水～土連成有限変形解析による自然堆積粘土地盤に打設された杭に作用する地盤反力の検討

中井 健太郎¹・野田 利弘²・河村 精一³・白鳥 洋平⁴

¹正会員 名古屋大学准教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: nakai@civil.nagoya-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学教授 減災連携研究センター (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: noda@civil.nagoya-u.ac.jp

³正会員 中部電力株式会社 土木建築部 (〒461-8680 愛知県名古屋市東区東新町1番地)

E-mail: Koumura.Seiichi@chuden.co.jp

⁴正会員 中部電力株式会社 西名古屋火力建設所 土木建築課
(〒490-1446 愛知県海部郡飛島村東浜三丁目5番地)

E-mail: Shiratori.Youhei@chuden.co.jp

地盤に長尺の杭が打設されている場合、地盤変位が大きく生じる大地震時には、杭の損傷が懸念される。これまでに、地盤の降伏および杭周面地盤の回り込みの影響を確認するために、土層内に配置された杭に強制変位を与える模型実験が実施され、杭に作用する地盤反力と粘性土のせん断強度の関係を把握している。本報では、模型実験のシミュレーションを行い、数値解析コードの **Validation** を行うとともに、自然堆積粘土地盤を想定した数値実験を実施した。その結果、1) 間隙水のマイグレーションの影響で、地盤反力は、ある載荷速度領域内で急変すること、2) 鋭敏比が大きく軟弱な自然堆積粘土地盤を想定した場合、再構成地盤に比べて地盤反力が小さくなるとともに、地盤内で局所的なせん断帯が次々と発生し、せん断ひずみの発生領域が広がることを示した。

Key Words: *finite deformation analysis, naturally deposited foundation, soil structure*

1. はじめに

埋立地のような軟弱地盤に建設されたプラント構造物基礎は、上部構造物の支持力確保の観点から杭基礎構造物となることが多い。特に、配管などを支える線状構造物や取放水設備のような地中構造物の場合、建物の杭基礎のように一定の範囲に多数の杭が打設されている場合とは異なり、杭本数が少なく、地盤の変位が杭に直接作用する特徴がある。そのため、地盤変位が大きく発生する大地震時には、地中部での杭の損傷が懸念される。実際、兵庫県南部地震では、上部構造物建設前の地中杭が地震時に損傷した事例も報告されているが¹⁾、地盤による強制変位が杭損傷の原因であると考えられており、杭の耐震設計において、杭周辺における地盤のすり抜け(杭に作用する地盤変位)の影響を把握することが求められている。

杭の極限水平地盤反力に関する研究は、兵庫県南部地震を契機に砂質土の液状化による側方流動に対して多数

行われており、その成果が各種設計基準類に反映されている。一方、粘性土に対しても地盤の大変形時において、地盤の塑性化を考慮して極限水平地盤反力を設定したバイリニア型の地盤バネとしてモデル化することが各種設計基準類で示されている。極限水平地盤反力の算出は、ランキンなどの極限土圧で計算するほか、Broms²⁾による崩壊メカニズムを仮定して導出する方法が用いられる。Bromsの研究は、設計的な視点から杭の形状や杭と地盤間の摩擦力を単純化して、現実的な極限水平地盤反力を導出した点で高く評価されるが、評価式の妥当性は明らかではなく、やや信頼性に欠ける問題がある。また、幾つかの極限地盤反力が導出されており、実際問題でどの評価式を用いるべきか、またその精度についても明確でない。同じ塑性論的アプローチで、より精緻な崩壊メカニズムを仮定して粘性土の極限地盤反力値を検討したRandolph and Houlsby³⁾やMartin and Randolph⁴⁾の研究がある。これらの研究は、杭周面の摩擦抵抗の影響まで検討されているが、実際現象との検証、例えば破壊モード(崩壊

