

鉄道構造物を対象とした斜杭基礎の耐震性評価

Seismic Resistance Evaluation of Batter Pile Foundation for Railway Structures

清 田 三四郎 (きよた さんしろう)

(株)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 課員

青 木 一二三 (あおき ひふみ)

(株)レールウェイエンジニアリング 技術部長

米 澤 豊 司 (よねざわ とよじ)

(株)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 課長補佐

西 岡 英 俊 (にしおか ひでとし)

(株)鉄道総合技術研究所 副主任研究員

1. はじめに

鉄道構造物では、地震時の列車走行安全性を確保するために、水平剛性が高い構造物とすることや構造物境界での不同変位を小さくすることが求められる^{1),2)}。しかし、鉄道構造物で使用されているラーメン高架橋は、一般に桁式高架橋に比べて線路直角方向の水平剛性が低いことから、地震時には構造物境界での不同変位が大きくなり、列車走行安全性が問題となる場合がある。

筆者らは、地震時の列車走行安全性や構造物の耐震性向上のための一つの方法として、図-1に示すような斜杭基礎に着目し、鉄道構造物への適用性を検討してきた。この中では、鉄道構造物への斜杭基礎適用を前提として、非線形領域までの耐震性を示す^{3)~8)}とともに、新杭頭接合構造の開発⁹⁾、ネガティブフリクションなどの鉛直荷重の影響を適切に評価できる設計手法の確立¹⁰⁾のほか、試設計による経済効果の算定¹¹⁾などの様々な検討を行っている。本稿では、斜杭基礎の耐震性評価を目的に行った数値解析と模型実験の結果を紹介する。

なお、筆者らの検討では、鉄道ラーメン高架橋を対象とし、相対的に剛性の低い線路直角方向のみに杭を傾斜させるものとした。また、傾斜角度は、杭長が約30mの場合に鉄道用地範囲内に納まることを考慮して、最大で5度程度までを検討対象としている。

2. 数値解析

数値解析では、杭角度による構造物の水平抵抗特性向上の感度確認を目的とした静的非線形解析と、斜杭と鉛直杭を有する構造物の地震時挙動の比較を行うことを目的とした動的な非線形解析を実施した。

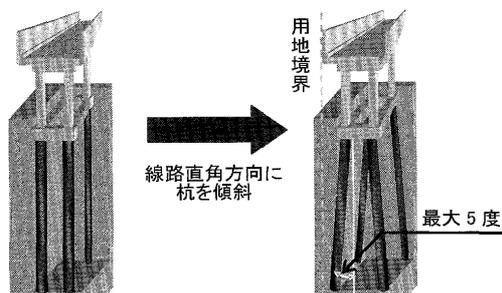


図-1 斜杭基礎の概略図

解析は、地盤種別¹⁾の異なる2タイプの新幹線ラーメン高架橋の線路直角方向を対象とした。杭角度が5度の場合の対象構造物を図-2に示す。耐震設計において、地震時の走行安全性が特に問題となるのは、軟弱地盤上の構造物がほとんどであることから、鉄道耐震標準¹⁾に示される地盤種別で、G4地盤上(表層地盤の固有周期 $T_g=0.57$ 秒)の高架橋AおよびG5地盤($T_g=0.97$ 秒)地盤上の高架橋Bを対象とした。

2.1 静的非線形解析³⁾

(1) 解析条件

解析ケースを表-1に示す。図-2に示した構造物に対して、杭の角度を0度(鉛直)~5度まで1度間隔で変化させ、地震時応答に関する解析を実施した。解析手法は、地盤抵抗をばね要素で、構造部材を梁要素でモデル化した静的非線形解析とし、地震時応答はL2地震動スペクトルIIの応答として非線形スペクトル法¹⁾により

表-1 解析ケース(静的非線形解析)

