

開端鋼管杭における急速载荷試験のシミュレーション解析

急速载荷試験 鋼管杭 弾塑性 FEM

愛知工業大学 国際会員 ○河野 清か 国際会員 渡邊 康司
(株) 地盤試験所 国際会員 林 世峻 国際会員 亀井 秀一

1. はじめに

地震時、交通荷重および衝撃荷重のような動的荷重作用時には、杭の鉛直支持特性に関して静的载荷試験による評価と異なる挙動が得られることがある。そのため、動的荷重作用時における杭の鉛直支持特性に関する設計の合理化は重要な課題となる。しかしながら、現行基準においては、速度効果や杭の慣性力効果といった動的効果を考慮することは稀である。そこで、動的効果が杭-地盤系の鉛直支持特性に与える影響を定量的に評価することを目的として、同一の開端鋼管杭を対象に押し込み試験（SLT）および急速载荷試験（RLT）を実施した。また、既往の研究²⁾で報告した弾塑性 FEM 解析による SLT のシミュレーション解析で確認したモデル化手法を用いて、RLT のシミュレーション解析を実施した。

2. 実大鉛直载荷試験

試験杭は、杭径 $D=318.5\text{mm}$ 、板厚 $t=6.9\text{mm}$ 、断面積 $A=0.0068\text{m}^2$ の SS400 材の開端鋼管杭を使用した。杭全長は 11.8m で、根入れ深さは 11.0m である。Fig. 1 に、試験地盤および試験杭の条件、測定項目を示す。試験方法は、軟クッション重錘落下方式とし、質量 $m=3.5\text{ton}$ の重錘を用いて、落下高さ h を $0.01\sim0.83\text{m}$ の範囲で段階的に増加させた計 8 回の打撃を行った。試験条件として、载荷時間内に応力波が杭体を往復する回数である、相対载荷時間を $T_r=t_l/(2L/c)=5$ (t_l =载荷時間 (sec)、 L =杭長 (m)、 c =杭の縦波速度 (m/sec)) とした。

3. シミュレーション解析

本章では、RLT 結果に対してシミュレーション解析を行い、解析条件の違いによるモデル化手法およびパラメータ評価の妥当性を検討した。解析モデルと境界条件は、Fig. 2 に示す通りである。解析モデルは対称性を考慮して、解析対象領域の 1/4 をモデル化し、杭頭部に RLT で実測された急速荷重 F_{rapid} の時刻歴波形を入力することで载荷荷重を作用した。载荷方法は RLT と同様に連続载荷方式である。地盤パラメータは、式 (1) から (3) に示す、港湾基準³⁾に記載された算定式により設定した。

砂質土: $G=14100N^{0.68}$... (1) 粘性土: $G=170q_u$... (2)

$\phi=25+3.2\sqrt{100N/(70+\sigma_v')}$... (3)

ここで、 G : せん断弾性係数 (kN/m^2)、 N : N 値 (-)、 q_u : 一軸圧縮強さ (kN/m^2)、 ϕ : 内部摩擦角 (deg.)、 σ_v' : 有効上載圧 (kN/m^2)

構成則は、鋼管杭を弾性、地盤を Mohr-Coulomb 則とした。解析モデルには、鋼管内部に形成された、ソイルプラグをモデル化し、プラグ長さを、試験杭打設後に実測された 6.50m とした。また、杭外周面および内周面には、周面抵抗特性を模擬したジョイント要素を付与した。パラメータは、Midas ユーザーマニュアル⁴⁾より法線剛性、せん断剛性、粘着力、内部摩擦角の 4 つを設定した。さらに、本解析では、2 種類の減衰を考慮し、解析結果に与える影響の比較を行った。まず、半無限媒体である地盤の遠方へと波動エネルギーが伝播・散逸するプロセス（エネルギー減衰）、もう一方は、土粒子間の摩擦や粘性、あるいは間隙水圧の上昇に伴うエネルギー消費プロセス（粘性減衰）である。本解析では、解析ケースを Table 1 のように分類し、結果を比較した。エネルギー減衰は、Lysmer らの提案⁵⁾に基づき、先端減衰定数

