

耐震設計に用いる 杭の支持力モデルの検証方法の検討

兵頭 順一¹・一井 康二²

¹正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)

E-mail: hyoudou@tepsco.co.jp

²正会員 関西大学社会安全学部 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町 7-1)

E-mail: ichiik@kansai-u.ac.jp

港湾構造物の耐震設計では、ケーソン式係船岸、矢板式係船岸や栈橋を対象に有効応力解析による耐震性能照査が実務的に行われるようになってきた。有効応力解析などの数値解析手法の品質保証の考え方には、検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation) がある。数値解析手法の検証 (Verification) は非線形の問題では難しく、解析の品質保証の観点からは、主として、妥当性確認 (Validation) が多く行われてきた。本研究では、液状化による構造物被害予測プログラムFLIP ROSEによる杭の支持力モデルを対象に、堀の提唱する数値創成解の考え方をを用いた検証 (Verification) を行った。まず、完全排水条件における杭の押込み試験のシミュレーションを行った。その際、杭頭への載荷方法を強制変位による載荷と強制荷重による載荷の2通りを実施し、検証が困難な事例と可能な事例を示した。また、杭の繰返し載荷のシミュレーションに対しても検討を実施し、強制変位による載荷と強制荷重による載荷が一致することを示し、杭の支持力モデルに関してFLIP ROSEの検証を実施することができた。

Key Words : pile end resistance, verification, effective stress analysis

1. はじめに

港湾構造物の耐震設計では、ケーソン式係船岸、矢板式係船岸や栈橋を対象に有効応力解析による耐震性能照査が実務的に行われるようになってきた¹⁾。例えば、液状化による構造物被害予測プログラム FLIP ROSE³⁾は、港湾構造物の設計で多く用いられてきた。

有効応力解析などの数値解析の品質の考え方には、検証 (Verification) と妥当性確認 (Validation) がある。検証 (Verification) とは、解析モデルがその基にした数学モデルの解を正確に表していることを示すことである。また、妥当性確認 (Validation) は、解析モデルが対象とする実現象を正確に表現している程度を示すことである。しかし、検証 (Verification) は非線形の問題では難しく、主として、妥当性確認 (Validation) が解析の品質保証の観点から行われてきた。例えば、有効応力解析プログラム FLIP ROSE の妥当性確認 (Validation) は、過去の多数の被災事例解析^{例えば2)}を実施することで行われてきた。

一方、近年では、数値解析の検証 (Verification) として、創成解を用いる検討が提唱されてきている。堀⁴⁾は創成解を以下のように定義している。(図-1)

➤ 連続体の数理問題では、変位を解析関数として設定すると、支配方程式を満たす物体力を解析的に計算できる場合がある。この物体力を既知として数値計算を行い、「代入した解析関数が復元されるか否か」を調べることで、解析手法の検証を行う。

➤ 変位に設定された解析関数は、この解析関数を使って計算された物体力に対する解となるため、“創成解”と呼ばれる。つまり、創成解は、物体力 b と境界条件 a に対する変位 u の数理問題に対して、次の手順で計算が正しいことを確認する考え方である。

1. u を解析関数として、 b と a を解析的に計算
2. b と a を使って数理問題を解析し、計算された u が設定された解析関数であることを確認

$$\begin{cases} D[u] = b \text{ in } V & (D: \text{微分演算子}) \\ u = a \text{ on } \partial V \end{cases}$$

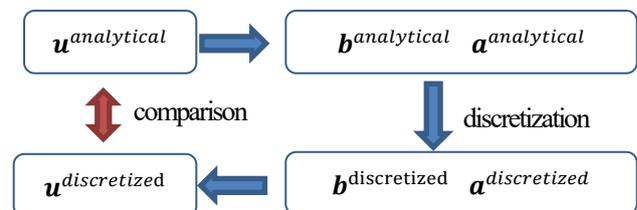


図-1 創成解の考え方⁴⁾

また、堀⁴⁾は数値創成解を次のように定義している。(図-2)

- 離散化された支配方程式に、離散化された変位を代入し、離散化された物体力を計算する。この離散化された物体力を既知として数値解析を行い、「設定した離散化された変位が復元されるか否か」を調べることで、解析手法の検証を行う。
- 変位と物体力に離散化された関数を使うため、“数値創成解”と呼ぶこととする。

