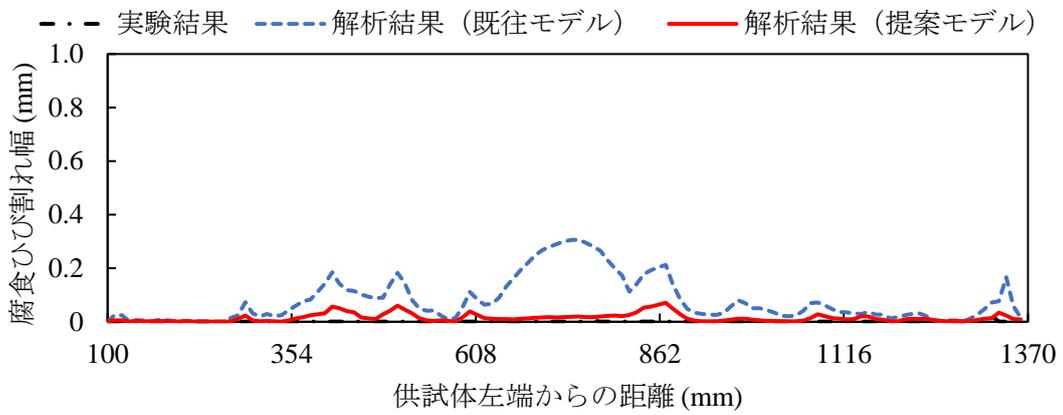


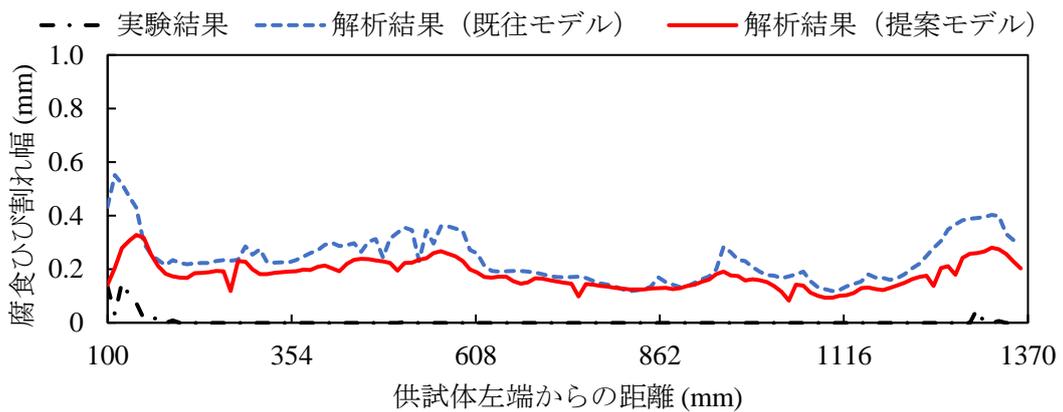
図 5-23 鉄筋に生じる不均一腐食のモデル化 (既往モデル)<sup>5-7)</sup>



(a-1) L 鉄筋

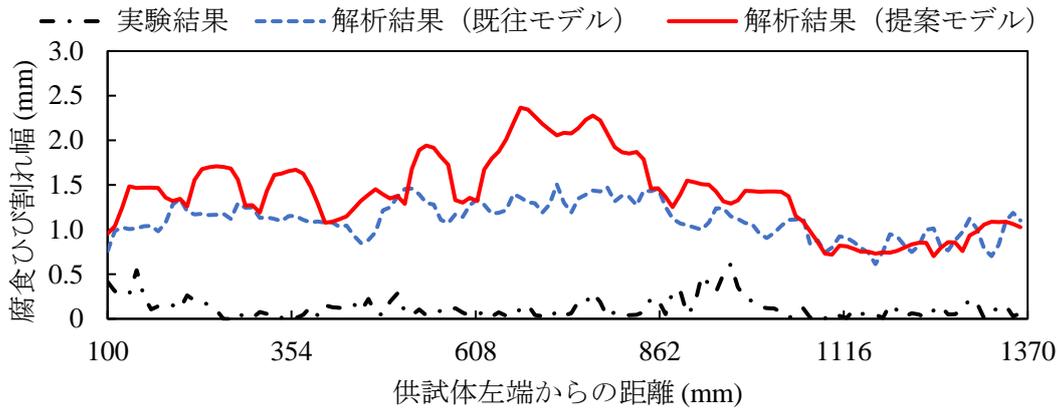


(a-1) C 鉄筋

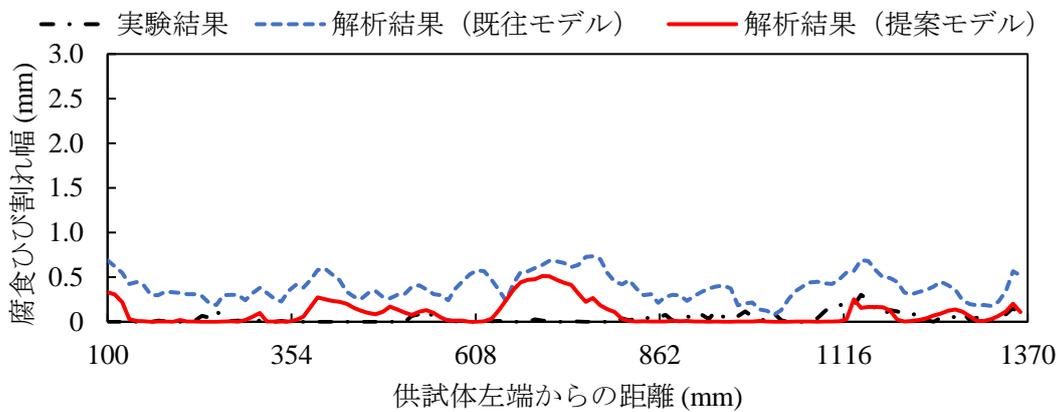


(a-1) R 鉄筋

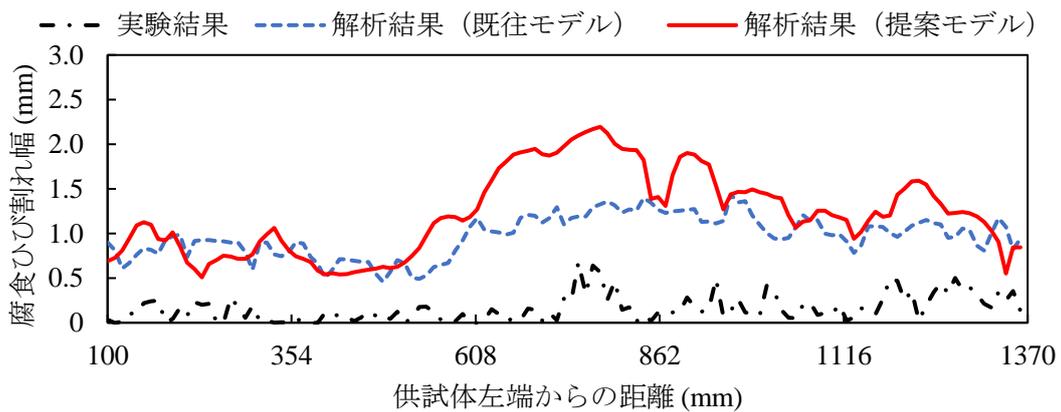
(a) A1-13-100-10



(b-1) L 鉄筋

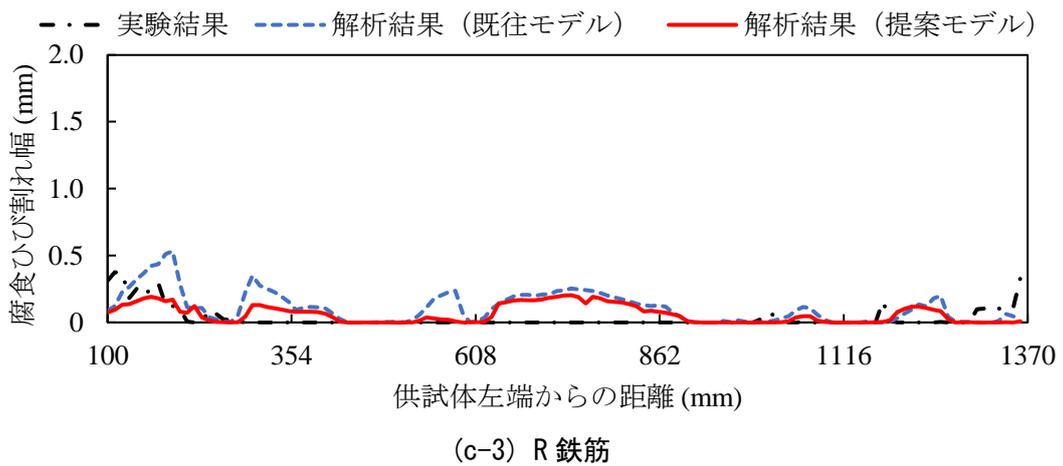
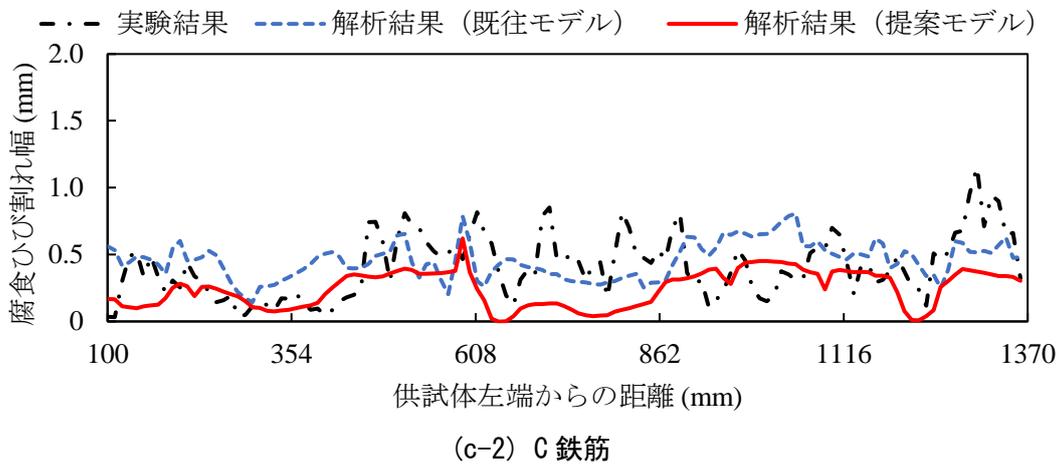
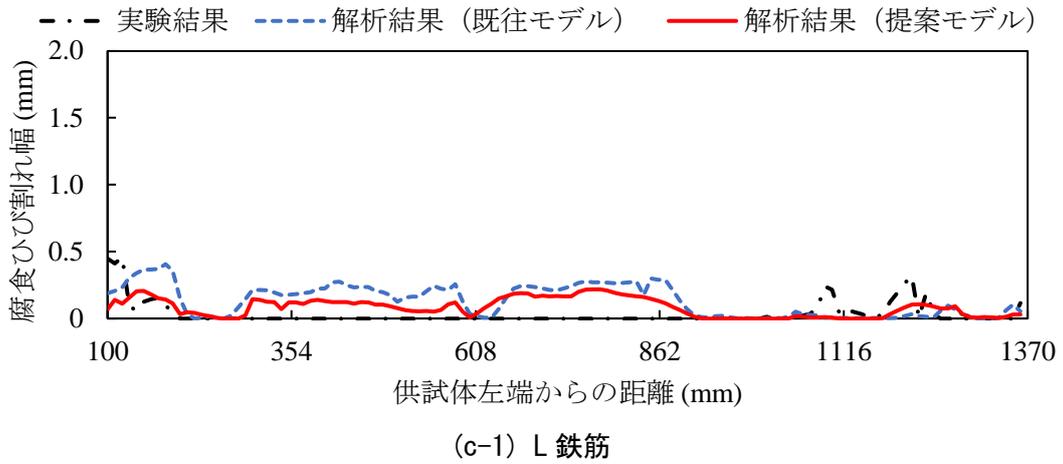


(b-1) C 鉄筋

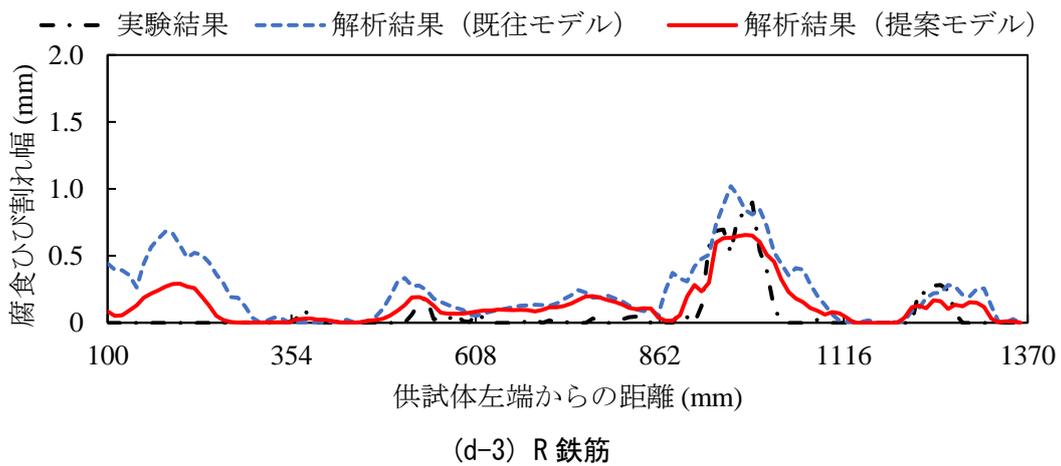
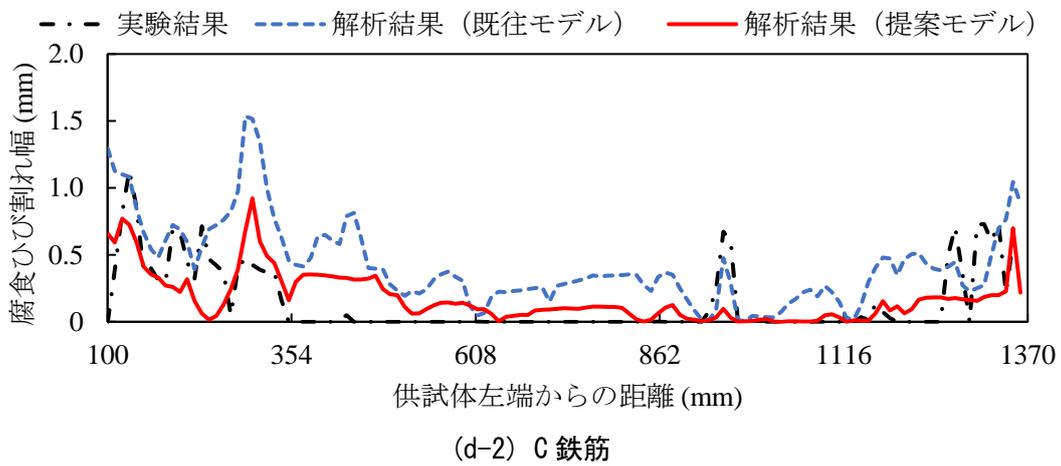
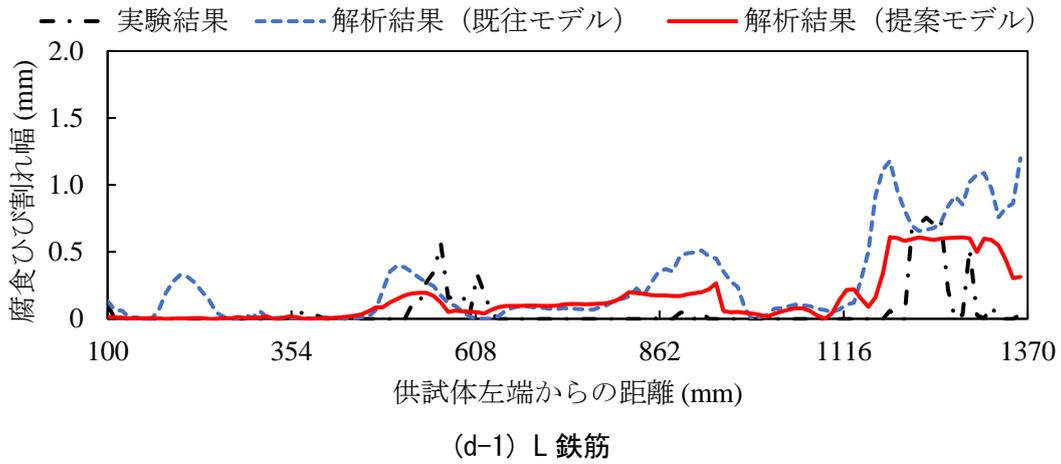


(b-1) R 鉄筋

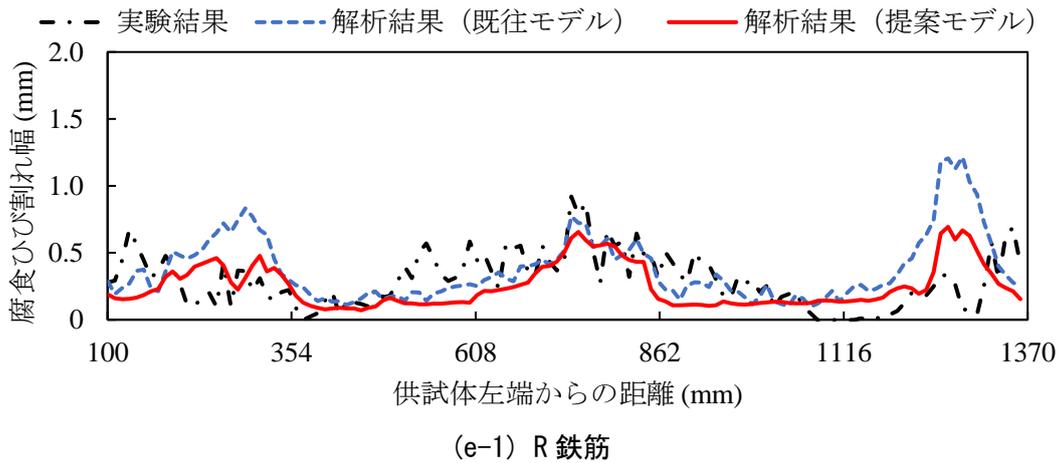
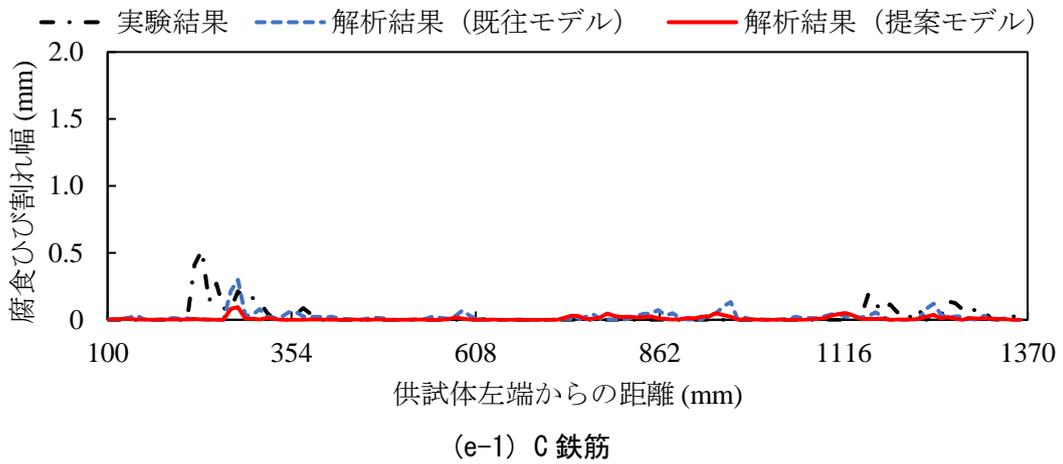
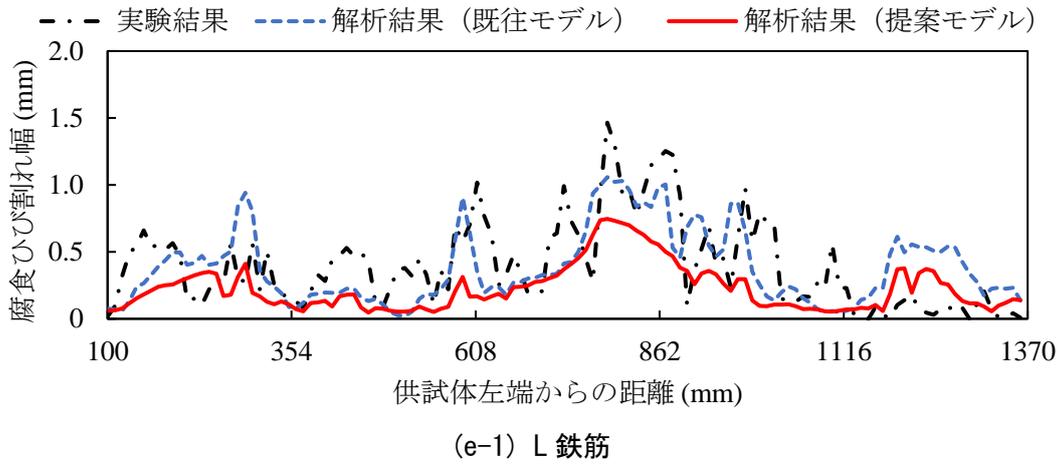
(b) A1-13-100-20



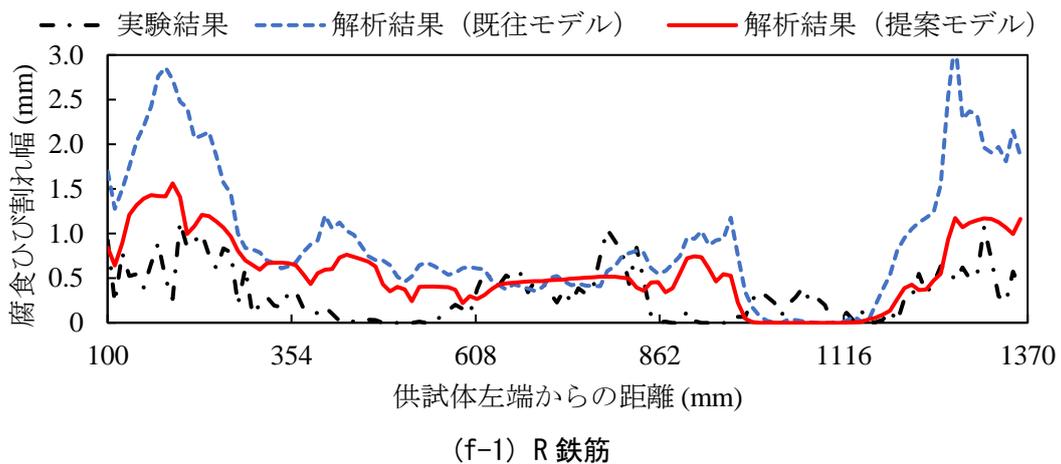
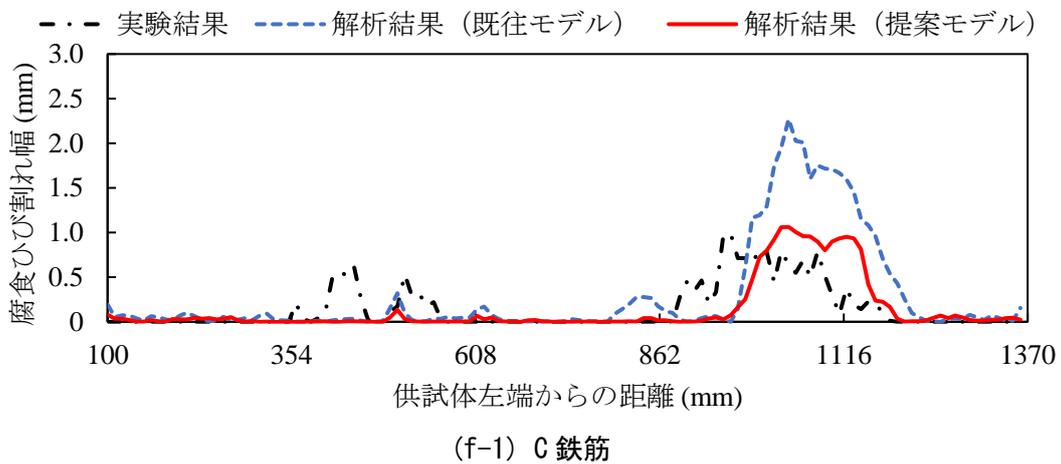
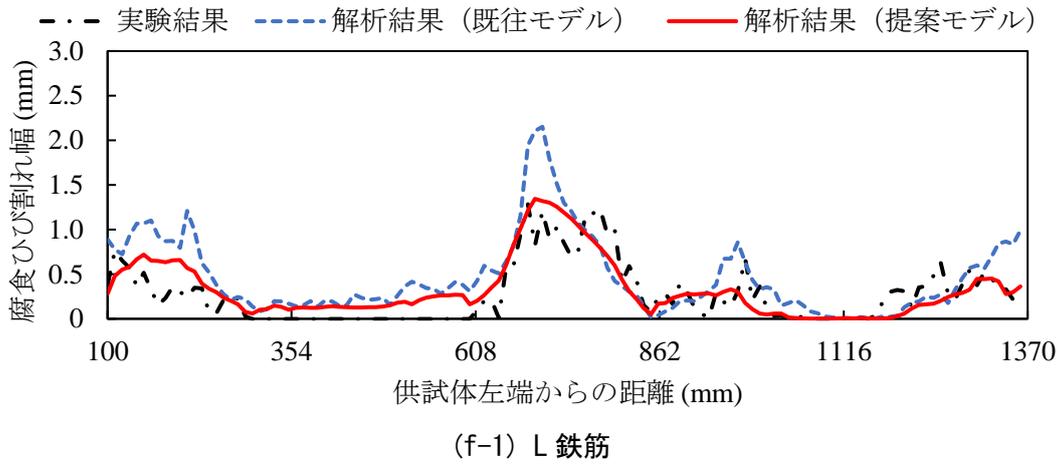
(c) B1-13-500-10



(d) B1-13-500-20



(e) B1-19-100-10



(f) B1-19-100-20

図 5-24 腐食ひび割れ幅分布の実験結果と再現解析結果の比較 (小型 RC はり)

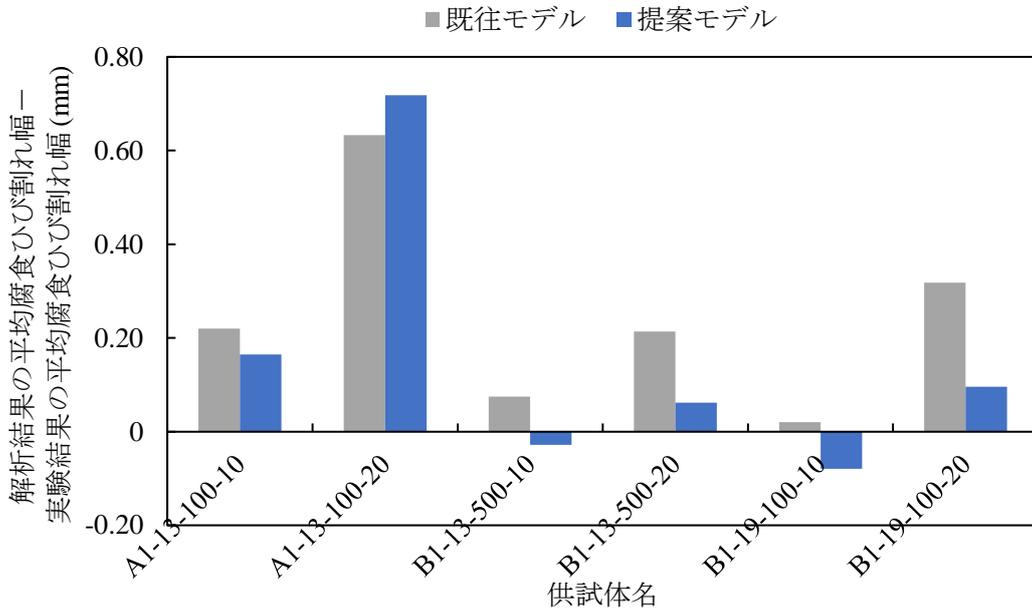


図 5-25 再現解析結果の平均腐食ひび割れ幅と実験結果の平均腐食ひび割れ幅の絶対誤差

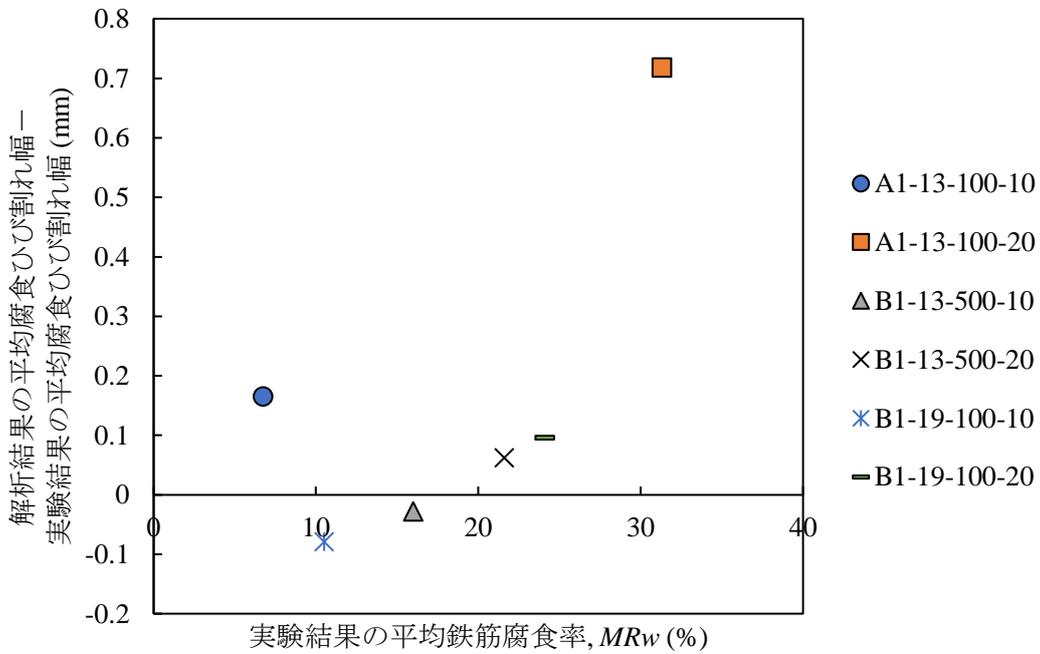
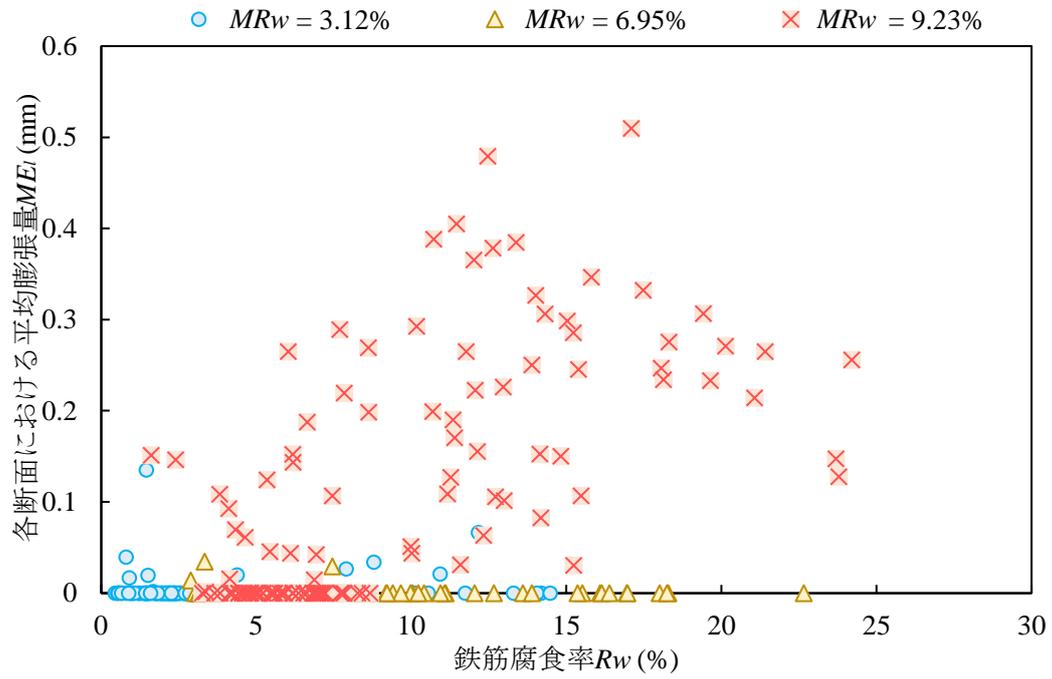
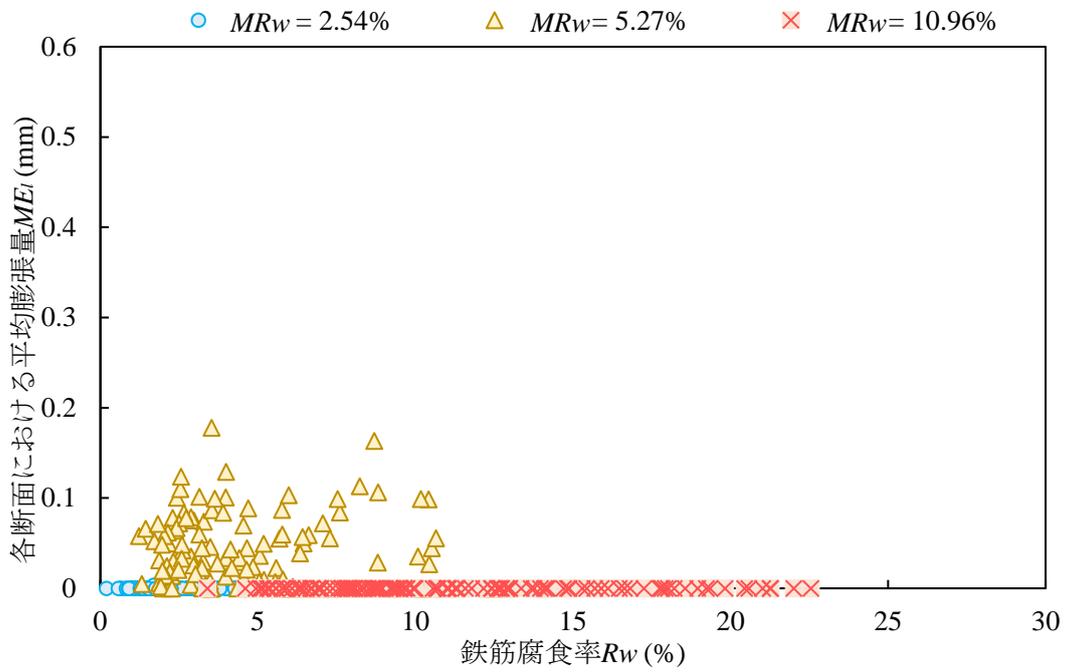


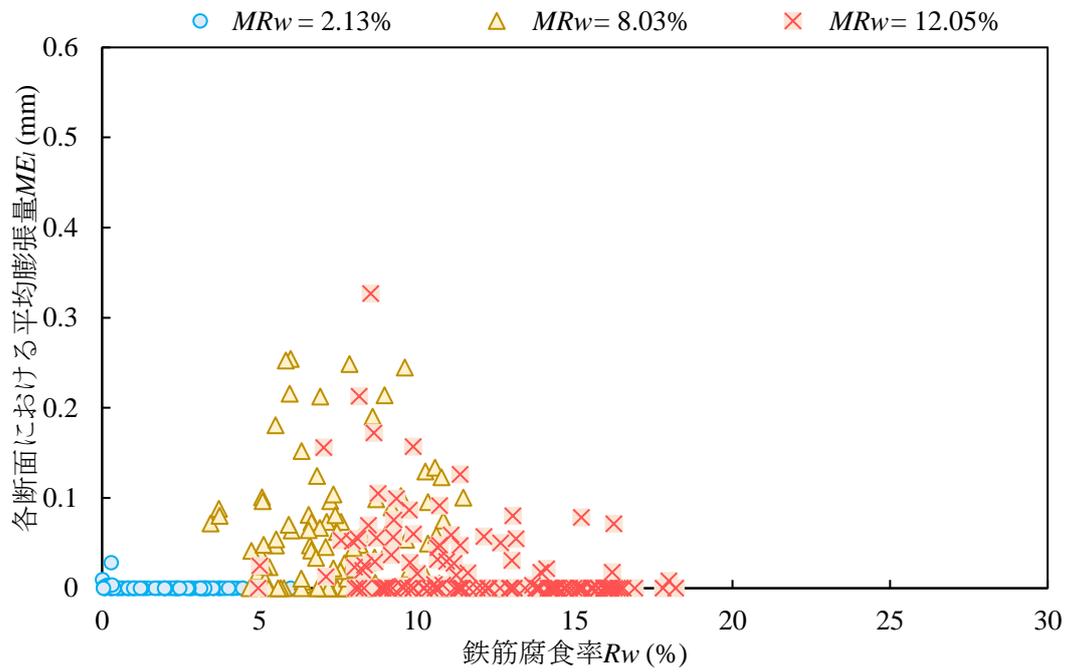
図 5-26 平均鉄筋腐食率に対する平均腐食ひび割れ幅の再現解析結果と実験結果の絶対誤差



