

論文 杭基礎橋脚を対象とした 地震時残留変位量の評価に関する検討

佐名川 太亮¹・尾崎 匠²

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: sanagawa.taisuke.39@rtri.or.jp (Corresponding Author)

²正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

E-mail: ozaki.takumi.90@rtri.or.jp

鉄道構造物の設計においては、要求性能のひとつとして復旧性が設定されており、想定される地震動に対して、短期間で機能回復できる状態に保つことが検討されている。特に基礎構造物の性能項目としては残留変位が設定されており、地盤の支持降伏や基礎部材の損傷等により過大な残留変位を生じさせないことを照査する。しかしながら、構造解析により基礎の残留変位を精度よく推定することが困難な場合が多いため、間接的に最大応答変位等を用いているのが現状である。そこで本検討では、杭基礎構造を対象に、残留変位量を精度よく算定できる構造解析モデルの構築を目的として、載荷試験の再現解析を実施した。再現解析を行ったモデルを用いて実橋脚を想定した動的解析を実施することで、損傷モードと地震時残留変位量との関係について試算を行った。

Key Words: pile foundation, residual displacement, dynamic numerical analysis

1. はじめに

鉄道構造物の設計では、一般的に要求性能のひとつとして復旧性が設定され、想定される地震動等の作用に対して短期間で機能回復できる状態にあることを照査する。鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物¹⁾(以下、基礎標準)では、復旧性における基礎構造物の性能項目として残留変位が設定されており、地盤の支持降伏や基礎部材等の損傷等により過大な残留変位を生じさせないことを照査する体系となっている。しかしながら一般的な耐震設計で用いられている構造解析モデルでは基礎の残留変位を精度よく推定することが困難なため、基礎標準においては間接的に最大応答変位等を照査指標としており、これに対応した設計限界値を経験的に設定しているのが現状である。

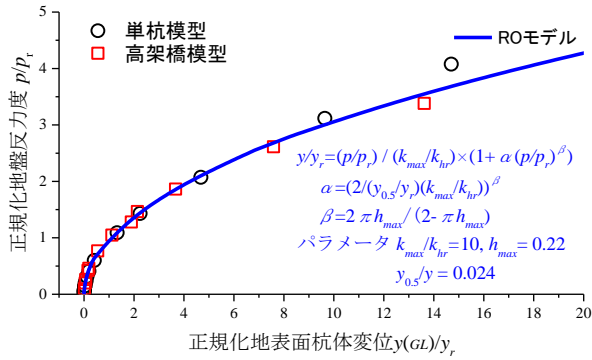
そこで本論文では、橋脚・高架橋の基礎形式として最も選定されている杭基礎を対象とし、復旧性の性能照査をより直接的に照査することができる構造解析モデルの構築を目的として、地震後の残留変位量を精度よく表現することが可能な解析モデル(特に地盤抵抗モデル)を提案するとともに、模型実験や実杭の載荷試験再現解析を実施することで提案モデルの妥当性を検証した。さらに、

杭基礎橋脚の地震時挙動を想定した動的解析を行い、最大変位量や損傷モードと地震後の残留変位量の関係について試算した。

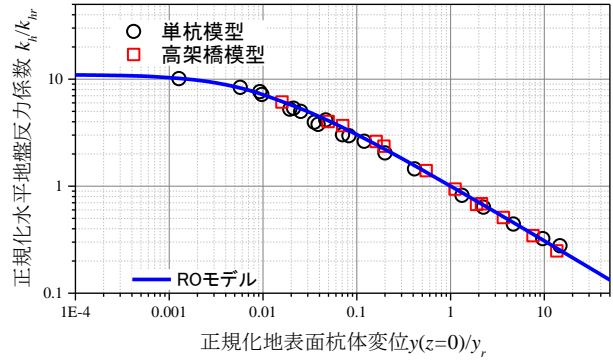
2. 提案する構造解析モデルの概要

橋脚や高架橋の実務設計においては、多質点系の梁ばねモデルでモデル化し、基礎と地盤との相互作用を不連続ばねの集合である Winkler ばねとしてモデル化する方法が一般的である。この方法は、比較的計算モデルが簡易でありパラメータが FEM と比べて比較的少ないため、得られる解に設計者間のばらつきが少ない、という利点がある。

ただし、Winkler ばねの剛性を表す地盤反力係数は、土の剛性・強度特性や地盤と基礎部材の剛性比、載荷幅などの影響が複雑に組み合わさって影響するため、その評価は非常に難しい。特に、変位量 y が大きくなるほど地盤反力係数 k が低下する「変位レベル依存性」(あるいは $k-y$ 関係の非線形特性、 $p-y$ 関係の非線形特性(p : 地盤反力度)とも表現される)が顕著に表れることが実杭の載荷試験等で確認されており、この変位レベル依存性の評価ならびにモデル化が、設計においては非



(a) $p/p_r - y/y_r$ 関係



(b) $k_h/k_{hr} - y/y_r$ 関係

図-1 模型実験から逆算された水平地盤反力係数の変位レベル依存性と RO モデルとの比較⁵⁾に加筆

常に重要となる。杭基礎は一般的に軟弱地盤上の構造物の基礎として選定される上に、杭先端を良質な支持層に支持させる完全支持杭形式が適用されることが基本であることから、水平地盤反力係数 k_h のモデル化が地震時挙動を評価する上では非常に重要となり、構造物—地盤系における相互作用問題の典型例のひとつでもある。

