動的相互作用の観点から見た斜杭基礎を有する高架橋の地震応答特性

本山 紘希¹・室野 剛隆²・高野 裕輔³・青木 一二三⁴

¹正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

Email: motoyama@rtri.or.jp

²正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

Email: murono@rtri.or.jp

³正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備機構 (〒231-8351 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

Email: ysk.takano@jrtr.go.jp

⁴正会員 (株)レールウェイエンジニアリング (〒105-0012 東京都港区芝大門1-3-8)

Email: 123.aoki@jrtr.go.jp

斜杭基礎を有する高架橋においては通常の直杭基礎の場合と異なり、上部構造物に水平振動と逆位相の回転振動（逆ロッキング動）が発生する。本研究では、逆ロッキング動について相互作用の観点から分析し、逆ロッキング動が慣性力を低減する効果について検討をした。検討においては、まず、相互作用のうち特に地盤変位の影響について解析的な検討を実施した。次に、斜杭基礎の有効入力動に着目し、慣性力の低減効果について考察を行った。これにより、有効入力動の回転成分を考慮できる振動モデルを考えることで、斜杭基礎の慣性力低減効果を評価できることを示した。最後に、設計計算を念頭に静的解析法をベースとした斜杭基礎を有する高架橋の応答値算定法の例を示し、適用性について基礎的な検討を行った。

Key Words : batter pile, out-of-phase rocking, effective motion, soil-structure interaction, kinematic interaction

1. はじめに

斜杭基礎を有する高架橋の地震時挙動に関しては、これまで実験的・解析的に様々な検討が行われてきた。これらの検討では、通常の斜角を持たない杭基礎（直杭基礎）と比較した際の幾何的な要因による水平支持力の増加やそれに伴う杭頭応力の増加に関する検討^{1),2)}に加えて、斜杭基礎の特徴的な挙動である、水平振動と逆位相の回転振動（ここでは、「逆ロッキング動」と呼称する：図-1）についての検討も多く実施されている^{3),4),5)}など。この逆ロッキング動は、高架橋に働く慣性力を打ち消す効果が容易に想像されるため、非常に興味深い現象であるが、既往の研究においては、逆ロッキング動の現象解明に終始するものがほとんどであり、逆ロッキング動の評価や慣性力の低減について直接的に扱った議論は見られない。

斜杭基礎は設計の観点からも検討がなされている⁶⁾など。これらは、基本的には斜杭基礎の水平支持力の増加に期待した検討であり、上記と同様、逆ロッキング動の

影響を積極的に設計に取り入れるまでには至っていない。斜杭基礎の逆ロッキング動を設計に取り入れるには、逆ロッキング動が発生するメカニズムを解明するとともに、逆ロッキング動の評価方法ならびに構造物の応答との関係について考察する必要がある。

以上を念頭に、斜杭基礎を有する高架橋の地震応答特性について解析的な検討を実施する。検討においては、直杭基礎を有する高架橋の地震応答特性と比較することで斜杭基礎を有する高架橋の地震応答特性の検討を行っている。特に基礎と地盤の相互作用に着目し、逆ロッキング動が発生するメカニズムおよびその評価方法について考察している。さらに、斜杭基礎における有効入力動に着目し、適切な1自由度系の簡易モデルを考えることで、逆ロッキング動の影響を含めて、斜杭基礎を有する高架橋の振動を説明できることを示している。上記の検討を踏まえ、通常、土木構造物の設計計算に用いられる静的解析法をベースとした応答値算定手法を斜杭基礎を有する高架橋について提案し、その適用性について基礎的な検討を実施している。

図-1 逆ロッキング動のイメージ図

図-2 検討におけるモデルケース

図-3 地盤の土質柱状図およびN値の深度分布

2. 直杭基礎を有する高架橋と斜杭基礎を有する高架橋の地震応答特性

ここでは、図-2に概形を示す実際に設計された鉄道高架橋をモデルケースとして検討を行う。この高架橋は、図-3に示す地盤に対して建設された高架橋である。当該地盤は、弾性周期が0.62秒の地盤であり、鉄道の耐震設計においては普通～軟弱地盤（G4地盤）に分類される⁷⁾。斜杭基礎は、杭に5度の斜角を与えることとした。また、杭基礎には鋼管を用いており、主に逆ロッキング動の発生メカニズムに焦点をあてるために本論文では杭部材の損傷については考慮しないものとした。

モデルケースの直杭基礎を有する高架橋と斜杭基礎を有する高架橋の地震時の応答を比較するため、動的解析を実施する。動的解析では、自由地盤と構造物を一体として扱うことで地盤と構造物の相互作用を自動的に考慮できる一体型の2次元の質点系モデルを用いることとし、モデル化を行った⁷⁾。モデル化においては図-4に示すように柱、梁、杭等の部材については梁要素を用いてモデル化し、地盤と基礎の相互作用についてはばね要素でモデル化した。自由地盤からの入力を自動的に考慮できるようにばね-質点系でモデル化した自由地盤を相互作用を表現するばね要素に接続しており、自由地盤の底面への地震動の入力を想定したものとなっている。自由地盤のモデル化においては、構造物系の応答の影響を受けないように十分広い領域を対象にモデル化した。梁要素およびばね要素に与える諸元は鉄道の設計標準⁷⁾に準拠し、非線形性は、RC部材を表現する梁要素には修正武田モデル、相互作用ばねにはバイリニア型モデル、自由地盤のばね要素にはGHE-Sモデル⁸⁾を用いた。

質点系でモデル化する場合、斜杭基礎に接続する相互

(a)直杭基礎 (b)斜杭基礎

図-4 解析モデル

(a)直杭 (b)斜杭

図-5 相互作用ばねの設定方向

作用ばねの設定方向やそれに伴う剛性・上限値の考え方が問題になるが、ここでは、検討する斜杭の斜角が5度と比較的小さいことを考慮し、直杭基礎と同様、ばね要素は杭基礎に対して図-5のように水平方向および鉛直方向に接続することとした。

なお、図-4に示したように、回転角の正方向が時計回りになるように設定した。正ロッキングの場合、水平振動と回転振動が同符号となり、逆ロッキングの場合、異符号となるように設定したものである。

図-6 入力地震動 (L2 地震動 スペクトル II)

