

斜杭基礎の水平抵抗特性と地震時動的挙動 に関する解析・実験

出羽 利行* 西岡 英俊* 神田 政幸*
山崎 貴之** 丸山 修** 青木 一二三***

Series of Analyses and Experiments for Lateral Resistance and Dynamic Behavior of Batter Pile Foundation during Earthquake

Toshiyuki DEWA Hidetoshi NISHIOKA Masayuki KODA
Takayuki YAMAZAKI Osamu MARUYAMA Hifumi AOKI

Railway structures should have high horizontal stiffness for ensuring running safety of railway vehicles during earthquakes; therefore the foundations having high lateral resistance are necessary for railway structures. We are researching the application of batter pile foundations to railway structures as one of the effective methods. This paper reports a series of analyses and modeled tests for lateral resistance and response of the batter pile foundation during earthquake. It has been made clear that the horizontal resistance of structures can be increased and the equivalent natural period of structures can be reduced even if the angle of the batter piles is about five degrees; on the other hand, the sectional force and deformation of the pile have increased subjected to the ground deformation during earthquakes.

キーワード：斜杭，水平抵抗，振動変位，地震時走行安全性，非線形解析，模型実験

1. はじめに

鉄道構造物では地震時の列車の走行安全性を確保するために、水平剛性が高い構造とすることや構造物境界での不同変位（角折れ，目違い）を小さくすることが求められる^{1), 2)}。構造物の水平剛性を向上させる方法として柱の大断面化やブレースの配置など様々考えられるが³⁾，上部工での対応は高架下利用の阻害や見た目の圧迫感・違和感などの問題も生じる。また軟弱地盤では，上部工のみの対応では困難となる場合も少なくない。そのような中，筆者らは，地震時の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斜杭基礎に着目し，鉄道構造物への適用性について検討を行っている^{4), 5), 6), 7)}。

一般に，斜杭基礎は鉛直杭基礎に比べて水平作用に対して安定性が高いことは知られているが，地震時の挙動が未解明であることや既製杭を用いた打込み工法が主であり騒音・振動などの問題を伴うため，近年の鉄道構造物では採用されてこなかった。また斜杭は，地盤沈下など鉛直方向の地盤変位が作用する場合には，鉛直杭と異なりネガティブフリクションによる軸力の発生だけでは

なく曲げモーメントやせん断力も生ずると考えられる。

これらの斜杭の課題に対して，最近の騒音・振動が小さいなどの特長をもつ新工法の中には斜杭の施工が可能な工法も開発され，環境面の課題は解決されてきた。

本稿は，斜杭基礎の課題の一つである地震時応答と，斜杭適用の主目的である構造物の高剛性化に対する定量的な効果について報告するもので，以下の解析および実験から成る。

- (1) 静的非線形解析：斜杭角度をパラメータとした水平抵抗特性の感度分析
- (2) 動的非線形解析：斜杭と鉛直杭を有する構造物の地震時挙動の比較
- (3) 模型静的載荷実験：斜杭および鉛直杭模型の水平抵抗特性の比較
- (4) 模型振動実験：斜杭および鉛直杭模型の動的応答の比較

2. 検討対象

図1に示すように，地盤種別の異なる2タイプの新幹線RCラーメン高架橋の線路直角方向を本検討の対象とした。高架橋Aは耐震標準¹⁾に示されるG4地盤（表層地盤の固有周期 $T_g = 0.57s$ ），高架橋BはG5地盤（ $T_g =$

