

3次元弾塑性構成式による杭の水平繰返し载荷試験の再現解析

構成式 杭 繰返し荷重

清水建設

国際会員 ○杉山博一 奥野哲夫 福武毅芳

JIP テクノサイエンス

国際会員 高橋寛臣 戸田圭彦

地域 地盤 環境 研究所 国際会員

中井照夫

1. はじめに

中井ら¹⁾は、これまでの単調载荷問題を対象とした地盤構成式を、繰返し载荷時の応力・ひずみ挙動についても合理的かつ簡単に表現できる地盤構成式に拡張し、繰返し载荷による要素実験時の地盤挙動を再現できることを確認した。著者らは中井らの構成式を PLAXIS+tij モデルに新たに導入したプログラムを開発し、その検証として過去に行われた杭の水平繰返し载荷実験²⁾を解析的に再現した。

2. 再現解析の対象とした実験の概要

再現解析の対象となる実験は、既往文献²⁾に記載されているものを対象とした。図-1 に実験の概要図を示す。実験は深層土層 (3×4×11m) に作成した砂地盤中に試験杭を設置し、地盤面から 700mm の位置で準静的な水平繰返し载荷が行われている。文献では計 5 ケースの実験が行われているが、解析の対象としたのは次の 2 ケースである。すなわち、試験杭の材質は STK400、杭径は 318.5mm、厚さは 6mm、杭の値入れ長は 8.0m であり、正負交番水平载荷を行った場合 (文献²⁾に記載のケース 2) と、一方向水平繰返し载荷を行った場合 (文献²⁾に記載のケース 3) である。

地盤材料は鹿島砂が用いられた。地盤は水中落下法をベースに密度管理しながら作成されている。表-1 に鹿島砂の物性を示す。試験時に測定された乾燥密度は平均で 1.51g/cm³、相対密度は 17.3%程度であった。ただし、この密度下での力学的特性は不明である。

载荷は、図-1 の载荷点での水平载荷を ±n δ₀ (δ₀=15mm、n=1, 2, 3, ...) の変位制御で段階的に変位量を増加させながら行われている。なお、各段階での繰返し回数 は 3 回ずつとなっている。

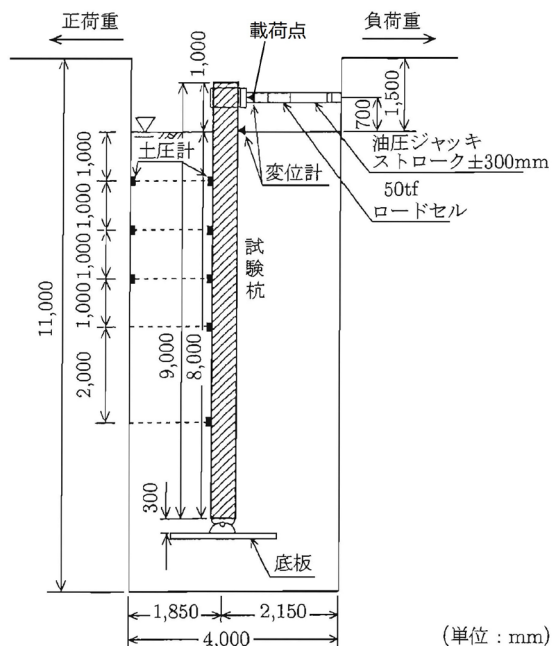


図-1 杭の水平载荷試験の概要²⁾

表-1 鹿島砂の諸物性²⁾より抜粋、整理

		試験時	Dr30%
土粒子の密度 ρ _s	g/cm ³	2.644	
最大乾燥密度 ρ _{dmax}	g/cm ³	1.789	
最小乾燥密度 ρ _{dmin}	g/cm ³	1.459	
試料の密度 ρ _d (平均値)	g/cm ³	1.51	—
相対密度 Dr (平均値)	%	17.3	30
初期せん断剛性 G ₀	kgf/cm ²	—	850
せん断抵抗角 φ'	deg	—	31.4
粘着力 c'	kgf/cm ²	—	0.114