メカニズム)の実観察や杭周面の摩擦抵抗とその影響範囲、杭打設に伴う周辺地盤の乱れの影響など、実問題への応用に関する検討が不足している。

一方、粘性土地盤を対象に地震時の地盤応答が及ぼす杭の極限水平地盤反力への影響について、模型による杭の繰返し載荷試験により考察したものに橋本ら⁵⁾や金丸ら⁶⁾の研究がある。地盤の破壊状況に関する検討や群杭も含めた実務への適用に関して検討が不足するが、単調載荷の場合に繰返し載荷よりも大きい極限地盤反力を示すことが明らかになり、単調載荷による極限水平地盤反力を用いて設計すると、杭に作用する地震時土圧に関して設計上安全側であることが示された。また、主働杭と受働杭という見方⁷⁾をすると、本論文で扱う対象は受働杭に相当し、これまでに地すべり抑止杭や橋台などの裏込めサーチャージによる側方流動問題に対する研究がある。地すべり抑止杭に作用する土圧には平面ひずみ状態を想定した松井らの研究^{例え 8)}があるが、群杭としての評価を前提としている。また、裏込めサーチャージの杭を検討した研究^{例え 9)}もあるが、地盤の三次元的な挙動を対象とした研究であり、地盤の杭周面のすり抜け時に作用する杭の極限地盤反力の評価に適用することはできない。

このような背景を踏まえ、河村ら¹⁰⁾は、粘性土地盤を対象として、地盤が水平変位によって杭をすり抜ける際の、杭周辺地盤の変形挙動や杭の極限水平地盤反力を把握することを目的に、1G 場の模型載荷実験を行っている。河村らは、剛塑性有限要素解析との比較から、①地盤反力度は杭径の約 10%程度の変位時点においてピークを示し、その値は非排水せん断強度の 12~13 倍程度であること、②杭周辺地盤の変形する領域は杭中心から杭径の 2.5~3 倍程度の範囲であること、などを見出した。また、③深部の杭に作用する極限地盤反力度に関して、既存の設計基準類は杭に作用する土圧を小さく見積もっており、危険側の評価となっていることを指摘している。

しかしながら、模型実験においては時間的・経済的制約が大きいことから、地盤条件や載荷条件などの実験条件を数多く変えて実施することが困難である。また、上述の模型実験においては、スラリー状に練返した粘性土試料を一次元圧密して作成した再構成地盤を対象としている。つまり、自然堆積土は再構成土とは異なる複雑な力学挙動を示すことが知られているが、自然堆積土のように骨格構造の発達した状態は再現できていない。

物理的にしろ、能力的にしろ、実験実施が困難である場合に一般的な結論を導き出すためには、数値解析的アプローチが必要かつ有効となる。ただし、ここで重要となるのは、解析結果の信頼性をどのように評価するかである。本報では、河村らの実施した模型実験の数値シミュレーションを通じて、数値解析結果の妥当性・信頼性

図-1 模型実験装置

を評価することを第 1 の目的とする。妥当性・信頼性を確認した上で、各種数値実験を実施し、模型実験では検討することのできなかった、①載荷速度効果の確認と、②再構成地盤と自然堆積地盤（鋭敏地盤）の挙動比較を行うことを目的とする。本報で用いた数値解析コードは、土の骨格構造概念を記述する SYS カムクレイモデル¹¹⁾を組み込んだ、静的／動的水～土骨格連成有限変形解析コード¹²⁾である。土の骨格構造概念に基づく、自然堆積地盤は骨格構造が高位に発達した地盤として、再構成地盤は骨格構造が低位な地盤としてモデル化することができるので、本解析コードを用いることで、自然堆積地盤と再構成地盤の挙動比較が可能となる。また、有限変形理論に基づいて定式化されているため、本研究で対象とするような地盤に大きな変位が生じるような大変形問題にも適用可能である。

2. 模型実験の再現解析

～数値解析の妥当性・信頼性評価～

本章では、河村らの実施した模型実験の数値シミュレーションを通じて、数値解析コードおよびその結果の妥当性・信頼性を評価 (Validation) することを目的とする。