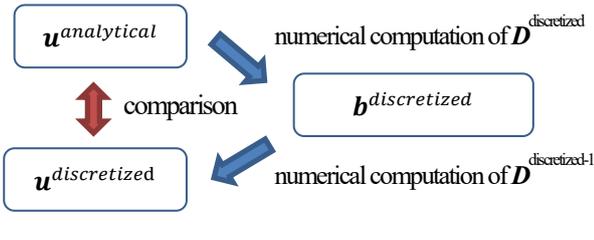


図-2 数値創成解の考え方⁴⁾

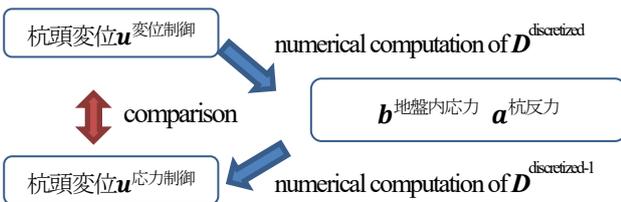


図-3 本研究における考え方

本研究では、数値創成解の考え方をを用いた杭の先端支持力の検証 (Verification) を実施する。つまり、図-3に示すように杭頭に変位として載荷する場合と荷重として載荷する場合の解析を実施して、両者の荷重変位曲線の比較を行う。なお、杭先端のモデルは、図-4に示すように、杭先端における杭と地盤の節点を共有する一般的な方法とした。なお、杭の周面摩擦力は非線形ばね要素でモデル化しているが、本研究では杭の先端支持力に着目するため、杭の周面摩擦角はゼロとしている。また、図-4には水平方向の相互作用を表現する杭-地盤相互作用ばね要素を図示されているが、本研究は鉛直方向の支持力を対象としており、水平方向の杭-地盤相互作用ばね要素は影響しない。

はじめに、完全排水条件における杭の押し込み試験を対象に解析を行った。その際、杭頭への載荷方法を強制変位による載荷と強制荷重による載荷の2通りを実施し、検証が困難な事例と可能な事例を示す。また、耐震設計で用いることを想定し、杭の繰返し試験を対象とする事例解析も実施し、杭の先端支持力の検証 (Verification) を示した。

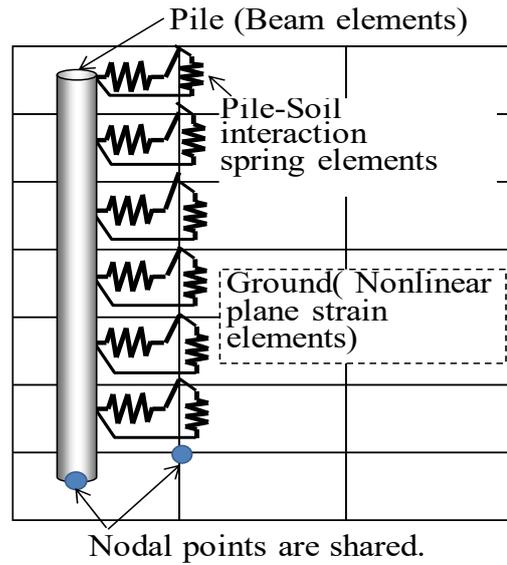


図-4 二次元解析における杭と地盤の相互作用のモデル化

2. 完全排水条件における杭の押し込み試験のシミュレーション

(1) 解析条件

地盤はFLIP ROSE³⁾のマルチスプリング要素を用いてモデル化し、杭は線形ばね要素でモデル化した。また、境界条件は側方を鉛直ローラー、底面を固定境界とした。地下水位は地表面に設定した。要素分割図を図-5に示す。地盤の物性値はN値に基づき、簡易設定法 (改訂版)¹⁾から設定した。地盤の物性値を表-1に、杭の物性値を表-2に示す。

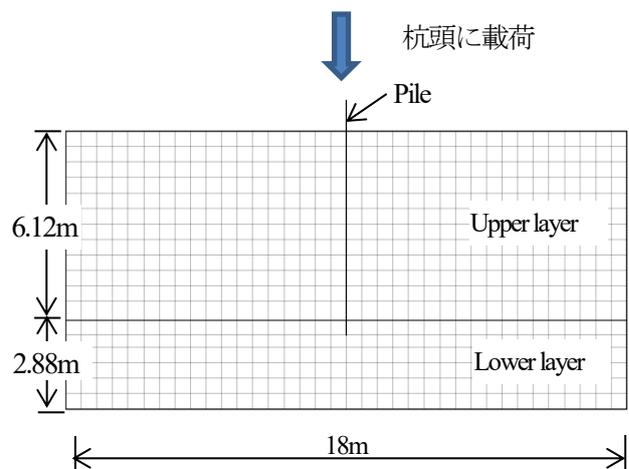


図-5 要素分割図

表-1 地盤の物性値

| Characteristics | 上層 | 下層 |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| 相対密度 D_r (%) | 60 | 90 |
| 質量密度 ρ (t/m ³) | 1.93 | 1.99 |
| ポアソン比 ν | 0.33 | 0.33 |
| 初期せん断剛性 G_{ma} (kPa) | 8.97×10^4 | 1.51×10^5 |
| 体積弾性係数 K_{ma} (kPa) | 2.34×10^5 | 3.94×10^5 |
| 基準平均有効応力 σ'_{ms} (kPa) | 98.0 | 98.0 |
| 拘束圧依存係数 m_G, m_K | 0.5 | 0.5 |
| 粘着力 C (kPa) | 0.0 | 0.0 |
| 内部摩擦角 ϕ (degrees) | 39.86 | 42.05 |