図-7 各高架橋天端における加速度応答波形

(a) 水平方向

(b) 回転方向

図-8 各高架橋天端における変位応答波形

さて、上記で作成した解析モデルに対して動的解析を実施する。入力波には鉄道の設計標準⁷⁾に示されたL2地震動(スペクトルII適合波)(図-6)を用いた。解析結果として、図-7に直杭基礎を有する高架橋と斜杭基礎を有する高架橋について、天端の水平加速度応答波形を重ねて表示した。加速度応答の最大値は斜杭基礎を有する高架橋の方が小さくなっている。また、それぞれの高架橋について図-8に変位応答波形を表示した。変位波形については、水平成分(図-8(a))に加えて回転成分(ロッキング動:図-8(b))も示した。変位応答の水平成分についても斜杭基礎を有する高架橋の方が応答が小さい。さらに、変位応答の回転成分はそれぞれの基礎形式で逆方向となっており、斜杭基礎を有する高架橋での逆ロッキング動の発生を示唆する結果となっている。実際に図-9に示すように振動中の特徴的な変形形状を取り出すと、斜杭基礎を有する高架橋では、構造物の変位する方向と逆位相の回転動が発生していることが分かる。また、杭頭の曲げモーメントの時刻歴波形について図-10に示し

(a) 直杭基礎

(b) 斜杭基礎

図-9 振動中の変形形状

図-10 杭頭モーメントの時刻歴波形

た。図示したように斜杭基礎の杭頭における曲げモーメントは直杭基礎より大きい。図には、地表面の変位応答波形を重ねてプロットしているが、斜杭基礎に発生する曲げモーメント波形は地表面の変位波形と相関が見られることから、斜杭基礎に発生する断面力は地盤変位の影響を強く受けると考えられる。なお、上記の解析により杭部材に損傷がないことについては確認している。

付録1に示したが、地盤条件を変化させたケースについても同様の検討を実施している。これにより、上記で考察した構造物の定性的な応答特性は地盤条件に依存しないことを確認している。以下の検討においても、付録に示した地盤条件で同様の検討を実施し、抽出された特性に対して地盤の影響が限定的であることを確認している。

次章では、ここで示された斜杭基礎特有の振動特性について、基礎と地盤の動的相互作用の観点から考察を行う。

図-11 【変位応答水平成分】高架橋天端の通常地震応答と地盤変位の影響による応答の比較

図-12 【変位応答回転成分】高架橋天端の通常地震応答と地盤変位の影響による応答の比較

3. 斜杭基礎と地盤の相互作用に関する分析

(1) 分析手法

構造物と地盤の相互作用の影響を分析するため、慣性力の影響による相互作用 (Inertia Interaction) と地盤変位の影響による相互作用 (Kinematic Interaction) に分けて分析を行う。ここでは、特に地盤変位の影響による相互作用に着目した分析を行う。

基礎と地盤の相互作用のうち、地盤変位の影響のみを取り出す場合には、構造物の質量をゼロとし、慣性力の影響を取り除いた条件で解析を行えば良い。この場合、慣性力の影響による上部構造物の応答が生じず、構造物の応答には水平方向・回転方向ともに地盤変位の影響のみ表れる。慣性力の影響のみを取り出す場合には、通常慣性力も考慮した地震応答解析の結果から地盤変位の影響のみ考慮した地震応答解析の結果を差し引けば良い。また、地盤変位の影響のみ考慮した動的解析により得られる基礎の頂部の応答は広義の有効入力動と解釈できる。また、地表面の地震応答に対する有効入力動の伝達関数が有効入力係数である。なお、有効入力動は基礎構造物のみを取出して検討するのが一般的であるが、本研究では、上部構造物の質量のみ取り除き、上部構造物の剛性を考慮している点で有効入力動を広義に解釈している。

本章では、まず、地盤変位の影響による相互作用について考察する。次に有効入力動および有効入力係数を算定し、斜杭基礎の有効入力動における特徴について整理する。また、地盤変形とロッキング動に関する検討として、地表面の地震応答と基礎の頂部の地震応答について時間軸上でも比を計算し、考察を行う。

(2) 地盤変位の影響による相互作用の評価

慣性力の影響を取り除き、地盤変位の影響のみに着目した検討を行うため、図-4でモデル化した直杭基礎を有する高架橋と斜杭基礎を有する高架橋について、構造物の重量を除いた解析モデルを作成し、動的解析を実施する。入力地震動は2章の検討と同様、L2地震動 (スペクトルII) (図-6) を用いた。

解析結果に関して、通常動的解析 (慣性力の影響および地盤変位の影響を両方考慮した解析) による構造物天端の変位応答と地盤変位の影響のみ考慮した解析による構造物天端の変位応答について、直杭基礎と斜杭基礎それぞれについて比較を行う。変位応答の水平成分の波形を図-11に、回転成分の波形を図-12に示す。図-12には回転成分の波形と地表面変位波形の関係について考察するため、地表面変位波形を重ねてプロットしている。

上記の解析において、直杭基礎と斜杭基礎の比較で特に大きな違いは回転変位波形に表れている。直杭基礎を有する高架橋の応答解析結果 (図-12(a)) を見ると、地盤変位の影響のみでは回転変位は見られず、通常動的解析 (慣性力の影響+地盤変位の影響) において回転変位が表れていることから、直杭基礎を有する高架橋では回転変位は慣性力の影響により発生することが分かる。一方、斜杭基礎を有する高架橋の応答解析結果 (図-12(b)) を見ると、地盤変位の影響のみを考えた解析においても、回転変位が表れている。地盤変位の影響で発生する回転変位の振幅は、地表面の変位波形の振幅が大きくなる時刻に大きくなっていることも特徴的であり、両者に強い負の相関がみられる。直杭基礎を有する高架橋において慣性力の影響で発生する回転変位は、概ね地

図-13 直杭基礎の有効入力動 (加速度)

