

地盤変位作用を受ける杭基礎の変形挙動を捉える実験技術

構造物技術研究部 基礎・土構造研究室

主任研究員 西岡 英俊

1. はじめに

地震時の杭基礎の設計においては、上部構造物の慣性力の影響のみならず、周囲の地盤がせん断変形することで杭が強制的に変形させられる影響を考慮する必要がある。平成24年に改訂された「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」(以下、耐震標準)においては、この影響を「地盤変位作用」と呼び、耐震設計上で考慮すべき主な地震作用の一つとして位置づけられている。一般的には地盤の水平変位を地盤ばねを介して杭体に作用させる「応答変位法」によって設計がなされる場合が多い。この応答変位法による杭の応答値算定精度を向上させるためには、実際に杭基礎に地盤変位を作用させる模型実験による検証が重要となる。

鉄道総研が保有する「基礎の動・静的载荷実験装置」は、せん断土槽を水平ジャッキで強制的にせん断変形を生じさせることにより、地震時の地盤変位作用を再現させることができる。この土槽内に模型杭を設置して地盤変位を作用させれば、応答変位法で想定している条件をそのまま模擬することが可能であり、実験結果と応答変位法による逆解析結果を比較することで、解析手法の妥当性を検証することができる。

本発表では、鋼管杭に対して地盤変位および慣性力をそれぞれ载荷させて杭体の変形挙動を評価する実験技術について紹介し、地盤変位载荷時と慣性力载荷時での地盤反力係数の違いを明らかとした研究事例を紹介する。

2. 基礎の動・静的载荷実験装置の概要

基礎の動・静的载荷実験装置(図1)は、深さ約3mのせん断土槽(せん断棒部分は土槽天端から深さ2.4mまで)に対して、3本の水平ジャッキ(図1中の水平ジャッキD~F)が取り付けられ、強制的にせん断土槽をせん断変形させることにより、その内部の模型地盤に対して地震時のような水平地盤変位を生じさせることができる。

また、上部構造物に対しては鉛直1本、水平2本のジャッキが取り付けられるようになっており、これらが死荷重および地震時の慣性力による鉛直荷重、水平荷重およびモーメントの組み合わせ载荷ができるようになっている。

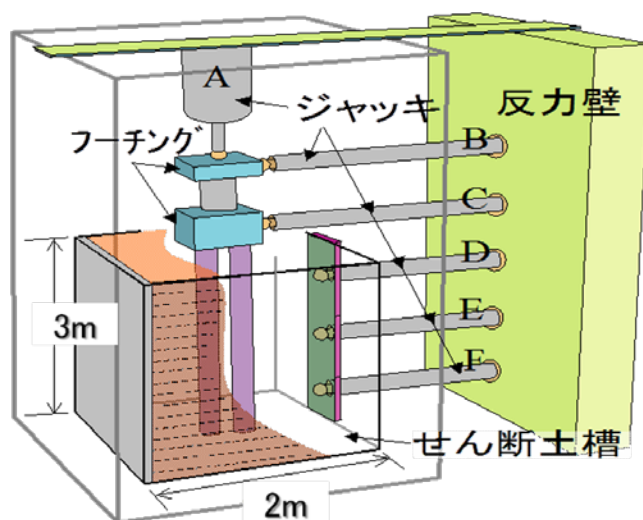


図1 基礎の動・静的载荷実験装置

このように、地震時の地盤変位と慣性力の両者を同時に作用できることが本実験装置の大きな

特徴であり、深さ 3m 規模の比較的大きな土槽としては国内外に例のないユニークな実験装置である。

3. 模型実験の概要¹⁾

実験は、模型地盤内に鋼管製の模型杭を1本設置し、载荷条件の異なる2ケースを実施した。なお、模型地盤はケース変更時に再構築した。

模型地盤は、乾燥珪砂6号を用い、支持層はバイブレーター転圧によって相対密度 $D_r=90\%$ 、表層は空中落下法によって相対密度 $D_r=60\%$ となるように作成した。模型杭は、実杭の約 1/5 モデルの単杭模型として、材質 STK400 の鋼管（外径 $D=216.3\text{mm}$ ）を用いた。なお、本実験では主に地盤ばねの影響を検討することを目的として、杭体は線形範囲内となるように肉厚を 4.5mm に設定した。模型地盤および模型杭配置の概要を図2に示す。