Sanagawa *et al.*²⁾は、起振器による共振実験と静的載荷実験を組み合わせることで、微小変位 (10^3 mm) から大变位 (数百 mm) までの広い変位レベルにわたる杭基礎の水平地盤反力係数を連続的に評価する手法を開発した。また、この手法により評価された水平地盤反力係数の変位レベル依存性を表現可能な非線形モデルとして RO モデル³⁾を選定した。ROモデルは、元来は金属材料の応力とひずみの関係として提案されたモデルであるが、土の応力—ひずみ関係を表現する際にもよく用いられている⁴⁾。RO モデルを正規化した $p - y$ 関係 ($p/p_r - y/y_r$ 関係) に適用する場合には、以下の式で表される。

$$y/y_r = \frac{p/p_r}{k_{hmax}/k_{hr}} \{1 + \alpha(p/p_r)^\beta\} \quad (1)$$

$$\alpha = \left(\frac{2}{(y_{0.5}/y_r)(k_{hmax}/k_{hr})} \right)^\beta \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\pi h_{max}}{2 - \pi h_{max}} \quad (3)$$

ここで、 y : 変位量 (m), y_r : 基準変位量 (m), p : 地盤反力度 (kN/m^2), p_r : 基準地盤反力度 ($y = y_r$ における地盤反力度) (kN/m^2), k_{hmax} : 最大水平地盤反力係数 (kN/m^3), k_{hr} : 基準水平地盤反力係数 ($y = y_r$ における水平地盤反力係数) (kN/m^3), $y_{0.5}$: $k_h/k_{hmax} = 0.5$ となる時の変位量 (m), h_{max} : 最大減衰定数である。 y_r を杭径の 1% とすることで、砂地盤における模型杭を対象とした場合には杭径によらず同一のパラメータで $p/p_r - y/y_r$ の非線形特性を表現できることが示されている⁵⁾ (図-1)。

この RO モデルを多質点系モデルに反映させることで、載荷試験で計測された杭の水平抵抗特性 (水平荷重～水

平変位関係等) を精度よく再現できることが明らかになっている⁵⁾。また、この水平地盤反力係数のモデルおよびパラメータ設定の考え方を適用することで、様々な構造形式における模型杭基礎構造の地震時の動的応答を精度よく再現することが示されている^{例えば6)}。一方で、残留変位量の再現性については検証されていなかった。そこで以降では模型実験を対象に再現解析を実施し、RO モデルによる杭基礎の残留変位量の評価精度を検証した。

3. 提案モデルによる残留水平変位量照査

杭基礎構造物の水平抵抗特性は杭の水平地盤抵抗のほか、杭部材の剛性が影響する。また、作用の特性によっても地盤抵抗特性が変化することから、本章では、模型杭の材料や載荷条件等を変化させた模型実験を対象に実施した再現解析の結果を示す。なお、本章に示す模型実験はすべて杭先端を固定条件としているため、鉛直地盤抵抗の影響が些細であることを別途確認しており、すべて線形ばねとしてモデル化している。