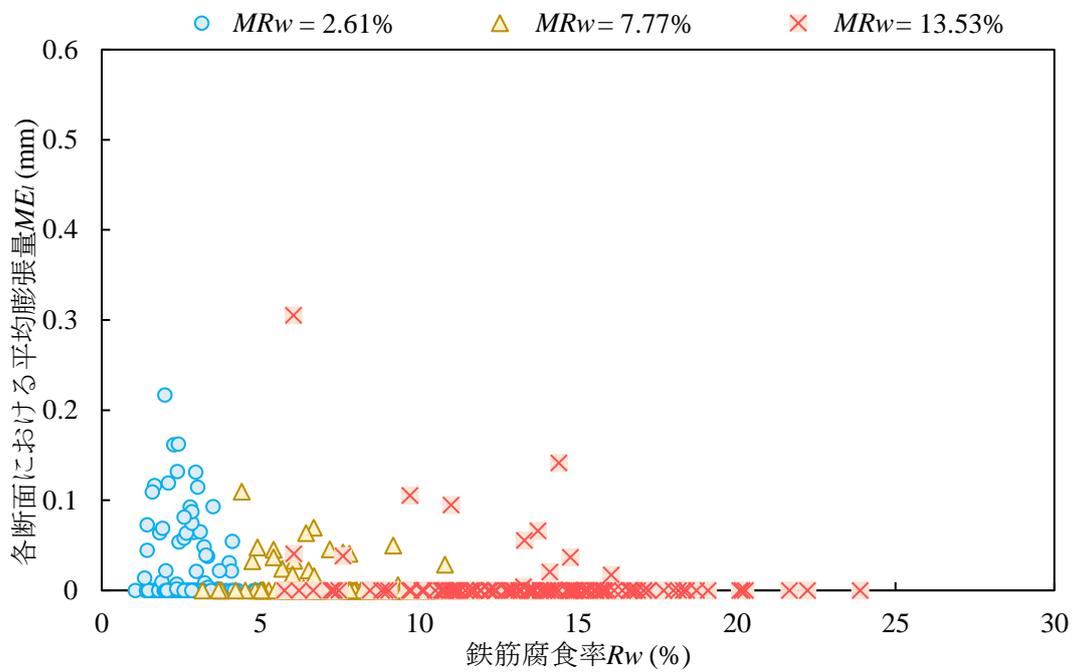
(a) CD-10



(b) CD-50



(c) CD-100



(d) CD-200

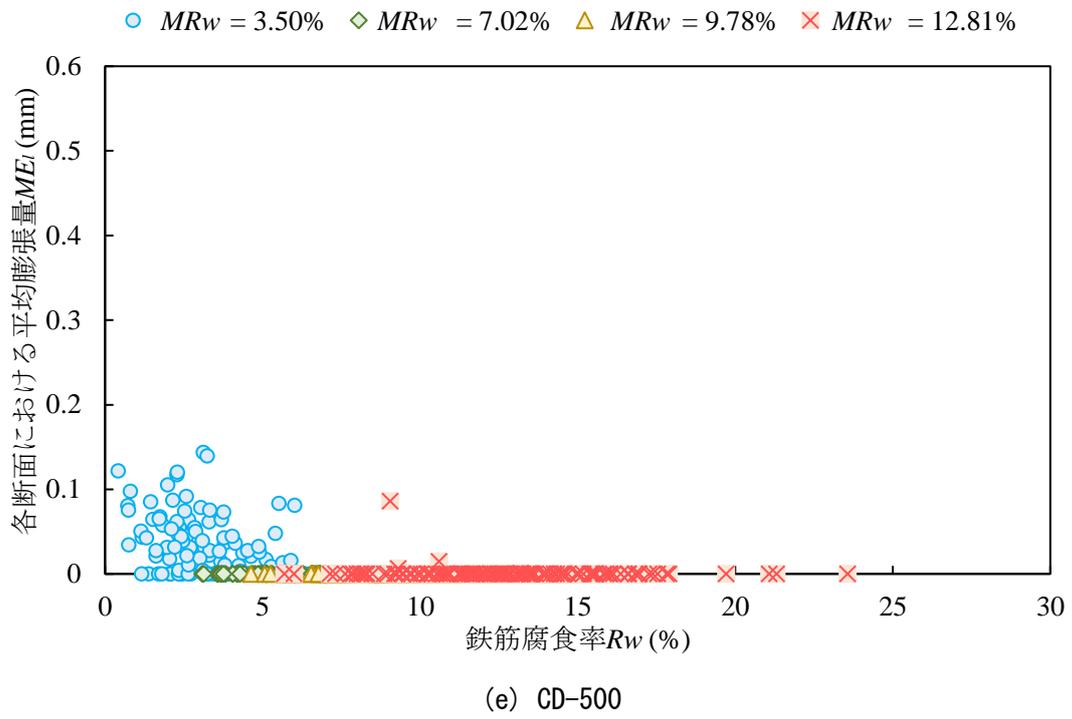
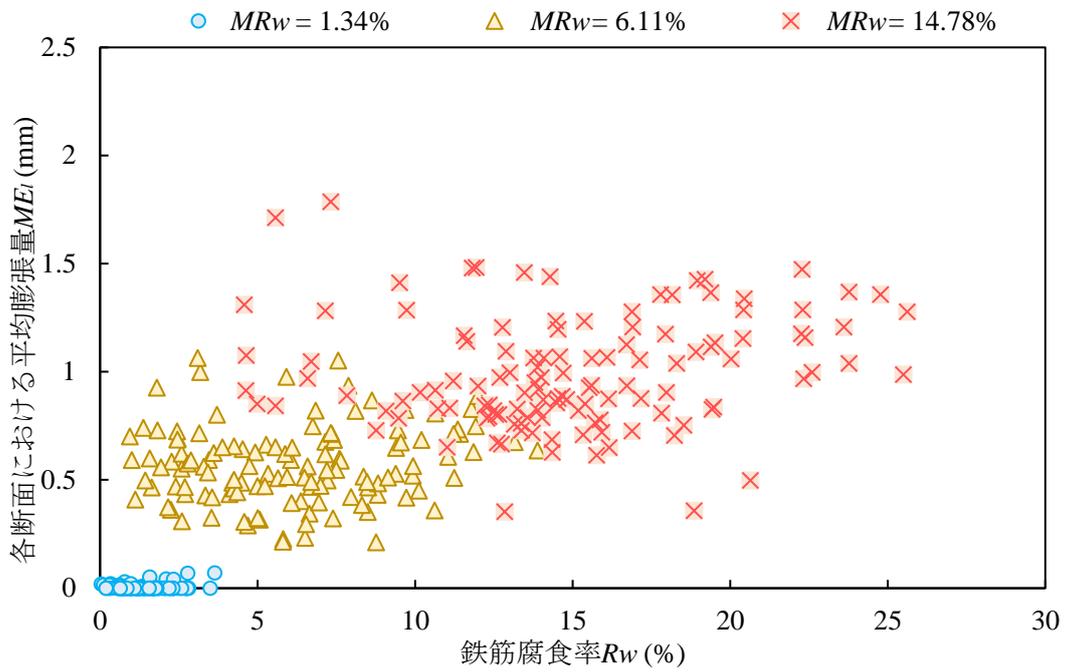
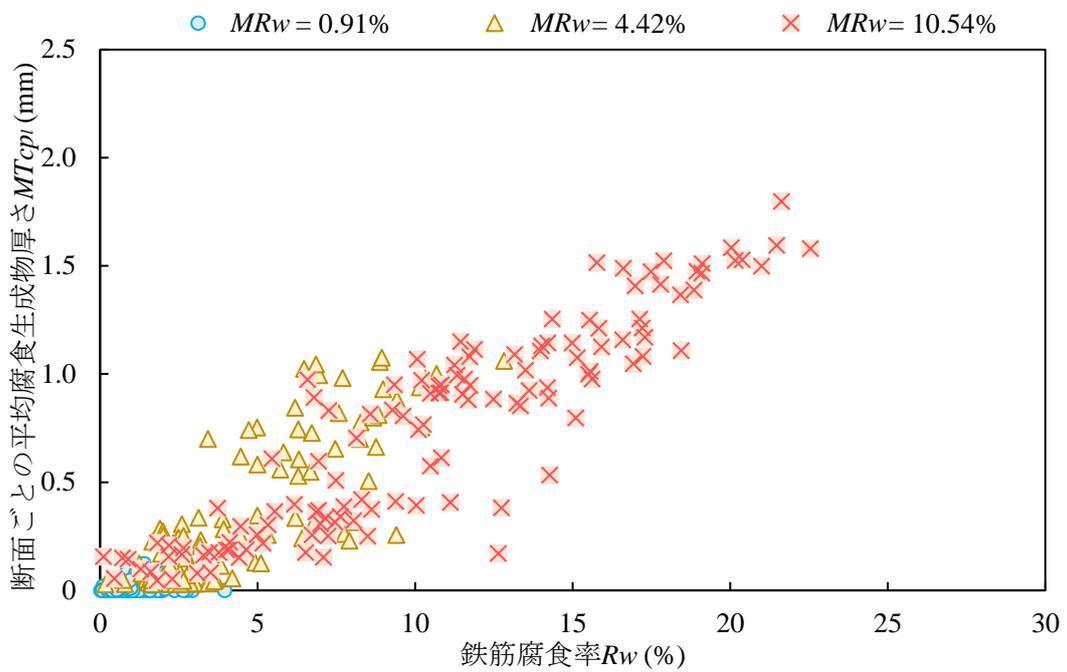


図 5-27 電食実験における鉄筋腐食率と鉄筋各断面における平均膨張量の関係



(a) WD-1



(b) WD-2

図 5-28 乾湿繰返し実験における鉄筋腐食率と鉄筋各断面における平均膨張量の関係

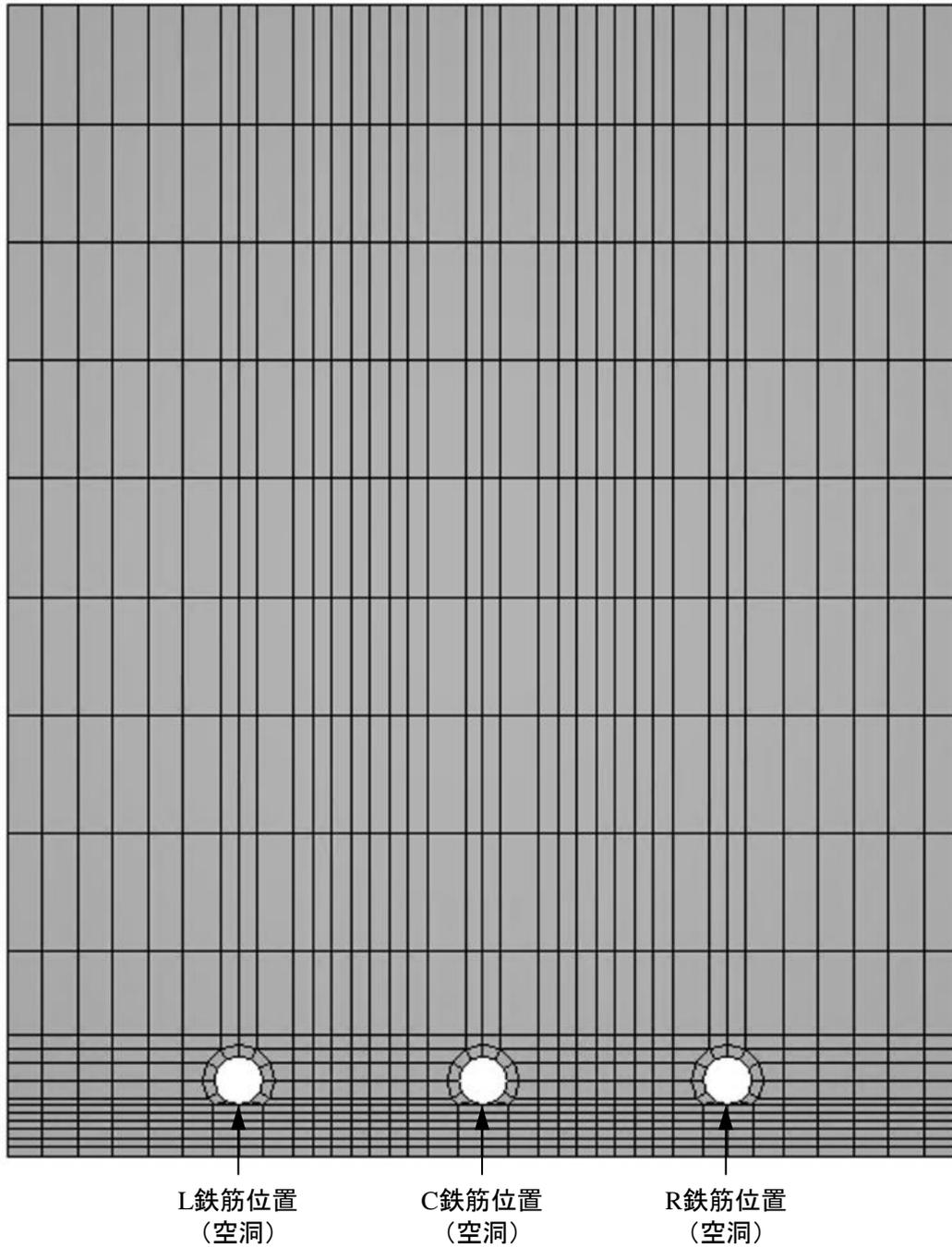
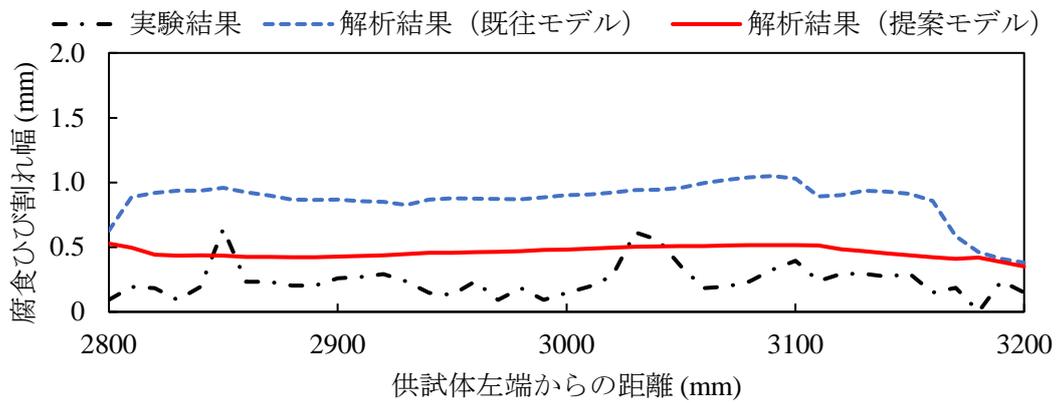
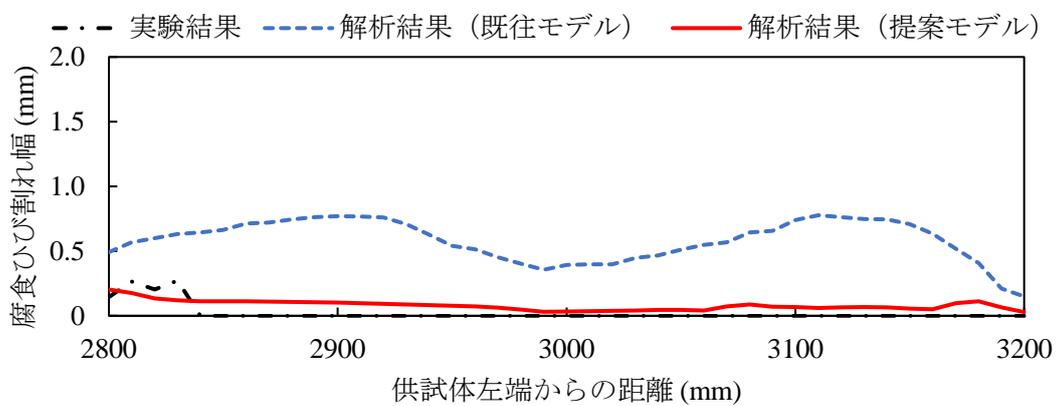


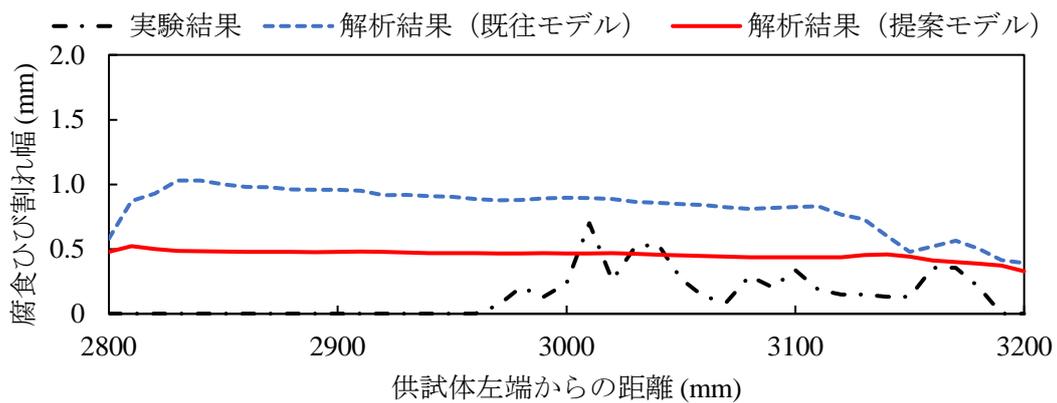
図 5-29 大型 RC はりの 3 次元 Non-FE モデルの断面図 ( $RS = 95\text{mm}$ ,  $RD = D19$ )



(a-1) L 鉄筋

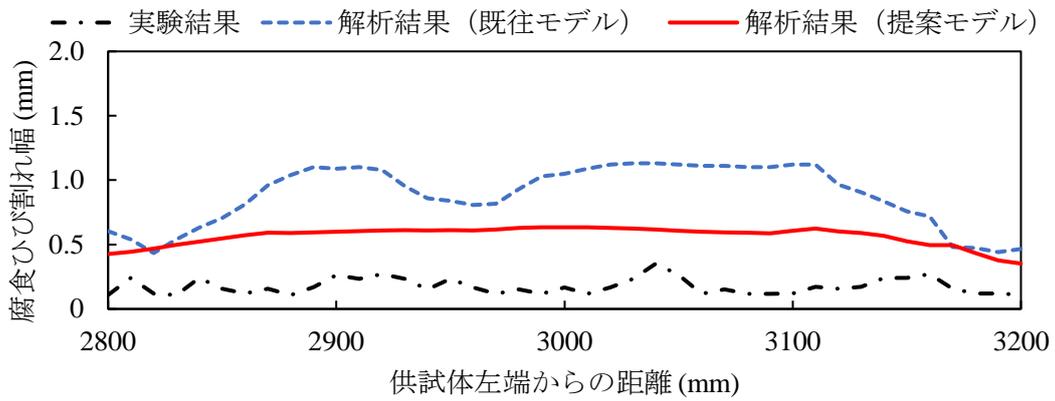


(a-1) C 鉄筋

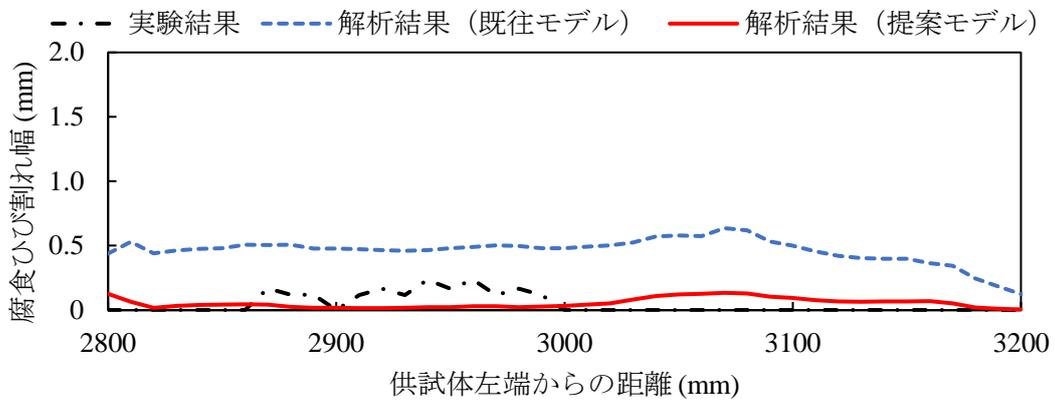


(a-1) R 鉄筋

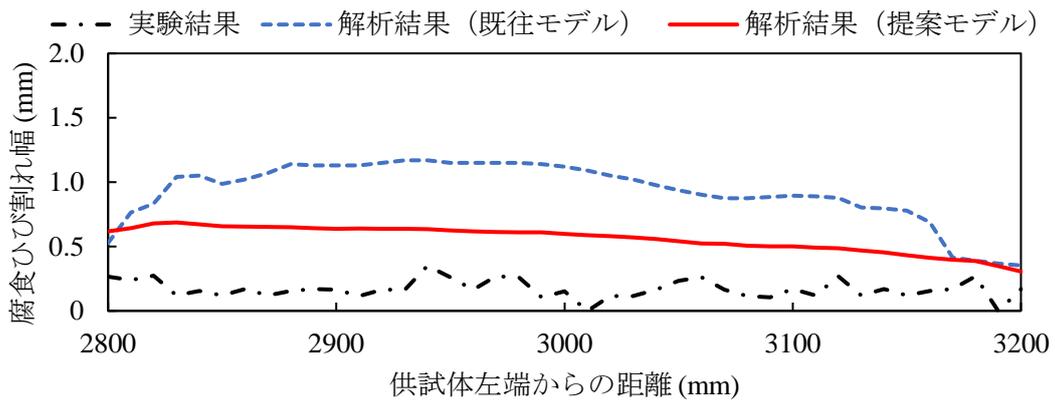
(a) C2



(b-1) L 鉄筋

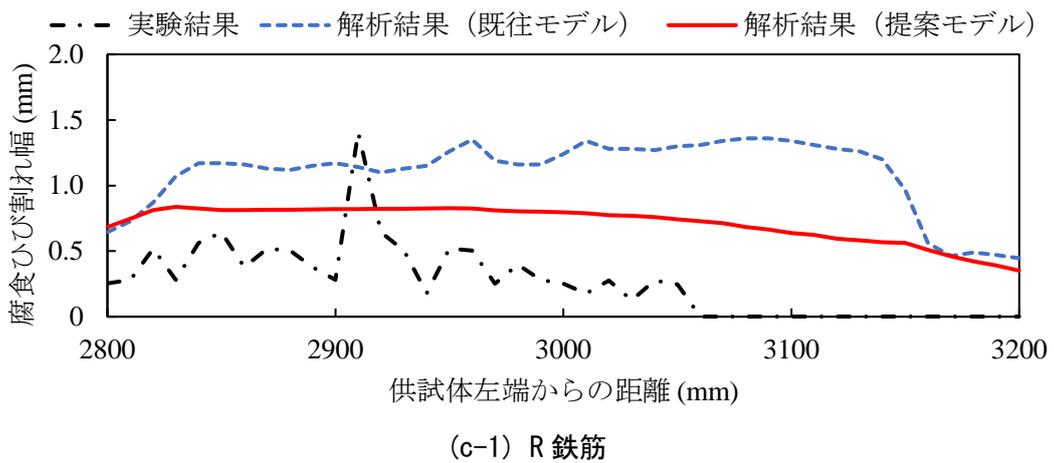
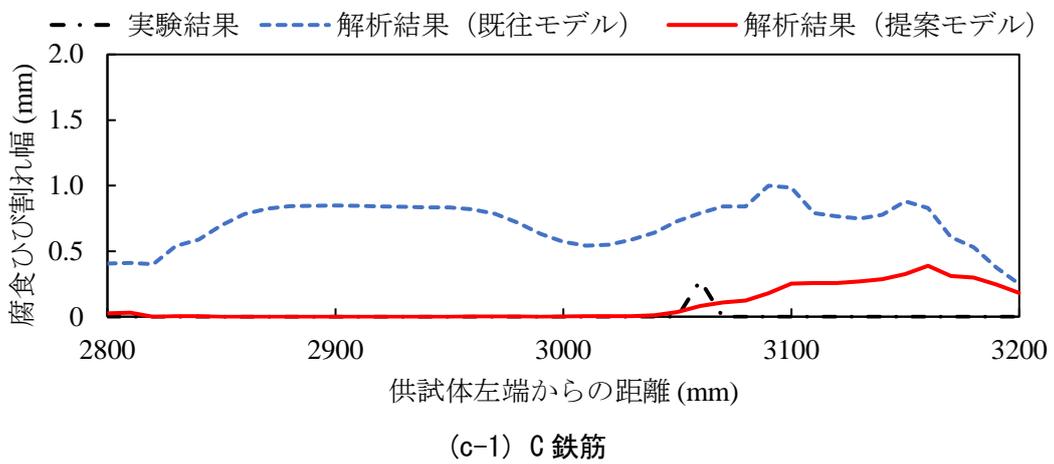
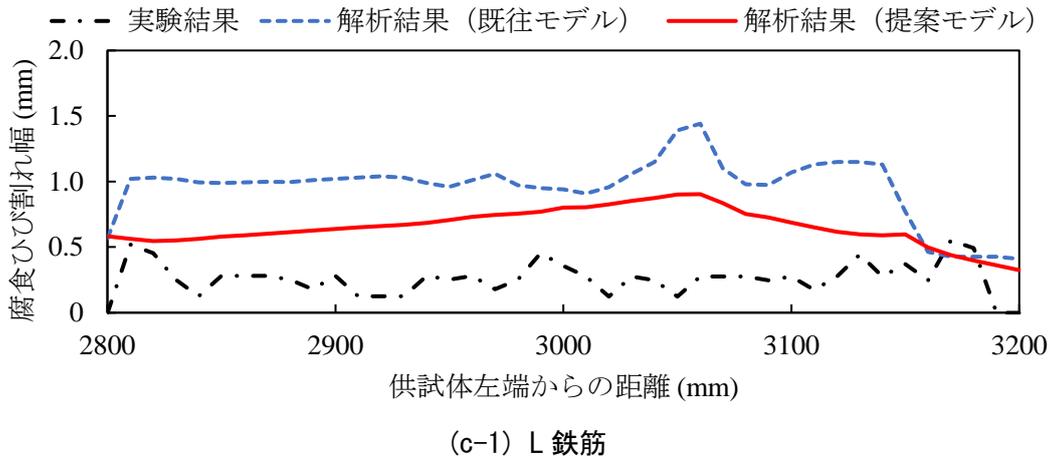


(b-1) C 鉄筋



(b-1) R 鉄筋

(b) C3



(c) C4

図 5-30 腐食ひび割れ幅分布の実験結果と再現解析結果の比較 (大型 RC はり)

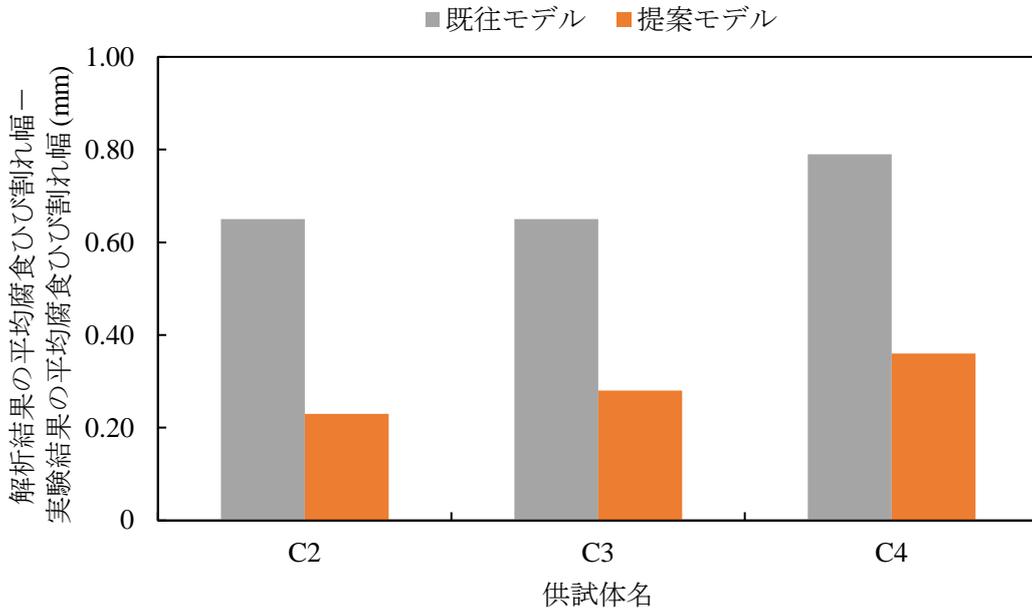


図 5-31 再現解析結果の平均腐食ひび割れ幅と実験結果の平均腐食ひび割れ幅の絶対誤差

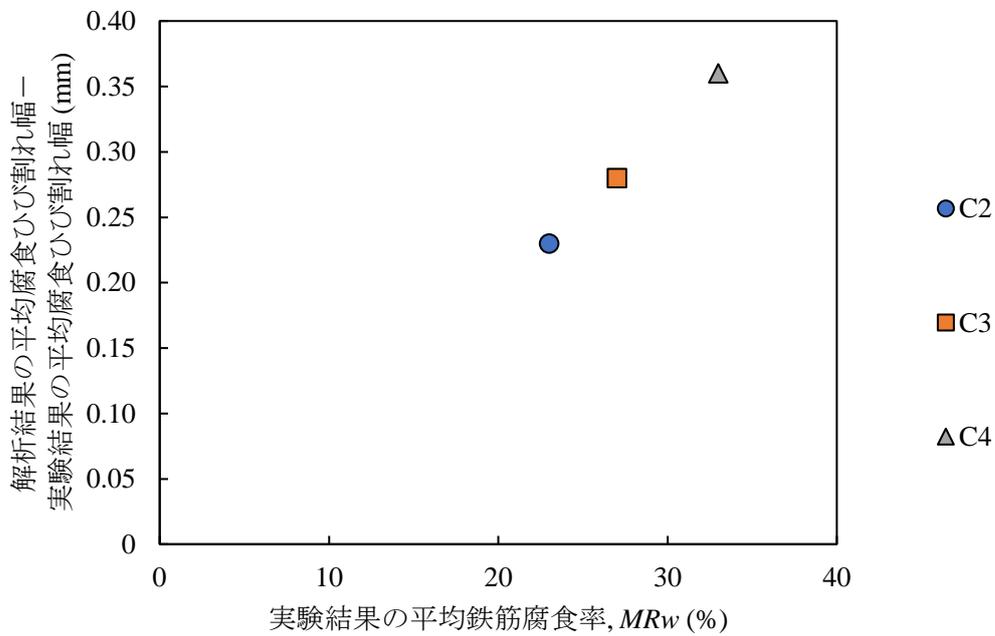


図 5-32 平均鉄筋腐食率に対する平均腐食ひび割れ幅の解析結果と実験結果の絶対誤差

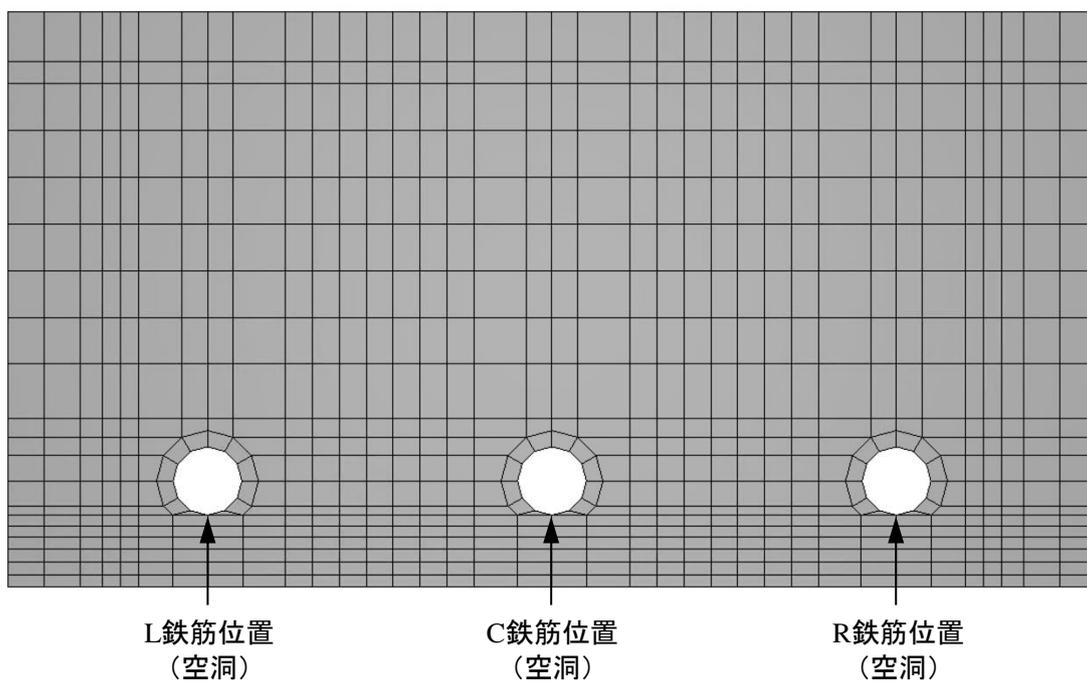
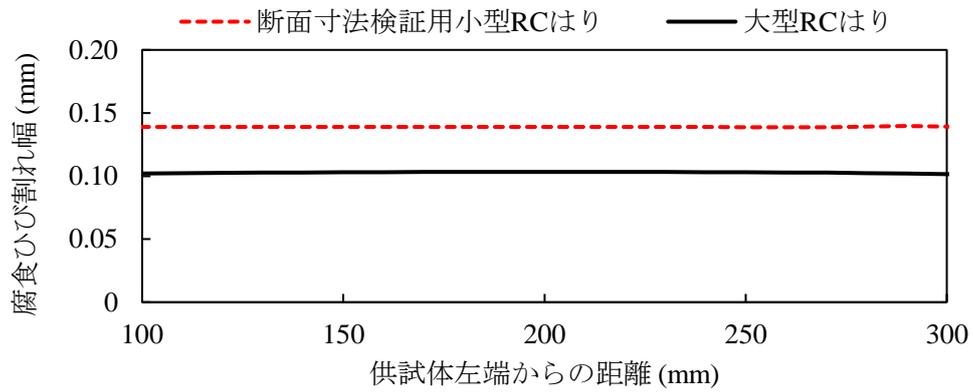
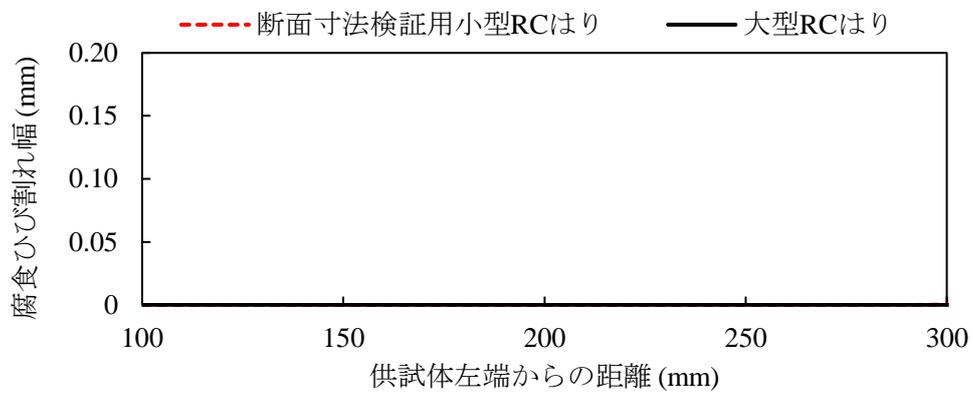