図-2 模型地盤の作成（圧密過程）

(1) 模型地盤の作成方法

図-1 はその模型実験装置の概略図を示す。直径 90mm の杭をあらかじめ設置した模型土槽に、液性限界の 1.5 倍に含水比調整したスラリー状の粘性土（トチクレイ、液性限界は 28.9%）を投入後、図-2 に示すように、土槽の上下面から排水し、段階的に一次元圧密（圧密圧力 5→10→20→40→50→100 kN/m²）した。圧密中は、杭に圧密荷重が直接入らないように、剛な載荷板に杭の部分だけ孔をあけた。圧密終了後、荷重を除荷した後に上下カラー部分とそれに対応する模型地盤および杭模型（ダミー部）を取り除き、アクリル板を上面に設置して模型地盤を作成した。その上で上面を成型後、アクリル板を設置し、杭の上下端を、油圧ジャッキを用いて 2mm/sec の速さで引っ張って水平載荷し、杭に作用する地盤反力度を計測している。

(2) 室内要素試験の再現による弾塑性性状の推定

模型地盤に用いたトチクレイの力学特性を把握するために、模型実験とは別に、直径 30cm のモールドで再構成試料を作成した。圧密応力は模型地盤作成時と等しい。3t 法で圧密終了を判断した後、鉛直コア抜きによって供試体を採取して室内力学試験（等方圧密／等方除荷試験および非排水三軸圧縮試験）を行った。ここでは、力学試験結果を SYS カムクレイモデルで再現することで、トチクレイの材料定数（弾塑性パラメータと発展則パラメータ）および初期状態を決定した。全ての再現結果において初期状態は共通とし、初期応力状態は再構成試料作成時に鉛直方向中央部に作用する土被り圧相当（自立した再構成試料の内部で作用する負圧相当）の 0.95kN/m²としている。

決定した材料定数および 0.95kN/m²における初期状態を表-1 に示す。弾塑性パラメータに関しては、正規圧密線の切片 N および圧縮指数 $\tilde{\lambda}$ は、別途実施した練返し試料の標準圧密試験結果から直接算出した。膨潤指

表-1 トチクレイの弾塑性性状一覧

弾塑性	限界状態定数 M	1.2
	NCL ($p' = 98 \text{ kN/m}^2$) の切片 N	1.62
	圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.07
	膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.01
	ポアソン比 ν	0.3
発展則	構造劣化の塑性尺度 (IREV)	4
	$-D_v^p$ と $\ D_s^p\ $ の割合 c_s	0.6
	構造劣化指数 a ($b = c = 1.0$)	0.13
	正規圧密土化指数 m	2.0
	回転硬化指数 br	1.0
物性	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.717
	透水係数 k (cm/s)	2.0×10^{-6}
初期値	初期平均有効応力 p'_0	0.95
	初期比体積 v_0	2.058
	初期応力比 η_0	0.0
	初期構造の程度 $1/R^*_0$	5.8
	初期過圧密比 $1/R_0$	1.0
	初期異方性の程度 ϵ_0	0.0

図-3 等方圧密／等方除荷試験（実験および再現結果）

図-4 非排水三軸圧縮試験（実験および再現結果）

数 $\bar{\kappa}$ は等方除荷試験から算出し、限界状態定数 M は、せん断中の異方性の発達も考慮して、非排水三軸圧縮試験の有効応力パスから決定した。土粒子密度 ρ_s は土粒子密度試験結果の値をそのまま利用し、透水係数 k は標準圧密試験結果から算出される値のうち、模型実験で想定される低拘束圧下のものとした。発展則パラメータおよび残りの初期値（骨格構造の程度）は、再構成試料の複数の試験結果（圧密およびせん断挙動）を一組の材料定数群と初期値群で再現できるように試行錯誤的に求めている。