構造物	地盤種別	作用	杭角度(度)
高架橋A	G4	慣性力	0,1,2,3,4,5
高架橋B	G5	慣性力	0,1,2,3,4,5

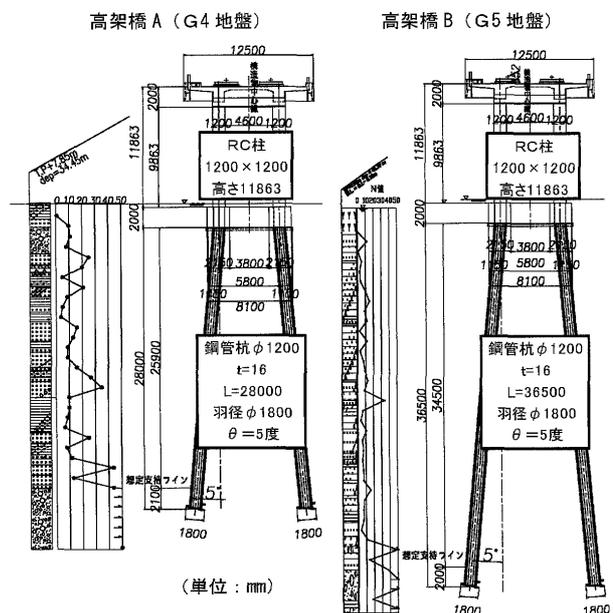


図-2 解析の対象構造物(杭角度5度の場合)

求めた。地盤ばねは、例えば文献12)では斜杭の法線方向に地盤ばね(傾斜した地盤ばね)を取り付けているが、本検討では、5度以下と小さな傾斜角度であることから、地盤ばねを傾斜させず、鉛直杭として算定したものを斜杭の鉛直・水平方向に設定した。鉛直方向の地盤反力係数および地盤反力の上限值は文献13)に示される値を用い、水平方向の地盤反力係数、有効抵抗土圧は文献14)に示される値を用いている。なお、実設計では支持層への根入れ長を確保する必要があることから、杭長は投影長が鉛直杭と同じになるように設定した。

(2) 解析結果

解析により求められた構造物の等価固有周期 T_{eq} 、降伏変位 δ_y 、最大応答変位 δ_{max} の変化を図-3(a)~(b)に示す。図より、5度以下の比較的小さな角度の斜杭でも、斜杭角度が大きいほど水平変位量が小さく抑えられ、等価固有周期が短くなる傾向があることがわかる。また、その効果はG5地盤の方が顕著であることも確認できた。これは、軟弱地盤である方が構造物の水平変位に占める基礎変位の割合が大きく、斜杭としての効果が得やすくなるからであると考えられる。

2.2 動的非線形解析⁴⁾

(1) 解析条件

解析ケースを表-2に示す。構造物と地盤は、静的非線形解析と同様に、図-2に示したラーメン高架橋を対象にしている。解析手法は、地盤抵抗をばね要素、構造部材を梁要素とし、質点系モデルを用いた非線形時刻歴応答解析とした。ばねの設定は、静的非線形解析と同様である。地震動の入力は、あらかじめ地盤応答解析でL2地震のスペクトルII地震動を入力地震動として基礎に入射波成分で与え、その位置の地震動成分を抽出し、この地震動を解析モデルの基礎から入力した。

(2) 解析結果

解析構造物天端での水平変位量を図-4に示す。斜杭基礎では、構造物天端での水平変位量が減少していることがわかる。また、最大水平変位量の比較により水平変位量の減少率を見ると、G4地盤で37.4%、G5地盤で44.4%となっており、軟弱地盤であるG5地盤の方が水平変位量を減少させる効果が大きい。これは、静的非線形解析の結果と定性的に一致している。

杭頭部と構造物天端における水平変位量の関係を図-5に示す。全体的な傾向に着目すると、鉛直杭基礎では、杭頭部・構造物天端ともに大きな水平変位量になっているのに対し、斜杭ではこれよりも小さな範囲の挙動となっており、杭頭部・構造物天端ともに、水平変位量が抑制されていることがわかる。また、杭頭部の水平変位量が同じ値のとき、構造物天端における水平変位量は、鉛直杭基礎よりも斜杭基礎の方が小さくなっており、斜杭基礎は上部工での変位の増幅が小さいことがわかる。