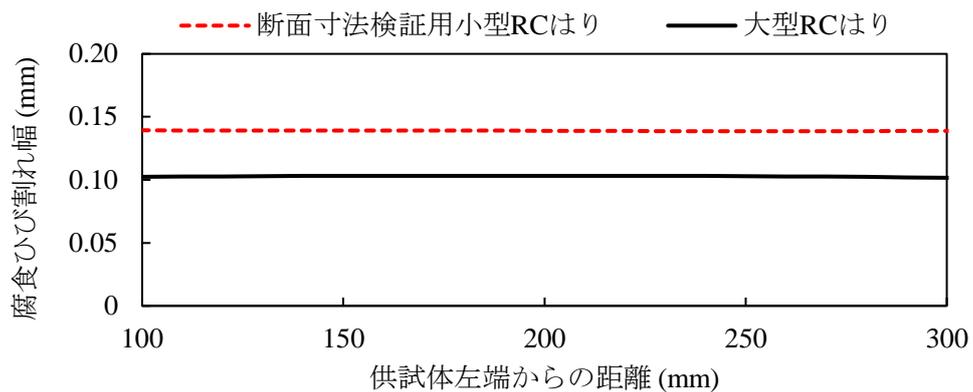
図 5-33 断面寸法検証用の小型 RC はりの 3 次元 Non-FE モデルの断面図  
( $RS = 95\text{mm}$ ,  $RD = D19$ )



(a) L 鉄筋



(b) C 鉄筋



(c) R 鉄筋

図 5-34 異なる断面寸法を持つ RC はりの解析結果で得られた腐食ひび割れ幅分布の比較

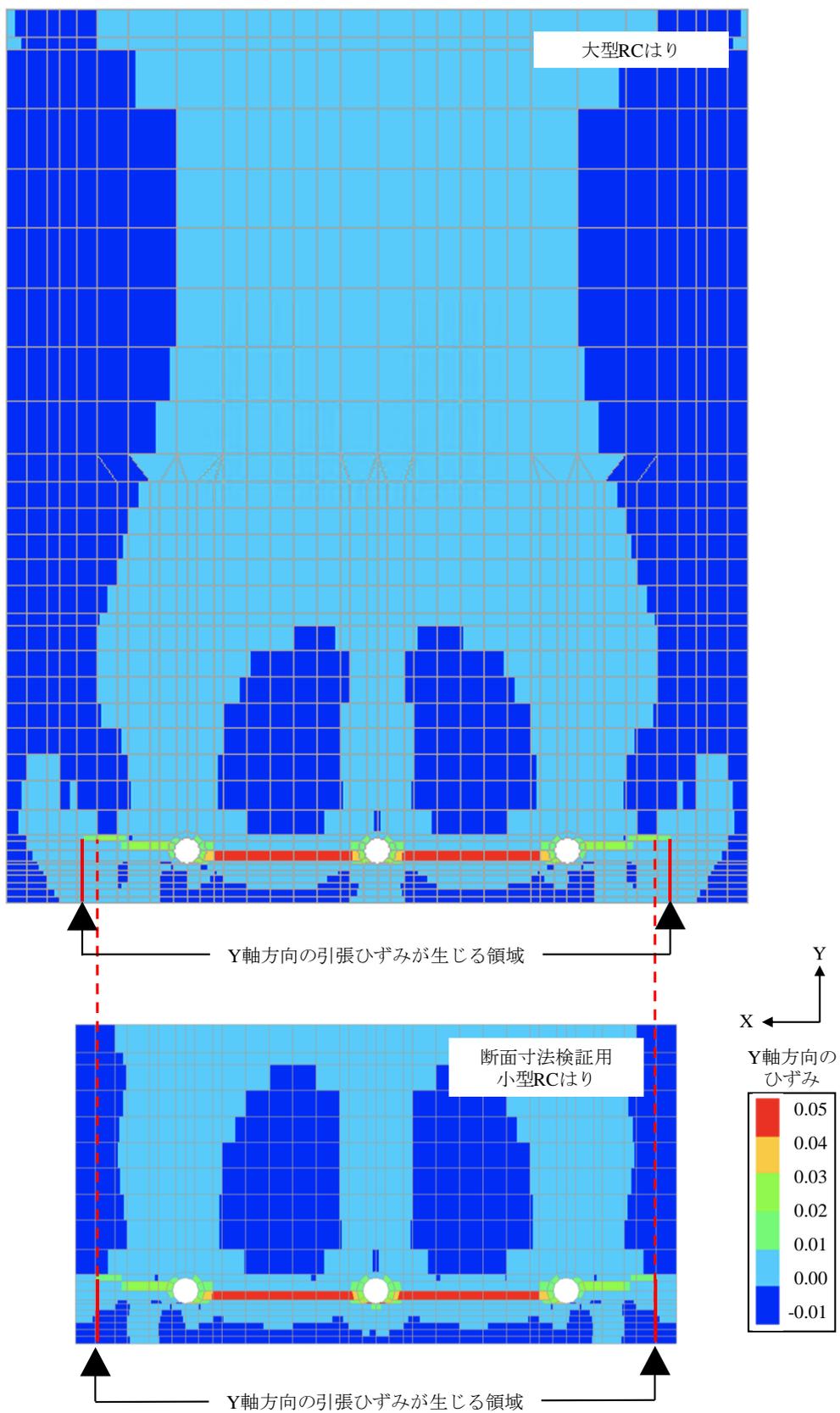


図 5-35 Y 軸方向に生じたひずみコンター図の比較

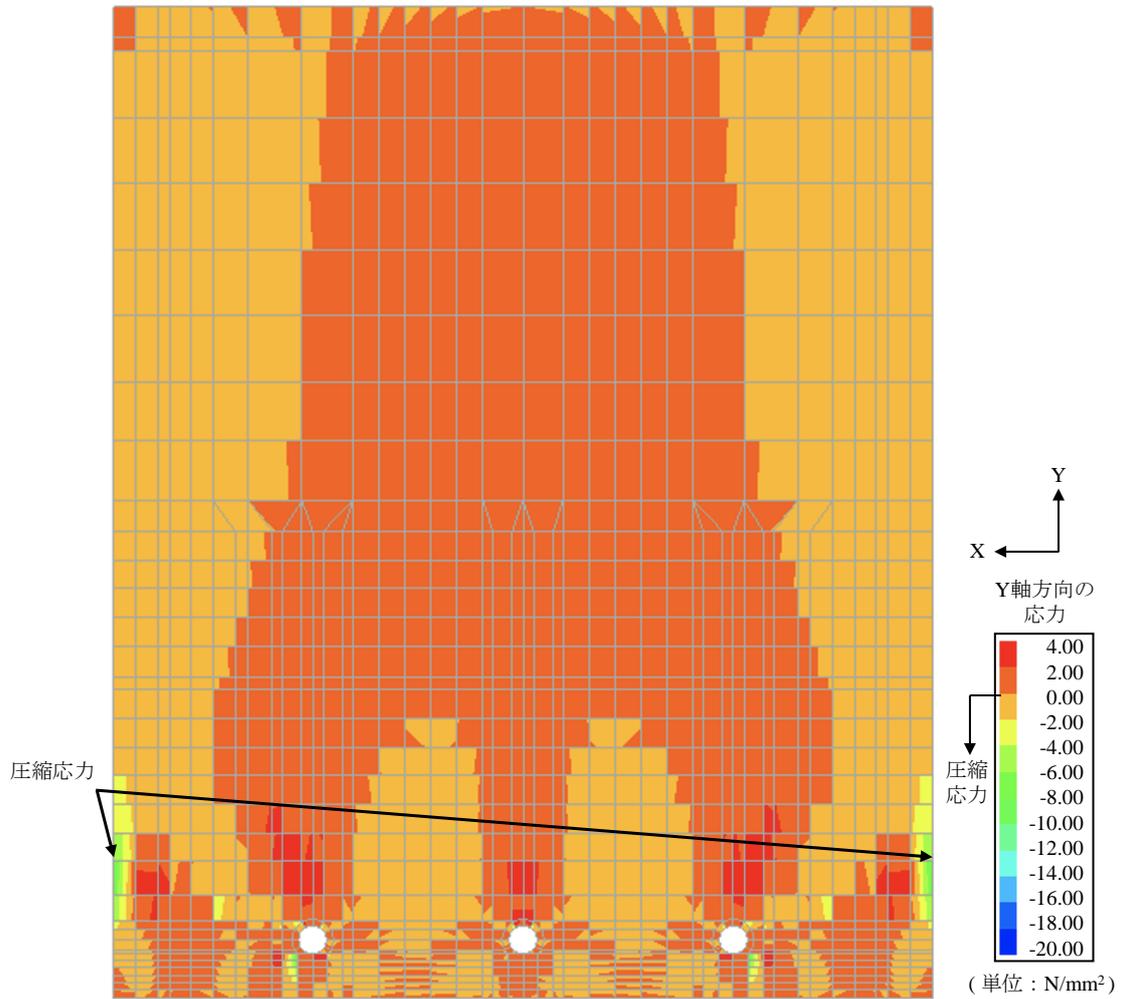


図 5-36 大型 RC はりの Y 軸方向に生じた応力コンター図

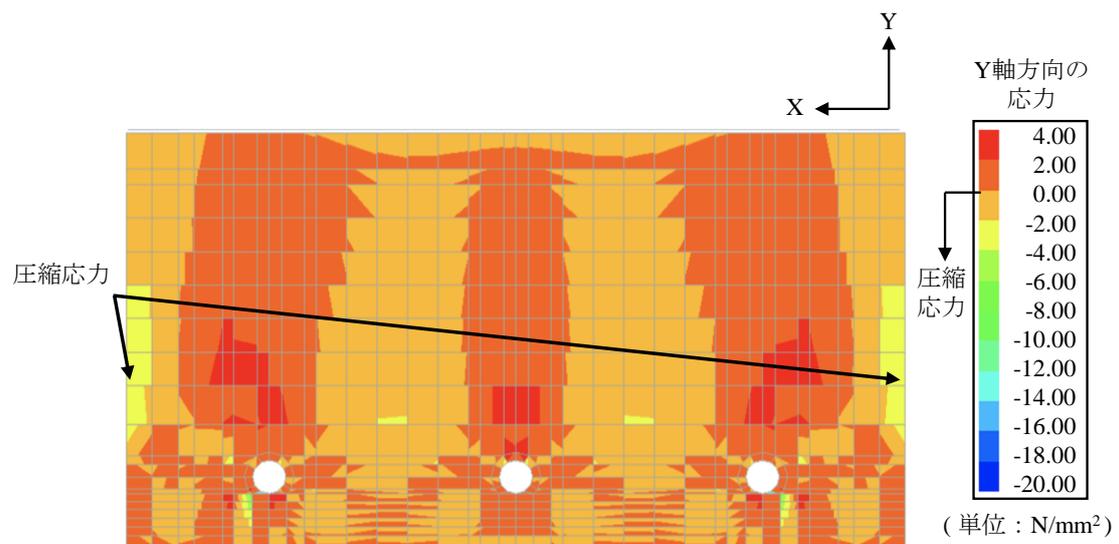
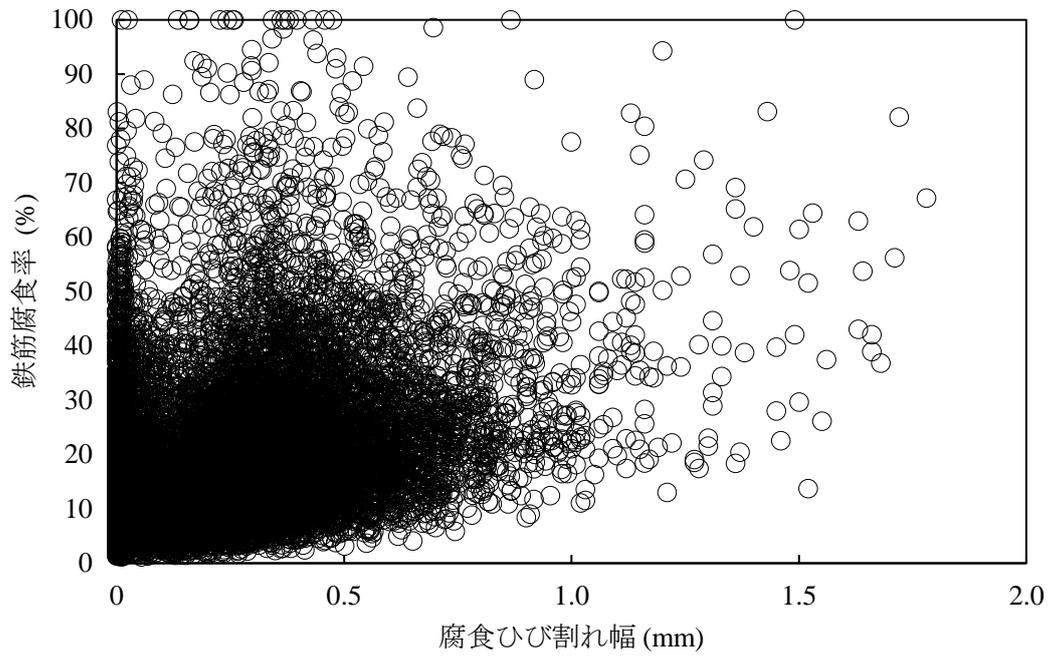
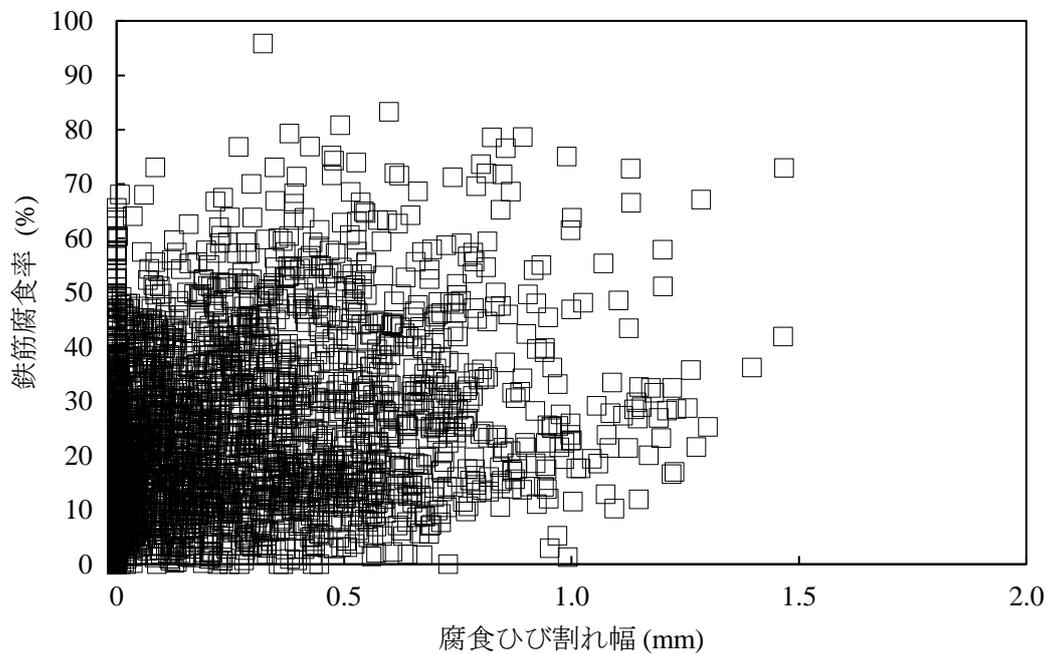


図 5-37 断面寸法検証用小型 RC はりの Y 軸方向に生じた応力コンター図



(a) データベースのプロット (ケース : A1-13-100, B1-13-500, B1-19-100)



(b) 実験結果のプロット (A1-13-100 シリーズ, B1-13-500 シリーズ, B1-19-100 シリーズ)

図 5-38 腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食率の関係の比較

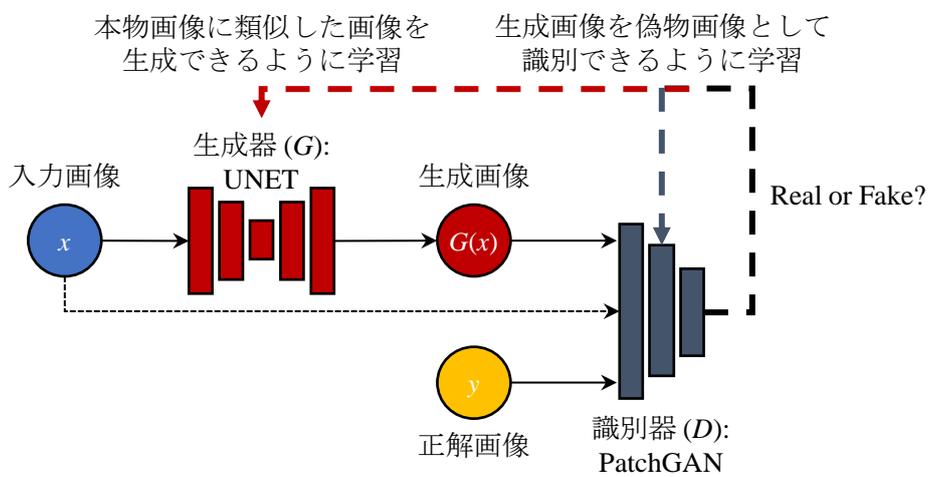


図 5-39 pix2pix の概要 <sup>5-34)</sup>

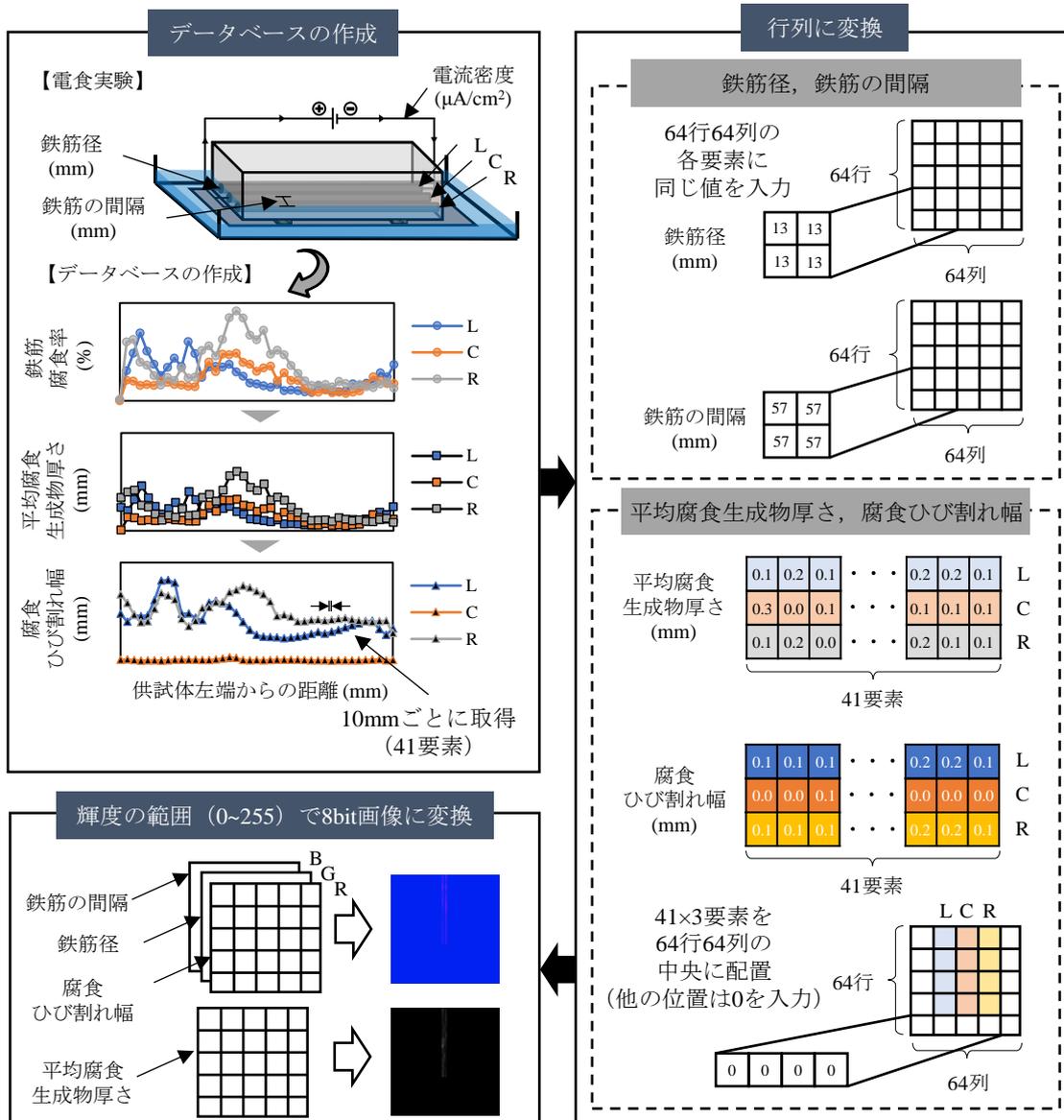
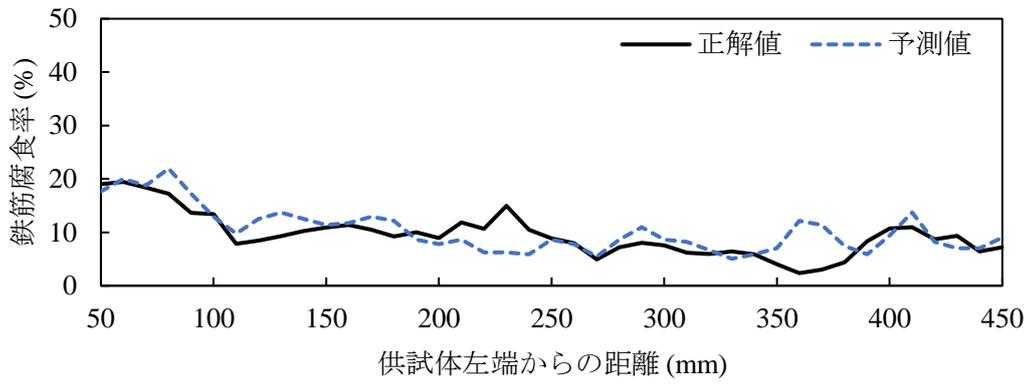
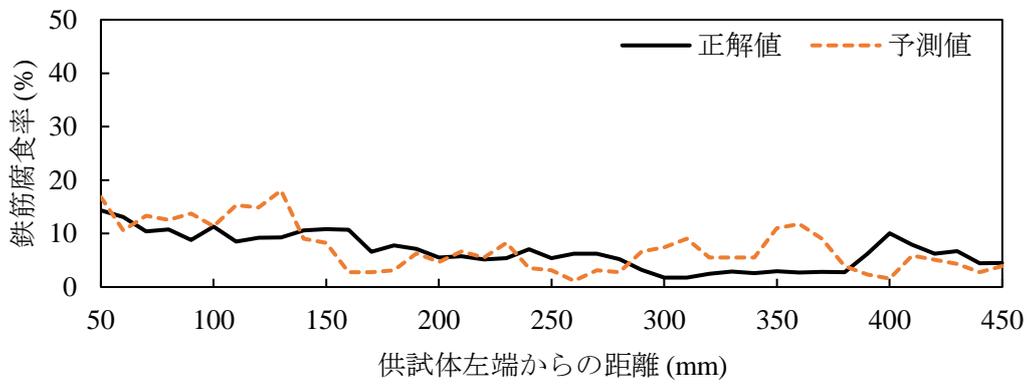


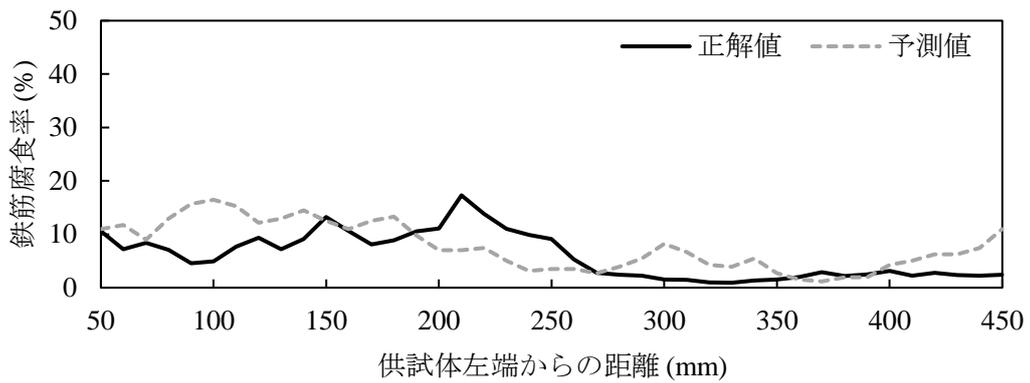
図 5-40 画像変換手順



(a-1) L 鉄筋

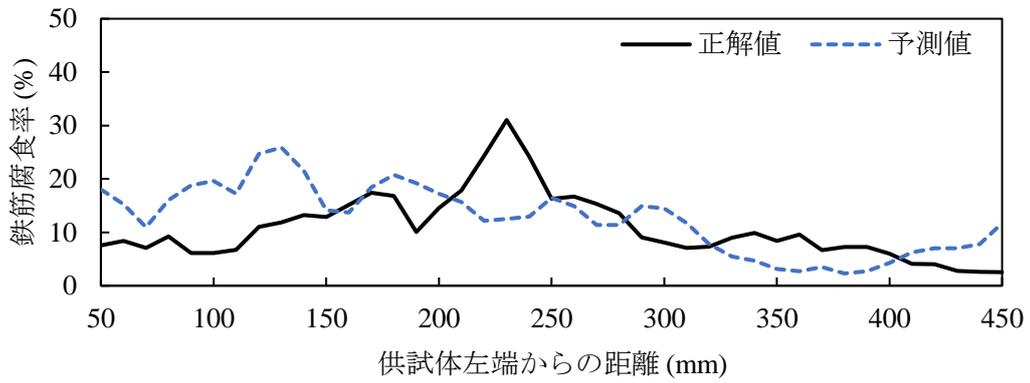


(a-2) C 鉄筋

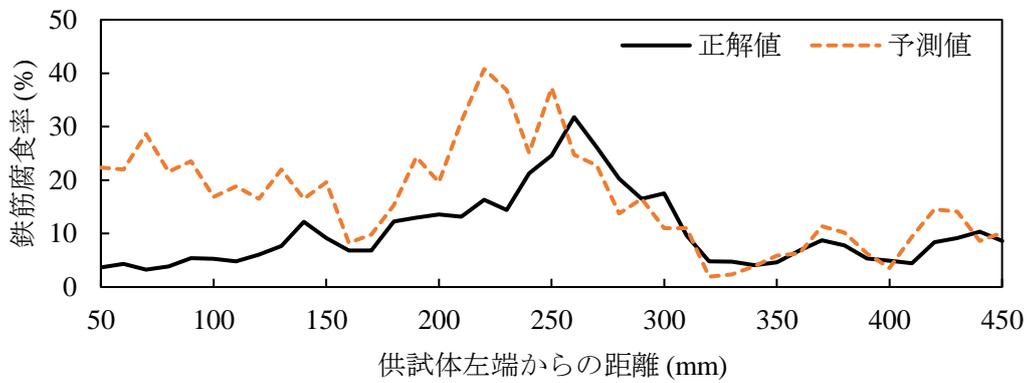


(a-3) R 鉄筋

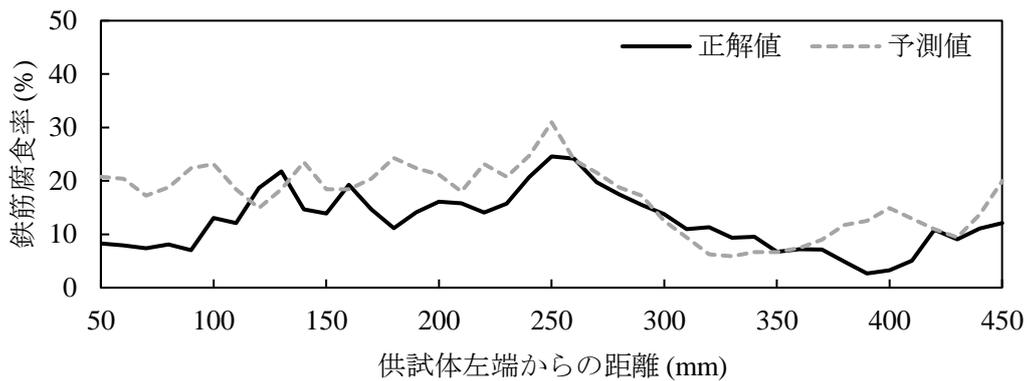
(a) ケース : A1-13-100



(b-1) L 鉄筋

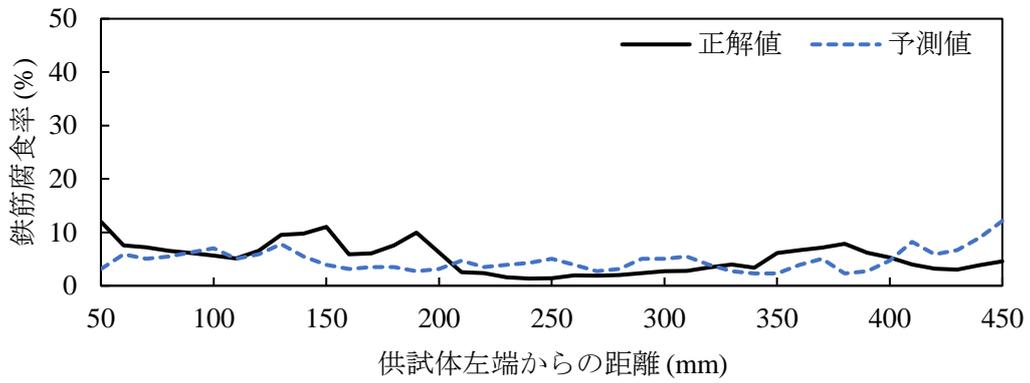


(b-2) C 鉄筋

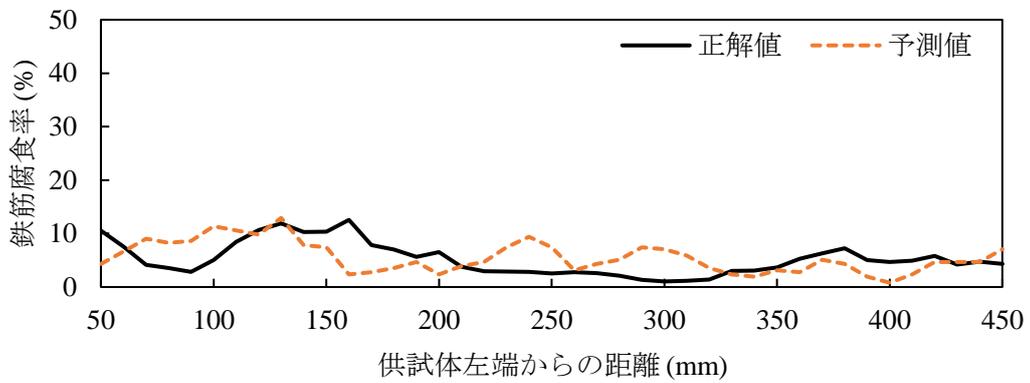


(b-3) R 鉄筋

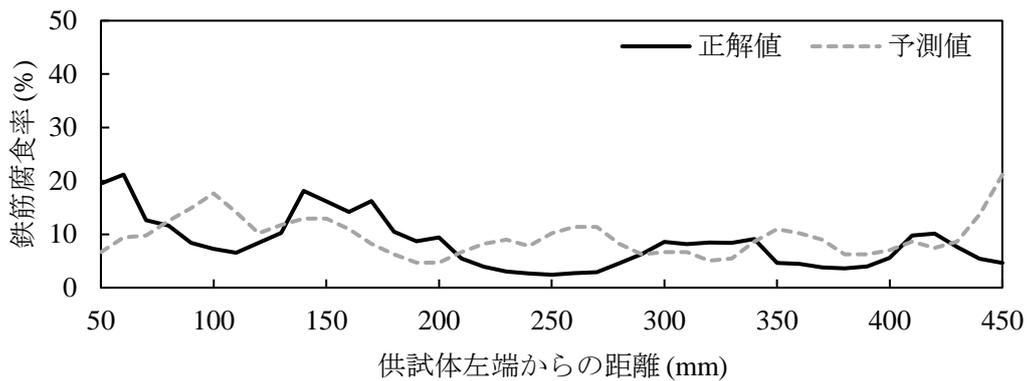
(b) ケース : B1-13-500



(c-1) L 鉄筋



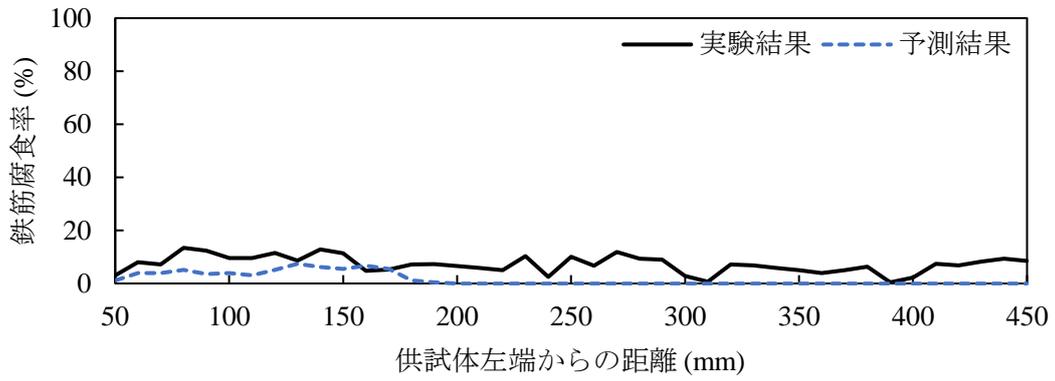
(c-2) C 鉄筋



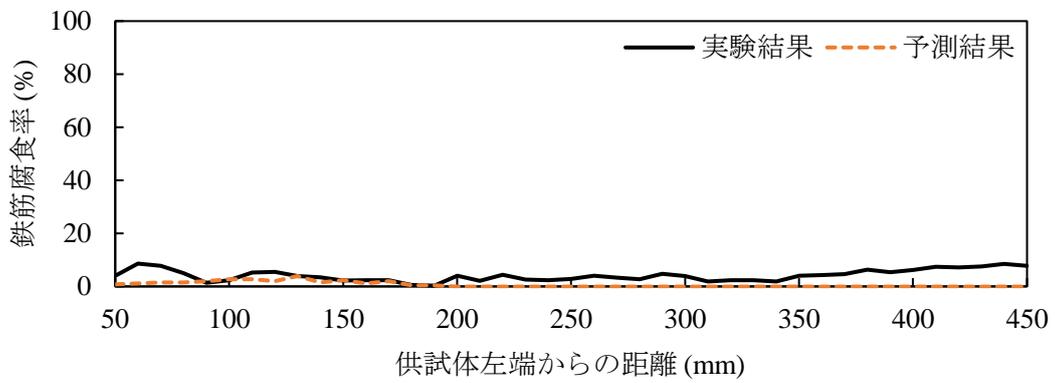
(c-3) R 鉄筋

(c) ケース : B1-19-100

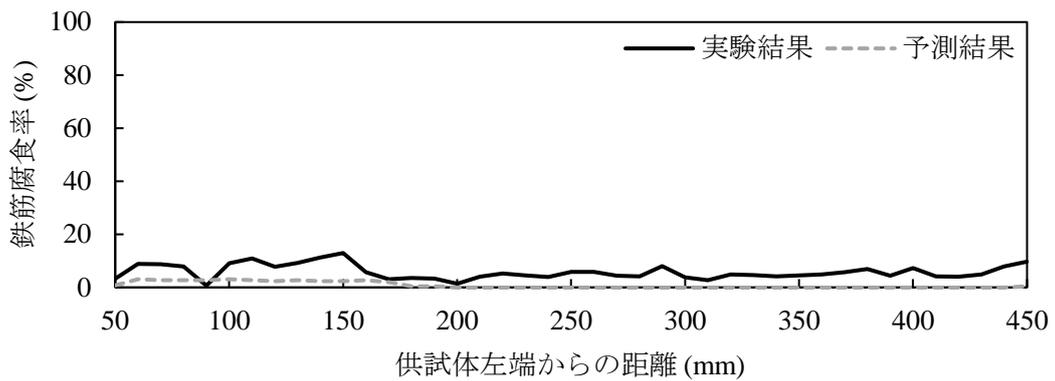
図 5-41 検証用データを用いた pix2pix による鉄筋腐食率分布の予測結果例