等方圧密／等方除荷試験の実験結果および再現結果を図-3に、非排水三軸圧縮試験実験結果および再現結果を図-4に示す。三軸圧縮試験の再現の際は、表-1を共通の初期値として、各圧密圧力までの等方圧密過程を再現した後、非排水せん断を実施している。再現結果を見ると、一組の材料定数群と初期値群で、圧密挙動からせん断挙動までよく再現できている。詳細は省略するが、骨格構造の発展則に関して既往の研究成果¹³⁾と比較すると、過圧密解消速度が構造劣化速度より卓越していることから典型的な粘土と砂の間に位置する（粘土よりの）中間土的パラメータである。非排水せん断終了時に見られる、有効応力経路で見られる塑性膨張を伴う硬化（ p' の増加を伴う q の増加）トチクレイは物理特性からシルトに分類される材料であり、妥当と言える。続いて初期値に目を向けてみると、再構成試料作成段階（予備圧密開始前）のスラリー状態の土は、異方性を有さないが（ $\zeta_0=0.0$ ）、構造を有し（ $1/R^*=5.8$ ）、正規圧密状態（ $1/R_0=1.0$ ）にあることがわかる。

(3) 模型地盤の初期状態の推定

前節では、力学試験結果を構成式の応答として再現することで材料定数（弾塑性パラメータおよび発展則パラメータ）および低拘束圧下（ $\sigma_v=0.95\text{kPa}$ ）における初期状態を決定した。ここでは、スラリー状態から一次元圧密までの模型地盤作成過程における応力状態変化をSYSカムクレイモデルで再現（追従）することによって、模型地盤の初期状態を推定する。

図-5にSYSカムクレイモデルによる作成過程の再現結果を示す。土槽投入時のスラリー状態（土槽高さ方向の中央部での土被り圧を初期応力状態）から予備圧密過程を構成式の応答として再現することで、模型地盤作成過程における状態量変化を追従した。なお、模型実験では、予備圧密終了後、地盤上面を整形するためにいったん上蓋を外すが、土がシルトで透水係数が小さいこと、またその作業に費やす時間は非常に短いことから、この過程は非排水状態（等体積状態）を保ったまま行われたと仮定した。こうして決まった模型地盤の初期状態を表-2に示す。なお、アクリル板が模型地盤表面に水平に

図-5 模型地盤作成過程の再現

表-2 模型地盤作成過程の状態量変化

	初期状態	圧密後
鉛直応力 σ_v	0.95	50.95
比体積 v	2.05	1.77
応力比 η	0.0	0.746
構造の程度 $1/R^*$	5.8	3.88
過圧密比 $1/R$	1.0	1.0
異方性の程度 ζ	0.0	0.393

図-6 模型地盤と解析断面の比較

設置されるため、数値解析の際は、模型地盤の層中央部を代表値として、二次元平面ひずみ条件で実施している（図-6参照）。そのため、解析で用いる拘束応力は $K_0=0.6$ を仮定して、以下の式で換算している。

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v = \frac{3-\eta}{3+2\eta} \sigma_v \quad (1)$$

予備圧密後に除荷を受けていないので、模型地盤は初期に正規圧密状態にある。また、予備圧密によって構造は低位化し、異方性が発達している様子がわかる。

なお、実験では、模型地盤と同じ予備圧密圧力で作成した再構成試料を用いて一軸圧縮試験を実施し、非排水せん断強度を算出している。その結果、 $c = 22.8\text{kN/m}^2$ であった。表-2の状態から非排水せん断強度を構成式の応答として求めた。計算結果を図-7に示す。計算結果

はピーク時において、破線で示される非排水せん断強度の実験値と近い値を示しており、設定した材料定数と初期値の妥当性が伺える。

(4) 杭の水平載荷試験のシミュレーション

解析に用いた有限要素メッシュを図-8に示す。模型実験を鉛直方向から見た図に対応する。左右対称性を仮定し、模型地盤全体の半断面を二次元平面ひずみ条件で解析した。水理条件に関しては、境界は全て非排水条件とした。側面は角部のみ固定境界とし、残りをスライド境界としている。杭前面は、杭と地盤間の滑りは発生しないと仮定して、側方方向固定のまま、変位速度一定境界として実験と同じ2mm/secで上向きに等しく変位させた。また、杭背面は、背面側の土を引っ張らないようにするために、応力速度ゼロのフリー条件としてモデル化した。なお、杭背面側を応力速度ゼロのフリー境界でモデル化しているため、杭の変位が100mm以上と大きくなると、杭背面への土の回りこみ量が多くなり、本来、杭が存在している領域にも入り込んでくるのが危惧される。しかしながら、本検討の変位範囲内においては、このような現象は生じていなかった。なお、解析に用いた弾塑性性状は、