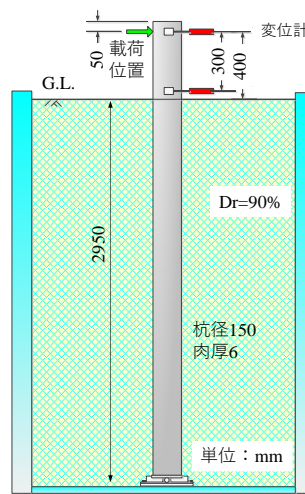


図-2 鋼管杭模型の静的載荷実験の概要⁵⁾

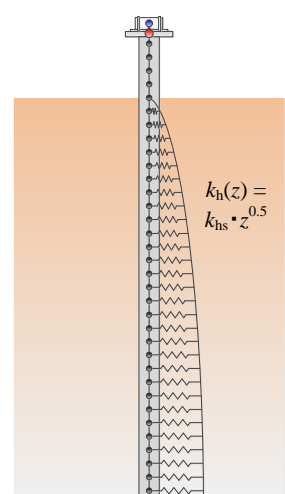


図-3 構造解析モデル⁵⁾

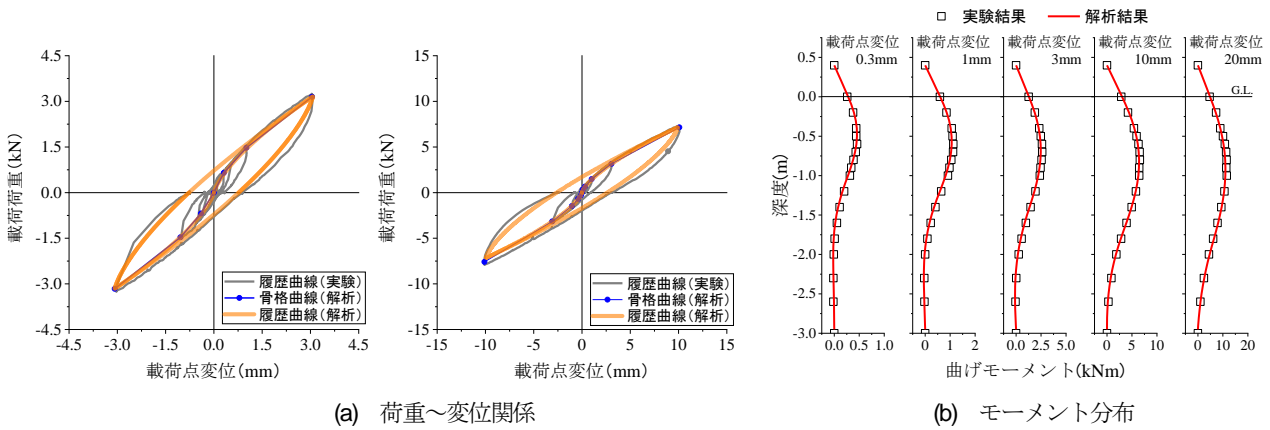


図-4 鋼管杭模型の静的水平荷重実験の再現解析結果

(1) 鋼管杭模型の静的水平荷重実験

はじめに、杭周辺地盤の塑性化によって生じる残留変位の再現性について検証するため、実物の 1/10 スケールの鋼管杭模型を対象に実施した静的水平荷重実験⁹⁾の再現解析を行った。模型実験としては、気乾砂（東北珪砂 6号，相対密度 $D_r=90\%$ ）の地盤の中に設置した外径 150 mm，肉厚 6mm の鋼管杭模型（単杭）を対象に，静的繰返し水平交番荷重を実施している（図-2）。

再現解析に用いた解析モデル⁹⁾について概説する。単杭であるため，一本棒の梁要素に水平相互作用ばねを設置し，相互作用ばねの地盤反力係数に拘束圧依存性と変位レベル依存性を適用した。基準水平地盤反力係数 k_{hr} （杭径の 1% 変位時の水平地盤反力係数）は実験結果から直接的に設定しているが，拘束圧依存性として基準水平地盤反力係数 k_{hr} を深さの 0.5 乗に比例するように設定し（図-3），非線形特性として図-1 に示す RO モデルを適用した。なお，杭先端を鉛直方向に固定した単杭の水平荷重試験を対象としているため，鉛直方向の相互作用ばねはモデル化せず，模型実験の条件と合わせて杭先端を固定条件としている。この解析モデルの杭頭部に水平交番の強制変位を作用させた。

解析で得られた荷重点における荷重～変位関係を図-4 (a) に示す。ここでは杭径の 2% に相当する荷重点変位量 3mm の場合と，杭径の 6.7% に相当する 10mm の時の再現解析結果を示しているが，実験で計測された履歴曲線を概ね再現できており，また荷重がゼロとなる残留変位時についてもその水平変位量を精度よく表現することができていることが確認された。また各荷重点変位時における曲げモーメント分布の比較結果を図-4 (b) に示すが，全深度において杭体に発生している断面力を精度よく再現することができている。

以上より，杭の水平地盤反力係数の非線形特性および履歴特性に RO モデルを適用することで，杭周辺地盤の塑性化による残留変位の発生状況を，幅広い変位レベル

で再現できることが示された。

(2) RC 組杭模型の静的水平荷重実験

次に，杭体損傷時における杭基礎の残留変位の再現性を確認するため，組杭形式の模型 RC 杭を用いた静的水平交番荷重試験⁹⁾の再現解析を実施した。

模型実験と構造解析モデルの概要を図-6 に示す。模型実験に用いた RC 杭模型は外径 146mm の鉄筋モルタル杭であり，配筋には異形鉄筋 D4 (SD295) を，モルタル材には圧縮強度 50.0 N/mm² 程度の無収縮モルタルを使用した。なお，荷重による損傷を誘発するため，杭頭部の軸方向鉄筋を小径配置とした。杭頭部および杭地中部の配筋状況を図-5 に示す。この杭を 400 mm 間隔で気乾砂地盤（東北珪砂 6号）の中に設置し，剛体とみなせる鋼製のフーチングで連結することで組み杭の形式とした。荷重点はフーチング天端から 110 mm の高さとし，荷重方式は正負 3 回の正負繰返し交番荷重とした。

解析モデルにおける相互作用ばねのモデル化については鋼管杭模型実験の再現解析で設定したものと基本的には同じであるが，単杭の荷重試験から設定した基準水平地盤反力 k_{hr} に群杭効果⁹⁾を追加で考慮した。RC 杭の曲げ変形特性として M-φ モデルを設定し，骨格曲線として鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造¹⁰⁾を参考に C 点（ひび割れ点），Y 点（軸方向鉄筋の降伏点），Y_b 点（C 点から Y 点を結ぶ直線を最大曲げモーメントまで延長した点），M 点（最大耐力を維持できる最大変形点），N 点（最大耐力後の耐力降下域で降伏耐力を維持できる最大変形点）を通るテトラリアモデルとし，別途実施した異なる軸力下での部材単体の曲げ試験結果を基に，杭体軸力に応じて M-φ 関係が変化するモデルとしている。また，M-φ モデルの履歴モデルは修正武田モデルとした。