図-14 斜杭基礎の有効入力動

盤変位と同位相であり、斜杭基礎を有する高架橋の地盤変位の影響により発生する回転変位は地盤変位と逆位相（逆ロッキング動）であることも分かる。

以上の検討により、斜杭基礎高架橋で発生する逆ロッキング動は構造物と地盤の相互作用のうち地盤変位の影響による相互作用の影響が大きいことが分かった。

(3) 有効入力動の分析

上記により、斜杭基礎の振動に対して、地盤変位の影響が大きいことを確認した。ここでは、地盤変位の影響により得られる有効入力動に着目した分析を行う。

通常の直杭基礎を対象とした有効入力動の算定における既往の研究は、弾性波動論を基礎としたものが一般的であり、杭の影響についても線形解析の範囲では精緻に評価する手法が提案されている^{9,10}。そのため、有効入力動を議論する場合には線形解析が基本となっている。一方では、非線形性を考慮した検討も見られ、地盤を等価線形として扱う手法¹¹や、地盤をソリッド要素で分割した非線形FEM解析による手法⁹が検討されている。本検討における質点系のモデルは、波動を扱う際に厳密なモデル化とはなっていないが、解析モデルの適用範囲内での議論と割り切り、図-4で示したモデルにより有効入力動の検討を行う。また、本検討で用いる解析モデルは非線形性を扱うのには便利なモデルであるため、非線形領域における検討も行う。

線形解析により、実際に有効入力動（加速度波形）を算定する。ここでは、有効入力動の算定位置は地中梁の中心位置の節点とした。また、上部構造物の剛性を考慮するため、質量をゼロとした状態で上部構造物を取り除かず解析を行っている。結果を直杭基礎および斜杭基礎についてそれぞれ図-13および図-14に示す。ここでも、

図-6に示した入力波を用いている。それぞれの基礎形式に対して水平成分および回転成分について図示した。図-14を見て分かるように、斜杭基礎を有する高架橋では、有効入力動として比較的大きな回転成分が発生していることが分かる。また、有効入力動の回転成分が有効入力動の水平成分と逆位相である特徴も見取れる。

上記の有効入力動に対して、地表面の地震応答とのフーリエスペクトル比（有効入力係数）を算定し、振動数領域において示す。表示においては、振幅比と位相差の表示を行い、水平振動と回転振動についてそれぞれ直杭基礎と斜杭基礎を比較している。結果を図-15に示す。

顕著な結果として見られるのは、直杭基礎および斜杭基礎それぞれの有効入力係数の回転成分の違いである。斜杭基礎では、直杭基礎に比べて有効入力係数の振幅比が複雑に変化する様子が見られる。位相に着目すると、直杭基礎では、0～12Hzの領域で0(rad)または 2π (rad)であり、同位相（正ロッキング動）であることが分かる。一方、斜杭基礎では、0～5Hzの領域で位相差が π (rad)であり、逆位相（逆ロッキング動）であることが分かる。0～5Hzでは、振幅も直杭基礎に比較して斜杭基礎で小さくなっている。水平成分に着目すると、斜杭基礎の方が直杭基礎よりも低減度合いが大きいのも興味深い。これは、斜杭基礎とすることで基礎の剛性が高くなり、地盤の挙動に基礎が追随しにくくなったことによると考えられる。

非線形解析でも有効入力動を算定し、それにより有効入力係数を算定した。算定結果を図-16に示す。結果は平滑化して表示した。非線形解析により得られる結果であるため、定常的な検討ではなく、入力波に依存したものであることは否めないが、有効入力係数の回転成分（図-16(b)）を見ると低振動数領域で斜杭基礎において

図-15 有効入力係数の算定 (上: 振幅比, 下: 位相差) —線形

図-16 有効入力係数の算定 (上: 振幅比, 下: 位相差) —非線形

は、ほぼ逆位相であり逆ロッキング動となっていることや、直杭基礎と比較して振幅が大きくなる点については、線形解析の結果と整合する結果が得られている。

(4) 地盤変位と基礎の回転振動の幾何的性質

一般に、有効入力動を議論する場合は、上述のように振動数領域で検討するが、ここでは、構造物の質量をゼロとした解析を行い、時刻歴で地盤変位と有効入力動の回転成分の比を示す。上記で行った有効入力係数の検討とは異なり、地盤変位としては図-17に示す基盤位置からの地表面の相対変位を用いる。これにより、各瞬間の地盤変位分布に対して、純粋に幾何的な要因により発生する回転動の比率が算定されると考えた。単純化すると、有効入力係数では地表面の絶対変位と回転角の比率を計算しているのに対し、ここでは地表面の基盤からの相対変位と回転角の比率に注目していると整理できる。純粋に幾何的な要因により発生する水平変位に対する回転変位の比率の参照値として、図-17の解析を静的に地盤変位を与えて実施し、入力した地盤変位とその時に得られた基礎の回転変位の比を別途算定した。静的解析におけ

る地盤変位分布は、応答変位法⁷⁾の考え方を参考に、別途自由地盤の動的解析を実施し、基盤と地表面の相対変位が最大となる時刻の地盤変位分布を用いた。

図-18に線形解析における斜杭の解析結果を示す。時間は、0~10秒を取り出して表示した。時刻歴の水平変位波形および回転変位波形も付した。分母となる地盤の水平変位がゼロに近いところで多少の値の変動が見られるが、振動が始まってすぐ、静的解析で得られる一定値(-0.016)を示すことが確認できる。

非線形解析による結果を図-19に示す。線形解析のように完全に一定値になるわけではないが、水平変位振幅が大きな部分においては、ほぼ一定の値を示すことが分かる。また、静的解析で得られる値(-0.024)とも整合する結果となっている。

以上の検討により、有効入力動の回転成分は、時間軸上では、ある地盤変位分布に対してその振幅に比例する値として得られることが分かる。この時の地盤変位分布の形状は応答変位法で用いる地盤変位分布(自由地盤の動的解析を実施し、基盤と地表面の相対変位が最大となる時刻の地盤変位分布)の形状と等しい。

なお、直杭においても同様の検討を行っているが、そもその回転成分の発生量が小さく、地盤変位に対する有効入力動の回転成分の比はほぼゼロで一定値であった。

(5) 相互作用による分析のまとめ

ここで本章の結果を簡単に整理する。本章での検討により、地盤と斜杭基礎の相互作用の影響で逆ロッキング動が発生していることが分かった。有効入力動および有効入力係数に着目して検討を行うことで、斜杭基礎においては定常的な性質として逆ロッキング動が表れることが分かる。また、時刻歴での検討により、逆ロッキング動は、基盤からの地盤の相対変位分布に比例して発生することが分かった。非線形解析による検討により、上記の特性が、地盤の非線形性を考慮した場合においても、概ね同様に表れることが分かった。