図-7 推定した弾塑性性状から得られた一軸圧縮強度

図-8 解析に用いた有限要素メッシュ

表-1と表-2に示すとおりである。

図-9に杭に作用する地盤反力を実験結果とともに示す。実験結果と比べると、初期剛性はほぼ等しいものの、緩やかに地盤反力が増加する。ただし、極限地盤反力(最大値)は実験結果とほぼ等しい。図-10は30mm変位させた時の模型地盤の変形の様子(載荷開始から載荷終了までの軌跡とその始点と終点のベクトル)を、実験

図-9 杭に作用する地盤反力

図-10 模型地盤の変形の様子

図-11 せん断ひずみの経時変化

図-12 模型実験と解析結果による壁面土圧の変化

図-13 模型実験と解析結果による過剰間隙水圧の変化

結果、解析結果ともに示す。ともに、杭周辺における前面から背後への土の回りこみ挙動や、その領域が杭中心から杭径の 2.5～3 倍程度の範囲に集中している様子など、類似の変形挙動を示している。図-11 には、せん断ひずみの経時変化（解析結果）を示す。せん断ひずみは最初、杭側面および前面で大きい。次第に杭の背後に向かって円弧状に拡がり、杭背面に土が回り込んでいく様子がわかる。変位量の増大とともにせん断ひずみは大きくなるが、その範囲はやはり杭周辺に集中している。

続いて、図-12 は壁面土圧を比較したものである。模型実験での計測位置は図中に示してあるとおりであり、解析においても同一箇所での数値を示している。模型実験では荷重初期に土圧の変化がすべての計測点において見られない。この原因の 1 つとしては、実験において、模型上下面で摩擦低減処理を行っているとはいえ完全で

はなく、荷重初期に摩擦の影響で土圧が発生しなかったことが影響していると考えられる。荷重背面（土圧 E）では土圧が減少し、前面では一様に増加する。側面（土圧 D）は杭が通過した後は土圧が減少するが、杭の正面（土圧 A）は土圧が緩やかに増加し続ける。図-13 は過剰間隙水圧を比較したものである。壁面土圧同様、計測箇所は図中に示すとおりである。実験結果を見ると、杭近傍（水圧 2）は先に上昇を示した後、杭通過後に減少に転じる。一方、杭背後（水圧 1）は杭の接近に伴って次第に増加している。実験結果と解析結果を比較すると、土圧、間隙水圧ともに、定量的には一致していないものの、定性的傾向はよく再現できている。

以上、力学試験結果の再現から杭の水平荷重試験のシミュレーションまでの一連の解析的検討を踏まえて、数値解析コードおよびその結果の妥当性・信頼性の評価（Validation）は十分であると判断した。

3. 数値実験

1. はじめにで述べたように、模型実験は地盤作成に時間を要するため、荷重条件などの実験条件を変えて、さまざまな実験を行うことは困難である。また、模型地盤は実験室で人工的に作成するため、鋭敏比が大きく軟弱な自然堆積地盤のように、骨格構造の発達した地盤を作成することは困難である。このような場合、数値解析的なアプローチが有効である。そこで、①荷重速度効果の確認と、②再構成地盤と自然堆積地盤の挙動比較を目的として数値実験を行った。