再現解析結果を図-6 に示す。荷重試験で得られた荷重荷重～変位関係の履歴，ならびに杭体の曲率分布（損傷位置を含む）の形状を概ね再現できるとともに，杭体損

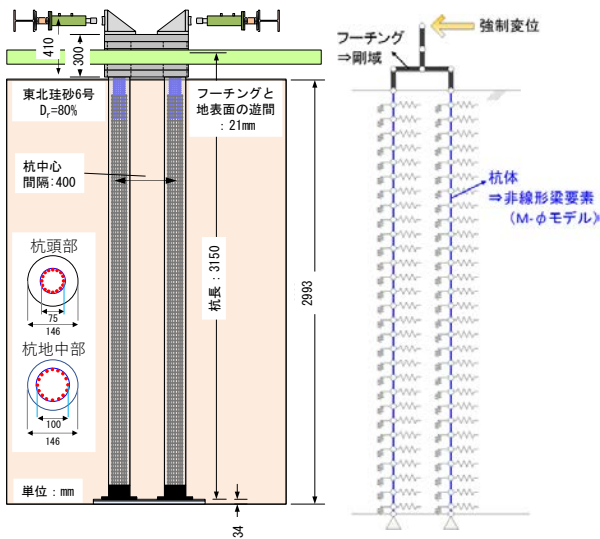


図-5 RC組杭模型による実験と構造解析モデルの概要⁸⁾

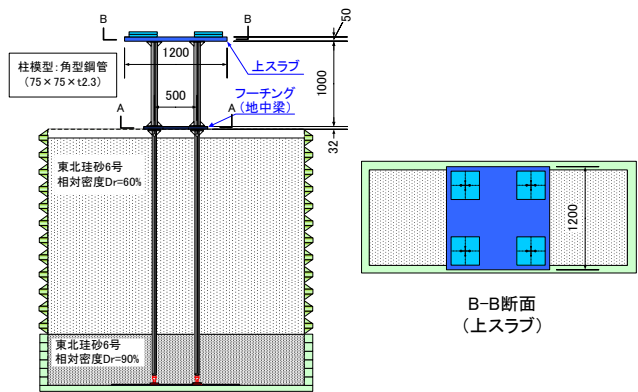
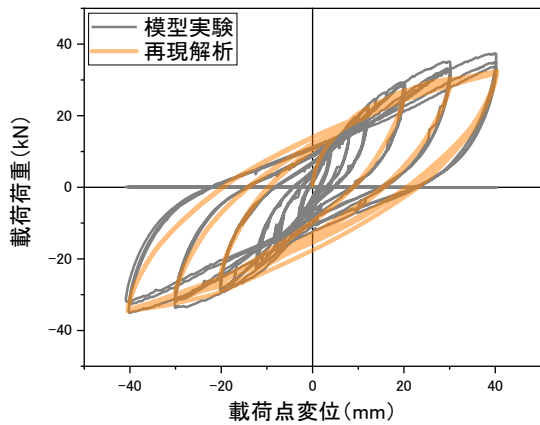


図-7 模型振動実験の概要⁵⁾

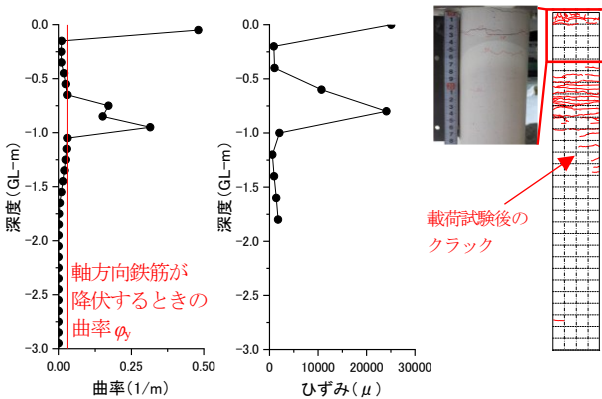
模型を対象にした振動実験(図-7)に対しても再現解析による検証を行った⁹⁾。構造解析モデルは図-5に示したRC組杭模型と基本的に同じであるが、一体型モデル¹⁰⁾とし地盤を土中モデルでモデル化することで、模型地盤の振動による影響も直接的に表現できるモデルとなっている。上スラブと柱も線材でモデル化しているほか、鋼管杭であるため部材の非線形特性は考慮していない。また、基準水平地盤反力係数 k_{hr} は、同じ模型を用いて別途実施した静的水平載荷試験の結果から設定した。

再現解析結果を図-8に示すが、幅広い地震動レベルに対する高架橋模型の挙動について、単一の地盤抵抗モデルを用いることで加振時の高架橋模型の挙動を精度よく再現できることが示されている。また、実験で確認されたL2加振後の基礎の残留水平変位が2.0mmであったため明確な地震後残留変位とはいえないものの、解析結果はおおむね整合しており、動的な挙動後の残留変位についても再現できることが確認された。

なお、この模型振動実験はせん断土槽を用いており、地震時に発生する地盤変位が杭体の変位・変形に与える影響も模擬している。これは一般的にKinematicな相互作用と呼ばれる一方で、図-1に示した水平地盤反力係数の変位レベル依存性は共振実験や杭頭部の載荷実験から得られたものであることから、静的荷重に対する慣性の相互作用(Inertialな相互作用)を評価したものである。すなわち、Inertialな相互作用を精度よくモデル化することができれば、Kinematicな相互作用に対しても比較的高い精度で地震時挙動を再現できることが、この再現解析結果から示された。



