

# 累積損傷度理論を適用した模型杭の鉛直繰返し载荷実験のシミュレーション

杭基礎 繰返し荷重 累積沈下量

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○阿部 慶太 国際会員 神田 政幸  
(株)複合技術研究所 国際会員 堀井 克己 木口 峰夫

## 1. はじめに

従来、構造物の施工時、供用時および地震時などの災害時の変形量および損傷量を累積的に取り扱った事例は少ない。特に構造物の変形および損傷に影響を与える杭の累積沈下量を適切に評価することが重要になる。しかしながら、実構造物の計測事例が少ない上、現設計の沈下量算定法は、静的鉛直载荷実験による鉛直荷重と沈下量の関係に基づいており、構造物構築後の季節的な微小な繰返し载荷や荷重レベルは小さいが何百万回に及ぶ列車通過時の動的な繰返し载荷、あるいは繰返し回数は少ないものの荷重レベルが大きい地震時の動的な繰返し荷重など、荷重レベル、繰返し回数が杭の累積沈下量に与える影響については明確になっていない。そこで本研究では、杭模型に動的な鉛直繰返し荷重を作用させた载荷実験<sup>1), 2)</sup>に対して、土構造物<sup>3)</sup>、バラスト<sup>4)</sup>の沈下量予測に実績を有する、累積損傷度理論と FEM 解析のハイブリッド手法による杭模型の累積沈下量の予測手法について検証を実施した。

## 2. 乾燥砂地盤中の杭模型の動的鉛直繰返し载荷実験

図-1 に動的鉛直繰返し载荷実験の概要を示す。乾燥した珪砂を敷き詰めた 2.0m × 2.0m、深さ 3.0m の矩形の土槽に、先端支持杭および摩擦杭となる模型鋼管杭 (STK490, 外径φ216mm, 肉厚 4.5mm, 長さ 2.25m, 根入れ 2.0m) を設置し、杭頭に静的载荷後、動的鉛直繰返し荷重を付与した。摩擦杭では相対密度 Dr90% の一様地盤内に乾燥珪砂を杭周面に付着させた模型鋼管杭を、一方、先端支持杭では杭先端支持地盤を Dr90%、杭周面を Dr60% とした地盤内に杭周面処置を施さない模型鋼管杭を設置した。図-2 に静的荷重と動的鉛直繰返し荷重の载荷パターンの一列を、図-3 に先端支持杭および摩擦杭に対する静的単調载荷時と静的・動的繰返し载荷時の鉛直荷重と沈下量の関係を示す。なお、図中の赤で示された曲線は各静的・動的繰返し载荷終了時の累積沈下量を包絡したものである。静的単調载荷時に比べ、静的・動的繰返し载荷時には沈下量が大きくなる事が分かる。

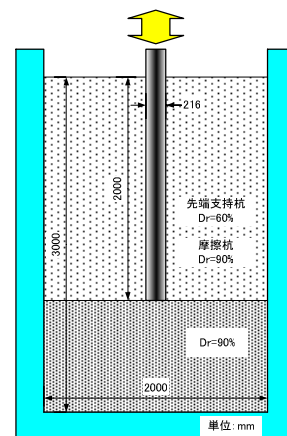


図-1 载荷実験の概要<sup>1), 2)</sup>

## 3. 累積損傷度理論と FEM を組み合わせた解析手法

図-4 に本研究での解析手法の概要を示す。基本的な流れは文献<sup>3)</sup>の方法と同様であるが、弾性 FEM 解析に用いる静的解析パラメータは静的载荷実験結果を良好に再現できた弾塑性 FEM 解析の結果による点が異なる。本研究では、引張り強度がゼロの弾完全塑性 Drucker-Prager モデルを用い、ジョイント要素はバイリニア型モデルとした。ここで、累積損傷度理論での载荷回数  $N$  の累積ひずみ  $\varepsilon_1^p$  の算定式は、

$$\varepsilon_1^p = (SR_d/a_1)^{1/a_2} N^m \quad (1)$$

ここで、 $SR_d$ : 動的せん断応力比、 $a_1, a_2, m$ : 累積沈下特性パラメータと表される。なお、 $a_1$  は最大動的せん断応力比により決定するパラメータであり、 $a_2, m$  は乾燥珪砂の三軸圧縮繰返し実験を行い決定した。

表-1, 表-2 に各パラメータを示す。

以下に、解析手法の流れを示す。

- ① 弾塑性 FEM 解析により静的载荷実験のシミュレーションを行い、良好に実験結果を再現できる静的解析パラメータを求める。
- ② 上記の解析パラメータのうち、ヤング係数、ポアソン比、単位体積重量を用いて、自重、初期鉛直荷重 (今回は 50kN または 80kN) により弾性 FEM 解析を行う。
- ③ 上記の静的解析パラメータのうち、ヤング係数、ポアソン比および

