

# 斜杭基礎の振動メカニズムを考慮した 静的解析による地震時応答解析法の提案

本山 紘希<sup>1</sup>・仲秋 秀祐<sup>1</sup>・室野 剛隆<sup>1</sup>・西岡 英俊<sup>1</sup>・森野 達也<sup>2</sup>  
陶山 雄介<sup>2</sup>・青木 一二三<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 (公財) 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)

Email:motoyama@rtri.or.jp

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>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)

斜杭基礎を有する高架橋においては、通常の直杭基礎とは異なり、上部構造物に水平振動と逆向きの回転振動(逆ロッキング動)が発生する。これにより、上部構造物の地震時応答の低減効果が期待される。本研究ではこの低減効果を高架橋の実設計で活用できるように、応答低減効果を表現でき、かつ簡易な応答値算定手法を提案することを目的としている。そこで、まず、斜杭基礎構造物において逆ロッキング動が発生する要因について考察した。次に、逆ロッキング動を考慮した場合の高架橋全体の振動について考察し、地震時慣性力が低減されていることを確認した。地震時の慣性力の評価手法として非線形応答スペクトル法の適用性を検討し、応答変位法による静的応答値算定手法の適用性を検討した。

**Key Words :** batter pile, seismic response, soil-structure interaction, seismic design

## 1. はじめに

土木構造物の耐震設計においては、地震時の応答を設定された制限値内に抑える必要がある。ある程度の試行錯誤により、通常想定される構造諸元内で構造物を設計できれば問題はない。しかし、例えば鉄道においては、列車走行安全性上の要求を満足するため振動変位に関する制限値があり、軟弱地盤中の高架橋では、通常想定される構造諸元により制限値を満足できない事例も存在する。このような場合、応答値を合理的に低減できる構造形式を採用できれば都合がよく、斜杭基礎はその地震時挙動の特徴から一つの選択肢として期待できる。

斜杭基礎の地震時挙動に関しては、これまでも実験的・解析的に様々な検討が行われてきた。これらの検討では、直杭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<sup>1)2)</sup>に加えて、斜杭基礎の特徴的な挙動である、水平振動と逆向きの回転振動(ここでは、逆ロッキング動と呼称する)についての検討も多くなされている<sup>3)4)5)6)</sup>。逆ロッキング動の検討においては、現象解明に終始するものがほとんどであり、実用においては、斜杭基礎化することの効果に期待した詳細な動的解析等による必要があった。著者らもこれまで、鉄道高架橋においての活用を念頭

に、様々な検討を行ってきた<sup>7)</sup>。これにより、斜杭基礎の水平支持力の増加に期待した設計の合理化は達成したが、逆ロッキング動の積極的な活用には至っていなかった。これは逆ロッキング動を定量的に評価し、通常的设计計算で使用可能な手法として整理できなかったためである。

そこで、本研究では、まず、逆ロッキング動の発生要因を分析し、斜杭基礎を有する高架橋の地震時の振動メカニズムおよび応答低減メカニズムについて考察を行った。さらに、逆ロッキング動の影響を定量的に既存の設計計算に付加する手法の提案を行い、詳細な動的解析の結果と比較することで手法の適用性を確認した。

## 2. 検討対象構造物

ここでは、[図-1](#)に示す鉄道高架橋をモデルケースとし、検討を行う。この高架橋は、[図-2](#)に示す地盤中に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G4地盤(普通～軟弱地盤)と分類される<sup>8)</sup>。斜杭基礎は、本高架橋において、基礎に5度の射角を与えることで想定した。