(1) 荷重速度の影響評価

杭に作用する地盤反力は周辺地盤と杭との相対速度と相関を持つことが実験的・解析的研究を通して確認されている^{14) 15) 16) 17)}。しかし、これら研究の多くは砂質土を対象とした液状化地盤中の地盤反力度を対象としており、粘性土地盤を対象とした検討は少ない。そこで本節では、粘性土地盤中の杭に作用する地盤反力と周辺地盤と杭との相対速度の関係を調べることを目的とする。模型実験では荷重速度を変えた実験を行うことができなかったため、荷重速度を 1/100 倍、1/10 倍、10 倍、100 倍と変化させたときの荷重速度の影響について数値解析的に検討した。図-14 に杭に作用する地盤反力の比較図を示す。荷重が速い場合（2.0mm/s～200mm/s）は、荷重速度が 100 倍異なっても杭に作用する地盤反力はほとんど差異がない。一方、荷重速度が 1/100 倍になると地盤反力が大きくなっている。

図-14 載荷速度が異なる時の地盤反力

図-16 載荷速度 2.0mm/s の時の比体積変化の経時変化

図-15 載荷速度 200mm/s の時の比体積変化の経時変化

図-17 載荷速度 0.02mm/s の時の比体積変化の経時変化

図-15, 16, 17 には、載荷速度 200mm/s, 2.0mm/s, 0.02mm/s の時の比体積変化の経時変化を示す。図から明らかなように、境界非排水条件とは言え、境界内では間隙水のマイグレーション（移動）が生じており、排水して圧縮している部分があれば、逆に吸水して膨張している部分も存在している。載荷が遅いと（図-17）間隙水のマイグレーションが十分に生じるので比体積変化が顕著に生じており、杭前面では体積圧縮を、杭背面では体積膨張を生じていることがわかる。一方、載荷が速いと（図-15）間隙水のマイグレーションがほとんど生じないので、比体積変化はほとんど生じない（境界内部もほぼ非排水条件を保っている）。両者を比較すると、載荷が遅い場合は、杭前面において排水に伴う密度増加を示すため、載荷が速いものに比べて地盤反力が大きくなったと考えられる。また地盤反力（図-14）において、載荷速度 0.2mm/s の結果を見ると、載荷初期は載荷速度が速いものと一致しているが、次第に地盤反力が大きくなり、最終的には、載荷速度 0.02mm/s の結果に近づく。

地盤反力は載荷速度に対して単調的に増加・減少を示すのではなく、ある載荷速度領域において急増・急減すると思われるが（三軸試験などで見られる部分排水効果¹⁸⁾）、この載荷速度 0.2mm/s はちょうど地盤反力が急変する閾値周辺の値であったことが想像される。

なお、載荷速度 0.02mm/sec と載荷が遅い場合、地盤反力が途中で低下する不連続な応答を示している。上述の通り、載荷速度が遅い場合は模型地盤内の比体積分布（密度分布）が不均一となってしまう、載荷中に局所的にひずみ／変形が集中したためだと考えられる。

(2) 再構成地盤と自然堆積地盤の挙動比較

模型実験で実施できるのは一般的に、練返した土を一次元圧密して作成される再構成地盤である。一般に自然堆積地盤は、土の骨格構造が発達しているが、自然堆積地盤の模型実験を実施することは極めて難しい。そこで、数値解析を用いて自然堆積粘土地盤に対する杭の水平載荷試験の数値実験を実施し、再構成地盤と自然堆積地盤

表-3 解析に用いた初期状態

	人工地盤	自然堆積地盤
初期平均有効応力 p'_0	50.95	50.95
初期比体積 v_0	1.77	1.85
初期応力比 η_0	0.746	0.746
初期構造の程度 $1/R^*_0$	3.88	10.00
初期過圧密比 $1/R_0$	1.00	1.00
初期異方性の程度 ζ_0	0.393	0.393

図-18 初期構造の差異による地盤反力の比較

図-19 構造高位な自然堆積地盤のせん断ひずみの経時変化

の挙動比較を行った。

表-3 に解析に用いた初期状態を示す。再構成地盤とは基本ケースである①を示すが、全く同じ初期状態のもと、構造の程度を 3.88 (低位) から 10.0 (高位) に高位化させた (構造の増加に伴って比体積も大きくなっている)。表は省略するが、その他の弾塑性パラメータ・発展則パラメータは全く同じである。