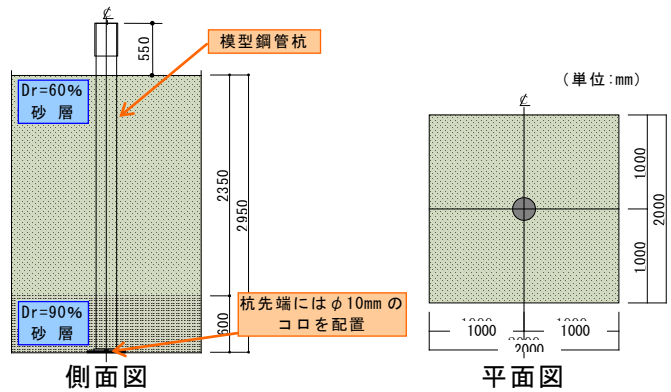


図2 模型地盤および模型杭配置の概要

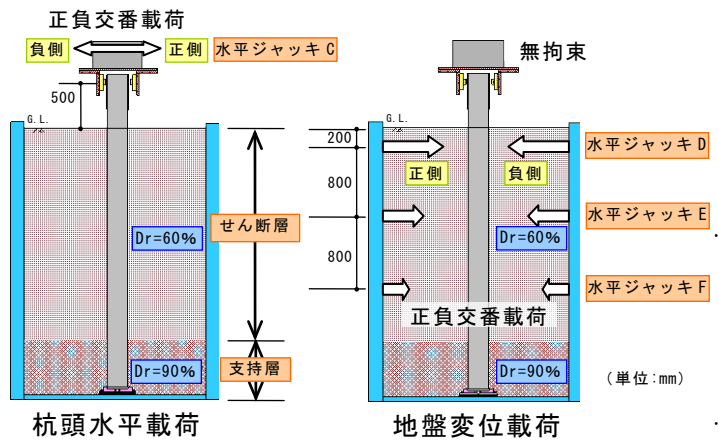


図3 载荷方法の概要

ここで杭の模型実験の相似則として重要となるのは、杭と地盤との相対的な剛性比を表す指標である杭の特性値 β と杭の根入れ長 L の積 βL である。本実験でこの βL を求めると概ね 2.0 程度となり、設計実務上では「特に短い杭」として杭先端の回転・せん断抵抗が無視できない条件に相当する。そこで、鋼管下端は、 $\phi 10\text{mm}$ のコロを介して土槽底部に設置することで、杭先端の回転・せん断抵抗の影響を除去することとした。

载荷方法は、大きく慣性力の影響を模擬した杭頭水平载荷と地盤変位作用を模擬した地盤変位载荷とし、CASE1 は杭頭水平载荷のみを、CASE2 は地盤変位载荷後に杭頭水平载荷を行った。载荷方法の概要を図3に示す。

杭頭水平载荷は、図1中の水平ジャッキCを用いて杭頭部に強制変位を静的に与えた。载荷変位量は正負交番で振幅を漸増させ、杭径の 20% を超えるまで载荷した。一方、地盤変位载荷は、せん断土槽に設置された3本の水平ジャッキ（図1中のD~F）を用いて、せん断土槽に静的にせん断変形を生じさせ、模型地盤に水平変位を与えた。せん断変形量も正負交番で振幅を漸増させ、上段のジャッキ位置での変位で最大 200mm まで载荷を行った。なお、実際にはせん断土槽の強制的なせん断変形量に地盤が完全に追随することはでき

