

## 鋼管杭の押込み試験におけるシミュレーション解析

鋼管杭  
静的荷重試験  
弾塑性 FEM

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

### 1. はじめに

杭の鉛直支持特性は、荷重試験により評価される。静的荷重試験（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、荷重試験装置には加力装置や測定装置だけでなく、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。一方、急速荷重試験（以下、RLT）は、杭頭に重錘を自由落下させ継続時間の短い荷重を加える試験であり、試験装置に反力装置を必要としないため、費用や工期の面で利点を有する。しかし、測定データに杭や地盤の動的な抵抗や慣性力の影響が含まれるため、静的な鉛直支持特性として評価するためには、解析により動的効果を除去する必要がある。

RLT で得られた結果を静的な鉛直支持特性として精度よく解析できれば、より合理的に荷重試験を行い、鉛直支持特性を評価することが可能となる。

本研究では、同一杭に対して SLT および RLT を実施し、解析的検討および実験的検討を行うことによって、杭の鉛直支持特性に与える動的効果のメカニズムを解明することを目的としている。本報では、解析的検討として、弾塑性 FEM を用いた SLT 結果のシミュレーション解析を実施し、現行基準で示される評価式を用いたパラメータ評価やモデル化手法の妥当性を検討した結果を報告する。

### 2. 実大鉛直荷重試験（押込み試験）<sup>1)</sup>

#### 2.1 試験概要

本研究では、実大サイズの押込み試験（以下、SLT）を実施した。試験杭は、杭径  $D=318.5\text{mm}$ 、板厚  $t=6.9\text{mm}$ 、断面積  $A=0.0068\text{mm}^2$  の SS400 材の開端鋼管杭を上杭、下杭の 2 本を用意し、それらを溶接によって接合した。よって試験杭は、杭全長 12.0m、根入れ深さ 11.0m である。

試験地盤の柱状図と試験杭の概要を Fig.1 に示す。試験地盤の調査として、ジャストポイントで標準貫入試験を実施した。また、標準貫入試験実施位置と試験杭配置を Fig.2 に示す。

本試験の計画最大荷重は、道路橋示方書における鋼管杭の極限支持力の評価式を用いて算出した。算出された試験杭の極限支持力は  $R_u=751\text{kN}$  となるため、荷重試験における計画最大荷重は 800kN とした。最終的な荷重荷重は、杭の極限支持力など荷重試験により確認すべき

鉛直支持特性値を十分に確認できた 1040kN とした。

#### 2.2 荷重試験方法

SLT は、反力体を使用した実荷重方式とし、荷重方式は 5 サイクルの段階荷重方式とした。SLT における測定項目は、杭頭部における鉛直変位量（4 点）、杭頭部における荷重および Fig.1 に示す 3 断面におけるひずみ（平面 4 方向）である。

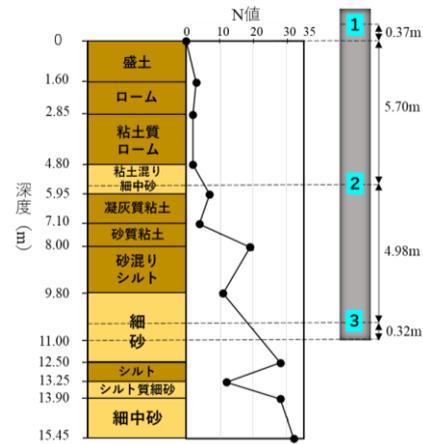


Fig.1 試験地盤の柱状図と試験杭の概要

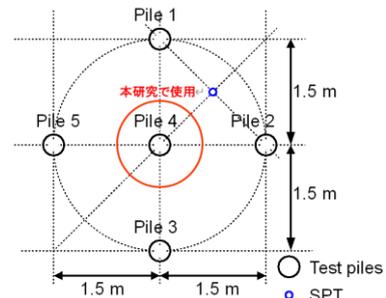


Fig.2 標準貫入試験実施位置と試験杭配置

### 3. SLT 結果におけるシミュレーション解析

荷重試験結果と数値解析結果で得られる鉛直支持性能を比較することで、解析結果の信頼性の確認や解析モデル、地盤パラメータの評価を行った。解析モデル、境界条件を Fig.3 に示す。解析モデルは、試験杭および周辺地盤の対称性を考慮し、1/4 の範囲をモデル化した。解析は、ステップ解析として、初期応力解析を実施後に杭頭部に荷重を 80kN ずつ、最大 960kN に達するまで段階的に荷重を行った。荷重方法は、実大鉛直荷重試験の荷重ステップに基づき設定し、杭頭部に荷重を段階的に作用させ

た。地盤のパラメータのうち変形係数は、道路橋示方書（以下、道示）、鉄道構造物等設計標準・同解説（以下、鉄道標準）、建築基礎構造設計指針（以下、建築）、港湾構造物設計基準（以下、港湾）、内田ら（2019）<sup>2)</sup>の5種類の現行基準等に示される算定式を用いて比較、検討を行った。各算定式における変形係数の具体的な値をまとめたものをTable.1に示す。なお、粘着力 $c$ および内部摩擦角 $\phi$ は道示により算定した。また、ポアソン比は経験的な値として、粘性土を0.45、砂質土を0.35とした。