4. 斜杭基礎を有する高架橋の振動の簡易な表現方法

通常の直杭形式を有する高架橋においては、重量が上部工に集中していることから高架橋全体の振動を構造物の1次の振動モードを考慮した1自由度系の振動で表現できる。この時、1自由度系の解析モデルに対する入力としては、有効入力動（水平成分）を考慮する。この性質により標準的な高架橋の慣性力の影響による応答値は、プッシュ・オーバー解析と非線形応答スペクトル法を用いた静的解析法により評価できる¹²⁾。斜杭基礎を有する高架橋においても、構造物自体の重量は上部工に集中しているため、直杭基礎を有する高架橋と同様、構造物の振動を1自由度系の振動で表現可能であることが期待される。また、これを確認することは、上述のように、静的解析法が使用できる可能性を示唆するため、設計実務上も意義深い。

斜杭基礎を有する高架橋では、前章で検討したように、有効入力動として回転成分の影響を無視できないため、1自由度系の振動を考える場合に、適切に有効入力動の回転成分を考慮する必要がある。本章では、これを踏まえて、斜杭基礎を有する高架橋の振動を1自由度系の簡易モデルで表現する手法について提案する。

(1) 回転成分を考慮した振動モデルの提案

直杭基礎を有する高架橋の振動を1自由度系の簡易モデルで表現する場合の運動方程式を次に示す。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{u}_{eff}(t) \quad (1)$$

ここで、 m 、 c 、 k はそれぞれ質量、粘性、剛性を表し、 x は1自由度系の応答を表す。また、 $\ddot{u}_{eff}$ は構造物に対する

図-17 地盤変位と有効入力回転成分との比の算定方法

(a) 有効入力動回転成分／地盤変位

(b) 有効入力動回転成分と地盤変位の時刻歴波形

図-18 地盤変位と有効入力動回転成分との比（線形解析）

(a) 有効入力動回転成分／地盤変位

(b) 有効入力動回転成分と地盤変位の時刻歴波形

図-19 地盤変位と有効入力動回転成分との比（非線形解析）

図-20 斜杭基礎高架橋の1自由度系の振動モデル

る有効入力動の水平成分である。直杭基礎では有効入力動に回転成分の影響が小さいため、式(1)の運動方程式で振動を表現できる。一方、上述のように斜杭基礎を有する高架橋では、有効入力動の回転成分の影響を適切に1自由度系の運動方程式に組み込む必要がある。ここでは、有効入力動の回転成分を簡易に取り入れた図-20に示す振動モデルを提案する。図で θ_{eff} は構造物における有効入力動の回転成分を表している。このモデルは、逆ロッキング動が働く場合、有効入力動の回転成分 θ_{eff} に構造物高さを考慮した $L\ddot{\theta}_{eff}$ だけ入力打ち消されることを表現している。この時、地震応答解析の運動方程式は次式ようになる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m(\ddot{u}_{eff}(t) - L\ddot{\theta}_{eff}(t)) \quad (2)$$

提案式での解析は、事前に算定した有効入力動から $\ddot{u}_{eff} - L\ddot{\theta}_{eff}$ を計算し、得られた波形を入力地震動として通常の1自由度系の地震応答解析をすることに等しい。ここでは、図に示したように、この低減された入力 $\ddot{u}_{eff} - L\ddot{\theta}_{eff}$ を「見かけの有効入力動」と呼称する。

(2) 提案したモデルの検証

上記で提案した簡易モデルおよび運動方程式の妥当性を検証する。検証は、図-4で示した詳細なモデルによる動的解析と提案した1自由度系の振動モデルによる動的解析を比較することにより行う。線形解析および非線形解析の両方で検討する。詳細モデルへ入力する地震動は図-6に示したものとした。なお、直杭基礎を有する高架橋についても同様の検討を行った。

a) 線形解析による検証

線形解析における有効入力動は、既に図-13・図-14に示している。見かけの有効入力動をそれぞれの基礎形式について計算すると図-21のようになる。有効入力動の水平成分と比較して示したが、斜杭基礎では直杭基礎と異なり、有効入力動の水平成分に比較して見かけの有効入力動の振幅が小さくなっていることが分かる。

1自由度系のモデルの剛性の設定においては、詳細モデルの固有値解析の結果得られる構造物の1次モードに対応した固有振動数から算定した。固有振動数は、直杭基礎を有する高架橋では1.063Hz、斜杭基礎を有する高架橋では1.156Hzとなった。

加速度応答の解析結果を図-22に示す。解析は直杭基礎、斜杭基礎それぞれの基礎形式について、詳細モデルによる解析、前項の式(1)（有効入力動の水平成分を入力とした運動方程式）による1自由度系の解析および式(2)（見かけの有効入力動を入力とした運動方程式）による1自由度系の解析、の3ケースを実施した。図-22(a)は直杭基礎での結果であり、実施した3つの解析結果がほぼ一致する。直杭基礎を有する高架橋では、詳細解析

(a) 直杭基礎

(b) 斜杭基礎

図-21 有効入力動の水平成分と見かけの有効入力動（線形）

(a) 直杭基礎

(b) 斜杭基礎

(c) 斜杭基礎（2～6秒を拡大）

図-22 加速度応答の比較（線形）

の結果を1自由度系の解析で表現できること、および、有効入力動に対する回転成分の影響が小さいことが分かる。図-22(b)(c)は斜杭基礎の結果である。図-22(c)は図-22(b)の結果について、2～6秒を拡大したものである。入力として有効入力動の水平成分のみを用いる（式(1)）と構造物の応答を過大に評価してしまうことが分かる。一方、入力として見かけの有効入力動を用い、有効入力動の回転成分も考慮すると、1自由度系のモデルによる解析結果は詳細モデルによる解析結果とほぼ一致することが分かる。

この結果から、線形解析では、見かけの有効入力動を用いる提案モデル（式(2)）を用いることで、詳細解析による解析結果を精度よく表現できることが分かる。

b) 非線形解析による検証

非線形解析において有効入力動を算定し、見かけの有効入力動を直杭基礎および斜杭基礎それぞれについて計算すると図-23のようになる。直杭基礎においては、線形解析の場合と同様、有効入力動の水平成分と見かけの有効入力動の違いは少ない。一方、斜杭基礎においては、線形解析の時のように、振幅が一樣に小さくなる訳ではないが、有効入力動の水平成分と見かけの有効入力動の波形に違いが生じる結果となっている。

