

液状化地盤の側方流動予測とライフライン被害予測システムの開発

早稲田大学 工学部

濱田 政則

目 次

1. はじめに	1
2. 液状化地盤の側方流動および構造物基礎と埋設管路の被害	3
2.1 傾斜地盤における側方流動の事例	3
2.2 護岸の移動に起因する側方流動の事例	4
2.3 側方流動による基礎杭の被害	5
2.4 側方流動によるライフライン埋設管路の被害	6
3. 地盤変位の予測法に関する既往の研究	8
3.1 液状化地盤の流動特性	8
3.2 傾斜地盤の側方流動による地盤変位の予測手法	9
3.3 護岸移動に起因した側方流動による地盤変位の予測手法	10
4. 地盤ひずみと埋設管路の被害に関する研究	13
4.1 地盤ひずみの算定法	13
4.2 既往地震による地盤ひずみの算定	15
4.3 地盤ひずみと埋設管路被害の定量的関係	15
4.4 側方流動が基礎に及ぼす外力特性の基礎的研究	19
5. 側方流動とライフライン埋設管路の被害予測システムの構築	21
5.1 予測システムの概要	21
5.2 GIS によるデータベースの構築	22
5.3 液状化の判定, 側方流動による地盤変位と地盤ひずみの算定	22
5.4 地盤のひずみによる埋設管路の被害率の算定	23
6. 適用事例	24
参考文献	28

1. はじめに

液状化地盤が水平方向に数 m のオーダーで変位する現象, いわゆる側方流動は, 兵庫県南部地震をはじめとする既往地震において, 構造物基礎やライフラインシステムの地中構築物等に極めて甚大な被害を生じさせてきた. このため, 将来発生が予測される地震に対して側方流動による地盤の水平変位量の推定を適切に行い, 構造物基礎やライフライン施設に対する影響を予測して必要な対策を講じておくことが急務と考えられる.

早稲田大学 濱田研究室では 1983 年の日本海中部地震を契機として, 側方流動のメカニズムと変位予測手法に関し, 模型実験および既往地震における事例分析による研究を推進してきた. これらの研究成果に基づき, 液状化地盤の大変位が主として液状化土の流体的挙動によるとの考え方より地盤変位予測手法の提案を行ってきた.

液状化地盤の側方流動は, 数 100m 四方の緩傾斜地盤および広域にわたる埋立地に生ずることから, 変位量の予測にあたっては地盤条件と地形条件および護岸の構造条件などを効率的にかつ統一的に処理し, これにもとづいて広域に及ぶ地盤変位を精度よく推定されることが要求される. このため GIS を活用したデータベースによる「液状化地盤の側方流動システム」の開発を行ってきた.

本研究では, 本システムを拡張して, 上・下水道などの広域にわたるライフライン埋設管路の被害を予測するシステムの開発および流動変位に対する構造物基礎の変形挙動の解明を研究目標とした. このため, 側方流動による地盤ひずみと上・下水道管路の被害率の関係を兵庫県南部地震等の既往地震における事例分析より定量的に明らかにし, この結果を被害予測のシステムの中に組み入れた. また, 側方流動による地盤変位が構造物基礎に及ぼす外力特性を実験的に明らかにし, 「側方流動予測システム」によって推定される地盤変位に対する耐震性照査のための基礎的知見を得た.

「液状化地盤の側方流動とライフライン埋設管路の被害予測システム」の概要と, これを構築するための要素技術の関係を図 1.1 に示す.

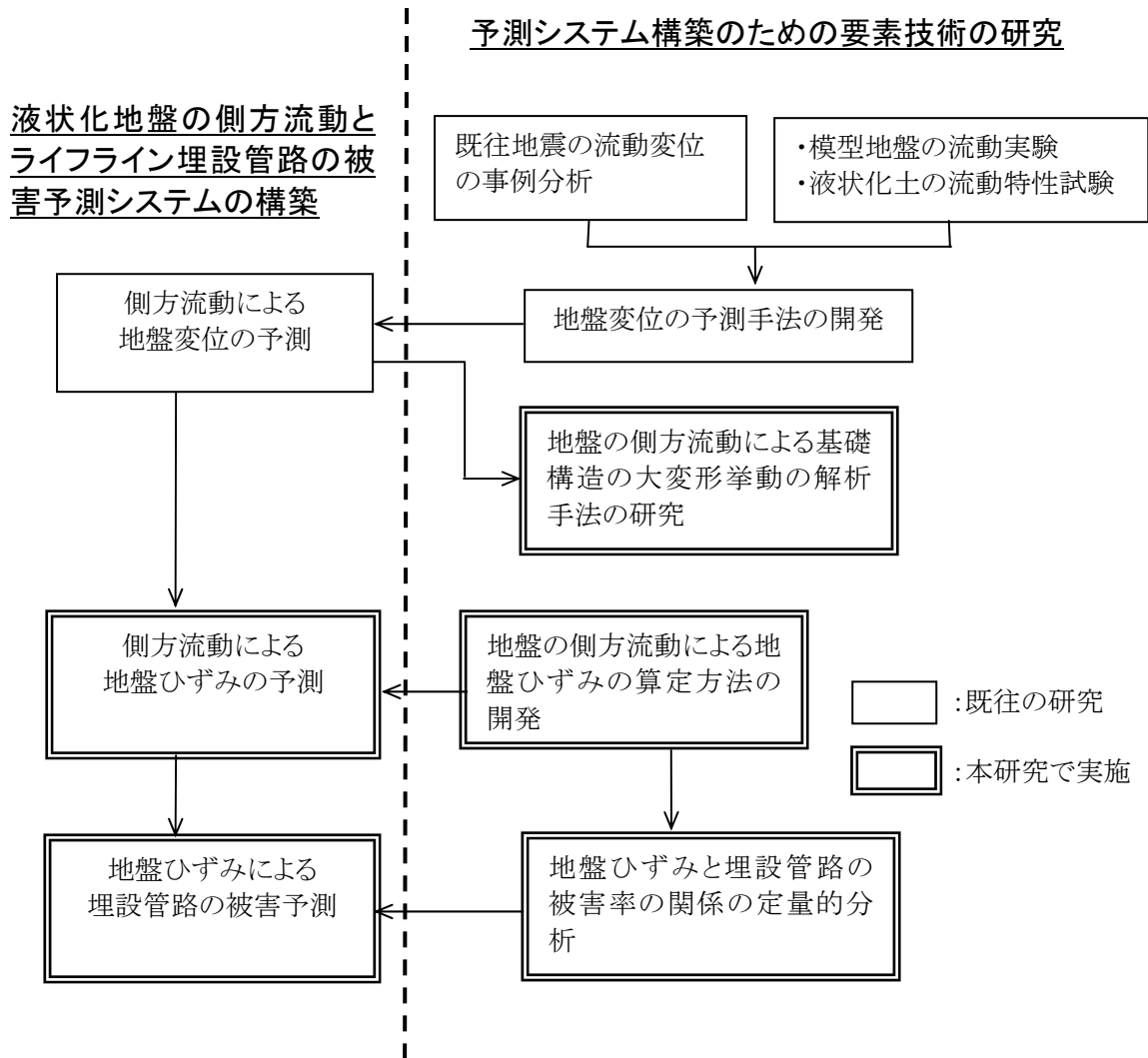
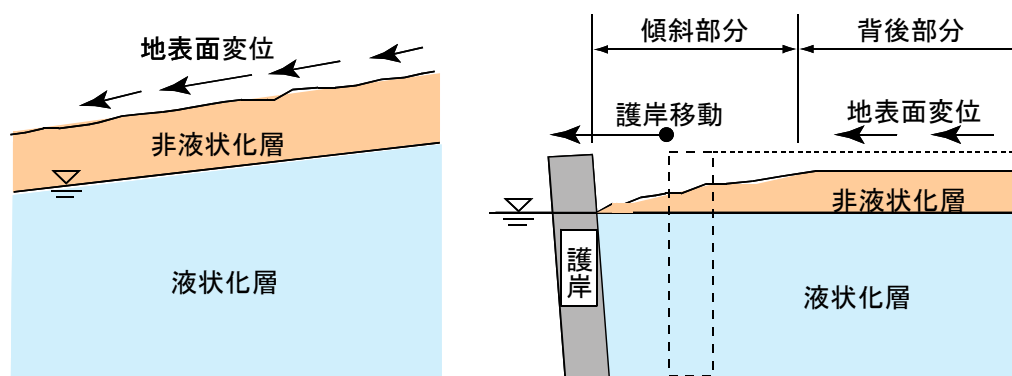


図 1.1 液状化地盤の側方流動とライフライン埋設管路被害の予測システムおよび要素技術の開発

2. 液状化地盤の側方流動および構造物基礎と埋設管路の被害

1964 年新潟地震,1983 年日本海中部地震および 1995 年兵庫県南部地震における液状化地盤の側方流動事例の分析によれば,液状化地盤の側方流動には図 2.1 に示す 2 つのタイプがあることが知られている.^{1), 2), 3)}



(a) タイプ 1:地表面の傾斜による側方流動

(b) タイプ 2:護岸の移動に起因する側方流動

図 2.1 液状化地盤の側方流動のタイプ

タイプ 1 の側方流動は,地表面が傾斜している場合に,液状化地盤が重力によって斜面下方に水平移動するものである.地表面の勾配は一般に 2~3% 以下の場合が多く,1% 未満のほぼ平坦な地盤でも数 m の水平変位を生じている場合が報告されている.

タイプ 2 の側方流動は,護岸が地震による慣性力や基礎地盤の液状化によって水辺方向に移動し,これに伴って護岸背後の液状化地盤が水平移動するもので,1995 年兵庫県南部地震で神戸市などの埋立地で多く観測されている.⁴⁾

2.1 傾斜地盤における側方流動の事例

図 2.2 は,1983 年日本海中部地震における能代市市街地における側方流動の例を示す.図中のベクトルが水平変位の大きさと方向を表す.この地域は海岸線よりやや離れた独立した砂丘地帯で,砂丘頂部より勾配 2~3% の緩やかな傾斜地盤となっているが,図示するように,砂丘の斜面に沿って地盤が水平変位を生じている.最大の水平変位は 5m に達している.この付近では,流動変位により家屋基礎の被害およびガス導管等の被害が数多く発生した.