(a) 荷重～変位関係



(b) 曲率分布(解析結果), 軸方向鉄筋のひずみ分布(実験結果)と載荷試験後の損傷の状況

図-6 RC模型杭の水平載荷試験の再現解析結果

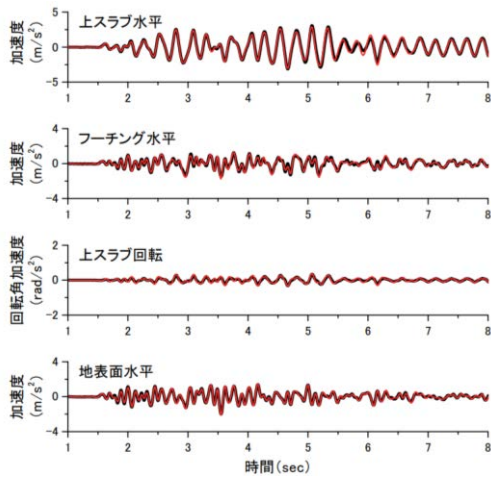
傷後の残留変位量についても提案モデルにより精度よく再現できることが示された。

(3) 高架橋模型の振動実験

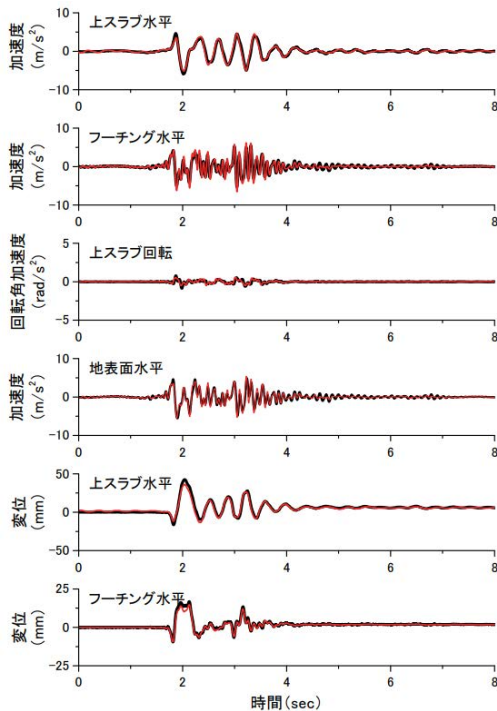
動的な荷重が作用した場合の挙動に対する提案モデルの適用性を確認するため、実物の1/10スケールの高架橋

4. 実橋脚を想定した動的解析による残留変位量の試算

3章では、模型実験結果を基に構築した水平地盤反力係数の構造解析モデルを用いることで、様々な条件で実施した模型実験をすべて精度よく再現できることが示された。そこで、実橋脚を想定した動的解析を実施し、地



(a) L1地震動加振時



(b) L2地震動スペクトルII加振時

図-8 模型振動実験の再現解析結果⁷⁾
(黒線: 実験, 赤線: 解析)

震後に発生する残留変位量の試算を行った。

しかしながら、実構造物への構造解析モデルの展開を考えると、実杭を対象に微小変位から～大変位までの水平地盤反力係数を連続的に計測した事例はない。一方で、3章で示したような模型実験では、杭の施工を模擬することはできないため、図-1で示した水平地盤抵抗の非線形特性が、実杭に対しても適用できる保証はない。また、模型実験では杭先端を完全固定状態としているが、実杭先端のそれほど高いとは限らないため、鉛直地盤抵抗の非線形特性についても精度よくモデル化するのが望ましい。そのため本章では、はじめに実杭の載荷試験結果から適用する非線形モデルの選定を行ったのちに、パラメータを設定し、実規模の橋脚を想定した動的解析を実施

した。なおモデル化の対象は、杭工法の中で最も適用数が多い場所打ち杭とした。

(1) 場所打ち杭の地盤抵抗のモデル化

a) 水平地盤抵抗

場所打ち杭の水平地盤抵抗の非線形特性を分析した結果、試験によるばらつきは大きいものの、模型杭と同じROモデルが適すると考えた。そこで、粒子フィルタ法¹¹⁾を用いてROモデルの標準パラメータを設定した(図-9(a))。検証のため、場所打ち杭の水平載荷試験を対象に再現解析を行い、妥当性を検証した。ここでは、砂地盤に打設された外径1200mm、長さ30mの場所打ち杭を対象とした一方向の多段階繰返し載荷試験の検証解析について示す。

再現解析モデルの地盤ばねの設定については、基準水平地盤反力係数 k_{hr} は杭頭部1%変位時の荷重～変位関係から同定し、非線形特性は上記の標準パラメータを準用した。また比較のため、基礎標準に記載されているバイリニアモデルでの解析も実施した。バイリニアモデルの初期勾配は基準地盤反力係数 k_{hr} 、上限値は有効抵抗土圧とし、履歴モデルには鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計¹²⁾(以下、耐震標準)に記載されているCloughモデルを適用した。

再現解析結果を図-10(a)に示す。ROモデル、バイリニアモデルともに載荷試験から得られた荷重～変位関係の骨格曲線については概ね再現することができている。一方で、ROモデルでは各載荷段階の除荷時に生じている残留変位を概ね再現できているのに対し、バイリニアモデルでは過小評価する結果となった。これは、バイリニアモデルでは初期勾配(すなわち最大水平地盤反力係数 k_{hmax})を比較的大きな変位レベルでの値として設定しているため、除荷勾配も小さい評価となった結果、残留変位量を過小評価する結果になったと考えられる。

b) 鉛直地盤抵抗

杭先端の鉛直地盤抵抗と杭周面の鉛直地盤抵抗を区分して分析した結果、杭先端では変位量が大きくなるにしたがって地盤抵抗も大きくなるのに対し、杭周面においては変位量が20mm程度になると地盤抵抗が頭打ちとなり、その後は大きくは増加しない傾向が見られた(図-10(b), (c))。そこで、杭先端にはROモデルが、杭周面にはHDモデル¹³⁾(双曲線モデル)が適していると考え、水平地盤抵抗と同様に、基準変位を20mmとして地盤反力度～変位関係を正規化し、粒子フィルター法により標準パラメータを設定した。

検証解析の対象は、杭径1200mm、杭長15.5mの場所打ち杭の鉛直載荷試験である。解析モデルに用いた基準鉛直地盤反力係数 k_{vr} (20mm変位時の鉛直地盤反力係数)は載荷試験から逆算し、非線形特性を図-9(b)(c)に