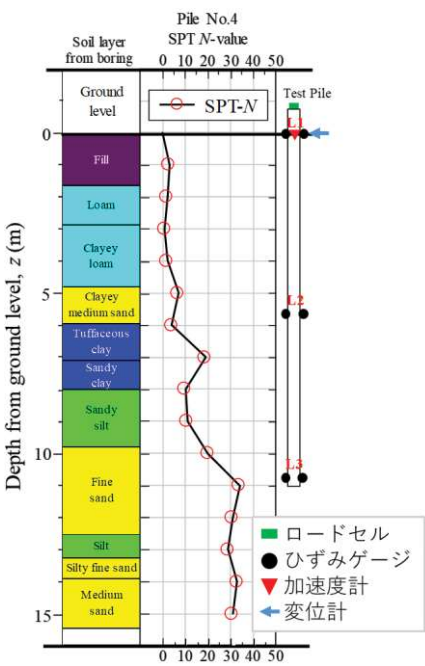


Fig. 1 試験地盤および試験杭の条件

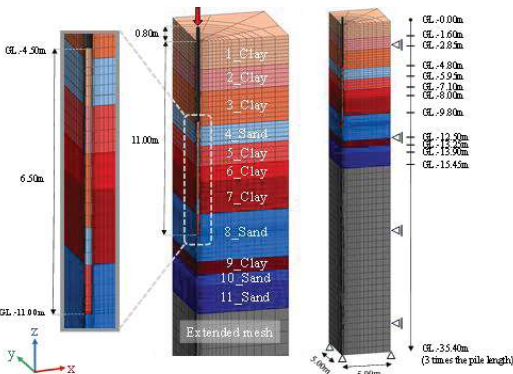


Fig. 2 解析モデルおよび境界条件

Table 1 解析ケース		
Case	エネルギー減衰	粘性減衰
1	×	×
2	○	×
3	×	○
4	○	○

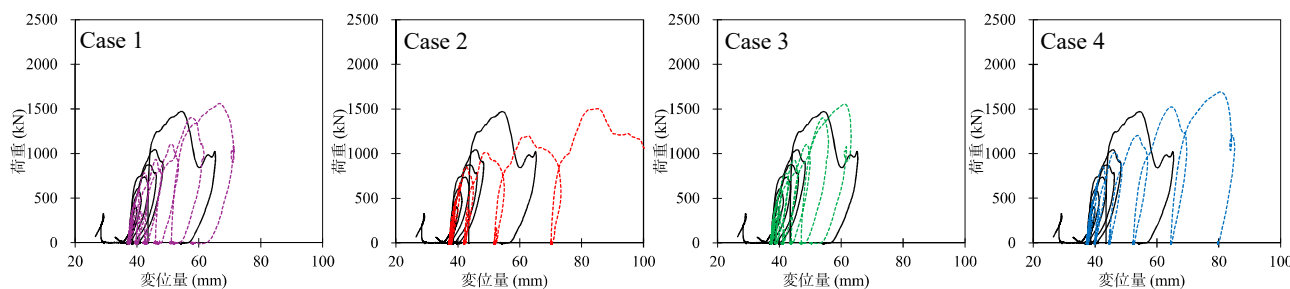


Fig. 3 Case 1 から Case 4 の杭頭部 (L1) における荷重-変位量関係 (全打撃)

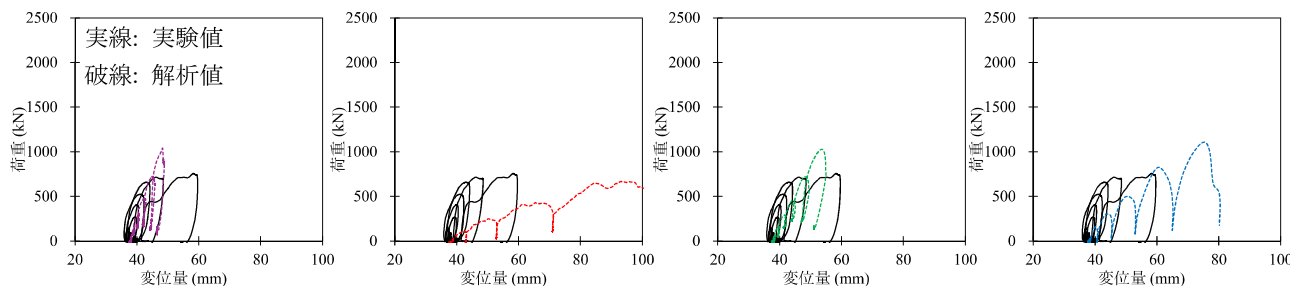


Fig. 4 Case 1 から Case 4 の杭先端部 (L3) における荷重-変位量関係 (全打撃)

