

第5章 数値解析による液状化時の沈下量予測

5.1 概要

2011年東北地方太平洋沖地震で甚大な液状化被害を受けた浦安市において、地震後に得られたボーリングデータを参照し、1次元地震応答解析を行う。液状化層と非液状化層の厚さが沈下量に及ぼす影響に着目し解析結果をまとめる。またその結果を既往の沈下量推定式と比較検討し、液状化の可能性のある住宅地における簡易貫入試験結果を用いた被害予測に資する成果を得ることを目的とする。具体的には、本検討委員会で実施されたボーリング調査地点の内4地点を対象に、地盤データを2次元有効応力解析法 FLIP¹⁾⁴⁾に取り込み、簡易貫入試験から得られる情報である、換算(等価) N 値、液状化層厚、表層の非液状化層厚、地下水位をパラメータとして解析を行い、液状化時の地盤の沈下量を簡易かつ定量的に推定する方法を開発する。

5.2 数値解析モデルの概要

本研究では2次元動的有効応力解析プログラム FLIP¹⁾⁴⁾を用いて解析を行う。本解析プログラムで用いられる土の構成モデルは、多重せん断ばねモデル¹⁾を基本とするカクテルグラスモデル⁴⁾と呼ばれるものである。カクテルグラスモデルでは、間隙水圧の上昇、消散及びこれに伴う地盤沈下が表現可能となっている。膨張的ダイレイタンス成分を鉛直上向きに、仮想単純せん断ひずみを水平面内にプロットすると、砂粒の集合体の誘導異方構造として、カクテルグラスのような下に凸の関数となることからカクテルグラスモデルと呼ばれる。また、透水を考慮した解析のため、固層の変位 U と間隙水圧 P を未知数とした定式化 U - P フォーミュレーションを用いている。ただし、本定式化ではひずみと応力に関しては、収縮・圧縮を負、伸張・引張を正とする。ただし、間隙水圧に関しては、土・水連成系の定式化についてその概略を示す。以下、2次元解析の場合の構成則を示す。

5.2.1 カクテルグラスモデル構成則

(1) 基本形

まず、応力、ひずみベクトルを以下で与える。

$$\boldsymbol{\sigma}^T = \{\boldsymbol{\sigma}'_x \boldsymbol{\sigma}'_y \boldsymbol{\tau}_{xy}\} \quad (5.2.1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \{\boldsymbol{\varepsilon}_x \boldsymbol{\varepsilon}_y \boldsymbol{\gamma}_{xy}\} \quad (5.2.2)$$

多重せん断モデルの積分形の基本形を以下で与える。

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{n}^{(0)} + \sum_{i=1}^I q^{(i)} \mathbf{n}^{(i)} \Delta\omega \quad (5.2.3)$$

ここに、

$$\bar{\mathbf{n}}^{(0)T} = \{1 \quad 0\} \quad (5.2.4)$$

$$\bar{\mathbf{n}}^{(i)T} = \{\cos \omega_i \quad -\cos \omega_i \quad \sin \omega_i\} \quad (f \text{ or } i = 1, \dots, I) \quad (5.2.5)$$

$$\omega_i = (i-1)\Delta\omega \quad (5.2.6)$$

$$\Delta\omega = \pi / I \quad (5.2.7)$$

式(5.2.3)の等方成分 p および仮想単純せん断応力 $q^{(i)}$ は、有効体積ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}'$ および仮想単純せん断ひずみ $\gamma^{(i)}$ の関数として、以下で与えられる。

$$p = p(\omega') \quad (5.2.8)$$

$$q^{(i)} = q^{(i)}(\gamma^{(i)}, \boldsymbol{\varepsilon}', \boldsymbol{\varepsilon}'') \quad (5.2.9)$$

ここで、式(5.2.8)と式(5.2.9)で与えた有効体積ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}'$ は、体積ひずみからダイレイタンシーによる体積ひずみ成分を除去したものであり、以下で与える。

$$\boldsymbol{\varepsilon}' = \mathbf{n}^{(0)\top} \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{n}^{(0)\top} (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_d) \quad (5.2.10)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_d = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_d}{2} \mathbf{n}^{(0)} \quad (5.2.11)$$

式(5.2.11)におけるダイレイタンシー成分は、収縮的成分 $\boldsymbol{\varepsilon}_d^c$ および膨張的成分 $\boldsymbol{\varepsilon}_d^d$ よりなる。

$$\boldsymbol{\varepsilon}_d = \boldsymbol{\varepsilon}_d^c + \boldsymbol{\varepsilon}_d^d \quad (5.2.12)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_d = \boldsymbol{\varepsilon}_d^c + \boldsymbol{\varepsilon}_d^d \quad (5.2.13)$$

ここで

$$\boldsymbol{\varepsilon}_d^c = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_d^c}{2} \mathbf{n}^{(0)} \quad (5.2.14)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_d^d = \frac{\boldsymbol{\varepsilon}_d^d}{2} \mathbf{n}^{(0)} \quad (5.2.15)$$

また、収縮的ダイレイタンシー増分の液状化状態依存性を表現するため、仮想有効体積ひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}''$ を導入する。これは有効体積ひずみから膨張的ダイレイタンシーを除去したもので、以下で与える。

$$\boldsymbol{\varepsilon}'' = \mathbf{n}^{(0)\top} \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{n}^{(0)\top} (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_d^c) \quad (5.2.16)$$

仮想単純せん断ひずみ $\gamma^{(i)}$ は以下で与える。

$$\gamma^{(i)} = \mathbf{n}^{(i)\top} (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_d) = \mathbf{n}^{(i)\top} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5.2.17)$$

ダイレイタンシー成分の増分は、ひずみ増分の線形変換で与えられるものと仮定し、以下に示す。

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_d = \mathbf{n}_d^\top d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (5.2.18)$$

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_d^c = \mathbf{n}_d^{c\top} d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (5.2.19)$$

$$d\boldsymbol{\varepsilon}_d^d = \mathbf{n}_d^{d\top} d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (5.2.20)$$

よって式(5.2.12)より、

$$\mathbf{n}_d^d = \mathbf{n}_d^c + \mathbf{n}_d^d \quad (5.2.21)$$

(2) 増分形

増分形の構成式は、式(3)の両辺の微分を取ることで、以下で与えられる。

$$d\boldsymbol{\sigma} = -dp\mathbf{n}^{(0)} + \sum_{i=1}^l dq^{(i)} \mathbf{n}^{(i)} \Delta\boldsymbol{\omega} \quad (5.2.22)$$

$$dp = \frac{dp}{d\boldsymbol{\varepsilon}'} d\boldsymbol{\varepsilon}' \quad (5.2.23)$$

$$dq^{(i)} = \frac{\partial q^{(i)}}{\partial \gamma^{(i)}} d\gamma^{(i)} + \frac{\partial q^{(i)}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}'} d\boldsymbol{\varepsilon}' + \frac{\partial q^{(i)}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}''} d\boldsymbol{\varepsilon}'' \quad (5.2.24)$$

式(5.2.19)と式(5.2.20)に、式(5.2.10)、式(5.2.16)、式(5.2.17)を代入すると、

$$dp = \frac{dp}{d\boldsymbol{\varepsilon}'} n^{(0)\top} d(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_d) \quad (5.2.25)$$

$$dq^{(i)} = \frac{\partial q^{(i)}}{\partial \gamma^{(i)}} n^{(i)\top} d\boldsymbol{\varepsilon} + \frac{\partial q^{(i)}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}'} n^{(0)\top} d(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_d) + \frac{\partial q^{(i)}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}''} n^{(0)\top} d(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_d^c) \quad (5.2.26)$$

式(5.2.25)と式(5.2.26)および式(5.2.18)～(5.2.20)を式(5.2.22)に代入すれば、増分形の構成式が以下で与えられる。

$$d\boldsymbol{\sigma} = \bar{D}d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (5.2.27)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D} = & K_{L/U} \mathbf{n}^{(0)} \mathbf{n}^{(0)\top} + \sum_{i=1}^l G_{L/U}^{(i)} \mathbf{n}^{(i)} \mathbf{n}^{(i)\top} \Delta\omega - K_{L/U} \mathbf{n}^{(0)} \mathbf{n}_d^\top + \\ & \sum_{i=1}^l (H^{(i)} + L^{(i)}) \mathbf{n}^{(i)} \mathbf{n}^{(0)\top} \Delta\omega - \sum_{i=1}^l (H^{(i)} \mathbf{n}^{(i)} \mathbf{n}_d^\top + L^{(i)} \mathbf{n}^{(i)} \mathbf{n}_d^{c\top}) \Delta\omega \end{aligned} \quad (5.2.28)$$

ここに、

$$K_{L/U} = -\frac{dp}{d\boldsymbol{\varepsilon}'} \quad (5.2.29)$$

$$G_{L/U}^{(i)} = \frac{\partial q^{(i)}}{\partial \gamma^{(i)}} \quad (5.2.30)$$

$$H^{(i)} = \frac{\partial q^{(i)}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}'} \quad (5.2.31)$$

$$L^{(i)} = \frac{\partial q^{(i)}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}''} \quad (5.2.32)$$

式(5.2.28)の右辺の第1項、第2項は、それぞれ圧縮伸張およびせん断に関する増分形を表し、対称マトリクスである。第3項は圧縮伸張へのダイレイタンシーの影響、第4項はせん断機構の拘束圧依存性および液状化状態依存性、第5項はせん断機構に与えるダイレイタンシーの影響を表すものである。これら第3～5項は、いずれも圧縮伸張の機構とせん断に関する機構のカップリングの3種類の機構を示すもので、非対称マトリクスとなる。

(3) ダイレイタンシーの定式化

従来の非排水条件における解析¹⁾では、過剰間隙水圧の発生は液状化フロントモデルが用いられている。このモデルは、非排水条件下の砂に対して、単位体積の土になされた塑性せん断仕事に応じて応力経路を与えるものである。塑性せん断仕事の累積値に基づき、同図中に示す液状化フロントパラメータ S_0 の位置が決定され、その状態において可能な応力経路は図中に示す液状化フロントである。液状化フロントの位置が決まれば、せん断応力比 r に応じて状態変数 S が定まり、この S により砂のせん断強度が調節される。

一方、本研究で用いる解析で用いているストレスダイレイタンシーモデルでは、式(5.2.12)に示すように、ダイレイタンシーを膨張的ダイレイタンシー成分と収縮的ダイレイタンシー成分に分けている。式(5.2.12)におけるダイレイタンシーの膨張的成分 $\boldsymbol{\varepsilon}_d^d$ および収縮的成分の増分 $\boldsymbol{\varepsilon}_d^c$ は以下で与えられる。

$$d\epsilon_d^d = \gamma_{\epsilon_d} \sum_{i=1}^l \left[\left| \frac{\gamma^{(i)}}{\gamma_v} \right| - \ln \left(1 + \left| \frac{\gamma^{(i)}}{\gamma_v} \right| \right) \right] \gamma_v m_{lv} \Delta \omega \quad (5.2.33)$$

$$d\epsilon_d^c = -r_{\epsilon_d} r_{\epsilon_d^c} r_{S_0} \sum_{i=1}^l r_t^{(i)} M_v \left| d\gamma_p^{(i)} \right| \Delta \omega \quad (5.2.34)$$

$$\gamma_{S_0} = S_0^{*q_2} \left[S_0^* - S_{bi} \right] q_1 + (1 - S_0^*) \left(1 - S_{bi} \right) \quad (S_0^{*q_2} < S_{bi} (=0.8) \text{ の場合}) \quad (5.2.35)$$

$$\gamma_{S_0} = S_0^{*q_2} \quad (S_0^{*q_2} > S_{bi} (=0.8) \text{ の場合}) \quad (5.2.36)$$

$$d\gamma_p^{(i)} = d\gamma^{(i)} - c_1 d\gamma_e^{(i)} \quad \left(\left| d\gamma^{(i)} \right| \leq \left| c_1 d\gamma_e^{(i)} \right| \text{ の場合には } d\gamma_p^{(i)} = 0 \text{ とする} \right) \quad (5.2.37)$$

ここで、

$$m_{lv} = \frac{m_l}{\sum_{i=1}^l \sin \omega_i \Delta \omega} \quad (5.2.38)$$

$$M_v = \left(1 - \frac{(-\epsilon_d^c)}{\epsilon_d^{cm}} \right)^{q_3} M_{v0} \quad (-\epsilon_d^c > \epsilon_d^{cm} \text{ の場合には } M_v = 0 \text{ とする}) \quad (5.2.39)$$

$$M_{v0} = \frac{M_p}{\sum_{i=1}^l \sin \omega_i \Delta \omega} \quad (5.2.40)$$

$$M_p = \sin \phi_p \quad (5.2.41)$$

γ_v : 仮想単純せん断モデルの(せん断)基準ひずみ

r_{ϵ_d} : 収縮的ダイレイタンシーおよび膨張的ダイレイタンシーに共通してかかるパラメータ

$r_{\epsilon_d^c}$: 収縮的ダイレイタンシーのみにかかるパラメータ

$\gamma_t^{(i)}$: 変相線付近を超えた領域における収縮的ダイレイタンシーの寄与度制御するパラメータ

$-\gamma_d^{cm}$: 負のダイレイタンシーによる体積ひずみの終局の値

ϕ_p : 変相角

上記の式(5.2.33)と式(5.2.34)を式(5.2.3)に組み込むことで、多重せん断モデルのダイレイタンシーを表現できる。

5.2.2 土・水連成系の定式化について

以下では、Zienkiewicz and Bettles(1982)⁴⁾に従い、本解析プログラムで用いられている、間隙水で満たされた多孔質体の運動方程式および水流の収支バランス式の導出を示す。

(1) 前提

σ_{ij} (引張正)、間隙流体圧を p (圧縮正)とする。すると有効応力は次式で与えられる。

$$\sigma_{ij}' = \sigma_{ij} + \delta_{ij} p \quad (5.2.42)$$

また、ひずみを以下のように定義する。

$$\epsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2 \quad (5.2.43)$$

但し、

$$u_{i,j} = \partial u_i / \partial x_j \quad (5.2.44)$$

である。ここで、土粒子の変位を u_i 、間隙率を n と置き、間隙流体の変位を $u_i + w_i/n$ とする。

(2) 全体系の運動方程式

全体系の運動方程式は、重力加速度を g_i 、土要素全体の密度を ρ 、流体部分の密度を ρ_f と定義すると、次式で与えられる。

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho \ddot{u}_i + \rho_f \ddot{w}_f \quad (5.2.45)$$