(a-1) L 鉄筋

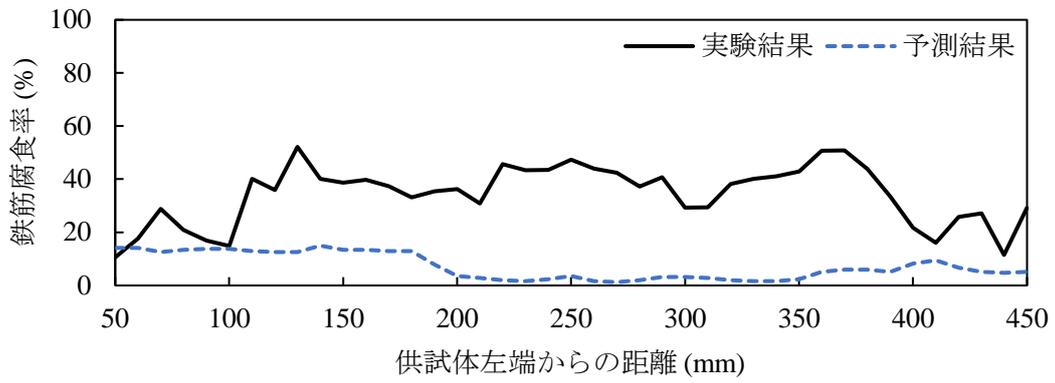


(a-2) C 鉄筋

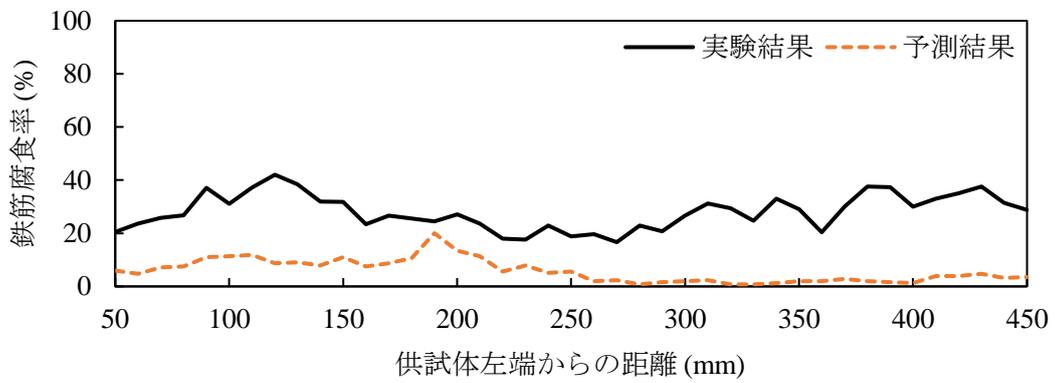


(a-3) R 鉄筋

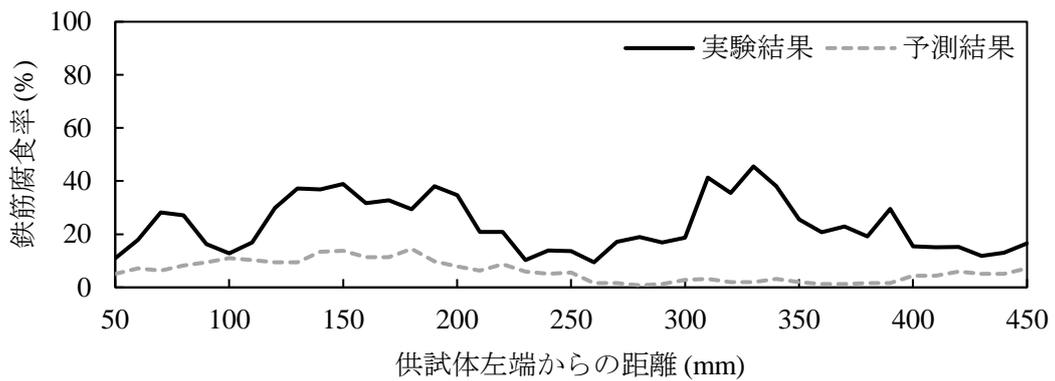
(a) A1-13-100-10



(b-1) L 鉄筋

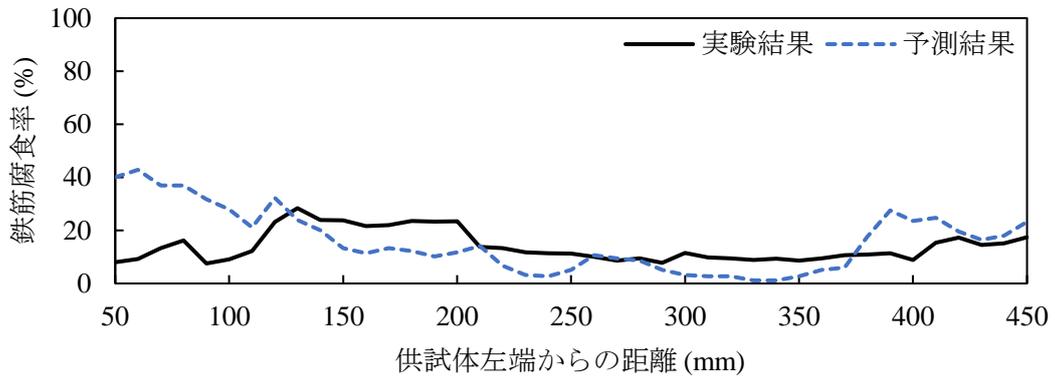


(b-2) C 鉄筋

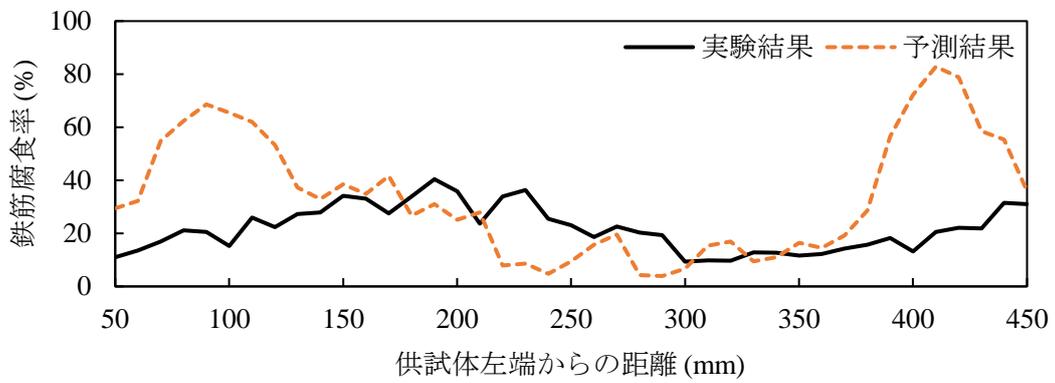


(b-3) R 鉄筋

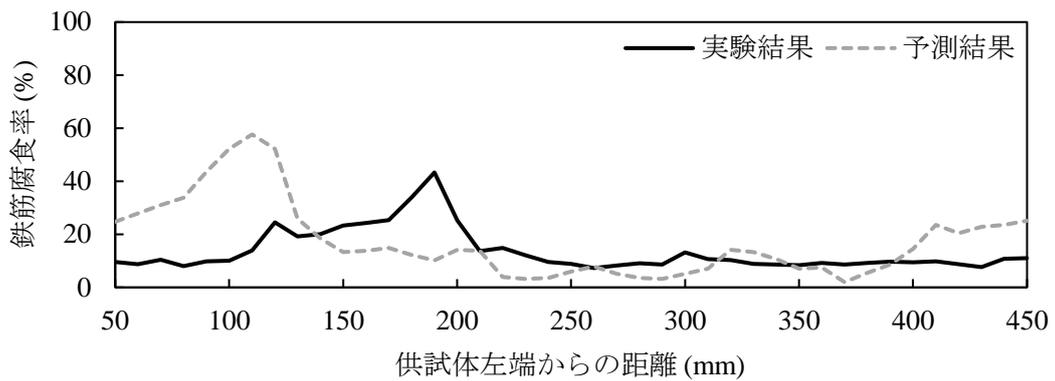
(b) A1-13-100-20



(c-1) L 鉄筋

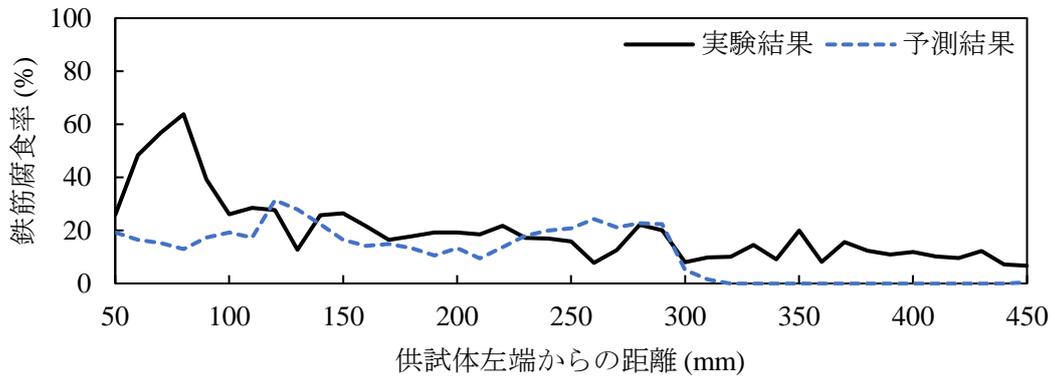


(c-2) C 鉄筋

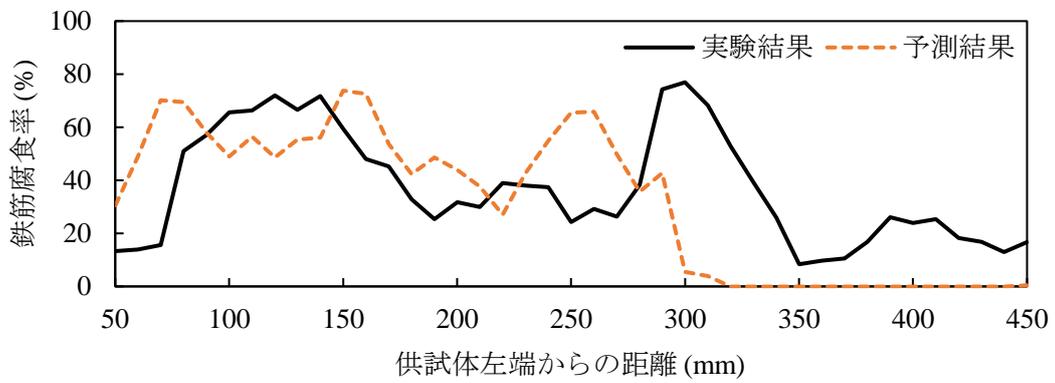


(c-3) R 鉄筋

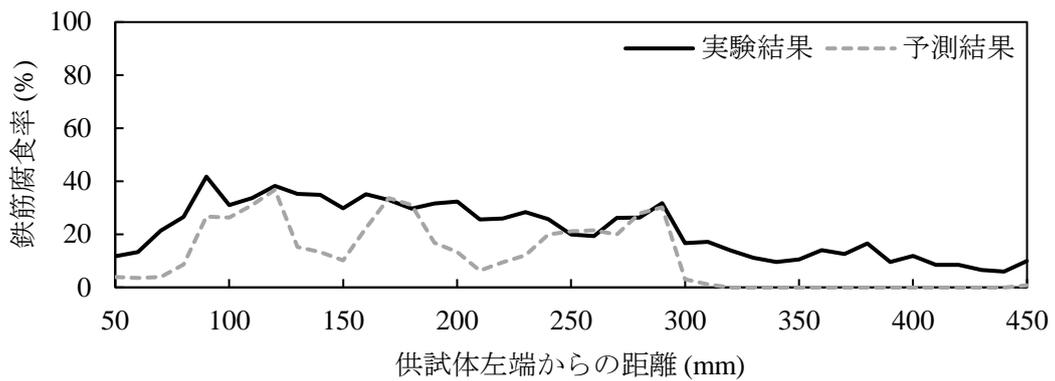
(c) B1-13-500-10



(d-1) L 鉄筋

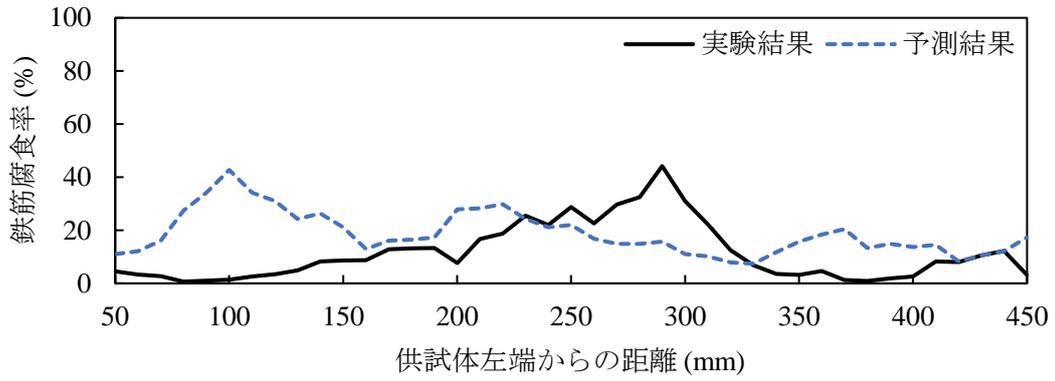


(d-2) C 鉄筋

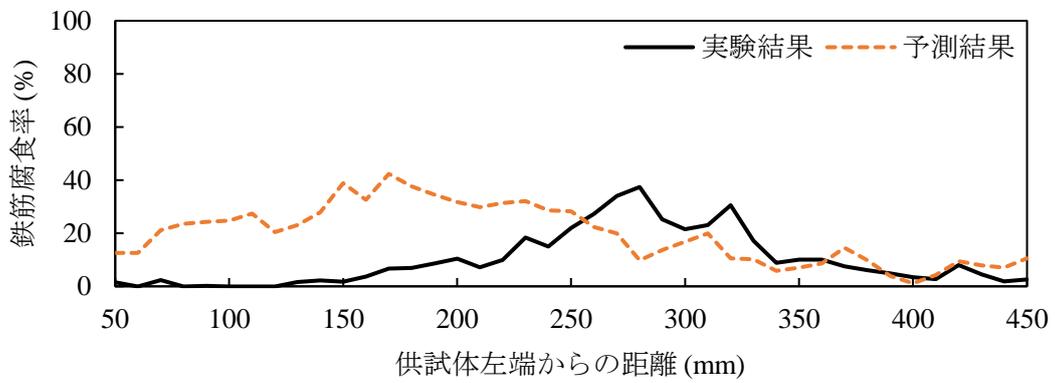


(d-3) R 鉄筋

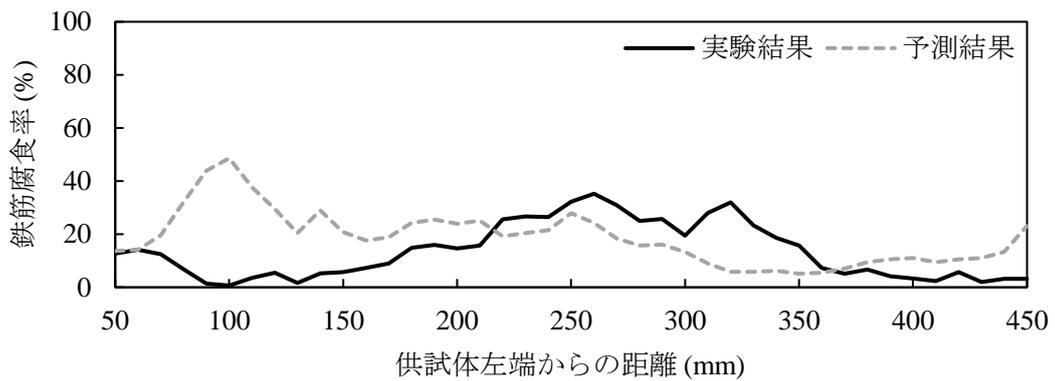
(d) B1-13-500-20



(e-1) L 鉄筋

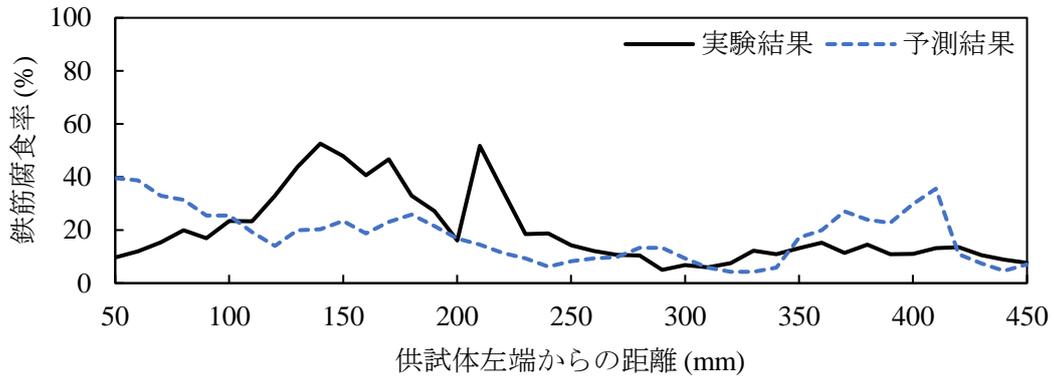


(e-2) C 鉄筋

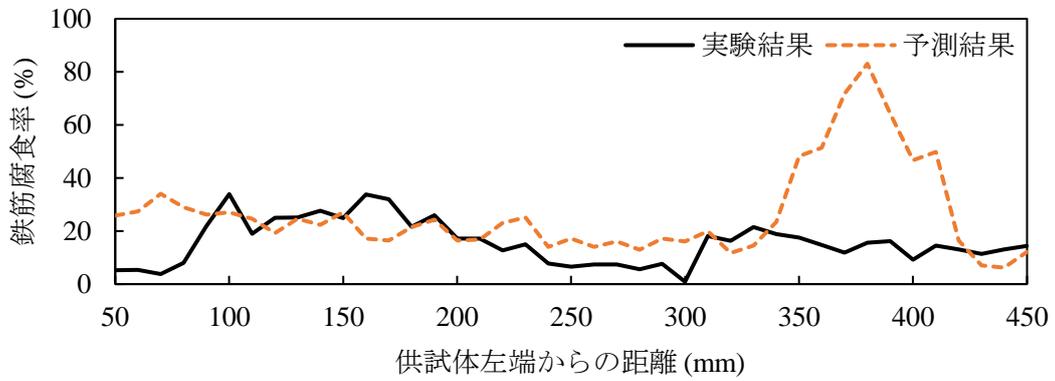


(e-3) R 鉄筋

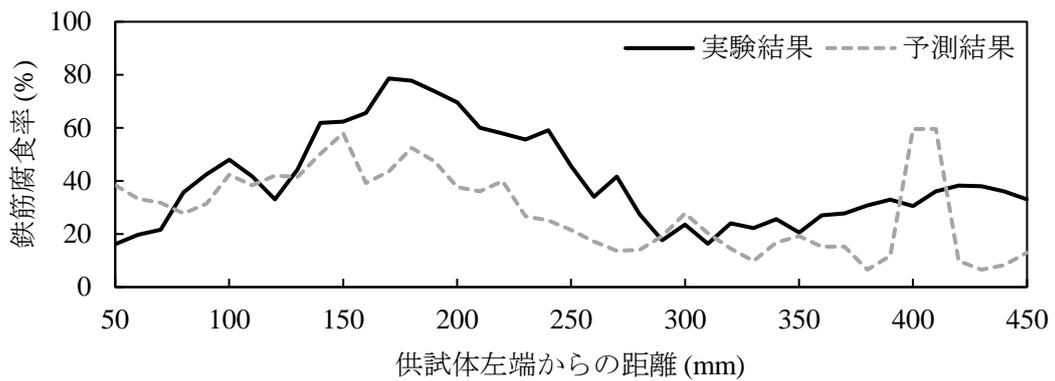
(e) B1-19-100-10



(f-1) L 鉄筋



(f-2) C 鉄筋



(f-3) R 鉄筋

(f) B1-19-100-20

図 5-42 実験結果を用いた pix2pix による鉄筋腐食率分布の予測結果

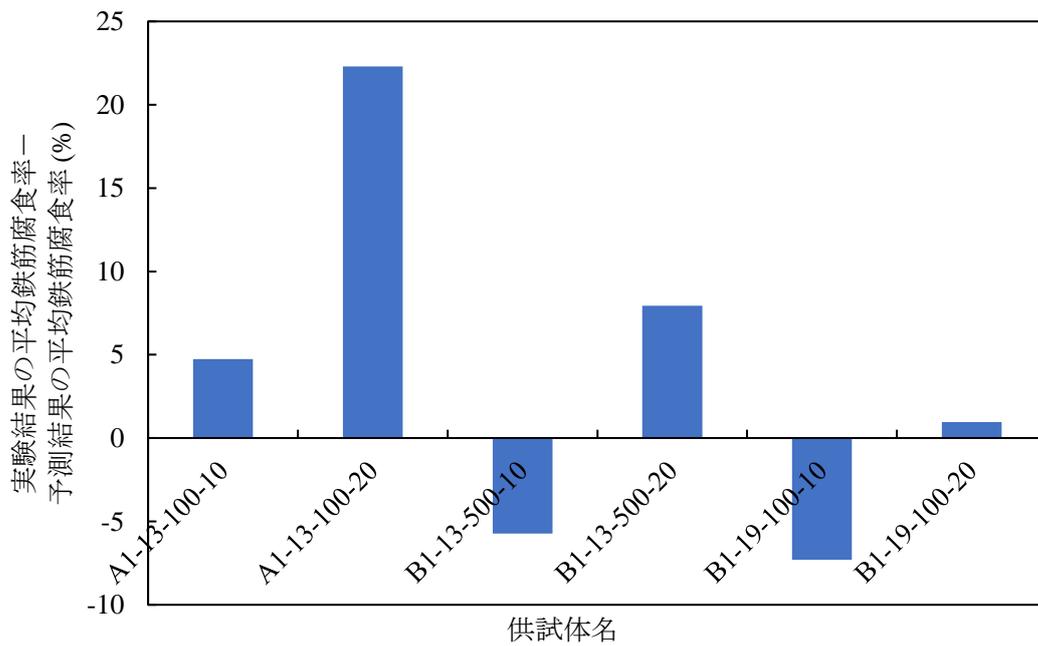


図 5-43 実験結果の平均鉄筋腐食率と予測結果の平均鉄筋腐食率の絶対誤差

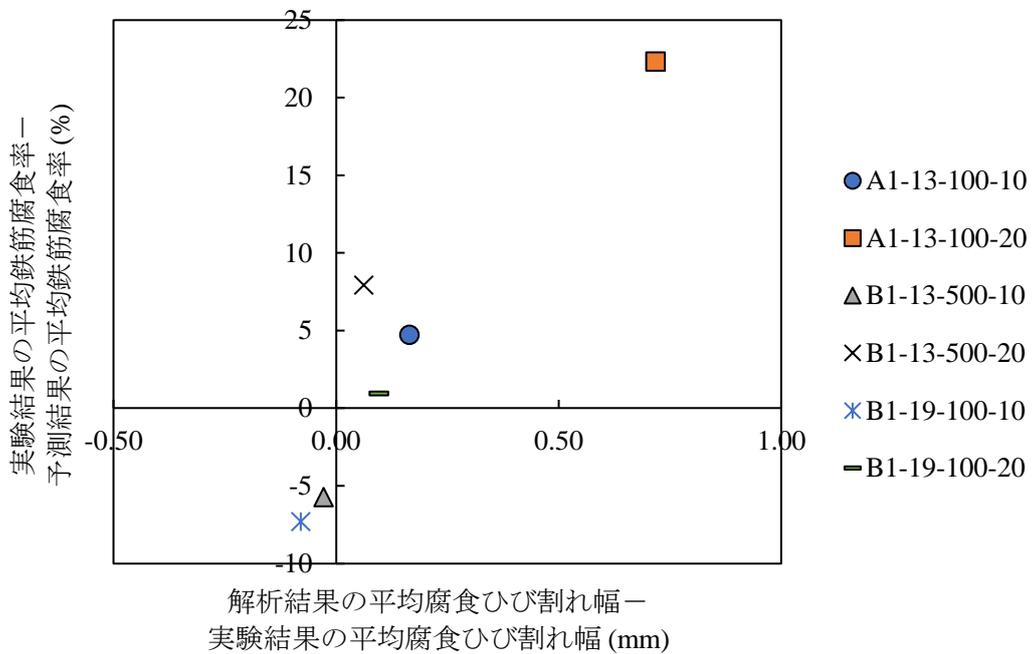


図 5-44 腐食ひび割れ幅の再現解析結果と実験結果の絶対誤差と鉄筋腐食率の実験結果と予測結果の絶対誤差の関係

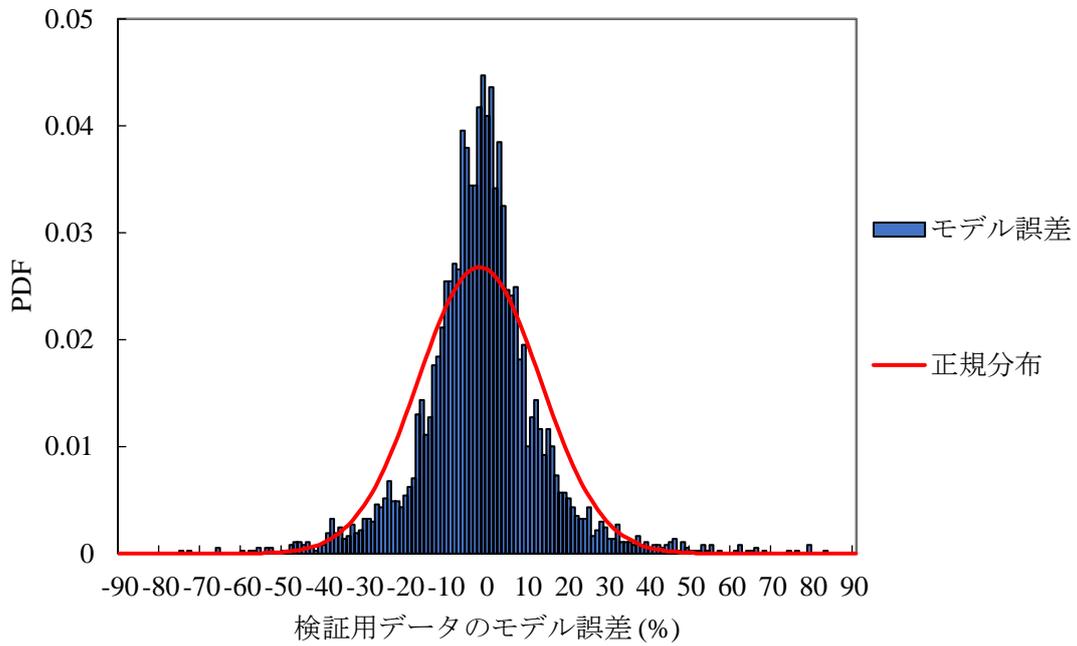


図 5-45 検証用データに対する pix2pix のモデル誤差の PDF

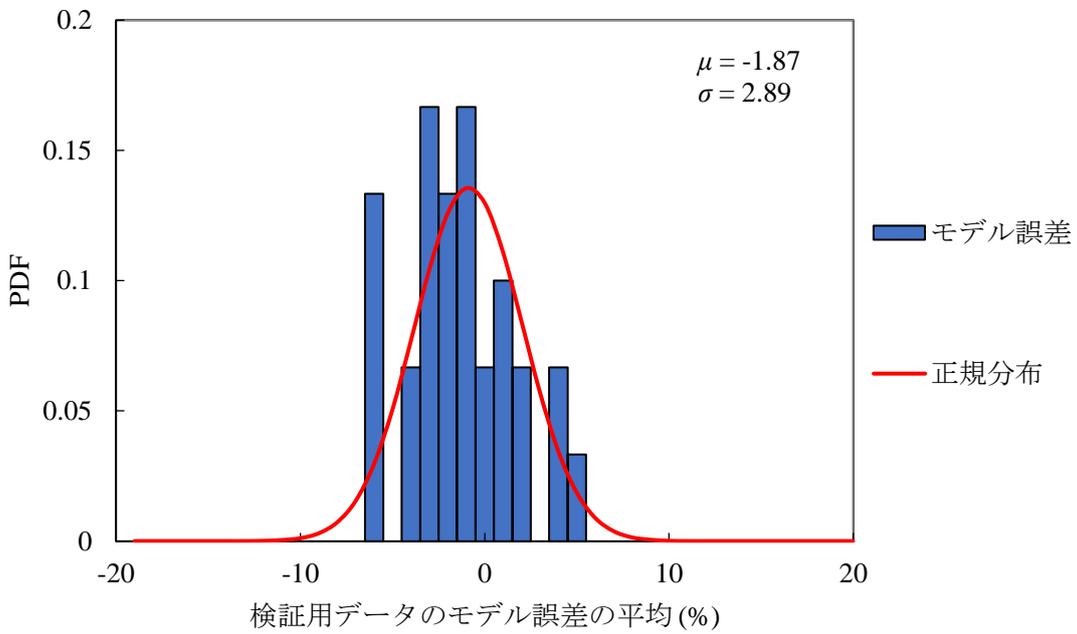


図 5-46 pix2pix のモデル誤差の平均の PDF

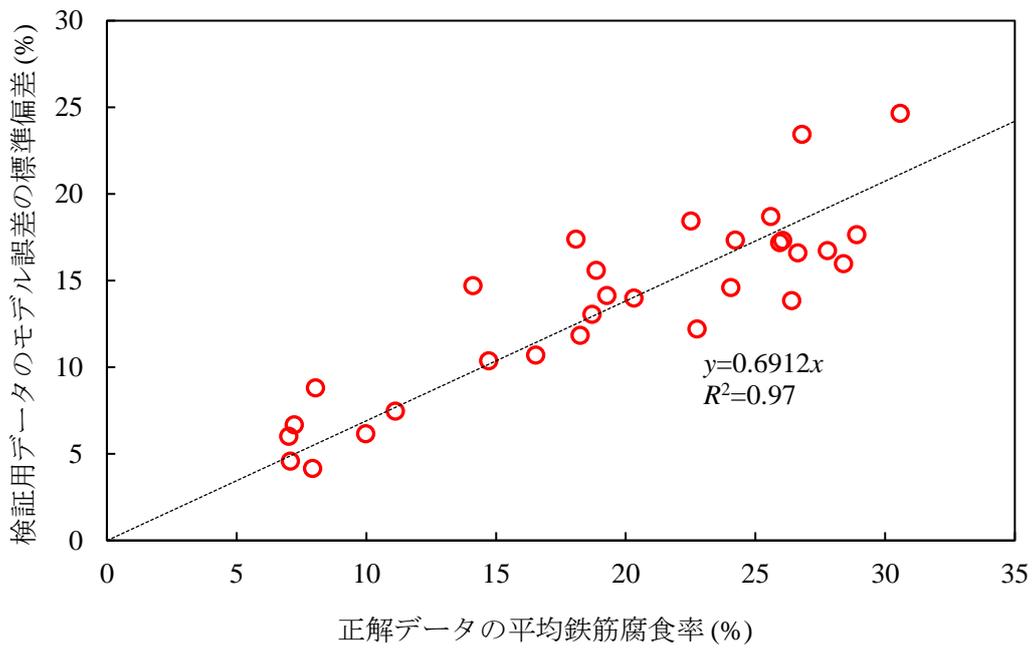


図 5-47 検証用データに対する pix2pix のモデル誤差の標準偏差と正解データの平均鉄筋腐食率の関係

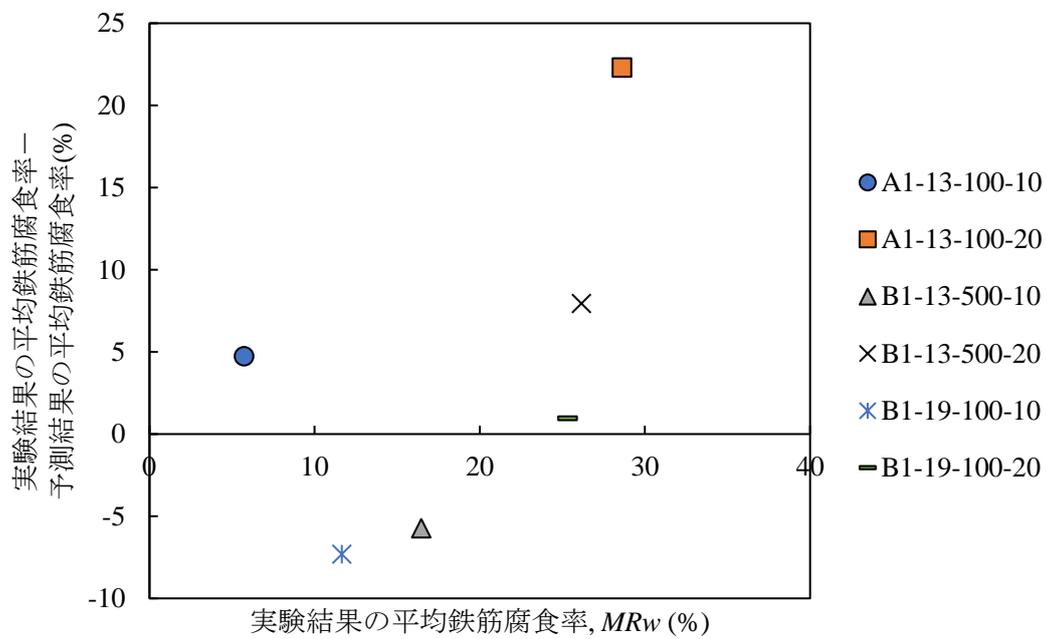


図 5-48 実験結果に対する実験結果と予測結果の平均鉄筋腐食率の絶対誤差

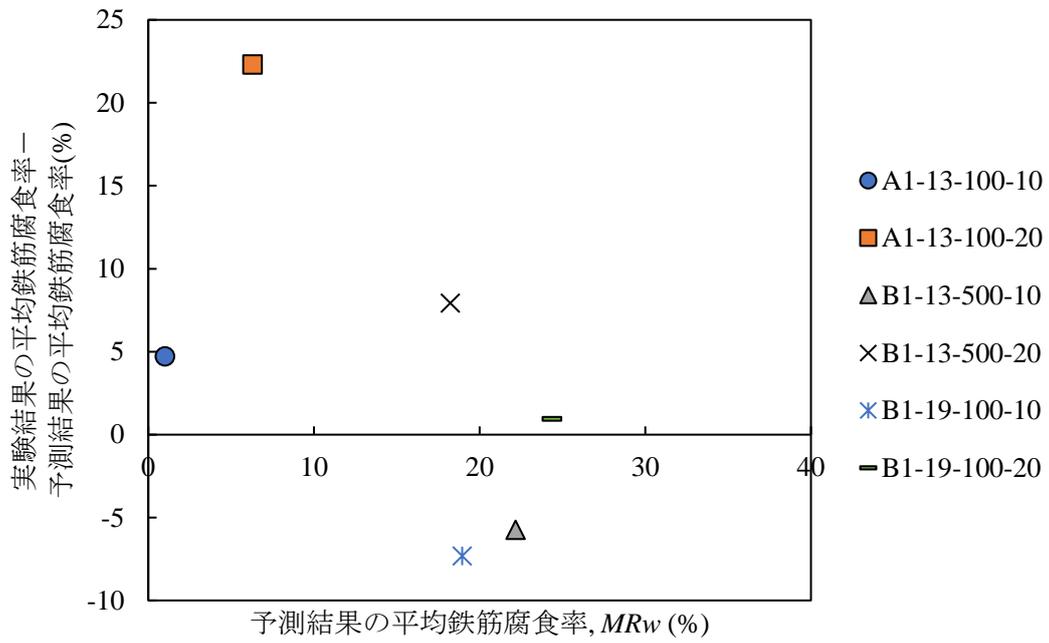


図 5-49 予測結果に対する実験結果と予測結果の平均鉄筋腐食率の絶対誤差

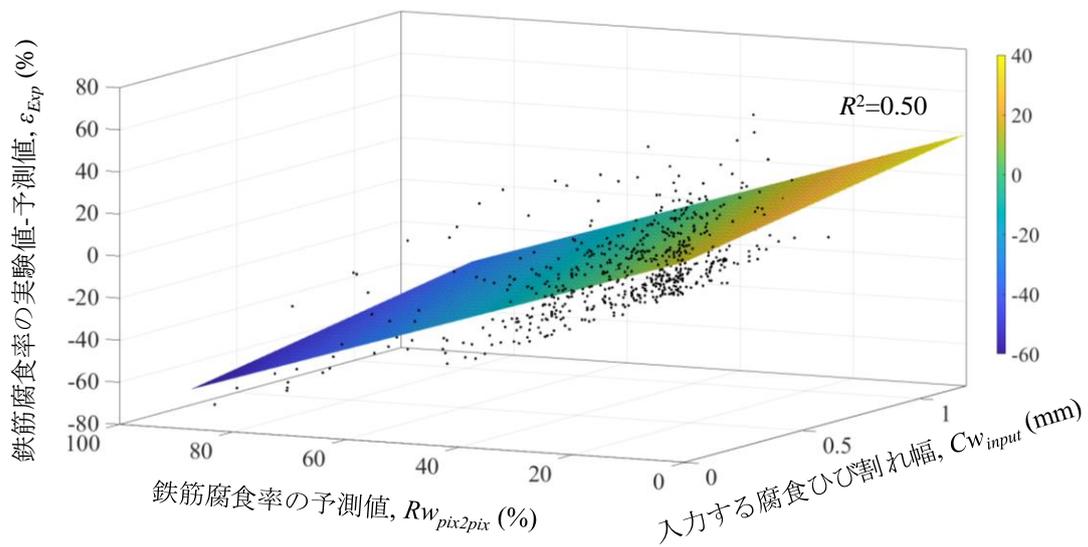


図 5-50 実験結果に対する pix2pix のモデル誤差

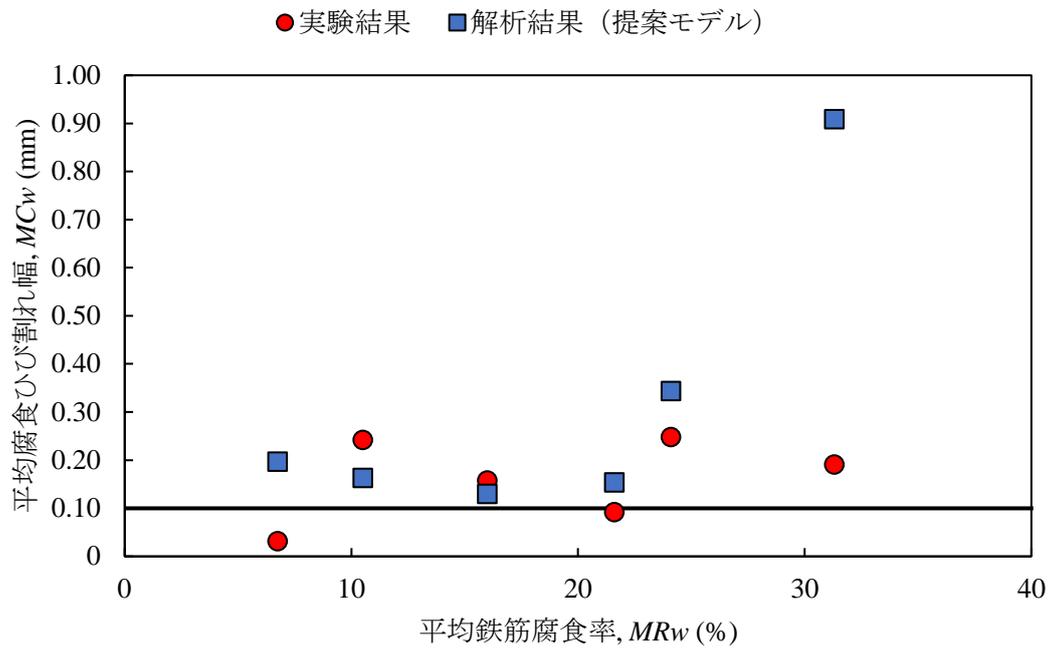
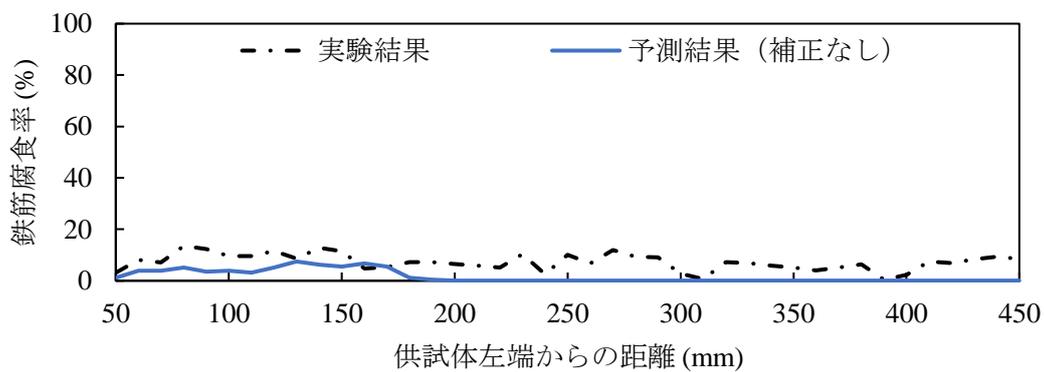
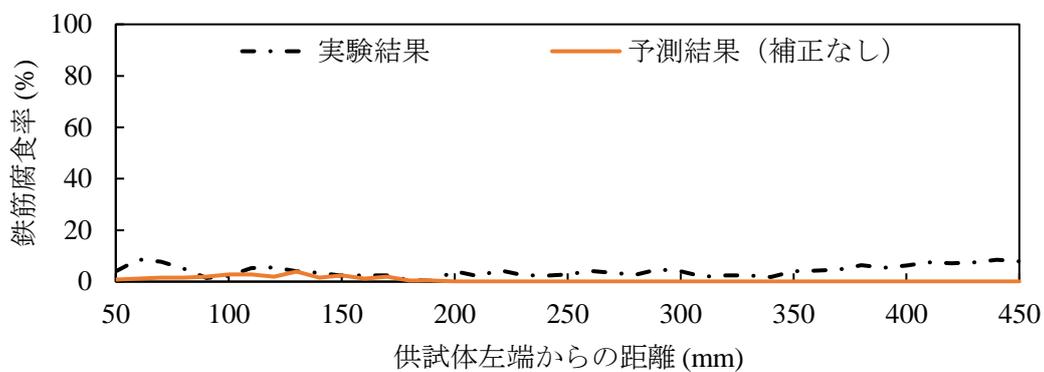


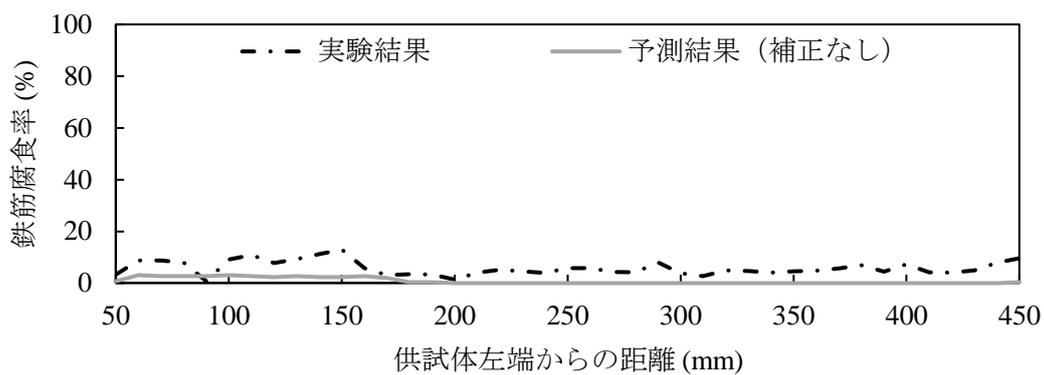
図 5-51 平均鉄筋腐食率と平均腐食ひび割れ幅の関係



(a-1) L 鉄筋

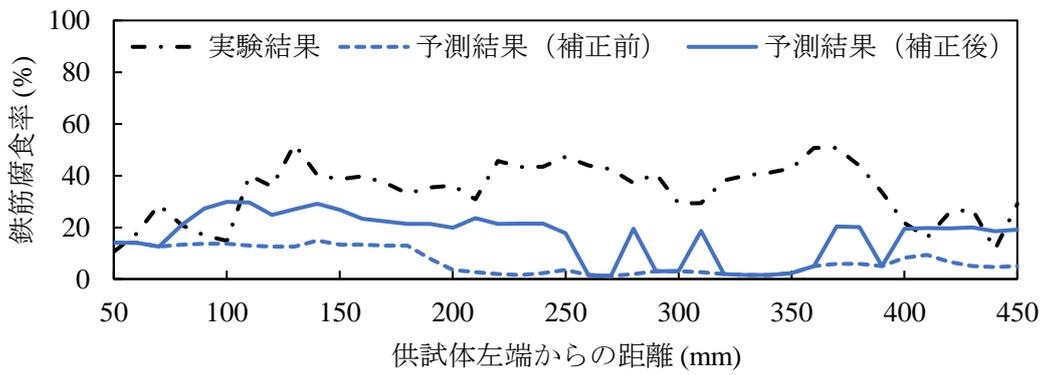


(a-2) C 鉄筋

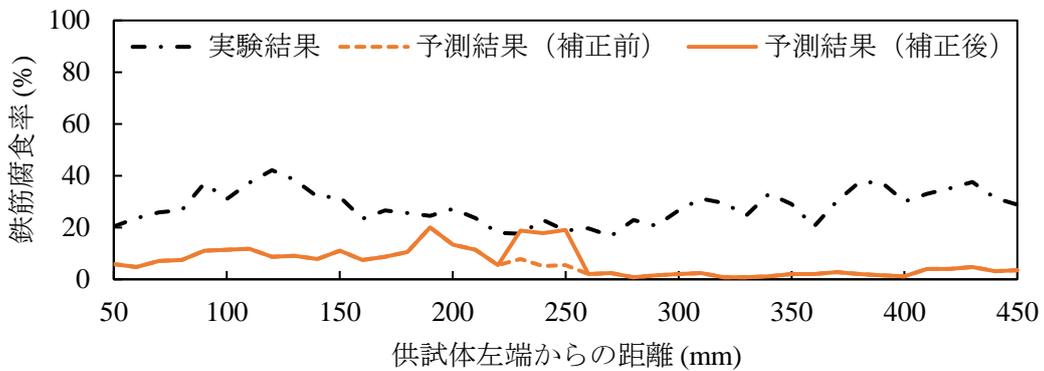


(a-3) R 鉄筋

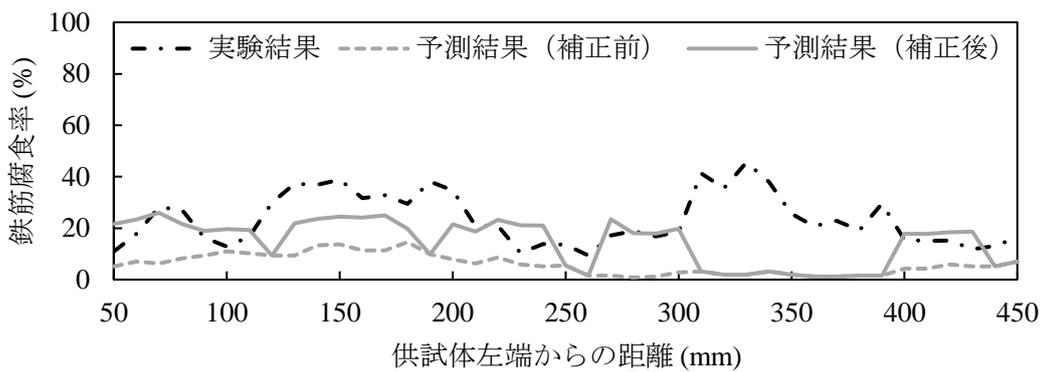
(a) A1-13-100-10



(b-1) L 鉄筋

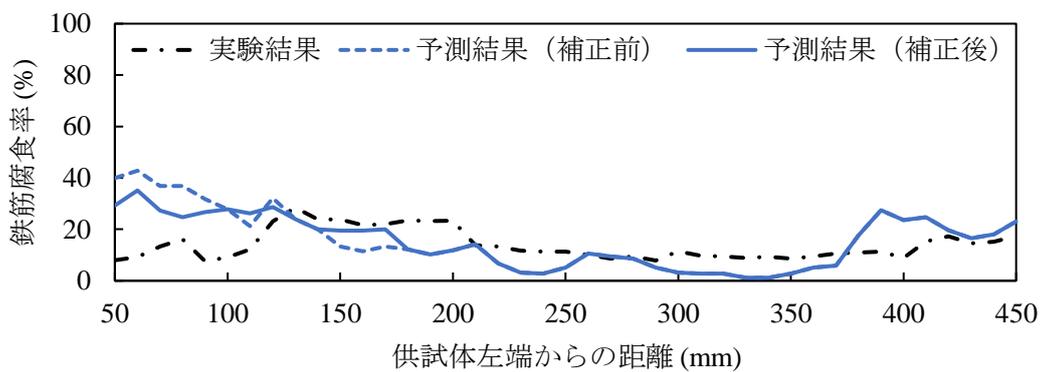


(b-2) C 鉄筋

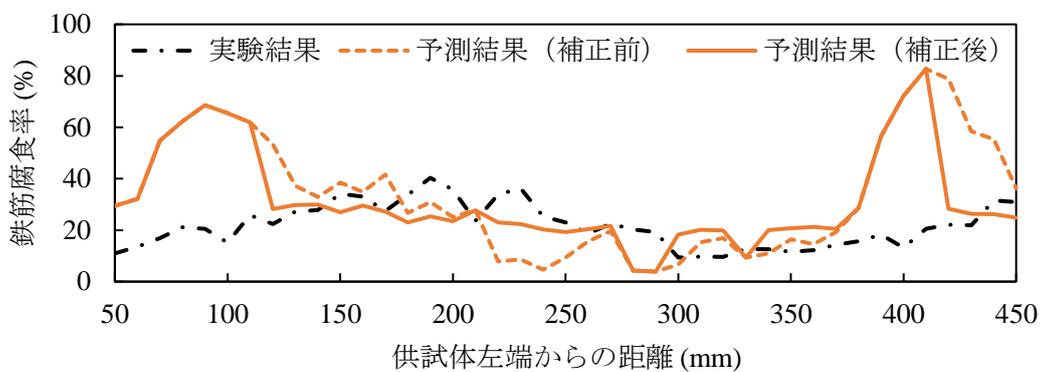


(b-3) R 鉄筋

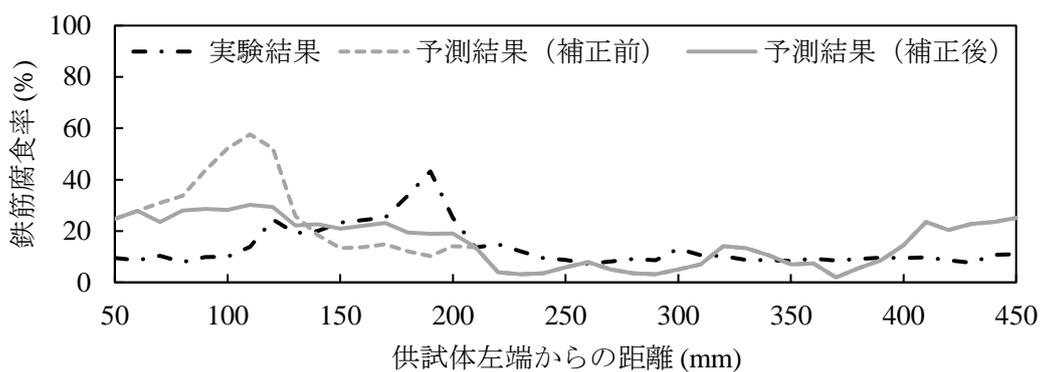
(b) A1-13-100-20



(c-1) L 鉄筋

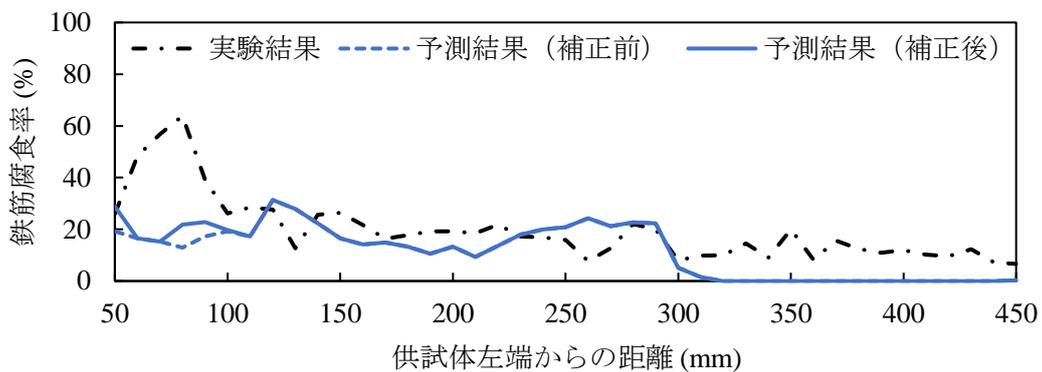


(c-2) C 鉄筋

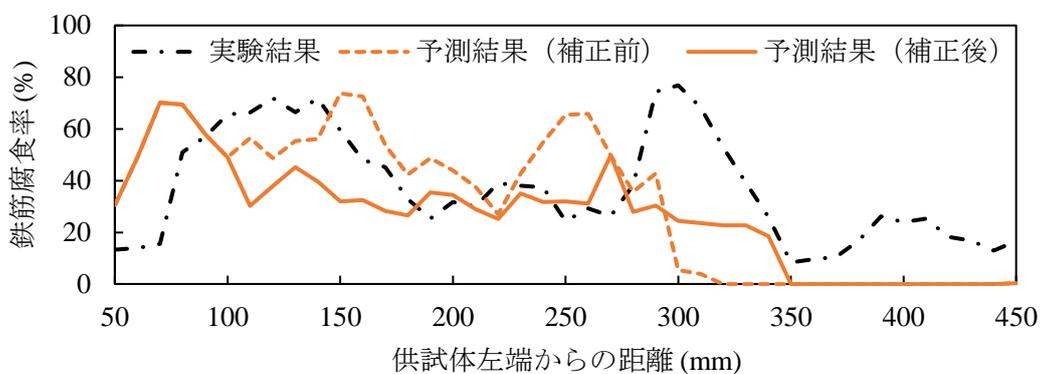


(c-3) R 鉄筋

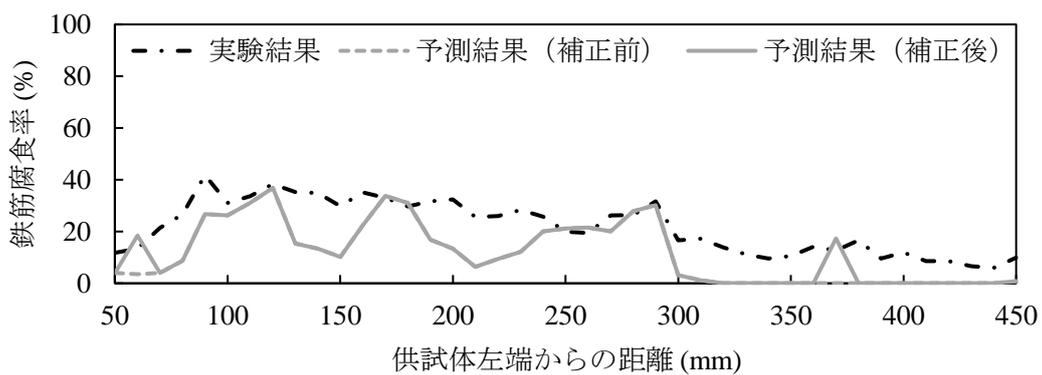
(c) B1-13-500-10



(d-1) L 鉄筋

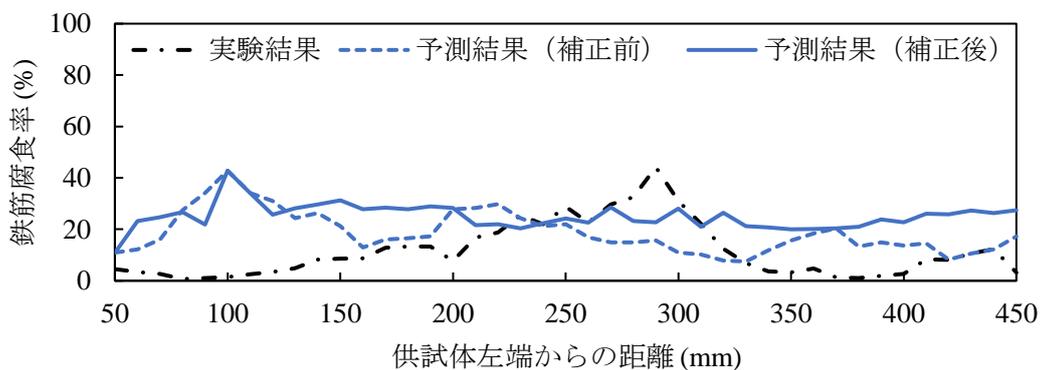


(d-2) C 鉄筋

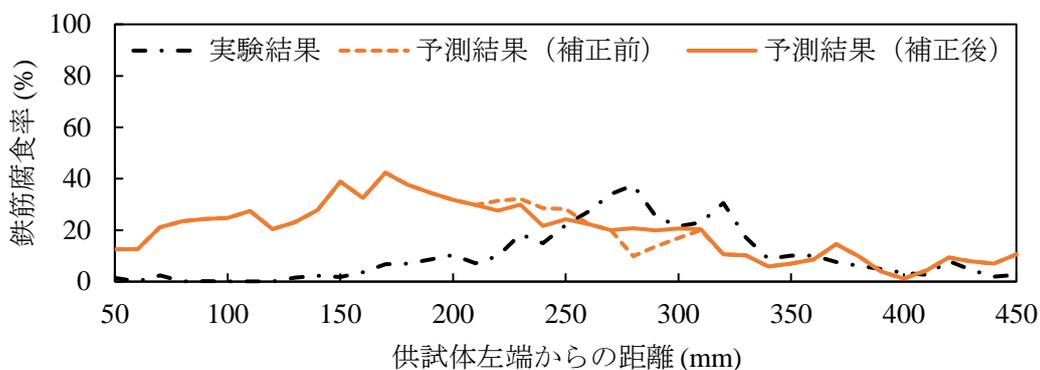


(d-3) R 鉄筋

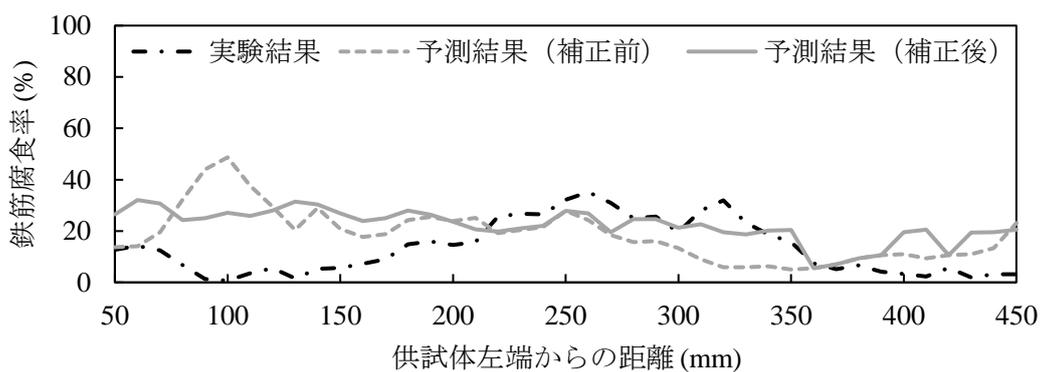
(d) B1-13-500-20



(e-1) L 鉄筋

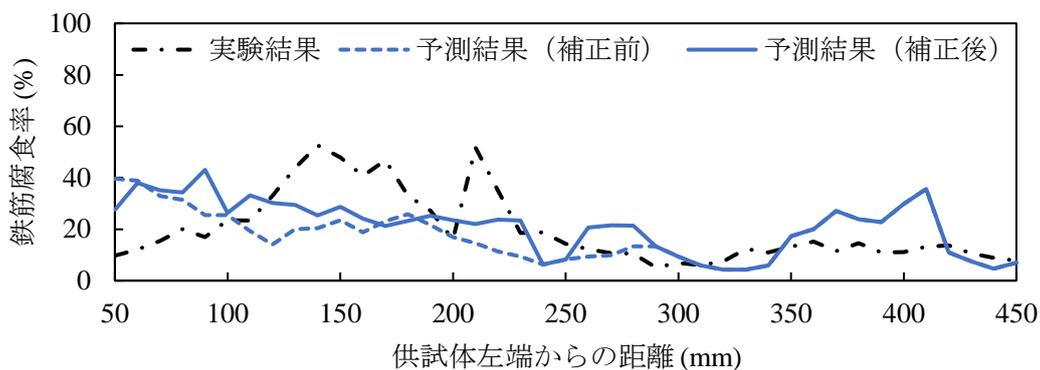


(e-2) C 鉄筋

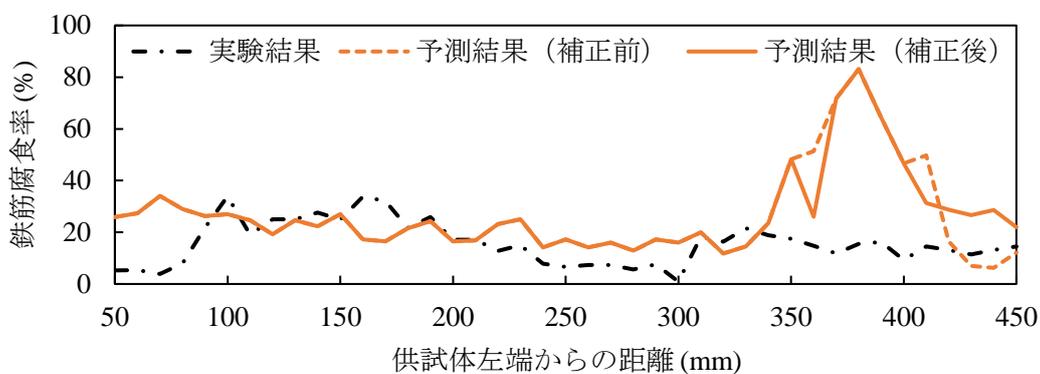


(e-3) R 鉄筋

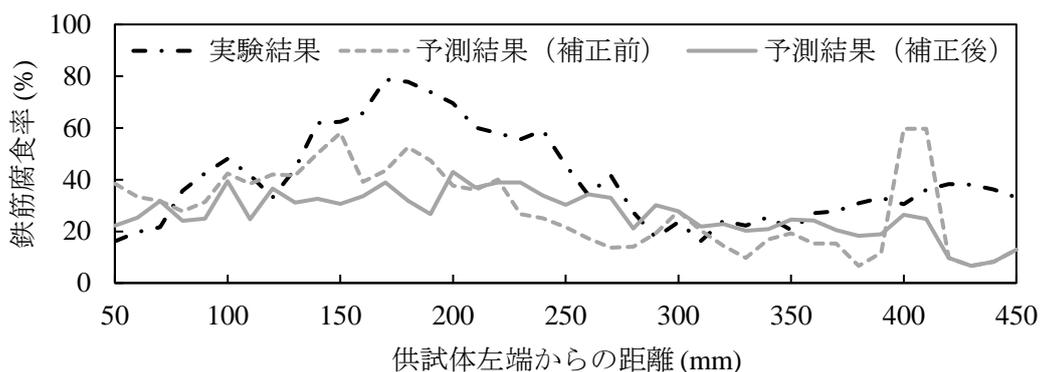
(e) B1-19-100-10



(f-1) L 鉄筋



(f-2) C 鉄筋



(f-3) R 鉄筋

(f) B1-19-100-20

図 5-52 実験結果に対する pix2pix のモデル誤差を用いて補正した鉄筋腐食率分布

## 6. モンテカルロシミュレーションを用いた劣化 RC 部材の確率論的耐荷力推定

### 6.1 概説

本章では、図 3-1 に示したフローのVにあたる、モンテカルロシミュレーション (MCS) を用いた劣化 RC 部材の確率論的耐荷力評価を行う。本研究の目的は、観測された腐食ひび割れ幅情報から RC 部材の耐荷力評価を行うことであるが、本章はその詳細なフローを提示し、ケーススタディとして大型 RC はりの実験で得られた腐食ひび割れ幅情報を用いて耐荷力を推定する。本研究では、4. の実験的な調査に基づき、5. で機械学習用のデータベースを作成し、機械学習の pix2pix モデルの構築を行った。その結果として、得られた腐食ひび割れ幅分布から 2 次元の鉄筋腐食率分布を推定できる pix2pix モデルと信頼性理論を用いると、観測情報である腐食ひび割れ幅から劣化 RC 部材の耐荷力を評価することができる。耐荷力推定の計算手順を図 6-1 に示す。

また、ケーススタディ (6.4) では、ドローンによって撮影された腐食ひび割れ幅を用いて推定した耐荷力分布と近接撮影によって撮影された腐食ひび割れ幅を用いて推定した耐荷力分布を比較し、腐食ひび割れ幅の撮影方法や測定精度の違いが耐荷力推定に及ぼす影響を調査した。