表-2 杭の物性値

| | |
|--------------------------------|---------------------------|
| 杭径 (m) | 1.0 |
| 杭の厚さ (m) | 0.012 |
| ヤング係数 (kPa) | 7.7×10^7 |
| ポアソン比 | 0.3 |
| 断面積 (m ²) | 3.41×10^{-2} |
| (断面二次モーメント (m ⁴))* | $(4.15 \times 10^{-3})^*$ |

*本解析の条件では曲げは作用せず，結果に影響しない。

(2) 解析結果

排水条件における杭の押し込み試験のシミュレーションを行った。その際、杭頭への載荷方法は、強制変位による載荷と強制荷重による載荷の2通り実施した。

解析による杭の荷重変位関係を図-6に示す。強制変位と強制荷重による杭の荷重変位関係は一致しなかった。なお、プロットは後述の要素挙動の着目 STEPを示す。

図-7に強制変位の杭頭変位が0.05mにおける変形図と地盤の鉛直応力分布を示す。杭先端では局所的な変形が生じているため、杭先端付近に応力がゼロとなっている要素がある。杭先端付近の3要素 (Element A, B, C) に着目し、図-6における着目 STEPにおける比較を行った。

各要素の挙動を図-8, 図-9に示す。ここで着目すべきは、Element Aが負担する軸差応力がピークより小さくなる現象 (軟化現象) である。これは、Element Cの平均有効応力がゼロになった後 (グラフの×印の後) に生じていることがわかる。つまり、強制変位と強制荷重の荷重変位関係の違いは、Element Cに引張破壊が生じた後に生じていることがわかる。引張破壊が生じると、近隣の要素が負担する応力が減少すると同時に、Element Cの応力-ひずみ関係が示すように応力ゼロで任意のひずみの値をとることができ、解の唯一性が担保されていない。このため、解析コードの検証は困難である。

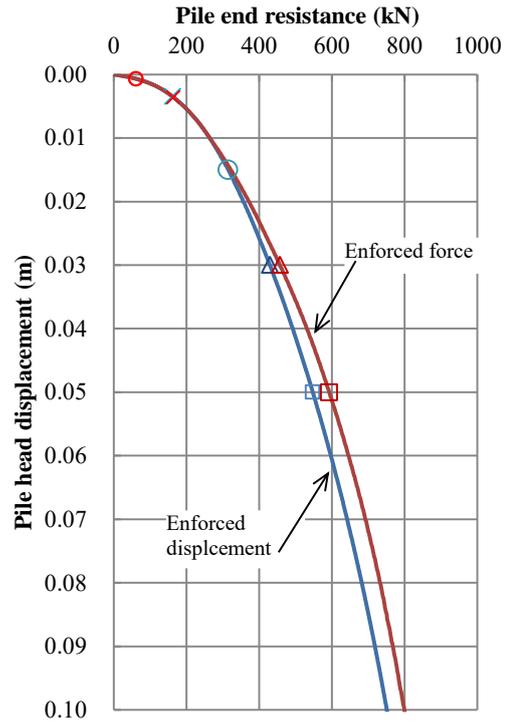
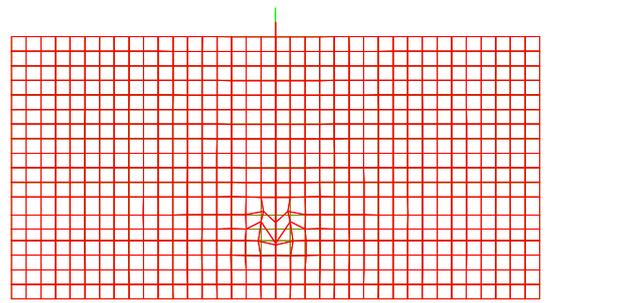
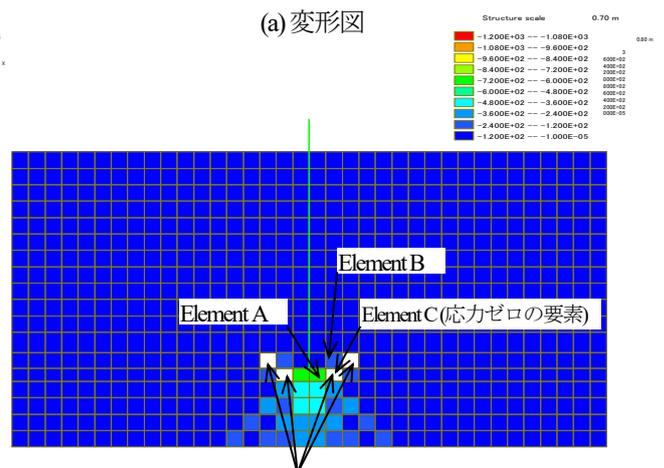