但し、

$$\frac{\partial}{\partial t} u_i \equiv \dot{u}_i \quad (5.2.46)$$

とする。

(3) 流体系の運動方程式

透水係数を

$$k_{ij} = \delta_{ij} k \quad (5.2.47)$$

と定義すると、 xi 方向の流体の速度はダルシー則より、

$$-p_{,i} = k_{ij}^{-1} \dot{w}_j \quad (5.2.48)$$

となるので、流体系の運動方程式は次式で与えられる。

$$-p_{,i} + \rho_f g_i = k_{ij}^{-1} \dot{w}_j + \rho_f \ddot{u}_i + \rho_f \ddot{w}_i / n \quad (5.2.49)$$

(4) 質量保存則

質量保存則は、土粒子の体積弾性係数を K_s 、間隙流体の体積弾性係数を K_f と定義すると、次式で与えられる。

$$\dot{w}_{i,i} = -\dot{\epsilon}_{ii} - (1-n)\dot{p} / K_s + \dot{\sigma}'_{ii} / 3K_s - \dot{p}n / K_f \quad (5.2.50)$$

(5) U-P formulation

U-P formulation 導出の際には、

$$\dot{w}_i / \dot{u}_i \rightarrow 0 \quad (5.2.51)$$

の関係をを用いると多孔質体の運動方程式は次式で与えられる。

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho \ddot{u}_i \quad (5.2.52)$$

また(5.2.49)式と(5.2.50)式にも(5.2.51)式の関係を用いて連立させると以下に示す水流の収支バランス式が得られる。

$$(k_{ij} p_{,j})_{,i} - (k_{ij} \rho_f \ddot{u}_j)_{,i} = -(k_{ij} \rho_f \ddot{u}_j)_{,i} + \frac{n\dot{p}}{K_f} \quad (5.2.53)$$

但し、導出に当たっては(5.2.49)式における土粒子の体積弾性係数は十分に大きいため、(5.2.50)式の右辺第二項と第三項を省略した。本研究では透水解析を行うため、(5.2.52)式と(5.2.53)式を連立させて計算を行う。

(6) 境界条件と初期条件

次に示す4種の境界条件について考える。

$$u_i = \bar{u}_i \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (5.2.54)$$

$$\sigma_{ij}v_j = \bar{T}_i \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (5.2.55)$$

$$p = \bar{p} \quad \text{on } \Gamma_3 \quad (5.2.56)$$

$$-\dot{w}_j v_j = k_{ij} (p_{,i} - \rho_f g_i + \rho_f \ddot{u}_i)_{,i} = \bar{q} \quad \text{on } \Gamma_4 \quad (5.2.57)$$

但し、

\bar{u}_i : Γ_1 境界上で規定される変位

\bar{T}_i : Γ_2 境界上で規定される表面力

\bar{p} : Γ_3 境界上で規定される間隙水圧

\bar{q} : Γ_4 境界上で規定される間隙水流入量

\dot{w}_j : 間隙水の骨格に対する相対速度(断面平均)

なお、 Γ_1 境界と Γ_2 境界をあわせたものが対象領域 V の全表面 Γ に等しい。また、 Γ_1 境界と Γ_2 境界の共通部分はない。 Γ_3 境界と Γ_4 境界についても同様である。

初期条件は領域 V の各点で次のように与えられるものとする。

$$u_i = \dot{u}_i = \ddot{u}_i = 0 \quad (5.2.58)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{st} = \sigma_{ij}^{st} - \delta_{ij} p^{st} \quad (5.2.59)$$

$$p = p^{st} \quad (5.2.60)$$

$$\dot{p} = 0 \quad (5.2.61)$$

特に、境界上では、次のように与えられるものとする。

$$u_i = \bar{u}_i^{st} = 0 \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (5.2.62)$$

$$\sigma_{ij}^{st} v_j = \bar{T}_i^{st} \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (5.2.63)$$

$$p = \bar{p}^{st} \quad \text{on } \Gamma_3 \quad (5.2.64)$$

$$k_{ij} (p_{,i}^{st} - \rho_f g_i)_{,j} = \bar{q}^{st} \quad \text{on } \Gamma_4 \quad (5.2.65)$$

以後、初期条件により示される系の状態を基準状態と呼ぶことにする。基準状態では、(5.2.52)式は、

$$\sigma_{ij,j}^{st} + \rho g_i = 0 \quad (5.2.66)$$

となる。(5.2.66)式を用い、(5.2.52)式から ρg_i の項を消去すると、次式を得る。

$$(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{st})_{,j} = \rho \ddot{u}_i \quad (5.2.67)$$

また、基準状態では(5.2.53)式は、

$$(k_{ij} p_{,j}^{st})_{,i} - (k_{ij} \rho_f g)_{,i} = 0 \quad (5.2.68)$$

となる。(5.2.68)式を用い、(5.2.53)式から重力加速度 g_i を含む項を消去すると次式を得る。

$$(k_{ij} (p_{,j} - p_{,j}^{st}))_{,i} - \dot{\epsilon}_{ii} = -(k_{ij} \rho_f \ddot{u}_j)_{,i} + n\dot{p} / K_f \quad (5.2.69)$$

以後、(5.2.68)式および(5.2.69)式を用いて、有限要素法に基づく定式化を行う。

5.3 浦安市高洲におけるボーリングデータを用いた1次元有効応力解析

まず、浦安市高洲の地点1と地点3(図-5.3.1)の標準貫入試験結果より、図-5.3.2に示すCase 0-1、Case 0-3の解析メッシュ(1メッシュサイズ1m×1m)を作成した。いずれのケースにおいても土層を表層から非液状化層(埋立層、透水係数 $k=4\times 10^{-5}$ m/s)、液状化層(沖積層、 $k=8\times 10^{-4}$ m/s)、粘土層($k=4\times 10^{-5}$ m/s)の3つに単純化して分割し、深度20mまでをモデル化した。解析パラメータは、 N 値から経験式によって得られる値と、室内試験より得られた液状化強度曲線に対してフィッティングして求めた値を用いた。解析に使用した入力加速度はK-NET(CHB008)で得られた観測記録(図-5.3.3(b))と振動数1Hz、継続時間10秒の正弦波である。図-5.3.3(a)は、地点1に対し、図-5.3.3(b)の観測記録を入力して得られた地表面の加速度記録である。この時の過剰間隙水圧消散までを考慮した地表面の残留沈下量は約35cmであり、観測値に近い結果が得られた。図-5.3.3(a)より、地表面加速度振幅は、約60~100秒までは大きく増幅しているが、その後振幅はほぼ一定値を保っていることがわかる。これは、図-5.3.4(b)に示すように、100秒付近で液状化層の間隙水が表層に浸透したことで液状化が発生したためであると推察される。これは実地盤での噴砂現象のメカニズムと対応している。

以下では同じ地盤パラメータを用い、層厚20m一定の元、表層の非液状化層厚(H_1)と液状化層厚(H_2)を変化させたときの、正弦波入力に対する地表面の沈下量に着目して考察する。

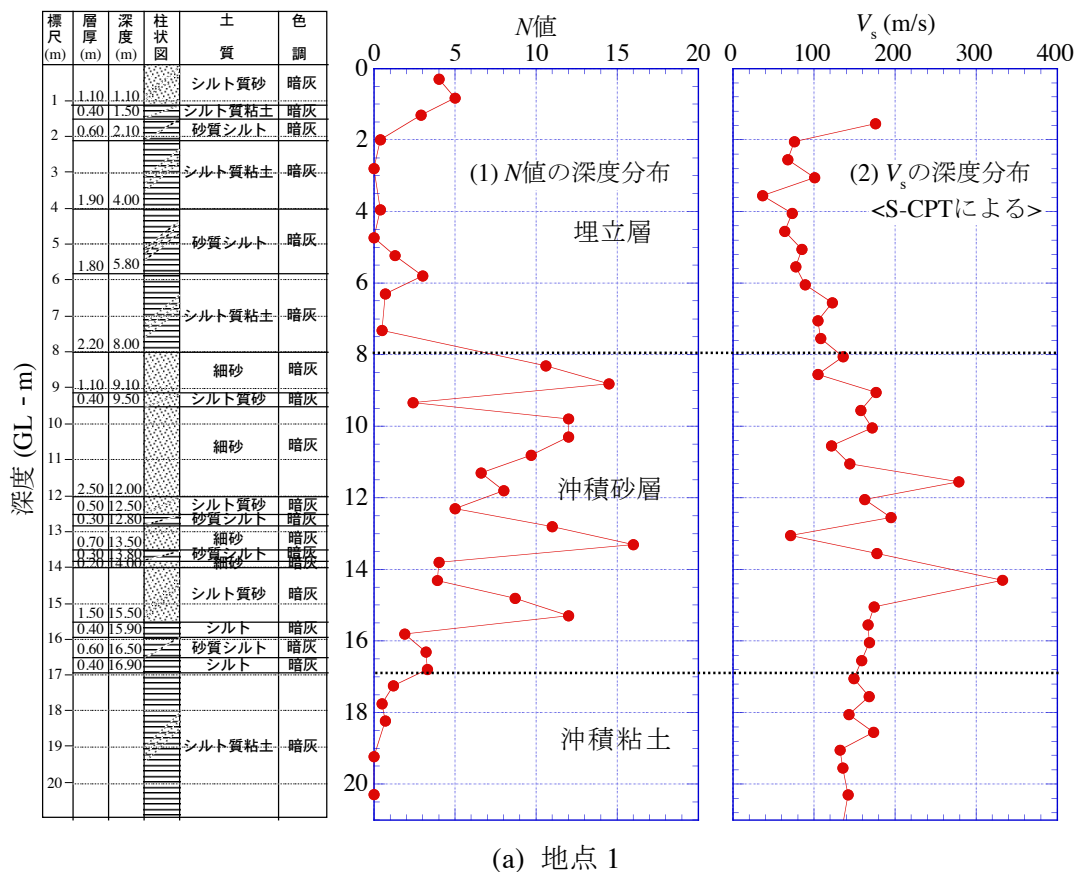
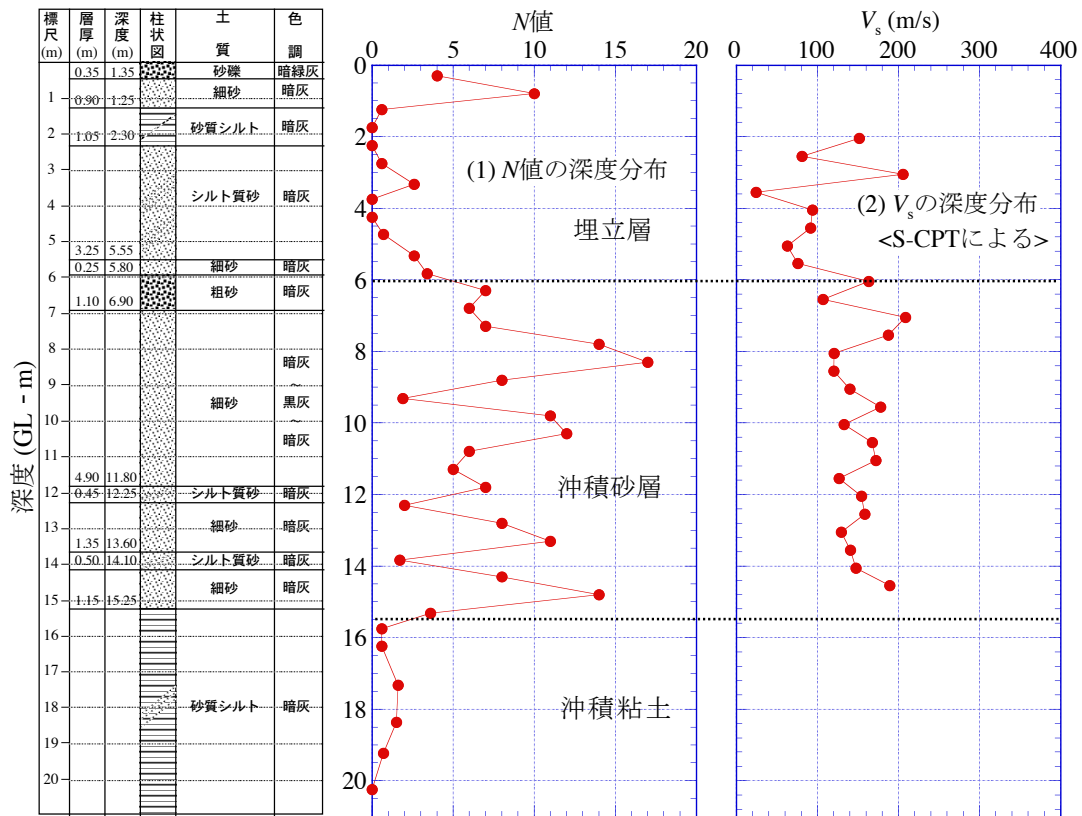


図-5.3.1 浦安市高洲におけるボーリング記録⁶⁾(つづく)



(b) 地点 3

図-5.3.1 浦安市高洲におけるボーリング記録⁶⁾ (つづき)