非線形解析における1自由度系のモデルは、詳細解析モデルのプッシュ・オーバー解析により得られる荷重－変位関係を骨格曲線として設定することで作成する。モデル化においては骨格曲線をトリリニア型で近似することとした。履歴法則にはClough型を用いる。各基礎形式における荷重（震度）－変位関係と1自由度系の骨格曲線の関係を図-24に示した。なお、直杭基礎を有する高架橋（図-24(a)）は降伏点の等価固有周期が1.27秒、降伏震度が0.44であり、斜杭基礎を有する高架橋（図-24(b)）は、降伏点の等価固有周期が1.18秒、降伏震度が0.44であった。

こうして得られた1自由度モデルの加速度応答の解析結果を図-25に示す。線形解析の場合と同様、それぞれの基礎形式について、詳細モデルによる解析と1自由度系の解析について前項の式(1)（有効入力動の水平成分を入力とした解析）および式(2)（見かけの有効入力動）による解析を実施し、加速度応答波形を比較した。図-25(a)は直杭基礎での結果であり、1自由度系の解析を行った2ケースとも詳細解析と誤差は見られるものの整合する結果となっている。図-25(b)(c)は斜杭基礎の結果である。詳細モデルによる解析の結果により整合するのは、見かけの有効入力動を用いた提案モデルによる解析であることが分かる。直杭基礎の場合と同様、誤差は生じるが、有効入力動の水平成分のみを用いた1自由度系の解析では、見かけの有効入力動を用いた場合より応答を過大に評価し、かつ、波形の差異も大きなものになっている。

以上より、斜杭基礎を有する高架橋について提案した1自由度系の簡易モデルは、従来の有効入力動の水平成分のみ使用する振動モデルに比べて、高架橋の応答を高精度に評価できることが分かった。これにより、斜杭基礎を有する高架橋についても、1自由度系モデルの動的解析により応答値を算定できることが分かるため、直杭基礎を有する高架橋と同様、静的解析法により応答値を算定できる可能性を示した。

(a) 直杭基礎

(b) 斜杭基礎

図-23 有効入力動の水平成分と見かけの有効入力動（非線形）

(a) 直杭基礎

(b) 斜杭基礎

図-24 荷重－変位関係と1自由度系の骨格曲線の設定

(a) 直杭基礎

(b) 斜杭基礎

(c) 斜杭基礎（2～6秒を拡大）

図-25 加速度応答の比較（線形）

5. 設計計算への展開の例

ここでは、前章までで検討した斜杭基礎を有する高架橋の逆ロッキング動を取り入れた振動の評価方法（見かけの有効入力動を用いる方法）と、従来指摘されている杭頭応力の増加¹²⁾を表現可能な静的解析法による応答値算定手法を提案し、本提案手法について適用性の検証を行う。ここで基本とする設計計算手法は、鉄道の設計で一般的に用いられる静的解析法とした⁷⁾。つまり、所要降伏震度スペクトルを用いた非線形応答スペクトル法により慣性力の影響を算定し、ここで得られた慣性力と地盤変位を組合せて応答変位法により構造物の各部材の断面力を算定する手法である。前章までの検討を考えると、斜杭基礎を有する高架橋においては、非線形応答スペクトル法により慣性力の影響を算定する際に、逆ロッキング動の影響を盛り込む必要がある。ここでは、簡易に逆ロッキング動の影響を考慮できるようにするため、所要降伏震度スペクトルを低減する手法を提案する。適用性の検証は応答変位法により得られる断面力と詳細な動的解析による断面力を比較することによって行う。

(1) 応答値算定手法の提案

a) 非線形応答スペクトル法

所要降伏震度スペクトルを用いた非線形応答スペクトル法について簡単に説明する。所要降伏震度スペクトルは、横軸に周期、縦軸に降伏震度を取り、目標塑性率ごとに降伏時の等価固有周期と降伏震度の関係を図化したものである⁷⁾。所要降伏震度スペクトルを利用した非線形応答スペクトル法では、プッシュ・オーバー解析により算定した降伏時の等価固有周期と降伏震度をスペクトルにあてることによって応答塑性率を読み取り（図-26）、降伏変位に応答塑性率を乗じることで高架橋の応答変位を算定する。また、プッシュ・オーバー解析により得られる荷重-変位関係上に応答変位を当てはめることで、高架橋に働く慣性力の影響を評価できる。所要降伏震度スペクトルを作成する際には、有効入力動（水平成分）に対して、等価固有周期と降伏震度をパラメータとした多数の1自由度系の解析を実施する。斜杭基礎を有する高架橋においては、所要降伏震度スペクトルに対して、見かけの有効入力動を考慮するのに等しい低減を考える必要がある。

b) 所要降伏震度スペクトルの低減の考え方

斜杭基礎を有する高架橋では、所要降伏震度スペクトルを算定する際の1自由度系の解析において、見かけの有効入力動を用いると精度が向上すると考えられる。また、結果として、応答の過大評価を回避できるものと考えられる。ただし、有効入力動の水平成分および回転成

図-26 非線形応答スペクトル法の概要

図-27 斜杭基礎高架橋の所要降伏震度スペクトル低減のための解析の概要

分を、4章で実施したように詳細な解析により算定する手法では、設計計算として使用が困難である。ここでは、逆ロッキング動による入力の低減結果を簡易に評価する手法を考える。

ある塑性率に対する所要降伏震度には入力地震動に比例するという性質がある。所要降伏震度および所要降伏震度スペクトルの本性質については付録2に解説している。この性質を利用すると、有効入力動の回転成分（式(1)での入力地震動）に対する見かけの有効入力動（式(2)での入力地震動）の比により、直杭基礎を有する高架橋の所要降伏震度スペクトルから斜杭基礎を有する高架橋の所要降伏震度スペクトルを算定できる。

有効入力動の回転成分に対する見かけの有効入力動の比 $\alpha^d(t)$ は次式で表される。

$$\alpha^d(t) = 1 - L \frac{\ddot{\theta}_{eff}^s(t)}{\ddot{u}_{eff}^s(t)} \quad (3)$$