図-18 に構造高位な自然堆積地盤と構造低位な再構成地盤の杭に作用する地盤反力の比較を示す。構造高位な場合、ピーク強度が 4 割程度低減するとともに、曲線がガタつく。図-19 は構造高位な自然堆積地盤のせん断ひ

ずみの経時変化である。载荷初期は、構造低位な再構成地盤 (図-10) と同様に杭周辺にせん断ひずみが集中しているが、再構成地盤ほどせん断ひずみの大きさは大きくない。その代わりに、変位量が大きくなるにつれて杭の前面や背面でせん断ひずみの局所化が壁面に向かって進展し、地盤の変形が広範囲に広がっている。一方、構造高位な場合は、杭の移動によって生じる塑性変形によって構造が低位化し、地盤内の変形が局所的する。進行的に発生するせん断帯の影響で地盤反力は増加・減少を繰り返す。

SYS カムクレイモデルによると、構造の劣化は塑性圧縮に働く¹¹⁾。構造が高位な状態としてモデル化される、鋭敏比が大きく軟弱な地盤の場合、杭の移動によって地盤が局所的に乱され、構造が著しく劣化することで、地盤反力が低下したと考えられる。また、図-19 を見てもわかるように、せん断ひずみの局所化は次第に広域に広がっていく。この局所化現象の進展によって、地盤反力～変位関係は増加と減少を繰り返したと考えられる。紙面の都合から省略するが、例えば構造が高位であってもその劣化速度が遅い場合や、劣化速度が速くても構造の程度が小さい場合は、構造低位化の影響が小さくなるため、図-18 や図-19 で観察された地盤反力の低下やひずみの局所化は見られない。

4. おわりに

本論文では、河村らが実施した模型粘土地盤内の杭の水平载荷試験の数値シミュレーションを通じて、数値解析結果の妥当性・信頼性を評価するとともに、数値実験を通じて、模型実験では検討することが困難な、①载荷速度効果の確認と、②再構成地盤と自然堆積地盤の挙動比較を行った。

- ・室内力学試験結果の再現を経て得られたトチクレイの弾塑性性状を用いて杭の水平载荷試験の数値シミュレーションを行ったところ、①地盤反力度は杭径の約 10% 程度の変位時点においてピークを示し、その値は非排水せん断強度の 12~13 倍程度であること、②杭周辺地盤の変形する領域は杭中心から杭径の 25~3 倍程度の範囲であること、③壁面土圧や過剰間隙水圧の変化の定性的傾向を抑えることができた、など、解析コードとその結果の妥当性を評価 (Validation) することができた。
- ・数値実験により载荷速度の影響を検討した結果、①境界非排水条件とは言え、境界で囲まれた地盤内部では間隙水のマイグレーション (移動) が生じており、排水して圧縮している部分があれば、逆に吸水して膨張している部分も存在していること、②载荷が遅いと地

盤内の比体積変化が顕著に生じるが、載荷が速いと比体積変化はほとんど生じないこと、③地盤反力は載荷速度に対して単調的に増加・減少を示すのではなく、ある載荷速度領域において急増・急減することを示した。

- ・ 鋭敏比が大きく軟弱な自然堆積粘土地盤を想定した構造高位な地盤の場合、地盤反力が小さくなるとともに、地盤内で局所的なせん断帯が次々と発生し、せん断ひずみの発生領域は広範囲になることを示した。

本論文における検討事項のように物理的に大量の実験が困難である場合や、自然堆積粘土地盤のように模型地盤の作成が困難な場合に対して、数値解析的なアプローチの有用性を確認した。