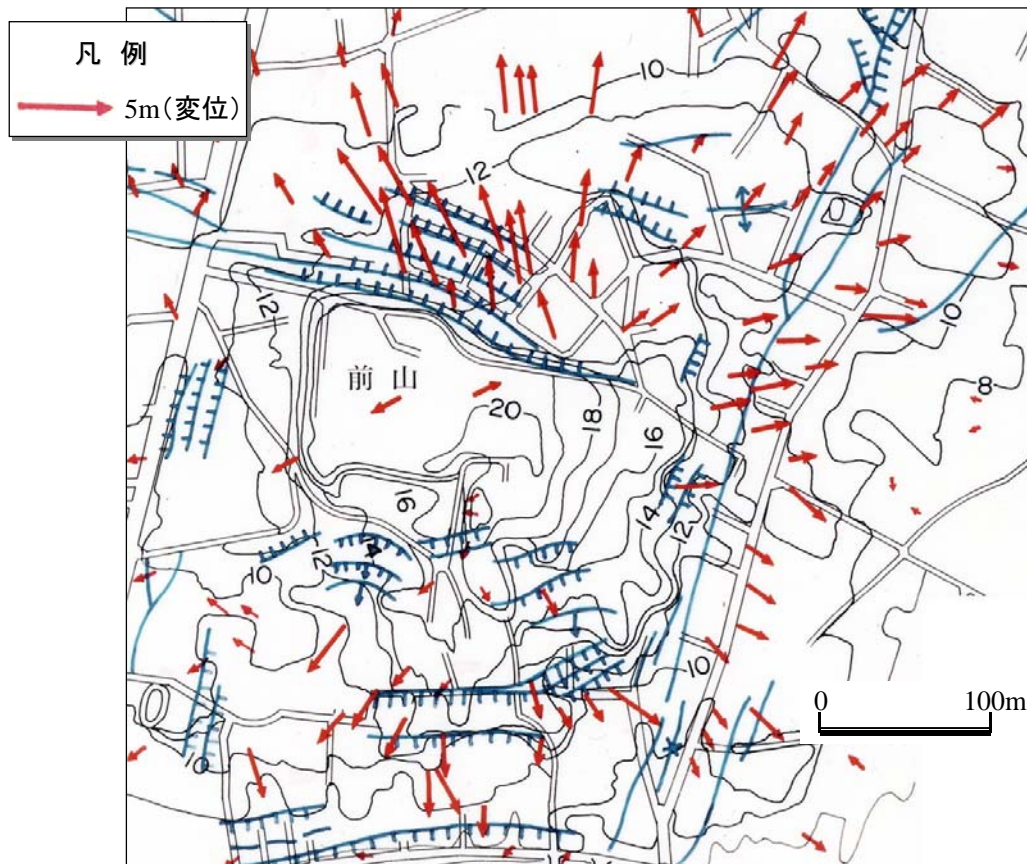


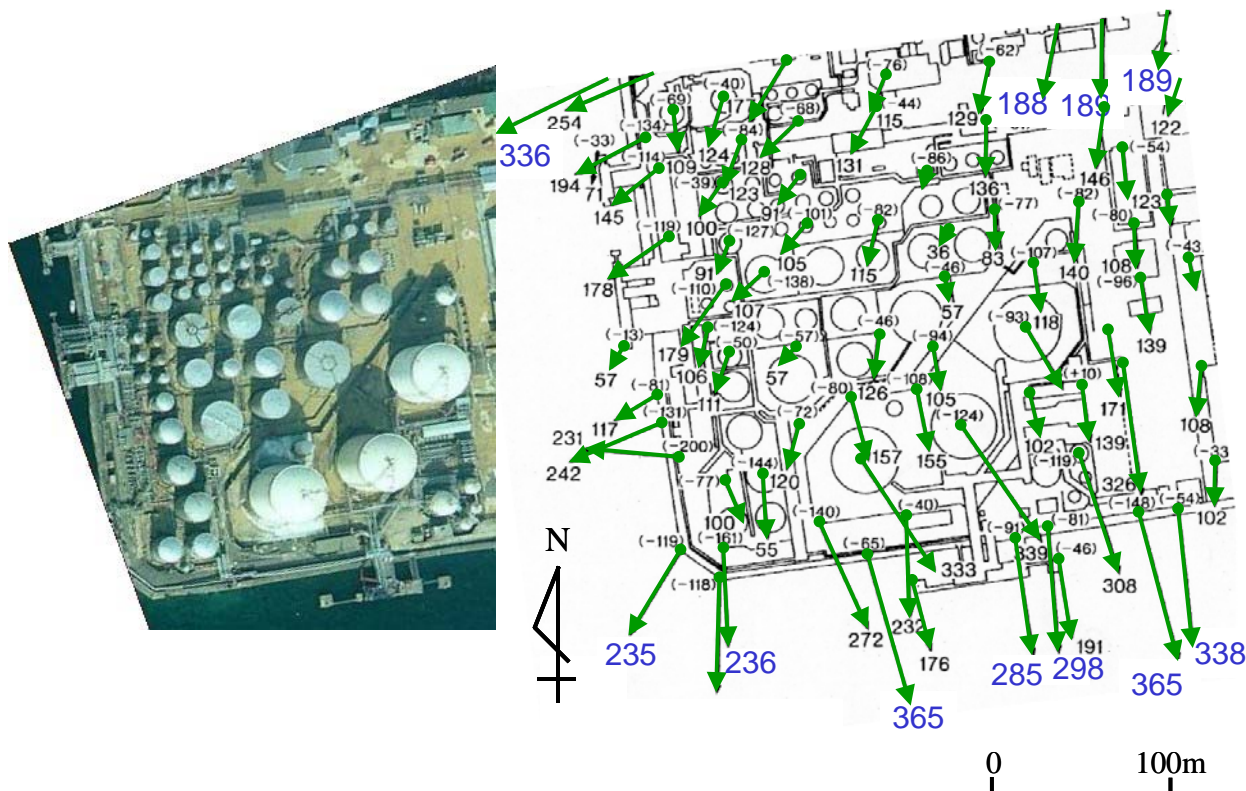
図 2.2 傾斜地盤における側方流動の事例(1983 年日本海中部地震,能代市)

2.2 護岸の移動に起因する側方流動の事例

図 2.3 は 1995 年兵庫県南部地震における神戸市深江浜の側方流動の事例を示す。図 2.3(a)は地震発生の2日後に撮影された航空写真であり,この中で黄色く映っている部分は液状化によって地中より噴出した砂を示す。これからこの埋立地全域が激しく液状化を起こしたことを伺うことが出来る。図 2.3(b)のベクトルは側方流動による水平方向の地盤変位でベクトルの先頭の数字は変位の大きさを cm で示している。これによれば,護岸が海方向に 3~4m のオーダーで水平変位を生じ,これに起因して護岸背後の埋立地盤が同様に海方向に水平変位を生じている。ここで注目すべきことは,この埋立地のタンクヤード全体が海方向に移動していることである。タンクヤードは幅,奥行きとも 300m の広さを有しているが,全体が水平移動を生じている。側方流動量の予測にあた

っては限定された狭い地域の地盤・地形条件だけでなく、広域にわたる地盤・地形条件と護岸の構造条件を考慮した予測が必要であることを示している。

このタンクヤードでは、地震により液化プロパンガスの配管系のバルブが変形し、大量のガスが漏洩し付近住民が緊急避難する事態となった。地盤変位による地盤ひずみが配管系のバルブを変形させたことが原因とされている。



(a)埋立地の航空写真(地震発生 2 日後) (b)側方流動による地盤変位 (単位:cm)

図 2.3 護岸の移動に起因する側方流動の事例

(1995 年兵庫県南部地震,神戸市深江浜)

2.3 側方流動による基礎杭の被害

液状化地盤の側方流動による地盤変位は建物,橋梁およびライフライン施設などの基礎構造に極めて深刻な被害を生じさせている。図 2.4 は 1964 年新潟地震による建物のコンクリート基礎杭の被害状況を示す。地震発生から 20 年後の建物の建替工事で直径 30cm のコンクリート杭(既製遠心杭)がことごとく破壊されていることが発見された。

図 2.5 はこの建物付近の流動による水平方向の地盤変位を示す。建物周辺において地盤が南東の方向に平均約 2m のオーダで水平変位していることが分かる。図 2.6 は杭の被害状況と建物基礎地盤の N 値を示す。杭は上下 2ヶ所で破断している。図には N 値から判定される推定液状化層を併せて示すが,上下部の非液状化層と液状化

層の2つの境界が杭の被害地点にほぼ一致していることが注目される。また、杭は南東方向に1~2m 変形しており、付近の地盤変位の大きさと方向に一致している。



図 2.4 側方流動による杭の被害
(1964 年新潟地震,新潟市)

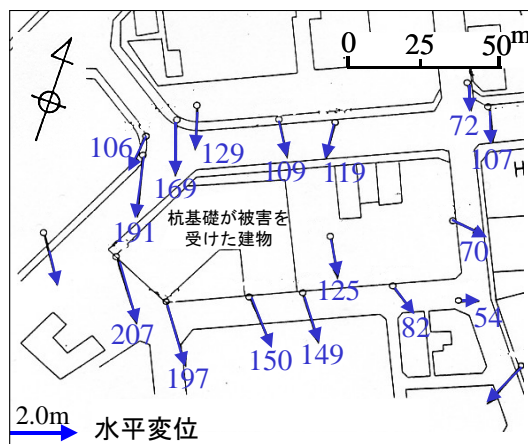


図 2.5 基礎杭が被害を受けた建物周辺での流動による地盤変位(cm)
(1964 年新潟地震)

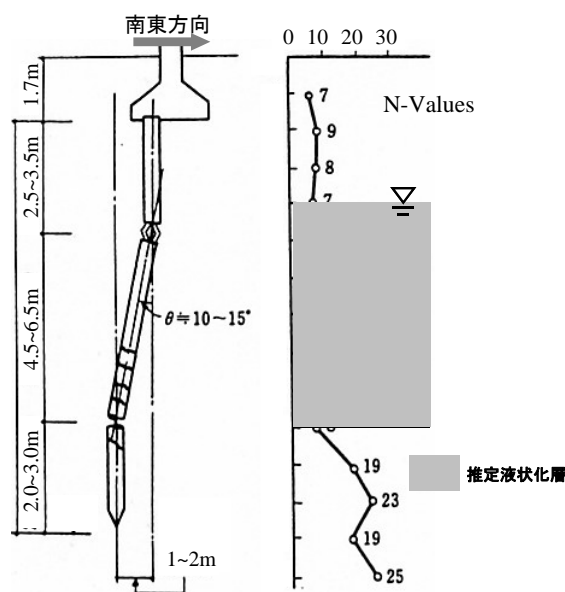


図 2.6 基礎杭の破壊状況とN値



図 2.7 下水処理場本館建屋の基礎杭の被害(1995 年兵庫県南部地震,神戸市)

側方流動による基礎杭の被害は、1995年兵庫県南部地震においても高速道路の橋脚基礎、建物基礎およびライフライン拠点施設の基礎にも数多く発生した。図 2.7 は神戸市の下水処理場の本館建屋の基礎杭の被害の状況である。

2.4 側方流動によるライフライン埋設管路の被害

液状化地盤の側方流動による変位は地盤に相対変位、すなわちひずみを生じさせ、ライフライン等の埋設管路に被害を発生させる。図 2.8 は 1983 年日本海中部地震に

おける直径 90mm の都市ガス用の溶接鋼管の被害である. 45° の曲がり部の溶接箇所が破断し,2つの破断面が 70cm も離れていた事例である.