$\alpha^d(t)$ を簡易な静的解析のみにより評価するため、図-27に示すように、慣性力の影響を考慮せず、地盤変位のみを静的作用として与えた解析を事前に行い、式(4)で近似的に評価することとした。

$$\alpha^s = 1 - L \frac{\theta_{eff}^s}{u_g^s + u_{bmax}^s} \quad (4)$$

ここで、 u_g^s は作用として与える地盤変位の地表面変位（基盤からの相対変位）であり、 u_{bmax}^s は基盤位置での入力地震動の最大変位である。つまり、右辺第二項の分母 $u_g^s + u_{bmax}^s$ は地表面での絶対変位に相当する値であ

図-28 直杭基礎 所要降伏震度スペクトルの精度検証

図-29 斜杭基礎 所要降伏震度スペクトルの精度検証

り、式(3)の右辺第二項の分母が絶対加速度となっていることに相当している。 θ_{eff}^s は静的解析により得られる基礎の位置での回転変位である。なお、基盤変位において、最大変位 u_{bmax}^s を考慮した理由は、式(3)で評価される低減率 $\alpha^d(t)$ は時々刻々変化するものであるが、式(4)で評価される低減率 α^s は一定値であるため、設計上安全側に値を算定できるようにするためである。

c) 応答値算定手法のフロー

上記の所要降伏震度スペクトルの低減を踏まえ、ここで検証する応答値算定手法のフローを整理する。

- 1) 構造物のプッシュ・オーバー解析による荷重-変位関係および等価固有周期・降伏震度の算定。
- 2) 図-27の地盤変位のみを与えた静的解析による基礎の回転変位の算定。
- 3) 式(4)で算定される α^s を用いた所要降伏震度スペクトルの低減。
- 4) 低減された所要降伏震度スペクトルを用いた非線形応答スペクトル法による慣性力の影響の算定。
- 5) 応答変位法により慣性力と地盤変位の影響を組合せた解析による高架橋の応答値の算定。

本応答値算定手法について、次項で動的解析法と比較した検証を行う。

(2) 提案した応答値算定手法の適用性の検証

前節で整理した応答値算定手法のフローの上で適用性を検証すべき項目は、「3) 式(4)で算定される α^d を用いた所要降伏震度スペクトルの低減」と「5) 応答変位法により慣性力と地盤変位の影響を組合せた解析による高架橋の応答値の算定」である。

a) 所要降伏震度スペクトル低減手法の適用性

有効入力動の水平成分を入力波として算定した所要降伏震度（直杭基礎を有する高架橋で用いる所要降伏震度）と見かけの有効入力動を入力波として算定した所要降伏震度（斜杭基礎を有する高架橋で用いるべき所要降伏震度）の比を算定し、式(4)に示された α^s と比較することで適用性を確認する。

前章の検討に用いた有効入力動の水平成分および見かけの有効入力動（図-23）を用いて所要降伏震度スペクトルを直杭基礎・斜杭基礎それぞれについて算定する。直杭基礎における検討は4章と同様、精度の指標を得るためである。所要降伏震度スペクトルを算定する際には、1自由度系の非線形性として骨格曲線にバイリニア型、履歴法則にClough型を用いた。結果を図-28・図-29に示す。図-28(a)・図-29(a)に、直杭基礎・斜杭基礎それぞれについて、目標靱性率3,4,5における所要降伏震度スペクトルを示した。また、図-28(b)・図-29(b)には、見かけの有効入力動により得られた所要降伏震度スペクトルを有効入力動の水平成分により得られた所要降伏震度スペクトルで除したスペクトル比を示した。図-28(b)・図-29(b)においては、式(4)に示された α^s を簡易法による低減率として示した。

まず注目する必要があるのは、直杭基礎において水平振動だけではなく、有効入力動の回転成分まで考えて詳細に所要降伏震度スペクトルを算定すると、短周期側でスペクトルが増幅している点である。増幅が地盤の1次モードに対応する周期0.62秒より短周期側で発生していることや、地盤の1次モードに対応する地盤変位分布が基礎の回転成分を励起しないことから、高次モードの影響で発生する回転成分が原因で発生した増幅であると考えられる。斜杭基礎の場合にも周期0.5秒以下の領域でスペクトルの増幅が見られているが、直杭基礎の場合と同様、高次モードに起因すると解釈するのが妥当である。本論とは別の議論であるため詳細に扱わないが、本結果は、高次モードに起因する回転振動が通常の設計計算において無視されていることを示すデータとしても、ある意味示唆が大きい。

上記の地盤の高次モードによるスペクトルの増幅を考慮に入れて斜杭基礎におけるスペクトルを解釈すると、周期が0.2秒より短い周期帯でのスペクトルの増幅は地盤の高次モードの影響によると考えられ、周期が0.2秒以上では広い周波数領域で簡易法による低減率 α^s は安全側の評価であることが分かる。

以上により、簡易手法としてここで想定した入力地震動に対しては、式(4)により算定された低減率 α' で所要降伏震度スペクトルを低減して良いことが示された。ただし、短周期側においては、現状、設計で考慮していない地盤の高次モードの影響があるため、実際の適用においては周期帯に制限を与える等の配慮が必要であると考えられる。また、非線形性の影響を受ける上記の結果は入力波の位相特性に依存することが考えられる。付録3に上記の他に2波の入力地震動を考え、同様の検討を実施した結果を示した。今回の検討の範囲においては式(4)による低減率 α' は妥当と考えられる結果となった。

b) 応答変位法の適用性

応答変位法は、地盤変位と慣性力を組合せた静的な作用を構造物に対して与え、応答値を算定するものである。地盤変位は、自由地盤のみの動的応答解析を実施し、地表面の地盤変位が最大となる時刻の地盤変位を用いる。慣性力は、所要降伏震度スペクトルを用いた非線形応答スペクトル法により算定した応答変位を構造物のプッシュ・オーバー解析で算定した荷重-変位関係に当てはめ、応答変位に相当する荷重（通常震度換算されている）を算定する。上記で算定される地盤変位ならびに慣性力はそれぞれの最大値として算定されているが、地震作用として考える場合には地盤変位と慣性力が位相差を伴って構造物に作用していることも考慮する必要がある¹³⁾。概念的には、慣性力と地盤変位の組合せ R_i は次の式で表現される。

$$\text{慣性力主体} \quad R_i = 1.0 \times R_a + \nu \times f(z) \quad (5)$$

$$\text{地盤変位主体} \quad R_i = \nu \times R_a + 1.0 \times f(z) \quad (6)$$

ここで、 R_a が慣性力、 $f(z)$ が地盤変位（ z は地表面からの深さ）を表し、 ν は慣性力と地盤変位を組み合わせるための補正係数を表す。上記はあくまで概念であり、式の上での和は作用の組合せを意味し、数値の和を意味している訳ではない。地盤変位主体のケースについてイメージを図-30に示す。本論文では補正係数の考え方は鉄道構造物の設計標準に準拠する⁷⁾。補正係数は構造物の降伏時の等価固有周期および地盤の固有周期から算定される。慣性力主体・地盤変位主体のそれぞれの場合について、補正係数の上限値と下限値を考え、最大4ケースの解析を行うものである。

