

(一財)日本建設情報総合センター研究助成

第 2022-6 号

点群データを活用した鋼製橋脚の FEM モデル自動構築および
解析結果の検証

名古屋工業大学 日高 菜緒

目次

研究者紹介	1
第1章 研究背景と目的	2
1. 1 我が国の維持管理, 新設プロジェクトの現状.....	2
1. 2 FEM モデルを用いた耐荷力解析	2
1. 3 FEM モデルを用いた耐荷力解析の課題	3
1. 4 本研究の目的	3
第2章 鋼製橋脚載荷実験の点群データ計測	4
2. 1 概要	4
2. 2 実験装置の点群データ計測	5
2. 2. 1 据え置きレーザー計測	5
2. 2. 2 ハンディレーザー計測	6
第3章 点群データから FEM モデル自動作成方法	7
3. 1 生成する FEM モデルの要件	7
3. 2 点群データから FEM モデルを構築する方法	7
3. 2. 1 リード線除去	8
3. 2. 2 骨組み構造 (節点・要素) の検出.....	9
3. 2. 3 柱部のシェルモデル生成	11
3. 3 FEM モデル生成結果	12
3. 4 FEM モデルの精度検証	13
3. 4. 1 解析条件	13
3. 4. 2 解析結果	13
3. 4. 3 解析結果に基づく精度検証の考察.....	15
第4章 まとめと今後の展望	17
謝辞	18
参考文献	19

研究者紹介

日高 菜緒 (ひだか なお)

博士 (工学)

現職：名古屋工業大学 大学院工学専攻 社会工学系プログラム 環境都市分野 助教

主な著書

- 1) Hidaka N., Hashimoto N., Magoshi K., Nonaka T., Obata M., and Watanabe E., “Construction of a Practical Finite Element Model from Point Cloud Data for an Existing Steel Truss Bridge”, Proceedings of the 23th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (ConVR 2023), pp. 1155-1166, Florence, 2023.11
- 2) 日高菜緒, “点群データ処理アルゴリズムの総括および土木分野での活用事例と展望, AI・データサイエンス論文集”, Vol. 4, No. 3, pp. 301-309, 2023.11
- 3) 日高菜緒, 橋本尚史, 中村真貴, 馬越一也, 野中哲也, 小畑誠, “点群データを活用した鋼橋の解析モデルの構築および精度検証,” 構造工学論文集, Vol. 69A, pp. 637-647, 2023.3
- 4) Hidaka N., Michikawa T, Motamedi A, Yabuki N., and Fukuda T., “Polygonization of Point Cloud of Tunnels Using Lofting Operation,” International Journal of Automation Technology, Vol.12, No.3, pp. 356-368, 2018.5
- 5) Hidaka N., Michikawa T., Motamedi A, Yabuki N., and Fukuda T., “Polygonization of Point Clouds of Repetitive Components in Civil Infrastructure Based on Geometric Similarities,” Automation in Construction, Vol, 86, pp. 99-117, 2018.2
- 6) 日高菜緒, 道川隆士, 矢吹信喜, 福田知弘, Ali Motamedi, “スケルトンと断面を利用したモノレールのレール部点群のポリゴンモデル化手法の開発,” 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol. 72, No. 2, pp. I_156-I_166, 2016.3

第1章 研究背景と目的

1. 1 我が国の維持管理, 新設プロジェクトの現状

我が国では、戦後の高度成長期に建造した膨大な数の橋梁が近い将来更新時期を迎える。逼迫した財政状況から、更新時期を迎える橋梁すべてを建て替えることは現実的でないため、維持補修の優先順位付けや壊れる前の予防保全等、既設橋梁の長寿命化による戦略的な更新が求められる。また、新設高架橋においても、更地から新たに橋梁を建築せずに、既設橋梁を補修・拡張するプロジェクトも立ち上げられている。そのため、既設橋梁の維持補修や、既設橋梁の増設に伴う新設工事において、対象の構造物に荷重が作用した際にどのような挙動を示すのかを事前に定量的に評価する技術が有用となる。

1. 2 FEM モデルを用いた耐荷力解析

鋼橋の解析には、FEM (Finite Element Method) モデルを用いた数値解析がある。文献 1)等により具体的な解析手法やモデルが提示され、現在も研究が精力的に進められている^{2)~6)}。FEM モデルは図 1.1 に示すように、骨組み構造を反映した梁モデル、梁モデルの要素に断面の情報を当てはめることで合理的な構造計算を可能にするファイバーモデル、厚さを有する面で構成することで局部座屈を考慮できるシェルモデル、3次元の形状を再現したソリッドモデルがある。構造物の耐荷力解析において合理的なモデルはファイバーモデルであり、局部座屈が支配的な場合はシェルモデルが併用される。鋼橋の FEM モデルの一例を図 1.2 に示す。モデルの構成 (部材における節点、要素の定義、部材同士の接合、境界条件、材料条件など) の妥当性について、構造実験をとおして検証され続けている⁷⁾。

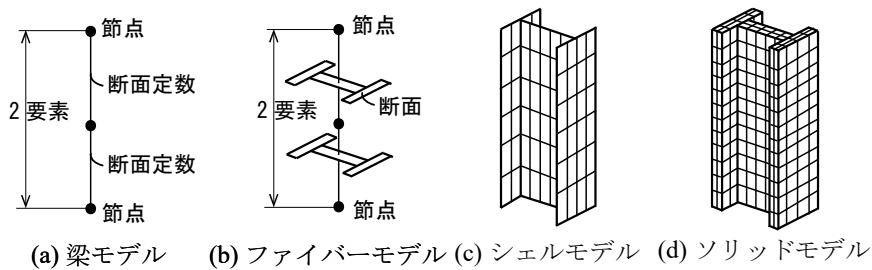


図 1.1 FEM モデルの種類

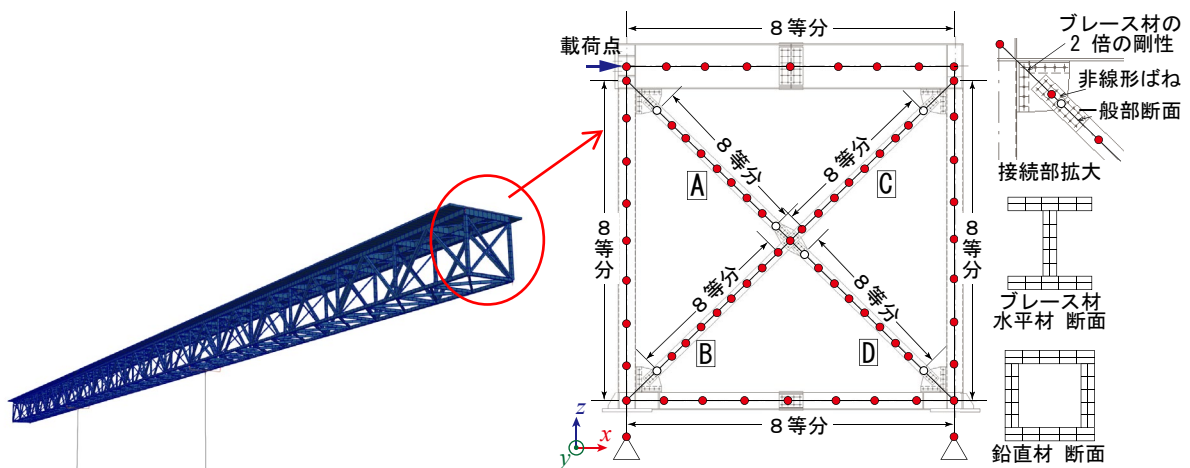


図 1.2 鋼橋の FEM モデルの一例 (図は文献 8)より引用)