図 2.9はこのガス導管の破断点付近における地盤の水平変位を示す. 地盤はガス導管の敷設ラインを外側に押し広げるように変位している. 地盤変位によってガス導管に引張応力が発生し,さらに曲がり部において曲げ応力が発生して破断したものと推定される.

図 2.10 は 1964 年新潟地震による天然ガスパイプラインの座屈である. 側方流動により地盤に圧縮ひずみが生じ,管路が座屈を起こして,地表面上に突出したものである.

図 2.11 は 1995 年兵庫県南部地震による水道本管の溶接部の破断である. この場合は地盤の引張ひずみとせん断ひずみが被害の原因と推定されている.

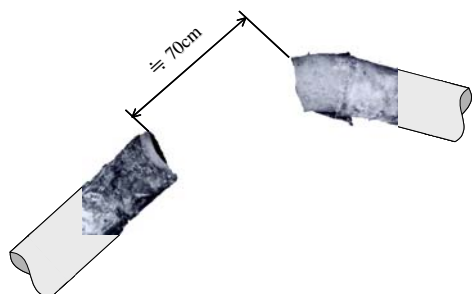


図 2.8 地盤ひずみによるガス導管の被害
(1983 年日本海中部地震,能代市)

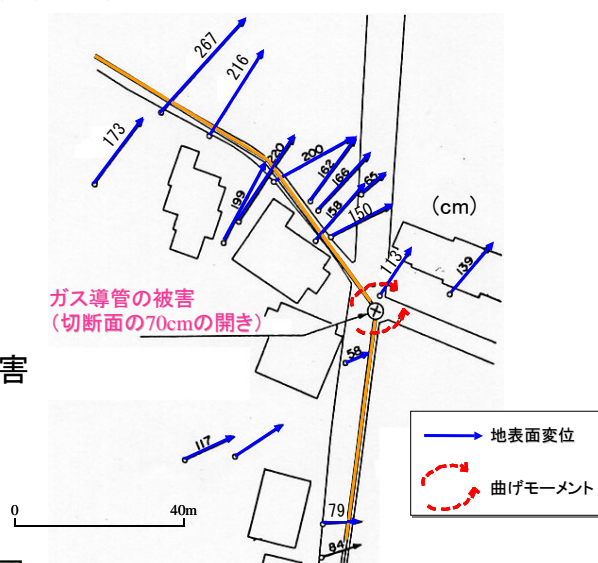


図 2.9 ガス導管の被害地点付近における地盤変位(1983 年日本海中部地震)



図 2.10 地盤の圧縮ひずみによる天然ガスパイプラインの座屈
(1964 年新潟地震,新潟市)



図 2.11 地盤の引張ひずみとせん断ひずみによる水平本管の破断

3. 地盤変位の予測法に関する既往の研究

側方流動による地盤変位予測システム構築のためには地盤変位の予測手法の確立が必要である。このため、既往の研究において液状化地盤の流動特性が模型地盤の流動実験により解明され、既往地震における流動事例の分析成果と併せることにより変位の予測手法が開発されている。これらの研究成果と本システムに用いられている変位の予測手法の概要を以下に述べる。

3.1 液状化地盤の流動特性に関する既往研究⁵⁾

液状化地盤の流動による地盤の大変位は液状化土の流体的な挙動によって引き起こされると考えられる。このため、液状化土の流体的性質(流れ易さ、又は流れ難さ)を解明しておくことは、地盤変位の予測に関して極めて重要と考えられる。

濱田等は、液状化地盤の流動特性を重力場(図 3.1)の模型実験から明らかにし、次の結果を得ている。

- ① 図 3.2 に示すように液状化土の粘性係数、すなわち流れ難さを表す指数はせん断ひずみ速度の増大とともに減少する非線型粘性流体(ビンガム流体又は擬塑性流体)の性質を示す。
- ② 図 3.3 に示すように液状化土の粘性係数は、模型地盤の厚さ H の約 1.3~1.6 乗に比例して増大する。このことは液状化地盤のその厚さのほぼ 1.5 乗に比例して流れ難くなることを示している。

以上の液状化土の重力場の模型実験より得られた流動特性は、遠心載荷場における液状化土の流動実験によっても確認されている。すなわち、液状化土の粘性係数がせん断ひずみ速度の増大とともに減少する非線型性を有することおよび地盤の拘束圧の 1.4~1.8 乗に比例して粘性係数が増大することが示されている。

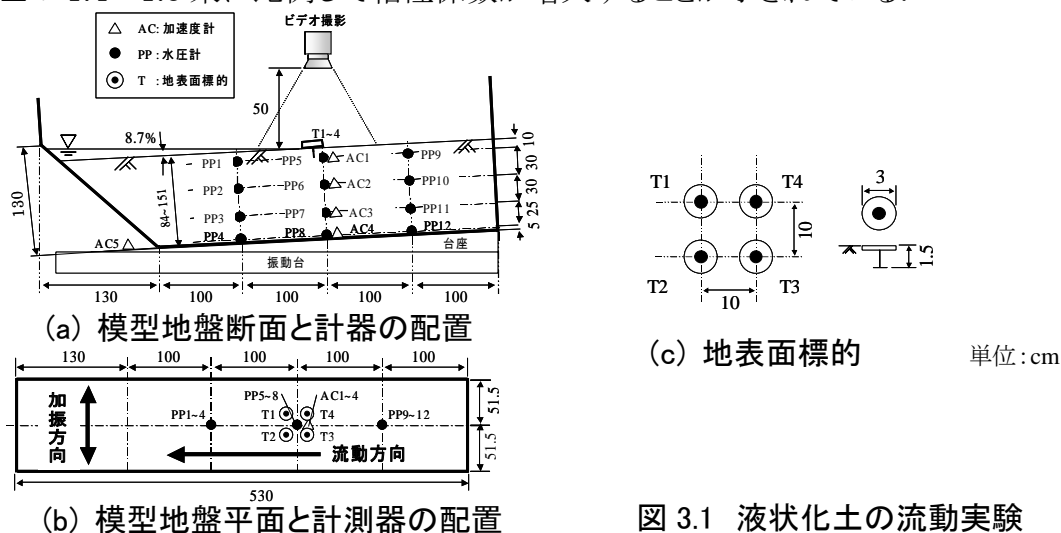


図 3.1 液状化土の流動実験

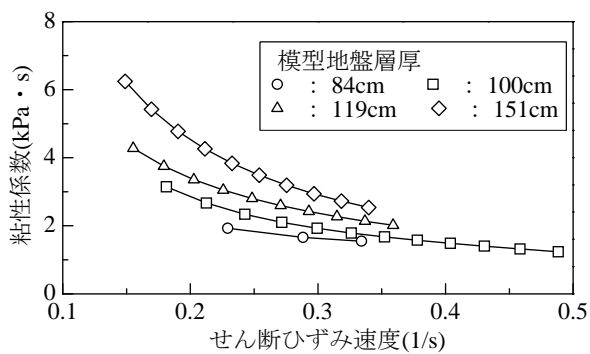


図 3.2 液状化土の粘性係数

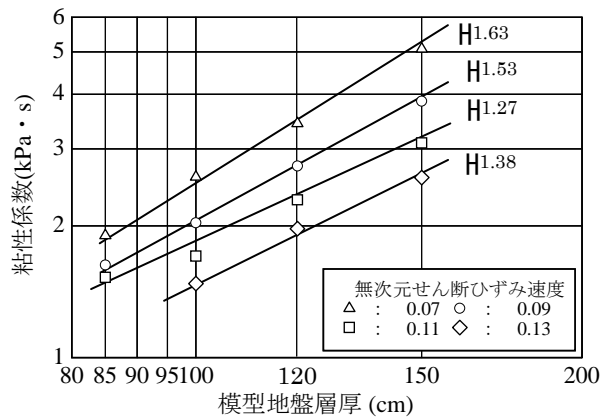


図 3.3 液状化土の粘性係数と模型地盤の厚さの関係

3.2 傾斜地盤の側方流動による地盤変位の予測手法

濱田等は、前述の「液状化地盤の流動特性に関する既往研究」の成果をもとに、液状化地盤の粘性係数がすなわち液状化土の流れ難さが地盤の拘束圧の 1.5 乗に比例するものとして以下の式を提案している。

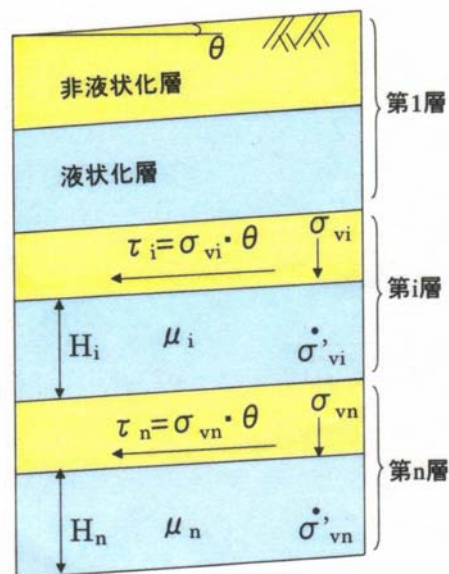


図 3.4 液状化層が複数層の場合の側方流動

(1)地震動の継続時間を含まない予測式

$$D_S = 36 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\left(\sigma_{vi} \cdot H_i + \frac{1}{2} \cdot \gamma_i \cdot H_i^2 \right)}{\left(\sigma_{vi} + \frac{1}{2} \cdot \gamma_i \cdot H_i \right)^{3/2} \cdot \bar{N}_i} \cdot \theta \quad (3.1)$$

ここで、

D_S : 傾斜地盤の水平変位量 (m) γ_i : 第 i 層の単位体積重量 (KN/m³)

θ : 地表面勾配 (%) σ_{vi} : 第 i 層上面での全上載圧 (KN/m²)