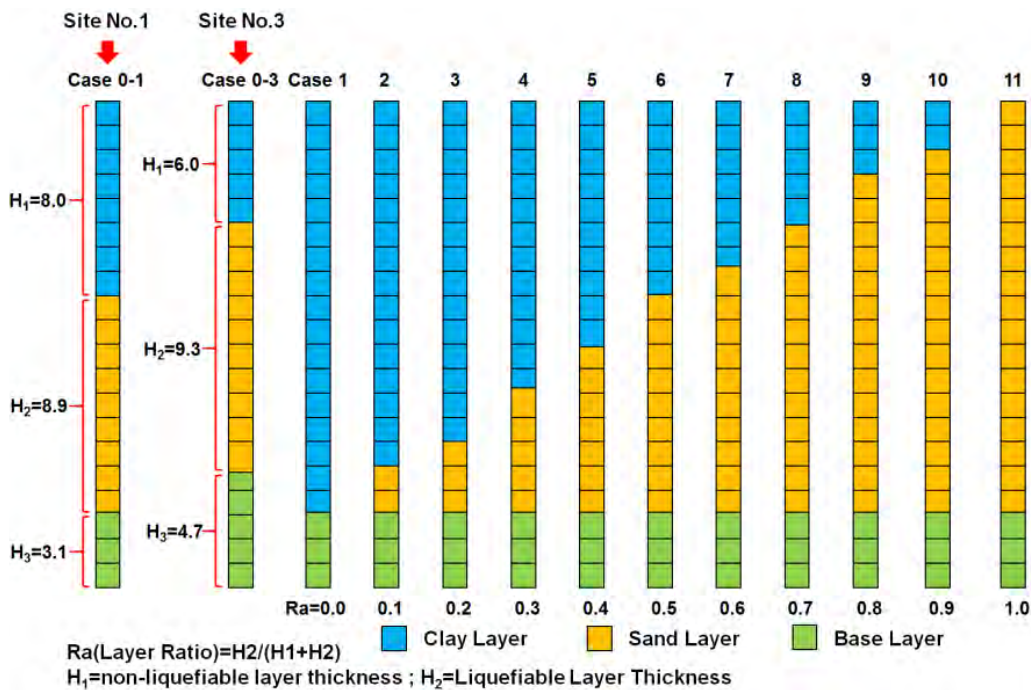


図-5.3.2 解析に用いたメッシュ：地点 1、 3 およびケース 1 から 11

解析により得られた沈下量と、以下に示す既往の液状化による沈下量推定式⁷⁾とを比較する (図-5.3.5)

$$S = 0.250 \times T \times A_{\max} / N_{liq} + 2.52 \quad (5.3.1)$$

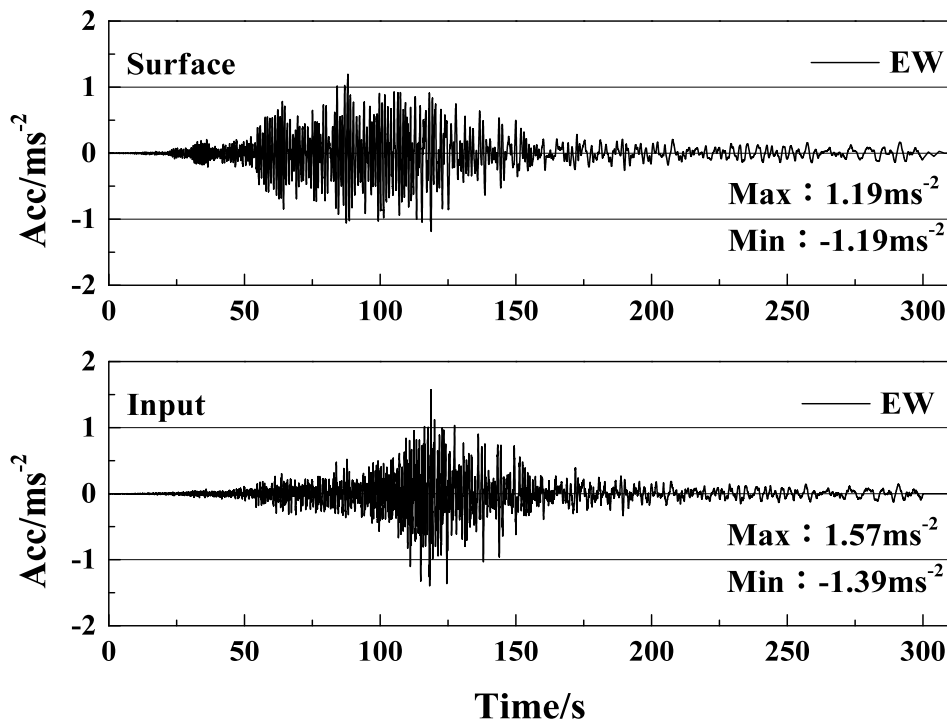


図-5.3.3 地点1の解析結果：加速度時刻歴：(a)地表面、(b)入力（K-NET: CHB008）

ここで、 S ：沈下量(cm)、 T ：砂層厚(m)、 A_{max} ：加速度最大振幅(gal)、 N_{liq} ：砂層 N 値である。ただし、推定式(5.3.1)の適用範囲は、回帰分析に用いたデータ範囲より、砂層厚さ2から22m、砂層 N 値2から30、最大水平加速度42から392gal、沈下量0.1から1.5mである⁷⁾。図-5.3.5は、全解析結果について沈下量を比較したものである。沈下量30cm程度までは両者はほぼ一致するが、それ以上では、ばらつきが大きくなり、本解析結果（横軸）がやや過小評価となっていることがわかる。しかし、両者の推定値は図-5.3.5中に示す傾き2と1/2で表される直線で囲まれる範囲内に収まっており、推定式(5.3.1)と本解析結果の相関は比較的高いと言える。

次に、加速度最大振幅と沈下量の関係について考察する。図-5.3.6は、入力加速度振幅と沈下量の関係をケースごとに示すものである。同図より、Case7までは沈下量と加速度振幅に比例関係が見られるが、非液化化層厚(H_l)が5m以下（Case8～11）では、300gal以上の振幅で沈下量が約90cmで頭打ち、あるいは加速度振幅の増加とともに大きな沈下傾向を示している。既往の研究では、非液化化層厚5mから6mの場合、液化化層厚にも依存するが、約300galの入力加速度振幅で液化化被害が生じると推定されており⁸⁾、本解析結果とも整合する。同図中に三角形のマーカー(Tohoku-EW)で示す東北地震波形による解析結果は、Case6の曲線上にあり、加速度振幅が157galに対し、沈下量は約35cmとなっている。土槽分割はCase0-1とCase6とで等しいことから、正弦波（1Hz、10波、振幅157gal）と東北地震波形（図-5.3.3(b)、継続時間約300秒、最大振幅157gal）とが残留沈下量に与える影響が、本検討においては同程度であったと推察される。

本研究では、1次元有効応力解析による沈下量と既往の沈下量推定式より得られる沈下量を比較し、両者が比較的良好な精度で一致することが示された。また、表層の非液化化層厚が5m以下、入力加速度振幅が200から300gal以上の場合、残留沈下量が急増する結果となった。ただし、同層厚が5m以上でも50cm程度の沈下が発生する可能性が示唆された。

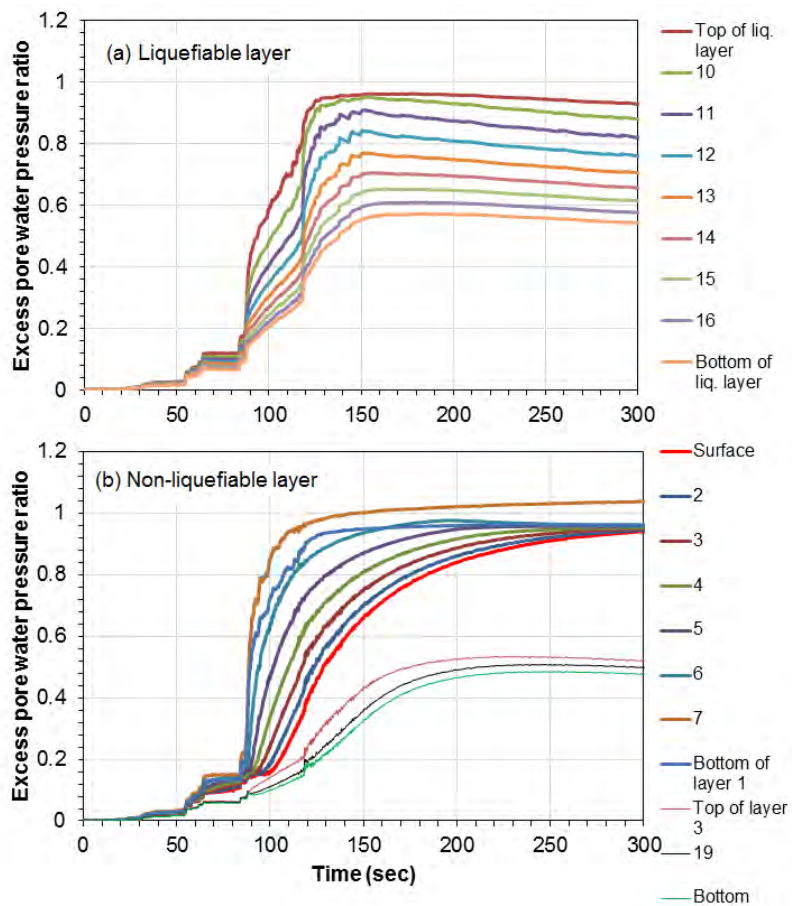


図-5.3.4 地点1の解析結果 (Case 0-1: K-NET: CHB008) : 過剰間隙水圧時刻歴 : (a)液状化層、(2)非液状化層

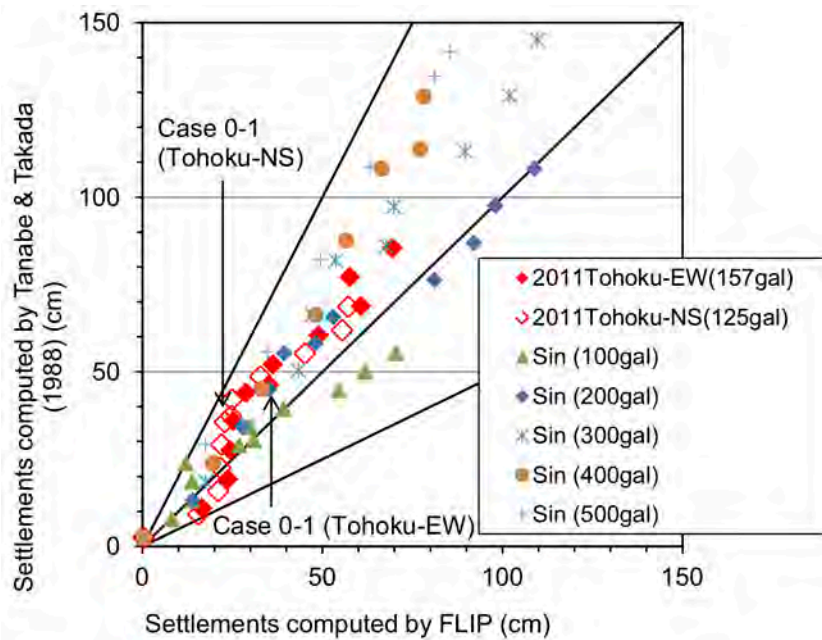


図-5.3.5 既往の沈下量予測式⁷⁾との比較

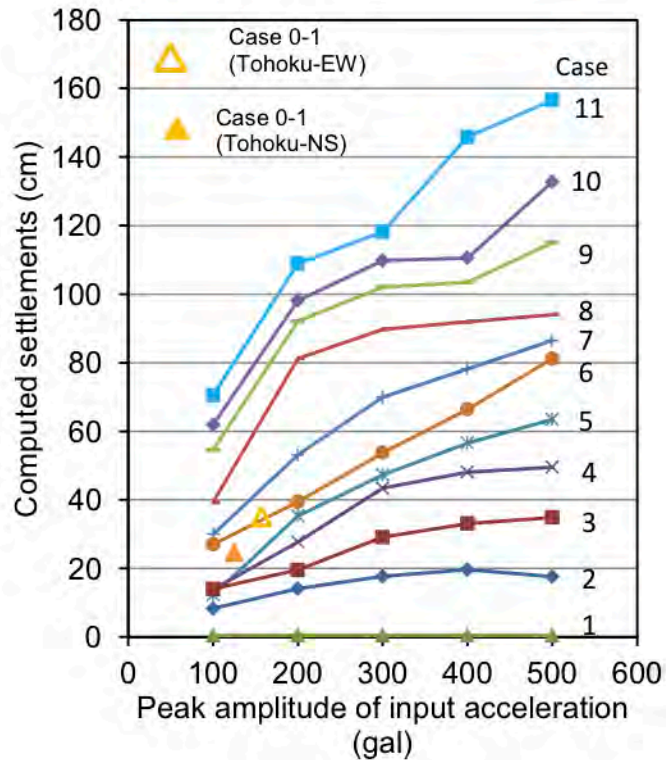


図-5.3.6 沈下量と入力加速度振幅の関係

5.4 地表面の非液状化層厚を考慮した沈下量推定式の提案

ここでは地盤沈下量を推定するための非線形多変量回帰式を提案する。そのための試みとして、入力加速度振幅(A)、地下水位以深の非液状化層厚(H_1)並びに液状化層厚(H_2)を変化させた有効応力解析を行って沈下量を求め、その沈下量を真値として回帰式を導く。ただし、本来であれば実測沈下量を真値として回帰分析を行うべきであるが、本研究では解析値を真値としていることに注意が必要である。したがって、のちに提案する回帰式の適用に当たっては、まず実測値との厳密な比較検証が必要であり、それに応じて適宜修正がなされなければならない。

まずボーリングデータが得られている4地点（浦安市高洲地点1、地点3、浦安市運動公園、守山市地点2(水保)）を対象に、5.3で用いた有効応力解析法を用い地震応答解析を行った。用いた入力加速度時刻歴は、図-5.3.5(b)に示すK-NET(CHB008)EW成分と、継続時間30秒で前後10秒間にテーパーを掛け漸増、漸減する正弦波である。正弦波については、振幅100galから500galまで100gal刻みの5パターンとした。表-5.4.1に示すようにケース毎に非液状化層厚(H_1)と液状化層厚(H_2)を変化させ、1地点につき12ケースの検討を行った。各地点におけるCase 0は、ボーリングデータから読み取った地層区分に対しメッシュを作成し解析を行ったケースであり、Case 1からCase 11は、 H_1 と H_2 を表-5.4.1の通り変化させたケースである。解析ケースの総数は288(=4地点×6地震動×12地層分割)ケースである。数値解析の詳細は付録1)から付録4)に示す。

5.3で述べた田邊・高田の式⁷⁾を参照し、これに非液状化層厚の影響を組み込むことを目的とする。田邊・高田の式を次式(5.4.1)に示す。

$$S = 0.25H_2A / N + 2.52 \quad (5.4.1)$$

ここで、 H_2 ：液状化層厚、A：入力加速度振幅、N：液状化層のN値である。ここでは、式(5.4.1)を参考に、一般的な表現として、次式(5.4.2)を仮定する。