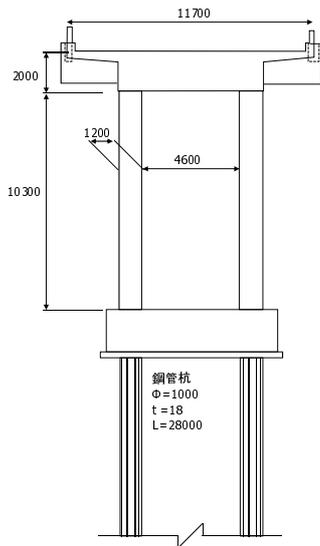


図-1 検討におけるモデルケース

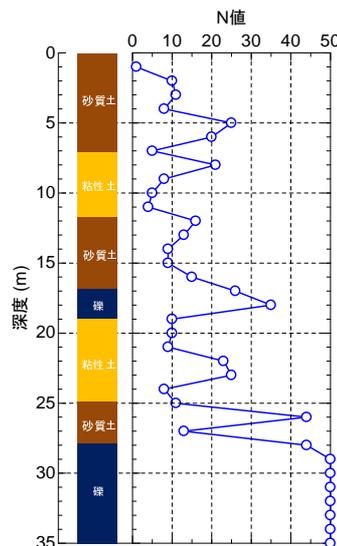


図-2 地盤の土質柱状図および  
N値の深度分布

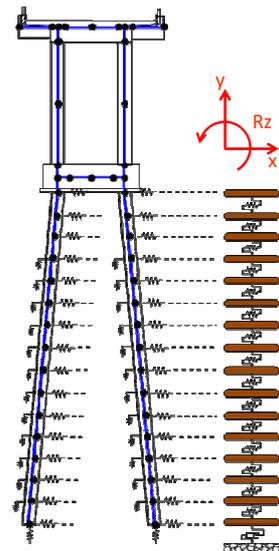


図-3 解析モデル

まずは、上記で想定した斜杭基礎高架橋の地震時の応答を整理するため、動的解析を行うためのモデル化を行った。解析モデルは図-3に示すように構造物を梁要素で、地盤をばね要素で表現した質点系モデルにより作成した。また、自由地盤を一体としたモデル化を行っており、解析モデル全体としては、自由地盤の下端への地震動の入力を想定したものとなっている。斜杭基礎の地震時の応答特性を直杭基礎との比較により示すため、直杭基礎においても同様のモデル化を行っている。

上記で作成した解析モデルに対して鉄道の耐震設計で用いられるL2スペクトルIIの地震動(図-4)を入力した。解析結果として、直杭基礎と斜杭基礎における構造物天端の水平変位および回転変位を示す(図-5)。直杭基礎に比べて斜杭基礎の高架橋では水平変位量が小さくなるとともに、回転変位がほぼ正負逆になっていることが分かる。応答の低減効果および逆ロッキング動の発生について示唆される結果となっている。

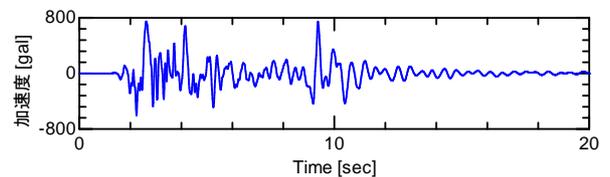
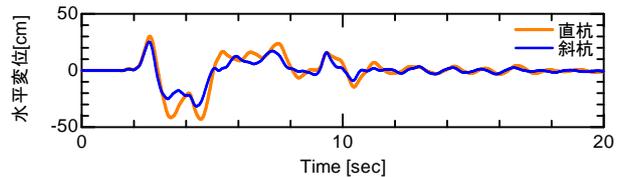
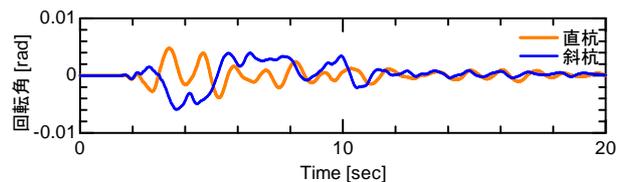


図-4 入力地震動 (L2 地震動スペクトルII)



(a) 水平振動



(b) 回転振動

図-5 構造物天端の変位応答

### 3. 斜杭基礎の地盤変位の影響による応答の分析

#### (1) 有効入力動による分析

有効入力動は、構造物の質量をゼロとし、地盤変位による影響のみを考慮した動的解析を行った場合の基礎の頂部(本検討では地中梁の位置)の応答として得られる。解析手法としては、精緻に杭の影響を評価する手法が提案されている<sup>9,10</sup>が、非線形性を考慮する場合は、これらの精緻な手法に地盤を等価線形として扱う工夫を行った手法<sup>11</sup>や、地盤をソリッド要素で分割したFEM解析による手法も見られる<sup>6</sup>。

本検討では、地盤はソリッド要素の代わりに質点系で

モデル化されているが、質点系モデルの適用範囲内においては、地盤変位の影響のみを考慮した解析を行うことで、本モデルにおける有効入力動が評価できると考えられる。

線形解析により、実際に有効入力動を算定した結果を図-6に示す。図には、(a)直杭基礎の有効入力動および(b)斜杭基礎の有効入力動をそれぞれ水平成分・回転成分について示した。回転成分を示す際には、水平成分と重ねて示した。図-6(b)を見ると、斜杭基礎では回転成分が水平成分と逆向きに発生していることが分かる(逆ロッキング動)。