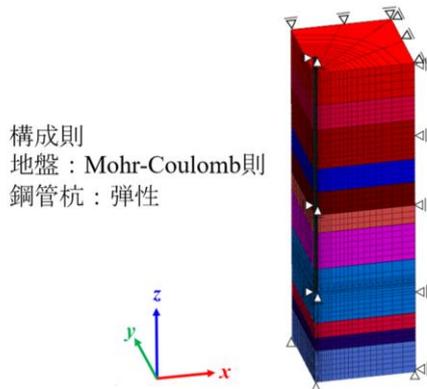


Fig.3 解析モデルおよび境界条件

Table.1 各算定式における変形係数の値および地盤定数

No.	$E$ (kN/m <sup>2</sup> )					$c$ (kPa)	$\phi$ (°)
	道示	鉄道標準	建築	港湾	内田ら (2019)		
1 粘性土	8400	12000	2100	25305	181146	18.75	0.20
2 粘性土	5600	8000	1400	33253	146711	33.73	0.20
3 粘性土	5600	8000	1400	42275	146711	42.88	0.20
4 砂質土	19600	14000	4900	142972	189008	10.00	25.25
5 粘性土	11200	16000	2800	278545	210377	282.50	0.20
6 粘性土	53200	76000	13300	66555	440397	72.50	0.20
7 粘性土	30800	44000	7700	71485	356001	72.50	0.20
8 砂質土	78400	56000	19600	394171	466392	10.00	35.49
9 粘性土	33600	48000	8400	126455	372478	128.25	0.20
10 砂質土	78400	56000	19600	394171	466392	10.00	35.49
11 砂質土	89600	64000	22400	401869	470448	10.00	36.91

4. 解析結果

解析で得られた軸方向力と変位量の関係を Fig.4~6 に示す。なお、これらの図中には SLT で得られた軸方向力と変位量の関係も合わせて示している。Fig.4 に示す杭頭部に着目すると、全ての算定式で各荷重段階における軸方向力が概ね一致した。また、港湾、内田ら（2019）においては、弾性域での軸方向力と変位量の関係が SLT の挙動に近い傾向がみられた。建築では、他の算定式に比べ変形係数が小さいことから、全ての荷重段階で SLT 結果の変位レベルを上回る傾向となった。

Fig.5 に示される 2 断面では、道示において、弾性域での挙動が SLT の結果と整合する結果となった。一方、鉄道標準や内田ら（2019）では、同一荷重レベルにおける変位量が小さく、SLT 結果を過大に評価した。一方、建築と港湾では、同一荷重レベルにおける変位量が大きくなり、SLT 結果を著しく過小評価した。

Fig.6 より先端部では、道示、鉄道標準、建築で軸方向力-変位量関係の初期勾配が概ね一致した。以上の結果を

から、本研究で検討した範囲においては、道示に示される算定式を用いてパラメータを評価した場合に、SLT 結果を再現できる可能性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 SLT に対するシミュレーション解析を行った。その結果、SLT 結果を最も再現するのは、道示に示される算定式を用いて地盤パラメータを評価した場合であると考えられる。今後の課題として、杭の周面抵抗を模擬するジョイント要素を設定したモデルを用いて、より再現性の高い数値解析を行う必要がある。

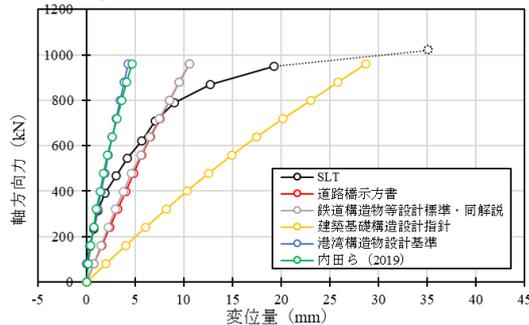


Fig.4 1 断面（杭頭部）における荷重-変位量関係

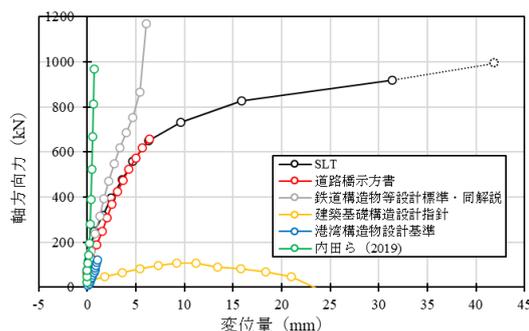


Fig.5 2 断面における荷重-変位量関係

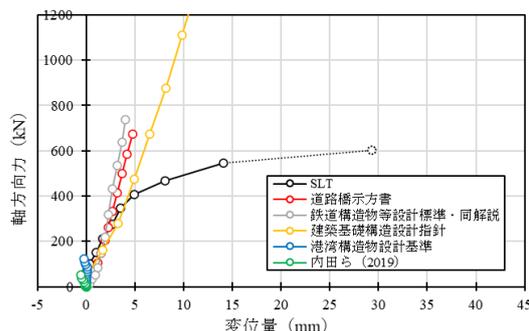


Fig.6 3 断面（先端部）における荷重-変位量関係

参考文献

- 1) 亀井ほか：鋼管杭を対象とした急速荷重試験と静的荷重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.
- 2) 内田明彦、時松孝次、辻本勝彦：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、pp.119-122、2019.2