表-5.4.1 解析ケース

Case	Site	Type of input motion	Input amplitude (gal)	Thickness (Liquefiable): H ₂ (m)	Thickness (non-liquefiable): H ₁ (m)
case0-U1	Urayasu City No.1	K-NET-Urayasu EW /Sin	157/100, 200, 300, 400, 500	8.9	8.0
case1-U1				0.0	16.9
case2-U1				1.7	15.2
case3-U1				3.4	13.5
case4-U1				5.1	11.8
case5-U1				6.8	10.1
case6-U1				8.5	8.5
case7-U1				10.1	6.8
case8-U1				11.8	5.1
case9-U1				13.5	3.4
case10-U1				15.2	1.7
case11-U1	16.9	0.0			
case0-U3	Urayasu City No.3	K-NET-Urayasu EW /Sin	157 /100, 200, 300, 400, 500	9.3	6.0
case1-U3				0.0	15.3
case2-U3				1.5	13.7
case3-U3				3.0	12.2
case4-U3				4.6	10.7
case5-U3				6.1	9.2
case6-U3				7.6	7.6
case7-U3				9.2	6.1
case8-U3				10.7	4.6
case9-U3				12.2	3.0
case10-U3				13.7	1.5
case11-U3	15.3	0.0			
case0-SP	Urayasu City Sports Park	K-NET-Urayasu EW /Sin	157 /100, 200, 300, 400, 500	6.5	5.2
case1-SP				0.0	11.7
case2-SP				1.2	10.5
case3-SP				2.3	9.4
case4-SP				3.5	8.2
case5-SP				4.7	7.0
case6-SP				5.9	5.9
case7-SP				7.0	4.7
case8-SP				8.2	3.5
case9-SP				9.4	2.3
case10-SP				10.5	1.2
case11-SP	11.7	0.0			
case0-M2	Moriyama City Site No.2	K-NET-Urayasu EW /Sin	157 /100, 200, 300, 400, 500	7.0	1.8
case1-M2				0.0	8.8
case2-M2				0.9	7.9
case3-M2				1.8	7.0
case4-M2				2.6	6.1
case5-M2				3.5	5.3
case6-M2				4.4	4.4
case7-M2				5.3	3.5
case8-M2				6.1	2.6
case9-M2				7.0	1.8
case10-M2				7.9	0.9
case11-M2	8.8	0.0			

$$S = aH_2^\alpha A / N + bH_1^\beta A + cH_0^\gamma A + d \quad (5.4.2)$$

ここで、 H_0 ：地下水位以浅の非液化化層厚、 H_1 ：地下水位以深の非液化化層厚、 a 、 b 、 c 、 d は回帰係数である。

まず、 H_0 と H_1 を区別せず両者の和を非液状化層厚とした場合、すなわち地盤が非液状化層と液状化層の2層からなると仮定した場合について回帰分析を行った。その結果、次式(5.4.3)を得た。

$$S = 0.178H_2^{0.9} A / N - 1.07 \times 10^{-4} H_1^{4.1} + 14.4 \quad (5.4.3)$$

式(5.4.3)による推定結果は、図-5.4.1に示す通り沈下量60cm程度までは、数値解析結果と良い一致を示すものの、沈下量がそれ以上になると推定式の方が過大評価する傾向にある($r=0.972$)。

次に、 H_0 と H_1 を区別して回帰分析を行ったところ、次式(5.4.4)を得た。

$$S = 0.294H_2^{0.6} A / N - 0.137H_1^2 - 20H_0^{0.3} + 35.5 \quad (5.4.4)$$

本回帰式による推定結果は、図-5.4.2に示す通り、沈下量が1mを超える範囲についても数値解析結果と良い一致を示していることがわかる($r=0.986$)。

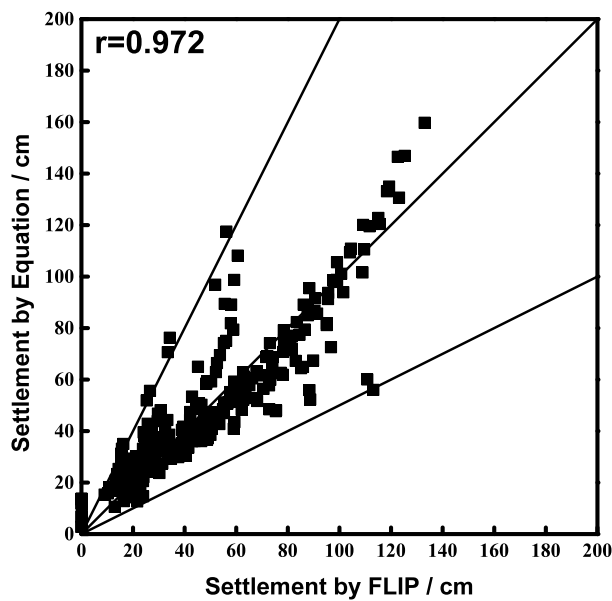


図-5.4.1 沈下量推定式(式(5.4.3))と有効応力解析による沈下量

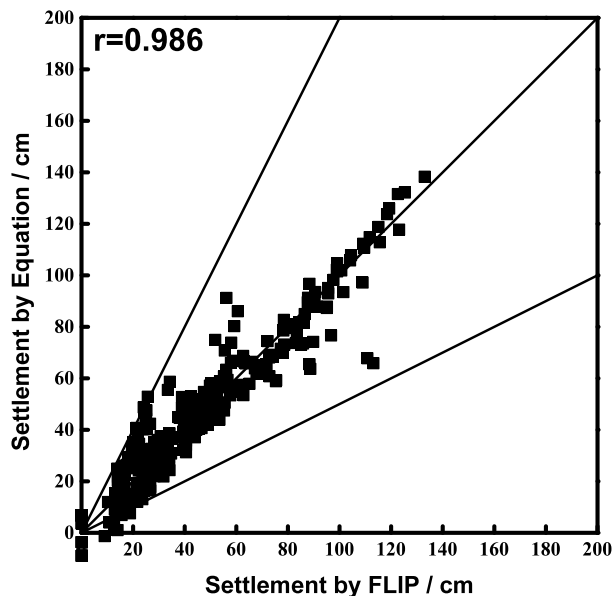


図-5.4.2 沈下量推定式(式(5.4.4))と有効応力解析による沈下量

5.5 まとめ

本研究では、液状化による沈下量の簡易推定式を求めることを目的とした。本研究で実施したボーリング4地点を選択し、1次元の有限要素解析を行った。同解析は、多重せん断ばねモデルを基本とするカクテルグラスモデルを構成則として採用した有効応力解析法であり、液状化による過剰間隙水圧の消散による沈下についても計算することができる。入力加速度は、2011年東北地方太平洋沖地震における観測記録と継続時間30秒の正弦波を使用した。まず浦安市における沈下量の推定を行うため、ボーリングデータと要素試験結果から解析パラメータを決定した。解析地点の入力加速度記録としてはK-NET(CHB008)で得られた記録をGL-20mの地点に入力した。この入力に対し、実測沈下量に近い約30cmの沈下量が計算された。また、非液状化層厚と液状化層厚をパラメータとして変化させた場合についても計算を行い、その結果を既往の沈下量推定式と比較したところ、沈下量30cm程度までは良い一致を示すが、それ以上ではばらつきが大きくなる結果となった。

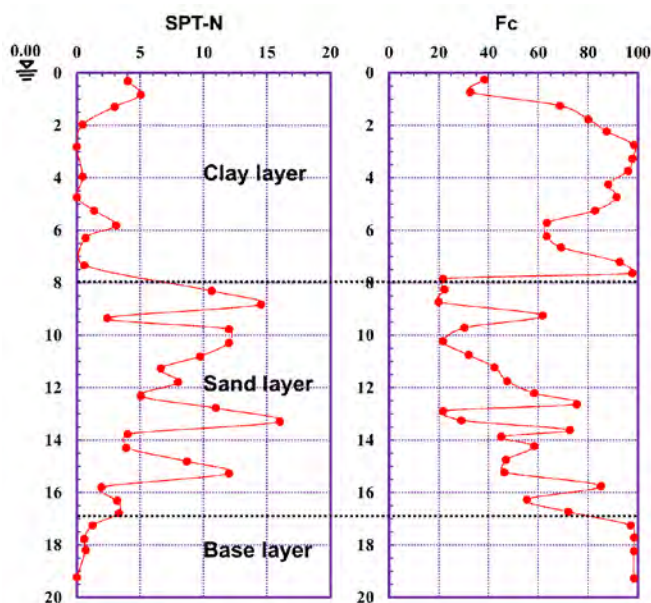
次に、既往の推定式では考慮されていない、表層の非液状化層厚の影響を考慮した沈下量推定式を提案した。ただし、本来であれば実測沈下量を真値として回帰分析を行うべきであるが、本研究では解析値を真値としていることに注意が必要である。したがって、のちに提案する回帰式の適用に当たっては、まず実測値との厳密な比較検証が必要であり、それに応じて適宜修正がなされなければならない。以上を念頭に置いたうえで、パラメータとして非液状化層だけではなく、簡易試験で得られる地下水位を用いて地下水位が浅くおよび深層を考慮した推定式を提案し、同式が解析結果(=この場合の真値)と良い一致を示すことを確認した。

謝辞：本研究では防災科学研究所 K-NET 観測記録を使用した。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Iai, S. Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 27-56, 1990.
- 2) 井合進・飛田哲男・小堤治：砂の繰り返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンスー関係、京都大学防災研究所年報、第51号、2008.
- 3) 小堤治：液状化地盤上の地盤・構造物系の地震時被害推定に関する数値解析法の研究、京都大学博士学位論文、2003.
- 4) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K. : Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 35, No. 3, pp.360-392, 2011.
- 5) Zienkiewicz, O. C. and Bettess, P. : Soil and other saturated media under transient, dynamic conditions, General formulation and the validity of various simplifying assumptions, in G.N. Pande and O.C. Zienkiewicz (eds), *Soil mechanics – Transient and Cyclic loads*, John Wiley & Sons, 1982.
- 6) 大島昭彦・田中洋行・三村衛・吉村貢・浅尾一巳・和田昌大：浦安市における各種動的サウンディング試験の比較(その1：調査概要)、浦安地盤調査一斉試験報告会(地盤工学会)、2012.
- 7) 田邊揮司良・高田至郎：ライフライン解析のための地震時地盤沈下量の推定、土木学会論文集, Vol. 392/I-9, pp. 377-384, 1988.
- 8) Ishihara, K. : Stability of natural deposits during earthquakes, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1: 321-376, 1985.
- 9) 浜田正則・安田進・磯山龍二・恵本克利：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, Vol. 376, No. III-6, pp. 221-229, 1986.

付録 1) 浦安市高洲地点 1 に対する FLIP による数値解析結果



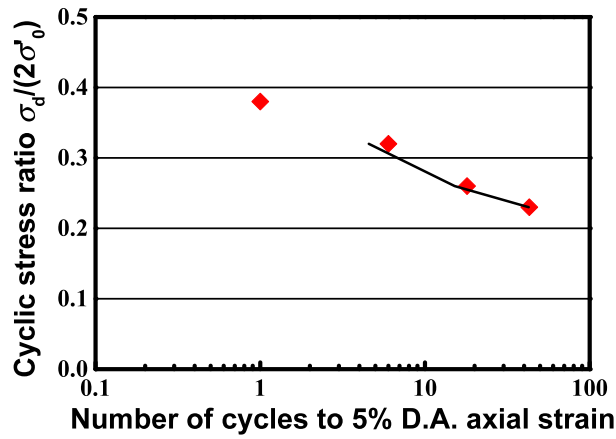
付図 1-1 浦安地点 1 の N 値と細粒分含有率の深度分布

付表 1-1 解析に用いた地盤パラメータ (浦安地点 1)

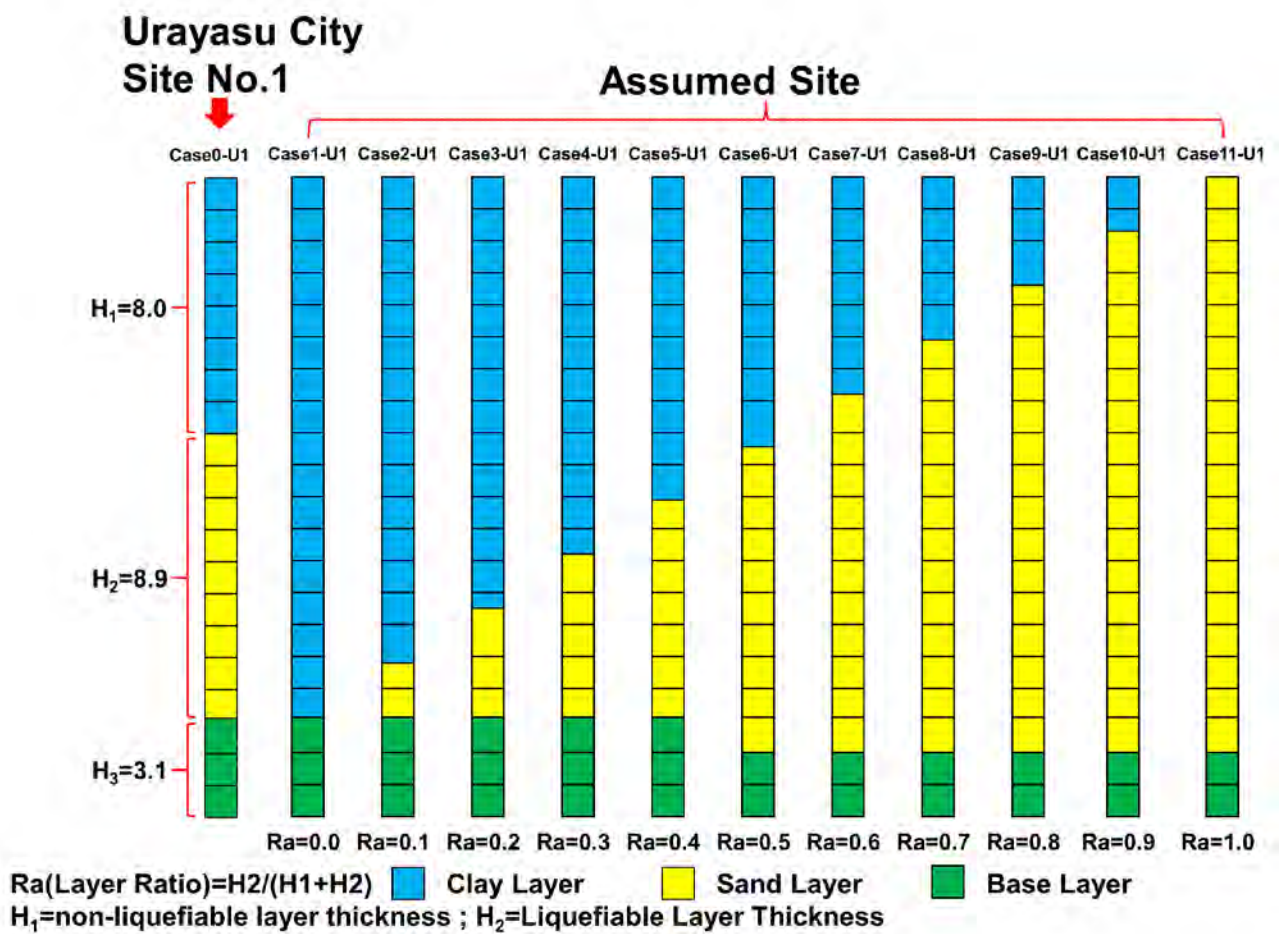
	Symbol	Unit	Clay No.1	Clay No.2	Sand No.1
ρ	RHO	10^3kg/m^3	1.70	1.70	1.90
P_a	PA	kN/m^2	62.00	325.00	156.00
G_{ma}	G0	kN/m^2	74970.0	74970.0	61476.0
m_G	PMG	-	0.5	0.5	0.5
K_{La}	RKLA	kN/m^2	195500.0	195500.0	160320.0
L_{Ua}	RKUA	kN/m^2	195500.0	195500.0	160320.0
n_K	PNK	-	0.5	0.5	0.5
-	PN	-	0.55	0.55	0.56
-	WKF	-	2200000	2200000	2200000
h_{max}	HMAX	-	0.30	0.30	0.30
-	COH	-	0	0	0
ϕ_f	PHIF	$^\circ$	30	30	34