### 6.2 耐荷力推定の計算手順

#### 6.2.1 腐食ひび割れ幅の取得

本研究では、腐食ひび割れ幅を用いて RC 部材の耐荷力を推定するため、劣化 RC 部材に生じた腐食ひび割れ幅を取得する必要がある。既往研究では、近接撮影によって腐食ひび割れ幅分布を取得していたが、実際の RC 構造物に対する近接撮影は、時間や手間がかかるだけでなく、人が立ち入るのが困難な場所では撮影すること自体が困難である。そこで、本研究では、ドローンを用いて腐食ひび割れ幅を取得した。ドローンによるひび割れ画像の撮影方法および腐食ひび割れ幅の測定方法は 4.4.2.1 に示す通りである。

#### 6.2.2 pix2pix を用いた鉄筋腐食率の予測

RC はり底面で観測された腐食ひび割れ幅分布、軸方向鉄筋の間隔および鉄筋径の情報から、pix2pix モデルを用いて部材内部に存在する軸方向鉄筋の鉄筋腐食率分布を推定する。

5.9 に示した通り、pix2pix の鉄筋腐食率予測にはモデル誤差が伴う。検証用データに対する pix2pix のモデル誤差および実験結果に対する pix2pix のモデル誤差を考慮することで、与えられた腐食ひび割れ幅分布から生じる可能性のある鉄筋腐食率分布群を多数作成する。

まず、5.9.1 で定量化した検証用データに対する pix2pix のモデル誤差を考慮する。pix2pix により推定された各位置での鉄筋腐食率  $R_{w_{pix2pix}}$ 、検証用データから定めたモデル誤差  $\varepsilon_{Test}$  を考慮した各位置での鉄筋腐食率  $R_{w_1}$  は以下の式で表せる。

$$R_{w_1} = R_{w_{pix2pix}} + \varepsilon_{Test} \quad (7-1)$$

次に、5.9.2 で定量化した実験結果に対する pix2pix のモデル誤差を考慮する。検証用データに対する pix2pix のモデル誤差を考慮した各位置で鉄筋腐食率  $R_{w_1}$  を用いて、実験結果から定めたモデル誤差  $\varepsilon_{Exp}$  を考慮した各位置での鉄筋腐食率  $R_{w_2}$  は以下の式で表せる。

$$R_{w_2} = R_{w_1} + \varepsilon_{Exp} \quad (7-2)$$

なお、検証用データから定めたモデル誤差  $\varepsilon_{Test}$  と実験結果から定めたモデル誤差  $\varepsilon_{Exp}$  は独立としている。

ケーススタディでは、1つの予測された鉄筋腐食率分布から 50 個の鉄筋腐食率分布群を作成した。

### 6.2.3 3次元非線形有限要素解析を用いた耐荷力の計算

3次元 Non-FEA を用いて、6.2.2 で作成した機械学習に伴うモデル誤差を考慮した鉄筋腐食率分布群から RC はりの降伏荷重を求める MCS を行う。この際、Non-FEA の降伏荷重の算出に伴うモデル誤差  $\varepsilon_{FE}$  を考慮して、降伏荷重の確率密度分布を更新する。

$$P' = P \cdot \varepsilon_{FE} \quad (7-3)$$

ケーススタディでは、1つの降伏荷重  $P$  に対して 2000 個のモデル誤差  $\varepsilon_{FE}$  を発生させ、式(7-3)を用いて降伏荷重  $P'$  を求めた。その結果、100000 個の降伏荷重からなる確率密度分布 (PDF) が最終結果として得られた。なお、鉄筋腐食率予測に伴う pix2pix のモデル誤差  $\varepsilon_{Test}$  および  $\varepsilon_{Exp}$  と Non-FEA の降伏荷重算出に伴うモデル誤差  $\varepsilon_{FE}$  は独立としている。

次節では、図 6-1 の(4)に必要な Non-FEA のモデル誤差  $\varepsilon_{FE}$  を定量化するため、4.4.3 の曲げ載荷実験の再現解析を行う。

## 6.3 3次元非線形有限要素解析による劣化 RC 部材の荷重-変位関係の再現

### 6.3.1 解析モデル

腐食劣化した RC 部材の曲げ載荷実験を再現する 3次元 Non-FE モデルの概要を示す。なお、本研究の Non-FEA には DIANA FEA 社の汎用非線形構造解析システム DIANA10.5 が用いられる。腐食した鉄筋が複数配筋される RC はりの場合、2次元よりも3次元の Non-FEA

を用いた方が軸直角方向の鉄筋腐食率のばらつきを考慮して構造性能を精度良く評価できることが報告されている<sup>6-1)</sup>ため、本研究でも3次元 Non-FEA モデルを用いることとした。

図 6-2 に Non-FE モデルの概要を示す。コンクリート要素は部材軸方向に幅が 50mm、部材軸直角方向と部材高方向も幅がおおよそ 50mm となるように要素分割を行い、8 節点ソリッド要素が適用される。Lim et al.<sup>6-2)</sup>を参考に、腐食区間のかぶりコンクリートのみ劣化コンクリート要素とし、それ以外は健全なコンクリート要素として、それぞれ 5.4.1 や 5.4.2 の健全時および劣化時のコンクリートの構成則が用いられる。また、コンクリート要素のひび割れモデルには回転ひび割れモデルを用いた。軸方向鉄筋要素は、RC はり左端から 2500mm～3500mm の位置では部材軸方向に幅が 10mm となるように要素分割を行い、0～2500mm、3500mm～6000mm はそれぞれ 1 つの要素とした。付着すべり埋め込み鉄筋要素が適用され、鉄筋とコンクリートとの間の付着が考慮される。構成則は 5.4.3 で示したものが用いられる。スターラップ要素は埋め込み鉄筋要素が適用される。載荷点位置および支持点位置では局所的な応力集中が発生することを防ぐという観点から鋼製プレート要素を用いている。8 節点ソリッド要素が適用され、剛性は一定であるとした。

Non-FE モデル上では、軸方向鉄筋要素の断面積の減少と付着劣化、劣化コンクリート要素の材料特性の変化によって腐食が表現される。腐食の空間変動性は、実験で得られた鉄筋腐食率分布もしくは機械学習モデルによって予測された鉄筋腐食率分布に対応するように、各位置での軸方向鉄筋の断面積を変化させることで表現するものとした。RC はり左端から 2800～3200mm の位置で 10mm に分割した 41 要素には、各鉄筋要素に鉄筋腐食率に応じた断面積を与えた。また、鉄筋要素の付着劣化は各鉄筋の平均鉄筋腐食率に依存するとし、同一鉄筋内では材料特性は同一であるとした。腐食による劣化コンクリート要素の材料特性の変化は供試体全体の平均鉄筋腐食率に依存するとし、供試体内で材料特性は同一であるとした。

載荷方法は、2 点載荷 2 点支持とし、載荷点位置において 1 ステップあたり鉛直方向 0.1mm ずつの変位漸増で荷重がかけられる。また、スパン中央から両側 200mm に位置する載荷点および供試体両端から 250mm に位置する支持点において部材高方向に固定し、片側の支持点のみ部材軸方向にも固定した。

### 6.3.2 実験結果との比較

6.3.1 で述べた 3 次元 Non-FE モデルを用いて、曲げ載荷実験の再現解析を行った結果を図 6-3 に示す。表 6-1 に降伏荷重の実験結果と再現解析結果の比較を示す。ここで、再現

解析における降伏荷重は、3本の軸方向鉄筋を分割した軸方向鉄筋要素のうち、1個でも降伏ひずみに達したステップでの荷重とした。すなわち、全ての鉄筋の降伏ではなく、1本目の鉄筋の降伏を降伏荷重の基準とした。表 6-1 をみると、再現解析の降伏荷重は実験結果に近い値をとっており、実験の降伏挙動を精度よく再現できていることが確かめられた。一方で、2つの値は完全には一致していない。すなわち、Non-FE モデルには降伏荷重算出に伴うモデル誤差が存在しているといえる。そのため、耐荷力を評価する際には、このモデル誤差を考慮する必要がある。この詳細は 6.3.3 に示す。