\bar{N}_i : 第 i 層の補正N値 (1)

式(3.1)による地盤変位の予測値と既往地震で観測値の関係は図 3.5 に示す通りである。予測値がほぼ倍半分の精度で実測値を説明していることが分かる。

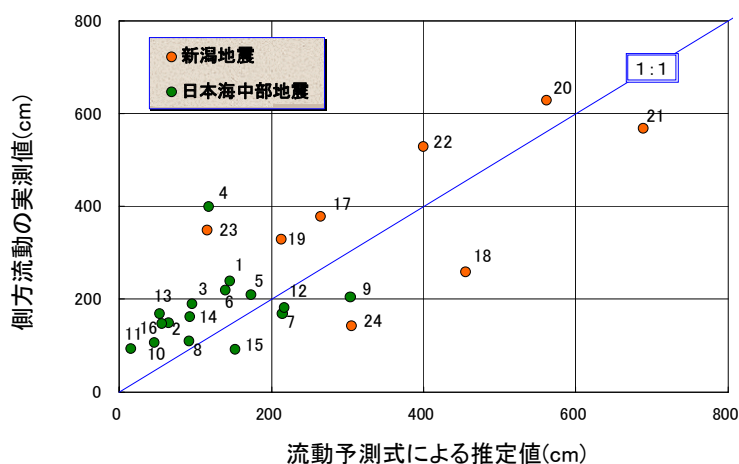


図 3.5 既往地震の実測値と予測式からの推定値

3.3 護岸移動に起因した側方流動による地盤変位の予測手法

護岸背後地盤の水平流動量は護岸自体の地震時の移動量に支配されている。そのため護岸背後地盤移動量は図 3.6 に示すようにまず護岸自体の移動量を求め、これに護岸から離間距離による移動量減衰率を乗ずることにより求める。

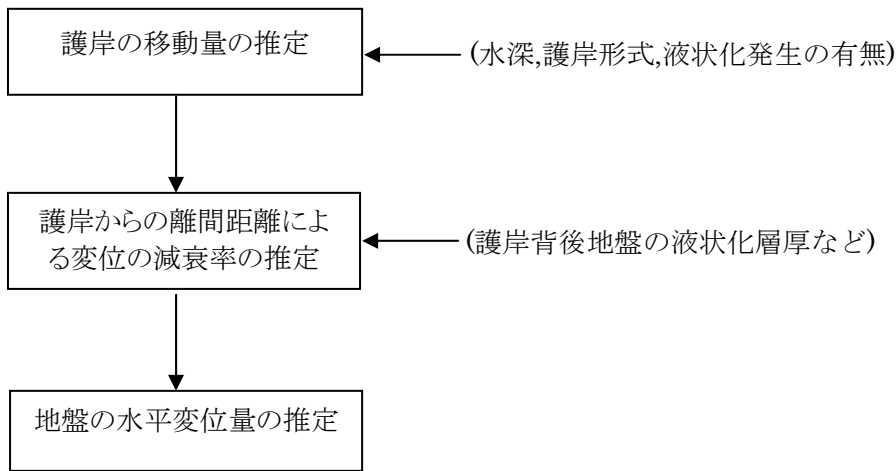


図 3.6 護岸背後地盤の側方流動量の推定

護岸の移動量の推定については,表 3.1 に示す護岸の変形率を用いる. これは兵庫県南部地震などの既往の地震における護岸の移動量の事例分析結果にもとづくものである. 護岸の水平変位量は

$$D_q = \alpha \times 10^{-2} \cdot H_w \quad (3.2)$$

ここで,

D_q :護岸の水平変位量(m) H_w :護岸の高さ(m)
 α :表 1 に示す護岸の変形率(%)

表 3.1 護岸の変形率(%) (井合ら, 1997 年)⁶⁾

構造形式	地震動	地盤条件	変形率 α (%)
重力式護岸	L1地震動	護岸背後のみ緩い砂質土	5~10
		護岸背後および基礎地盤が緩い砂質土	10~20
	L2地震動	護岸背後のみ緩い砂質土	10~20
		護岸背後および基礎地盤が緩い砂質土	20~40
矢板式護岸	L1地震動	護岸背後のみ緩い砂質土	控え工周辺は堅固な地盤 5~15
			控え工周辺は緩い砂質土 15~25
		護岸背後・控え工周辺・基礎地盤がいずれも緩い砂質土	25~50
	L2地震動	護岸背後のみ緩い砂質土	控え工周辺は堅固な地盤 15~20
			控え工周辺は緩い砂質土 25~40
		護岸背後・控え工周辺・基礎地盤がいずれも緩い砂質土	50~75

護岸背後地盤の水平変位は護岸からの離間距離 L を用いて下式(3.3)より求める.

$$D_s = \frac{D_q}{2.0 \left(\frac{L}{H} \right)^2 \times 10^{-4} + 4.9 \left(\frac{L}{H} \right) \times 10^{-2} + 1.0} \quad (3.3)$$

ここで,

D_S : 地盤の水平変位量 (m)

L : 護岸からの離間距離

D_q : 護岸天端の水平移動量 (m)

H : 背後地盤の平均液状化層厚 (m)

である.

4. 地盤ひずみと埋設管路の被害に関する研究

4.1 地盤ひずみの算定法

前述したようにライフラインの埋設管路の被害は地盤のひずみの大きさに密接に関係している。広域にわたる埋設管路の被害を予測するためには地盤変位より地盤ひずみを予測する手法が必要となる。

図 4.1 に示すように任意の離散地点において計測された地盤変位,又は予測システムにより求められた変位より,メッシュ毎の地盤ひずみを算定する手法は以下の通りである。

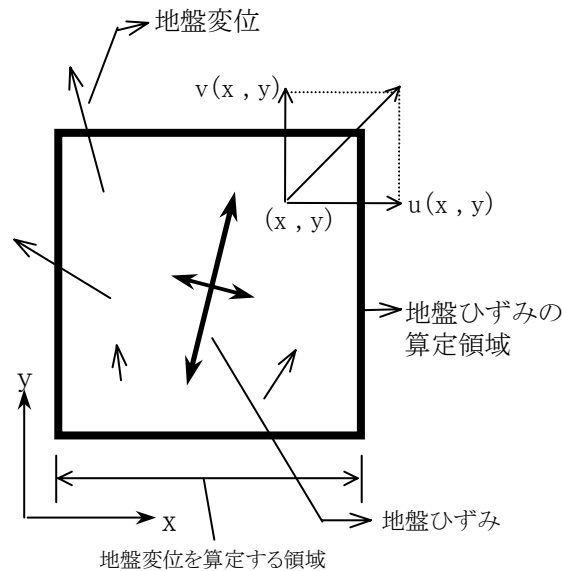


図 4.1 地盤ひずみの算定

- ① 地盤ひずみを測定する領域を任意に設定する。
- ② 算定領域内の地盤変位関数を式(4.1)に示すように線形とする。すなわち,領域内の地盤ひずみは一定とする。

$$\begin{aligned} u(x,y) &= \alpha_1 x + \beta_1 y + \gamma_1 \\ v(x,y) &= \alpha_2 x + \beta_2 y + \gamma_2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

x, y : 東西,南北方向の座標

u, v : 地点 (x,y) の東西,南北方向の地盤変位

- ③ 地盤変位関数の係数 $\alpha_1 \sim \gamma_2$ を領域内で測定された地盤変位を用いて最小二乗法により決定する。
- ④ 求められた係数 $\alpha_1 \sim \gamma_2$ を用いて以下のように地盤ひずみを算定する。
x 方向の垂直ひずみ $\epsilon_x = \alpha_1$

$$y \text{ 方向の垂直ひずみ} \quad \varepsilon_y = \beta_2 \quad (4.2)$$

$$\text{せん断ひずみ} \quad \gamma_{xy} = \beta_1 + \alpha_2$$

また,主ひずみ $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ とその作用方向 θ_1, θ_2 (x 軸より反時計方向を正とする)は下式のように求まる.

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \gamma_{xy}^2}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \gamma_{xy}^2}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_y} \right)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_3 - \varepsilon_y} \right)$$

以上の方法で算定された地盤ひずみの例(1995 年兵庫県南部地震, ポートアイランド北部地域)を図 4.2 に示す. 図示したように,護岸および背後地盤が海方向に大きく水平移動を生じており,このため地盤に全体的に引張ひずみが生じている.

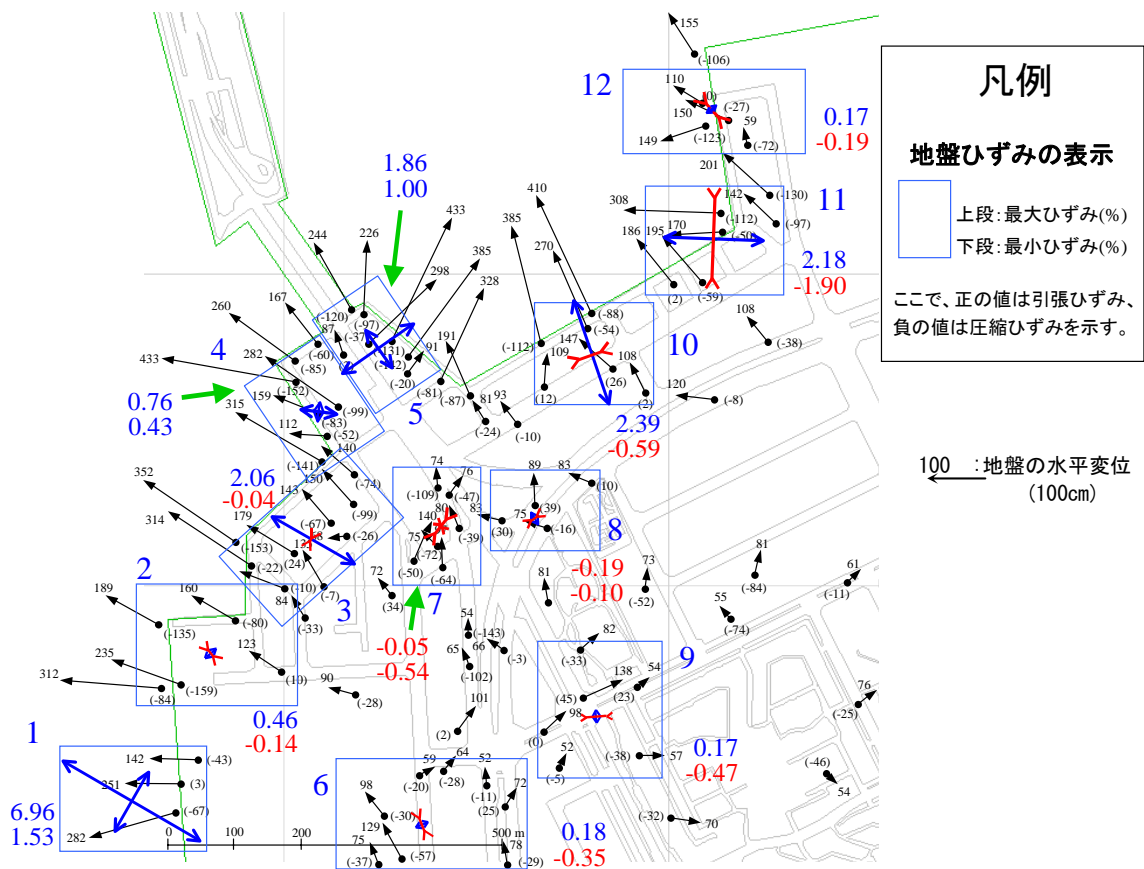


図 4.2 地盤ひずみの算定例(1995 年兵庫県南部地震, ポートアイランド)

