鋼管杭の急速載荷試験のシミュレーション解析

急速載荷試験　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　渡邉　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

杭の鉛直支持特性は、載荷試験により評価される。静的載荷試験（以下、SLT）は、実際の杭と同様の荷重条件で実施されるため、鉛直支持特性の評価に関して信頼性が高いが、大規模な反力装置が必要となることから、膨大な試験費用や工期を要する。そこで、SLT に代わり杭の鉛直支持特性を簡便に推定する方法として動的載荷試験が行われている。動的載荷試験のひとつである急速載荷試験（以下、 RLT）は、SLT と比較して載荷試験装置の組立て・実施が容易であり費用や工期の面で利点を有するが、 試験データに地盤の動的抵抗成分や慣性力の影響（以下、動的効果）が含まれる。そのため、静的な鉛直支持力特性として正確に評価するためには、動的効果の定量的評価が不可欠である。動的効果のメカニズムを解明し、RLT で得られた結果を精度よく解析できれば、より合理的に杭の鉛直支持特性を評価することが可能となる。本研究では、同一の開端鋼管杭を対象に SLT および RLT を実施 [1]し、河野ら [2]が実施した弾塑性 FEM を用いた SLT のシミュレーション解析により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。また、砂に対して載荷速度を変化させた要素試験（三軸圧縮試験）を実施し、地盤材料の変形強度特性に与える載荷速度の影響を評価し、要素試験結果から得られた速度効果を考慮した RLT のシミュレーション解析を行った。本報では、速度効果の影響が RLT のシミュレーション解析結果に与える影響について報告する。

2. 実大鉛直載荷試験

試験杭は、杭径 D=318.5mm、板厚 t=6.9mm、断面積 A=0.0068m^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=3.5ton の重錘を用いて、落下高さ h を 0.01～0.83m の範囲で段階的に増加させた計 8 回の試験（打撃）を行った。試験条件として、載荷時間内に応力波が杭体を往復する回数である、相対載荷時間を T_r ＝ t_L / （$2L/c$） ＝5 （t_L =載荷速度、L =杭長、c = 杭の縦波速度） 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うことで、モデル化手法およびパラメータ評価の妥当性を検証した。解析モデルと境界条件は、Fig. 2 に示す通りである。試験杭および周辺地盤は対称性を考慮し、解析対象領域の 1/4 をモデル化した。解析は、ステップ解析として初期応力解析を実施後、杭頭部に RLT で計測された急速荷重 F_{rapid} の時刻歴を載荷した。地盤パラメータは、式（1）に示す、道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編 [3]（以下、道示）に示される算定式をベースとし、河野ら [2]のパラメータ手法に基づいて設定を行った。

$$E=2800N \qquad (1)$$

ここで、E: 変形係数 （kN/m^2）、N: N 値 （-）

まず、試験杭が打撃工法で施工されたことを考慮し、杭先端以深の地盤を、式（2）、式（3）に示す内田ら [4]が提案した微小ひずみレベル相当のものと、道示により算出した変形係数を平均化し、解析に用いることとした。

$$\text{砂質土: } V_s=110N^{0.30}\text{、粘性土: } V_s=130N^{0.29} \qquad (2)$$

ここで、V_s: せん断波速度（m/s）、N: N 値 （-）

$$G=\rho V_s^2 \qquad (3)$$

ここで、G: せん断弾性係数（kN/m^2）、ρ: 密度（ton/m^3）

次に、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、試験杭構築時に実測された 6.50m とした。さらに、杭周面は、周面抵抗特性を模擬したジョイント要素を付与し、載荷試験で得られた周面抵抗力度-変位量関係からジョイント要素の物性値を設定した。