1. 3 FEM モデルを用いた耐荷力解析の課題

対象構造物のFEMモデルを作成する場合は、基本的には必要な寸法を図面や実測から取得して、指定のソフトウェアにそれらのパラメータを入力する。しかしながら、古い橋梁は図面が残されていない、図面があっても維持補修や損傷等で竣工図から形が変わっている可能性がある。そのため、実寸計測がもっとも対象構造物の実構造が取得できる手段にあたるが、橋梁は大規模構造物なのでFEMモデル構築のためのパラメータが膨大なため、1つ1つの寸法を手作業で計測することは時間がかかる上に計測漏れの恐れもある。

1. 4 本研究の目的

本研究ではレーザースキャナや写真測量から取得できる点群データに着目する。点群データは短時間・低コストで対象物の3次元位置座標や色情報を取得することが可能であるため、部材の形状情報を自動取得でき、荷重で生じた局部変形の定量的評価ができることが期待される。しかし、点群データは図1.3のように離散的な点の集合データのため、FEMモデルの構築のために必要なパラメータや変形量を得るためには、幾何学アルゴリズムにもとづく処理を要する。橋梁上部工の点群データからファイバーモデルを構築する手法については、文献8)で実装しているが、局部変形が予測される下部工の点群データからのFEMモデル化についてはまだ取り組みがない。

そこで、本研究では、複雑な挙動による局部変形が予測される高速道路の鋼製橋脚の点群データからFEMモデルを自動生成する手法を開発し、荷重時の変形の定量的評価を行うことを目的とする。点群データから自動生成したFEMモデルで荷重解析を行い、図面から作成したモデルと比較することで解析精度を評価する。

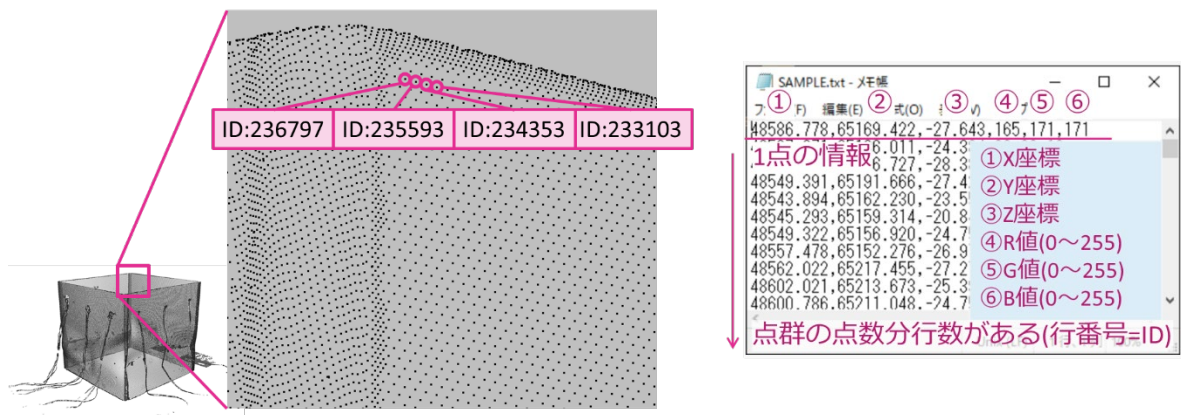


図 1.3 点群データのデータ構成

第2章 鋼製橋脚載荷実験の点群データ計測

2.1 概要

2022年11月28日に愛知工業大学にて、1/5スケールの鋼製橋脚の供試体を用いた載荷実験を実施した際の形状を、点群データ計測した。実験に使用した供試体を図2.1に、載荷装置と供試体の設置状況を図2.2に示す。橋脚柱は図2.1のとおり、4枚のパネルが溶接された中空断面の構造で、内側に8本の縦リブと2枚のダイヤフラムがある。

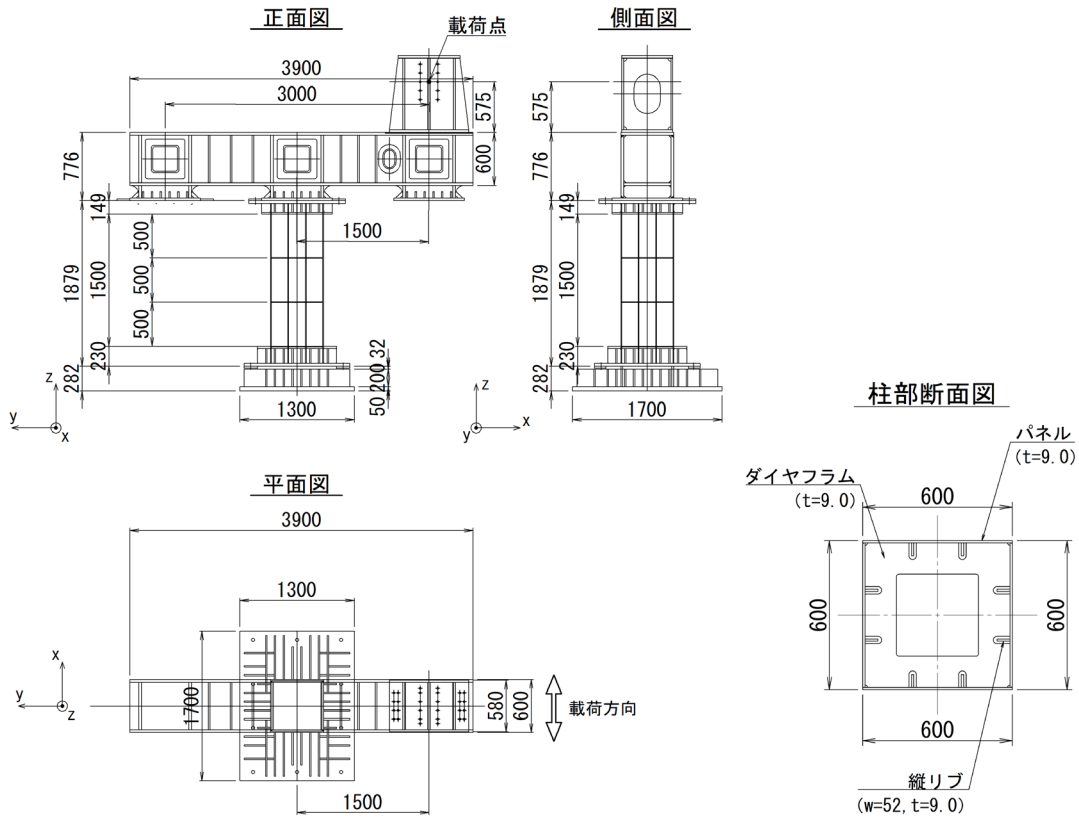
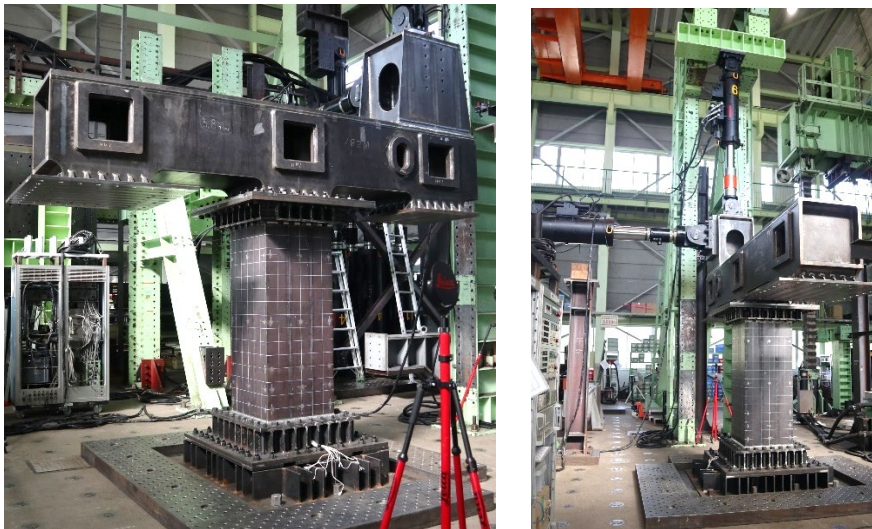