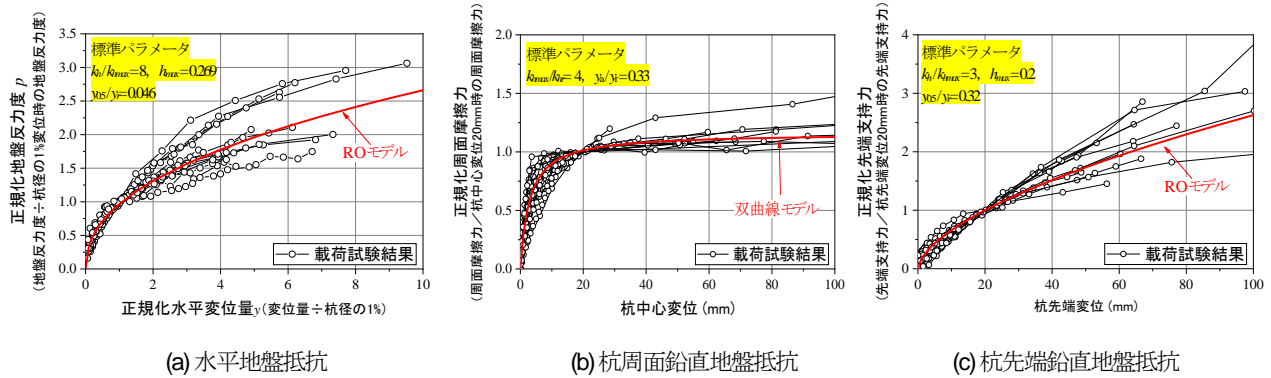


図-9 実杭の載荷試験から求めた地盤抵抗の非線形特性と RO・HD モデルの標準モデル

示す標準パラメータとした。また比較のため、基礎標準で示されているバイリニアモデルによる解析も実施した。履歴モデルは耐震標準に準拠し、周面相互作用ばねには一般的なバイリニアモデルを、先端鉛直相互作用ばねには Slip 型のバイリニアモデルを適用した。

結果を図-10 (b)に示す。RO モデル・HD モデル、バイリニアモデルとともに載荷試験で得られた荷重～変位曲線の骨格曲線については概ね再現することができている。一方で、残留変位については RO モデル・HD モデルでは概ね再現できているものの、バイリニアモデルでは、過小評価する結果となっている。この理由も、a)で示した水平載荷試験の再現解析結果と同様、設計標準モデルでは初期勾配を比較的大きな変位レベルで設定していることが大きな要因と考える。

(2) 実橋脚を想定した動的解析

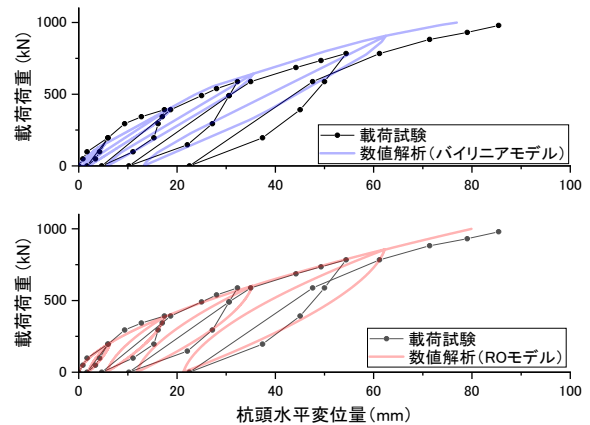
場所打ち杭で支持された鉄道橋りょう橋脚を想定して地震後に発生する残留変位量を試算した。近年の設計事例を参考に設定した橋脚 34 基 (図-11) に対し、耐震標準に記載されている地盤種別に応じた設計地震動 (L2 地震動スペクトル I, スペクトル II) ¹²⁾の地表面地震動や実観測波 (兵庫県南部地震における神戸海洋気象台観測波, 鷹取駅構内観測波, ポートアイランド観測波) を含んだ計 17 種類に地震動を与えることで、結果的に約 580 ケースの動的解析を実施している。

構造解析モデルの地盤抵抗のモデルとしては、基準地盤反力係数は基礎標準から設定し、非線形パラメータは図-9に示す標準値を用いた。また、部材については関連する鉄道構造物等設計標準に準拠してモデル化を行ったが、本解析では基礎の残留変位に着目するため、本解析では橋脚く体は弾性体とした。

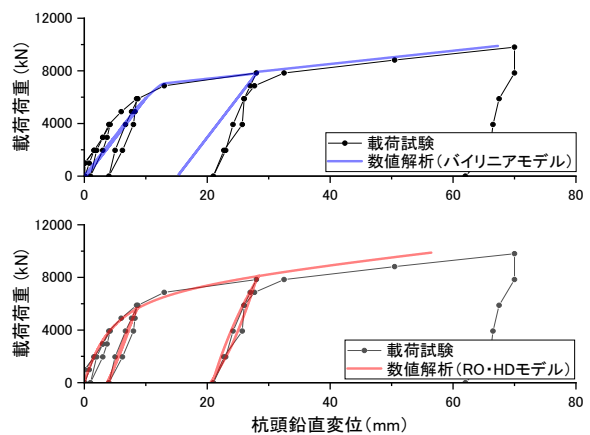
動的解析においては、減衰特性の設定も重要なパラメータとなる。構造物の減衰には代表的なものとして構造減衰, 履歴減衰, 逸散減衰がある。履歴減衰は非線形モデルの中で考慮されるため、これ以外の減衰としてレーリー減衰を設定し、構造物の 1 次固有振動数における橋