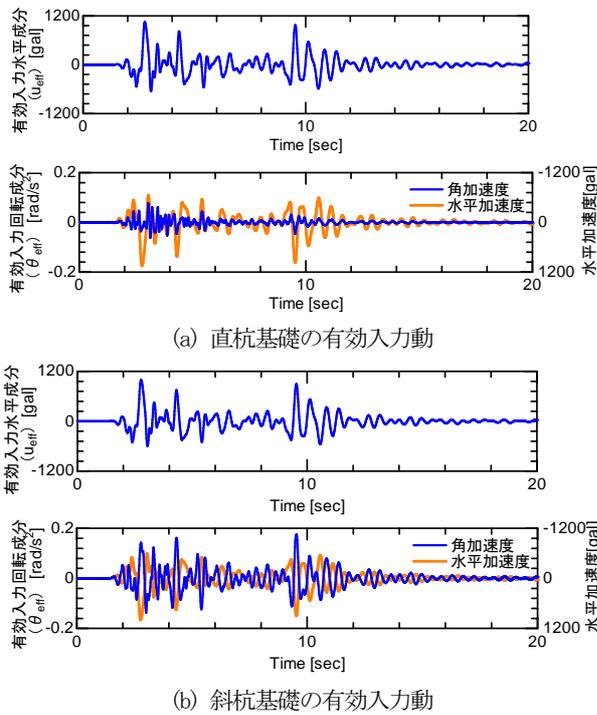


図-6 線形解析による有効入力動

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を算定し、定常的な性質を周波数領域において示す。入力地震動としては、L2スペクトルⅡに加えてホワイトノイズによる検討も行った。ここでも、水平成分および回転成分について検討を行った。結果を図-7に示す。

顕著な結果として見られるのは、直杭基礎・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、直杭基礎に比べて回転成分の係数が大きくなるとともに、周波数領域で複雑に変化する様子が見られる。これらの違いは、L2スペクトルⅡを用いた結果とホワイトノイズを用いた結果が一致することにより、直杭基礎と斜杭基礎で表れる定常的なものであると分析できる。つまり、図-6で示された斜杭基礎の有効入力動の水平成分と回転成分が逆向きに発生する現象は定常的な斜杭基礎の性質として現れたものと解釈できる。

なお、諸条件が異なるため定量的な比較にはならないが、直杭の結果について、文献9と比較すると有効入力係数の定性的な傾向は整合がとれている。つまり、有効入力係数の水平成分は0Hzにおいて1.0となり、振動数が高くなるにつれ徐々に減少する。また、回転成分は0Hzにおいて0であり、振動数が高くなるにつれ値が大きくなり、ある振動数でピークを持つ傾向を示している。質点系モデルにより算定した有効入力動は精度が検証されたものではないが、本モデル内での検討に終止する上では、十分であると考えられる。

定常的な検討ではないが、非線形解析でも有効入力動および周波数領域の有効入力係数を算定した。時刻歴の

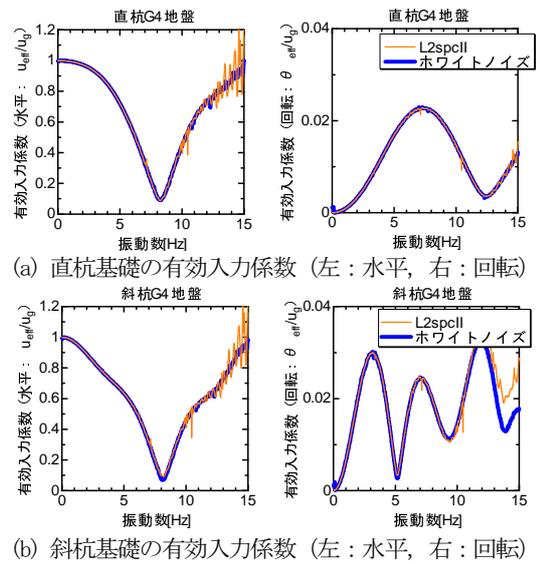


図-7 有効入力係数

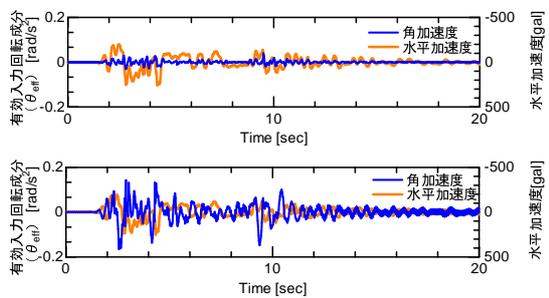


図-8 非線形解析における有効入力動 (上：直杭，下：斜杭)

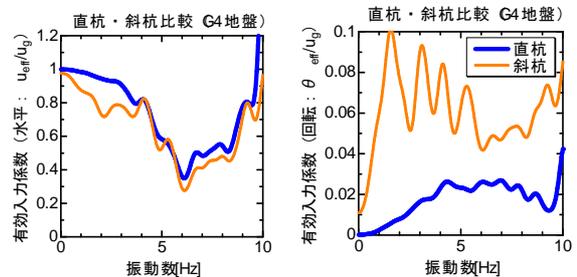


図-9 非線形解析における有効入力動係数 (左：水平成分，右：回転成分)