図-6 杭の荷重変位関係



(a) 変形図



応力ゼロの要素 (白抜き)の4要素
(b) 地盤の鉛直応力分布図

図-7 強制変位による解析結果
(杭頭変位0.05 mにおける分布図)

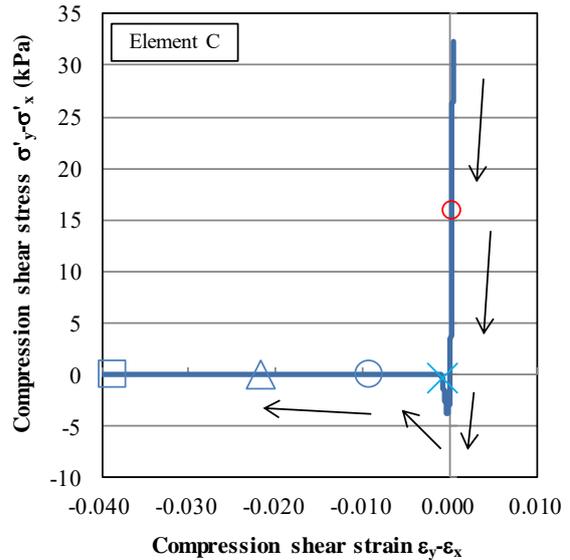
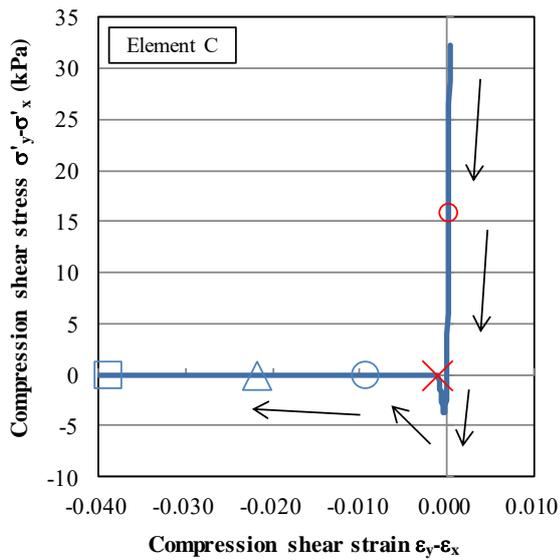
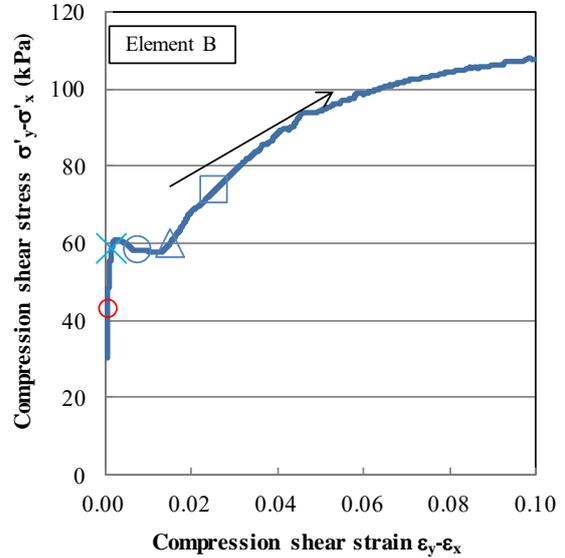
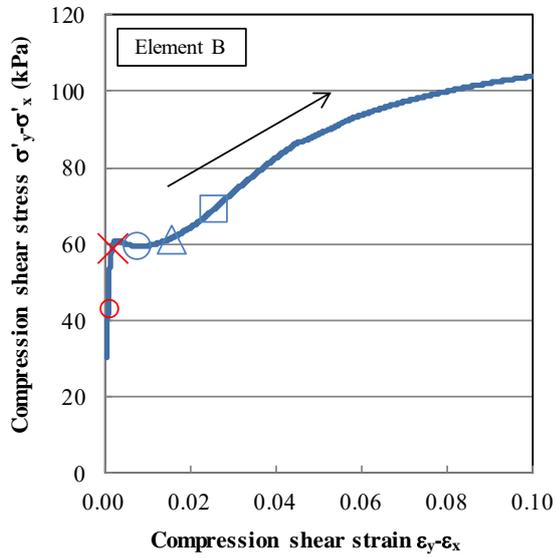
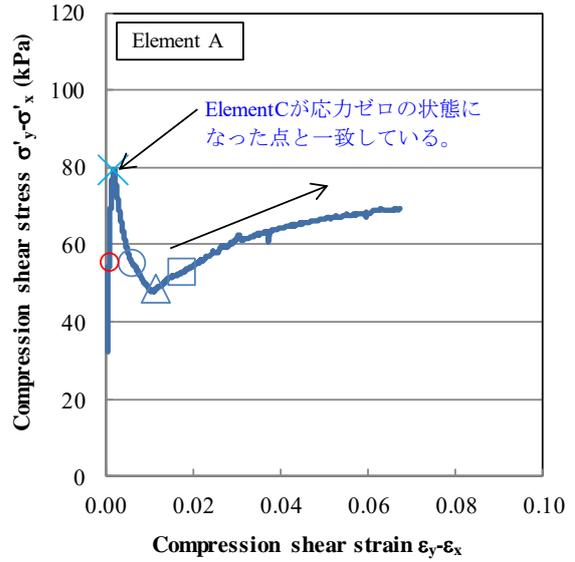
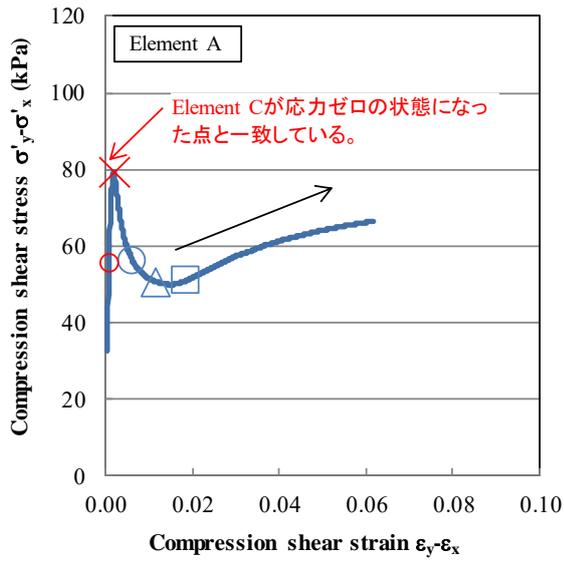