3. 模型振動実験⁶⁾

3.1 実験条件

実験ケースを表-3に示す。幅2m、奥行0.6mの土

表-2 解析ケース(動的非線形解析)

構造物	地盤種別	作用	杭角度(度)
高架橋A	G4	L2スペクトルII	0,5
高架橋B	G5	L2スペクトルII	0,5

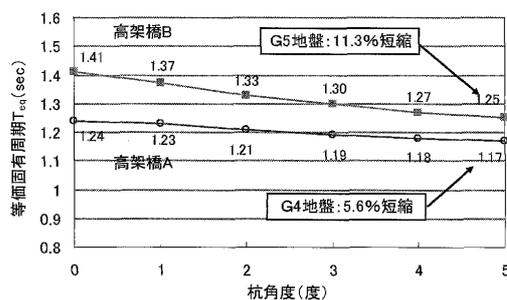


図-3(a) 等価固有周期 T_{eq} の変化

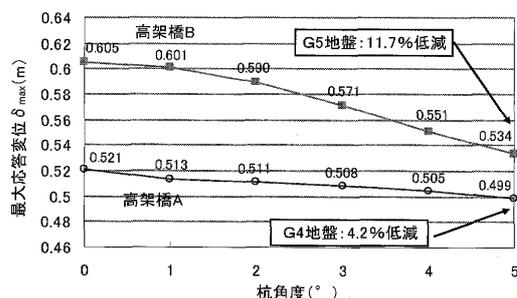


図-3(b) 最大応答変位 δ_{max} の変化

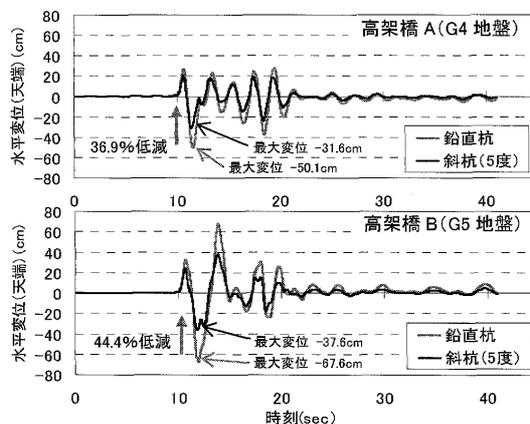


図-4 構造物天端の水平変位量

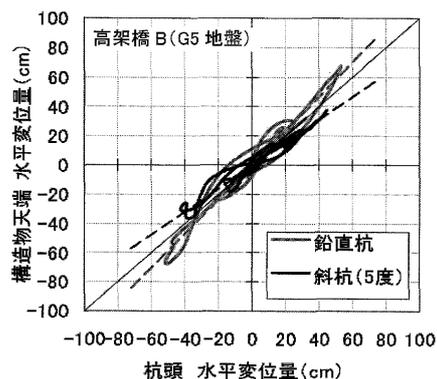


図-5 杭頭部と構造物天端の水平変位量の関係

論 説

槽を載せた振動台を用い、鉛直杭模型と斜杭模型を並べて配置した。模型基礎は、図-2の高架橋Aの約1/60模型とし、奥行方向は1径間（杭中心間隔180mm）として、フーチングに4本の杭を配した構造である。杭は真鍮製の中空管（直径20mm、肉厚1.5mm）を用い、杭先端は回転杭の羽根を模擬して直径30mmの円形板で閉塞した。あらかじめ杭を所定の位置に設置し、空中落下法により模型地盤を作製後、杭とフーチングを剛結した。模型基礎を写真-1に、模型杭の設置状況を写真-2に示す。