応答変位法により得られた解析結果および動的解析により得られた応答値を比較して示す。なお、解析結果には応答変位法における入力として考慮した地盤変位も併記した。まず、図-31に杭の深さ方向の曲げモーメント分布を示す。動的解析の結果については、全時刻における最大曲げモーメント分布を示した。本検討では、左右の杭で発生した曲げモーメントに差異が見られなかったため、片方の杭の結果のみ示している。また、これまで

図-30 応答変位法における慣性力と地盤変位の組合せのイメージ（地盤変位主体）

図-31 動的解析法と応答変位法による杭の曲げモーメント分布の比較

の検討と同様に、応答変位法の精度についての指標として直杭基礎についても結果を示している。

まず、直杭基礎の断面力について考察する。深さ10mより浅い領域では、慣性力主体のケースで発生する曲げモーメントが地盤変位主体のケースで発生する曲げモーメントを上回っている。また、特に杭頭付近の曲げモーメント分布については慣性力主体のケースの方が動的解析の結果をより正確に表現できていることが分かる。10mより深い部分に関しては、地盤変位主体の解析ケースの方が杭に発生する曲げモーメント分布を精度よく表現できていることも分かる。

斜杭基礎については直杭基礎と異なり、浅い領域についても地盤変位主体の解析ケースの方が動的解析の結果を精度よく表現している。特に、既往の研究でも指摘されている杭頭部に発生する比較的大きな断面力について、適切に表現している。また、断面力の評価の精度についても、直杭基礎の場合と同等と考えて問題ない。

また、上部構造物の応答についても簡単に示す。表-1・表-2に柱端部に発生する曲げモーメントについて、動的解析の結果および応答変位法の各ケースの結果を示した。直杭基礎に比べて斜杭基礎では、慣性力の影響が低減されていることから、動的解析により発生している

曲げモーメントの値が小さくなっているが、応答変位法による結果も同様の傾向となっている。また、動的解析法で得られる応答値より応答変位法で得られる設計応答値の方が大きいため、上記の静的解析法ベースの簡易な応答値算定手法で安全側に応答を評価できていることが分かる。

c) 適用性の検証に関するまとめ

以上では、5章(1)c)で提案した斜杭基礎を有する高架橋における静的解析法による応答値算定手法について適用性の検証を行った。本手法のポイントは、逆ロッキング動の影響を取り入れるため、逆ロッキング動の影響による所要降伏震度の低減手法を式(4)により提案したことである。適用性の検証は、所要降伏震度の低減手法に関する検証と、最終的に応答変位法で算定される部材の断面力の検証について行った。結果として、一例における検証ではあるが、本解析対象における適用性は確認できた。

6. まとめ

本研究は、斜杭基礎を有する高架橋について、その地震応答特性について相互作用の観点から研究したものである。具体的には、以下のことが分かった。

- 1) 斜杭基礎においては、地盤と基礎の相互作用のうち、地盤変位の影響で基礎に回転振動が発生する。
- 2) 上記で発生する回転振動は、地盤の水平変位方向と逆位相（逆ロッキング動）になる傾向がある。また、有効入力動を算定すると水平成分に加えて回転成分の影響が大きいことが分かる。
- 3) 斜杭基礎を有する高架橋の振動は、有効入力動の回転成分を考慮することで、簡易な1自由度系の解析により評価することができる。

また、本論文では、設計計算を念頭に逆ロッキング動の影響を取り入れた静的応答値算定手法を提案し、その適用性を確認した。検討においては、逆ロッキング動を適切に考慮した慣性力の影響を算定し、応答変位法により、地盤変位と慣性力の影響を適切に組合せて、応答値の算定を行う必要があることが分かった。

付録1 地盤の剛性を変化させた場合の斜杭基礎を有する高架橋の地震応答

地盤条件により応答特性が著しく変化しないことを確認するため、図-32に示す地盤条件においても地震応答解析を実施した。この時、地盤の弾性周期は0.45秒であり、鉄道においては普通地盤（G3地盤）に分類される

表-1 柱端部に発生する曲げモーメント 直杭基礎

	動的解析	応答変位法			
		慣性力主体		地盤変位主体	
		上限値	下限値	上限値	下限値
左柱上端	4.12E+03	4.74E+03	4.74E+03	2.53E+03	2.18E+03
右柱上端	4.05E+03	4.79E+03	4.79E+03	2.55E+03	2.14E+03
左柱下端	4.38E+03	4.90E+03	4.90E+03	2.75E+03	2.22E+03
右柱下端	4.27E+03	4.91E+03	4.91E+03	2.68E+03	2.29E+03

□: 応答変位法で応答値が最大となる解析ケース (単位: kN・m)

表-2 柱端部に発生する曲げモーメント 斜杭基礎

	動的解析	応答変位法			
		慣性力主体		地盤変位主体	
		上限値	下限値	上限値	下限値
左柱上端	3.32E+03	4.17E+03	4.12E+03	2.58E+03	1.59E+03
右柱上端	3.30E+03	4.25E+03	4.44E+03	2.56E+03	1.66E+03
左柱下端	3.51E+03	4.38E+03	4.20E+03	2.59E+03	1.82E+03
右柱下端	3.45E+03	4.47E+03	4.50E+03	2.64E+03	1.83E+03

□: 応答変位法で応答値が最大となる解析ケース (単位: kN・m)

