

薄層支持地盤における鋼管杭の鉛直載荷試験の再現解析

(株)地域地盤環境研究所 正会員○稲垣 祐輔, 山内 雅基  
 阪神高速道路(株) 正会員 篠原 聖二, 服部 駿佑, 藤井 遥

1. はじめに

海上橋梁基礎の設計において支持層は砂礫層に富み、かつ粘土を挟在する洪積砂泥互層が分布し、薄層支持状態となる場合がある<sup>1)</sup>。このような複雑な互層状態となる地盤の支持力は適切に評価する必要があることから、鋼管杭の支持力評価を目的に実施した大口径(1,500 mm)鋼管杭の鉛直載荷試験(押し込み試験)<sup>1)</sup>を実施した。本稿では、その鉛直載荷試験に関する再現解析をおこなったので、その結果について報告する。

2. 当該現場の地盤条件

本検討箇所の地質は、海底面から海成粘土層(Ma13層, N値=0程度)、沖積砂礫層(平均N値=22)および洪積砂礫層(N値=20~100)と洪積粘土層(N値=10~30)の互層の地層構成を呈している。Ma13層では、細粒分が大半を占めるおおむね均一な粒度分布であるが、鋼管杭下端が位置する洪積層では砂分が多い(砂分約90%)深度とシルト・粘土分が多い(細粒分約77%)深度などがあり、均一な砂礫層ではなく、0.5~1.0mの不連続な弱層(粘性土層)が挟在していることが特徴的である。

3. 再現解析の条件

本検討では、1/4円モデルの3次元弾塑性FEM解析(解析ソフト: PLAXIS, Bentley製)を実施し、鉛直載荷試験(押し込み試験)は短期的な挙動であると仮定して全応力解析により検討した。FEM解析モデルを図-1に示す。地盤をソリッド要素、鋼管杭をシェル要素で設定し、地盤と鋼管杭の間には摩擦を考慮したジョイント要素(図-2)を、杭先端付近には薄層支持状態(薄い粘性土)をモデル化した。地盤材料パラメータ一覧を表-1に、鋼管杭の諸元を表-2に示す。解析領域は、荷重の影響が無視できる領域まで広げることが念頭に、鉛直方向には鋼管杭下端から10D(D:鋼管杭径(=1.5m))、水平方向には鋼管杭中心から10Dをモデル化した<sup>2)</sup>。境界条件は、モデル側面で鉛直ローラー、モデル下端で完全固定とした。