降伏荷重を精度よく再現できた一方、変形能に関しては実験結果を適切に再現できていない点があった。終局時にコンクリートの圧壊が生じた C1 と C2 に関しては、変形能が過小評価される傾向にあった。また、終局時に軸方向鉄筋が破断した C4 に関しては、再現解析では明確な荷重の低下が見られなかった。そのため、本解析モデルでは鉄筋の破断を上手く再現できていない可能性がある。このような終局時の挙動の再現に関しては今後の課題となる。

### 6.3.3 3次元非線形有限要素解析に介在するモデル誤差の定量化

6.3.2 で述べた通り、降伏荷重の再現解析結果は実験結果と完全には一致しない。そのため、耐荷力評価を行う際には、Non-FEA で算出された降伏荷重に対して、式(7-4)を用いて Non-FEA のモデル誤差  $\varepsilon_{FE}$  を考慮する必要がある。そこで本項では、実験結果と再現解析結果を用いて、Non-FEA のモデル誤差の定量化を行う。

本研究では、Non-FEA のモデル誤差  $\varepsilon_{FE}$  を以下の式で定義する。

$$\varepsilon_{FE} = P_{Exp} / P_{FE} \quad (7-4)$$

ここで、 $P_{Exp}$  は実験の降伏荷重、 $P_{FE}$  は再現解析の降伏荷重を表す。表 6-1 に Non-FEA のモデル誤差を示した。本研究では、Non-FEA のモデル誤差  $\varepsilon_{FE}$  は正規分布に従うと仮定した。したがって、以下の式で表せる。

$$\varepsilon_{FE} = \mu_{FE} + \sigma_{FE} \cdot r \quad (7-5)$$

ここで、 $\mu_{FE}$  はモデル誤差の平均、 $\sigma_{FE}$  は標準偏差、 $r$  は正規乱数を表す。表 6-1 の値から求めたモデル誤差の平均  $\mu_{FE}$  と標準偏差  $\sigma_{FE}$  を表 6-2 に示す。

## 6.4 ケーススタディ

### 6.4.1 想定する構造諸元と腐食ひび割れ情報

本節では、図 6-1 のフローに従い、与えられた RC はりの腐食ひび割れ幅分布から耐荷力を推定するケーススタディを行う。ケーススタディでは、実験で得られた腐食ひび割れ幅分布および構造諸元（細目）を与条件とし、フローに従って pix2pix, Non-FEA, MCS 等を用いて確率密度分布の形で RC はりの耐荷力を評価する。この結果と実験結果の降伏荷重を比較することにより、本研究の提案する腐食劣化 RC はりに対する耐荷力評価手法の有用性を示すことを試みる。

ケーススタディで想定する 3 つの RC はりは、4.2.2 の実験供試体と同様の構造諸元（細目）と腐食ひび割れ幅分布を持つとし、ケース名には実験供試体名をそれぞれ用いる。各ケースで与条件となる腐食ひび割れ幅分布は、近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅分布とドローンにより得られた腐食ひび割れ幅分布をそれぞれ使用する。各撮影方法で得られた腐食ひび割れ幅分布から推定される耐荷力分布を実験結果の降伏荷重と比較することで、撮影方法の違いが耐荷力推定に及ぼす影響について考察する。

ケース名および与条件となる構造諸元（細目）を表 6-3 に、ケース 1 の RC はり C2 で観測された腐食ひび割れ幅分布を図 6-4 に、ケース 2 の RC はり C3 で観測された腐食ひび割れ幅分布を図 6-5 に、ケース 3 の RC はり C4 で観測された腐食ひび割れ幅分布を図 6-6 に示す。また、RC はりの寸法や物性値は実験と同様であるとし、寸法等は図 4-4 の側面図および図 4-3 の断面図に示される値、コンクリートの物性値は表 4-8 の載荷日における圧縮強度、鉄筋の物性値は表 4-9 の値を用いる。これらの値を Non-FEA モデルの構成則等に使用した。

### 6.4.2 解析結果および考察

#### 6.4.2.1 ドローンによる撮影画像を用いた耐荷力推定

図 6-1 に示した耐荷力評価フローの(1)を行い、ドローン撮影 (Skydio) で得られた腐食ひび割れ幅分布と構造諸元（細目）を与条件として、pix2pix モデルにより予測された鉄筋腐食率分布を図 6-7 に示す。実験値の鉄筋腐食率分布と比較すると、すべての供試体で過小に予測される結果となった。これは、Skydio で得られた腐食ひび割れ幅が小さいため、鉄筋腐食率の予測値が小さくなったと考えられる。Skydio による撮影では、腐食ひび割れ幅を計測できていない領域が多く、その部分では、鉄筋腐食率が 0%程度の予測となっている。

次に、ドローン撮影（ANAFI）で得られた腐食ひび割れ幅分布と構造諸元（細目）を与条件として、pix2pix モデルにより予測された鉄筋腐食率分布を図 6-8 に示す。実験値の鉄筋腐食率分布と比較すると、すべての供試体で過小に予測される結果となった。Skydio の場合と同様に、ANAFI で得られた腐食ひび割れ幅が小さいため、鉄筋腐食率の予測値が小さくなったと考えられる。

続いて、図 6-1 に示した耐荷力評価フローの(2)において、検証用データを用いた pix2pix のモデル誤差と実験結果を用いた pix2pix のモデル誤差を考慮する。実験結果を用いたモデル誤差による補正は、5.9.2 に述べたように、補正を行う基準として平均腐食ひび割れ幅の大きさを設けている。表 6-4 に、各ドローンを用いて得られた腐食ひび割れ幅分布から計算される平均腐食ひび割れ幅を示す。ドローンの種類にかかわらず、どの供試体も、平均腐食ひび割れ幅が 0.1mm 未満であるため、5.9.2 で示した実験結果を用いた pix2pix のモデル誤差による補正は対象外となる。つまり、検証用データを用いたモデル誤差のみを考慮することとなる。

図 6-1 に示した耐荷力評価フローの(3), (4)を行い、最終結果として得られた耐荷力の確率密度分布（PDF）を図 6-9 に示す。すべての RC はりにおいて、実験結果の耐荷力が推定された耐荷力分布の範囲内に収まった。しかし、実験結果が確率密度分布の端に位置しており、精度の良い推定結果とはいえない。これは、ドローン撮影で得られる腐食ひび割れ幅が実際よりも小さく測定されており、その結果、pix2pix によって予測される鉄筋腐食率も実際より小さくなったことで、耐荷力を過大に評価したと考えられる。また、C2 では ANAFI で得られた腐食ひび割れ幅を与条件とした方が Skydio に比べて耐荷力の分布が実験値側に位置していた。これは、図 6-4 から分かるように、ANAFI の方が腐食ひび割れ幅を検出しており、表 6-4 に示すように、平均腐食ひび割れ幅も ANAFI の方が大きいことで、鉄筋腐食率分布も ANAFI の方が Skydio に比べて実験値に近い側で予測されたためと考えられる。C3 は、Skydio と ANAFI で腐食ひび割れ幅の検出精度に大きな違いはみられず（図 6-5 参照）、耐荷力分布も概ね等しくなった。C4 については、Skydio で得られた腐食ひび割れ幅を与条件とした方が ANAFI に比べて実験値側に耐荷力の分布が位置した。図 6-6 から分かるように Skydio の方が腐食ひび割れ幅を検出しており、表 6-4 に示すように、平均腐食ひび割れ幅も Skydio の方が大きいことで、鉄筋腐食率分布が Skydio の方が ANAFI に比べて実験値に近い側で予測されたためと考えられる。

6.4.2.2 で示す、近接撮影画像を用いた耐荷力推定結果と比較をし、腐食ひび割れ幅の取得精度が耐荷力推定に及ぼす影響を考察する。

#### 6.4.2.2 近接撮影画像を用いた耐荷力推定

近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅分布と構造諸元（細目）を与条件として、pix2pix モデルにより予測された鉄筋腐食率分布を図 6-10 に示す。実験値の鉄筋腐食率分布と比較すると、すべての供試体で過小に予測される結果となった。まず、小型 RC はりを想定して作成したデータベースを用いて構築した pix2pix が大型 RC はりに適用できるかを検証する。

図 6-11 に、実験結果の平均鉄筋腐食率と予測結果の平均鉄筋腐食率の絶対誤差を示す。小型 RC はりの場合、実験結果の鉄筋腐食率が大きい場合にその絶対誤差が大きくなる傾向にあった。大型 RC はりの場合も、その傾向は同じである。一方で、同程度の鉄筋腐食率に対する絶対誤差は大型 RC はりの方がやや大きい傾向にある。これは、同程度の鉄筋腐食率の場合、小型 RC はりに比べて大型 RC はりの方が腐食ひび割れ幅が小さくなる傾向があるため、予測される鉄筋腐食率は小さくなり、絶対誤差が大きくなったと考えられる。

続いて、図 6-1 に示した耐荷力評価フローの(2)において、検証用データを用いた pix2pix のモデル誤差と実験結果を用いた pix2pix のモデル誤差を考慮する。表 6-4 に、近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅分布から計算される平均腐食ひび割れ幅を示す。どの供試体も、平均腐食ひび割れ幅が 0.1mm 以上であるため、5.9.2 で示した実験結果を用いた pix2pix のモデル誤差による補正を行う。図 6-12 に実験結果に対するモデル誤差を用いて補正した鉄筋腐食率分布を示す。なお、図 6-12 に示す補正後の鉄筋腐食率分布は検証用データを用いたモデル誤差を考慮していないものを図示している。

次に、図 6-1 に示した耐荷力評価フローの(3), (4)を行い、最終結果として得られた耐荷力の確率密度分布（PDF）を図 6-13 に示す。これをみると、すべての RC はりで実験結果の耐荷力が腐食ひび割れ幅分布から推定された耐荷力の確率密度分布内に収まっている。また、実験値が耐荷力分布内の中央付近に位置しており、精度よく予測できたといえる。

これより、データベースの作成に用いていない大型 RC はりに対して、提案する確率論的耐荷力推定手法の有用性が示された。今回は、データベースの作成した小型 RC はりと耐荷力推定に使用した大型 RC はりにおける断面寸法の違いは、耐荷力推定には大きな影響を及ぼさなかったといえる。今後は、断面寸法の違いが腐食ひび割れ幅に及ぼす影響を調査した上で、データベースに反映するべきかを検討する必要がある。

#### 6.4.2.3 腐食ひび割れ幅の測定精度の違いが耐荷力推定に及ぼす影響

図 6-14 に、各撮影方法から得られた腐食ひび割れ幅画像を用いて耐荷力評価を行った結果を示す。近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅分布から算出した耐荷力分布は、実験値に対して良い精度で推定できている。一方で、ドローンで得られた腐食ひび割れ幅分布から算出される耐荷力分布は、実験結果を推定することはできたが、その精度は低い結果となった。これは、腐食ひび割れ幅の取得精度が耐荷力分布推定に大きく影響していることを表している。そして、精度よく耐荷力を推定するためには、近接撮影で得られる画像精度が必要であるといえる。近接撮影で得られた画像をもとに、撮影時に求められるカメラや撮影方法について考察する。表 6-5 に、撮影時に RC はり底面に取り付けたクラックスケールを用いて求めた、画像分解能、RC はり底面までの撮影距離、そして視認可能な最小のひび割れ幅を示す。まず、分解能について、今回使用したデジタルカメラおよびドローンカメラの画素数は約 1200 万画素～1600 万画素であり、カメラの性能としては大きな違いはない。分解能とは 1 ピクセル当たりの距離であるため、撮影距離によってその大きさは変動する。また、画質の粗さを表すものではないため、表 6-5 に示すように、近接撮影とドローン撮影で分解能に違いはなく、この指標では評価することは困難であると考えられる。

近接撮影では、撮影距離を一定としているため、RC はり間で撮影距離に違いはない。一方で、ドローン撮影では、揺れによって距離を一定に保つのは困難であるため、撮影距離がばらついていることが分かる。本研究では、撮影距離の違いが腐食ひび割れ幅の取得精度に及ぼす影響は検討できていない。

最小視認ひび割れ幅は撮影方法によって大きく異なる結果となった。分解能や撮影距離に大きな違いはないが、近接撮影では、0.05mm のひび割れを視認できた一方で、ドローン撮影の場合は最小視認ひび割れ幅が 0.20mm である。これは、ドローンによって撮影された画像の画質が粗いことを示している。ドローンによる撮影では、画像が粗い結果、錆汁を伴う腐食ひび割れ幅の測定が困難となり腐食ひび割れ幅を過小評価したことが耐荷力推定精度に大きく影響していると考えられる。

これより、錆汁を伴う腐食ひび割れが観測される劣化 RC 部材の耐荷力を精度良く推定するためには、近接で得られる画像と同程度の画質で撮影する必要があるといえる。本研究においては、0.05mm のひび割れが視認できることが近接で得られた画像の画質を表す指標である。ドローン撮影の画質が低い理由として、供試体の影になること、ドローンが風を受けて安定しないことが考えられる。供試体に近づかなくても高精細な撮影が可能な一眼レフ

カメラを搭載したものや、明るさや一定距離を保ちながら飛行可能なドローンを開発することで、近接画像と同程度の画質を得ることが可能になると考えられる。

#### 参考文献

- 6-1) Zhang, M., Nishiya, N., Akiyama, M., Lim, S. and Masuda, K.: Effect of the correlation of steel corrosion in the transverse direction between tensile rebars on the structural performance of RC beams, *Construction and Building Materials*, Vol.264, 120678, 2020.
  
- 6-2) Lim, S., Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling, *Engineering Structures*, Vol.127, pp.189-205, 2016.

表 6-1 降伏荷重の実験結果と再現解析結果の比較

供試体名	降伏荷重		モデル誤差 (実験値/解析値)
	実験値	解析値	
C1	78.3	66.2	1.18
C2	76.4	79.5	0.96
C3	64.0	71.9	0.89
C4	58.4	49.6	1.18

表 6-2 Non-FEA の計算に伴うモデル誤差の統計量

平均	標準偏差
1.05	0.13

表 6-3 ケーススタディで想定した構造諸元

ケース名	軸方向の鉄筋間隔 (mm)	鉄筋径
C2	95	D19
C3	95	D19
C4	95	D19

表 6-4 各撮影方法で得られた平均腐食ひび割れ幅

供試体名	平均腐食ひび割れ幅 (mm)		
	近接撮影 (画像処理)	ドローン撮影 (Skydio)	ドローン撮影 (ANAFI)
C2	0.100	0.019	0.039
C3	0.105	0.029	0.024
C4	0.135	0.069	0.020

表 6-5 各撮影方法での撮影距離とカメラ分解能および視認可能な腐食ひび割れ幅の比較

撮影方法		分解能 (mm/pixel)	撮影距離 (mm)	視認可能な最小 ひび割れ幅(mm)
C2	近接撮影	0.12	402	0.05
	ドローン撮影 (Skydio)	0.97	461	0.20
	ドローン撮影 (ANAFI)	0.14	434	0.45
C3	近接撮影	0.12	402	0.05
	ドローン撮影 (Skydio)	0.16	367	0.30
	ドローン撮影 (ANAFI)	0.13	389	0.20
C4	近接撮影	0.12	402	0.05
	ドローン撮影 (Skydio)	0.16	373	0.20
	ドローン撮影 (ANAFI)	0.15	445	0.30

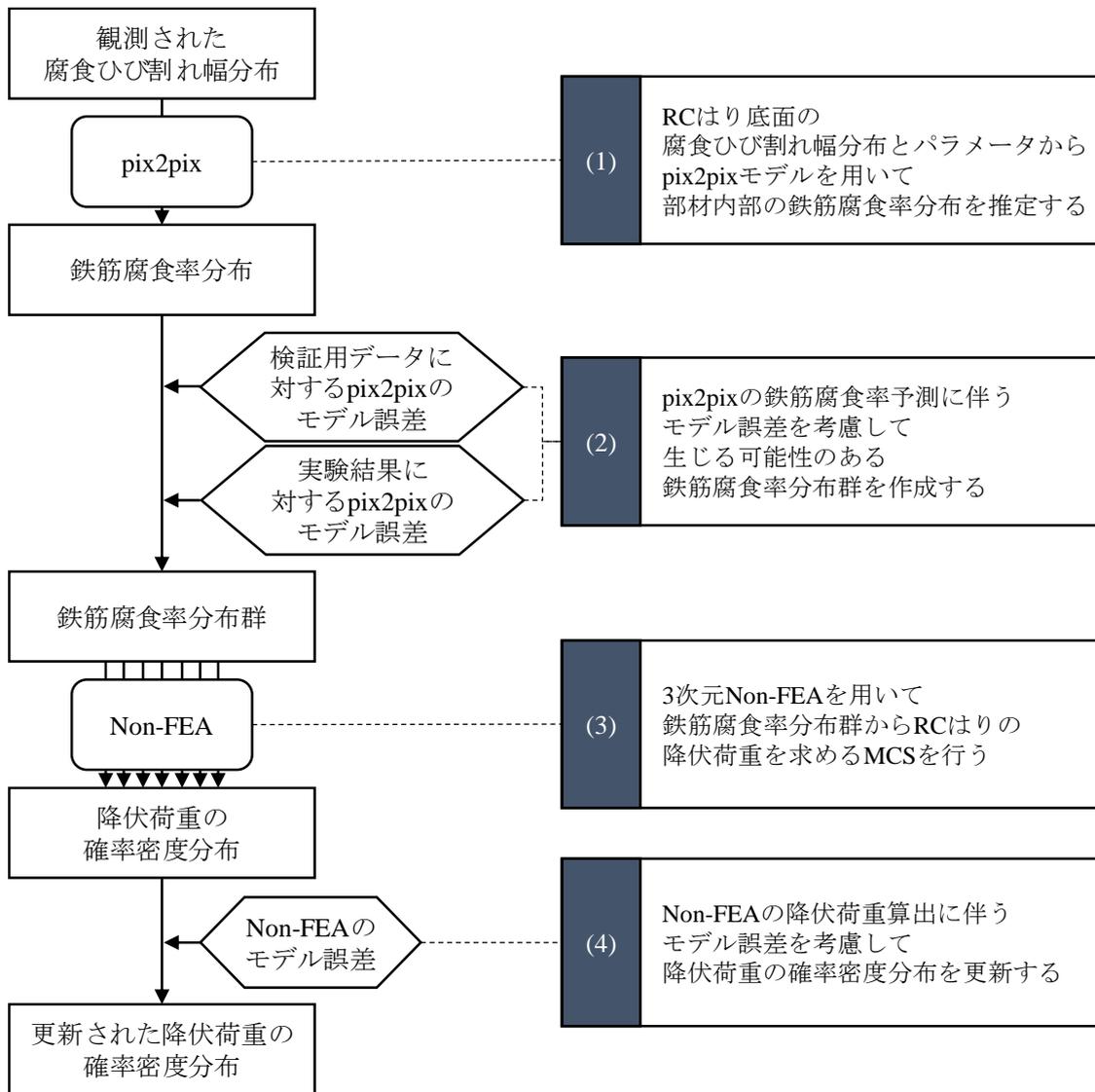


図 6-1 耐荷力評価フロー

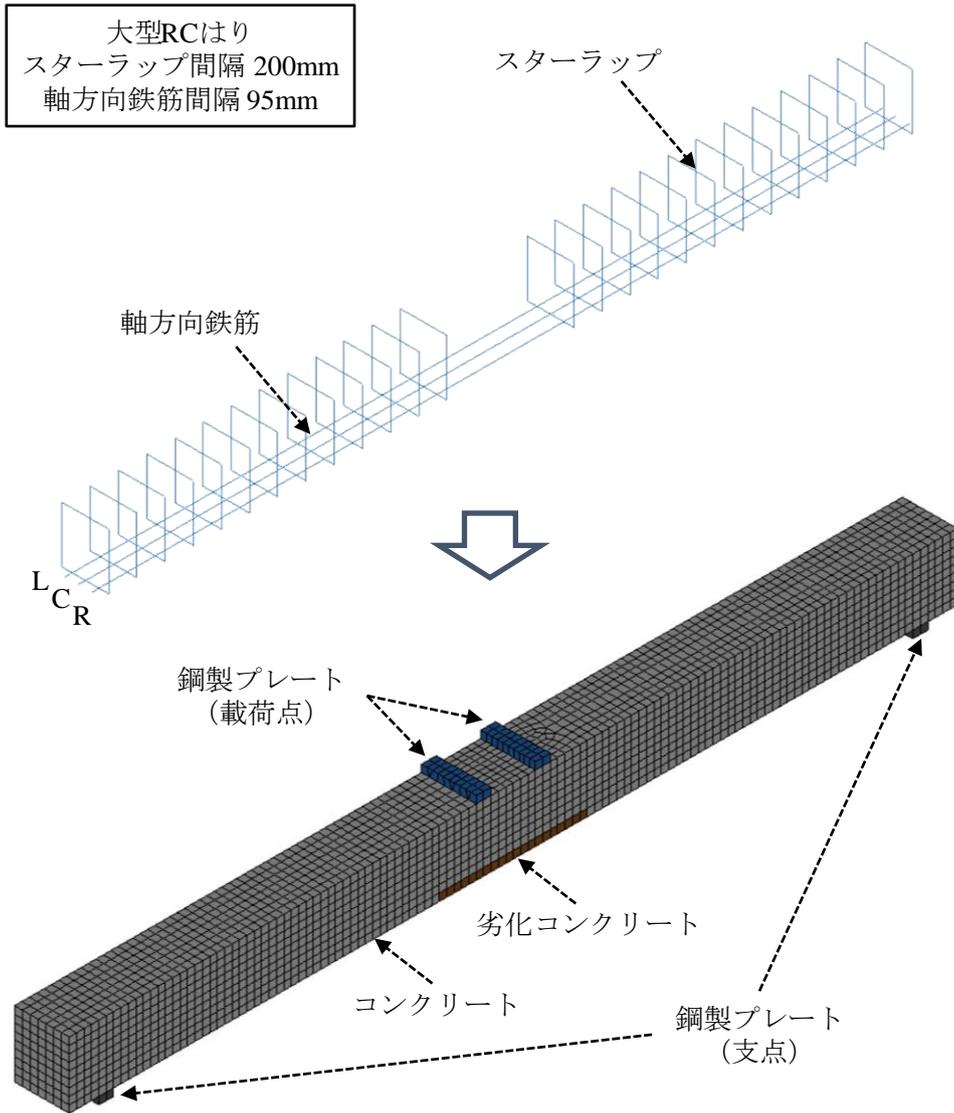
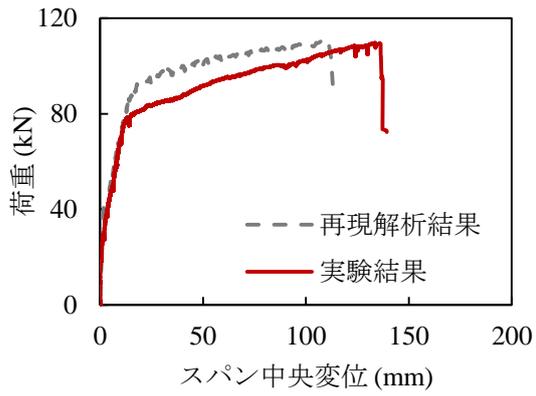
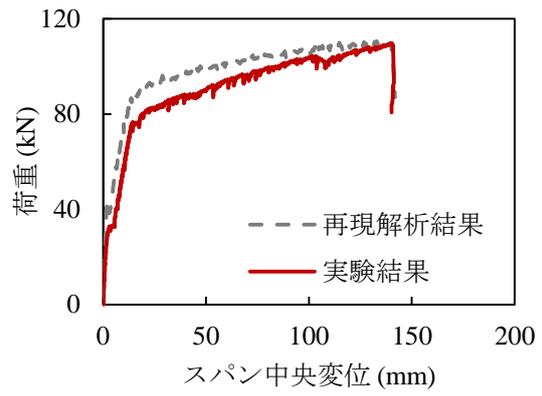


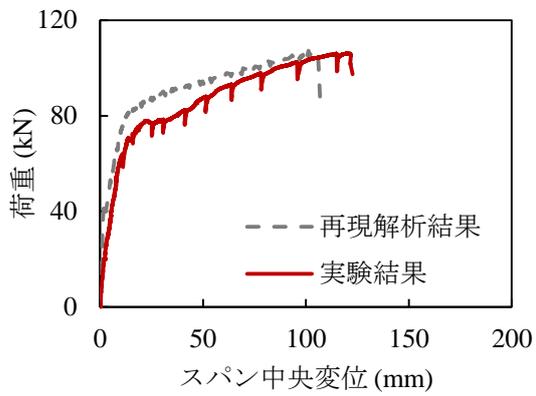
図 6-2 3次元 Non-FE モデルの概要



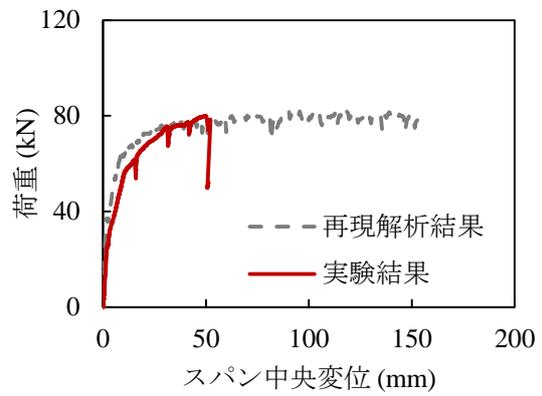
(a) C1



(b) C2

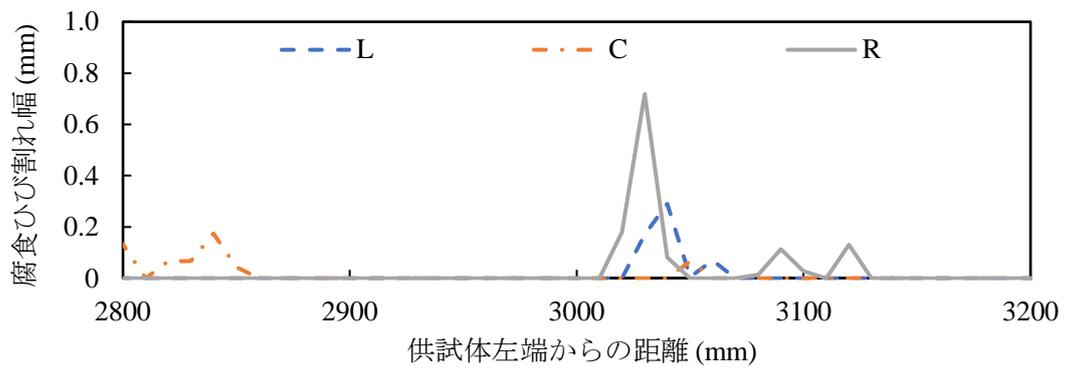


(c) C3

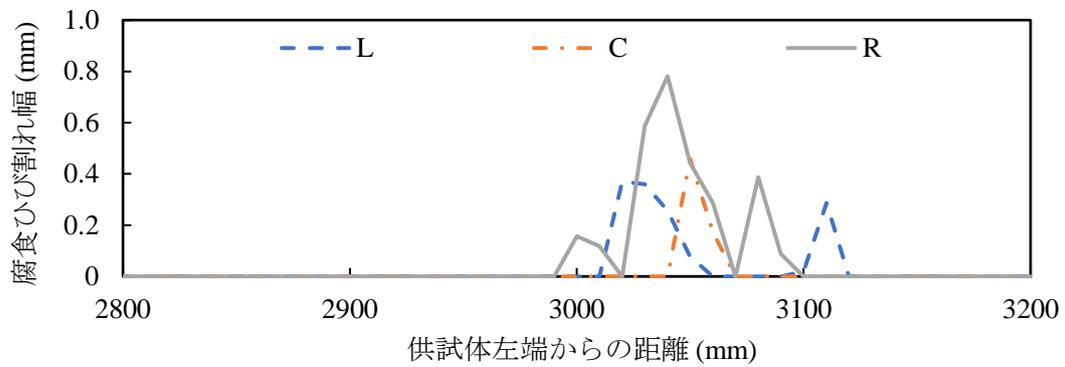


(d) C4

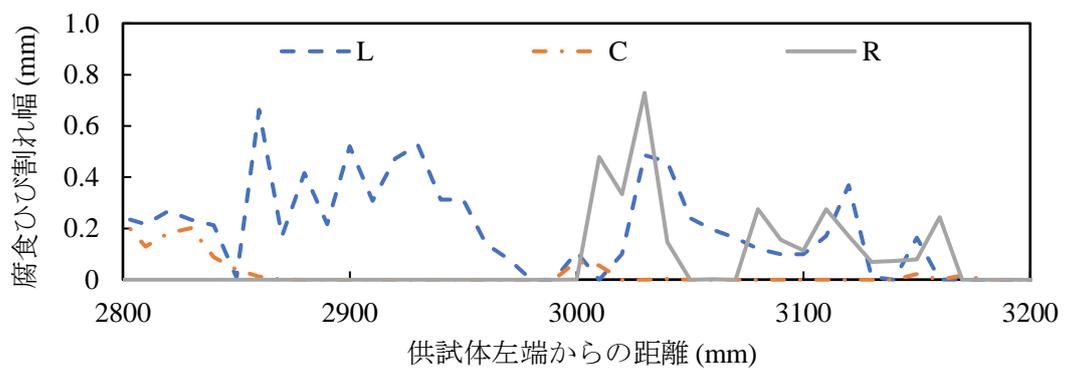
図 6-3 荷重—変位関係の実験結果と再現解析結果の比較



(a) ドローン撮影 (Skydio)

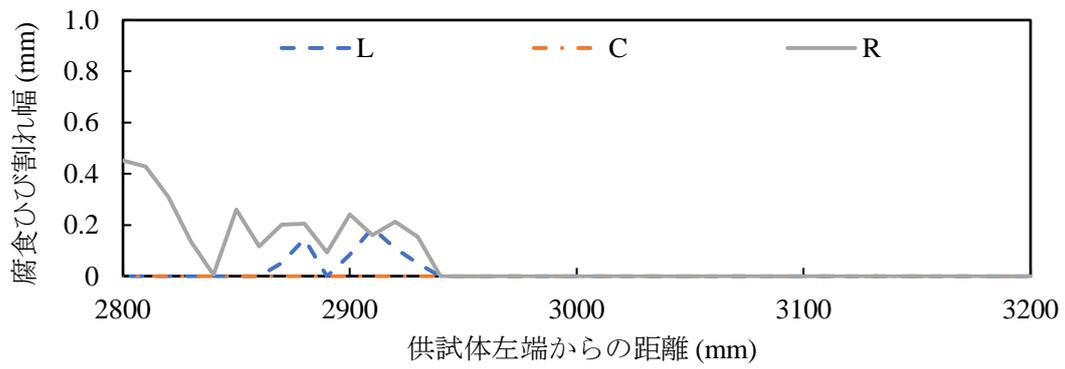


(b) ドローン撮影 (ANAFI)

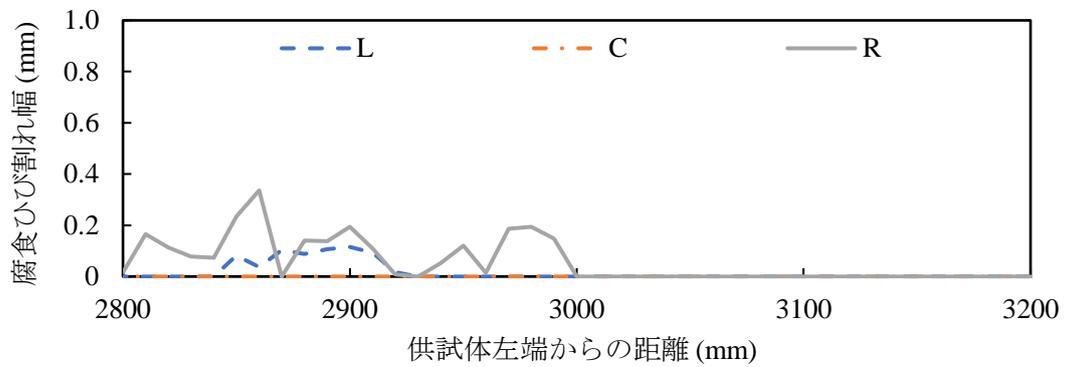


(c) 近接撮影

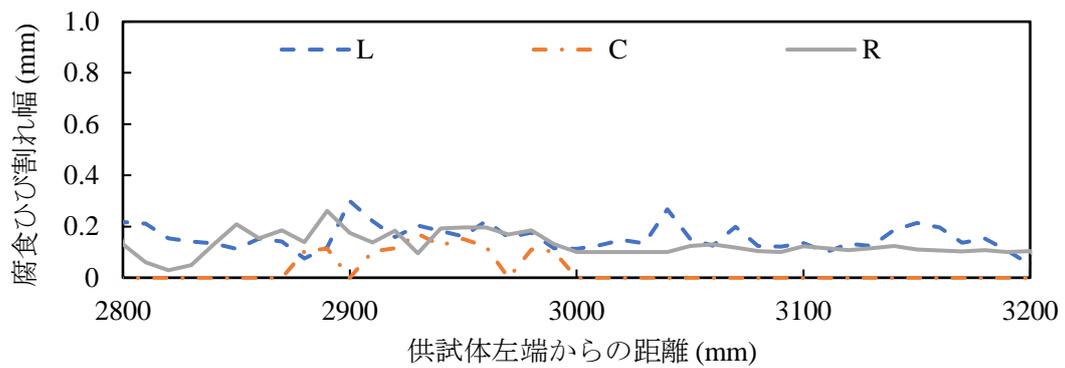
図 6-4 C2 で観測された腐食ひび割れ幅分布



(a) ドローン撮影 (Skydio)

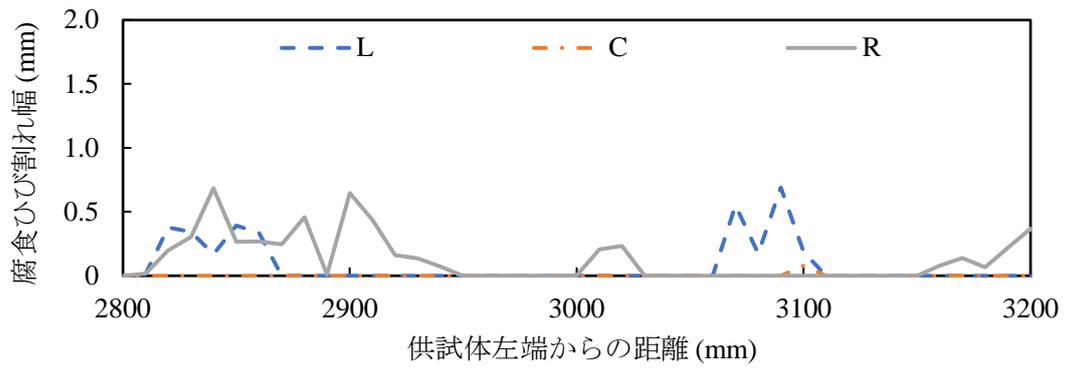


(b) ドローン撮影 (ANAFI)

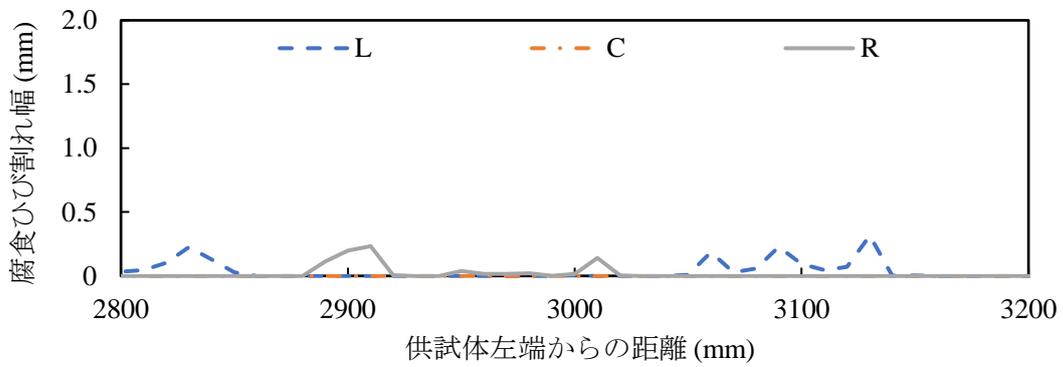


(c) 近接撮影

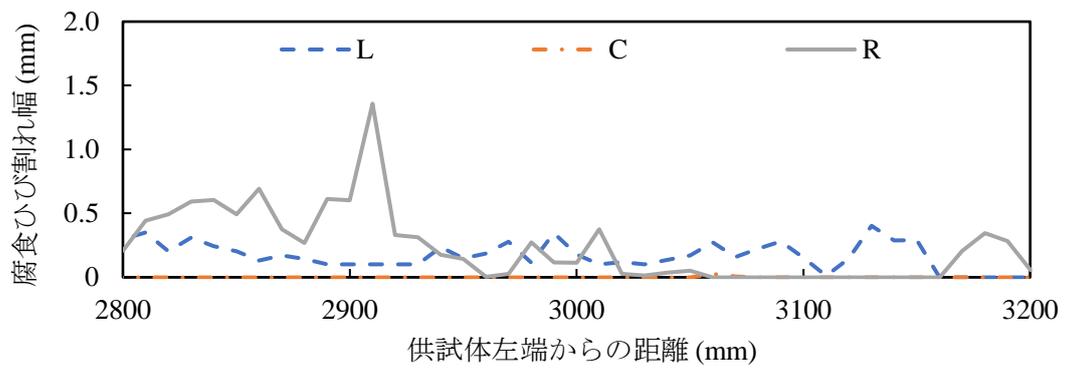
図 6-5 C3 で観測された腐食ひび割れ幅分布



(a) ドローン撮影 (Skydio)