付表 1-2 解析に用いた液状化パラメータ (浦安地点 1)

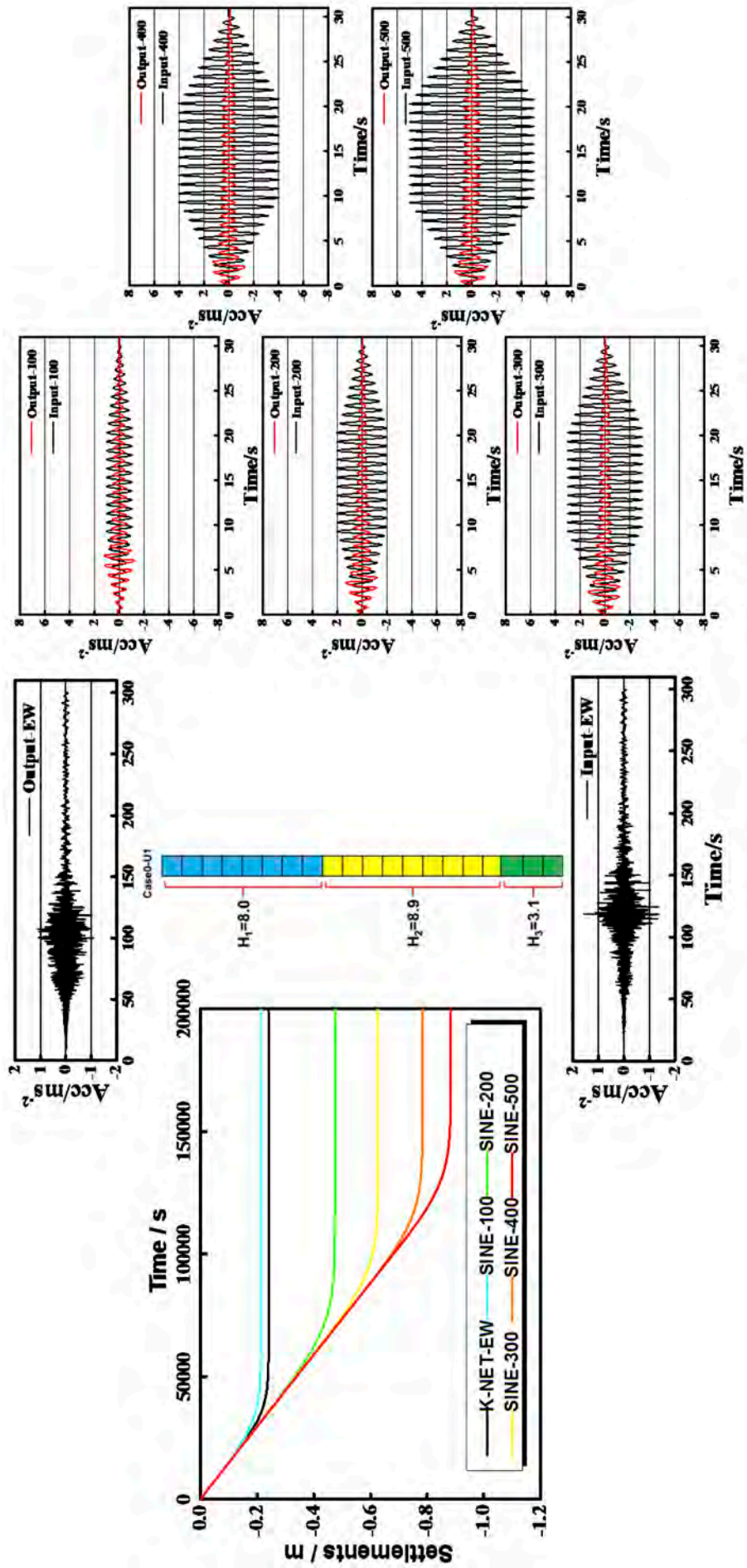
	PHIP ϕ_p	EPSCM ε_d^{cm}	repsdc r_{sdc}	STOL	repsd r_{sd}	q1 q_1	q2 q_2	rkpp r_0
Sand No.1	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	1.0	1.0	0	0.1
	plk l_K	rk r_K	s1 s_1	c1 c_1	qus q_{us}	q4 q_4	rgamma r_{tmp}	rrmtmp r_{mtmp}
Sand No.1	2.0	0.1	0.005	2.9	10,000	1.0	0.1	0.5



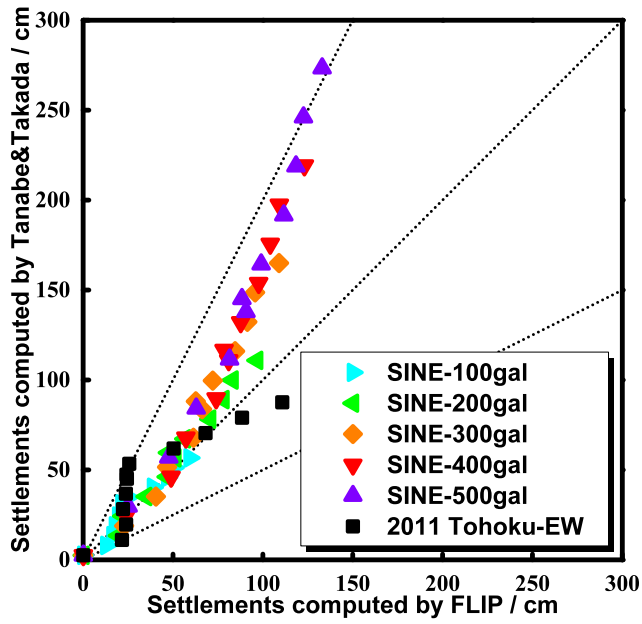
付図 1-2 要素試験と解析による液状化強度曲線（浦安地点 1）



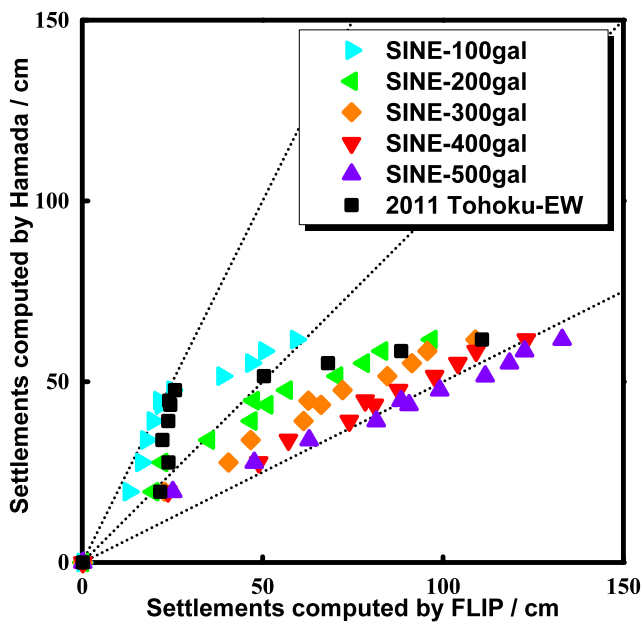
付図 1-3 解析に用いたメッシュ（浦安地点 1）



付図1-4 ボーリング地点の層分割 (Case 0) による解析結果 (浦安地点1)

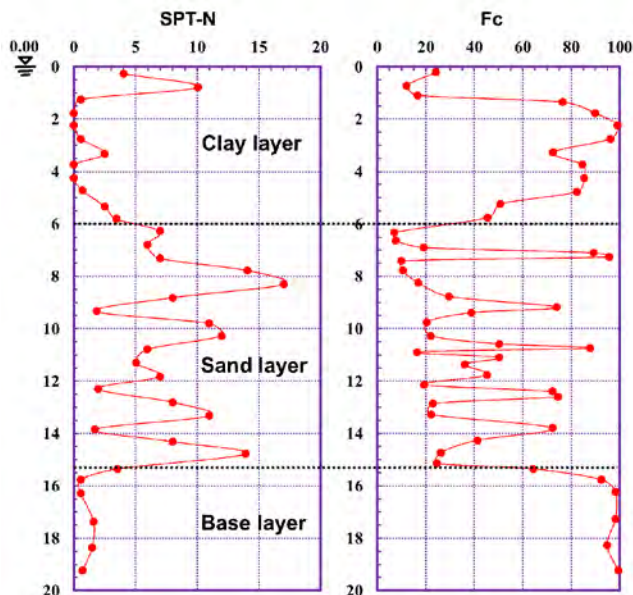


付図 1-5 沈下量推定式⁷⁾と有効応力解析による沈下量の比較（浦安地点 1）



付図 1-6 沈下量推定式⁹⁾と有効応力解析による沈下量の比較（浦安地点 1）

付録 2) 浦安市高洲地点 3 に対する FLIP による数値解析結果



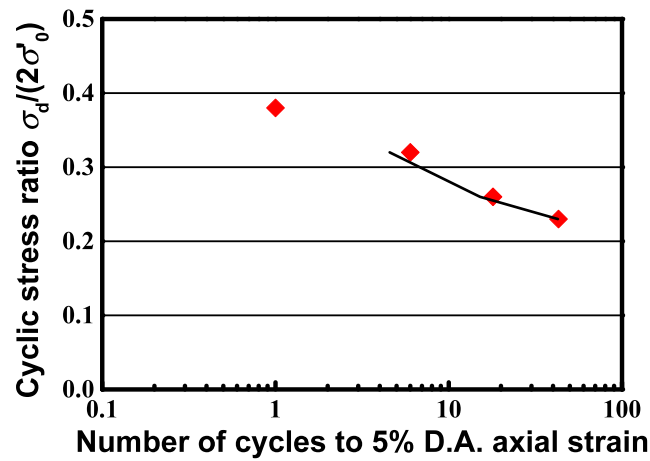
付図 2-1 浦安地点 3 の N 値と細粒分含有率の深度分布

付表 2-1 解析に用いた地盤パラメータ (浦安地点 3)

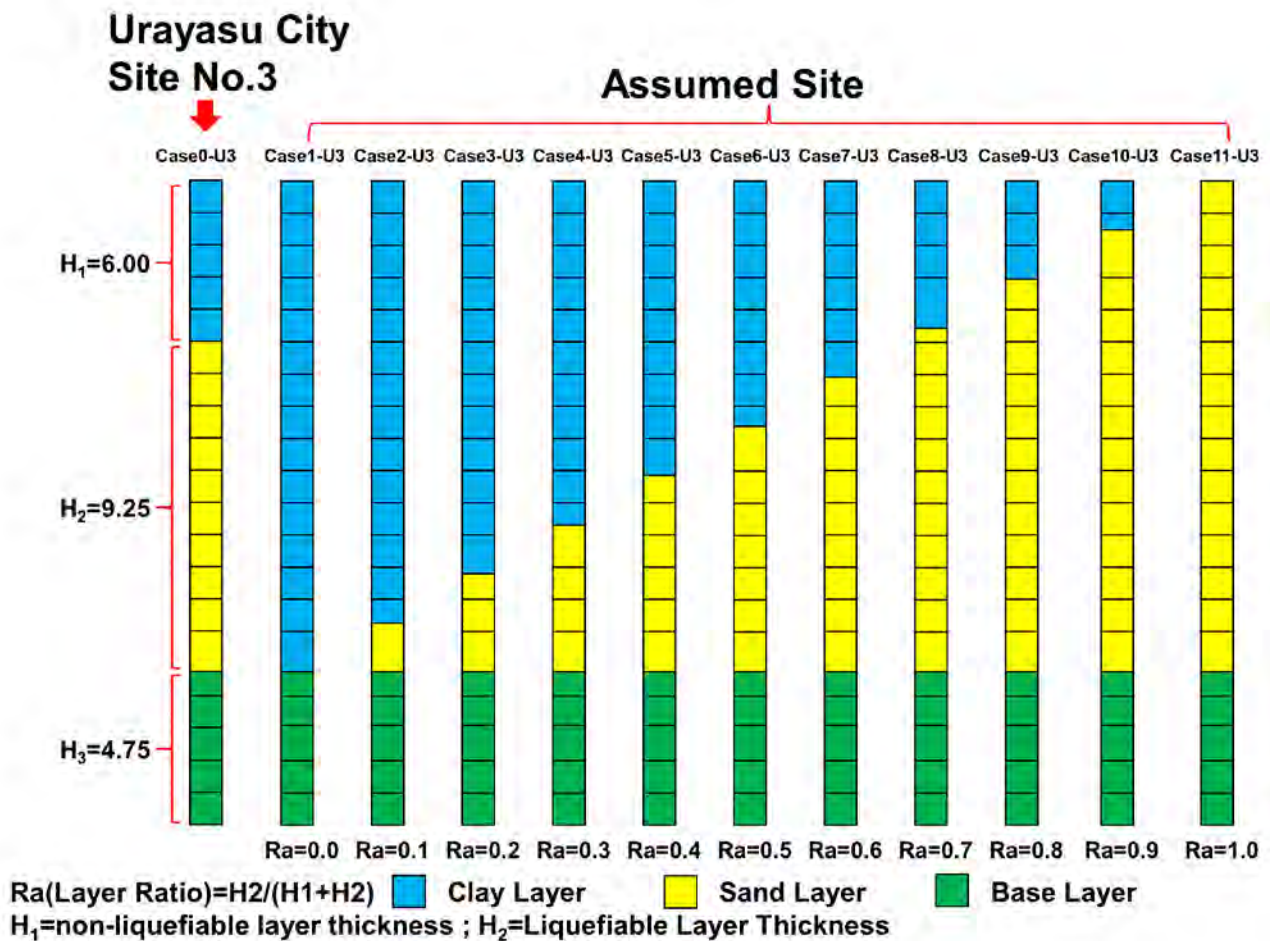
	Symbol	Unit	Clay No.1	Clay No.2	Sand No.1
ρ	RHO	10^3kg/m^3	1.70	1.70	1.90
P_a	PA	kN/m^2	62.00	325.00	156.00
G_{ma}	G0	kN/m^2	74970.0	74970.0	61476.0
m_G	PMG	-	0.5	0.5	0.5
K_{La}	RKLA	kN/m^2	195500.0	195500.0	160320.0
L_{Ua}	RKUA	kN/m^2	195500.0	195500.0	160320.0
n_K	PNK	-	0.5	0.5	0.5
-	PN	-	0.55	0.55	0.56
-	WKF	-	2200000	2200000	2200000
h_{max}	HMAX	-	0.30	0.30	0.30
-	COH	-	0	0	0
ϕ_f	PHIF	$^\circ$	30	30	34