参考文献

- 1) 堀越研一, 大津宏康, 末岡徹, 亀村勝美: 1995 兵庫県南部地震によって被災した杭の詳細調査, 大成建設技術研究所報, 第 29 号, pp.59-64, 1996.
- 2) Broms, B. B. : Lateral resistance of piles in cohesive soils, *Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, 1964.3.
- 3) Randolph, M. F. and Houlsby, G. T. : The limiting pressure on a circular pile loaded laterally in cohesive soil, *Geotechnique*, Vol. 34, No. 4, pp. 613-623, 1984.
- 4) Martin, C. M. and Randolph, M. F. : Upper-bound analysis of lateral pile capacity in cohesive soil, *Geotechnique*, Vol. 56, No. 2, pp. 141-145, 2006.
- 5) 橋本理, 末政直晃, 片田敏行, 中村和之: すり抜け破壊領域における杭の水平抵抗, 第 31 回地盤工学研究発表会, pp.1771-1772, 1996.
- 6) 金丸裕秀, 末政直晃, 片田敏行, 中村和之: 地震時における粘土地盤中の地盤反力ー杭変位関係, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp. 2063-2068, 1998.
- 7) 松井保: 主働杭と受働杭, 技術手帳, 土と基礎, Vol.30, No. 7, pp. 103-104, 1982.
- 8) Ito, T. and Matsui, T. : Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles, *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 4, pp. 43-59, 1975.
- 9) 渡部要一, 竹村次朗, 木村孟: 裏込め載荷時の軟弱粘土地盤と杭基礎の相互作用に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 523/III-32, pp. 111-123, 1995.9.
- 10) 河村精一, 白鳥洋平, 大塚悟, 保科隆: 軟弱粘性土地盤中の杭に作用する地震時極限水平地盤反力に関する研究, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.72, No.2, pp.48-61, 2016.
- 11) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 12) Noda, Asaoka, A. and Nakano, M. : Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol.48, No.6, pp.771-790, 2008.
- 13) Asaoka A. : Consolidation of clay and compaction of sand –An elasto-plastic description-, *Proc. of 12th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.2, pp.1157-1195, 2003.
- 14) 鈴木康嗣, 安達直人: 液状化・側方流動地盤における杭の地盤反力～変位関係, 液状化メカニズム・予測法に関するシンポジウム, pp.531-538, 1999.
- 15) 時松孝次, 鈴木日呂子, 鈴木康嗣, 藤井俊二: 大型振動台実験に基づく液状化過程における杭の水平地盤反力の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 533 号, pp.57-64, 2002.
- 16) 安達直人, 鈴木康嗣, 三浦賢治: 振動台実験による杭の地盤反力と液状化地盤応答の関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 578 号, pp.75-82, 2004.
- 17) 渦岡良介, 芝崎水無子, 風間基樹, 八嶋厚, 張鋒: 液状化地盤中の杭の地盤反力に対する 3 次元有効応力解析の適用性, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp.1055-1060, 2002.
- 18) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. : Soil-water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state, *Soils and Foundations*, Vol.34, No.1, pp.91-105, 1994.

(2017.6.23 受付)

SOIL-WATER COUPLED FINITE DEFORMATION ANALYSES ON SUBGRADE REACTION OF PILE WHICH WERE EMBEDDED INTO NATURALLY- DEPOSITED FOUNDATION

Kentaro NAKAI, Toshihiro NODA, Seiichi KOMURA and Yohei SHIRATORI

This paper reports a numerical simulations about the pile-ground interaction behavior. The analysis code is the soil-water coupled finite deformation analysis (GEOASIA), which is capable of expressing the behavior of soils ranging from sand up to clay within the same theoretical framework. The elasto-plastic equation of the soil skeleton mounted on this code is the SYS Cam-clay model, which describes the soil skeleton structure (structure, overconsolidation and anisotropy) at work.

Analysis result shows comparatively good agreement with model test result. Moreover, further conclusion as follows can be derived with systematically conducted analyses. 1) With the movement of the pile, ground deformation occurs widely especially around the front of pile. 2) If loading speed is slow, density increases with ongoing migration of the excess pore water at the pile front which makes subgrade reaction force grows large. On the other hand, if loading speed is rapid, migration of pore water cannot be occurred which means that subgrade reaction force is smaller than that of slowly loaded case. 3) Virtually-imaged highly structured ground showed localized deformation with ongoing destruction of the structure which leads to non-smooth load displacement curve.