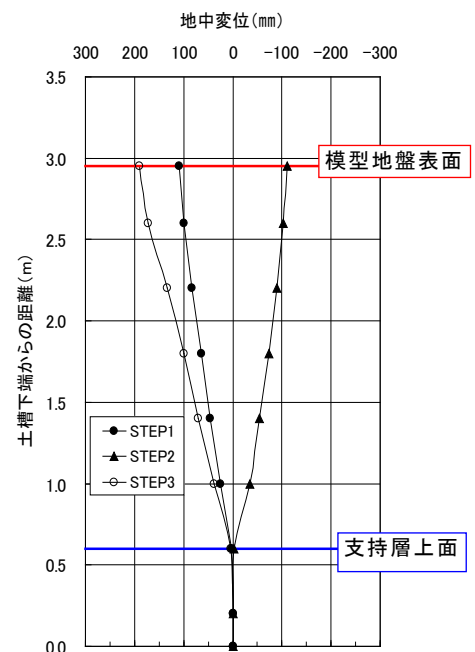


図4 地盤変位载荷時の地中変位分布

ないため、模型地盤の中央部付近に傾斜計を深さ方向に複数配置して、実際の地中の地盤変位を求めた。実測された地盤変位分布を図4に示す。支持層上面からほぼ三角形の地盤変位分布となっており、最大8%程度のせん断ひずみを生じさせることができた。

4. 実験結果と逆解析結果²⁾

4.1 杭頭水平載荷

杭頭水平載荷時の荷重変位関係を図5に示す。また、杭頭変位10mm時および40mm時での杭体の曲げモーメント分布を図6に示す。各ケースで荷重変位関係や曲げモーメント分布には大きな差はなく、杭体が線形範囲内であれば地盤抵抗特性に及ぼす影響は些少であると考えられる。

実験結果に対する逆解析は、一般的な耐震設計で用いられるバイリニア型の地盤ばねを用いた静的非線形解析により行った。解析モデルの概要を図7に示す。地盤ばねの初期剛性となる水平地盤反力係数 k_h は、別途実施した直径300mmの深度別の水平平板載荷試験⁴⁾での実測値 k_{h30} (図8)に基づき、載荷幅の補正も考慮して深度 z (m) に応じて以下のように設定した。