4.2 既往地震による地盤ひずみの算定

1995年兵庫県南部地震における阪神地区の埋立地(ポートアイランド,六甲アイランド,摩耶埠頭,御影浜,住吉浜,魚崎浜,深江浜,芦屋浜および西宮浜)の地盤ひずみを上記の方法によって算定した。

引張ひずみと圧縮ひずみの大きさの分布をそれぞれ図4.3,4.4に示す。図示した結果で水際部とあるのは護岸線より100m以上離れた領域でのひずみである。引張ひずみの大半が1.0%以下であるが,中には5%を超える例も見られる。圧縮ひずみも同様で大半が1.0%以下であるが,2.0%を超す圧縮ひずみも場所によっては発生していたことが分かる。これらの結果は,埋設管路の耐震設計用の地盤ひずみを設定する際に有用な情報を与えるものと考えられる。

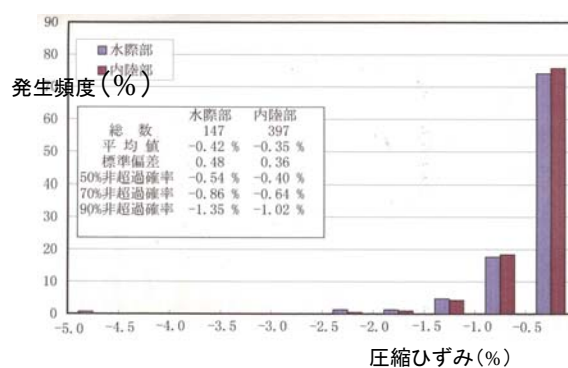
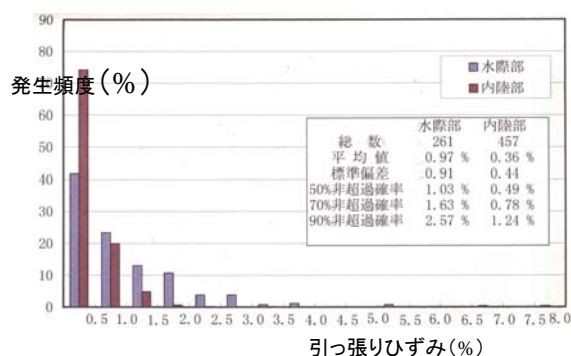


図 4.3 側方流動による地盤の引張りひずみ 図 4.4 側方流動による地盤の圧縮ひずみ
(1995年兵庫県南部地震)

4.3 地盤ひずみと埋設管路被害の定量的関係

地盤ひずみと埋設管路の被害定量的関係を検討するため埋設管の管軸に沿った地盤ひずみを算定する。埋設管路に沿った地盤ひずみは以下の手順により算定する。

- ① 任意の離散地点によって計測された地盤変位又は流動変位予測システムにより予測された変位から管路上の変位を補間により求める。図4.3に示すように変位が既知の点からの距離に反比例するものとして補間を行う。

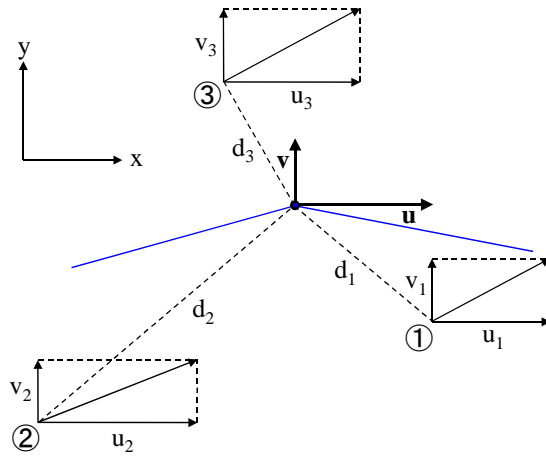


図 4.5 補間による管路上の変位の算定

$$u = \sum_{i=1}^n \frac{u_i / d_i}{1 / d_i} \quad (4.4)$$

$$v = \sum \frac{v_i / d_i}{1 / d_i}$$

- ② 管路に沿った地盤ひずみは図 4.6 に示すように管路上の 2 点間の地盤の相対変位より求める。

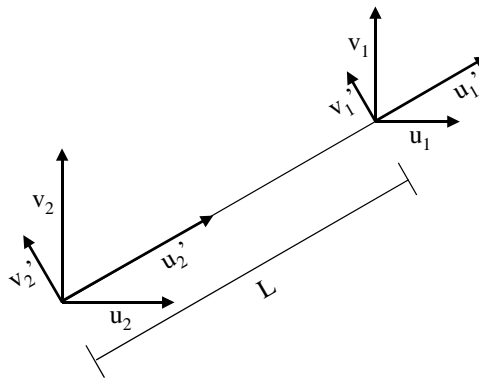


図 4.6 管路に沿った地盤ひずみの算定

管路軸方向の垂直ひずみ $\varepsilon_G = \frac{u'_1 - u'_2}{L}$

管路軸と直角方向のせん断ひずみ $\gamma_G = \frac{u'_1 - u'_2}{L}$ (4.5)

以上の方法により求めた管軸に沿った地盤ひずみの算定例。1995年兵庫県南部地震、ポートアイランド北部地域、水道管路)を図4.7に示す。

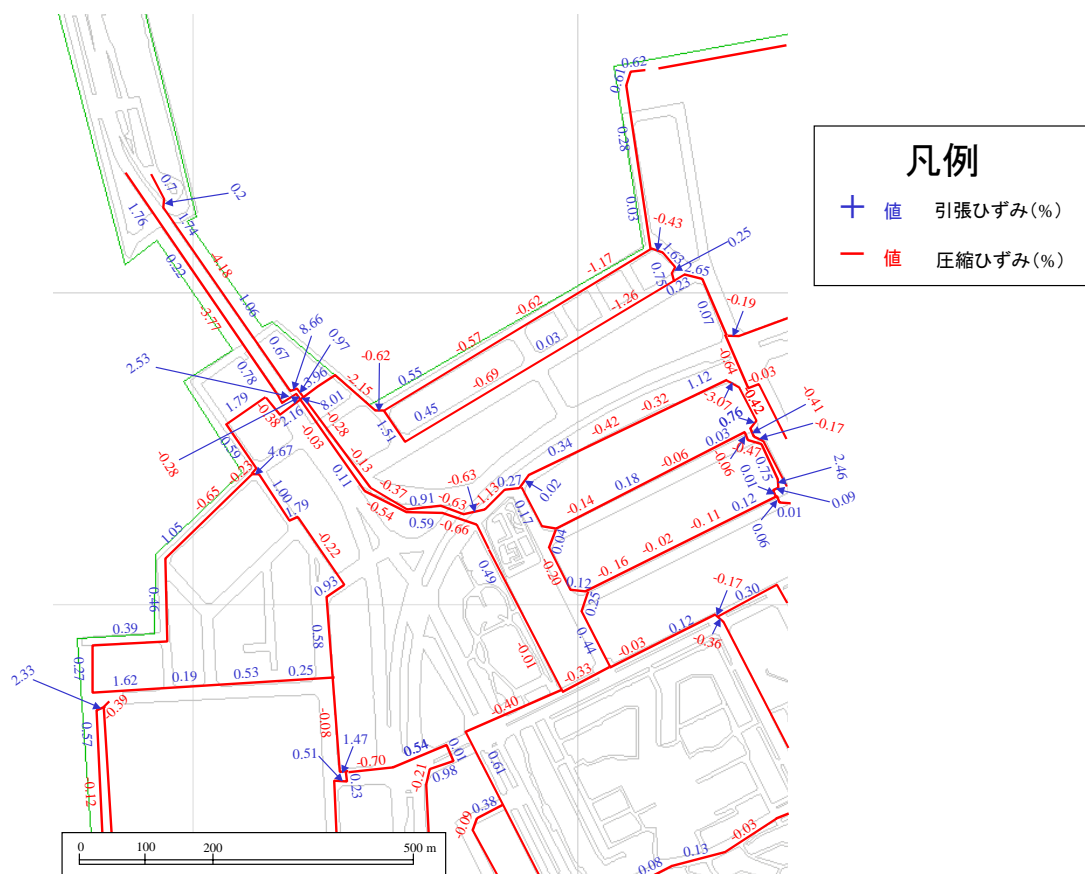


図 4.7 水道管路の管軸に沿ったひずみの算定
(1995年兵庫県南部地震, ポートアイランド北部地域, 水道管)

1995年兵庫県南部地震における埋立地(ポートアイランド, 六甲アイランド, 摩耶埠頭, 御影浜, 住吉浜, 魚崎浜, 深江浜, 芦屋浜, 西宮浜)の上水道および下水道の埋設管路の被害と地盤ひずみの定量的関係を検討した。

(1) 水道管路の被害率と地盤ひずみの関係

水道管路の被害はその大半継手部で発生しているが,継手は図4.8に示すようにA, K, T型と呼ばれている継手で,特にT型は耐震性が低く継手の引抜き,突込みが数多く報告されている。