図-32 地盤剛性を変化させた検討における地盤の土質柱状図

図-33 各高架橋天端における加速度応答波形

(a) 水平方向

(b) 回転方向

図-34 各高架橋天端における変位応答波形

地盤となっている。応答解析結果として、構造物天端の加速度波形および変位波形を示す(図-33・図-34)。加速度応答波形の差は基礎形式によって少ないが、水平変位応答波形を比較すると斜杭基礎を有する高架橋の方が

図-35 各高架橋天端における加速度応答波形

図-36 入力波の振幅調整による所要降伏震度の変化

直杭基礎を有する高架橋より応答が小さくなっていることが分かる。また、回転変位波形の比較から斜杭基礎において逆ロッキング動が発生していることも読み取ることができる。以上より、2章で考察した基礎形式ごとの高架橋の応答特性は、地盤への依存が限定的であることが確認できた。

付録2 有効入力動が低減される場合の所要降伏震度スペクトルの変化

図-35に示した2つの波形を用いて所要降伏震度スペクトルを算定する。図に示した2つの入力波形は、図-23に示した斜杭基礎における有効入力動の水平成分（元波形）およびそれを振幅調整により80%に低減した波形である。所要降伏震度スペクトルの算定における1自由度系の解析モデルの非線形性は、骨格曲線をバイリニア型で設定し、履歴法則はClough型で設定した。算定結果を図-36に示す。各目標応答塑性率で2つの入力波による結果を比較すると、スペクトルが同様の形状になっていることが確認できる。また、元波形により算定した所要降伏震度に対する元波形を80%に低減した波形により算定した所要降伏震度の比はちょうど80%になっていることを確認した。この検討により、所要降伏震度スペクトルが入力に比例する、という性質を示すことができた。

付録3 所要降伏震度スペクトル算定における地震波の感度

5章において所要降伏震度スペクトルの低減に関する

(a) 神戸 JMA

(b) 釧路沖地震

図-37 検討地震波

(a) 神戸 JMA

(b) 釧路沖地震

図-38 斜杭基礎 所要降伏震度スペクトルの精度検証

考察を行った。しかし、所要降伏震度スペクトルは地震波の位相特性の影響を受けることが知られているため、本検討では、位相特性の異なる地震波でも検討する必要がある。

ここでは、5章で実施した鉄道の設計地震動に加えて2ケースの地震波について所要降伏震度スペクトルの低減に関する検討結果を示す。斜杭基礎についてのみ検討を行い、有効入力動の水平成分のみ使用した所要降伏震度スペクトルと見かけの有効入力動を使用した所要降伏震度スペクトルの比と、式(4)で算定される低減率 α と比較した。検討に用いた地震波は次の2つである（図-37）。

- ・1995年兵庫県南部地震（神戸JMA）
- ・1993年釧路沖地震

これらの地震波は地表面で得られた地震波であるが、ここでは異なる位相情報を持った波による検討と割り切り、各波を基盤位置で考慮した。算定結果を図-38に示す。簡易法による低減率はいずれも、詳細な検討結果と整合する結果となっており、この2波による検討においても、簡易な低減率により所要降伏震度スペクトルの低減を表現して良いことが示された。

参考文献

- 1) 木村亮, 牧野洋志, 大川賢紀, 亀井宏之, 張鋒: 斜杭を有する群杭基礎の静的水平支持力特性, 土木学会論文集, No.722/III-61, pp.97-107, 2002.
- 2) 大川賢紀, 亀井宏之, 木村亮, 張鋒: 斜杭を有する群杭基礎の動的挙動に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.729/III-62, pp.31-41, 2003.
- 3) 大川賢紀, 亀井宏之, 張鋒, 樋口美紀恵, 木村亮: 斜杭を有する鋼管杭基礎の地震時の支持性能, 土木学会論文集, No.806/III-73, pp.1-12, 2005.
- 4) Giannakou, A., Gerolymos, N., Gazetas, G., Tazoh, T. and Anastasopoulos, I.: Seismic behavior of batter piles: elastic response, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 136, No. 9, pp. 1187-1199, 2010.
- 5) 田蔵隆, 張至鎬, 田地陽一, 木全宏之, 坂井康伸, 齊藤正人, Chandra Goit: 斜杭基礎のキネマチック・インターアクションに関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.1, pp.51-66, 2014.
- 6) 清田三四郎, 米澤豊司, 青木一二三, 神田政幸, 西岡英俊, 出羽利行: 斜杭基礎の水平抵抗特性と鉄道構造物への適用性の検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp.293-307, 2010.
- 7) 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.
- 8) 室野剛隆, 野上雄太: S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力~ひずみ関係, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.494-497, 2006.
- 9) 長谷川正幸, 中井正一: 杭基礎の有効入力に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第422号, pp.105-115, 1991.
- 10) Konagai, K.: An upright single beam equivalent to grouped piles, 生産研究, 50巻9号, pp.13-16, 1998.
- 11) 室野剛隆, 坂井公俊: 短周期の卓越した地震動が橋梁・高架橋の耐震設計に与える影響評価, 鉄道総研報告, Vol.26, No.11, 2012.
- 12) 室野剛隆, 佐藤勉: 構造物の損傷を考慮した非線形応答スペクトル法の適用, 土木学会地震工学論文集, 29巻, pp.520-528, 2007.
- 13) 室野剛隆, 西村昭彦, 永妻真治: 軟弱地盤中の杭基礎構造物の地震応答特性と耐震設計への応用, 構造工学論文集, Vol. 44A, 1998.3.

(2014. 10. 22 受付)

SEISMIC RESPONSE OF A VIADUCT WITH BATTER PILES IN CONSIDERATION OF DYNAMIC SOIL-PILE INTERACTION

Hiroki MOTOYAMA, Yoshitaka MURONO, Yuusuke TAKANO and Hifumi AOKI

It is well known that seismic response of a viaduct with batter piles tends to show the out-of-phase rocking motion unlike the case of that with normal piles. In this research, we studied out-of-phase rocking motion in consideration of dynamic soil-pile interaction and effect of reduction of inertia force triggered by out-of-phase rocking motion. We analyzed the kinematic interaction of a viaduct with batter piles with a numerical method. Next, we focused on the effective motion of batter piles and considered the effect of reduction of inertia force. The analytical results showed that the appropriate simple model which considered rotation component of effective motion could express the seismic response of the viaduct with batter piles. Finally, we proposed the static method for a seismic response analysis of the viaduct with batter piles, and confirmed the applicability of the proposed method.