付表 2-2 解析に用いた液状化パラメータ (浦安地点 3)

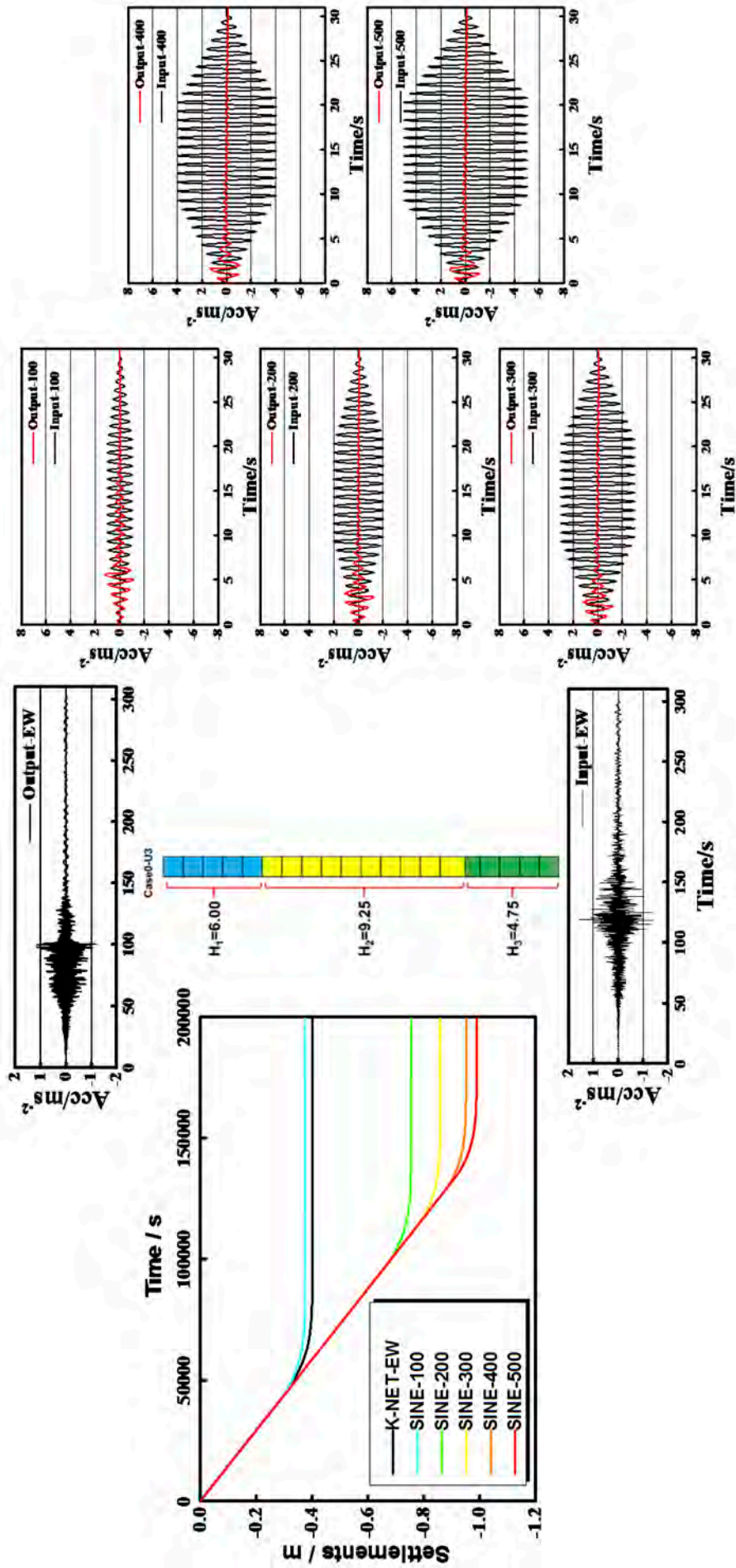
	PHIP ϕ_p $^\circ$	EPSCM ϵ_d cm	repsdc r_{sdc}	STOL	repsd r_{sd}	q1 q_1	q2 q_2	rkpp r_0
Sand No.1	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	1.0	1.0	0	0.1
	plk l_K	rk r_K	s1 s_1	c1 c_1	qus q_{us}	q4 q_4	rgamma r_{imp}	rrtmp r_{tmp}
Sand No.1	2.0	0.1	0.005	2.9	10,000	1.0	0.1	0.5



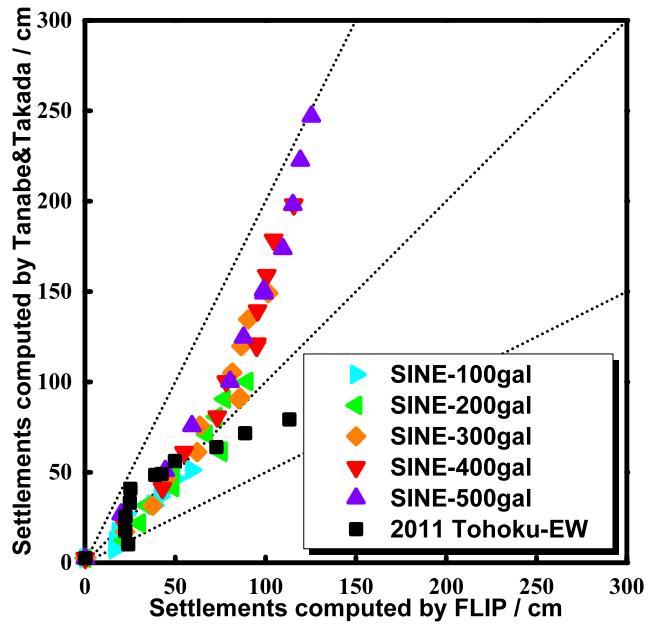
付図 2-2 要素試験と解析による液状化強度曲線（浦安地点 3）



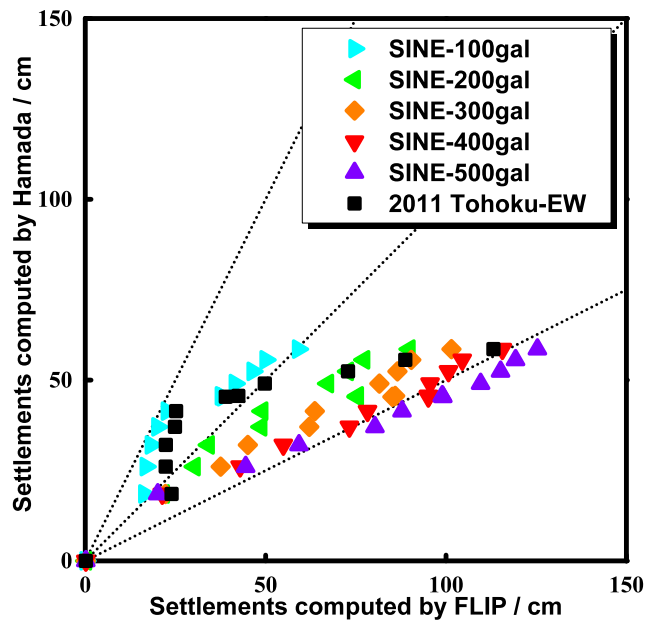
付図 2-3 解析に用いたメッシュ（浦安地点 3）



付図2-4 ボーリング地点の層分割 (Case 0) による解析結果 (浦安地点3)

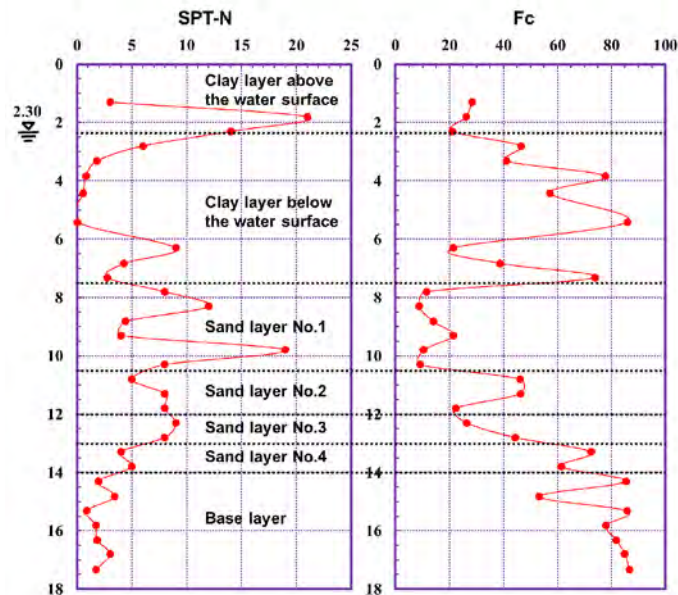


付図 2-5 沈下量推定式⁷⁾と有効応力解析による沈下量の比較 (浦安地点 3)



付図 2-6 沈下量推定式⁹⁾と有効応力解析による沈下量の比較 (浦安地点 3)

付録 3) 浦安市運動公園に対する FLIP による数値解析結果



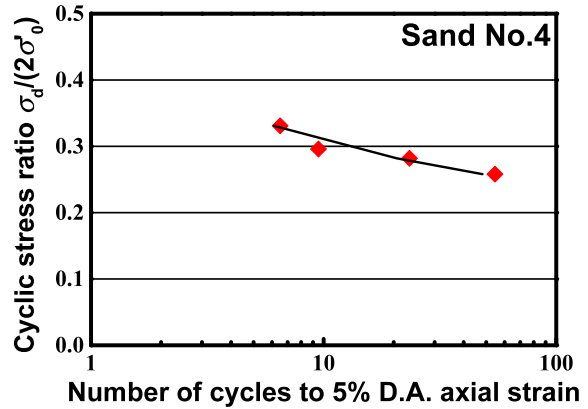
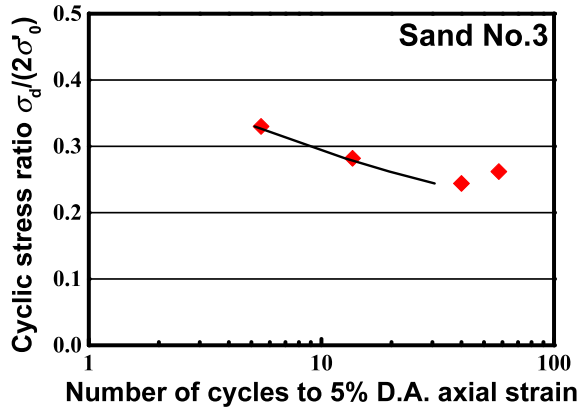
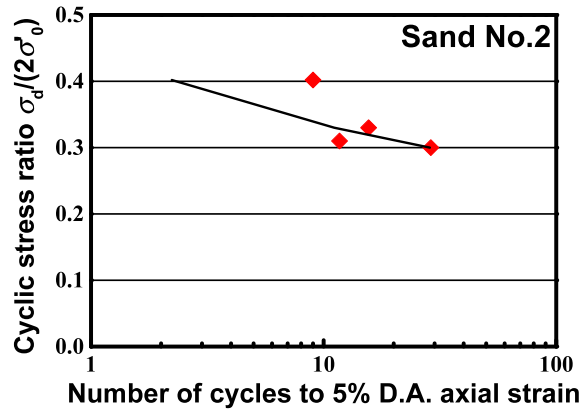
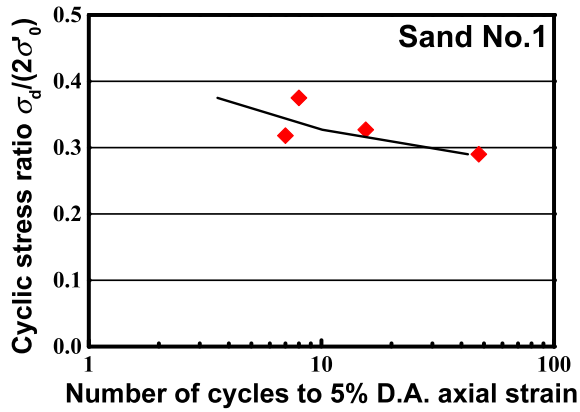
付図 3-1 浦安運動公園の N 値と細粒分含有率の深度分布

付表 3-1 解析に用いた地盤パラメータ (浦安運動公園)

