

第I部門

2024年9月6日(金) 9:00 ~ 10:20 A104(川内北キャンパス講義棟A棟)

耐風・風工学(1)

座長：中藤 誠二（関東学院大学）

10:00 ~ 10:10

[I-326] 砂地盤中のモノパイル基礎の単調載荷解析における地盤剛性およびインターフェース要素低減係数の設定方法の提案と実験による検証

*石井 やよい¹、嶋田 健司¹、石原 孟² (1. 清水建設株式会社、2. 東京大学大学院工学系研究科)

キーワード：着床式洋上風車、モノパイル、CPT、地盤剛性、インターフェース要素低減係数、HSsmall

砂地盤中の大口径短杭（モノパイル）を対象に，CPT（Cone Penetration Test：コーン貫入試験）から得られたコーン先端抵抗に基づき，地盤剛性（ G_0 および E_{50} ）を算出するための簡便な式を提案し，HSsmallモデルを用いた単調載荷の3次元FEM解析を実施した．その結果，本提案式を適用し，かつ杭と地盤の界面のインターフェース要素強度低減係数とした場合，野外試験（打撃）と遠心実験（圧入）によらず，試験から得られたモノパイルの応答を精度よく再現できることを示した．

砂地盤中のモノパイル基礎の単調載荷解析における地盤剛性およびインターフェース要素低減係数の設定方法の提案と実験による検証

清水建設 正会員 ○石井 やよい
清水建設 正会員 嶋田 健司
東京大学 正会員 石原 孟

1. はじめに

モノパイルの設計に必要な地盤反力特性を 3 次元 FEM 解析により求めるため、CPT (Cone Penetration Test: コーン貫入試験) により得られたコーン先端抵抗に基づき 3 次元 FEM で使用する構成則に必要な地盤剛性 (初期せん断剛性 G_0 , 変形係数 E_{50}) を適切に設定することが重要である¹⁾。また、杭近傍地盤は杭の設置により乱れるため、FEM 解析では杭と地盤の界面にインターフェース要素低減係数 R_{inter} を導入する必要がある¹⁾。

本報告では、まずモノパイルを対象に、CPT の無次元化コーン先端抵抗 q_c^* に基づく地盤剛性の推定式を提案し、野外試験および遠心実験の再現解析を行い、その適用性について述べる。次に、本提案式を用いることにより、杭の設置方法 (野外試験における打設、遠心実験における圧入) によらず、インターフェース要素低減係数 R_{inter} を 0.6 とすることができることを示す。

2. 解析対象と地盤剛性の提案式

本報告では、まず PISA²⁾の野外試験 (Case P で示す)、と遠心実験 (Haouari and Bouafia (2020)³⁾ (Case H2 で示す)) を対象とした。これらの杭の諸元については石井ら⁴⁾を参照されたい。本報告では、Fan et al. (2021)⁴⁾の遠心実験 (Case F で示す) を追加した。Case F は、砂の相対密度 38%, 杭径 $D = 5.22\text{m}$, アスペクト比 $L/D = 3.1$, 板厚 $t = 21\text{mm}$, 載荷高さ $h = 19.8\text{m}$, 曲げ剛性 $EI = 9.244 \times 10^5\text{MN/m}^2$ の 1-g 圧入の遠心実験杭である。

有限要素法による解析は PLAXIS 3D および PLAXIS Monopile Designer を用いて排水状態の有効応力解析で行った。砂地盤の構成則には、PLAXIS の標準で、PISA プロジェクト²⁾でも実績のある HSsmall モデル^{5,6)}を用いた。

本報告では、無次元コーン先端抵抗 q_c^* は CPT のコーン先端抵抗 q_c を初期有効鉛直応力 σ'_{v0} で正規化し、次式のように定義する。

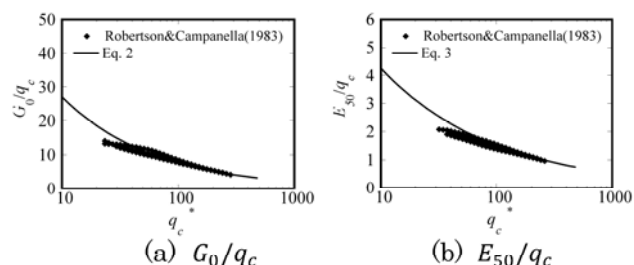


図 1 G_0/q_c および E_{50}/q_c と q_c^* の関係

$$q_c^* = (q_c/p_{ref}) \cdot (\sigma'_{v0}/p_{ref})^{-0.5} \quad (1)$$

ここに、 p_{ref} は基準応力 (=100kPa) である。

図 1 にはクリーンサンド (珪砂) を対象にした Robertson and Campanella (1983)⁷⁾の拘束圧の異なる q_c における G_0 および E_{50} と q_c^* の関係を示す。 G_0/q_c および E_{50}/q_c は拘束圧によらず、それぞれ一つの曲線で近似でき、本報告では、次式より表す。