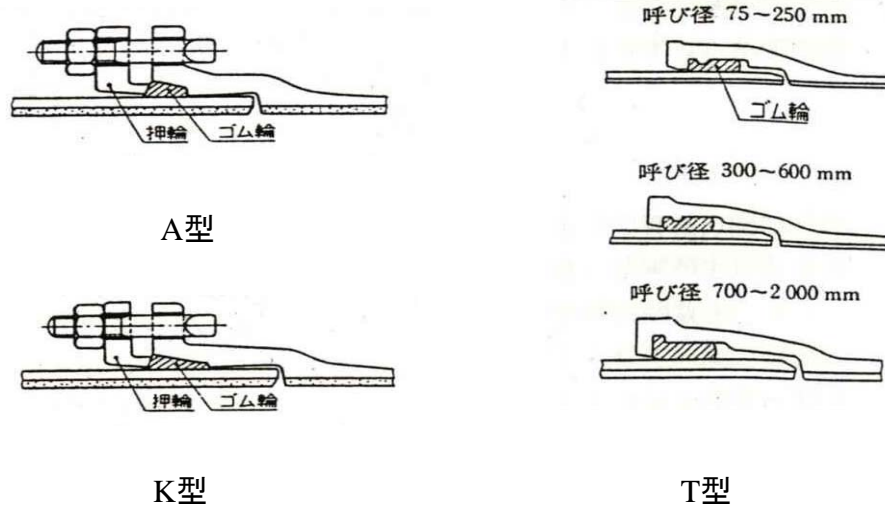


図 4.8 水道管路の継手

図 4.9 に管軸方向の引張ひずみと水道管の被害率の関係を、また図 4.10 に圧縮ひずみと被害率の関係を示す。水道管の場合の被害率は 1km 当たりの被害件数と示す。引張ひずみ、圧縮ひずみとも被害率は極めて高く、引張ひずみでは 4.0~5.0%の地盤ひずみは 35 件/km にも達している。神戸市での非液状化地域を含む水道管の平均被害率が 2.2 件/km であることを考えると、液状化地盤の流動地域では 10 倍以上の被害が発生していることになり、水道管路の耐震性を考える上で側方流動による地盤ひずみが重大な要件であることを示している。

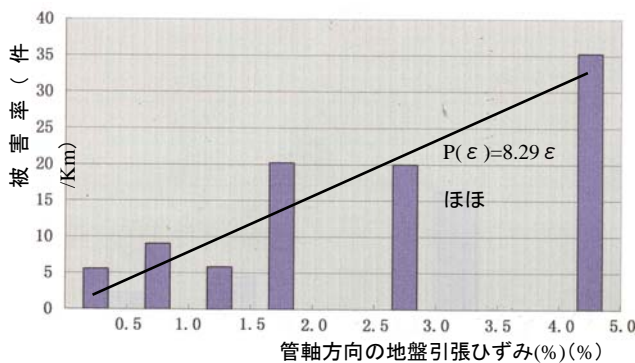


図 4.9 管軸方向の地盤の引張ひずみと水道管被害率の関係

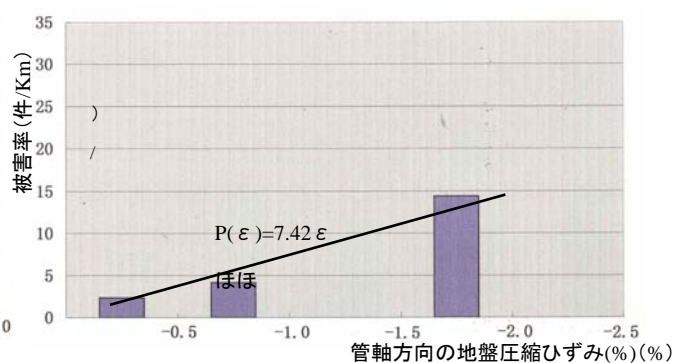


図 4.10 管軸方向の地盤の圧縮ひずみと水道管被害率の関係

(2) 下水道管路の被害率と地盤ひずみの関係

図 4.11 に下水道管路の被害率と管軸方向の地盤の引張ひずみの関係を、また、図 4.12 に圧縮ひずみとの関係を示す。下水道管路は大半が長さ 4.0m のヒューム管であり

被害は継手部の引き抜け(引張り)および突込み(圧縮)である。被害率は、隣接するマンホール間を単位として、マンホール管で被害が発生した割合を示している。地盤の引張ひずみが 2.0%以上では全体の 45%の管路に被害が発生していることが分かる。

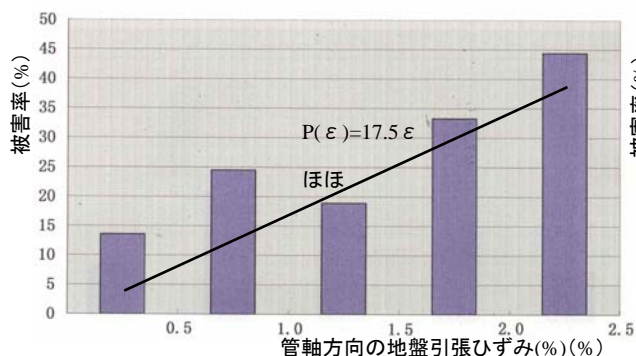


図 4.11 管軸方向の地盤の引張ひずみと
下水道管の被害率

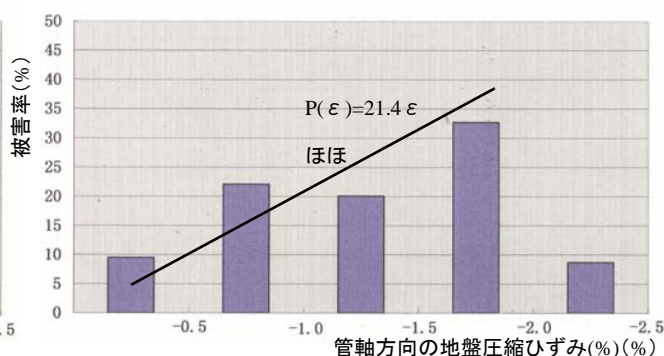


図 4.12 管軸方向の地盤の圧縮ひずみ
と下水道管の被害率

4.4 側方流動が基礎に及ぼす外力特性の基礎的研究

側方流動が基礎杭に及ぼす外力特性を明らかにすることはライフラインシステムをはじめとする構造物の耐震安全性を検討する上で極めて重要である。図 4.13 に示す模型地盤と模型杭を用い、30g の遠心載荷場で流動実験を行い、杭に作用する外力特性を検討した。⁷⁾ 模型地盤は水平幅 1m、流動方向 1m で、地盤の厚さは 27cm である。地表面が 10%で傾斜しており、流動直角の水平方向の加振により、液状化を発生させ斜面下方に向かって流動を生じさせる。杭のひずみ記録より杭に作用する曲げモーメントを求め、これより杭に作用する外力を算定する。

図 4.14 に実験結果の一例を示す。ここで弾性力とは地盤変位に起因する外力を示し、粘性力とは地盤の流動速度に起因する外力を示している。本実験では、地盤の上部に乾礫砂による非液状化層が存在する。図は杭のそれぞれの深さに作用する弾性力と粘性力の時刻歴を示している。地盤の上部の非液状化層からは弾性力、すなわち地盤の変位に起因した外力が作用していることが分かる。これに対して液状化層中の2点(図中 Depth2,3)では、実験の前半の区間で弾性力が、すなわち地盤変位に起因する外力が、実験の後半の区間で粘性力が、すなわち流動速度に起因した外力が卓越していることが分かる。粘性力が弾性力を上回る区間は、過剰間隙水圧比がほぼ 1.0 に達し、地盤が完全に液状化状態に達した区間に相当する。

以上の実験結果から、地盤の流動によって杭基礎に作用する外力は、地盤の液状化の度合によって地盤変位に起因する外力と地盤速度に起因する外力が作用することが明らかにされた。

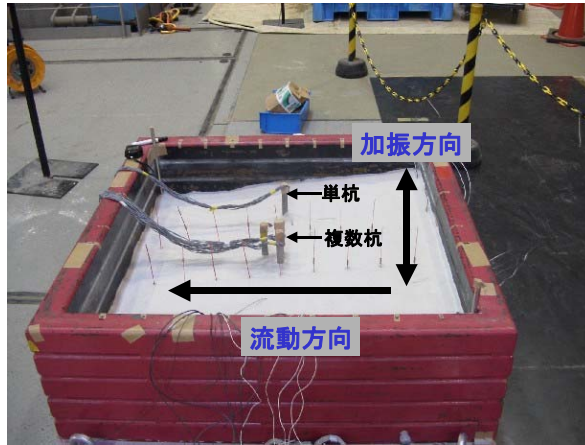


図 4.13 液状化地盤の流動が基礎杭に及ぼす外力特性に関する実験
(遠心载荷場 30g)

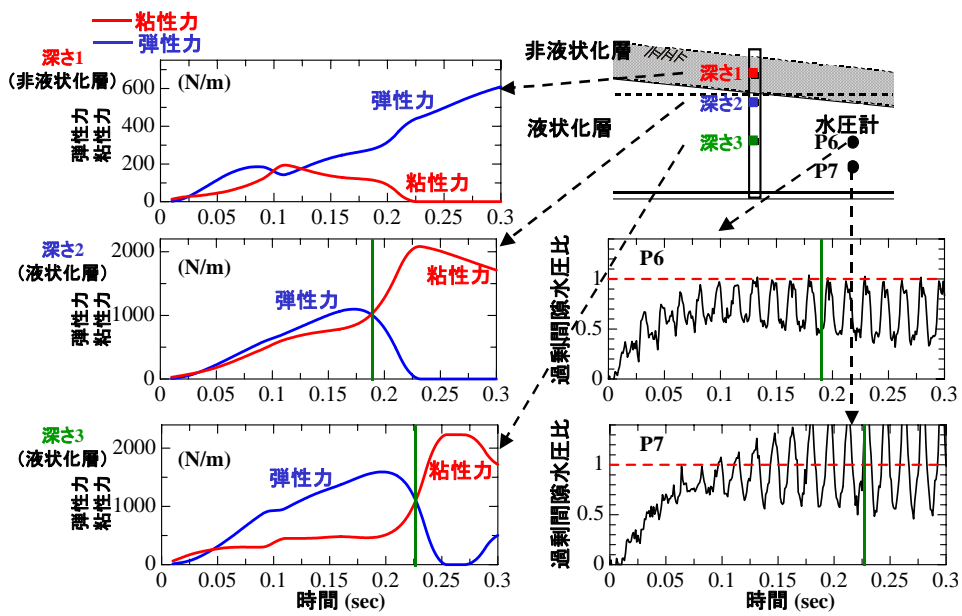


図 4.14 液状化地盤の流動力が杭基礎に及ぼす外力の特性

5. 側方流動とライフライン埋設管路の被害予測システムの構築

5.1 予測システムの概要

図 5.1 に開発された「側方流動とライフライン埋設管路の被害予測システム」の流れを示す。ここでシャドウをつけた項目が本研究で対象とした課題を示す。システムは、①地盤条件、護岸構造、ライフライン埋設管路等のデータベースの構築、②側方流動による地盤の水平・鉛直変位および地盤ひずみの算定、③地盤ひずみによる埋設管路の被害率の算定と構造物・施設の基礎構造の耐震性の照査、よりなっている。