脚全体の減衰定数が実測結果 ¹⁴⁾を参考に 0.05 程度となるよう、RC 部材の減衰定数を 0.03, 相互作用ばねの減衰定数を 0.07 とした。

試算の結果として、軌道面および橋脚天端における地震時の最大水平変位～地震後の残留水平変位関係を図-12に示す。なお以下では、杭の鉛直支持降伏の有無, および杭体損傷の有無の 2 つの指標で損傷モードを分類し、考察する。最大水平変位が 30mm 以下の場合には、損傷モードによらず残留変位がほぼ発生しない結果となっている。一方で、最大水平変位が 30mm を超えた場合



(a) 水平載荷試験



(b) 鉛直載荷試験

図-10 場所打ち杭の載荷試験の再現解析結果

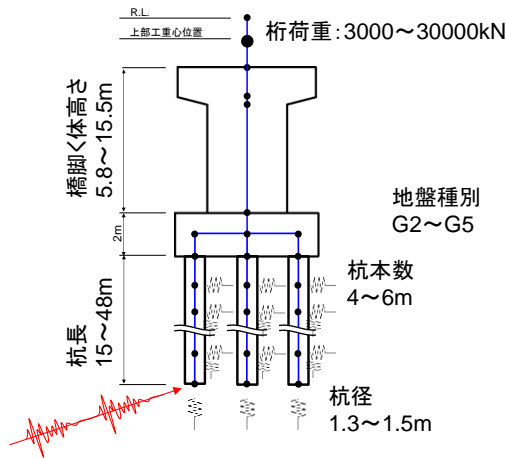


図-11 動的解析の対象となる橋脚の条件

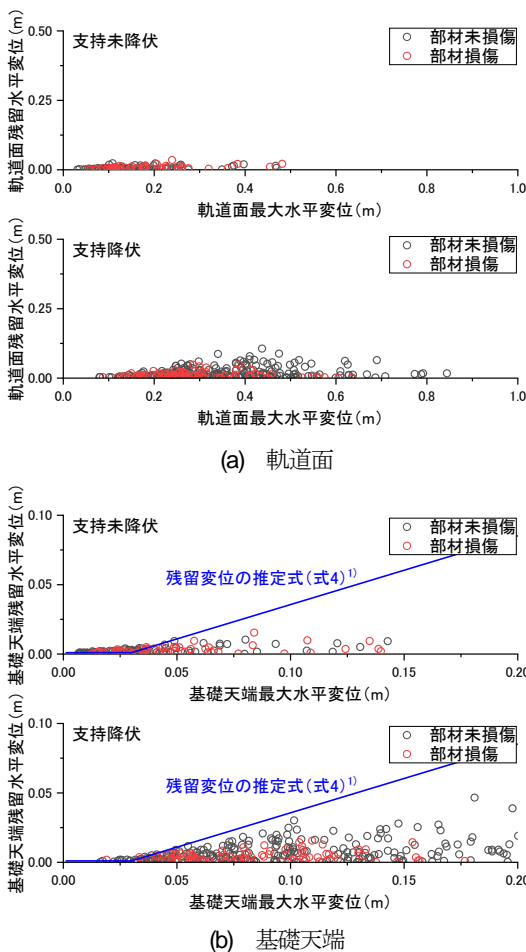


図-12 動的解析による残留変位量の試算結果

には、支持降伏が生じていない場合には残留変位量は最大でも 20mm 以下と微小であるのに対し、支持降伏が生じている場合に残留変位量が大きくなる傾向がみられる。一方で、支持降伏を生じている場合において杭体損傷の有無で比較すると、杭体が損傷していない場合の方が最大変位および残留変位の発生が大きくなっている。これは、杭体が損傷する場合には塑性化によるエネルギー吸収により橋脚の応答加速度が低減されるためと考える。

以上より、損傷・降伏状態が基礎構造物全体の残留変位量に与える影響が明らかになった。実務設計においては、鉄道構造物の復旧性の観点からは、特に重要な構造物においては支持降伏が生じないように誘導するのがよいと考える。

なお、既往の検討において、実験的検討、解析的検討をもとに基礎構造物の残留変位の推定方法が検討されており、以下の推定式が提示されている¹⁾。

$$\delta_r = 0.5(\mu - 1) \cdot \delta_y \quad (4)$$

ここで、 δ_r ：残留変位量、 μ ：塑性率、 δ_y ：降伏変位である。この推定式による結果を図-15 に併記するが、ここでは、 δ_y を杭径 1.5 m の場合の復旧性性能レベル 1 の設計限界値 (杭径の 2% = 0.03 m) とした。式(4)の推定式を超過する事例はほとんど存在せず、一般的な杭基礎橋脚に発生する地震時残留変位量を安全側に推定できることが改めて示された。なお、特に変位量が最大変位量が大きい領域においては残留変位量を過大に評価しているため、例えば地震動の影響などを加味することで推定式の高度化を図ることも可能と考えられる。

5. まとめ

本研究テーマでは、地震後の残留変位量を精度よく表現できる構造解析モデルの構築を目的として、載荷試験データに基づいた非線形・履歴モデルを提案するとともに、再現解析による検証を実施した。このモデルを用いることで、地震後の残留変位量を精度よく評価することができる。また、実構造物を想定したパラメトリックスタディを行い、地震後の残留変位挙動した。

本検討は比較的一般的な構造の杭基礎橋脚を対象としているが、様々な形式の構造物に対して同様の検討を実施しその知見を積み重ねることで、残留変位量を照査指標とした場合の設計限界値の設定や、地震後の運行再開可否の判断指標の作成において活用できると考える。