$$G_0/q_c = 96q_c^{*-0.55} \quad (2)$$

$$E_{50}/q_c = 12q_c^{*-0.45} \quad (3)$$

インターフェース要素の強度および剛性の設定方法は、石井ら⁴⁾に従い、バイリニア型とした。周囲地盤の強度 τ_{lim} とせん断弾性剛性 G_s をインターフェース強度低減係数 R_{inter} により低減させ、インターフェース要素の強度 $\tau_{lim,i}$ およびせん断剛性 G_i を次式より求めた。

$$\tau_{lim,i} = R_{inter} \cdot \tau_{lim} \quad (4)$$

$$G_i = R_{inter}^2 G_s \quad (5)$$

3. 解析結果

図 2~4 の(a)~(c)には、それぞれ各ケースの q_c^* 分布、 G_0 分布、 E_{50} 分布を示す。野外試験は $0 < q_c^* < 1200$ の範囲であり、深さによる変動が大きい。一方、遠心実験は $0 < q_c^* < 150$ の範囲であり、深さによる変動は小さい。図 2 および図 3 の(d)~(f)には、式(1)~(3)により地盤剛性を算出した CaseP および CaseH2 の応答解析結果を示す。本報告では、 R_{inter} は野外試験 (打撃)、遠心実験 (圧入) によらず、 $R_{inter} = 0.6$ により試験から得られたモノ

キーワード 着床式洋上風車, モノパイル, CPT, 地盤剛性, インターフェース要素低減係数, HSsmall

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3 丁目 4-17 清水建設株式会社技術研究所 TEL 090-2728-9871

パイルの応答を再現できることを示した。

図 4(d)には、アスペクト比 $L/D = 3.1$ と小さく、相対密度も 38% と小さい Case F の解析結果を示す。この場合においても本提案式を用いる場合に、同様に、 $R_{inter} = 0.6$ により再現できることを示した。図 4(e)には、CEL (coupled Eulerian-Lagrangian) 法を用いて 1-g 圧入による杭設置過程を忠実に再現した Fan et al. (2021)⁴⁾と、本提案式および PLAXIS 3D による主応力 σ_{11} 分布の解析結果の比較 ($y_g/D = 0.04$) を示し、両者がよく一致していることが分かる。

以上のように、本提案式を用いる場合に、杭の設置方法 (打撃または圧入) によらず、単調載荷応答を精度よく予測できることを示した。

4. まとめ

砂地盤中の大口径短杭 (モノパイル) を対象に、地盤剛性 (G_0 および E_{50}) を算出するための簡便な式を提案し、HSsmall モデルを用いた単調載荷の 3 次元 FEM 解析を実施した。その結果、本提案式を適用し、かつイン

ターフェース要素強度低減係数 $R_{inter} = 0.6$ とした場合、野外試験 (打撃) と遠心実験 (圧入) によらず、試験から得られたモノパイルの応答を精度よく再現できることを示した。

参考文献 1)石井・他(2023)砂地盤中の洋上風車モノパイル基礎における単調載荷に関する FEM 解析, 第 45 回風力エネルギー利用シンポジウム. 2)Zdravkovic et al. (2020) Ground characterization for PISA pile testing and analysis, *Geotechnique*, 70, 945-960. 3) Haouari and Bouafia (2020) A Centrifuge Modelling and Finite Element Analysis of Laterally Loaded Single Piles in Sand with Focus on P-Y Curves, *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*, 64(4), 1064-1074. 4)Fan et al. (2021) Effects of Monopile Installation on Subsequent Lateral Response in Sand. II: Lateral Loading, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 147(5). 5) Shanz et al. (1999) The hardening soil model: Formulation and Verification, *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*, 281-296. 6)Benz (2007) Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences, Ph.D. Thesis, Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart. 7) Robertson and Campanella (1983) Interpretation of Cone Penetration Tests: Sands and Clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 20, 719-745.