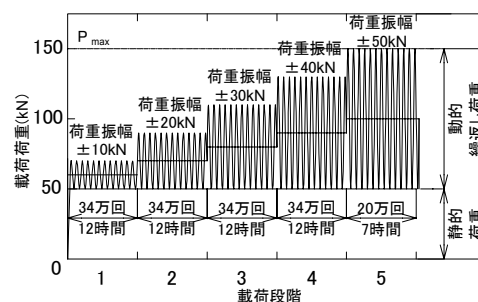


図-2 载荷パターン (先端支持杭)<sup>1)</sup>

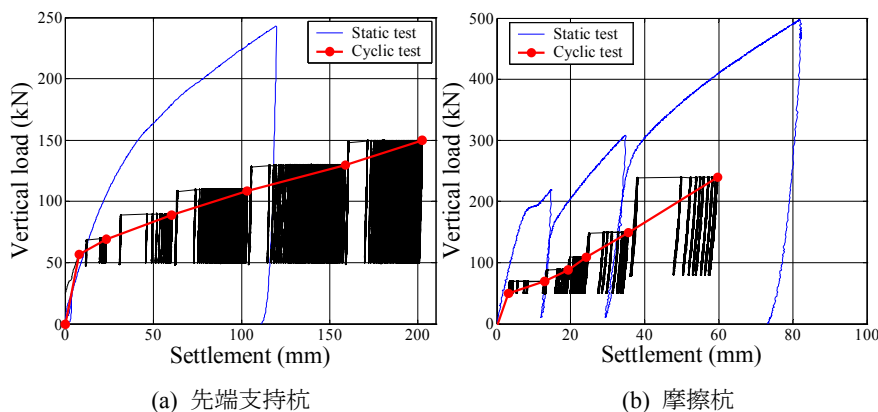


図-3 鉛直荷重と沈下量の関係<sup>1), 2)</sup>

び単位体積重量を用いて、自重、各载荷段階での静的荷重+動的繰返し荷重（例えば、図-2の例の载荷パターンでは1载荷段階では50+20kN、2载荷段階では50+40kNとなる）による弾性FEM解析を行う。

- ④ ②、③から得た各要素の応力を用いて累積損傷度理論により、繰返し载荷後の累積ひずみで軟化したヤング係数、せん断剛性係数を求める。この際、繰返し载荷回数（34万回、20万回）、①の静的解析パラメータを用いる。
- ⑤ ④から得た各地盤要素の軟化剛性を用いて、自重および各载荷段階での初期鉛直荷重による弾性FEM解析を行い、各载荷段階での沈下量を求める。
- ⑥ ⑤から得た沈下量を载荷履歴に応じて足し合わせ、最終沈下量を求める。

#### 4. 解析結果と実験結果の比較

実験結果および解析結果から得られた鉛直繰返し荷重と累積沈下量の関係を図-5に示す。同図には静的载荷時の鉛直荷重と沈下量の関係も示した。先端支持杭については、実験結果を概ね良好に再現できている。一方、摩擦杭では、実験結果を良好に再現できていない。この原因として、摩擦杭で主となる杭周面の地盤抵抗に対して累積沈下特性パラメータが適切に表現できていないことが考えられる。しかしながら、鉛直繰返し荷重と累積沈下量の関係が下に凸な形状をしており、実験結果の定性的な特徴は表現できている。なお、別途実施した1载荷目で荷重振幅を±30kNまたは±20kNとした、初期の荷重振幅が大きい载荷パターンの場合では、沈下量の実験値に対して過小に評価する結果が得られている。

#### 5. まとめ

累積損傷度理論とFEM解析のハイブリッド手法が、とりわけ先端支持杭に対して、その累積沈下量評価に有効であることが分かった。静的载荷試験

結果の挙動を再現可能な弾塑性FEM解析の解析パラメータを用いて、適切な累積沈下特性パラメータを設定し、累積損傷度理論を適用することで、実杭の繰返し载荷時の累積沈下量を予測できる可能性を示唆する結果と考えられる。なお、初期の荷重振幅が大きい载荷パターンの場合では、別途検討が必要であることも明らかになった。原因として、繰返し载荷時に刻々と

変化する杭の現有支持力に対する応力レベルの大きさが影響していると考えられ、このような支持力近傍の繰返し载荷に対する累積損傷度理論の適用性も含め、別途検討が必要であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 千葉佳敬, 神田政幸: 砂地盤中の杭の動的鉛直繰返し载荷実験, 第41回地盤工学研究発表会, pp.1559-1560, 2006.7.
- 2) 鈴木聡, 太田剛明, 神田政幸, 西岡英俊, 千葉佳敬: 砂地盤中の基礎の鉛直繰返し载荷実験, 第42回地盤工学研究発表会, pp.1339-1400, 2007.7.
- 3) 館山勝, 篠田昌弘, 堀井克己, 小島謙一: 列車の繰返し载荷による盛土の残留沈下量の算定方法, 鉄道総研報告, Vo.20, No.12, pp.43-48, 2006.12.
- 4) 石川達也, 細田充, 関根悦夫, 三浦清一: 移動荷重作用下の粒状構造物の変形挙動解析法の検討, 第41回地盤工学研究発表会, pp.1071-1072, 2006.7.