表-2 解析用の構成式パラメータ

λ	0.025	a	60
κ	0.0025	k _a	12
Rcs	3.0	a _{cve}	2.0
N	1.5	k _{m(eye)}	5.0
β	1.6	k _{n(eye)}	2.0
e ₀	0.8	—	—

3. 解析方法、および解析条件

解析は PLAXIS 3D を用いた。表-2 に解析用の構成式パラメータを示す。最後の 3 つのパラメータが今回追加されたものであり、再载荷、あるいは逆载荷を考慮した剛性の変化や、繰返し回数による剛性増加、さらに剛性回復の速度等が考慮できるパラメータである。これ以外のパラメータは従来の地盤構成式と同じものであるが、今回鹿島砂の力学的特性が不明なため、豊浦砂に用いられているパラメータを参考にして決定した。

図-2 が解析メッシュであり、1/2 モデルになっているが、図-1 に示した試験条件をほぼ忠実にモデル化した。なお、底板部は水平载荷の影響が小さいと考え、モデル化はしていない。また、実験用の杭は鋼管であるが、解析では等価な曲げ剛性になるようソリッド要素でモデル化した。さらに杭周り

Simulation analysis of horizontal cyclic loading tests of pile using 3D elasto-plastic constitutive model

SUGIYAMA, H., OKUNO, T., FUKUTAKE, K. (Shimizu Corp.)
TAKAHASHI, H., TODA, Y. (JIP Techno Science Corp.)
NAKAI, T. (Geo-Research Institute)

にインターフェース要素を配置し、表-1 に示した Dr30%相当のモール・クーロン材料としてモデル化した。

解析では、自重圧密で初期応力状態を作成したのち、実験と同様に強制変位を杭頭部に与えた。強制変位の与え方も実験と同様に、 $1\delta_0 \times 3$ 回 $\rightarrow 2\delta_0 \times 3$ 回 $\rightarrow \dots \rightarrow n\delta_0 \times 3$ 回の順に繰返し载荷を与えた。

4. 解析結果と考察

図-3 に一方向载荷時の実験結果と解析結果の比較を、図-4 に正負交番载荷時の実験結果と解析結果の比較を示す。なお解析は、杭体が降伏しない範囲を対象としたが、現段階では一方向载荷では $+5\delta_0$ まで、正負交番载荷では $\pm 2\delta_0$ まで解析が進んだところで杭近傍の地表のせん断ひずみが 100%以上発生して止まっている。図からわかるように、再現できた範囲では解析結果は実験結果を良く再現できている。すなわち、初期载荷時の剛性の傾きのほか、除荷時や再载荷時の剛性変化の形状や、一方向载荷時では残留変位の増加（ひずみの蓄積）、各载荷ステップでの 2 回目、3 回目のわずかな荷重減少等が、実験結果と良く整合している。一方、交番载荷では繰返しが進むにつれ徐々に剛性が高まる事が再現されている。

5. まとめと今後の課題

繰返し载荷時の地盤挙動を合理的に説明できる地盤構成式を用い、既往の実験結果の再現解析を実施した。その結果、実験結果を非常によく再現することが確認できた。今回は鹿島砂の力学特性が不明なため豊浦砂のパラメータを参考にしたが、今後は室内試験から各パラメータを設定したうえで実験の再現解析を通じた検証を進める予定である。