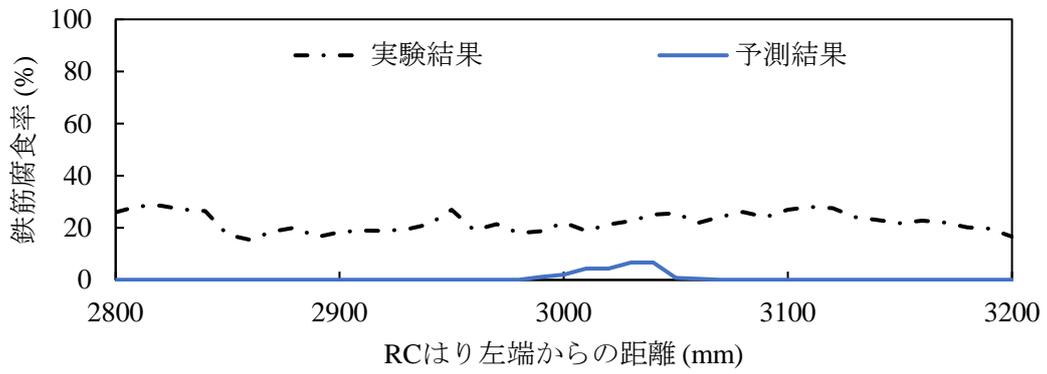


(b) ドローン撮影 (ANAFI)

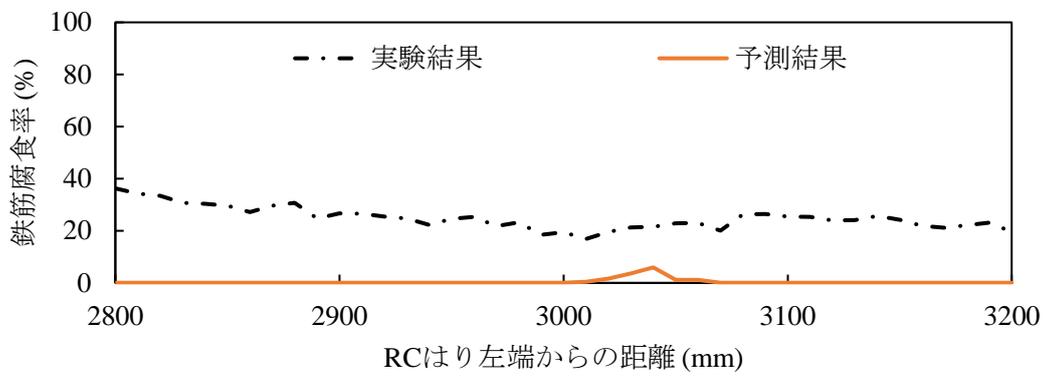


(c) 近接撮影

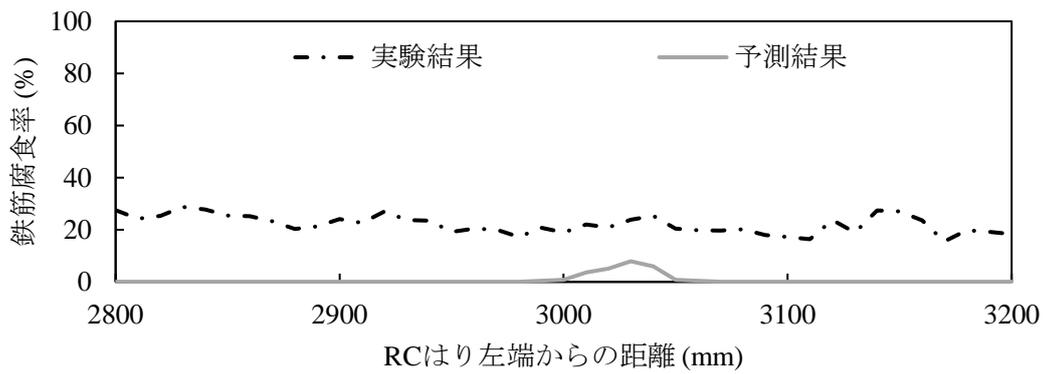
図 6-6 C4 で観測された腐食ひび割れ幅分布



(a-1) L 鉄筋

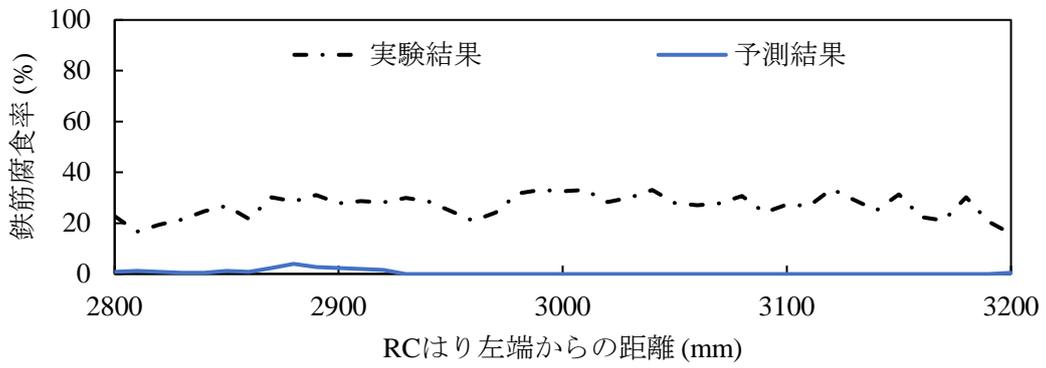


(a-2) C 鉄筋

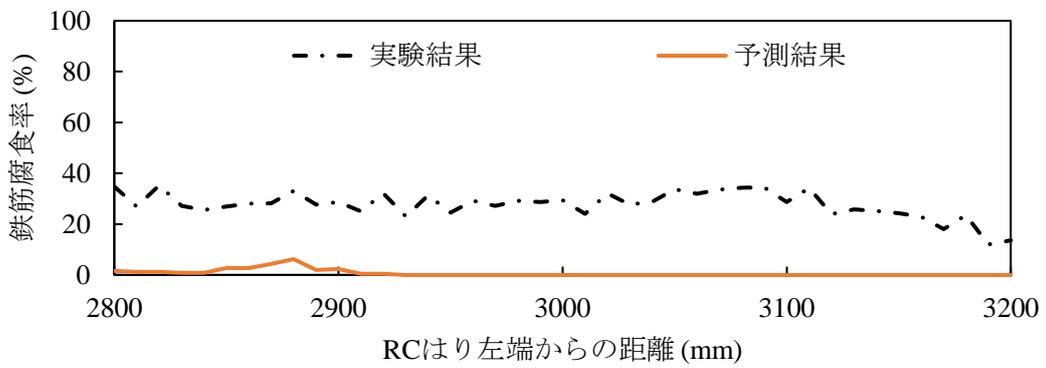


(a-3) R 鉄筋

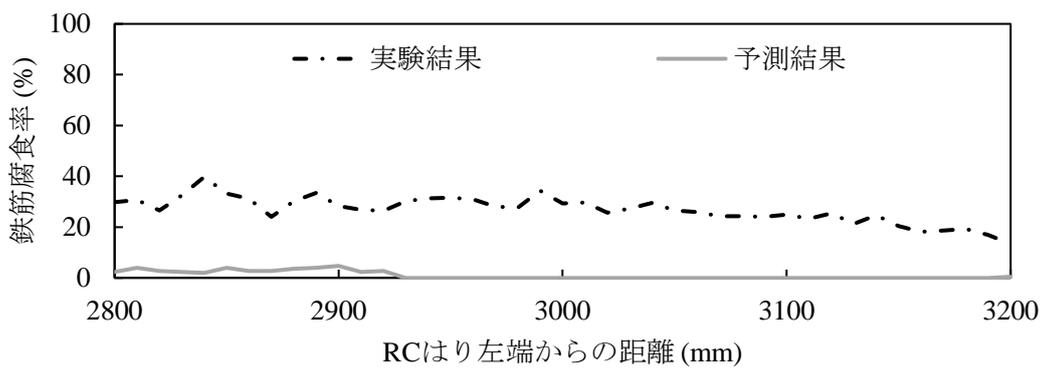
(a) C2



(b-1) L 鉄筋

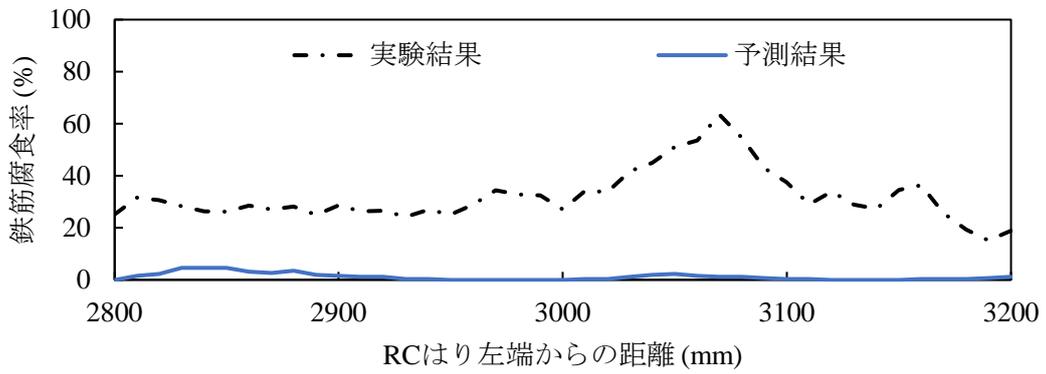


(b-2) C 鉄筋

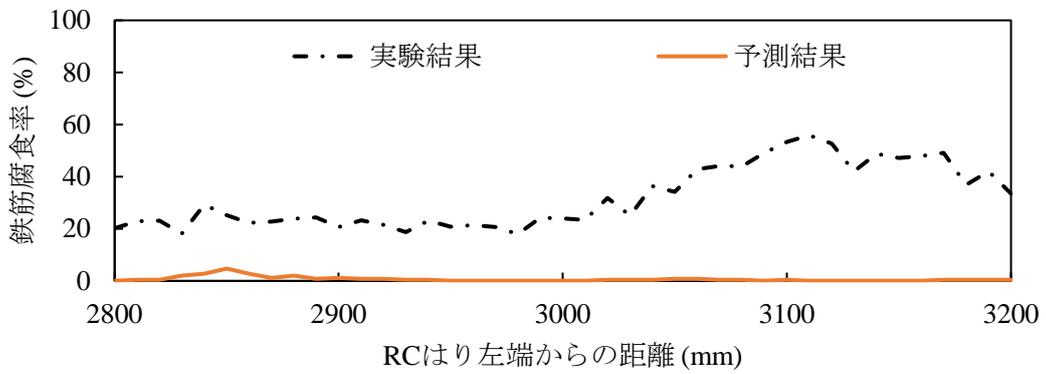


(b-3) R 鉄筋

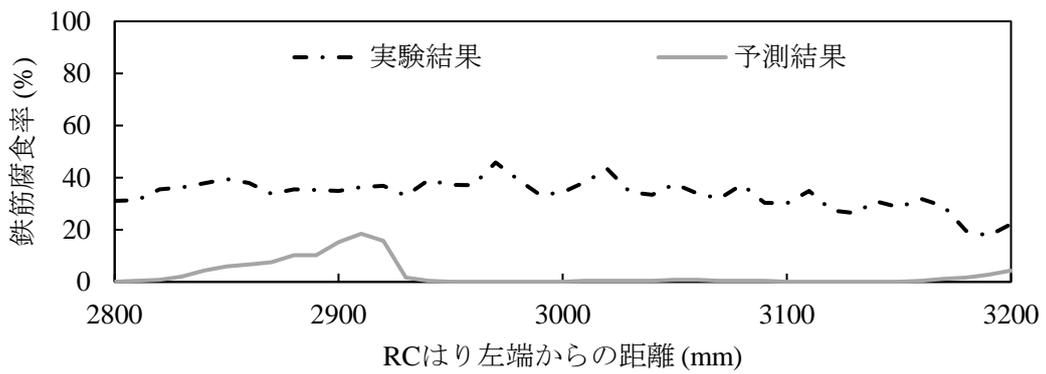
(b) C3



(c-1) L 鉄筋



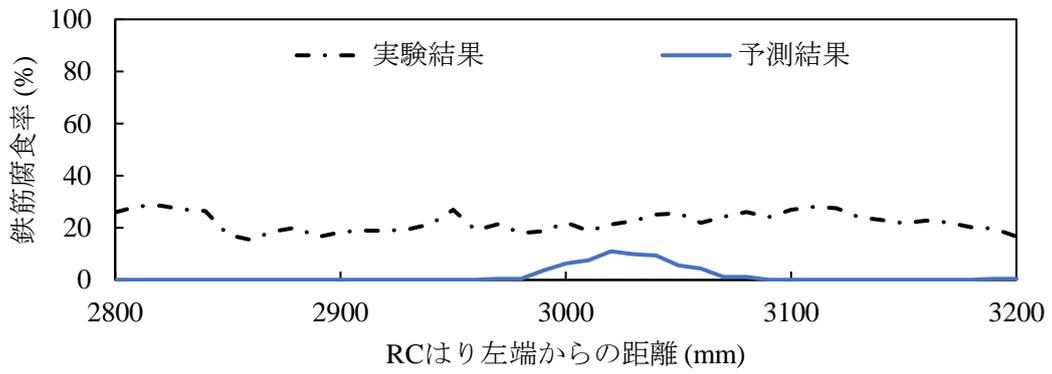
(c-2) C 鉄筋



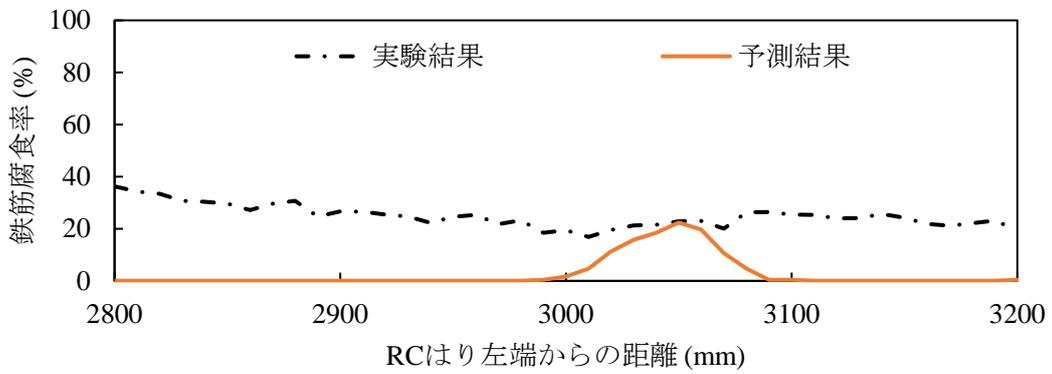
(c-3) R 鉄筋

(c) C4

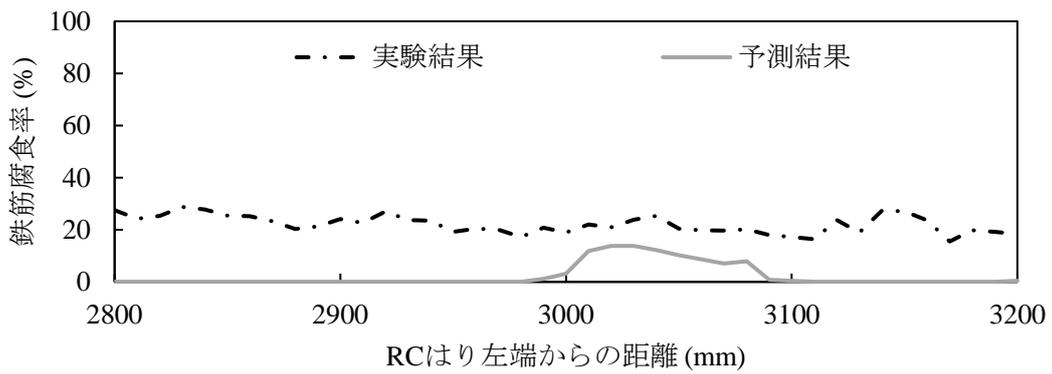
図 6-7 Skydio により撮影した腐食ひび割れ幅分布から予測された鉄筋腐食率分布



(a-1) L 鉄筋

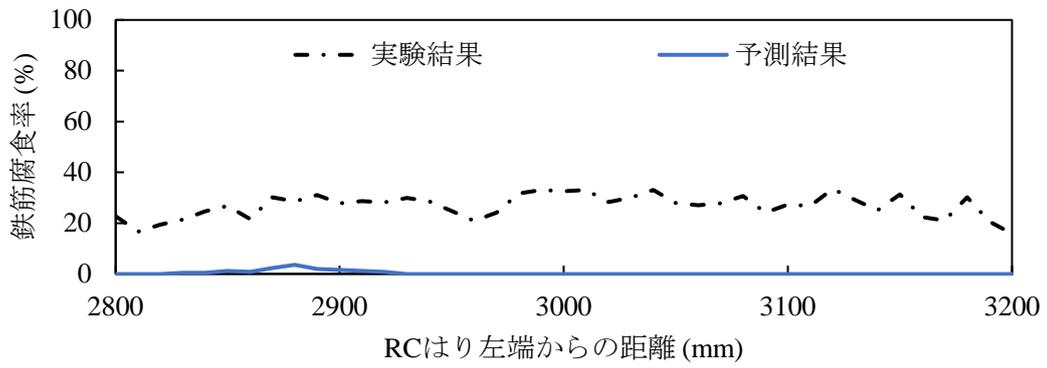


(a-2) C 鉄筋

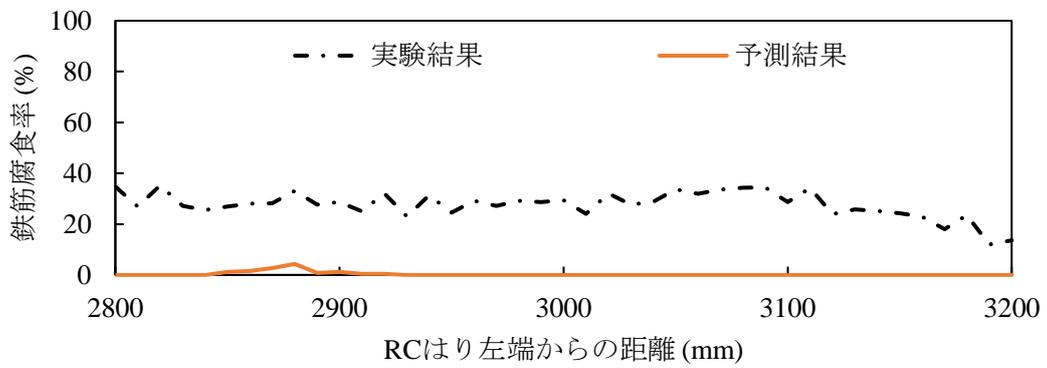


(a-3) R 鉄筋

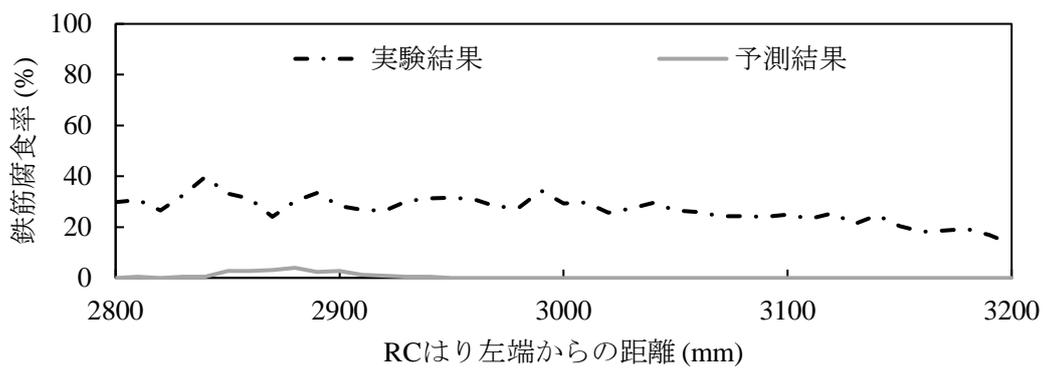
(a) C2



(b-1) L 鉄筋

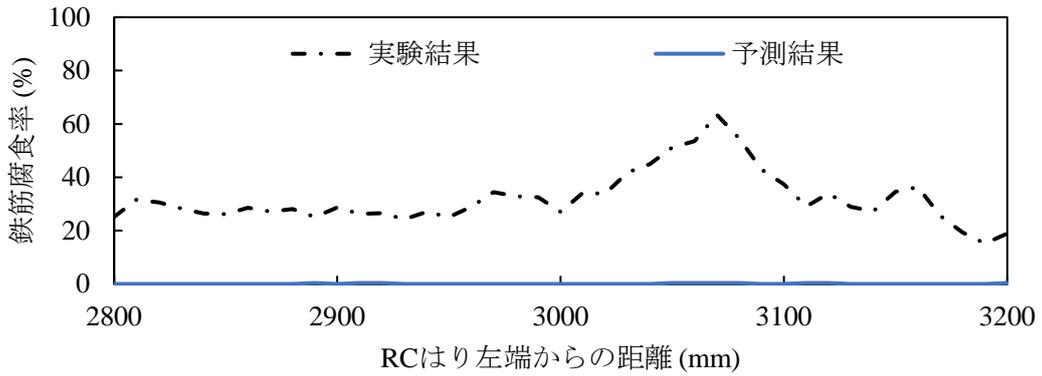


(b-2) C 鉄筋

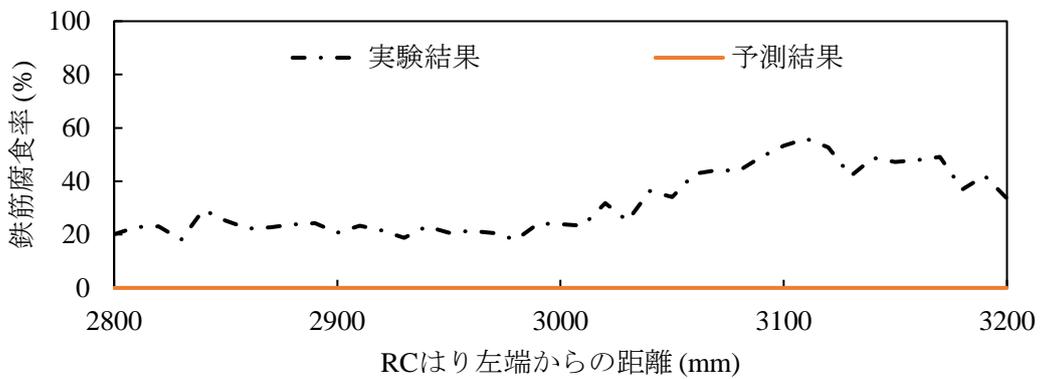


(b-3) R 鉄筋

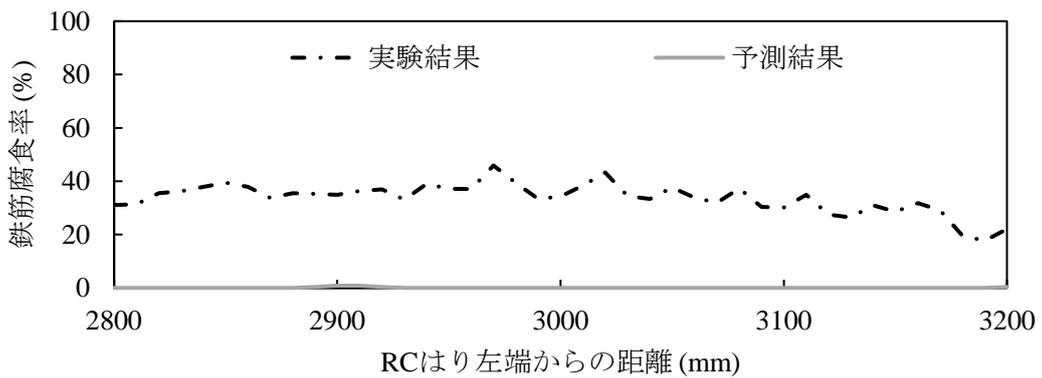
(b) C3



(c-1) L 鉄筋



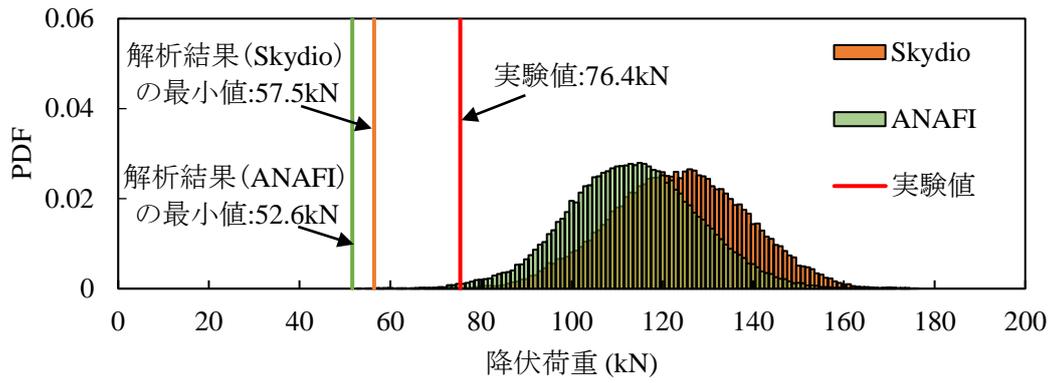
(c-2) C 鉄筋



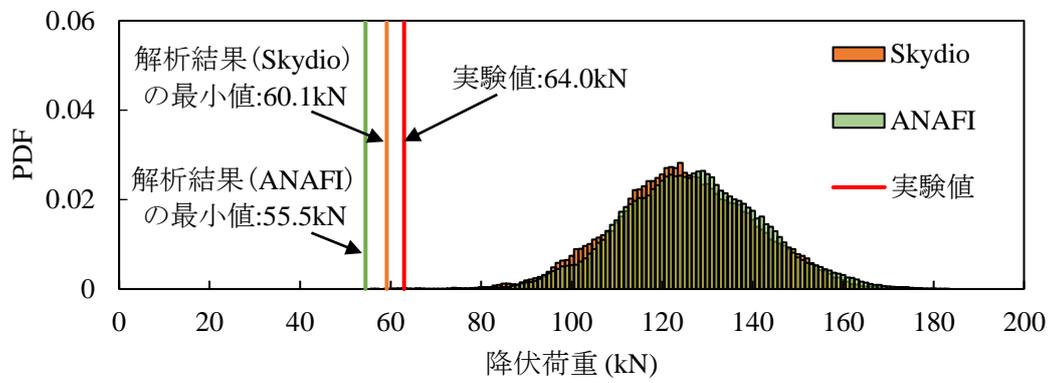
(c-3) R 鉄筋

(c) C4

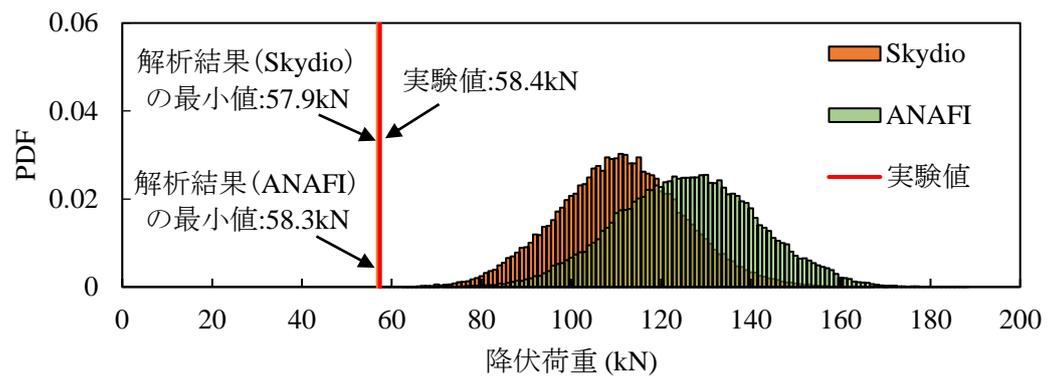
図 6-8 ANAFI により撮影した腐食ひび割れ幅分布から予測された鉄筋腐食率分布