	Symbol	Unit	Clay No.1	Clay No.2	Clay No.3	Sand No.1	Sand No.2	Sand No.3	Sand No.4
ρ	RHO	10^3kg/m^3	1.80	1.80	1.70	2.00	1.90	1.90	1.80
P_a	PA	kN/m^2	20.30	86.50	284.70	121.40	154.00	171.50	185.00
G_{ma}	G0	kN/m^2	79380.0	79380.0	74970.0	56384.0	55130.0	61711.0	47677.0
m_G	PMG	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
K_{La}	RKLA	kN/m^2	207000.0	207000.0	195500.0	147040.0	143771.0	160934.0	124334.0
L_{Ua}	RKUA	kN/m^2	207000.0	207000.0	195500.0	147040.0	143771.0	160934.0	124334.0
n_K	PNK	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
-	PN	-	0.45	0.45	0.55	0.51	0.55	0.53	0.63
-	WKF	-	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000
h_{max}	HMAX	-	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
-	COH	-	0	0	0	0	0	0	0
ϕ_f	PHIF	$^\circ$	36	36	30	35	33	34	32

付表 3-2 解析に用いた液状化パラメータ（浦安運動公園）

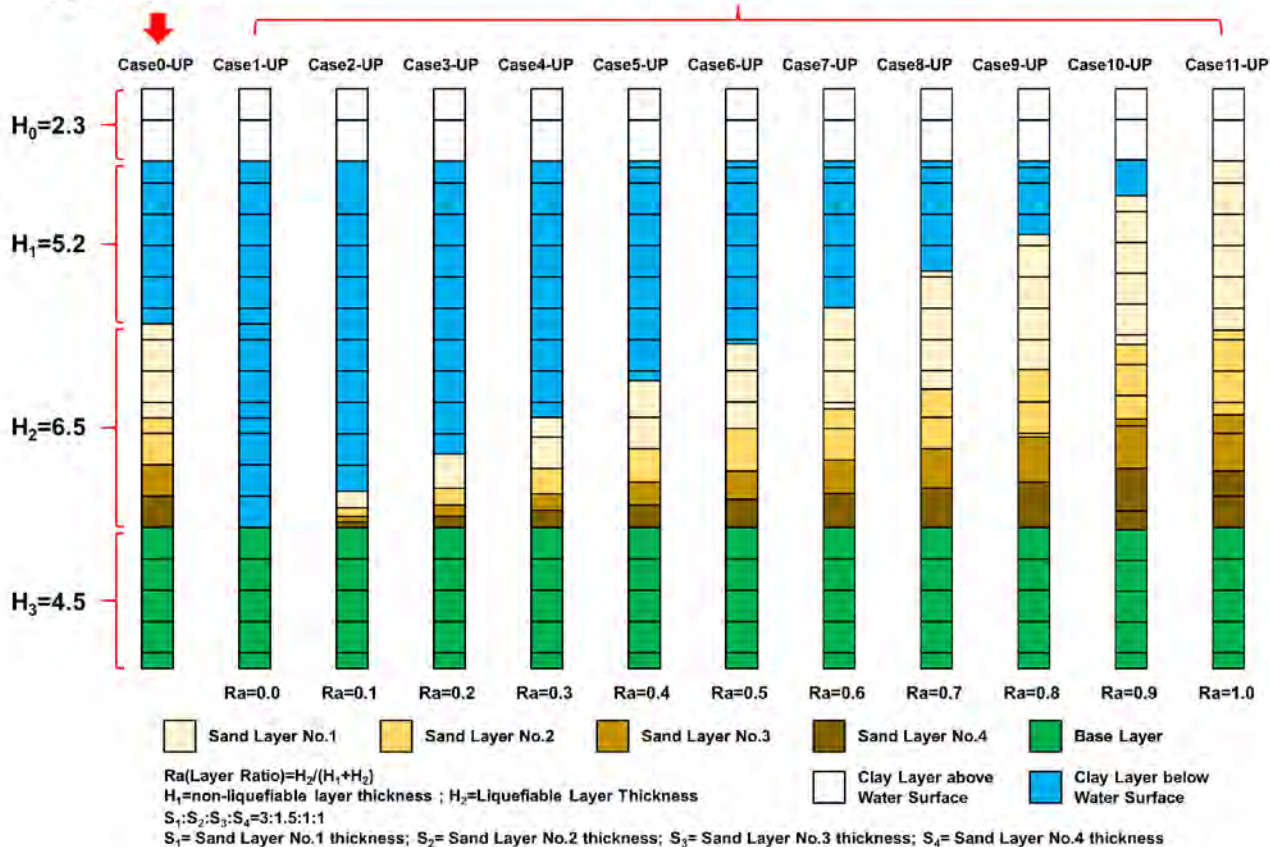
	PHIP Φ_p°	EPSCM ε_d^{cm}	repsdc r_{fdc}	STOL	repsd r_{fd}	q1 q_1	q2 q_2	rkpp r_0
Sand No.1	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	1.0	1.0	0	0.1
Sand No.2	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	0.4	1.0	0	0.1
Sand No.3	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	0.4	1.0	0	0.1
Sand No.4	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	0.4	1.0	0	0.1
	plk l_k	rk r_k	s1 s_1	c1 c_1	qus q_{us}	q4 q_4	rgamma r_{imp}	rrmtmp r_{mtmp}
Sand No.1	2.0	0.1	0.005	4.3	10,000	1.0	0.1	0.5
Sand No.2	2.0	0.1	0.005	4.4	10,000	1.0	0.1	0.5
Sand No.3	2.0	0.1	0.005	2.5	10,000	1.0	0.1	0.5
Sand No.4	2.0	0.1	0.005	3.6	10,000	1.0	0.1	0.5



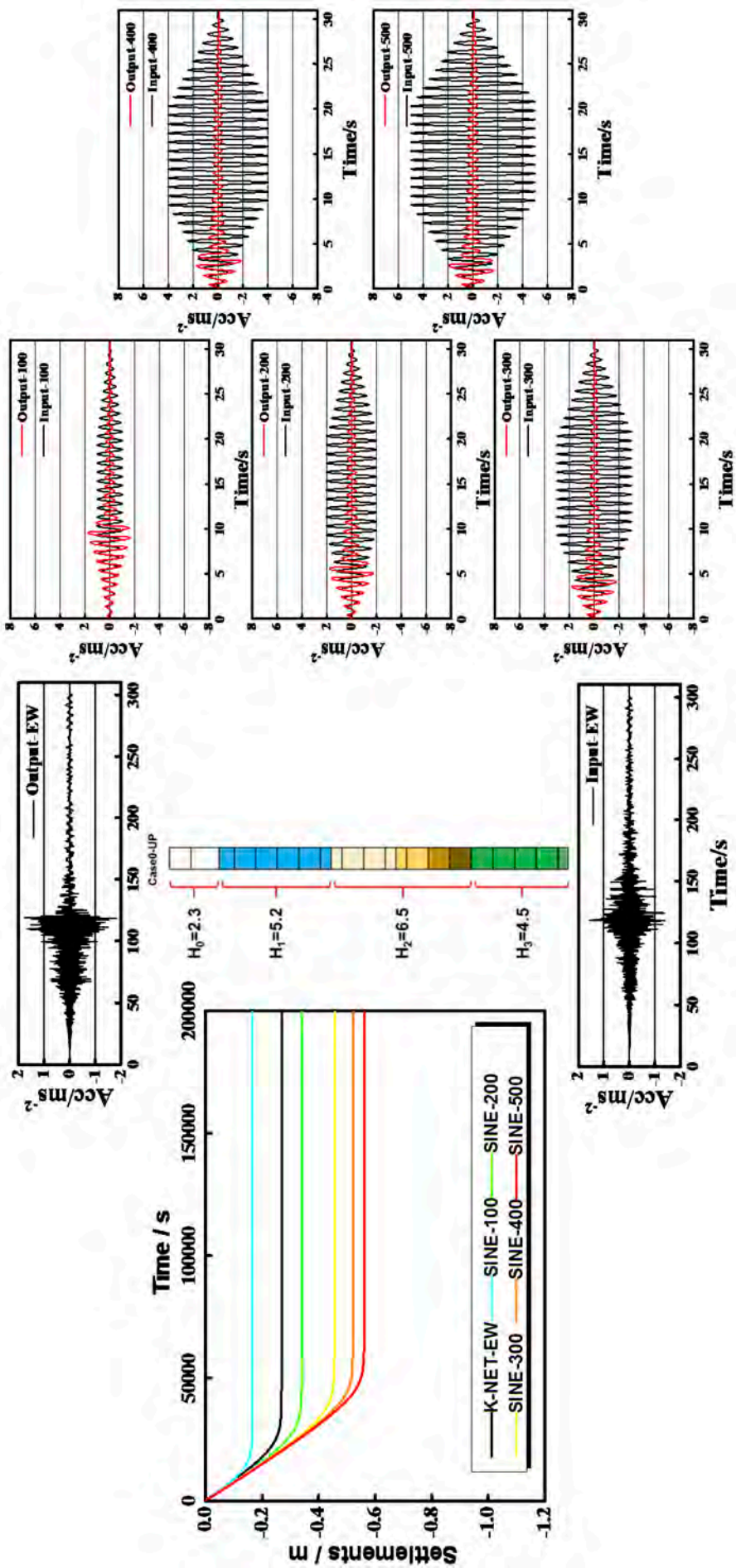
付図 3-2 要素試験と解析による液状化強度曲線（浦安運動公園）

Urayasu City Sports Park

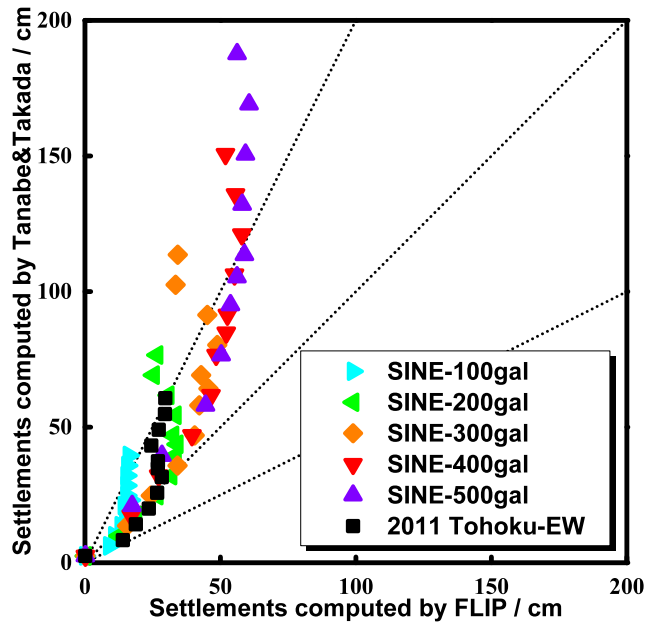
Assumed Site



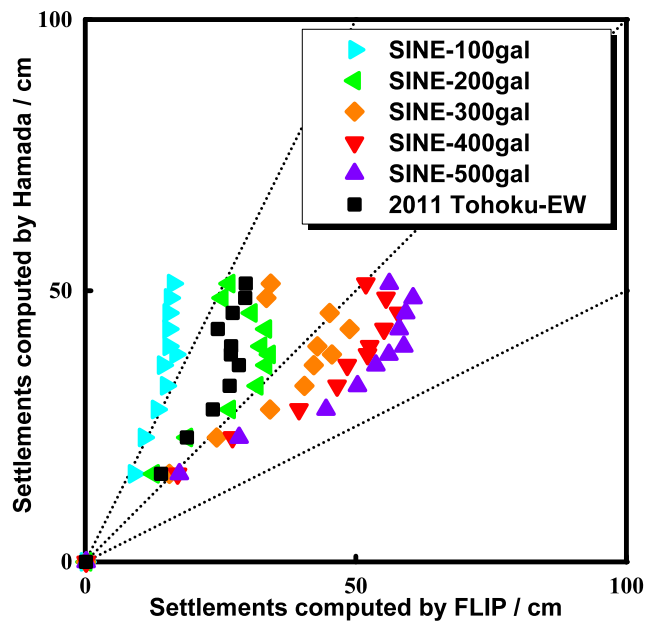
付図 3-3 解析に用いたメッシュ (浦安運動公園)



付図3-4 ボーリング地点の層分割 (Case 0) による解析結果 (浦安運動公園)

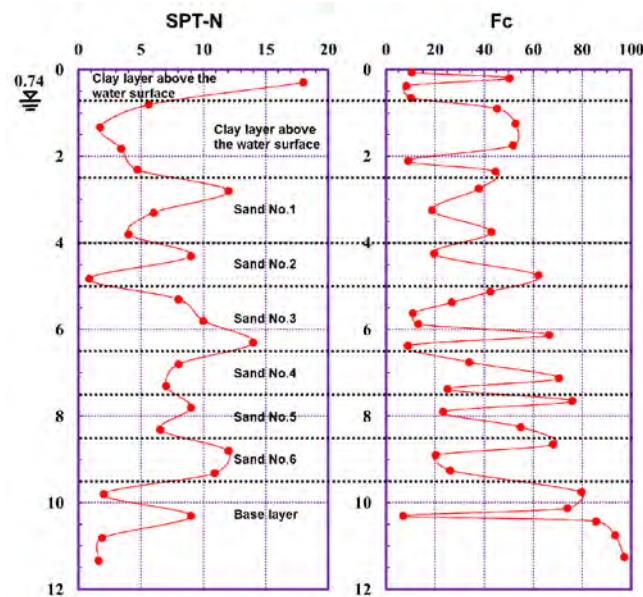


付図 3-5 沈下量推定式⁷⁾と有効応力解析による沈下量の比較 (浦安運動公園)



付図 3-6 沈下量推定式⁹⁾と有効応力解析による沈下量の比較 (浦安運動公園)