図 2.1 供試体図面



(a) 正面

(b) 側面

図 2.2 載荷装置と供試体の設置状況

2. 2 実験装置の点群データ計測

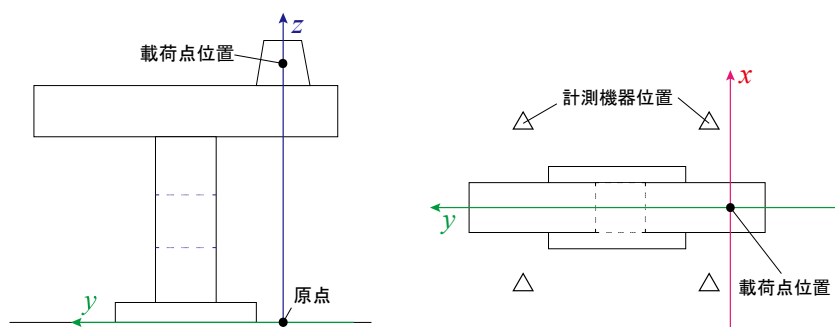
実験開始前の供試体の形状、位置座標を「据え置きレーザー計測」と「ハンディレーザー計測」の2通りの手段で計測した。計測手段の詳細と計測した点群データについて述べる。

2. 2. 1 据え置きレーザー計測

据え置きレーザー扫描仪は供試体の全体形状を計測するために使用した。使用機種はLeica RTC360（解像度：6mm@10m，誤差：1.9mm@10m）である（図2.3(a)）。図2.3(b)のように荷重点から地面に鉛直投影した位置に原点座標を設定し，供試体の面外方向を x 軸，面内方向を y 軸，高さ方向を z 軸と設定した。図2.3(b)のとおり4箇所計測し，点群データを重ねる。計測した点群データを図2.3(c)に示す。点数は実験室全体が144,340,978点，橋脚とアクチュエータの部分を取りだしたものが8,030,700点，点密度は70点/cm²～100点/cm²程度であり，計測時間は1箇所につき約1分であった。



(a) 計測機器



(b) 原点位置と計測機器設置箇所

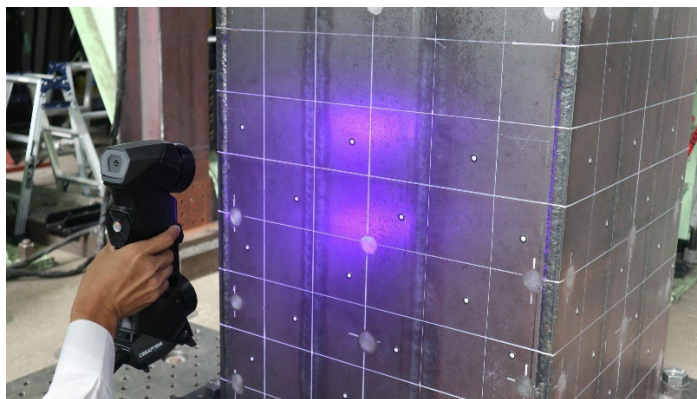


(c) 計測点群データ

図2.3 据え置きレーザー計測機器と計測点群データ

2. 2. 2 ハンディレーザー計測

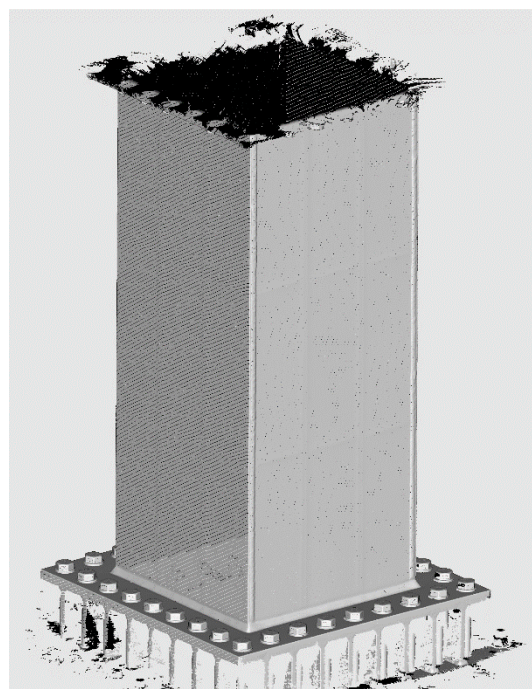
ハンディレーザー scanner は供試体の柱部の詳細形状を計測するために使用した。使用機種は HandySCAN BLACK™ |Elite (解像度 : 0.025mm@30cm, 誤差 : 0.025mm@30cm) である (図 2.4(a))。高解像度かつ誤差が小さいことから、初期不整や縦リブの溶接線の取得も目的にする。レーザー scanner から対象物までの距離は約 30cm である。図 2.4(b)に示す柱部分の全面を計測した。計測点群データを図 2.4(c)に示す。点数は 4,658,203 点、平滑部の点密度は 44 点/cm² ~100 点/cm² 程度、変化点の点密度は 204 点/cm² ~625 点/cm² 程度であった。ハンディレーザー計測の点群データは据え置きレーザー計測の点群データと座標系を揃えている。



(a) 計測機器



(b) 供試体 (柱部拡大)



(c) 計測点群データ

図 2.4 ハンディレーザー計測機器と計測点群データ

第3章 点群データから FEM モデル自動作成方法

3.1 生成する FEM モデルの要件

本章では、第2章の構造実験にて計測した点群データから、FEM モデルを自動生成する手法を開発したことについて述べる。

生成する FEM モデルは骨組み構造を基本とするが、局部座屈が支配的になる可能性がある中空断面の柱部やその内部の縦リブ、ダイアフラムについてはシェルモデル化する。従って図 3.1 に示すような FEM モデルを生成する。なお、本実験では供試体の梁部はほぼ剛体としてみなせることから、剛体の梁モデルとする。