有効入力動については、回転成分に着目した結果を示した(図-8)。有効入力係数は、実際に得られた値に対して、平滑化を行った結果を示した(図-9)。図-8より、斜杭基礎においては、線形解析と同様、逆ロックンク動が発生していることが分かる。図-9の結果からは、有効入力係数についても、線形解析の場合と同様、直杭基礎に比べて斜杭基礎では回転振動の振幅が大きく、変化が複雑である傾向が見られる。

## (2) 地盤変位と基礎に働く回転動の幾何的性質

上記と同様、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-10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、ここでは地表面の相対変位と回転角の比率に注目していると整理できる。

図-11に線形解析における斜杭の解析結果を示す。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、一定値を示すことが確認できる。次に非線形解析による結果を図-12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き部分においては、ほぼ一定の値を示すことが分かる。また、図-11および図-12には幾何的性質として表現可能かどうかの確認のため、静的に地盤変位を載荷し、載荷した地盤変位の地表面変位量と基礎に発生した回転角の比を算定し、重ね描いている。この値は、動的解析で得られた上述の値と整合が取れている。

以上の検討により、有効入力動の回転成分は、ある地盤変位分布形状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。ここで得られる値は正の値であるが、座標系は図-3に示すものであり、逆ロッキング動であることが分かる。なお、直杭においても同様の検討を行っているが、そもそもの回転成分の発生量が小さく、上記の比はほぼゼロで一定値であった。

### (3) 相互作用による検討のまとめ

上記(1)(2)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。線形解析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。また、非線形解析においても、傾向として逆ロッキング動の影響が大きいことが示されたと考えられる。また、基礎に働く有効入力動の回転成分は、地盤変位形状に対して、ある一定の比率で発生する傾向にあることが示された。

## 4. 有効入力動の回転成分を考慮した振動メカニズム

### (1) 1自由度系の振動による表現

通常の直杭形式の高架橋においては、高架橋がトップヘヴィであ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。この性質により高架橋は非線形応答スペクトル法により

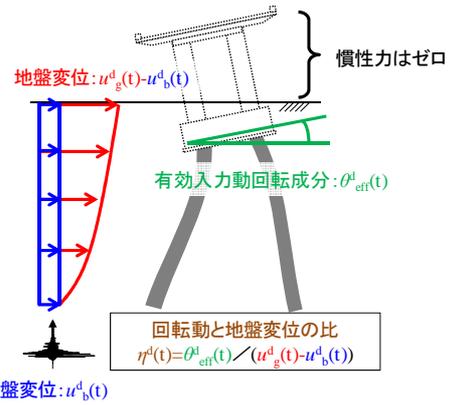


図-10 地盤変位と有効入力回転成分との比の概要

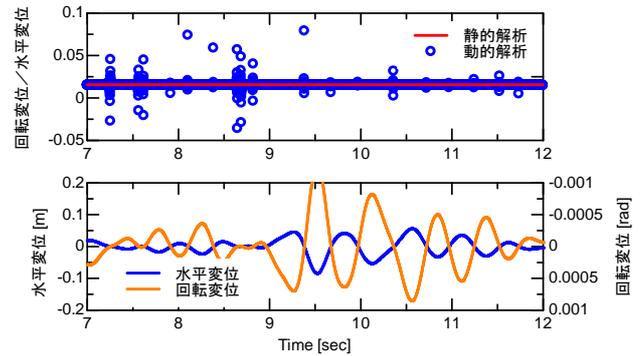


図-11 地盤変位と有効入力回転成分との比 (線形解析)

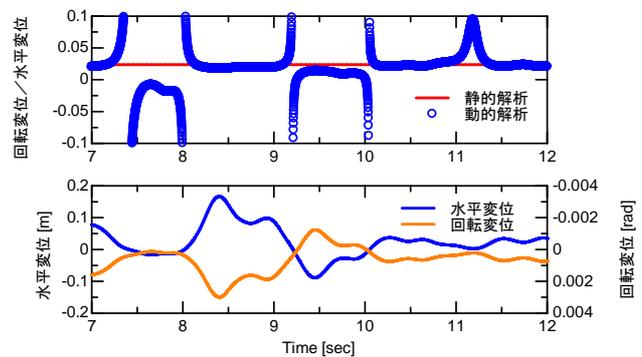


図-12 地盤変位と有効入力回転成分との比 (非線形解析)

構造物の慣性力の影響による応答値を評価できる<sup>12)</sup>。斜杭基礎の高架橋においても、構造物自体がトップヘヴィであることに変わりなく、直杭基礎高架橋と同様、1自由度系の振動で表現可能であることが期待される。