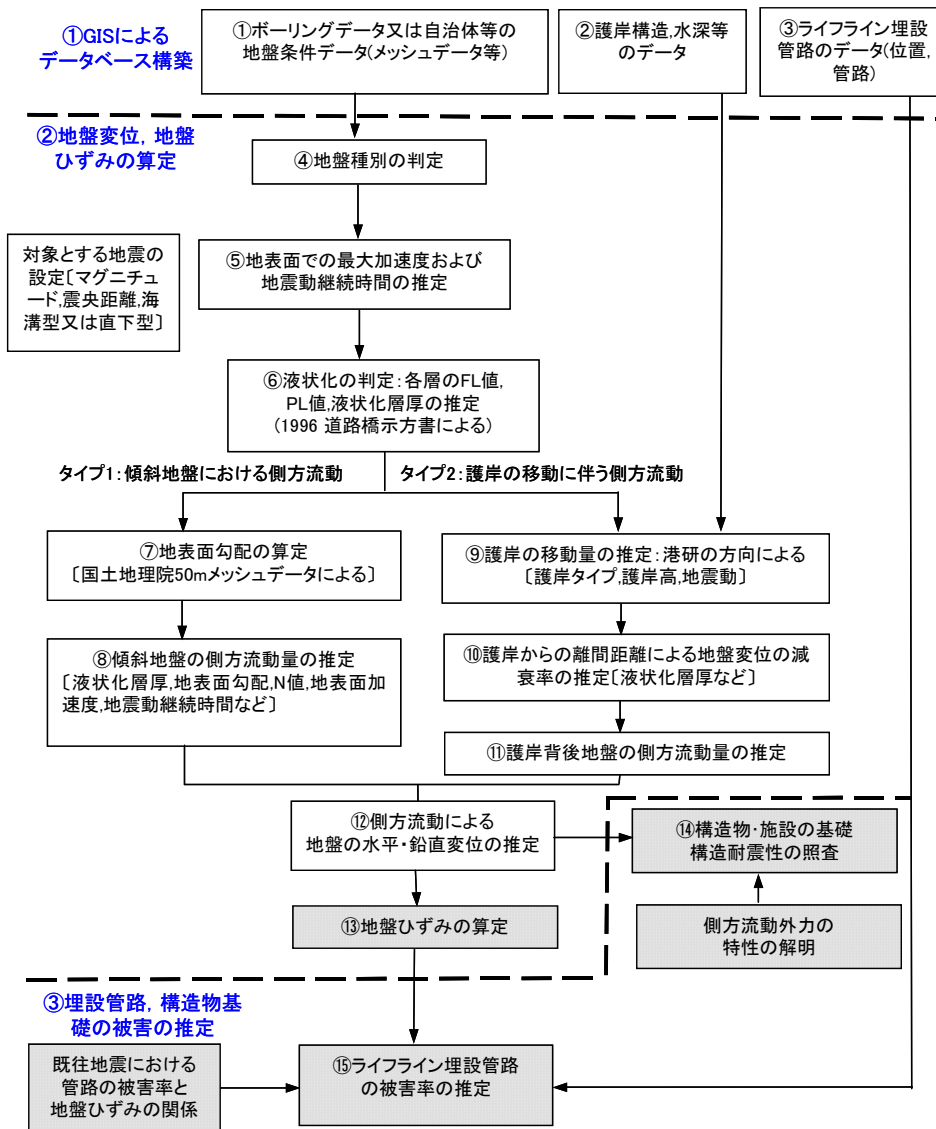


図 5.1 液状化地盤の側方流動とライフライン被害の予測システムの流れ

5.2 GIS によるデータベースの構築

側方流動による地盤変位およびライフライン埋設管路の被害の予測を行うためには、ボーリングデータによる地盤情報、護岸構造情報、埋設管の埋設位置と管種情報を事前に電子データ化し、DB(データベース)に整備・格納しておく必要がある。ボーリング、護岸および埋設管は位置情報として緯度経度の座標データを有しているが、これらは一旦 UTM(Universal Transverse Mercator)座標系への座標変換を行った後に DB に格納する。各予測結果を表示する際に用いる。「50m×50m メッシュ」の中心点の座標データについても同様の操作を施す。

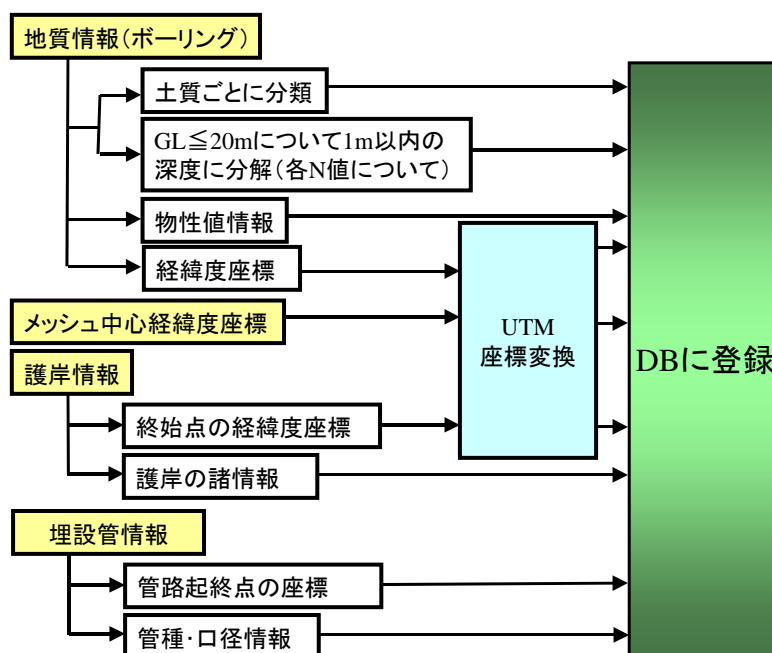


図 5.2 GIS によるデータベースの構築

5.3 液状化の判定、側方流動による地盤変位と地盤ひずみの算定

液状化の判定方法は「道路橋示方書、V耐震設計編」(平成8年、日本道路協会)によるものとした。⁸⁾ また側方流動による地盤変位と地盤ひずみの算定は、それぞれ本報告書「3.地盤変位の予測法に関する既往の研究」および「4.地盤ひずみと埋設管路の被害の研究」に記述した方法を用いている。

液状化地盤の側方流動には、傾斜地盤における流動と護岸の移動に伴う流動の2つのタイプがあるが、地盤変位の予測では、これらの総和を求めることで地盤変位を求めている。

5.4 地盤のひずみによる埋設管路の被害率の算定

地盤の引張りおよび圧縮ひずみによる上・下水道管路の被害率は本研究による調査研究をもとに図 4.9～4.12 に示した関係式を用いる。

水道管路

引張りひずみ $P(\text{被害率:件数/km})=8.29 \times \varepsilon_G(\text{地盤ひずみ, \%})$

圧縮ひずみ $P(\text{件数/km})=7.42 \times \varepsilon_G(\text{地盤ひずみ, \%})$

下水道管路

引張りひずみ $P(\text{被害率, \%})=17.5 \times \varepsilon_G(\text{地盤ひずみ, \%})$

$P(\%)=21.4 \times \varepsilon_G(\text{地盤ひずみ, \%})$

上記において、水道管路の被害率は 1km 当たりの被害件数であり、上下水道管路の被害率は隣接するマンホール間の管路区間が被害を受ける割合を示す。

6. システムの適用事例

川崎市の臨海部埋立地(水江町)を対象として本システムを適用した事例を示す。

(1) ボーリング地点および柱状図

図 6.1 は GIS 上に示したボーリング地点である。任意のボーリング地点をクリックすることで、図 6.2 のような電子ボーリング柱状図が表示される。この電子ボーリング柱状図は「ボーリング柱状図作成要領(案)解説書」(平成 11 年, 財団法人日本建設情報総合センター)を基に, 液状化判定によって得られる F_L 値のグラフ, P_L 値および全液状化層厚といった表示項目を加えたものである。



図 6.1 GIS 上に表示されたボーリング地点

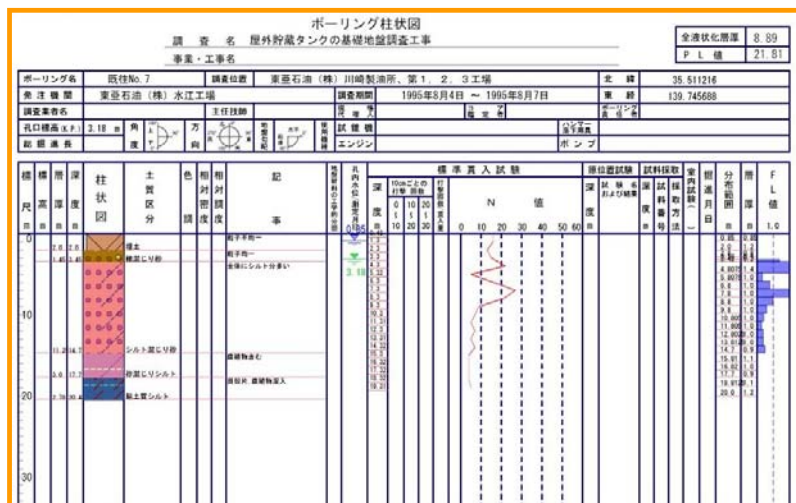


図 6.2 電子ボーリング柱状図

(2) 護岸位置および構造形式

図 6.3 は護岸の位置を示したものである。図中の凡例に示すように、護岸を「重力式」、「矢板式(控工あり)」、「矢板式(控工なし)」の 3 種類に分類している。またボーリングデータ同様、任意の護岸をクリックすると図 6.4 のような護岸構造形式図が表示される。