模型基礎は、別途行った鉛直交番載荷実験⁵⁾の結果より得られた鉛直支持力の1/6相当の重量（533N）を与え、かつ上下の重量比が実設計で上層梁と地中梁に作用させる死荷重による地震時慣性力の比率（上半分：下半分=2~2.5:1≒380N:165N）となるよう上部工模型を配した。模型地盤は密地盤（ $D_r=90\%$ ）と緩地盤（上層 $D_r=60\%$ 、支持層 $D_r=90\%$ ）とし、杭先端を支持層に羽根径分根入れした。加振方法は、正弦波10波を2, 5, 10Hzと周波数を変化させ、各周波数において入力加速度を50, 100, 200, 400, 800gal（2Hzは最大400gal）と増加させた。

実験では、模型上部とフーチングの変位量、模型天端とフーチングおよび地盤の応答加速度、杭の軸力と曲げモーメントの測定を行った。

表-3 実験ケース（模型振動実験）

Case	杭角度 (度)	地盤の D_r (%)	杭角度 (度)
Case1	0	全層90	正弦波 2, 5, 10Hz 50, 100, 200, 400, 800 gal (2Hzは最大 400 gal)
Case2	5		
Case3	0	上層60	2Hzは最大 400 gal
Case4	5	支持層90	

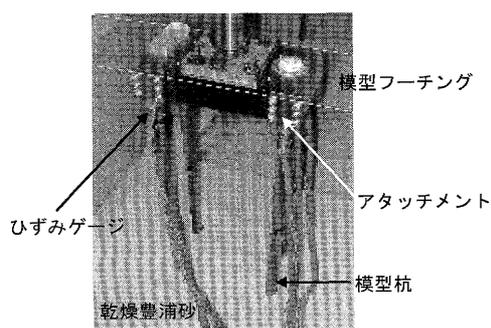


写真-1 模型基礎（杭角度0度）

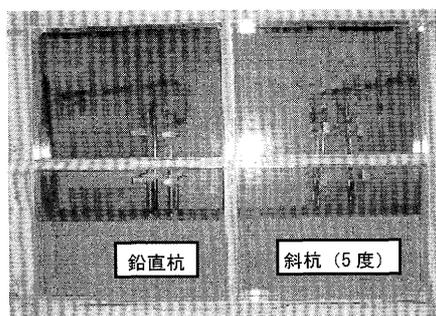
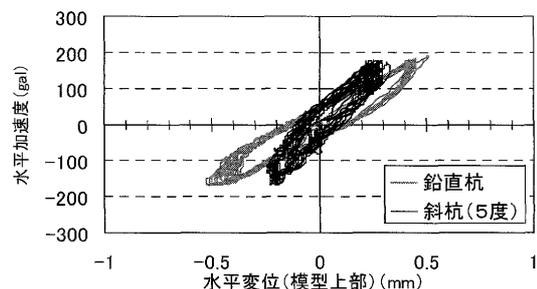


写真-2 模型杭の設置状況（表層地盤作製前）

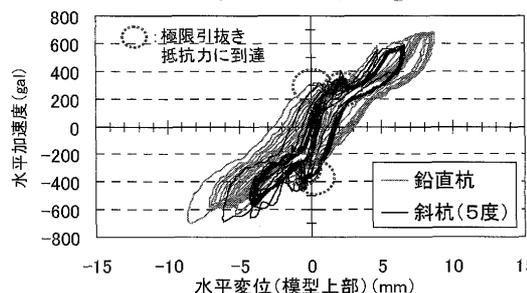
3.2 実験結果

密地盤での2Hz, 100galおよび400gal加振時の模型天端での水平加速度と水平変位の関係（各加振開始時を原点として補正したもの）を図-6に、杭に発生した断面力の一例として、密地盤での2Hz, 400gal加振時の杭の断面力と水平変位の関係を図-7に示す。

図-6より、100gal加振では、斜杭の水平抵抗が鉛直杭に比べて大きくなっている。400gal加振では、斜杭と鉛直杭ともに途中で剛性低下しているが、剛性低下するまでは斜杭の水平抵抗が大きく、剛性低下後は同程度となっている。静的載荷実験⁵⁾でもこの傾向は同様であり、この剛性低下の原因は、引抜き側杭が極限引抜き抵抗に達したためであることが、図-7に示した杭の