まず、直杭基礎高架橋で用いられる1自由度系の運動方程式を示す。

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

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、 $\ddot{u}_{eff}$  は構造物に対する有効入力動である。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、斜杭基礎高架橋では、有効入力動の

回転成分の影響を上手く運動方程式で表現する必要がある。図-13に提案する1自由度系の振動のモデルを示す。対応する運動方程式としては、次式を提案する。

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

ここで、 $\ddot{\theta}_{eff}$  は構造物における有効入力動の回転成分であり、 $L$ は構造物高さである。慣性力が働く位置で構造物高さを考慮した回転振動 $L\ddot{\theta}_{eff}$ 分の低減を考慮することで、あたかも入力地震動が $L\ddot{\theta}_{eff}$ だけ低減されたような運動方程式が立式されることになる。ここでは、この低減された入力 $\ddot{u}_{eff} - L\ddot{\theta}_{eff}$ を回転成分を考慮した「見かけの有効入力動」と呼称する。斜杭において、有効入力動の水平成分 $\ddot{u}_{eff}$ と見かけの有効入力動 $\ddot{u}_{eff} - L\ddot{\theta}_{eff}$ の比較を図-14に示した。

式(2)で示された運動方程式により高架橋の振動が表現できることを確認する。まずは、1自由度系のモデルで用いる復元力特性を設定する。復元力特性の設定については、構造物のプッシュ・オーバー解析から得られる荷重-変位関係を再現できる骨格曲線を設定し、clough型の履歴則を与える。ここでは、図-15に示すように、トリリニア型の骨格曲線を用いることで、適切に荷重-変位関係を表現できることが分かったため、骨格曲線としてはトリリニア型を採用した。

構造物の詳細モデルにおける構造物天端の加速度応答と、1自由度系モデルにおける加速度応答を比較する。1自由度系モデルにおいては、有効入力動の水平成分を入力地震動としたもの(式(1))および見かけの有効入力動を入力地震動としたもの(式(2))の感度についても検討を行う。解析結果について、振幅の大きい5秒間の加速度応答を抜き出し、図-16に示す。直杭のケースにおいては、有効入力動の回転成分がほぼゼロであることから、回転成分の考慮の有無にかかわらず、詳細モデルによる解析の結果は1自由度系の解析により表現されている。一方、斜杭のケースにおいては、1自由度系の解析で、回転成分を考慮したものとしていないものの違いが現れており、見かけの有効入力動を考慮した場合の方が、詳細モデルの解析結果を適切に表現できている。このことから、適切に有効入力動の回転成分を取り扱うことで、構造物の詳細な応答を1自由度系の振動で表現できることが分かる。また、見かけの有効入力動に対応した所要降伏震度スペクトルを作成することで、斜杭基礎高架橋についても、非線形応答スペクトル法の適用が可能であることが分かる。