図-8 杭頭への荷重方法が強制変位の場合の各要素の軸差応力($\sigma_y-\sigma_x$)～ひずみ($\epsilon_y-\epsilon_x$)関係

図-9 杭頭への荷重方法が強制荷重の場合の各要素の軸差応力($\sigma_y-\sigma_x$)～ひずみ($\epsilon_y-\epsilon_x$)関係

3. 完全排水条件下で杭先端に拘束条件を与えた杭の押し込み試験のシミュレーション

(1) 概要

2章に示した解析では、地盤要素の一部に引張応力（応力がゼロとなる要素）が生じ、要素レベルで挙動が不安定化した。このため、杭頭からの強制変位による解析と強制荷重による荷重で結果は一致せず、検証が困難な事例であった。そこで、数値創成解で検証可能な事例を検討するため、杭先端付近の地盤要素の挙動を安定化させるために杭先端の節点に多点拘束（対象とする節点のXY方向の変位を同じとする。）の条件を設けた解析を実施した。

杭先端に多点拘束を用いた解析（その1）と（その2）の解析モデルを図-10、図-11に示す。（その1）、（その2）ともに、杭先端における杭径の幅（1.0m）の節点を多点拘束（X方向の変位、Y方向の変位を同じとする）としたものである。（その1）では、多点拘束を変位による拘束とした場合であり、（その2）では、杭頭への载荷が強制変位の時には多点拘束を変位として与え、強制荷重の時には多点拘束を節点力として与えたものである。

(2) 杭先端に多点拘束を用いた解析（その1）

杭先端に多点拘束を用いた解析（その1）では、杭先端の節点に多点拘束（XY方向の変位を同じとする）を設けた。解析結果を図-12に示す。その結果、杭頭からの強制変位による解析と強制荷重による解析を行ったところ、両者の荷重変位関係は一致した。ただし、ここで多点拘束は変位の拘束条件であるため、強制荷重による解析時に変位の拘束条件を与えることとなり、数値創成解の考え方にはあっていない。