図 6.3 GIS 上に表示された護岸位置

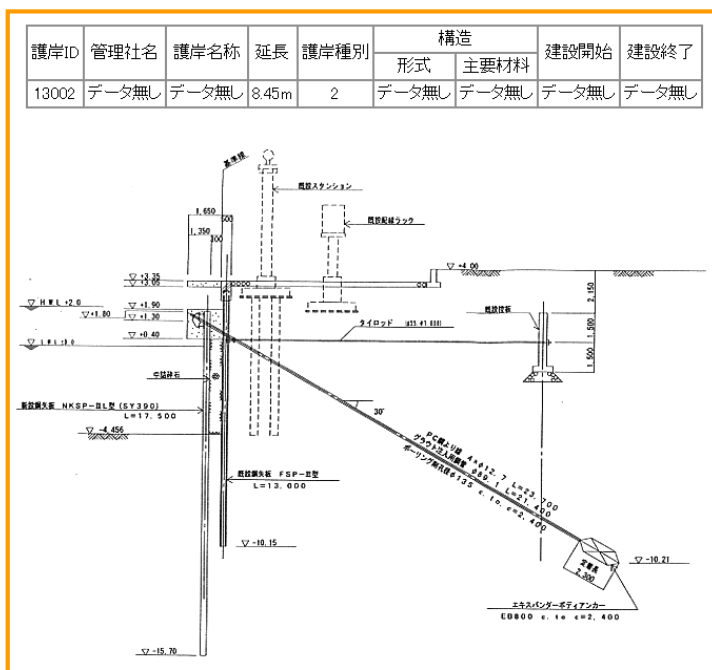


図 6.4 電子化された護岸構造形式図

(3) P_L 値

図 6.5 のように対象地域を国土地理院が定める 50m×50m メッシュに区切り、メッシュ毎に P_L 値の大きさによって色分けして表示する。 P_L 値は各ボーリング地点において算出するが、ボーリングの存在しないメッシュについては距離補間によってその値を得る。

また、コンターラインを引くことも可能である。

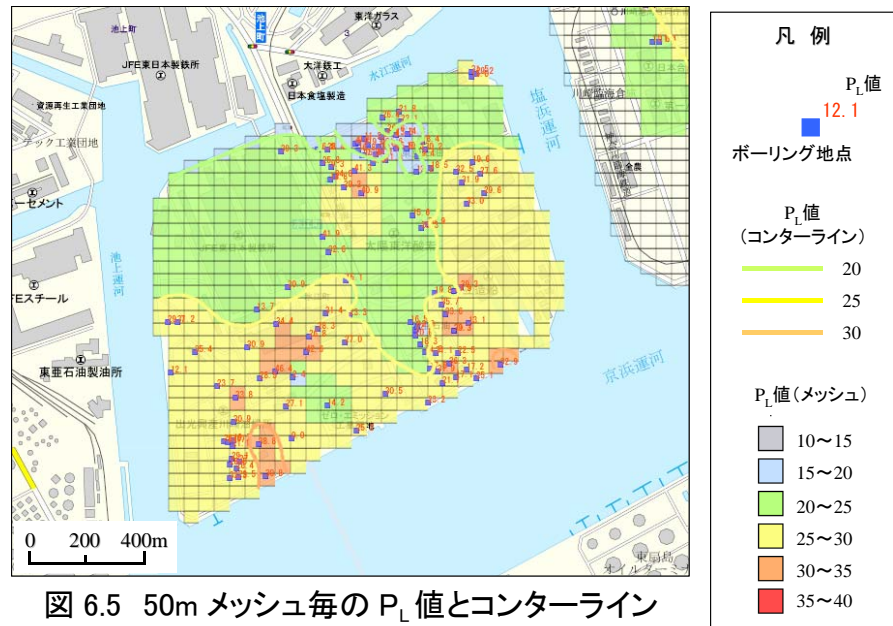


図 6.5 50m メッシュ毎の P_L 値とコンターライン

(4) 合計液状化層厚

図 6.6 に示すように、 P_L 値同様 50m メッシュとコンターラインによって表示する。

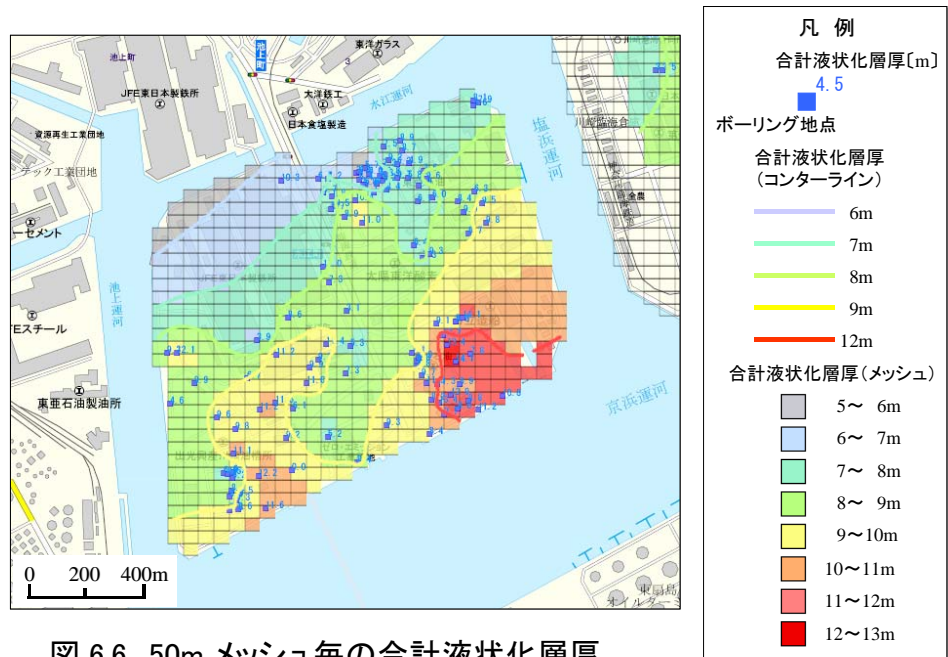


図 6.6 50m メッシュ毎の合計液状化層厚

(5) 護岸移動量および地盤の流動量

図 6.7 に護岸移動量および背後地盤の水平変位をベクトルで示す。

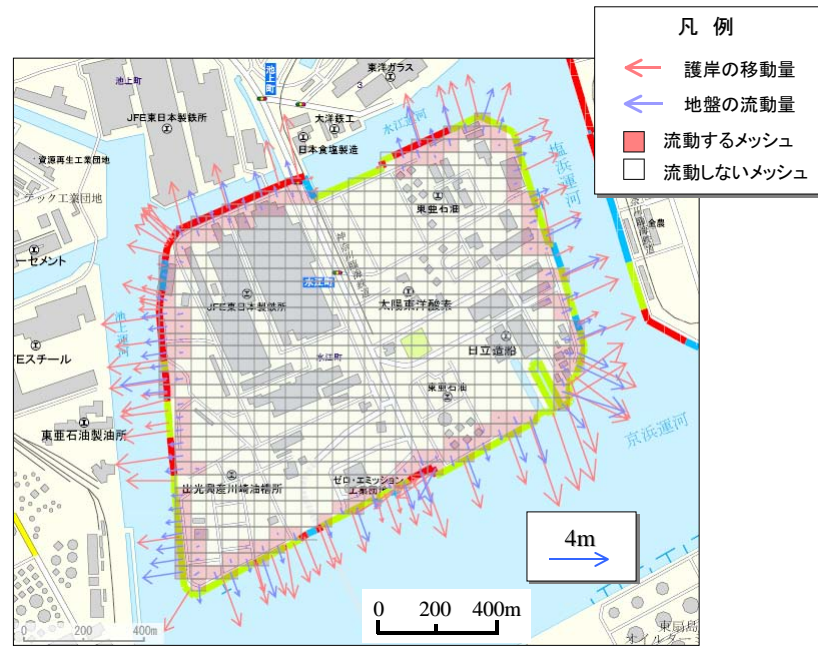


図 6.7 護岸の移動量および地盤の流動量

(6) 地盤のひずみ

地盤の最大・最小主応力を図 6.8 に示す。

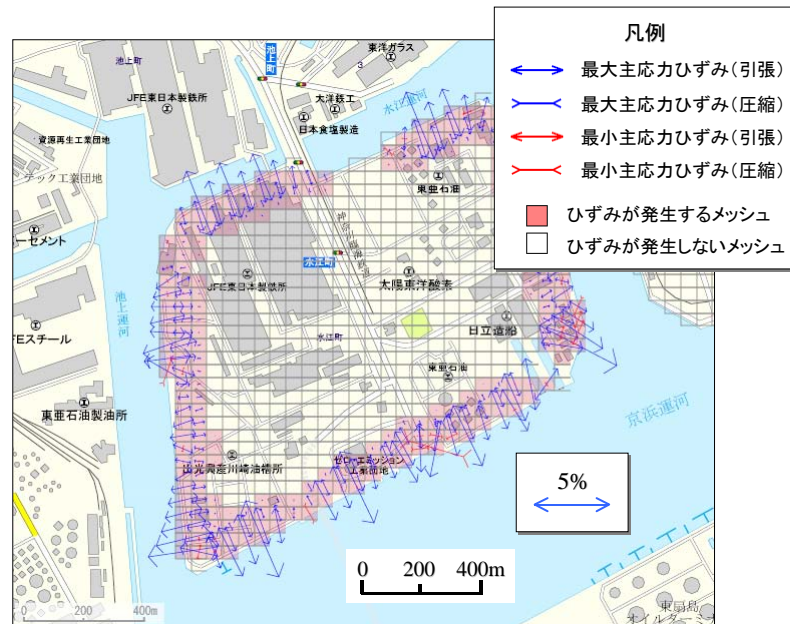


図 6.8 地盤の最大・最小ひずみ

参考文献

- 1) 濱田 政則,安田 進,磯山 龍二,他 1 名: 液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究, 土木学会論文集, No.376, pp221~229, 1986
- 2) Masanori Hamada : Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines: 1964 Niigata Earthquake, Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquake,Vol1,Japanese Case Studies, Technical Report NCEER-92-0001,National Center for Earthquake Engineering Research, USA, pp3-1~3-123, 1992
- 3) 濱田 政則,若松 加寿江: 液状化による地盤の水平変位の研究, 土木学会論文集, No./Ⅲ-43,596, pp189~208,1998
- 4) Masanori Hamada, Ryoji Isoyama and Kazue Wakamatsu:Liquefaction-Induced Ground Displacement and Its Related Damage to Lifeline Facilities, Japanese Geotechnical Society, Special Issue of Soils and Foundations , pp197~205, 1996
- 5) 濱田政則:液状化砂の流動特性に関する実験的研究, 土木学会論文集投稿中, 2004.
- 6) 井合進 他:既往の地震時事例に見られる液状化の護岸変形量について, 第 2 回 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 1997
- 7) 張至縞, 濱田政則: 液状化地盤の流動が基礎杭に及ぼす外力特性に関する研究, 土木学会論文集 No.766/I-68, pp191-201, 2004.7
- 8) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, (社)日本道路協会, 1996