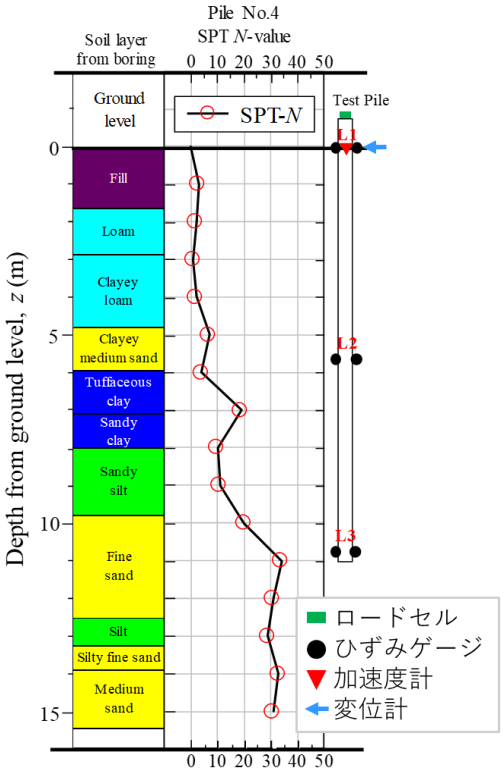

Fig. 1　試験地盤および試験杭の条件

Simulation Analysis for Rapid Load Test of Steel Pipe Pile

Kiyoka KONO and Koji WATANABE, Aichi Institute of Technology
Shihchun LIN and Shuichi KAMEI, Jibanshikenjo Co., Ltd.

© 公益社団法人 地盤工学会

本研究で対象とする試験杭は砂質土層を支持層としている。そのため、杭先端における速度効果の影響を検討する目的で、砂に対して載荷速度を変化させた要素試験（三軸圧縮試験）を実施し、速度効果が地盤材料の変形強度特性に与える影響を考慮した解析についても実施した。要素試験は載荷速度一定の条件で行ったため、慣性力の影響を無視することができ、載荷速度影響のみを確認している。なお、三軸圧縮試験の載荷速度は、0.0005cm/s から 25cm/s の範囲で実施しており、急速載荷試験の各落下高さにおいて杭先端部で計測された速度に対応させることで、パラメータに速度効果を反映している。

4. 解析結果

Fig. 3 に L1、Fig. 4 に L3 における荷重-変位関係を示す。本論文では紙面の都合上、8 打撃のうち落下高さ 0.83m の結果のみを示す。L1 の荷重-変位関係では、変位レベル 62mm 以降で速度効果の有無による差異が確認されており、速度効果を考慮しない場合、変位量を過大評価している。一方、L3 では、変位量 53mm 時を比較すると、速度効果を考慮した場合で先端荷重が約 240kN 増加した。以上より、速度効果の考慮が解析の再現性向上に寄与することが確認された。Fig. 5 に、L1 および L3 の全打撃における F_{rapid} の最大値を連ねた骨格曲線を示す。L1 では、速度効果の有無に関わらず、RLT の初期部分と整合性の高い結果が得られ、全体としても類似した傾向を示した。一方、L3 では速度効果を考慮しない場合、RLT の曲線よりも荷重が著しく小さい結果となったが、速度効果を考慮することで、1 回目の打撃から荷重の増加傾向が確認された。さらに、L3 では L1 よりも速度効果の影響が顕著であったことから、杭先端における速度効果の影響が確認された。しかしながら、剛性が小さく評価されていることや、最終打撃から 2 番目の打撃（h=0.53m）から、RLT 結果よりも大きな値を示していることなど、杭先端部地盤の速度効果の評価については、改良の余地があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、弾塑性 FEM を用いたシミュレーション解析により RLT 結果を再現するとともに、載荷速度を変化させた三軸圧縮試験を実施し、地盤材料のパラメータに載荷速度効果を反映させた解析を行った。以下に得られた知見を示す。