* 構造物技術研究部（基礎・土構造）

** 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

*** 株式会社 レールウェイエンジニアリング

特集：構造物の耐震技術

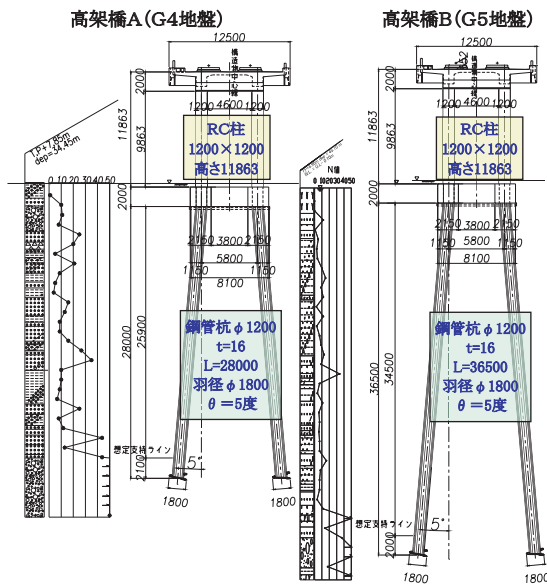


図1 対象構造物（斜杭角度5度の場合）

0.97s) 上の構造物である。高架橋Bは地盤条件に合わせて高架橋Aの杭長だけを伸ばした構造である。耐震設計¹⁾において、地震時の走行安全性が特に問題となるのは、軟弱地盤上でかつ構造物の等価固有周期 T_{eq} が1秒以上と比較的長い場合がほとんどであることから、G4およびG5地盤上の新幹線RCラーメン高架橋を本検討の対象とした。

斜杭の角度は、用地境界を高欄外面付近と仮定し、杭長約30mの場合に用地内に納まる斜杭角度を想定して、5度までを検討対象とした。

杭種別は、環境面・施工面から斜杭への適用性が高いと考えられる回転杭とした。回転杭は、鋼管杭の先端付近に掘削推進力を得るためにネジ山のように螺旋状に加工した鋼板（以下羽根と呼ぶ）を取付けた構造で、杭体に回転力を付与し地中に貫入する工法であり、低騒音・低振動のうえ、泥水や掘削汚泥の発生がないことから鉄道構造物への適用事例⁸⁾が増加しつつある。

3. 静的非線形解析⁴⁾

3.1 解析条件

表1に解析ケースを示す。図1の構造物に対して、杭の角度を0,1,2,3,4,5度と変化させ、地震時応答に関する解析を実施した。地震作用として慣性力のみを作用させた場合と応答変位法¹⁾による地盤変位と慣性力の両方を作用させた場合の2種類を実施した。地盤変位は、地盤応答解析から得られた値を用いた。その値は、G4地盤の場合、最大変位は杭頭部で261mm、G5地盤の場合は434mmである。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。

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(°)
高架橋A	G4	慣性力	0,1,2,3,4,5
		慣性力+地盤変位	0,1,2,3,4,5
高架橋B	G5	慣性力	0,1,2,3,4,5
		慣性力+地盤変位	0,1,2,3,4,5

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⁾により求めた。地盤ばねについては、例えば文献9)では斜杭にあわせ傾斜した地盤ばねを用いているが、本検討では、5度以下と小さな斜杭であることから地盤ばねは傾斜させず、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。回転杭の鉛直方向の地盤反力係数、地盤反力の上限值は文献10)に示される値を用い、水平方向の地盤反力係数、有効抵抗土圧は基礎標準¹¹⁾に示される値を用いた。

3.2 解析結果

構造物の等価固有周期 T_{eq} の変化を図2に示す。斜杭角度が大きくなるほど水平変位量が小さくなり、等価固有周期が短縮される。斜杭角度5度の斜杭とすることで、G4地盤で5.6%、G5地盤で11.3%の短縮が可能となり、効果はG5地盤の方が顕著である。これは、軟弱地盤である方が構造物の全水平変位に占める基礎変位の割合が大きく、斜杭としての効果も得られやすくなるためである。

高架橋A（G4地盤）について、慣性力のみが作用する場合と、慣性力と地盤変位の両方が作用する場合の杭の変形量（杭頭部の回転角と杭地中部の曲率）の変化を図3に示す。図中の縦軸は鉛直杭の変形量 (θ_{d0} , ϕ_{d0}) に対する比率で示した。杭の変形量は、慣性力のみが作用する場合は、杭角度が大きくなるほど減少する傾向が確認できる。一方、地盤変位が作用する場合は、杭の変形量は全体的に増加傾向である。以上の結果はG5地盤の高架橋Bでも同様であった。

図4には杭に発生するせん断力の変化を示した。杭のせん断力については、慣性力のみが作用する場合と地盤変位と慣性力の両者が作用する場合ともに、斜杭角度が大きくなるほど押し込み側杭のせん断力は減少するが、引抜き側杭のせん断力は増加している傾向が確認できる。