(3) 杭先端に多点拘束を用いた解析（その2）

杭先端に多点拘束を用いた解析（その2）でも、杭先端付近の地盤要素の挙動を安定化させるために、杭先端の節点に多点拘束（XY方向の変位を同じとする）を設けた。その際、前節の問題点を改善するため、杭頭から強制変位による解析では杭先端を変位で拘束し、強制荷重による解析では杭先端の節点に節点力（荷重）を与えて多点拘束を模擬した。解析結果を図-13に示す。その結果、両者の荷重変位関係は一致し、両者の収束性も良い結果であった。

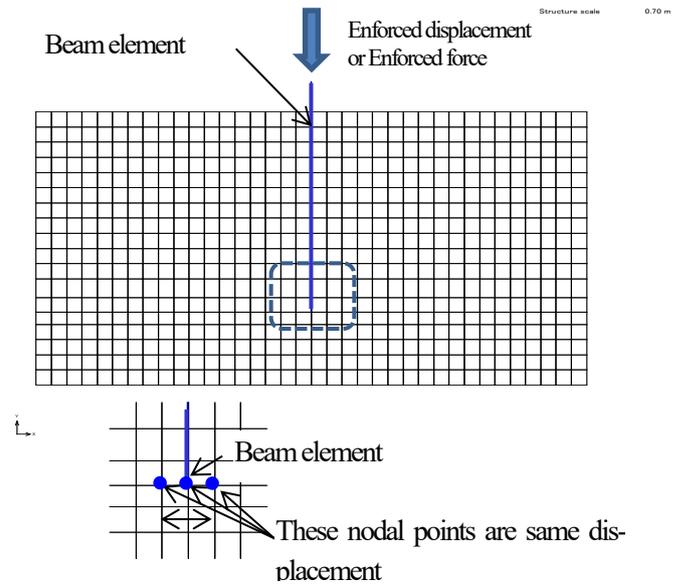


図-10 杭先端に多点拘束を用いた解析（その1）の解析モデル

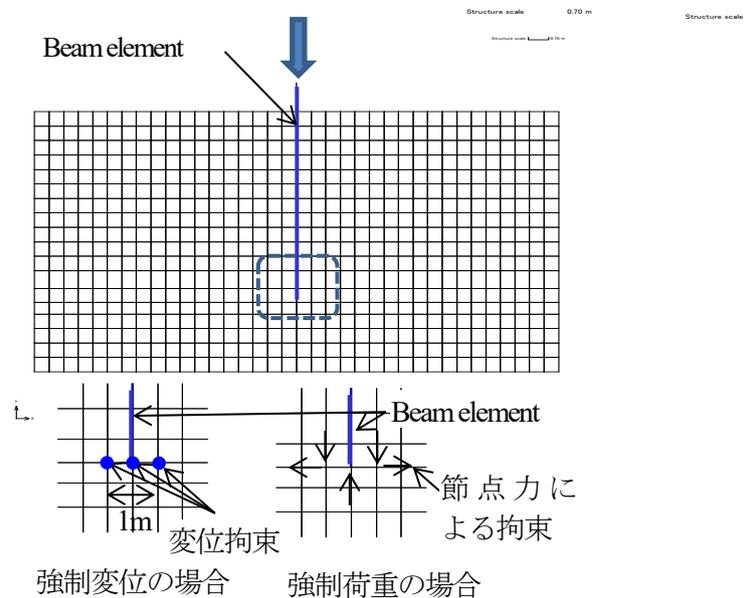


図-11 杭先端に多点拘束を用いた解析（その2）の解析モデル

4. 完全排水条件下で杭先端に拘束条件を与えた杭の繰返し载荷試験のシミュレーション

本節では、杭の押し込み試験のシミュレーションを利用して、繰返し载荷を杭頭荷重を強制変位と強制荷重の2パターンで行った。また、繰返し载荷パターンも2通り（パターンA、パターンB）実施した。パターンAは、载荷後、変位0.02mまで除荷し再载荷したパターンであり、パターンBは、载荷後、荷重がゼロになるまで除荷し再载荷したパターンである。解析結果を図-14、図-15に示す。パターンA、Bともに強制変位と強制荷重の荷重変位関係は一致した。