地盤は、一般的な力学試験から推定したパラメータを用いて簡単に地盤の降伏を表現できる弾塑性モデルの1つであるMohr-Coulombモデルを採

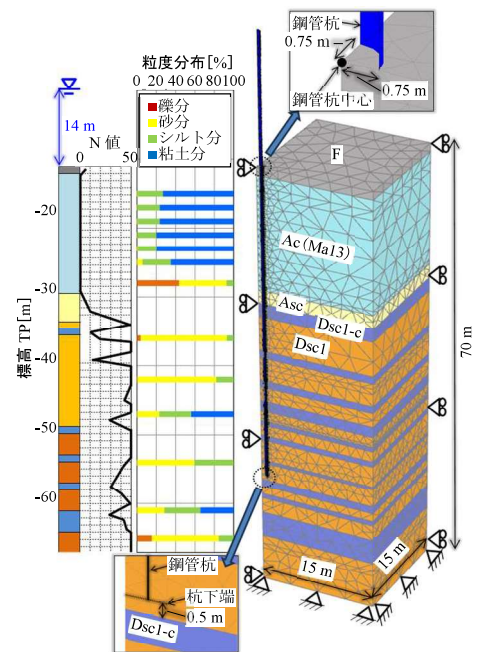


図-1 柱状図および解析モデル図

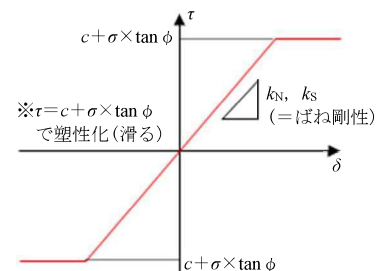


図-2 ジョイント要素のモデル概念図

表-1 地盤材料パラメータ一覧

| 土層       | 鋼管杭         | 単位体積重量<br>$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | 粘着力<br>$c$ [kN/m <sup>2</sup> ] |             | 内部摩擦角<br>$\phi$ [°] |                   | 変形係数<br>$E$ [kN/m <sup>2</sup> ] |       | ポアソン比<br>$\nu$ | 静止土圧係数<br>$K_0$ |
|----------|-------------|---|---------------------------------|-------------|---------------------|-------------------|----------------------------------|-------|----------------|-----------------|
|          |             |   | Case1                           | Case2       | Case1               | Case2             | Case1                            | Case2 |                |                 |
|          |             |   | F                               | 19.7        | 5.7                 | 23.0              | 40.1                             | 35.3  |                |                 |
| Ac(Ma13) | 14.2 ~ 15.5 | 12.5 ~ 53.6                             | 11.2 ~ 50.4                     | 0.0         |                     | 2,625 ~ 11,256    | 29,500                           | 0.45  | 0.80           |                 |
| Asc      | 19.7        | 5.7                                     | 23.0                            | 40.1        | 35.3                | 61,600            | 121,500                          | 0.35  | 0.36           |                 |
| Dsc1-c   | 19.0        | 60.0 ~ 180.0                            | 96.0 ~ 250.0                    | 0.0         |                     | 28,800 ~ 86,400   | 120,000 ~ 517,000                | 0.45  | 0.50           |                 |
| Dsc1     | 17.1 ~ 19.6 | 1.4 ~ 52.8                              | 23.0 ~ 150.0                    | 34.3 ~ 40.4 | 35.0                | 47,600 ~ 159,600  | 266,000 ~ 517,000                | 0.35  | 0.35 ~ 0.44    |                 |
| Dsc1-c   | 18.7 ~ 19.0 | 72.0 ~ 156.0                            | 290.1 ~ 326.9                   | 0.0         |                     | 34,560 ~ 74,880   | 833,500                          | 0.45  | 0.50           |                 |
| Dsc1     | 19.4 ~ 19.6 | 8.3 ~ 52.8                              | 53.5 ~ 68.0                     | 34.3 ~ 37.0 | 45.0                | 134,400 ~ 280,000 | 833,500                          | 0.35  | 0.40 ~ 0.44    |                 |

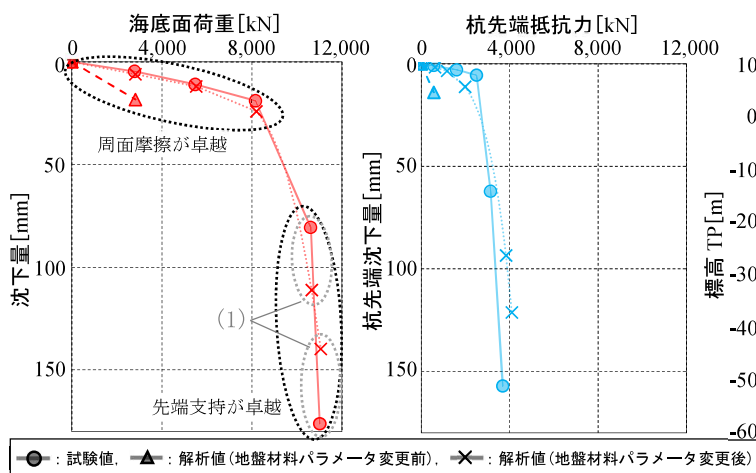
※Case1: 土質調査結果に基づいて設定した地盤材料パラメータ, Case2: 再現解析結果にもとづいた再考値

表-2 鋼管杭の諸元

| 材料   | 鋼管杭SKK490       |                                     |
|------|-----------------|-------------------------------------|
| 寸法   | 外径 $D$          | 1.5 m                               |
|      | 厚さ $h$          | 0.021 m                             |
| 材料定数 | ヤング係数 $E$       | $9.3 \times 10^8$ kN/m <sup>2</sup> |
|      | 単位体積重量 $\gamma$ | 77 kN/m <sup>3</sup>                |
|      | ポアソン比 $\nu$     | 0.3                                 |