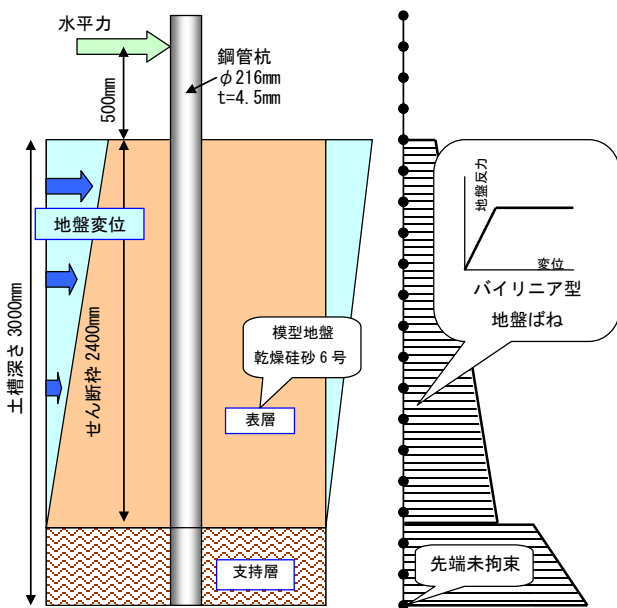


図7 解析モデルの概要

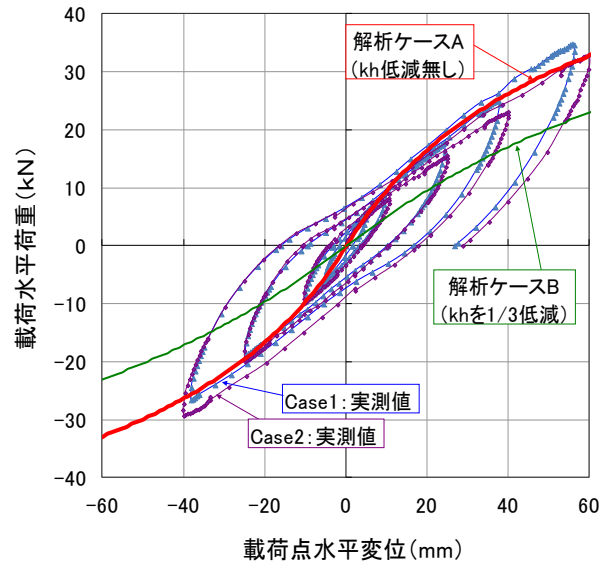
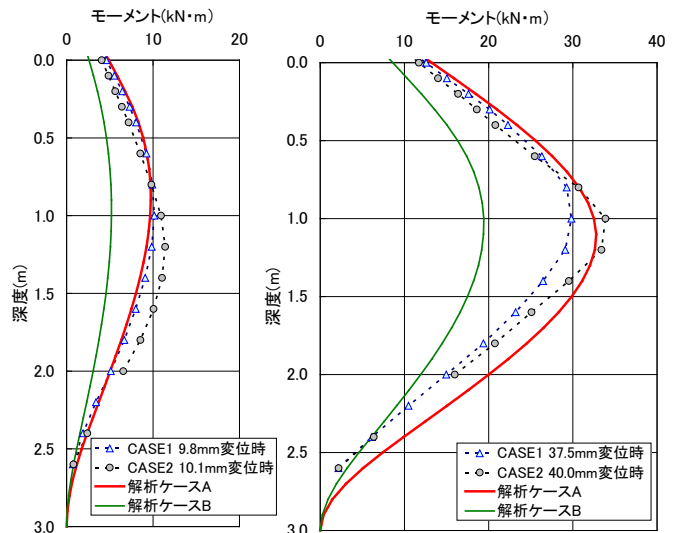


図5 杭頭水平載荷時の荷重と変位の関係



(a) 載荷点変位10mm時 (b) 載荷点変位40mm時

図6 杭頭水平載荷時の曲げモーメント分布

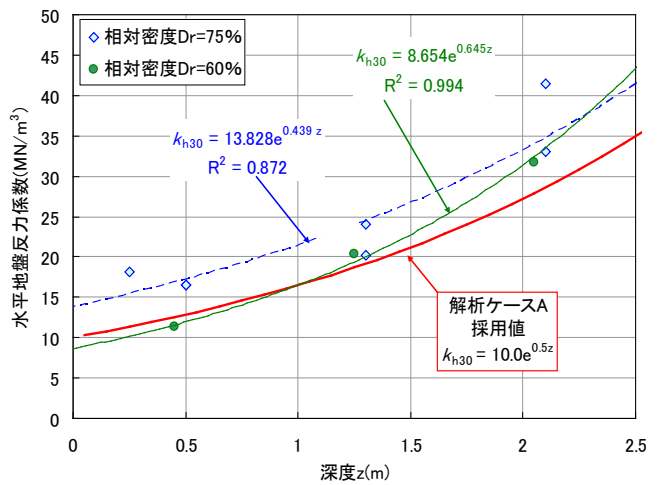


図8 水平地盤反力係数 k_{h30} の深度分布

$$k_{h30} = 10.0 \times e^{0.5z} \text{ (MN/m}^3\text{)} \quad (1)$$

$$k_h = (D/0.3)^{-1/2} \times k_{h30} = 1.18 k_{h30} \text{ (MN/m}^3\text{)} \quad (2)$$