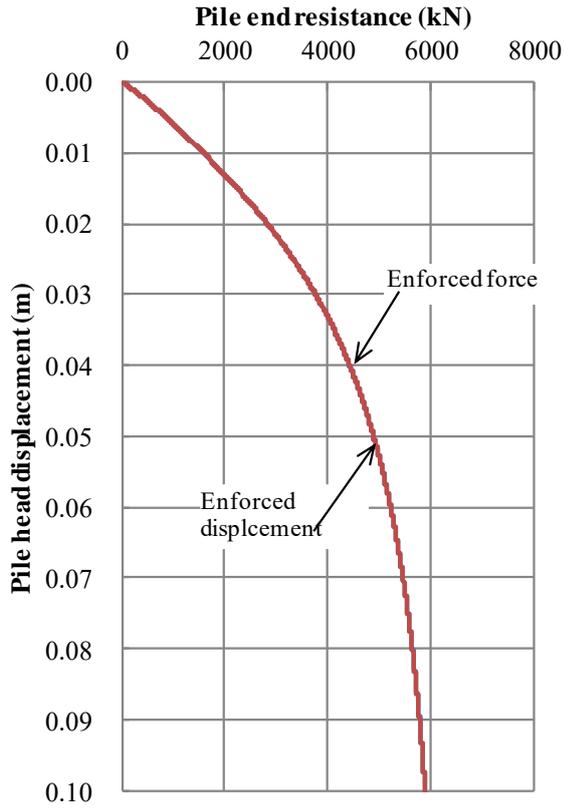


図-12 杭先端に多点拘束を用いた解析（その1）の解析結果

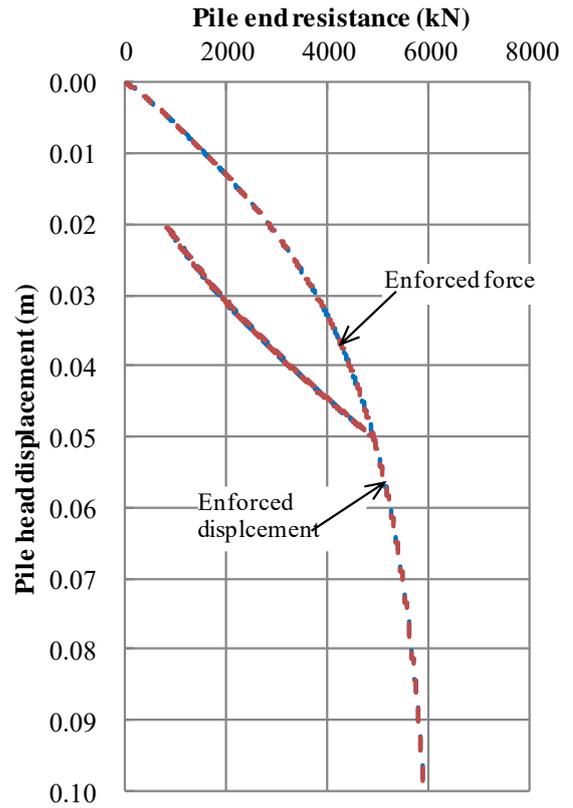


図-14 杭の繰返し載荷試験（パターンA）の解析結果

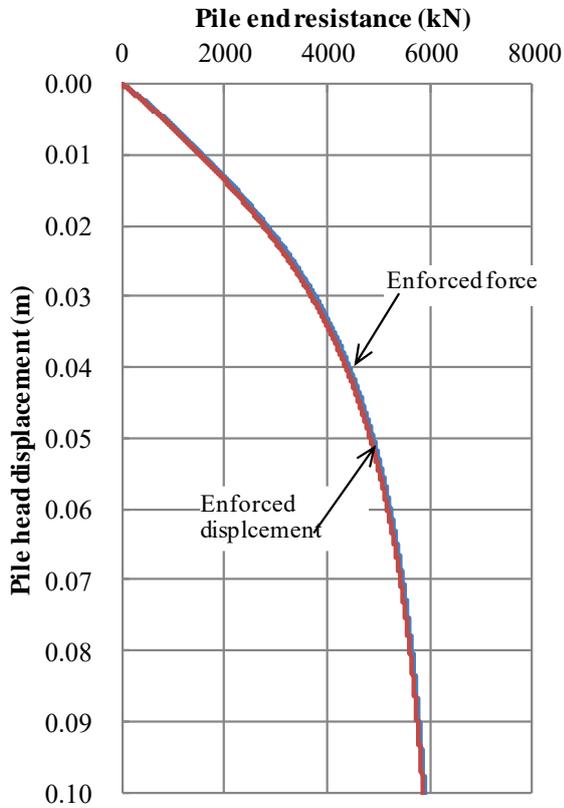


図-13 杭先端に多点拘束を用いた解析（その2）の解析結果

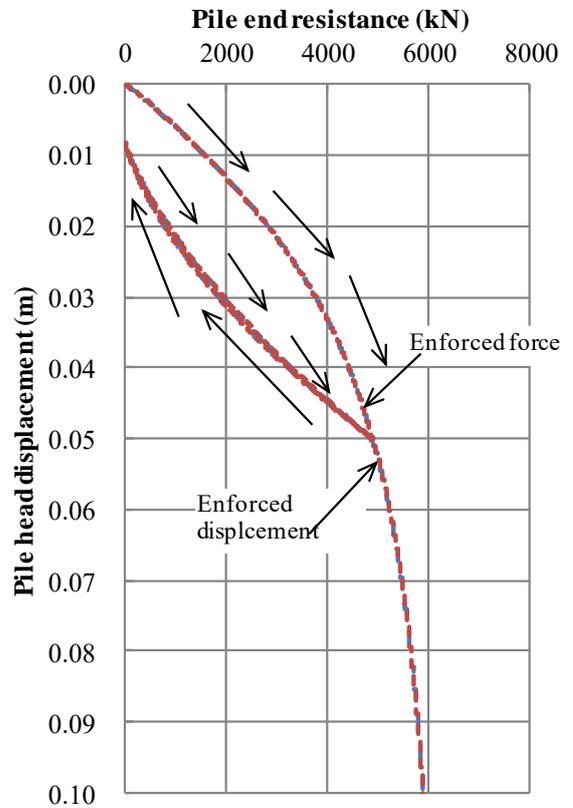


図-15 杭の繰返し載荷試験（パターンB）の解析結果

6. まとめ

本研究では二次元有効応力解析 FLIP ROSE を用いた杭の押込み試験の数値解析を行い、数値解析プログラムの検証方法 (Verification) を検討した。得られた結論を下記に示す。

- (1) 杭先端から地盤に集中荷重として載荷する場合、強制変位と強制荷重の荷重変位関係は一致しなかった。この理由は、杭先端では局所的な変形が生じて、杭先端付近に応力がゼロとなっている要素が生じたためである。つまり、引張応力等が生じると解の唯一性が担保されず、検証困難な事例となった。
- (2) 杭先端の周辺地盤に対して多点拘束を用いて要素レベルの挙動を安定化させれば、強制変位と強制荷重の荷重変位関係は一致した。強制変位による解析に変位拘束を与えた場合と強制荷重による解析に節点力による拘束を与えた場合で杭の荷重-変位関係が一致し、数値創成解による方法で同様の検証を実施することができた。
- (3) 杭の押込み力を繰り返し載荷する解析も実施し、強制変位と強制荷重の荷重変位関係は一致した。

以上のことから、杭の先端支持力に関して、二次元有効応力解析 FLIP ROSE の検証 (verification) を実施することができた。ただし、今回の事例解析は限られたケー

ス数であるため、今後、多くの事例解析を行うことが必要と考えている。

参考文献

- 1) (財)沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集（平成19年改訂版），2007.
- 2) (財)沿岸技術研究センター，第四期FLIP研究会14年間のまとめWG：液状化解析プログラムFLIPによる動的解析の実務～マルチスプリング要素の実務への適用における検討成果～FLIP研究会の14年間の研究成果【理論編】【事例編】，2011.
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y., Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, **32**(2), pp.1-15, 1992.
- 4) 堀宗朗：非線形数値解析の検証の一手法 Method of Numerically Manufactured Solution（非線形数値創成解の手法），土木学会原子力土木委員会 地盤安定解析高度化小委員会 公開シンポジウム-地盤・斜面の安定解析技術の高度化を目指して-，2018.

VERIFICATION OF MODELING OF PILE END RESISTANCE IN THE ANALYSIS FOR SEISMIC DESIGN

Junichi HYODO and Koji ICHII

The finite element method (FEM) is commonly used to verify seismic performance in the design of various facilities, such as buildings with pile foundations and sheet pile quay walls in Japan. It is very important to conduct validation and verification of numerical analysis. Although validations of numerical analysis is usually conducted, it is very difficult to conduct verification of non-linear problem. We did verification of modeling of pile end resistance by using FLIP ROSE. We conducted the simulation of monotonic loading test and cyclic loading test of a pile. The pile penetration was represented as the enforced displacement and the enforced load at the pile head nodes. The load-settlement relationship of enforced displacement did not agree with that of enforced load when the effective confining pressure of ground elements at the pile tip goes zero. However, when the ground nodal points within the pile diameter are constrained not to occur tensile stress, the load-settlement relationship of enforced displacement agreed well with that of enforced load. Finally, we could confirm the verification of modeling of pile end resistance using in FLIP ROSE.