$C_p = \rho V_p = 1100 \text{ kN} \cdot \text{sec}/\text{m}^3$ 、周面減衰定数 $C_s = \rho V_s = 550 \text{ kN} \cdot \text{sec}/\text{m}^3$ (ρ : 地盤の密度 (g/cm^3)、 V_p 、 V_s : PS 検層による P 波、S 波 (cm/sec)) とした。なお、粘性減衰には、レイリー減衰を採用した。ここで、RLT における杭の挙動を再現するために、解析対象モデルに対して事前の固有値解析を実施した。その結果、質量比例型減衰の影響が強い低周波数域において、モデル全体の主要な振動モードを考慮するために、固有値解析による 1 次固有振動数である $f_1 = 5.4 \text{ Hz}$ を採用することの妥当性を確認した。また、剛性比例型減衰の影響が強い高周波数域については、急速載荷波形の周波数および高次モードの影響を考慮し、解析上の最大卓越周波数である 20.4 Hz を十分に網羅できる $f_2 = 30 \text{ Hz}$ とした。なお、減衰比 h に関しては、 $1 \sim 5\%$ を 1% 刻みでパラメトリックスタディを実施し、最も実験結果との整合性が高い $h = 2\%$ とした。

4. 解析結果

Fig. 3 に L1 の全打撃における荷重-変位量関係を示す。Fig. 3 より、いずれのケースにおいても荷重-変位関係における載荷剛性は精度よく再現できているが、各打撃段階に生じる残留変位により、ケースごとに差異が生じた。特に、エネルギー減衰のみである Case 2 では、著しく変位量を過大評価する傾向が確認された。一方、粘性減衰を考慮した Case 3 では、最終打撃時における最大変位で比較した場合に、減衰を考慮していない Case 1 に比較して実験値との整合性が向上する結果となり、4 つのケースのうち最も再現性が高い結果となった。杭先端部における荷重-変位関係を Fig. 4 に示す。Fig. 4 から、粘性減衰を考慮した Case 3 で最も再現性の高い結果が得られたことが分かる。以上より、本研究における RLT のシミュレーション解析において、本研究で提案するモデリング手法・パラメータ評価法は妥当性があり、減衰現象のうち、粘性減衰のみを考慮した場合において再現性の高い結果が得られるといえる。

5. まとめ

本研究では、動的荷重作用時の杭の鉛直支持特性を合理的に評価することを目的として、RLT 結果に対して弾塑性 FEM を用いたシミュレーション解析により、実験結果を再現可能なモデリング手法およびパラメータ評価法の妥当性を検討した。その結果、杭頭部・杭先端部の全打撃における荷重-変位量関係より、粘性減衰を考慮した Case 3 で、本研究で実施した 4 ケースのうち最も再現性が高い結果となった。以上より、本研究における RLT のシミュレーション解析において、モデリング手法・パラメータ評価法に妥当性があり、減衰現象のうち、粘性減衰のみを考慮した場合において最も再現性の高い結果が得られるといえる。

参考文献

- 1) 亀井ほか：鋼管杭を対象とした急速載荷試験と静的載荷試験の比較実証実験（その 1、その 2）、第 58 回地盤工学研究発表会講演概要集、13-9-1-03・13-9-1-04、2023.7。
- 2) Kono, K., et al.: THREE-DIMENSIONAL SIMULATION ANALYSIS OF OPEN-ENDED STEEL PIPE PILE BY USING FINITE ELEMENT METHOD, the 15th Int. Conf. on GEOMATE, 2025.11.
- 3) 港湾の施設の技術上の基準・同解説、2018.3
- 4) GTS-NX User Manual, MIDAS Information Technology Co., Ltd., p. 146
- 5) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L.: Finite dynamic model for infinite media, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 95, No. EM4, pp. 859-877, 1969.
- 6) Kontoe, S., et al.: Selection of the optimal frequencies of viscous damping formulation in nonlinear time-domain site response analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014.