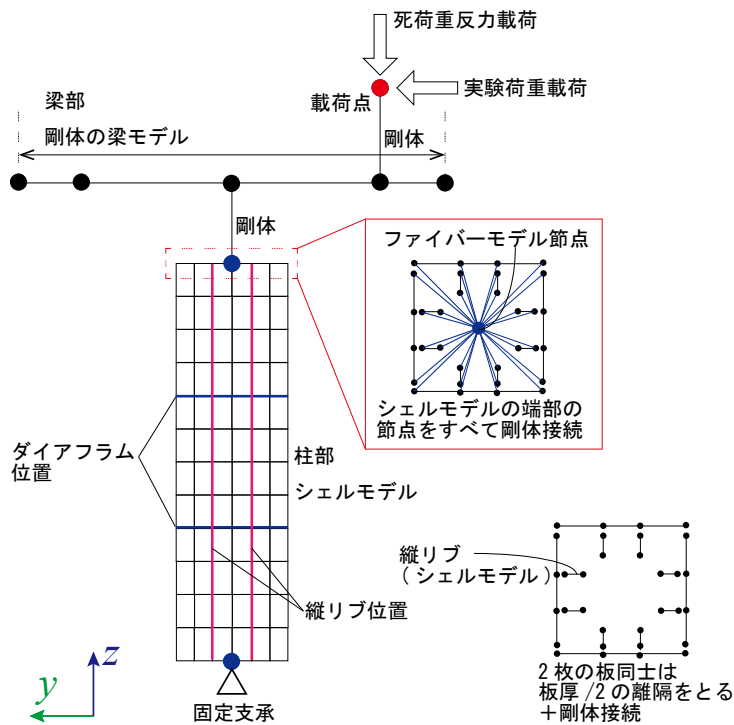


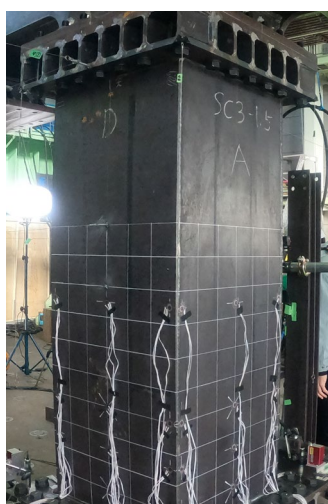
図 3.1 生成する FEM モデルの構造

3.2 点群データから FEM モデルを構築する方法

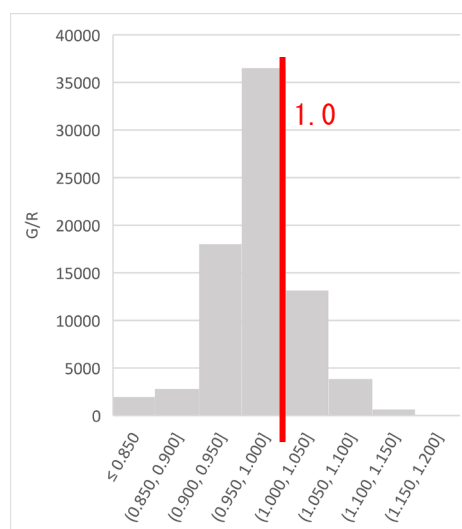
点群データから FEM モデルを自動生成する手法は、「リード線除去」、「骨組み構造（節点・要素）の検出」、「柱部のシェルモデル生成」の3ステップで構成される。以降、各手法について説明する。

3. 2. 1 リード線除去

供試体には実験時ひずみゲージが取り付けられていたため、実験中に計測した点群データにはひずみゲージのリード線の点が含まれる。これらはFEMモデル化において不要なため、事前に除去する。リード線を除去する方法として、点のRGB値に基づくフィルタリングを適用した。図3.2(a)に示す供試体とリード線は図3.2(b)のようにRGB値の比率がほぼ同じかつ、RGB値が広範囲に分布している特徴に着目して、リード線の色をRGB値の1つ（ここではG値）が極端に大きくなるように塗装した（図3.2(c)）。これにより、リード線の点のG/RもしくはG/Bの値が供試体のそれより大きくなり（図3.2(d)）、閾値設定によりリード線を自動で除去することができる。



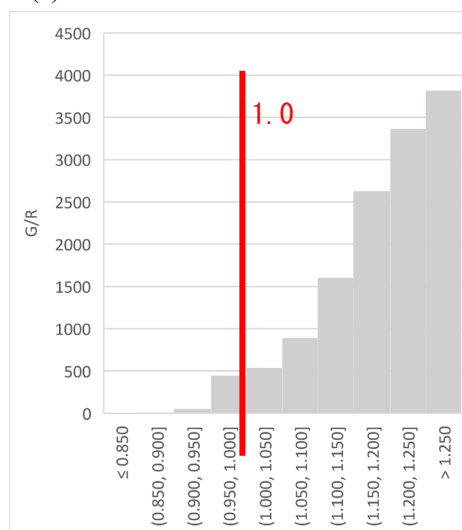
(a) 供試体とリード線（無着色）



(b) (a)のリード線の点のG/R値の点数分布



(c) 供試体とリード線（着色後）



(d) (c)のリード線の点のG/R値の点数分布

図3.2 リード線の色分布

3. 2. 2 骨組み構造（節点・要素）の検出

アクチュエータを含む供試体の計測点群データから、骨組み構造にあたる節点と要素を検出する。

【リブ・ダイアフラム位置の検出】

本供試体は図 3.1 に示すように、柱内部にダイアフラムと縦リブが含まれる。これらは直接レーザーが照射されないため点群データで形状が取得できないが、溶接の影響でわずかに表面が盛り上がっていることから位置は検出することができる。

図 3.3 に示すように、精度と点密度が高いハンディレーザースキャナで計測した点群データに対して法線を求め、それらの法線を水平角と鉛直角に分離すると、溶接位置近くのみ異なる特徴がみられる。これらの点を RANSAC 法⁹⁾で直線に近似することで、ダイアフラムと縦リブのラインを取得することができる。

同じ高さのダイアフラムのラインの 4 交点の重心を用いることで、柱部の中心軸を求められる。(図 3.4)