## (2) 応答低減効果の確認

(1)の検討により、斜杭基礎においては見かけの有効入力動を用いて1自由度系の地震応答解析を行うことに

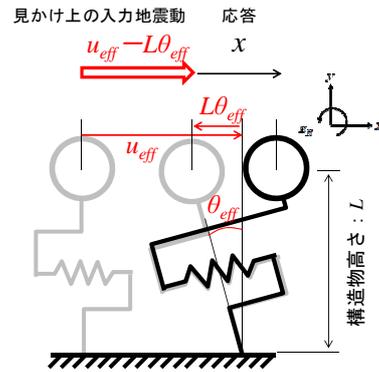


図-13 斜杭基礎高架橋の1自由度系の振動モデル

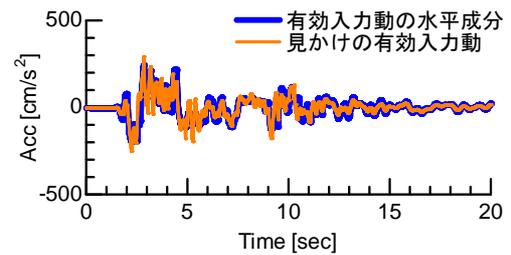


図-14 有効入力動の水平成分と見かけの有効入力動

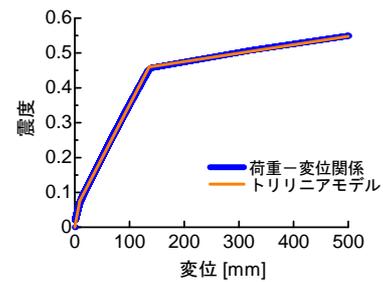
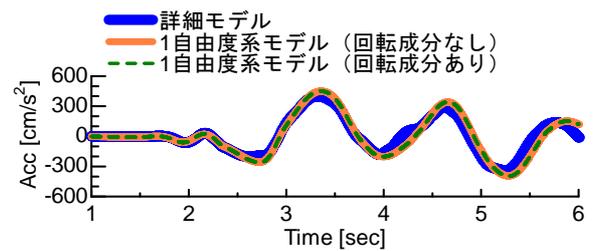
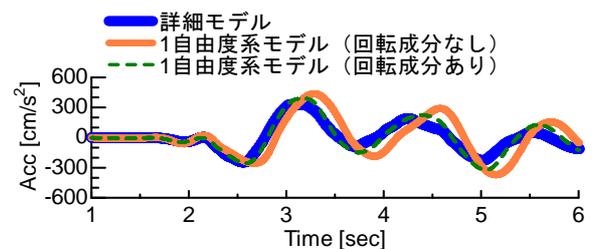


図-15 荷重-変位関係とトリリニア型による1自由度系のモデル化



(a)直杭形式



(b)斜杭形式

図-16 詳細モデルと1自由度系モデルの解析結果の比較

より、高架橋の振動を表現できることが分かった。ここでは、有効入力動の水平成分を用いる振動解析（式(1)）に対して、見かけの有効入力動を用いる場合（式(2)）では、応答が低減されることを示す。

応答の比較においては、所要降伏震度のスペクトルを用いる。非線形応答スペクトルは、周期をパラメータに1自由度解析を実施し、縦軸に非線形応答を図示したものである。所要降伏震度スペクトルも、横軸に周期、縦軸に降伏震度をとって、目標塑性率毎に構造物の等価固有周期と降伏震度の関係を図化したものであり、周期および降伏震度をパラメータとした1自由度系の解析を多数実施することで作成する。入力に変化し、応答が低減されると、所要降伏震度スペクトルの振幅は減少する。ここでは、式(1)および式(2)による所要降伏震度スペクトルをそれぞれ算定し、スペクトルの比を評価することで、各周期における応答の変化について定量的に把握する。

図-17に直杭基礎の結果を、図-18に斜杭基礎の結果を示す。直杭基礎の結果から分かるように、直杭基礎であっても短周期側では有効入力動に回転成分が発生し、それが影響で応答が増幅している。これは、地盤の高次モードの影響により杭基礎に発生する回転動であると考えられ、耐震設計においては、一般には無視されている。斜杭の結果を見ると、短周期側では直杭と同様応答の増幅が見られるが、地盤の周期より長い周期帯においては、ほぼ応答が低減している様子が見られる。短周期成分については、ひとまず直杭基礎と同様無視するとすると、斜杭化することにより、有効入力動の回転成分の影響（逆ロッキング動の影響）により、構造物の応答が低減されていることが確認できた。

### (3) 応答低減効果の簡易算定手法の提案

実設計に上記の応答低減効果を展開していくためには、スペクトルの低減比を簡易に算定する手法が必要になる。ここでは、地盤変位のみを与えた静的解析法により得られる基礎の回転角と入力した地盤変位の比から低減比を推定する手法を提案する。

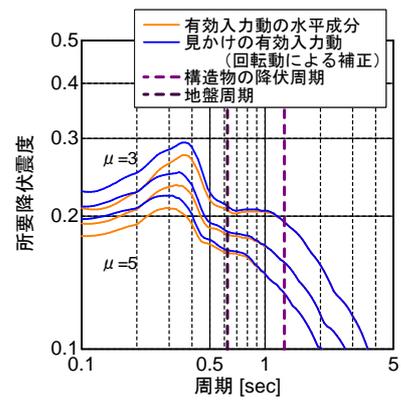
まず、式(2)を次のように式変形する。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\alpha\ddot{u}_{eff} \quad (3)$$

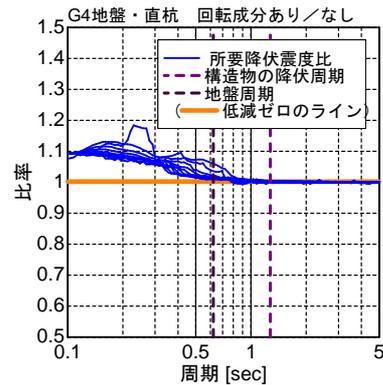
ここに、

$$\alpha = 1 - L \frac{\ddot{\theta}_{eff}}{\ddot{u}_{eff}} \quad (4)$$

である。この $\alpha$ は、回転動と水平動の比を用いて表されている。図-10に示したが、地表面の変位と有効入力動の回転成分の比は動的解析により算定した場合と静的解析による場合で整合する。そこで、式(4)の $\alpha$ を次