付録 4) 守山市地点 2 (水保) に対する FLIP による数値解析結果



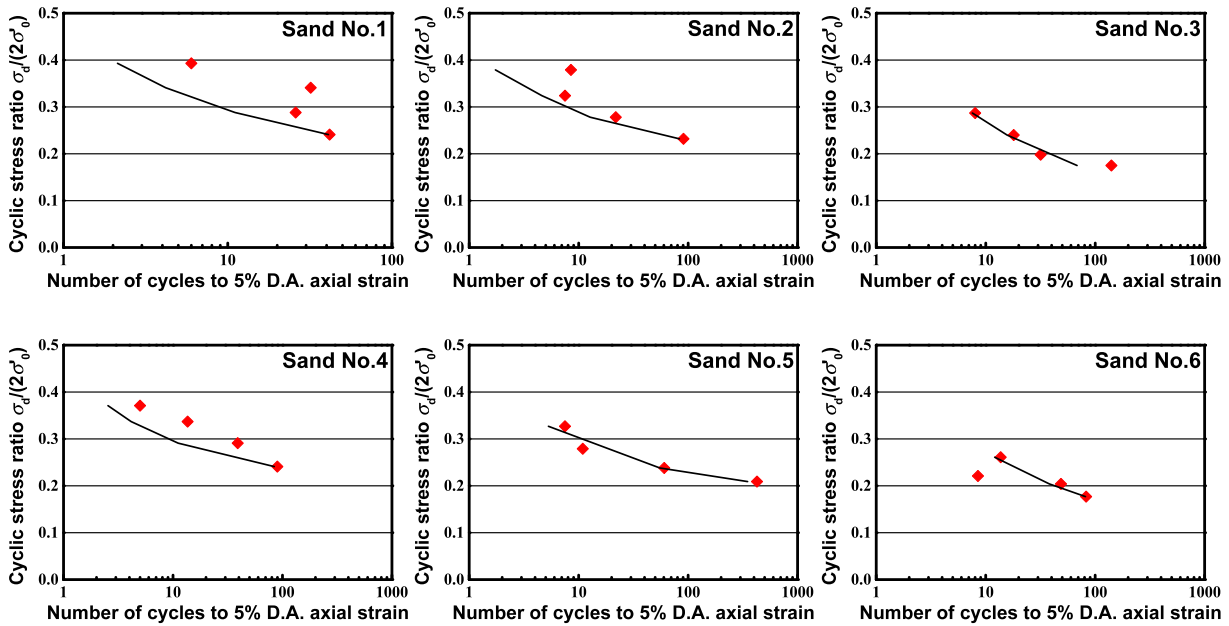
付図 4-1 守山地点 2 の N 値と細粒分含有率の深度分布

付表 4-1 解析に用いた地盤パラメータ (守山地点 2)

	Symbol	Unit	Clay No.1	Clay No.2	Clay No.3	Sand No.1	Sand No.2	Sand No.3	Sand No.4	Sand No.5	Sand No.6
ρ	RHO	10^3kg/m^3	1.80	1.80	1.70	1.95	1.90	2.00	1.90	1.90	1.90
P_a	PA	kN/m^2	6.50	28.60	193.50	43.90	61.70	79.70	97.70	111.70	125.60
G_{ma}	G0	kN/m^2	79380.0	79380.0	74970.0	55045.0	44679.0	68894.0	59300.0	63617.0	76714.0
m_G	PMG	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
K_{La}	RKLA	kN/m^2	207000.0	207000.0	195500.0	143549.0	116516.0	179665.0	154646.0	165904.0	200059.0
L_{Ua}	RKUA	kN/m^2	207000.0	207000.0	195500.0	143549.0	116516.0	179665.0	154646.0	165904.0	200059.0
n_K	PNK	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
-	PN	-	0.45	0.45	0.55	0.50	0.55	0.56	0.55	0.57	0.52
-	WKF	-	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000	2200000
h_{max}	HMAX	-	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
-	COH	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ϕ_r	PHIF	$^\circ$	36	36	30	37	34	37	35	35	37

付表 4-2 解析に用いた液状化パラメータ (守山地点 2)

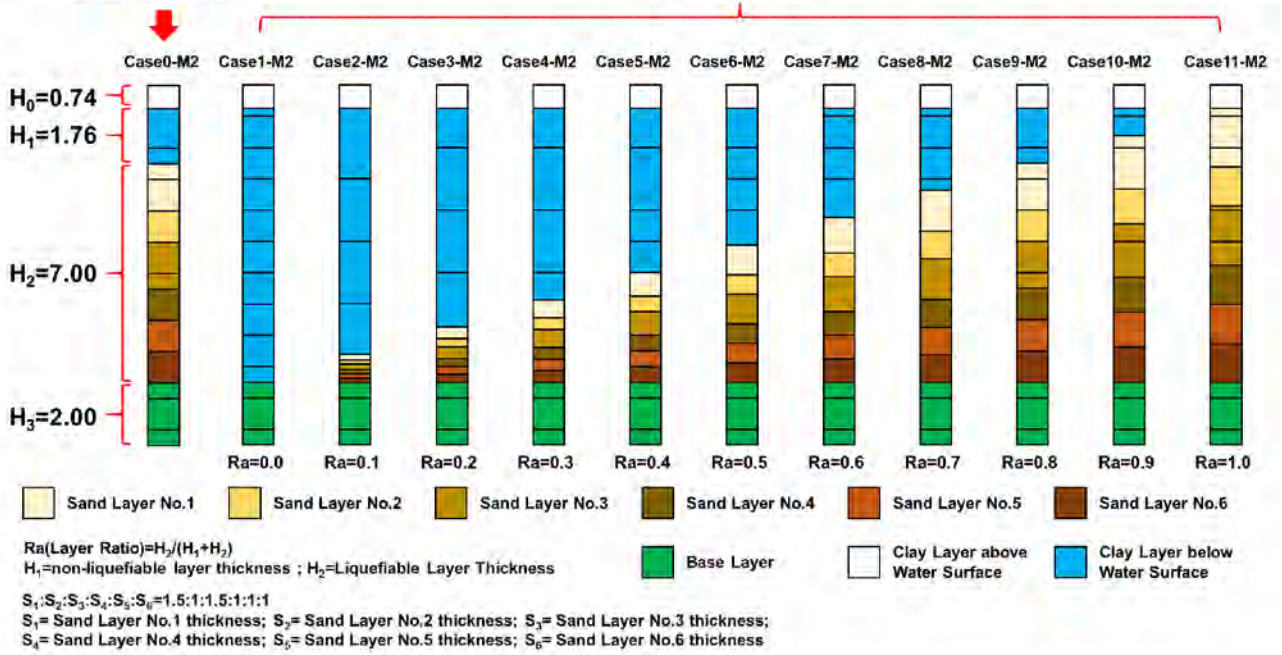
	PHIP Φ_p°	EPSCM ε_d^{cm}	repsdc r_{fdc}	STOL	repsd r_{fd}	q1 q_1	q2 q_2	rkpp r_0
Sand No.1	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	0.8	1.0	0	0.1
Sand No.2	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	0.9	1.0	0	0.1
Sand No.3	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	0.5	1.0	0	0.1
Sand No.4	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	1.0	1.0	0	0.1
Sand No.5	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	0.6	1.0	0	0.1
Sand No.6	30.0	0.2	1.0	1.00×10^{-5}	0.5	1.0	0	0.1
	plk l_k	rk r_k	s1 s_1	c1 c_1	qus q_{us}	q4 q_4	rgamma r_{imp}	rrmtmp r_{mtmp}
Sand No.1	2.0	0.1	0.005	2.7	10,000	1.0	0.1	0.5
Sand No.2	2.0	0.1	0.005	3.2	10,000	1.0	0.1	0.5
Sand No.3	2.0	0.1	0.005	1.7	10,000	1.0	0.1	0.5
Sand No.4	2.0	0.1	0.005	3.3	10,000	1.0	0.1	0.5
Sand No.5	2.0	0.1	0.005	2.9	10,000	1.0	0.1	0.5
Sand No.6	2.0	0.1	0.005	1.8	10,000	1.0	0.1	0.5



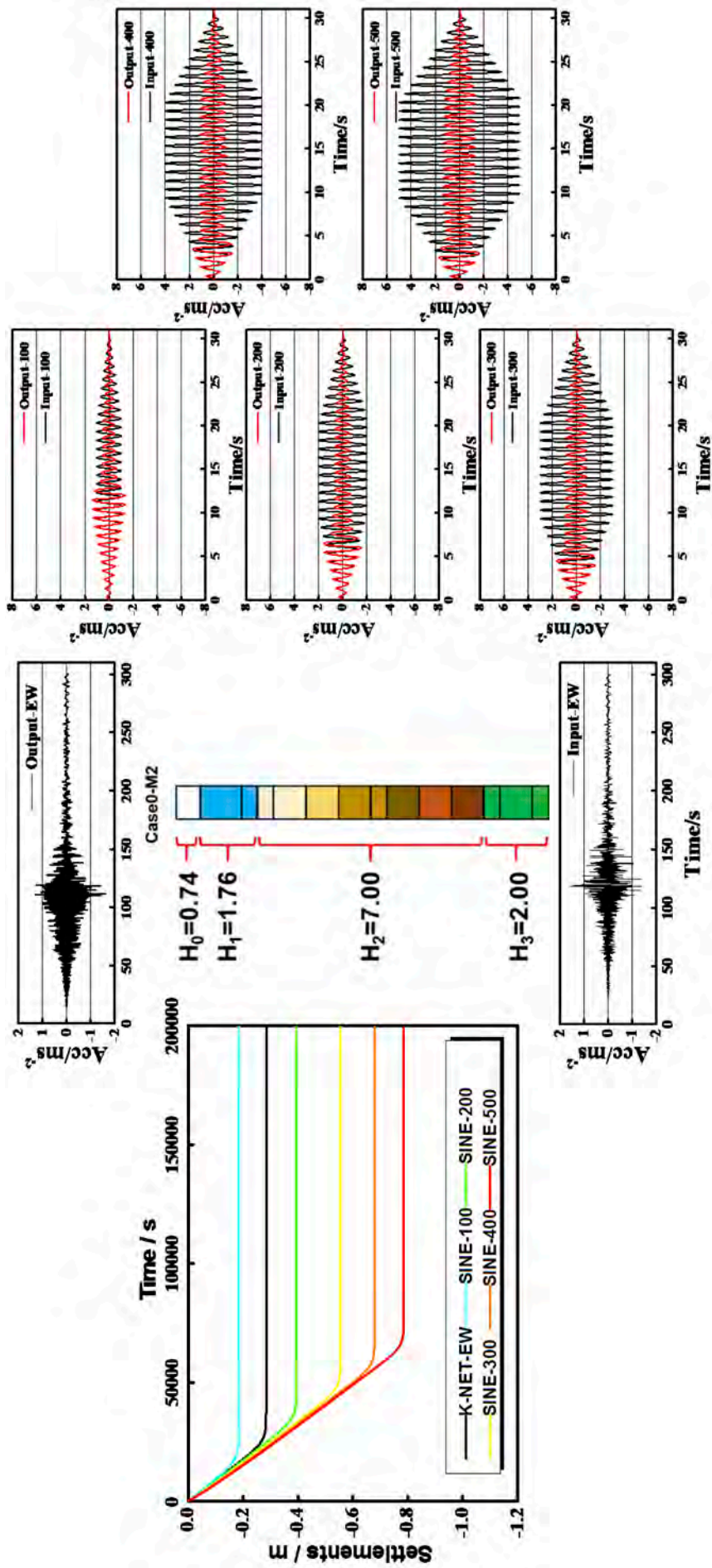
付図 4-2 要素試験と解析による液状化強度曲線 (守山地点 2)

Moriyama City Site No.2

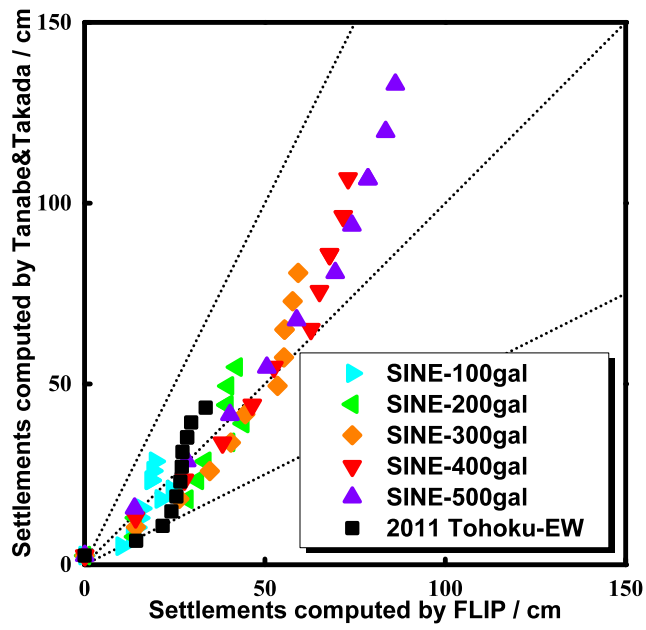
Assumed Site



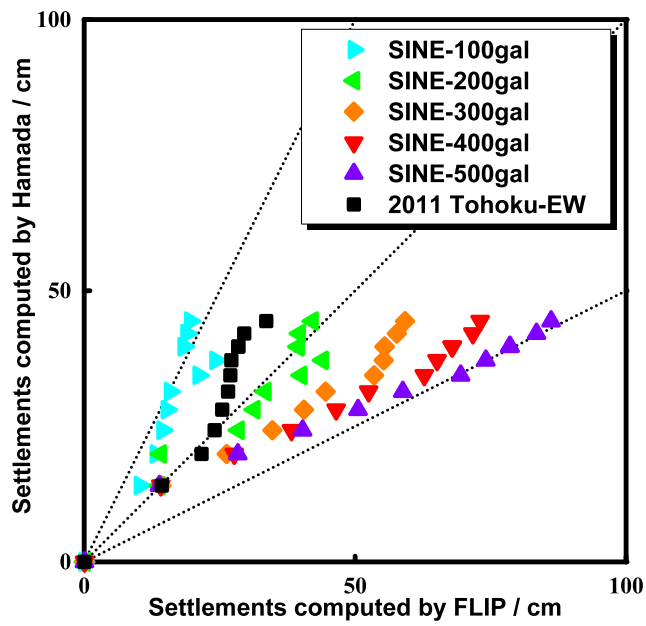
付図 4-3 解析に用いたメッシュ (守山地点 2)



付図4-4 ボーリング地点の層分割 (Case 0) による解析結果 (守山地点2)



付図 4-5 沈下量推定式⁷⁾と有効応力解析による沈下量の比較 (守山地点 2)



付図 4-6 沈下量推定式⁹⁾と有効応力解析による沈下量の比較 (守山地点 2)