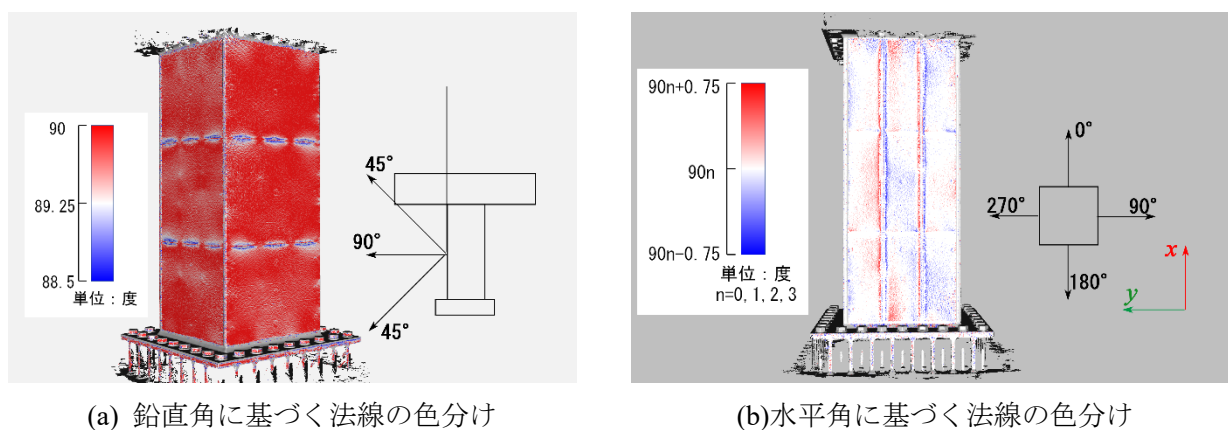


図 3.3 柱点群の法線の角度を利用した溶接部の検出

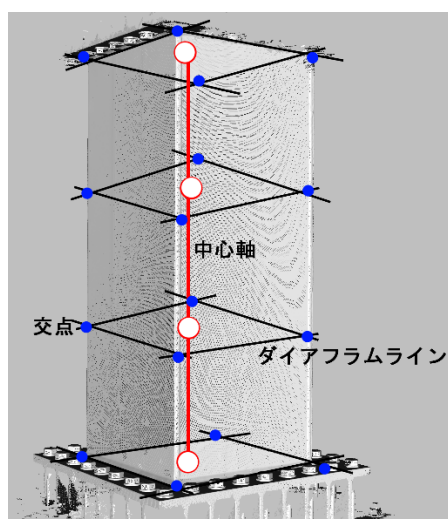


図 3.4 ダイアフラムのラインを用いた柱部の中心軸検出

【梁部分のモデル化】

梁部分のモデル化のためには、梁の中心軸の検出が必要になる。そこで、点群データの法線と曲率のパラメータが近い隣接点を同じグループに追加するクラスタリング手法である領域成長法¹⁰⁾を用いて、橋脚の点群データを面のセグメントに分離する。分離したセグメントごとに図心と法線、面積を求め、そのセグメントの位置と向き、大きさからどのセグメントにあたるか認識する。梁部の前面・背面に合計6つあるハンドホールのセグメントを抽出し、前面・背面に位置するハンドホールを対応付け、それぞれの図心の midpoint をとることで梁の中心部を通る軸線が得られる。(図 3.5)

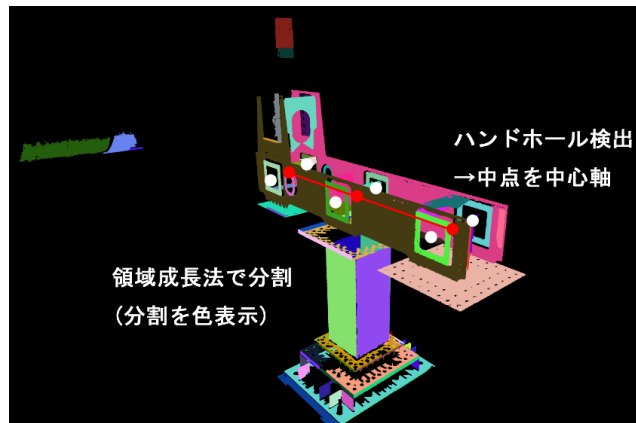


図 3.5 領域成長法を用いた梁部の中心軸検出

【アクチュエータと载荷点の検出】

本実験で用いたアクチュエータは円柱形状で、2つのアクチュエータの载荷線の交線が载荷点にあたる性質を利用することで载荷点を取得する。前述の領域成長法で分離したセグメントの法線閾値に基づき (xyz 成分のいずれかが突出してなく分散しているもの) アクチュエータのセグメントを検出し、RANSAC 法で円柱にフィッティングすることで、円柱の半径と中心軸の直線式のパラメータを得ることができる。2本の円柱の中心軸の交点を求めることで载荷点の座標を得ることができる。なお、2直線の交点はねじれの位置にある可能性を考慮して、交点は2直線に直交し、かつ2直線との距離が最小になる線分の midpoint と定義する。(図 3.6)

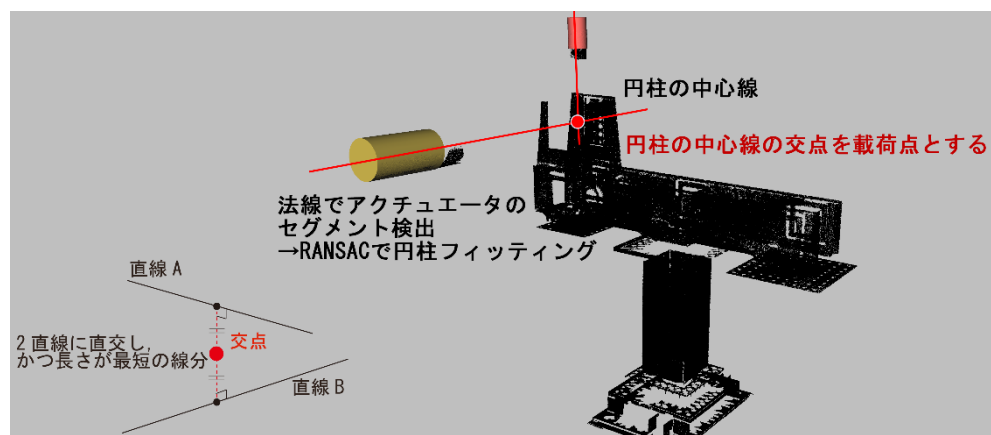


図 3.6 円柱のフィッティングを用いたアクチュエータと载荷点の検出

3. 2. 3 柱部のシェルモデル生成

骨組み構造が検出できたら、次に柱部のモデルを生成する。柱部は表面の4面のパネルと内側の縦リブ、ダイアフラムで構成されるため、それらに関するパラメータを点群データから取得する。

まず、柱の底部を起点に、柱の中心軸に沿って等間隔に断面をスライスする。次に、得られた断面と前述した縦リブのラインの交点から、柱の4面のパネルの接合点と縦リブ溶接点を検出する。なお、隣り合うシェルの板厚による重なりを防ぐために、パネルの接合点と縦リブ溶接点の位置を補正する。そして、2点の接合点もしくは縦リブ溶接点の間を等間隔に分割する。この処理をスライスした断面分繰り返し、上下左右隣り合った4節点を結び1枚のシェルを生成する。(図3.7)

接合点もしくは縦リブ溶接点を結ぶ線分を線形補間することで得られる節点では初期不整などの実際の形状を反映できない可能性があるため、点群データを用いて実際の形状に補正する。柱の点群データ内から節点に対する最近傍点を検索して置き換える方法では、点に隙間があることから斜め方向の最近傍点を取得する可能性があるため、その最近傍点を中心に局所的な平面を作り、節点をその平面に投影して補正する。(図3.8)