(a) $D_r=90\%$, 2Hz, 100gal



(b) $D_r=90\%$, 2Hz, 400gal

図-6 構造物天端の水平加速度と水平変位の関係

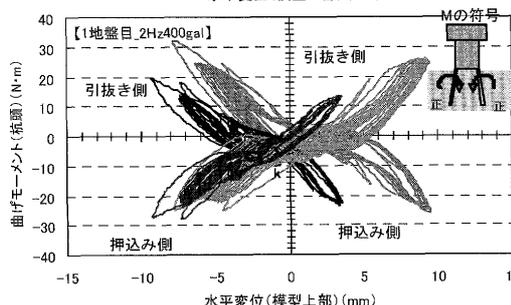
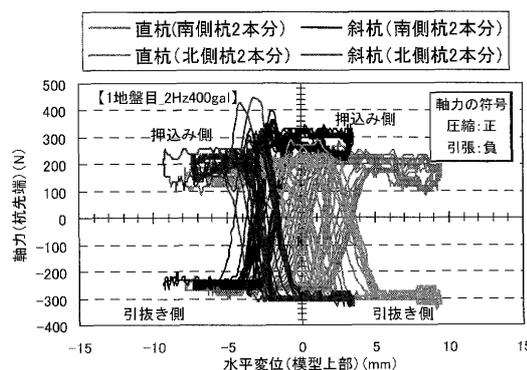


図-7 杭の発生断面力と水平変位の関係

引抜き側の引張り軸力が、 $-260\text{ N} \sim -300\text{ N}$ 付近で頭打ちとなっていることから確認できる。ただし、斜杭は発生軸力の増加が大きい分、支持降伏に達する変位量も小さくなる。また、図-7より、曲げモーメントは軸力が極限に到達した後の増加が大きくなっており、抵抗成分が軸力から曲げに移行したと考えられる。以上の結果は、地盤条件、加振周波数、加振加速度が異なっても同様であった。

4. おわりに

鉄道構造物は、軌道上を走行する列車を支持しているため、一般的な土木構造物に対して行われる設計検討に加えて、地震時の列車走行安全性に対する検討を行う必要があることが特徴的であり、構造物の耐震性を向上させることで列車走行安全性を高めることができる斜杭基礎には、大きな期待がよせられる。

本稿で紹介したとおり、斜杭基礎の数値解析と振動模型実験を行った結果、5度程度の傾斜角度でも構造物の水平変位量を小さく抑えられることや、等価固有周期を短くできることから、列車走行安全性を高めるのに有効であり、斜杭基礎が優れた耐震性を示すことがわかった。

また、引抜き側の杭が極限引抜き抵抗力に達するまでの耐震性は鉛直杭より大きい。斜杭基礎の回転抵抗メカニズムとして、水平荷重を杭の軸線方向の力へと変換することにより大きな抵抗力を得ていることから、斜杭基礎は、鉛直杭基礎よりも小さな水平変位で支持降伏に達し、支持降伏後の水平剛性は、鉛直杭基礎と同程度となる。このため、斜杭基礎の大きな耐震性を期待できるのは、支持降伏しない範囲に限られることもわかった。

最後に、再度、図-3(b)および図-4に着目したい。両図より、鉛直杭基礎では、静的解析と動的解析で構造物の水平変位量の最大値に大きな差はみられない。一方、斜杭基礎では、静的解析でも水平変位量を低減させる効果はみられるものの、動的解析ではその効果がさらに大きく、水平変位量の最大値に大きな差があらわれている。

図-8に動的的非線形解析でみられた構造物の1次モード図を、図-9にメカニズムを示したとおり、斜杭基礎の幾何的特徴による制振効果が、この理由として考えられる。すなわち、斜杭基礎では、地震による水平力が作用した際、開かれた脚の効果によって、構造物を逆方向に押し戻そうとする動きが見られる。つまり、水平変位と回転方向が逆方向となるため、動的解析では構造物天端位置の変位が小さくなることが表現される。