水平地盤反力係数に着目する本検討では、上述の地盤ばねを用いる基本ケースを解析ケース A とし、パラメータスタディの一つとして地盤反力係数を 1/3 に低減させた場合を解析ケース B として、両者で模型実験のシミュレーションを行い、その結果を比較した。この解析ケース B は、載荷面積が広がって寸法効果（載荷幅依存性）により、見かけ上の地盤反力係数が低下した状態を模擬したものである。

解析結果は図 5 および図 6 中に実験結果とともに示している。解析ケース A が杭頭での荷重～変位関係、曲げモーメント分布ともに実験結果をよく表現できていることがわかる。一方、地盤反力係数を 1/3 に低減した解析ケース B は、荷重～変位関係では同一荷重に対して変形を過大評価しており安全側の評価となっているが、杭体の曲げモーメントは過小評価で危険側の評価となっている。

4.2 地盤変位載荷

CASE2 の地盤変位載荷時の杭体の曲げモーメント分布を図 9 に示す。地盤変位分布が急変する支持層上面付近に大きな曲げモーメントが生じていることがわかる。

図 9 中には、4.1 に示した静的非線形解析モデルに応答変位法を適用して求めた断面力分布も併記している。地盤変位載荷の場合は杭頭変位載荷の場合とは逆に、解析ケース B が実験結果を精度よく再現でき、解析ケース A が過大評価で安全側の評価となった。このことは現在応答変位法で用いられている地盤ばねの評価を高精度化することによって、杭体設計を合理化できる可能性を示唆するものである。

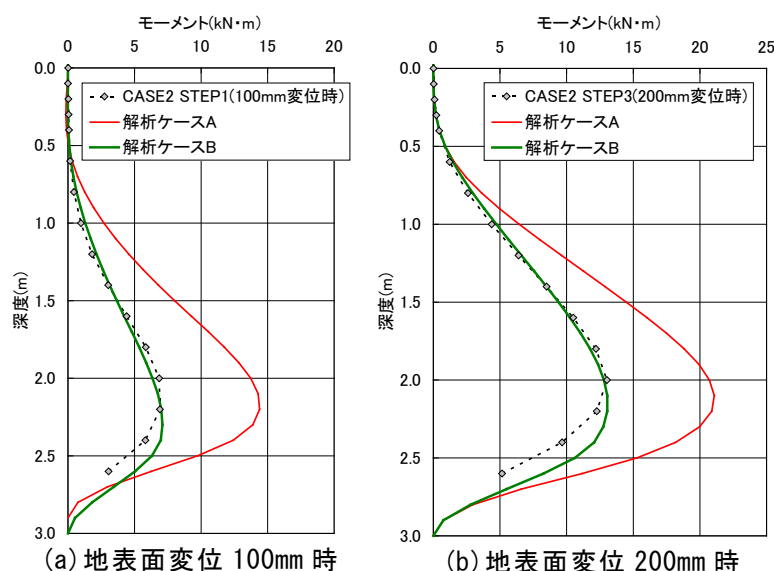


図 9 地盤変位載荷時の曲げモーメント分布

5. おわりに

本発表では、杭の耐震設計で近年重要視されている地盤変位作用を模擬する実験手法とその研究事例を紹介した。なお、本発表で示した模型実験^{1),2)}は、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構からの委託研究のうち、基礎的な検討として実施された内容の一部である。

【参考文献】

- 1) 清田, 米澤, 青木, 西岡, 坂本, 室野, 飯島: 模型鋼管杭を用いた静的載荷実験による水平地盤反力特性の比較, 土木学会年次学術講演会, I-232, 2009.9
- 2) 青木, 米澤, 清田, 西岡, 西村, 神田: 杭の慣性力設計と応答変位法に用いる水平地盤反力係数に関する一考察, 土木学会年次学術講演会, I-233, 2009.9
- 3) 鈴木, 太田, 神田, 西岡, 近藤: 深さの異なる水平地盤反力係数に着目した模型土槽内水平平板載荷実験, 土木学会第 64 回年次講演会, III-133, 2009.9