キーワード 薄層支持, 鋼管杭, 載荷試験, 再現解析, 3次元弾塑性有限要素法

連絡先 〒540-0008 大阪府中央区大手前2丁目1番2号 (株)地域地盤環境研究所 TEL06-6943-9706



(a) 周面摩擦+先端支持

(b) 先端支持

図-3 鋼管杭の鉛直変位～荷重関係

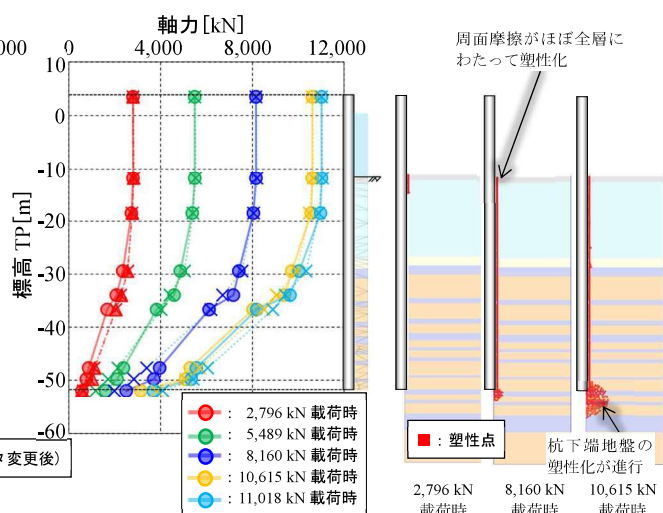


図-4 鋼管杭の軸力分布

図-5 塑性分布

用した。地盤材料パラメータは、単位体積重量 $\gamma$ では湿潤密度試験、粘着力 $c$ および内部摩擦角 $\phi$ では三軸圧縮試験などの試験結果を採用することを基本とし、試験結果がない層はN値より推定した。また、変形係数およびジョイント要素のばね係数は、砂層でN値、粘土層で粘着力 $c$ より推定した。

#### 4. 再現解析結果

鉛直荷重試験結果と再現解析結果の比較に関して、鋼管杭の鉛直変位～荷重関係を図-3に、鋼管杭の軸力分布を図-4に示す。土質試験結果に基づいて設定した地盤材料パラメータを用いた解析値(Case1)は、荷重荷初期段階から試験値より大きな変位を示し、解が発散する結果となった(図-3の△)。これは、本検討に用いた地盤材料パラメータのうち地盤強度や地盤剛性が実地盤より軟質な設定となっていたためと考えられる。そこで、地盤材料パラメータを再考して再検討した。具体的には、地盤剛性はPS検層結果、地盤強度は粘着力 $c$ および内部摩擦角 $\phi$ に関するパラメトリックスタディにより設定した(Case2)。その結果、地盤強度および地盤剛性を大きくすることで、鉛直荷重試験(押し込み試験)結果をおおむね再現できた(図-3の×)。杭周辺地盤の塑性分布図を図-5に示すが、8,160 kN 荷重時には杭の周面摩擦がほぼ全層にわたって塑性化していることから、荷重荷初期段階では周面摩擦力が大きく寄与していると考えられる。さらに、荷重荷重が大きくなると杭下端地盤の塑性化が進行していることから、荷重負担は先端支持に移行していると考えられ、図-3に示す鉛直変位～荷重関係と整合が取れた。

土質試験結果から設定した地盤材料パラメータ(Case1)と鉛直荷重試験を再現できた地盤材料パラメータ(Case2)で乖離があった要因として、杭貫入時の地盤押し広げにより杭周辺地盤では密度が増加して強度増加している可能性が考えられる(図-6)。つまり、室内土質試験を実施した杭貫入前の乱れの少ないサンプリング試料と、杭貫入後に地盤を押し広げた状況では異なるシチュエーションにあったためと考えられる。なお、10,615~11,018 kN 荷重時で解析値と試験値で若干の乖離があった(図-3の(1))。さらに緻密に試験値を表現するためには、ひずみ軟化を表現できる地盤構成モデルが必要と考えられる。

#### 5. まとめ

本稿では、大口徑鋼管杭の鉛直荷重試験(押し込み試験)を対象に、3次元弾塑性 FEM 解析により再現解析を実施した。試験結果との比較から、地盤強度および地盤剛性を土質試験結果より設定した地盤材料パラメータより大きくすることで変位～荷重関係および軸力分布ともにおおむね再現できることを確認した。今後、本稿で構築した再現解析モデルを用いて、薄層支持状態となっている鋼管杭の支持力評価を実施する予定である。

#### 参考文献

- 1)服部ら：鉛直荷重試験をふまえた大口徑鋼管杭の支持力評価方法，第78回年次学術講演会，III-262，2023。2)大志万ら：薄層支持杭の支持力特性に関する研究，阪神高速道路(株)「技報」第10号，1991。