REFERENCES

- 1) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物, 2012. [Railway Technical Research Institute : Design standards for Railway Structures and Commentary (Foundation Structure), 2012.]
- 2) Sanagawa, T., Nishioka, H., Shinoda, M. and Koda, M. : Resonance and static loading tests about displacement-level dependency of the coefficient of lateral subgrade reaction of pile, Proceedings of 9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations (IS-KANAZAWA2012), pp.371-376, 2012.
- 3) Jennings, P.C. : Periodic response of a General Yielding Structure, Proc. ASCE, Vol.90, EM2, pp.131-163, 1964.
- 4) 龍岡文夫, 福島伸二：砂のランダム繰返し入力に対

- する応力～歪関係のモデル化について(1), 生産研究, Vol.30, No.9, pp.356-359, 1978. [Tatsuoka, F. and Fukushima, S : Stress-Strain Relation of Sand for Irregular Cyclic Excitation (1), Journal of Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Vol.30, No.9, pp.375-378, 1978.]
- 5) 佐名川太亮 : 幅広い変位レベルにおける杭の水平地盤反力係数の評価と変位レベル依存性のモデル化に関する研究, 東京工業大学博士論文, 2017. [Sanagawa, T.: A study on evaluation of coefficient of lateral subgrade reaction of piles and modeling of displacement-level-dependency at wide displacement level, *Tokyo Institute of technology, Doctoral thesis* 2015.]
 - 6) 佐名川太亮, 西岡英俊, 本山紘希, 室野剛隆, 高野祐輔, 陶山雄介, 米澤豊司, 青木一二三 : 斜杭ラーメン高架橋を対象とした地盤変位作用時の動的挙動に関する実験的検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.71, No.3, pp.163-176, 2015. [Sanagawa, T., Nishioka H., Motoyama, H., Murono, Y. Takano, Y., Suyama, Y., Yoneawa, T. and Aoki, H : Experimental study of seismic response under kinematic and inertial interactions of rigid frame viaduct on batter piles, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.C (Geosphere Engineering)*, Vol. 71, Issue 3, pp. 163-176, 2015.]
 - 7) 佐名川太亮, 西岡英俊, 室野剛隆, 高野祐輔, 米澤豊司, 青木一二三 : ラーメン高架橋柱端部の塑性化が斜杭基礎の制震効果に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.2, pp.302-314, 2016. [Sanagawa, T., Nishioka, H., Murono, Y. Takano, Y., Yoneawa, T. and Aoki, H : Non-linear dynamic behavior of rigid frame viaduct on batter piles, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering)*, Vol. 72, Issue 2, pp. 302-314, 2016.]
 - 8) 村田和哉, 佐名川太亮, 岩田秀治, 鈴木亨, 高橋佑斗, 西岡英俊 : 損傷抑制型結合方式を用いた杭基礎構造の地震時挙動 その2 模型 RC 杭を用いた静的載荷実験, 土木学会第 74 回年次学術講演会, pp.1-226, 2019. [Murata, K., Sanagawa, T., Iwata, S. Suzuki, J., Takahashi, Y. and Nishioka, H : Non-linear dynamic behavior of rigid frame viaduct on batter piles, *Proceeding of annual conference of the Japan Society of Civil Engineers*, pp. I-226-227, 2019.]
 - 9) 玉木修, 三橋晃司, 今井常雄 : 水平抵抗における群杭効果の研究, 土木学会論文報告集第 192 号, pp.79-89, 1971. [Tamaki, O., Mitsuhashi, K. and Imai, T. : Horizontal resistance of a group pile subjected to lateral load, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 1971, Issue 192, pp. 79-89, 1971.]
 - 10) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編 : 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 2004. [Railway Technical Research Institute : Design standards for Railway Structures and Commentary (Concrete Structure), 2004.]
 - 11) Kitagawa, G. : Monte Carlo filtering and smoothing method for non-Gaussian nonlinear state space models, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Vol.5, No.1, pp.1-25, 1996.
 - 12) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編 : 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012. [Railway Technical Research Institute : Design standards for Railway Structures and Commentary (Seismic Design), 2012.]
 - 13) Kondner, R.L. : Hyperbolic Stress-strain Response, Cohesive Soils, Proc. ASCE, SM1, pp.115-153, 1963.
 - 14) 和田一範, 坂井公俊, 室野剛隆 : 実測に基づく鉄道高架橋の減衰定数の特性把握と低減衰箇所の簡易抽出法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.1, p.1-12, 2018. [Wada, K., Sakai, K. and Murono, Y. : Characterization of damping constants of railway viaducts based on vibration measurements and extraction method of low damping viaducts, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering)*, Vol. 74, Issue 1, pp. 1-12, 2018.]

(Received April 1, 2022)
(Accepted June 3, 2022)

STUDY ON EVALUATION OF RESIDUAL DISPLACEMENT OF PILE FOUNDATIONS SUPPORTING BRIDGE PIER AFTER EARTHQUAKE

Taisuke SANGAWA and Takumi OZAKI

Restorability is one of the required performance of Japanese railway structures, and it is verified to keep the state that the structures can be restored by repair within reasonable ranges of cost and time. For foundation structures, residual displacement is set as the performance item of restorability as concept, however maximum displacement is usually used in actual design because the general structural analysis method can evaluate the residual state after earthquake. In this study, reproduction numerical analyses of the loading tests were carried out for the purpose of constructing a structural analysis model that can accurately calculate the residual displacement amount for the pile foundation structure. Trial calculations showed the relationship between the damage mode and the amount of residual displacement after earthquake by performing a dynamic analysis assuming an actual pier using a model that was recreated.