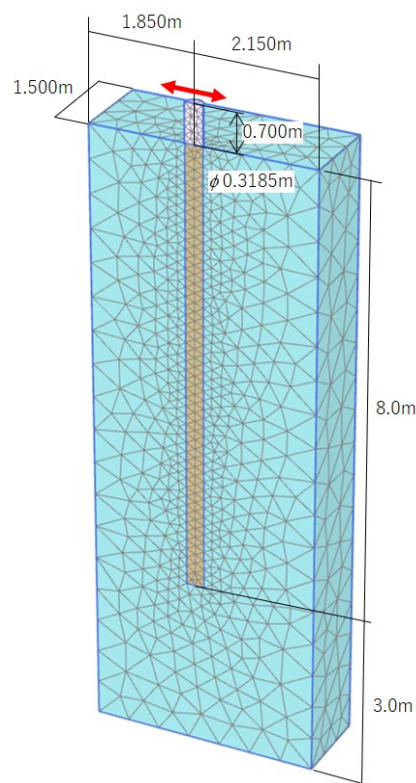


図-2 解析メッシュ (1/2 モデル)

参考文献：1) 中井照夫、H. M. Shahin、高橋寛臣、戸田圭彦、奥野哲夫、杉山博一、福武毅芳；繰返し载荷特性を説明するための Subloading tij model の拡張、第 55 回地盤工学研究発表会、2020 年（投稿中）

2) 建設省土木研究所；砂地盤中の単杭の復元力特性に関する水平载荷試験、土木研究所資料第 3552 号、1998 年 3 月

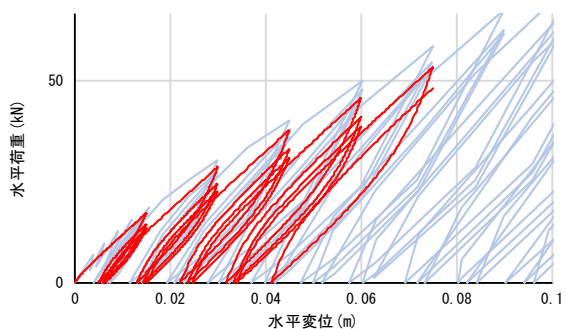
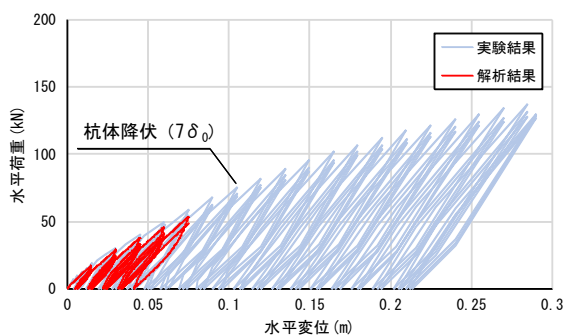


図-3 一方向载荷時の実験結果と解析結果の比較
(上；実験結果の全体図、下；拡大図)

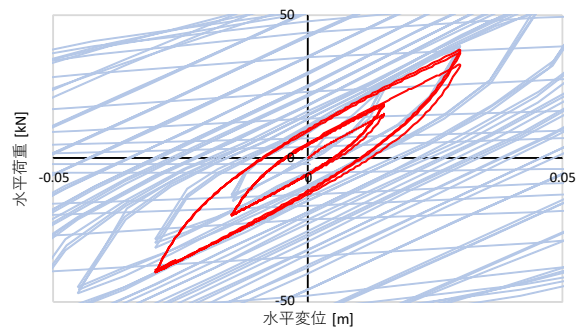
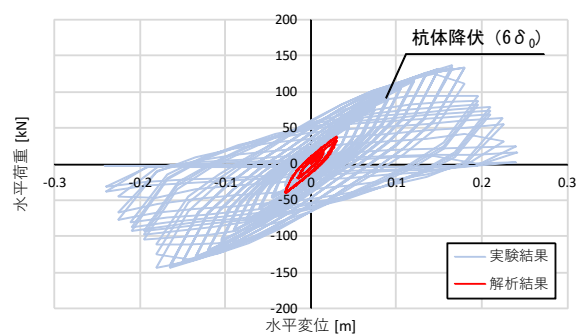


図-4 正負交番载荷時の実験結果と解析結果の比較
(上；実験結果の全体図、下；拡大図)