(a) C2

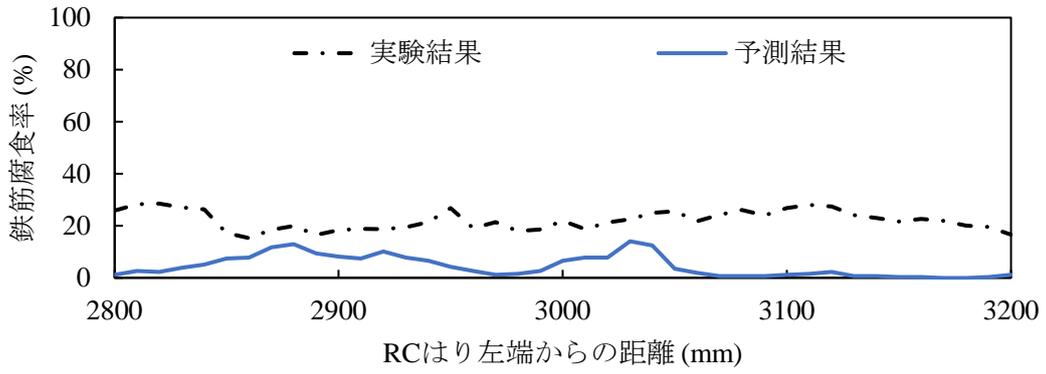


(b) C3

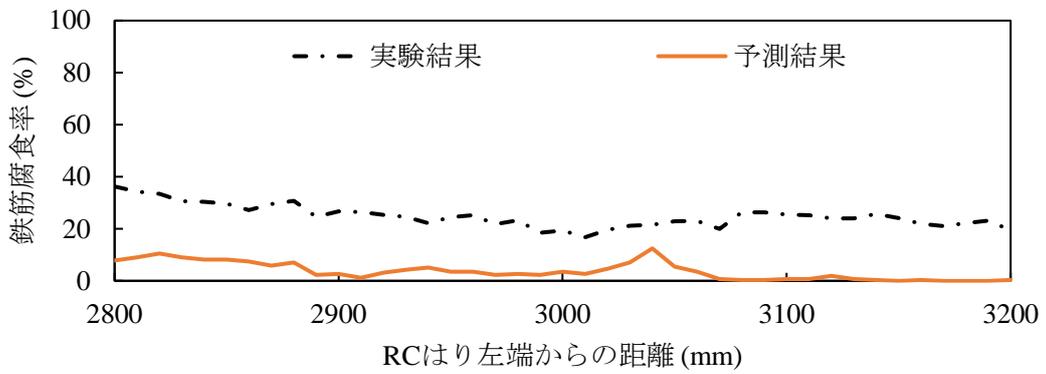


(c) C4

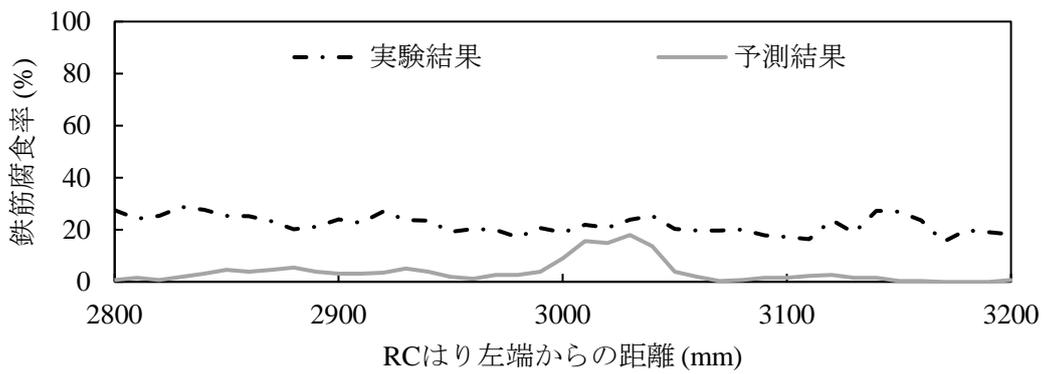
図 6-9 ドローン撮影画像を用いた耐荷力評価結果



(a-1) L 鉄筋

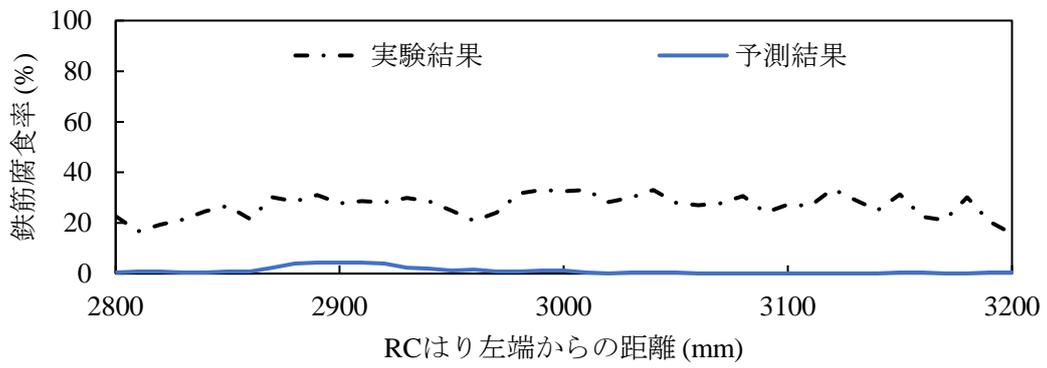


(a-2) C 鉄筋

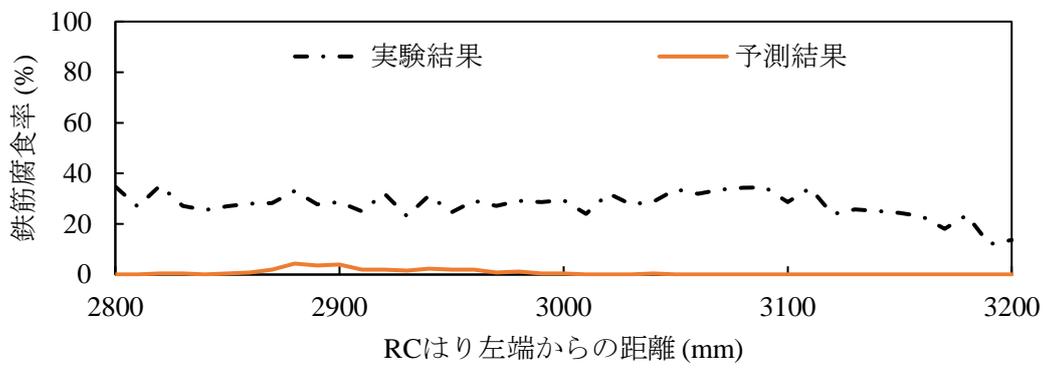


(a-3) R 鉄筋

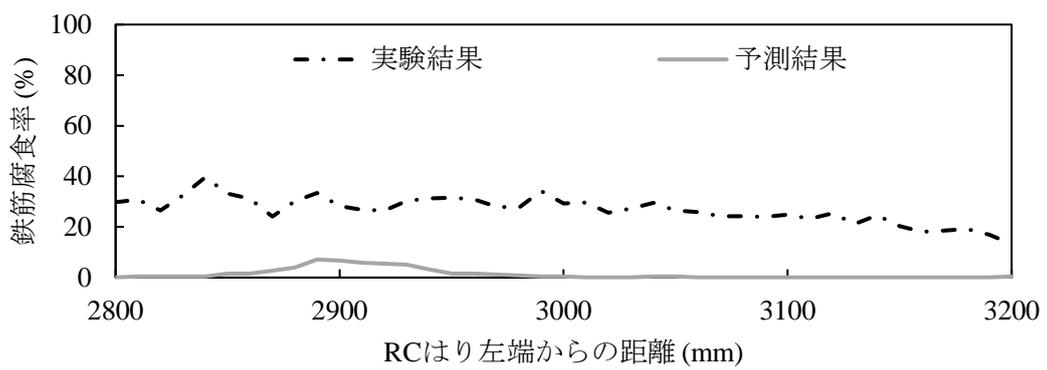
(a) C2



(b-1) L 鉄筋

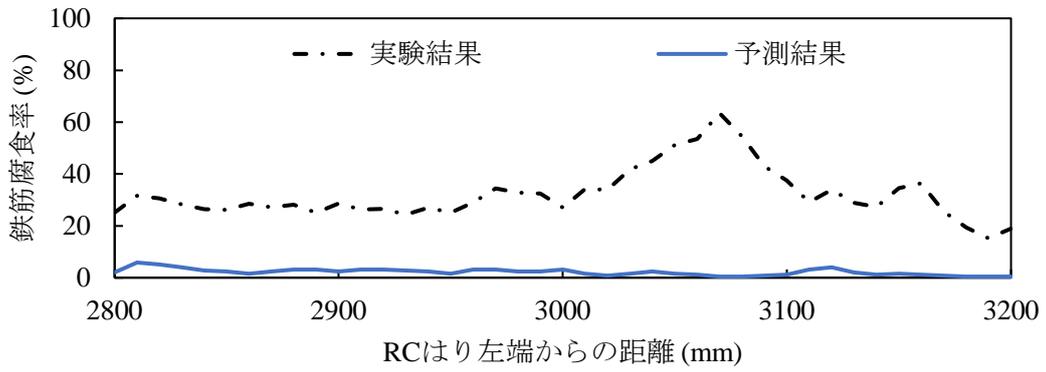


(b-2) C 鉄筋

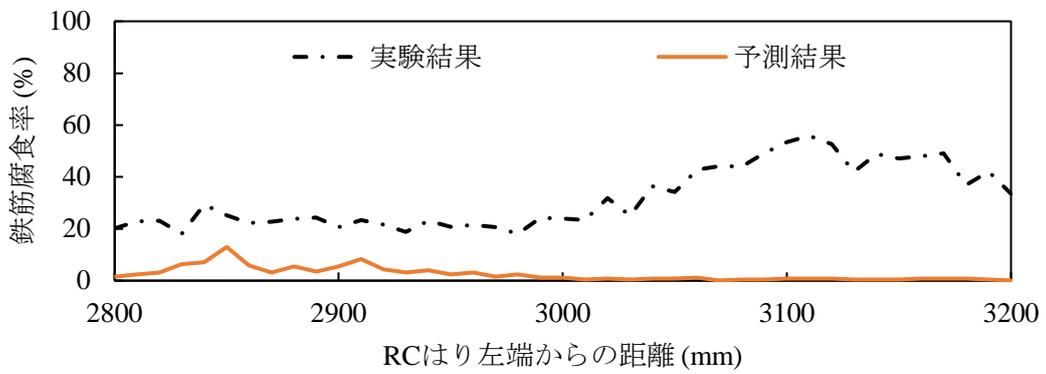


(b-3) R 鉄筋

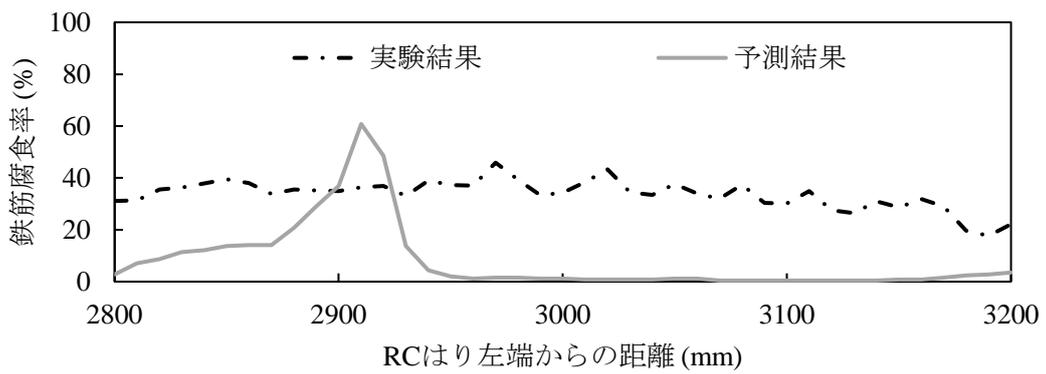
(b) C3



(c-1) L 鉄筋



(c-2) C 鉄筋



(c-3) R 鉄筋

(c) C4

図 6-10 近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅から予測された鉄筋腐食率分布

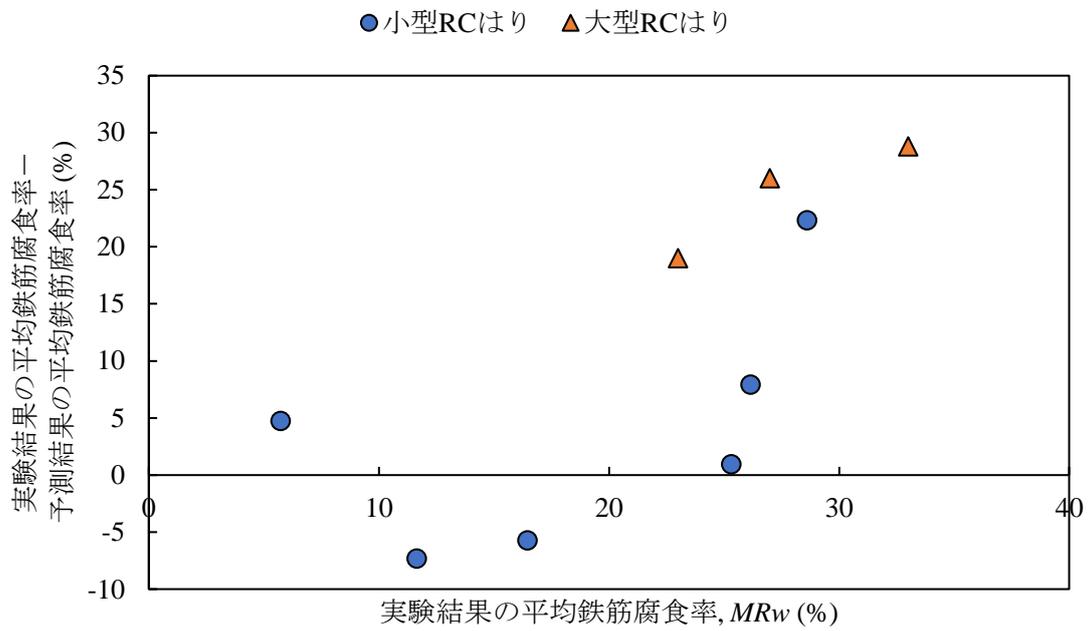
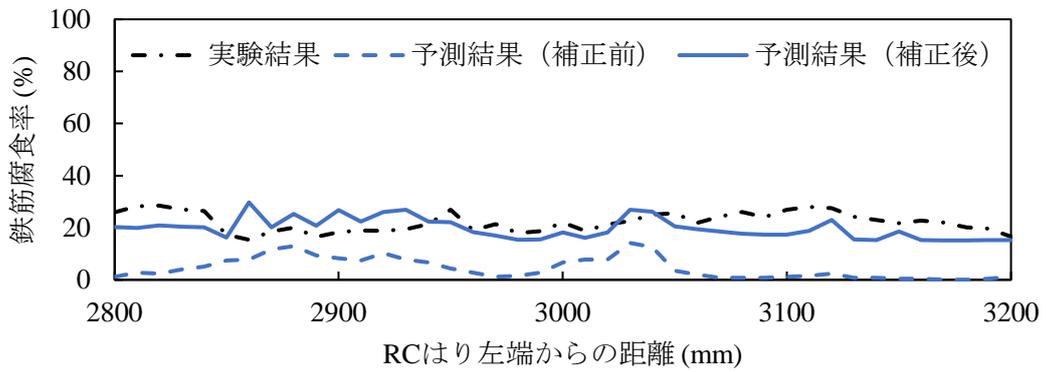
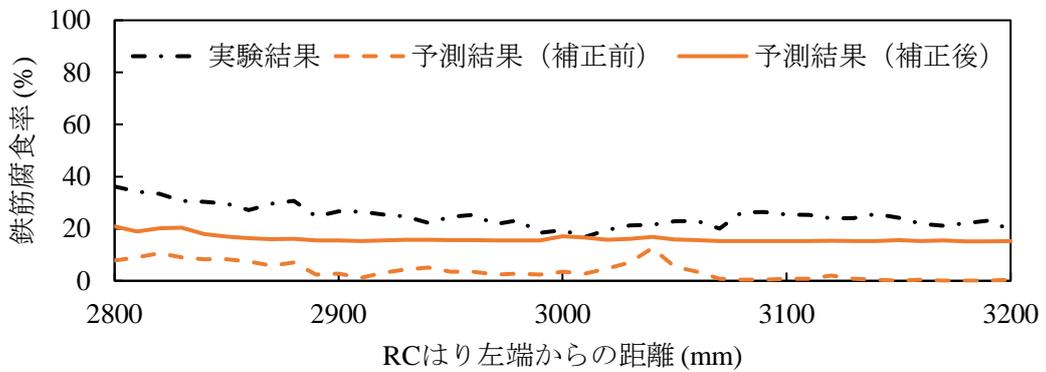


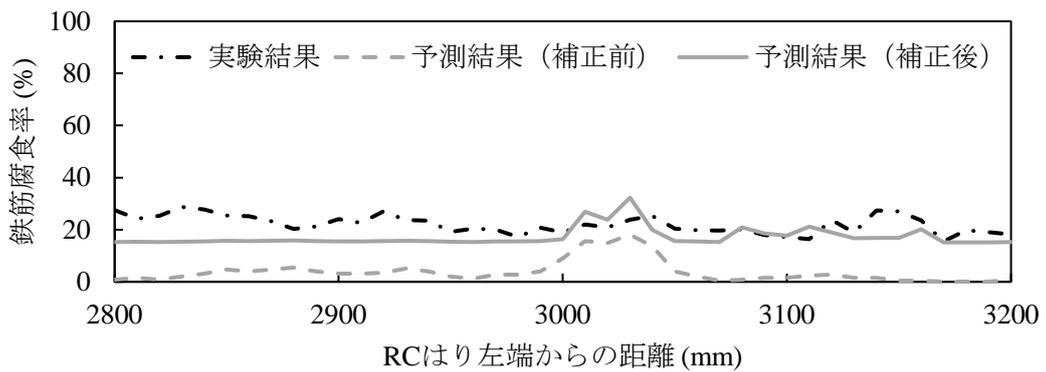
図 6-11 実験結果に対する平均鉄筋腐食率の実験結果と予測結果の絶対誤差



(a-1) L 鉄筋

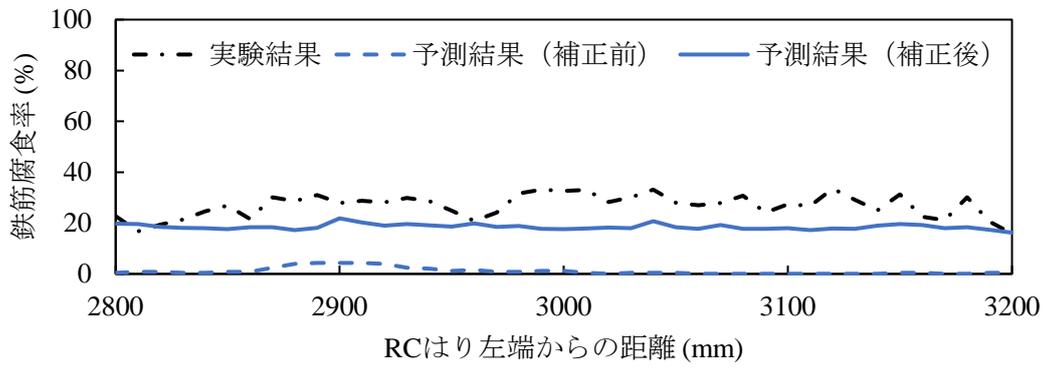


(a-2) C 鉄筋

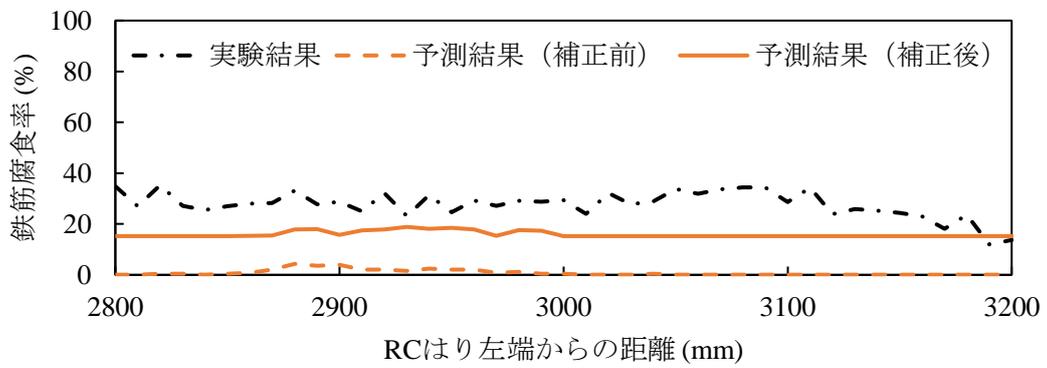


(a-3) R 鉄筋

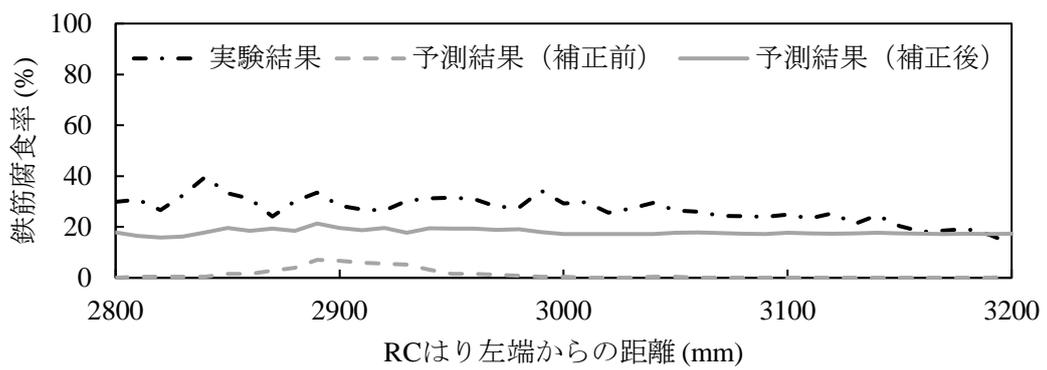
(a) C2



(b-1) L 鉄筋

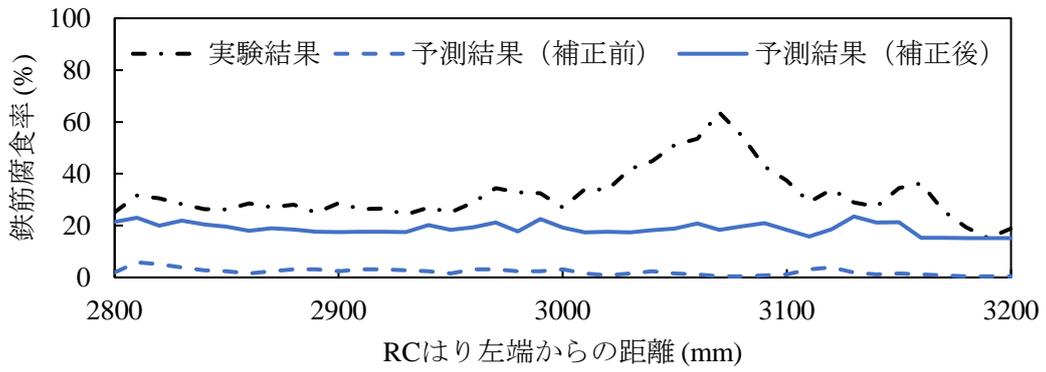


(b-2) C 鉄筋

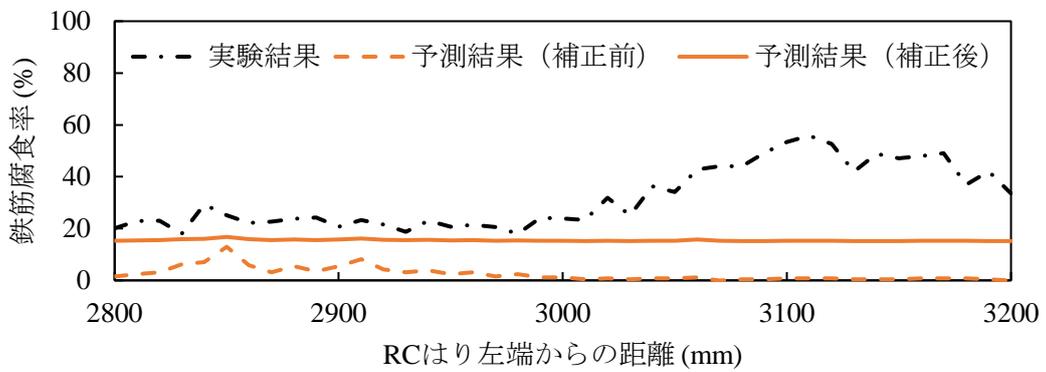


(b-3) R 鉄筋

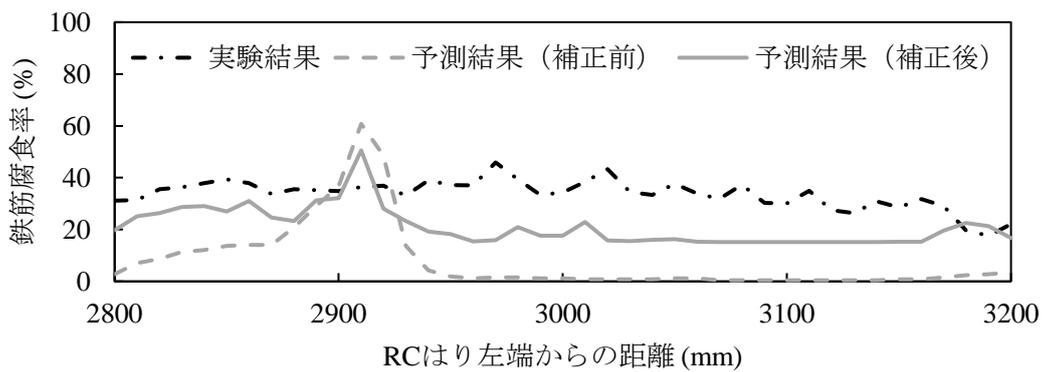
(b) C3



(c-1) L 鉄筋



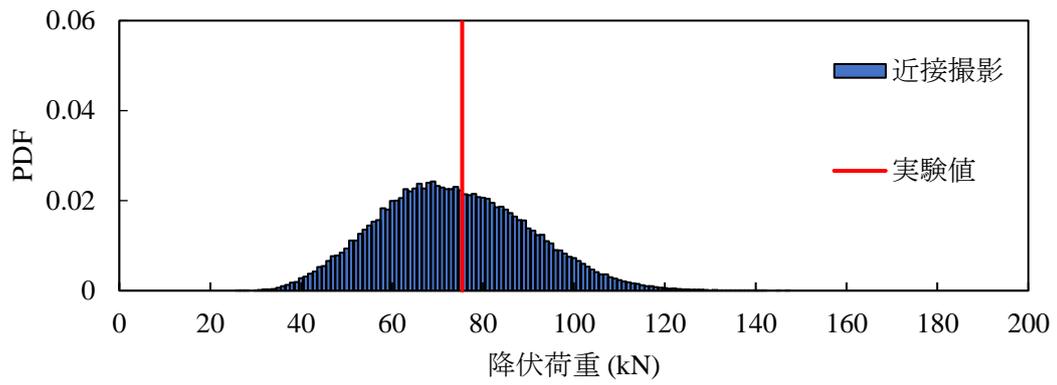
(c-2) C 鉄筋



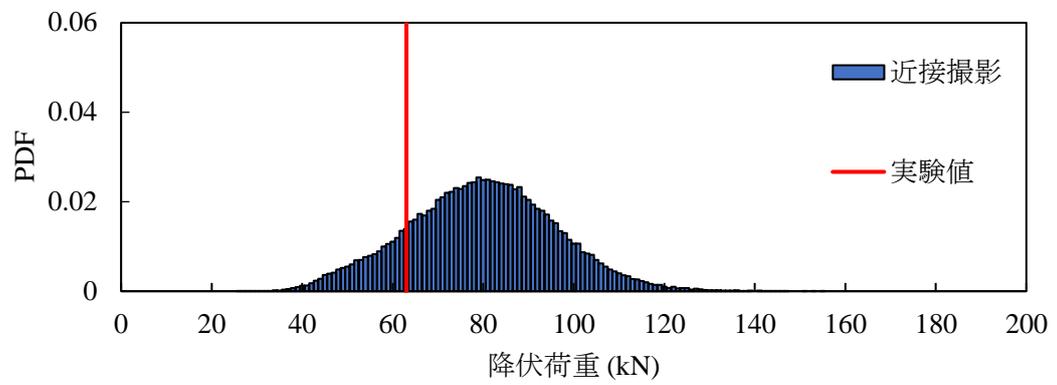
(c-3) R 鉄筋

(c) C4

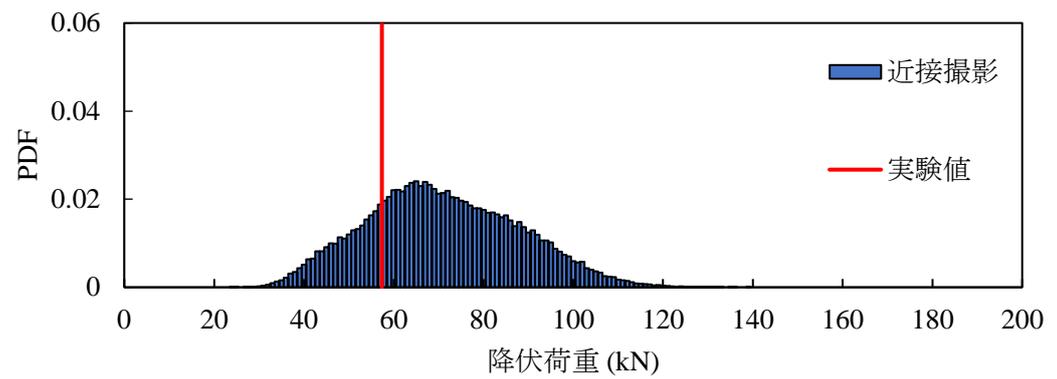
図 6-12 補正後の鉄筋腐食率分布



(a) C2

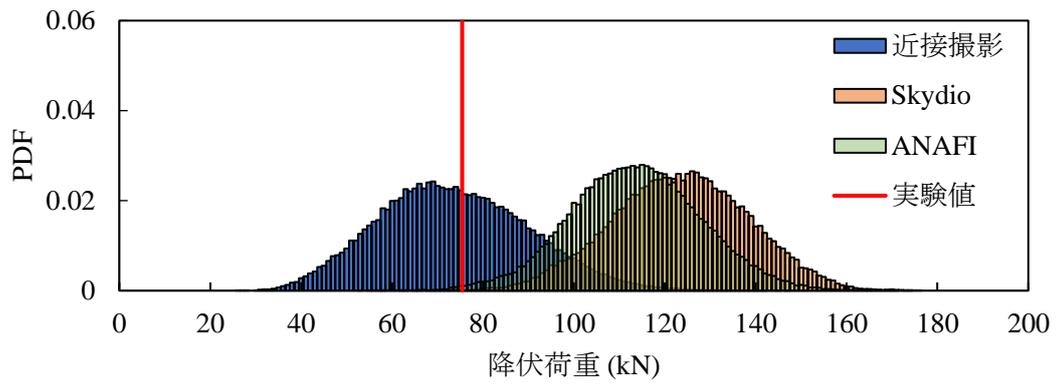


(b) C3

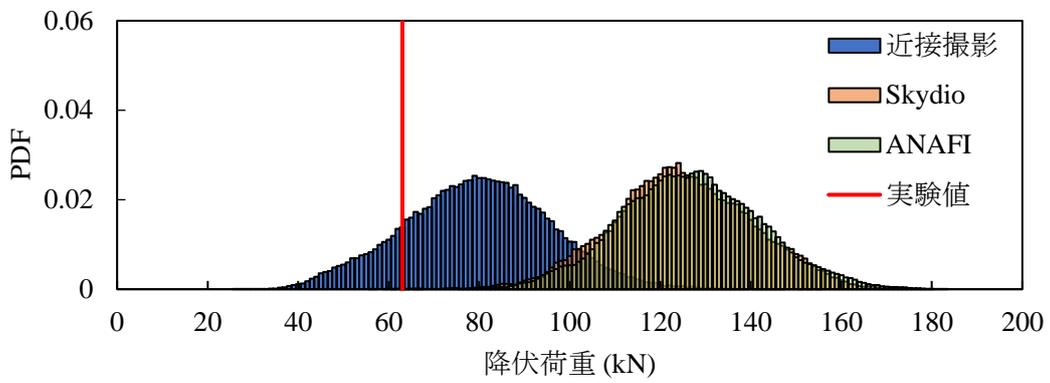


(c) C4

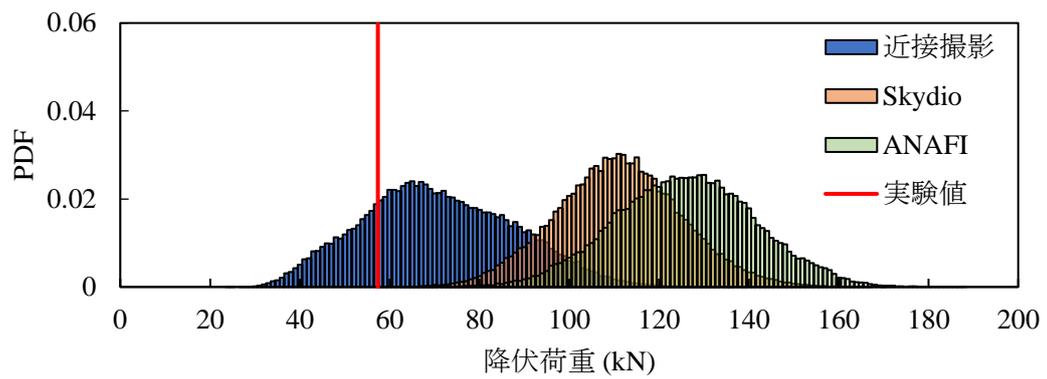
図 6-13 近接撮影画像を用いた耐荷力評価結果



(a) C2



(b) C3



(c) C4

図 6-14 撮影方法の違いによる耐力評価結果の比較

## 7. 今後の展開

本章では、本研究を通して得られた知見や考察を基に、今後の展開や課題について述べる。

### 7.1 疑似腐食供試体を用いた機械学習用データベースの改善

本節では、腐食ひび割れ幅分布から鉄筋腐食率を予測するための機械学習モデルの構築に必要な機械学習用データベースの作成に関して考えられる改善点を示す。

本研究では3つの手順によってデータベースを作成している。1)SRMにより疑似鉄筋腐食率分布を作成し、2)腐食生成物モデルを用いて腐食生成物厚さに変換し、3)腐食生成物厚さを強制変位として与えた Non-FEA を行うことによって、疑似鉄筋腐食率分布に対応する疑似腐食ひび割れ幅分布を算出され、機械学習用データベースとなる。

まず、SRMを用いた疑似鉄筋腐食率分布の再現について述べる。5.2で述べたように、軸直角方向の鉄筋腐食率は鉄筋間隔が狭いほど相関が強いと仮定していた。しかし、実験結果では、必ずしも鉄筋間隔が狭いほど相関係数が高いわけではなかった。複数本の軸方向鉄筋を有している場合、腐食ひび割れ幅の発生する順番が鉄筋腐食率に影響している可能性があった。そこで、複数本の鉄筋を有するRCはりを対象に鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅の成長過程を調査する必要がある。また、コヒーレンス関数の算出時には、エイリアシング処理によりプロット数が少なくなり、相関性の評価が困難であった。今後、軸方向鉄筋の本数の多い供試体や間隔が狭い供試体を対象とした腐食実験から軸直角方向の相関性を理解することが必要である。

次に、腐食生成物厚さのモデル化の改善点について述べる。本研究で提案した腐食生成物厚さモデルは、X線画像とデジタル画像処理を用いることで腐食生成物を可視化し、腐食実験条件が腐食生成物に及ぼす影響を考慮したモデル化を行った。一方で、鉄筋腐食生成物量に影響を及ぼすと考えられる鉄筋径の違いを考慮できていない。今後は実験的な検討を行い、鉄筋径など構造諸元の異なるRCはりを含めたモデル化を行う必要がある。

最後に、Non-FEAによる腐食ひび割れ幅分布の再現性について述べる。提案した腐食生成物モデルを用いることで、既往のモデルを用いた場合に比べて腐食ひび割れ幅の再現精度を向上することができた。一方で、鉄筋腐食率が高い場合に腐食ひび割れ幅を過大評価した。これは、腐食生成物厚さを剛体と仮定して与えていることが原因であると考えられる。今後は、腐食生成物の弾性係数等の弾性的性質に及ぼす影響やコンクリートの空隙への侵入の影響を考慮した Non-FEA の開発を行う必要がある。また、断面寸法の違いが腐食ひび

割れ幅の大きさに影響していることがわかったため、今後は、断面寸法の影響を考慮したデータベースを構築していく必要がある。

本研究において、pix2pixによる予測精度は、Non-FEAによる腐食ひび割れ幅の再現精度と相関があった。つまり、Non-FEAによる腐食ひび割れ幅の再現精度向上が鉄筋腐食率分布の予測精度向上につながる可能性がある。

## 7.2 劣化 RC 部材の耐荷力推定に必要なカメラの性能

6.4.2 に示した通り、ドローン撮影により得られた腐食ひび割れ幅分布を用いた場合は、耐荷力を過大に評価した。これは、ドローンで撮影した画像の画質が粗く腐食ひび割れ幅を正しく計測できていなかったことが原因であると考えられる。ドローンによる撮影画像が粗くなった原因として、撮影時に RC はりの影になること、ドローンの揺れにより画像が安定しないことがあげられる。近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅分布から推定される耐荷力分布は、実験値を精度よく推定していたため、近接撮影で得られた画像の画質と同程度の画像取得が必要であるといえる。腐食ひび割れ幅は錆汁などの汚れが付着していることが多いため、高精度な画像の取得が求められる。効率的な点検に向けて、遠隔操作が可能なドローンやロボットの活用は有用であるため、高精細カメラを搭載したドローンを用いることで、風の影響を受けない距離からでも高画質な画像が撮影可能になると考えられる。また、一定距離を保ちながら、さらには十分な明るさを確保可能なドローン等の撮影機器の開発が必要である。

## 7.3 電食実験で生じる鉄筋腐食生成物の理解

本研究では、X線画像とデジタル画像処理によって腐食生成物厚さを可視化・測定し、その厚さを Non-FEA に適用することで腐食ひび割れ幅の再現精度を向上させた。一方で、膨張圧に寄与する腐食生成物を過大評価している可能性があり、その結果、腐食ひび割れ幅も過大に計算される課題が残されている。そこで、電食実験を行い、腐食生成物の弾性係数等の腐食生成物性状を調査することによって、膨張圧に寄与する腐食生成物量を定量化する必要がある。

一方で、電食実験では、流れ出しのほか、結晶化していない腐食生成物の割合が多いことから、膨張圧に寄与する腐食生成物が少なく、自然腐食とは鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係が異なっている可能性がある。腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食率を予測する機械学習モデルの構築では、この両者の関係が非常に重要であり、自然腐食に近い関係をモデル化する

必要がある。電食実験は、人工的に腐食を制御可能である点で実験的に腐食を理解するのに有用であるため、電流密度の異なる電食実験と自然腐食の条件に近い乾湿繰返し実験を比較し、自然腐食に近い環境を再現できる電食実験方法の開発が必要である。

#### 7.4 載荷実験途中で得られる情報を用いた劣化 RC 部材耐荷力の更新

本研究では、腐食ひび割れ幅分布情報から鉄筋腐食率を予測し、耐荷力を確率密度分布の形で推定した。このような耐荷力の確率密度分布に対して、構造物が載荷実験途中にある荷重を受けることができる場合、耐荷力はこの荷重よりも大きいため、耐荷力の確率密度分布を更新することができる<sup>7-1)</sup>。一方で、耐荷力を更新するには大きな荷重をかける必要があり、腐食した RC 部材の様に破壊に対して不確実性の高い構造物に対しては、荷重を用いた耐荷力分布の更新は危険であると考えられる。そこで、荷重以外の指標から耐荷力を更新する必要がある。例えば、4.4.3.3 で示したように、曲げひび割れ性状は局所的に大きな腐食のある位置と正の相関があると考えられ、劣化状況を知る指標となり得る。腐食ひび割れ幅分布情報だけでなく、載荷実験途中で得られる情報を加えることで、より正確に耐荷力分布を推定できると考えられる。今後は、腐食劣化 RC 部材に対する耐荷力分布の更新手法を確立していく必要がある。

### 参考文献

- 7-1) Eva, L, Cor, V., Ane de, B., and Dick A, H.: State-of-art on load testing of concrete bridges, Engineering Structures, Vol.150, pp.231-241, 2017

## 8. 結論

本研究では、ドローンにより取得した腐食ひび割れ幅分布情報から鉄筋腐食率分布を予測し、塩害劣化 RC 部材の残存耐荷力を評価した。本研究の特徴は、ドローンを用いて得られた腐食ひび割れ幅分布情報から機械学習 (pix2pix)・非線形有限要素解析 (Non-FEA)・モンテカルロシミュレーション (MCS) を用いて、鉄筋腐食率分布の予測と確率論的耐荷力評価を行った点、その結果から腐食ひび割れ幅の取得精度が耐荷力推定に及ぼす影響を調査した点、さらに、鉄筋腐食率分布を予測する機械学習の構築に必要なデータベースの作成において、X 線画像とデジタル画像処理によって可視化した腐食生成物をモデル化することで、腐食ひび割れ幅の再現精度を向上させた点にある。

本研究で得られた結論は以下の 5 点である。

- (1) 構造諸元 (軸方向鉄筋の間隔, 鉄筋径) と目標腐食率の異なる 3 本の軸方向鉄筋を有する RC はり 10 体の電食試験を行い、それらのパラメータが鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係に与える影響について調査した。その結果、鉄筋の間隔が狭い供試体では同程度の鉄筋腐食率において腐食ひび割れ幅が小さい傾向があること、鉄筋径が大きい供試体では同程度の鉄筋腐食率において腐食ひび割れ幅が大きい傾向にあること、電流密度による影響は 1 本の軸方向鉄筋を有する RC はりに比べて少ないことが示された。このように、パラメータが鉄筋腐食率と腐食ひび割れ幅の関係に影響を与えていることが示された。
- (2) デジタル画像処理により、腐食ひび割れ幅を半自動的に取得した。ドローン撮影で得られた腐食ひび割れ幅と近接撮影で得られる腐食ひび割れ幅を比較することで、撮影方法の違いが腐食ひび割れ幅の測定精度に及ぼす影響を調査した。ドローン撮影では、RC 部材の影やドローン自体の揺れにより、ドローンの性能にかかわらず、画質の粗い画像となった。その結果、錆汁を伴う腐食ひび割れ幅の検出が困難となり、腐食ひび割れ幅を過小に計測した。
- (3) X 線画像とデジタル画像処理を用いることで、RC 部材内部の腐食生成物を可視化した。そして、その厚さを測ることで、腐食生成物厚さ・形状のモデル化を行った。モデル化の際には、腐食実験条件の違いが鉄筋腐食率と腐食生成物厚さに及ぼす影響を考慮した。これより、Non-FEA を用いた腐食ひび割れ幅の再現精度が既往研究に比べて向上

した。また、これらの腐食生成物のモデルを用いた Non-FEA を用いて、計算機上で多数の劣化 RC 構造物を作り出すことによってデータベースの構築を可能にした。

- (4) 画像間の関係を学習する機械学習モデルである pix2pix を用いて、入力画像に構造諸元（鉄筋径，軸方向鉄筋の間隔）を組み込むことにより，複数本の鉄筋を有する RC はりを対象として，腐食ひび割れ幅分布だけでなく構造諸元（細目）を考慮した鉄筋腐食率分布の予測を可能にした。1つの pix2pix モデルで様々な構造諸元（細目）を持つ RC はりに適用可能なモデルを構築した。
- (5) ドローン撮影で得られた腐食ひび割れ幅分布情報から，pix2pix モデルを用いて鉄筋腐食率分布を予測し，耐荷力の確率密度分布の算出を可能とした。近接撮影で得られた腐食ひび割れ幅分布情報から推定した耐荷力と実験結果の耐荷力のそれぞれと比較することで，耐荷力推定に影響を及ぼす腐食ひび割れ幅の取得精度を提示した。