このように、斜杭基礎特有の制振効果を設計上考慮することで、構造物全体系の耐震性、ひいては経済性がより向上することが期待できるため、今後更なる研究を進めたいと考えている。

参 考 文 献

- 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（耐震設計），1999。
- 2) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構

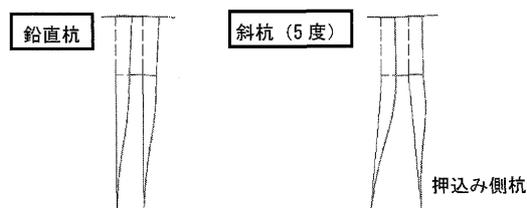


図-8 構造物の1次モード図（動的的非線形解析）

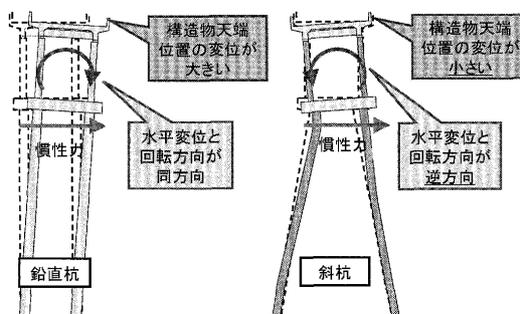


図-9 斜杭基礎の制振効果メカニズム

造物等設計標準・同解説（変位制限），2006。

- 3) 池亀真樹・丸山 修・青木一二三・神田政幸・出羽利行：鉄道高架橋の地震時挙動に対する斜杭の影響解析（静的解析による検討），土木学会第62回年次学術講演会，pp. 477~478, 2007。
- 4) 出羽利行・丸山 修・清田三四郎・青木一二三・西岡英俊・神田政幸：斜杭基礎を有する鉄道ラーメン高架橋の動的的非線形解析，第43回地盤工学研究発表会，pp. 1167~1168, 2008。
- 5) 出羽利行・山崎貴之・丸山 修・青木一二三・西岡英俊・神田政幸：砂地盤中の斜杭基礎模型の静的載荷実験，第42回地盤工学研究発表会，pp. 1241~1242, 2007。
- 6) 出羽利行・山崎貴之・青木一二三・西岡英俊・阿部慶太：砂地中の斜杭基礎模型の振動実験，土木学会第62回年次学術講演会，pp. 479~480, 2007。
- 7) 鈴木 聡・清田三四郎・丸山 修・青木一二三・神田政幸・西岡英俊・西村昌宏：直杭・斜杭模型の水平載荷実験と地盤変位載荷実験，土木学会第63回年次学術講演会，pp. 249~250, 2008。
- 8) 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，第54回地盤工学シンポジウム，pp. 299~306, 2009。
- 9) 山崎貴之・丸山 修・青木一二三・神田政幸・千葉佳敬：鋼管斜杭の杭頭接合構造の変形性能確認実験，土木学会第62回年次学術講演会，pp. 317~318, 2007。
- 10) 清田三四郎・丸山 修・青木一二三・神田政幸・西岡英俊・出羽利行・勅使川原敦：ネガティブフリクションが作用する斜杭基礎の設計手法に関する検討，土木学会第63回年次学術講演会，pp. 251~252, 2008。
- 11) 清田三四郎・丸山 修・青木一二三・神田政幸・西岡英俊・出羽利行：斜杭基礎を有する鉄道ラーメン高架橋の試設計，第43回地盤工学研究発表会，pp. 1169~1170, 2008。
- 12) 小松 章・青木一二三：応答変位法による鉄道高架橋斜杭基礎の検討事例，基礎工，Vol. 34, No. 11, pp. 46~49, 2006。
- 13) 小松 章・神田政幸・西岡英俊・武川啓悟：回転圧入鋼管杭工法に関する支持力性状評価，第40回地盤工学研究発表会，pp. 1591~1592, 2005。
- 14) 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・抗土圧構造物），2000。

(原稿受理 2009.12.14)