1) 0.83m 時の荷重-変位関係より、L1、L3 ともに、要素試験で得られた速度効果を考慮することで、RLT 結果の再現性を向上させることができる。
2) 骨格曲線より、L1 では速度効果の有無に関わらず、RLT の初期部分と整合性の良い結果が得られ、L3 では速度効果を考慮することで打撃ごとの荷重が増加する傾向が確認された。
3) 骨格曲線より、L3 では L1 よりも速度効果による影響が顕著であったことから、杭先端における速度効果の影響を適切に評価することが重要である。

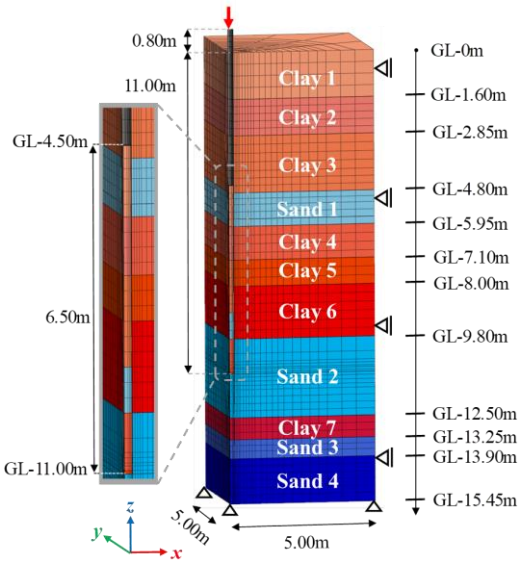

Fig. 2　解析モデル

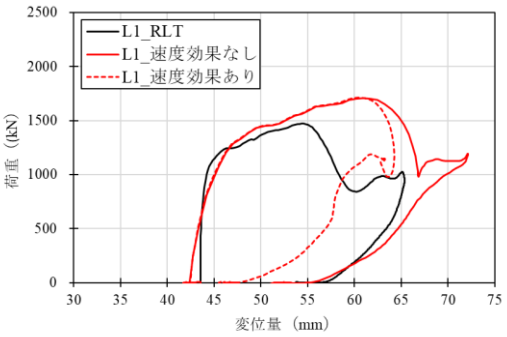

Fig. 3　落下高さ 0.83m 時の L1 における荷重-変位関係

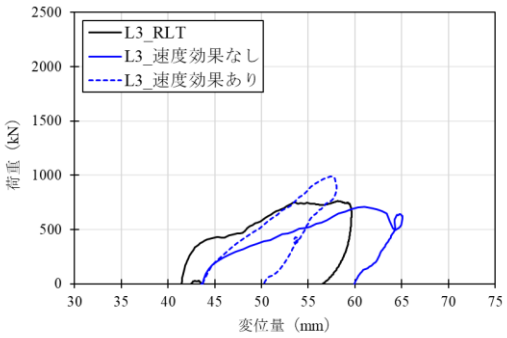

Fig. 4　落下高さ 0.83m 時の L3 における荷重-変位関係

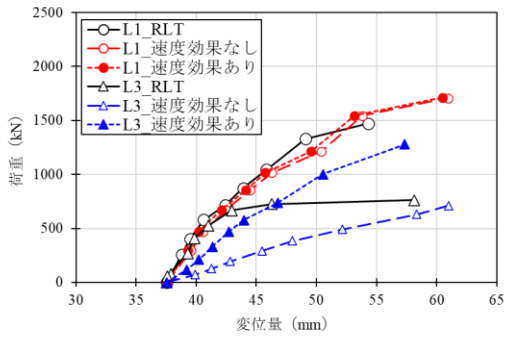

Fig. 5　L1, L3 における骨格曲線

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.: “Simulation analysis for static compressive load test of steel pipe piles,” the 14th Int. Conf. on GEOMATE, 2024.11.
3) 日本道路協会「道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編」，日本道路協会, 2017.11.
4) 内田ほか：N 値による S 波速度の推定に関する一考察,日本建築学会技術報告集, 25 巻 59 号, pp.119-122, 2019.2.

© 公益社団法人 地盤工学会