縦リブのシェルモデルは前述の縦リブ溶接点を起点に、同じ面の2点の縦リブ溶接点を結ぶ線分に対して垂直な方向に節点をサンプリングすることで生成する。

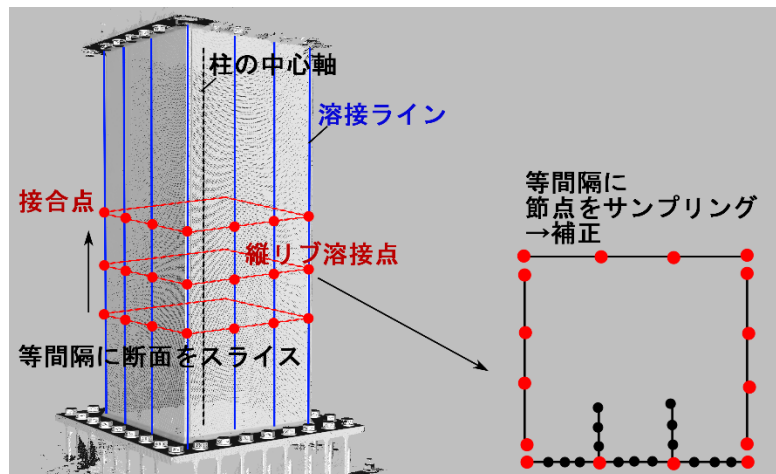


図 3.7 柱部のシェルモデル生成

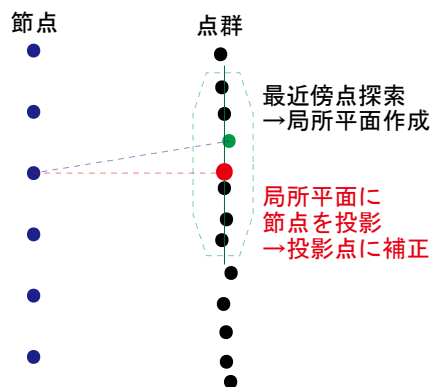


図 3.8 節点の座標補正

3. 3 FEM モデル生成結果

3. 2 で述べた手法を表 3.1 の開発環境にて実装した。実験前に据え置きレーザースキャナとハンディレーザースキャナで計測した点群データをそれぞれ1つずつ入力した結果, 計算時間は約 2.5 分であった。材料条件や荷重条件は解析ソフト上で入力する。

なお, 本論で用いた計測手法では各部材の板厚と縦リブの高さを取得することが困難であったため, これらの値については図面から読み取った値 (図 2.1) を適用している。

表 3.1 開発環境

CPU	Intel(R) Xeon(R) Silver 4214R CPU @ 2.40GHz 2.39 GHz (2 processors)
メモリ	64GB
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3080 (10GB)
OS	Windows 10 Enterprise 22H2 64bit
開発環境	Microsoft Visual Studio Community 2022 64bit
ライブラリ	Point Cloud Library (PCL) 1.12.0 64bit ⁽¹⁾ OpenCV 4.5.5 64bit ⁽²⁾
プログラミング言語	C++
解析ソフト	ScanFEM ⁽³⁾

生成された FEM モデルを図 3.9 に示す。

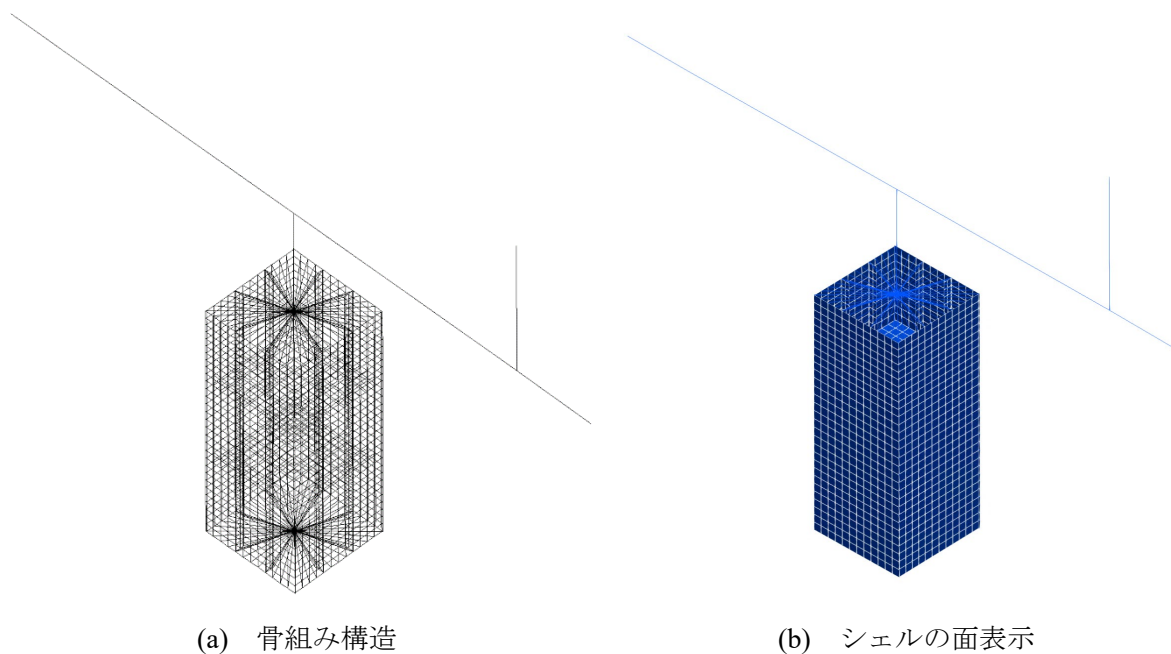


図 3.9 提案手法で生成した FEM モデル

3. 4 FEM モデルの精度検証

3. 4. 1 解析条件

供試体の計測点群データから提案手法で生成した FEM モデル（以降「点群モデル」と表記）と図面から手作業で作成した FEM モデル（以降「図面モデル」と表記）に載荷実験時と同様の荷重を作用させ、挙動を確認した。両モデルの違いは、柱部のシェルモデルや梁部の梁モデルの節点の座標値で、それ以外のモデル化（要素分割、接合部のモデル化など）、荷重条件、拘束条件等の境界は、両モデルとも同一である。