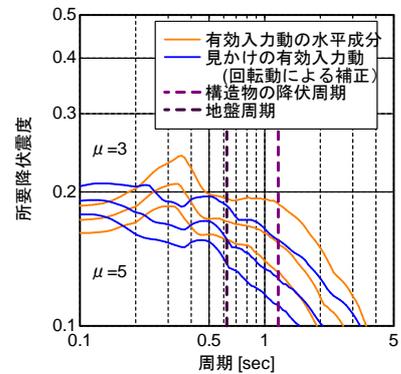


(a)所要降伏震度スペクトル

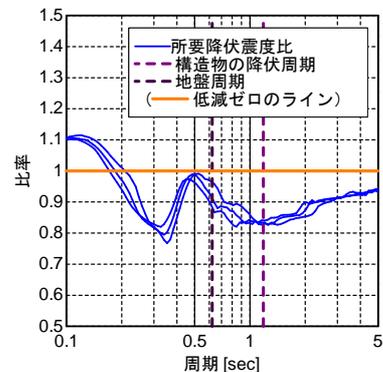


(b)所要降伏震度スペクトルの比

図-17 直杭基礎の所要降伏震度スペクトル比



(a)所要降伏震度スペクトル



(b)所要降伏震度スペクトルの比

図-18 斜杭基礎の所要降伏震度スペクトル比

の式で近似できないか検討を行う。

$$\alpha = 1 - L \frac{\ddot{\theta}_{eff}}{\ddot{u}_{eff}} \approx 1 - L \frac{\theta_{eff}^s}{u_g^s + u_b^s} \quad (5)$$

ここで、 $\theta_{eff}^s$  は静的に地盤変位のみを与えた場合に基礎に位置に発生する回転動であり、 $u_g^s, u_b^s$  はそれぞれ、応答変位法で静的に与える地表面の地盤変位および基礎位置の最大変位とする。図-18 (b)に示したスペクトルの比に、式(5)で得られる静的解析による低減比の値を重ねて図-19示す。地盤周期より長い周期帯においては、静的解析による低減比で所要降伏震度のスペクトル比をほぼ包絡できており、静的解析により低減比を評価できる可能性が示された。なお、ここでは省略するが、ここでの検討が非線形解析であるため、所要降伏震度のスペクトル比は定常的な性質として得られていないため、位相特性の異なるいくつかの地震動で同様の検討を行い、提案手法の妥当性については別途検証を行った。

#### (4) 振動メカニズムのまとめ

ここでの検討により、有効入力動の回転成分を式(2)の形で運動方程式として盛り込むことで、斜杭基礎高架橋の振動が1自由度系の振動として評価できることが分かった。また、同様の運動方程式を用いて得られる所要降伏震度スペクトルが通常の運動方程式(式(1))を用いて得られる所要降伏震度スペクトルより小さくなる傾向になることから、斜杭基礎高架橋では、逆ロッキング動の影響により応答が低減されることが示された。また、この応答低減の簡易な評価手法として式(5)を用いて所要降伏震度スペクトルを低減する手法を提案した。

### 5. 応答変位法の適用性の確認

既往の研究でも指摘されているように<sup>例えは5)</sup>、斜杭基礎では基礎と地盤の相互作用の影響により、杭頭で負担する断面力が大きくなるため、基礎と構造物の相互作用の影響を考慮できる応答値算定手法を用いなければならない。有用な手法として、応答変位法が考えられる。ここでは、応答変位法により基礎の断面力を算定し、動的解析による詳細な解析結果との比較を行うことで、応答変位法の適用性を検討した。

応答変位法で用いる作用として、4章で説明された斜杭基礎高架橋の振動メカニズムを考慮した非線形応答スペクトル法により算定される慣性力と、地盤変位を組合せる。組合せ方については、鉄道の設計標準の手法を用いた<sup>8)</sup>。図-20に慣性力と地盤変位の組合せのイメージを

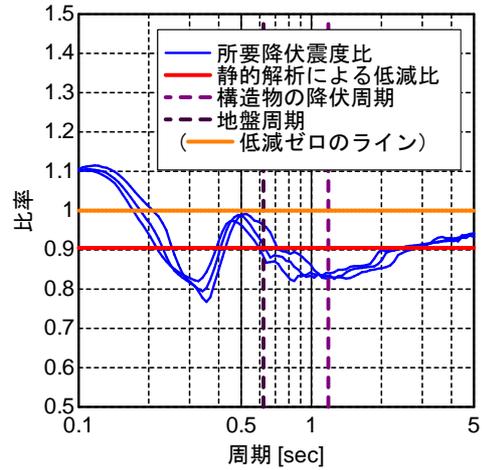


図-19 静的解析による低減比の評価

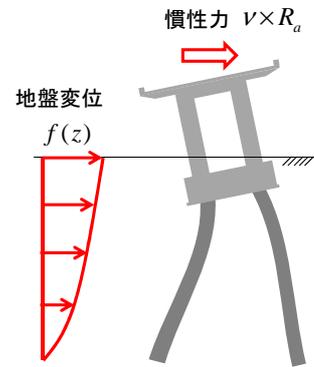


図-20 応答変位法における慣性力と地盤変位の組合せのイメージ(地盤変位主体)