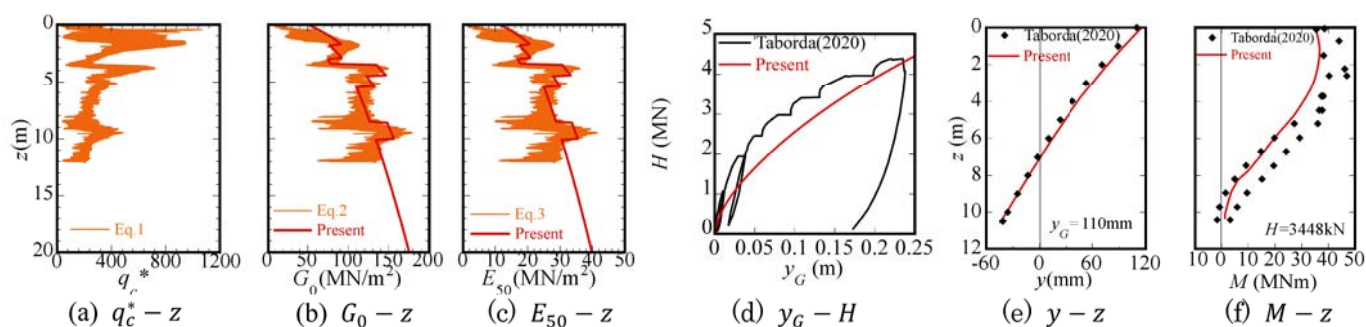


図 2 Case P (野外 (打設), $D = 2\text{m}$, $L/D = 5.25$) の地盤剛性, 荷重-変位関係, 変位分布, 曲げモーメント分布

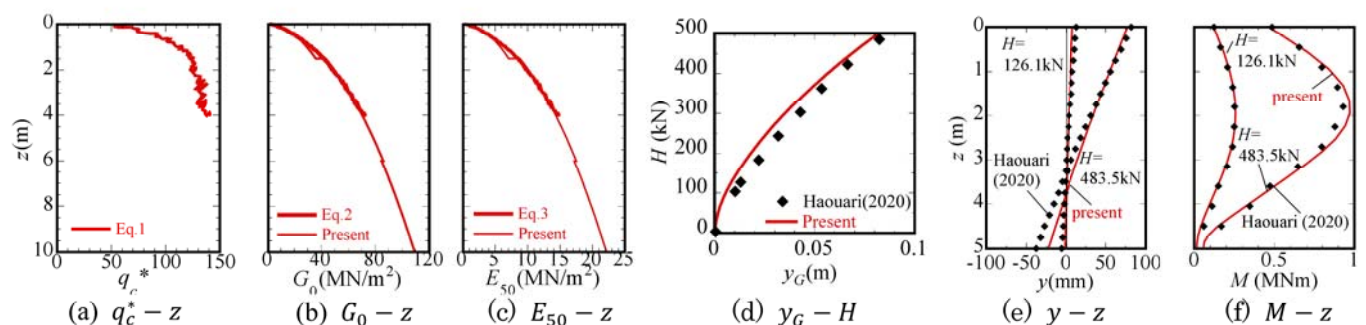


図 3 Case H2 (遠心 (圧入), $D = 0.5\text{m}$, $L/D = 5.6$) の地盤剛性, 荷重-変位関係, 変位分布, 曲げモーメント分布

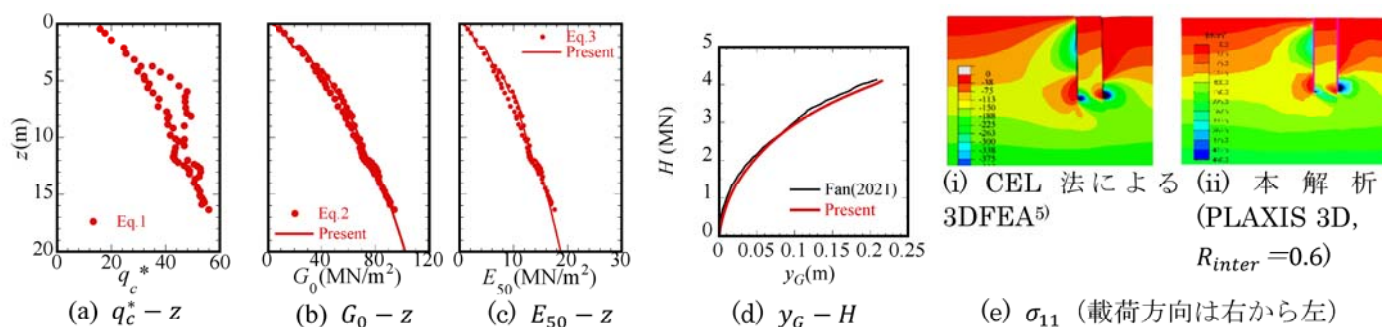


図 4 Case F (遠心 (圧入), $D = 5.22\text{m}$, $L/D = 3.1$) の地盤剛性, 荷重-変位関係, 主応力 σ_{11} 分布