表-1 静的解析パラメータ

|                            | 杭体                           | 地盤                  |                     |                     |
|----------------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                            |                              | 先端支持杭               |                     | 摩擦杭                 |
|                            |                              | Dr60%               | Dr90%               | Dr90%               |
| ヤング率(kN/m <sup>2</sup> )   | 2.0×10 <sup>8</sup>          | 2.5×10 <sup>4</sup> | 5.0×10 <sup>4</sup> | 1.0×10 <sup>5</sup> |
| せん断剛性(kN/m <sup>2</sup> )  | 7.7×10 <sup>7</sup>          | 9.6×10 <sup>3</sup> | 1.9×10 <sup>4</sup> | 3.8×10 <sup>4</sup> |
| ポアソン比                      | 0.3                          | 0.3                 | 0.3                 | 0.3                 |
| 単位体積重量(kN/m <sup>3</sup> ) | 78.5                         | 16.0                | 16.0                | 16.0                |
| 粘着力(kN/m <sup>2</sup> )    | —                            | 0.0                 | 0.0                 | 0.0                 |
| 内部摩擦角φ(deg)                | —                            | 15.0                | 20.0                | 20.0                |
| 杭周面ジョイント要素                 | 周面のせん断剛性(kN/m <sup>2</sup> ) | —                   | 10.0                | 10.0                |
|                            | 周面の摩擦角ψ(deg)                 | —                   | 5.0                 | 20.0                |

表-2 累積沈下特性パラメータ<sup>3)</sup>

|            | 土質区分 <sup>3)</sup> | a <sub>2</sub> | m    |
|------------|--------------------|----------------|------|
| 地盤 (Dr60%) | 土質② 一般の砂, 砂礫       | 0.50           | 0.30 |
| 地盤 (Dr90%) | 土質① 密な砂, 砂礫        | 0.60           | 0.13 |

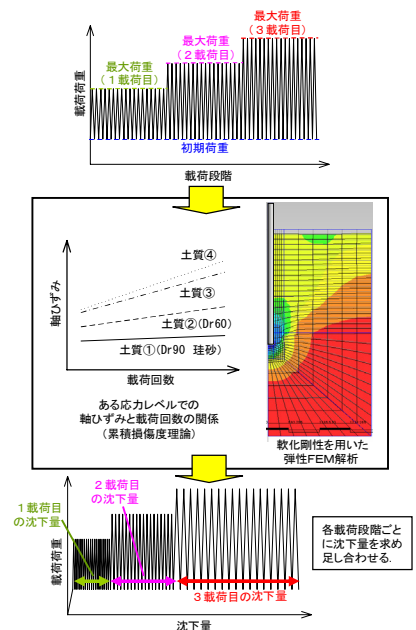


図-4 解析の概要

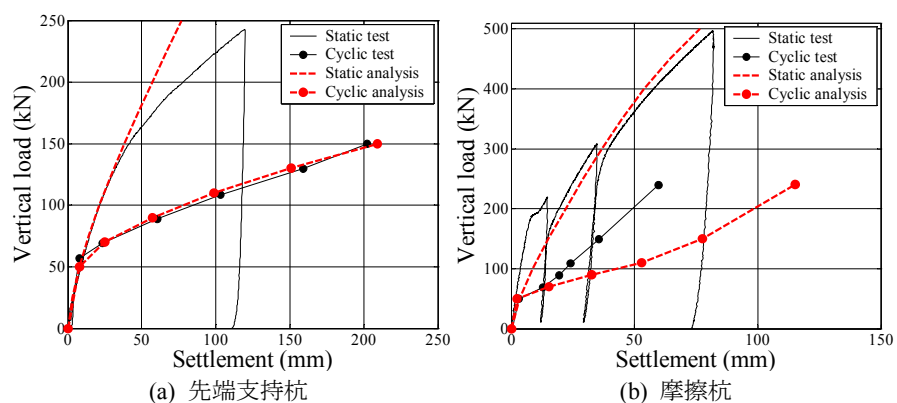


図-5 鉛直荷重と沈下量の関係の解析結果

#### 参考文献

- 1) 千葉佳敬, 神田政幸: 砂地盤中の杭の動的鉛直繰返し载荷実験, 第41回地盤工学研究発表会, pp.1559-1560, 2006.7.
- 2) 鈴木聡, 太田剛明, 神田政幸, 西岡英俊, 千葉佳敬: 砂地盤中の基礎の鉛直繰返し载荷実験, 第42回地盤工学研究発表会, pp.1339-1400, 2007.7.
- 3) 館山勝, 篠田昌弘, 堀井克己, 小島謙一: 列車の繰返し载荷による盛土の残留沈下量の算定方法, 鉄道総研報告, Vo.20, No.12, pp.43-48, 2006.12.
- 4) 石川達也, 細田充, 関根悦夫, 三浦清一: 移動荷重作用下の粒状構造物の変形挙動解析法の検討, 第41回地盤工学研究発表会, pp.1071-1072, 2006.7.