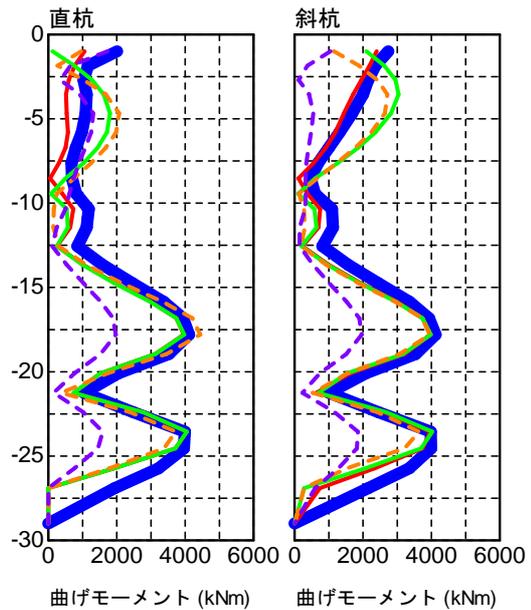
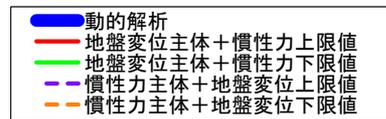


図-21 動的解析法と応答変位法による杭の曲げモーメント分布の比較

示すが、概念的には、慣性力と地盤変位の組合せ  $R_t$  は次の式で表現される。

$$\text{慣性力主体} \quad R_t = 1.0 \times R_a + \nu \times f(z) \quad (6)$$

$$\text{地盤変位主体} \quad R_t = \nu \times R_a + 1.0 \times f(z) \quad (7)$$

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、 $\nu$  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。この補正係数  $\nu$  は、地盤の固有周期と構造物の等価固有周期の関係から設定される値であり、上限値と下限値を考慮する。この慣性力の影響と地盤変位の影響の組合せについては、一般の杭基礎高架橋に対して設定されたものである。ここでは、斜杭基礎高架橋においても、同様の作用の組合せによって、構造物の応答を表現できるかを検討する。

解析結果として杭に発生する最大断面力分布を図-21に示す。ここでは、適用性の程度の参考値として直杭基礎に関する結果も示したが、これとの比較で解析結果を見ると、斜杭基礎でも動的解析により得られた杭の断面力分布を静的解析で適切に表現できている。特に地盤変位主体のケースで杭頭の断面力の増加を表現できている点は注目すべき点であると考えられる。

以上により、設計で使用可能な手法として応答変位法の適用性が検証された。

## 6. まとめ

本研究は、斜杭基礎の逆ロッキング動による応答値低減効果を積極的に活用した構造物の応答値算定手法を提案するものである。具体的には次の検討を行った。

- ①斜杭基礎高架橋における逆ロッキング動発生メカニズムの整理
- ②逆ロッキング動を考慮した構造物の振動モデルの提案および適用性の確認
- ③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場合のスペクトルの低減方法の提案
- ④構造物全体の地震時応答値算定手法として、応答変位法の適用性の検証

これらの検討により、斜杭基礎高架橋においても、通常の設計実務で用いられる静的解析法により、地震時応答値の算定の可能性を示すことができた。

## 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, 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, 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, 1-12, 2005.
- 4) A. Giannakou, N. Gerolymos, G. Gazetas, T. Tazoh, I. Anastasopoulos: Seismic Behavior of Batter Piles: Elastic Response, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol. 136, No.9, 1187-1199, 2010.
- 5) 佐藤正義, 張至鎬, 田蔵隆: 直杭基礎との比較による斜杭基礎の耐震性評価 (その1 遠心振動実験によるキネマティックインターアクションの検討), 第45回地盤工学研究発表会, 2010.
- 6) 張至鎬, 佐藤正義, 田蔵隆: 直杭基礎との比較による斜杭基礎の耐震性評価 (その2 数値解析によるキネマティックインターアクションの検討), 第45回地盤工学研究発表会, 2010.
- 7) 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, 293-307, 2010.
- 8) 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.
- 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, 105-115, 1991.
- 10) Kazuo Konagai: An Upright Single Beam Equivalent to Grouped Piles, 生産研究, 50巻9号, 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, pp520-528, 2007.