荷重は図 3.10 に示すように、載荷点にまず死荷重反力 540kN を作用させ、その後面外方向（x 軸方向）に強制変位 0.2m を作用させた。

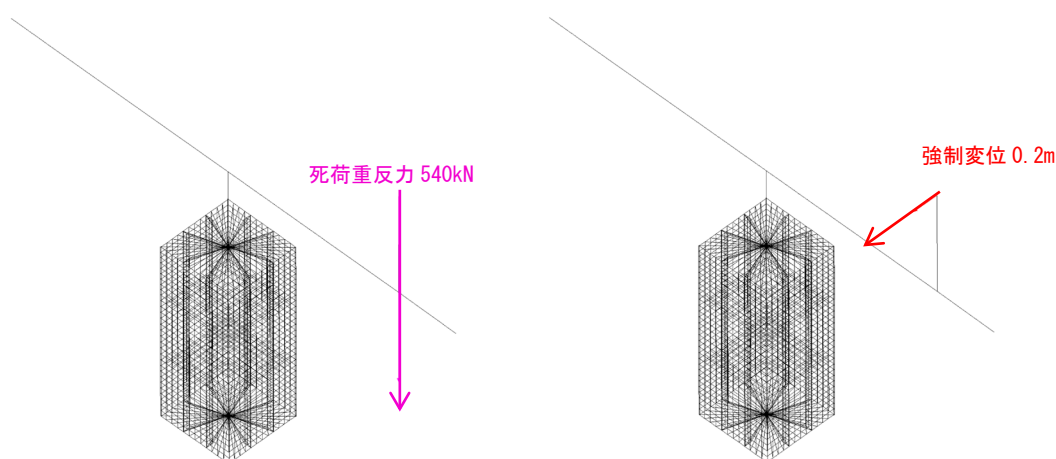


図 3.10 載荷条件

3. 4. 2 解析結果

点群モデルと図面モデルの載荷点位置での荷重変位曲線を図 3.11 に、面外方向の水平変位が 0.2m のときの柱部の応力分布図を図 3.12 に示す。このように、点群モデルと図面モデルはほぼ同等の挙動を示すことが確認でき、点群データから FEM モデルを生成できる可能性を示した。一方で、図 3.11 によると点群モデルは図面モデルよりも降伏荷重や最大荷重がわずかに低く、さらに図 3.12 によると、局部変形が発生した付近の応力分布が点群モデルのほうがわずかに低いことが判明した。

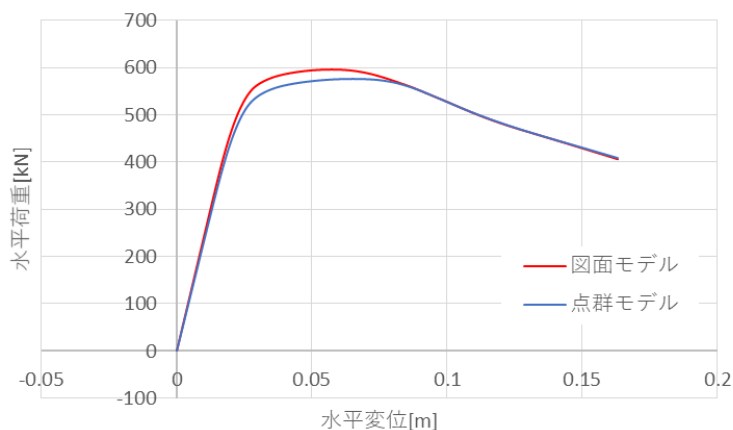


図 3.11 載荷点真下での水平荷重—水平変位の関係

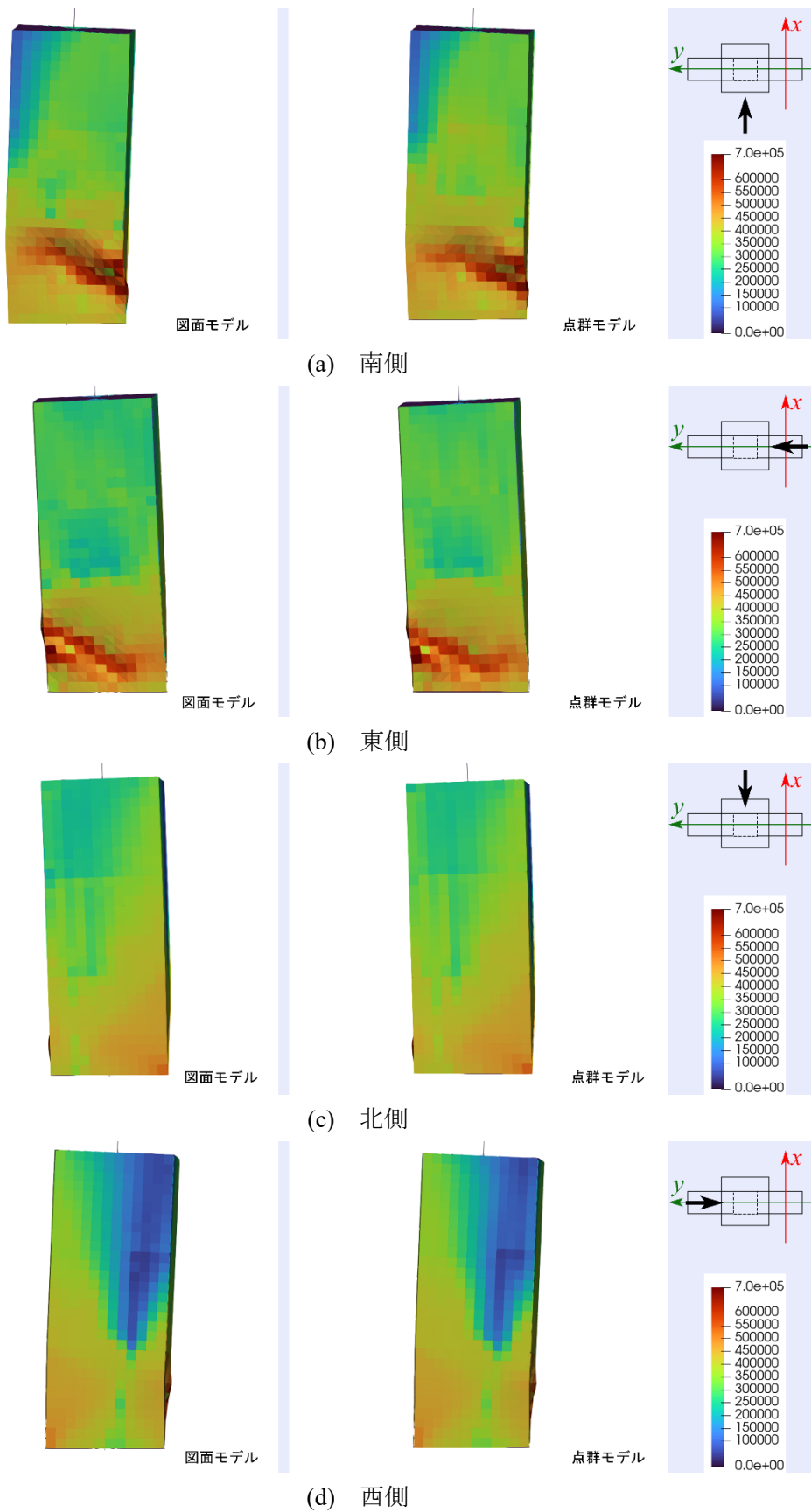


図 3.12 4 方向から見た面外方向の水平変位が 0.2m のときの柱部の応力分布図

3. 4. 3 解析結果に基づく精度検証の考察

本論にて、点群データから自動生成した FEM モデルを用いた構造解析の可能性を示した。荷重変位曲線や一部の局部座屈付近の応力分布がわずかに異なる理由は、初期不整など実構造と図面に乖離があったこと、もしくは提案手法の点群処理の精度が不十分であったことが考えられる。しかしながら、载荷実験結果との比較が未実施であるため、今後载荷実験との比較により更に考察を深める。現在の载荷実験の変位評価は手で触ったり曲尺を当てたりすることで局部変形を確認したり、ある 1 点や直線を対象に変位計を設置したりと、面的かつ定量的な評価をしているとはいいがたい。その課題に関しても点群データを用いた新たな定量的な局部変形量の評価方法を検討しており¹⁴⁾、今後载荷実験との比較による考察の内容がより深まることを期待している。

本提案手法では柱部の内側にある縦リブやダイアフラムの位置は検出することができたが、板厚や縦リブの高さを取得することが困難であった。図 3.13 のように溶接は 1 枚の板につき両側 2 ヶ所行うが、溶接により盛り上がった位置は板の縁でなく少し外側にあり、2 本の溶接線を取得しその距離を求める方法では実際の板厚より大きな値が得られ、この値と実際の板厚との相関は現状特定できていない。しかし、パネルの板厚が得られれば、設計基準に基づき縦リブやダイアフラムの板厚、縦リブの高さを推定できる可能性がある。パネルの板厚は超音波計測でも得られるが、図 3.13 のような柱の接合の勝ち負けを計測点群データで取得できれば、パネルの板厚を取得でき、点群データから板厚や縦リブの高さも含めた FEM モデルが自動構築できることが期待される。

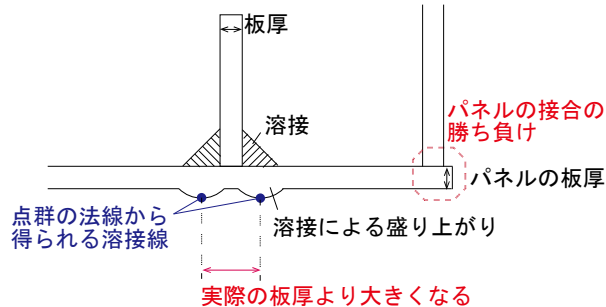


図 3.13 縦リブ・ダイアフラムの溶接方法と得られた溶接線と板厚の関係

また、本論で用いた供試体は、梁部のハンドホールを利用したモデリングを実施したが、ハンドホールがない鋼製橋脚も存在する。更に、梁の断面形状が一定でない鋼製橋脚も存在する。今後、汎用性を高めるためには、図 3.14 に示すような様々な形状の鋼製橋脚に対応できる手法を検討する必要がある。加えて、本提案手法では点群データ処理のために幾何学アルゴリズムを多数用いているが、現状それらの閾値のパラメータ設定はケーススタディごとにトライアル&エラーを通して妥当な値を設定している。様々な形状の鋼製橋脚に対して適用できる幾何学アルゴリズムの適切なパラメータを設定する手法が開発できれば、本手法の汎用性がさらに向上されることが期待される。



図 3.14 提案手法では梁のモデル化が容易でない鋼製橋脚の例

第4章 まとめと今後の展望

本論では、点群データを活用して図面を使わず効率的に部材断面や部材構造を取得することで FEM モデルを構築する手法を提案し、複雑な挙動が予測される高速道路の鋼製橋脚の供試体を用いた載荷解析を実施した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 供試体の形状および部材寸法等を正確に取得する方法（据え置きレーザー計測，ハンディレーザー計測を用いた点群データの取得方法）を提示した。
- 2) 取得した情報から FEM モデルの構築方法を確立した。
- 3) 点群データから自動的に解析モデルが生成できるプログラムを開発した。
- 4) 点群データから構築した点群モデルと図面から作成した図面モデルでの解析結果を比較すると、両モデルとも荷重変位曲線や応力図の傾向は似ているが、初期勾配，耐荷力にわずかな差が表れた。

最後に、本研究の課題と今後の研究について述べてみたい。本論では鋼製橋脚の点群データから自動的に FEM モデルを生成することができたが、板厚や縦リブの幅は自動取得できなかつたり、適用できない鋼製橋脚の種類が想定されたりと、汎用性に改善の余地がある。また、構造実験を実施したがその応答値との評価が未実施のため、今後載荷実験との比較により更に考察を深める。その際、現在の載荷実験の変位評価に代わる手法として、点群データから面的、定量的な変位評価手法を用いることで、考察の内容がより深まることが期待される。

謝辞

まず初めに、本研究助成をいただきました(一財)日本建設情報総合センターに、重ねて御礼申し上げます。

本研究で用いた点群データは、名古屋高速道路公社、名古屋工業大学、愛知工業大学の構造実験時の供試体を(株)亀田 橋本尚史様に計測いただき、構造実験においては愛知工業大学の鈴木森晶先生、嶋口儀之先生にご協力いただきました。また、(株)地震工学研究開発センター岩村真樹様に解析モデルの構成についてご教示頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 土木学会：2018 年制定 鋼・合成構造標準示方書 [耐震設計編]，丸善，2018.
- 2) 馬越一也，奥村徹，吉野廣一，野中哲也：繰り返し荷重下における鋼橋の 2 次部材のポストピーク挙動を考慮するモデル化と鋼アーチ橋への適用，構造工学論文集，Vol. 65A，pp. 214-224，2019.
- 3) 奥村徹，馬越一也，野中哲也，吉野廣一：非エネルギー吸収部材の損傷を伴う上路式鋼アーチ橋の構造全体系の地震時終局挙動，構造工学論文集，Vol. 66A，pp. 264-273，2020.
- 4) 山田忠信，野中哲也，馬越一也，吉山純平，鈴木森晶，嶋口儀之：既設上路式鋼アーチ橋のブレース材の終局強度およびガセットプレート補強方法に関する検討，構造工学論文集，Vol. 68A，pp. 69-81，2022.
- 5) 馬越一也，山田忠信，嶋口儀之，鈴木森晶，野中 哲也：ブレース材の塑性化を許容した鋼トラス橋の耐震性能照査，第 25 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp. 221-226，2022.
- 6) 長谷川秀也，野中哲也，森下宜明，吉野廣一，馬越一也，岩村真樹：曲げねじり弾塑性挙動が表現できるファイバーモデルの理論と逆 L 形橋脚への適用，第 25 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp. 265-272，2022.
- 7) 嶋口儀之，山田忠信，野中哲也，馬越一也，鈴木森晶：繰り返し荷重を受ける鋼トラス橋のブレース材の終局挙動に関する実験および再現解析，構造工学論文集，Vol. 68A，pp. 59-68，2022.
- 8) 日高菜緒，橋本尚史，中村真貴，馬越一也，野中哲也，小畑誠：点群データを活用した鋼橋の解析モデルの構築および精度検証，構造工学論文集，Vol. 69A，pp. 637-647，2023.
- 9) Fischler, M. A. and Robert, C. B.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381-395, 1981.
- 10) Ballard, D. H. and Brown, C. M.: Region Growing, In *Computer Vision*, Prentice Hall, pp. 149-165, 1982.
- 11) Rusu, R. B. and Cousins, S. :3D Is Here: Point Cloud Library (PCL), In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1-4, 2011.
- 12) OpenCV: <http://opencv.org/> (参照 2023.10.24)
- 13) 株式会社地震工学研究開発センター：SeanFEM ver.1.2.3 理論マニュアルと検証，2007.
- 14) 橋本尚史，日高菜緒，野中哲也，小畑誠：鋼製橋脚の変形計測における高精度点群データの活用に向けた検討，2023 年度土木情報学シンポジウム講演集 Vol. 48，pp. 229-232，2023.