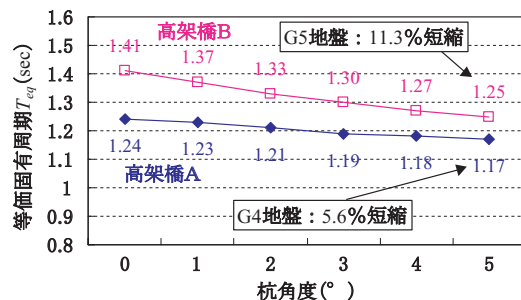


図2 等価固有周期 T_{eq} の変化

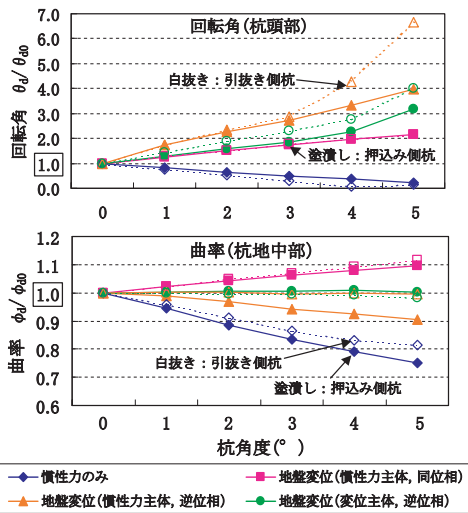


図3 杭の変形量の変化（高架橋 A, G4 地盤）

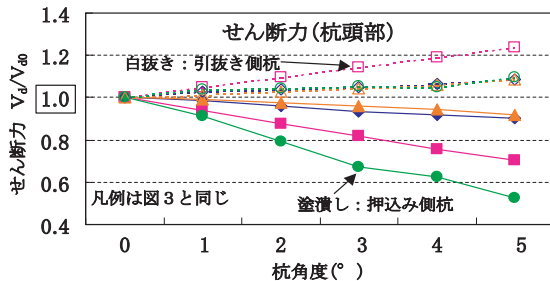


図4 杭のせん断力の変化（高架橋 A, G4 地盤）

地震時の列車の走行安全性が問題となるような軟弱地盤では地盤変位が大きく、この影響を無視できないことから、耐震設計では地盤変位を考慮した設計（応答変位法）がなされている。したがって、このような軟弱地盤上の鉄道構造物に斜杭を適用する際は、杭体や杭頭接合部に十分な変形性能を保有させる必要がある。また、せん断力も増加することから十分なせん断耐力も有する必要がある。したがって、杭体としては靱性やせん断耐力に富む鋼管杭などが適すると考えられる。杭頭接合部については、本研究の中で配筋の施工性向上が期待できる新しい接合構造を考案し、模型鋼管斜杭接合部の水平交番荷重実験により十分な変形性能を確認⁷⁾している。

4. 動的非線形解析

4.1 解析条件

表2に解析ケースを示す。構造物と地盤は、静的非線形解析と同様に、図1に示すラーメン高架橋（線路直角方向）の鉛直杭（0度）と5度斜杭を対象とした。地盤ばねは、静的非線形解析と同様に設定した。解析方法は質点系モデルを用いた非線形時刻歴応答解析とした。地震動の入力は、あらかじめ地盤応答解析でスペクトルⅡ地震動を入力地震動として基盤に入射波成分で与え、そ

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 (°)
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

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盤から入力した。

4.2 解析結果

構造物天端での水平変位量を図5に示す。また、鉛直杭と斜杭の曲げモーメントとせん断力を比較したものを表3に示す。表3は鉛直杭と斜杭の応答値の差を、鉛直杭の応答値に対する比率で示したもので、表中の値が正（着色部）であるものは斜杭にすることで応答値が増加したものであり、負は減少したものである。図5から斜杭にすることで、構造物天端の水平変位量が減少することが確認できる。一方、表3から杭の曲げモーメントはやや増加する傾向が見られる。この傾向は、静的非線形解析の応答変位法の結果と一致する。

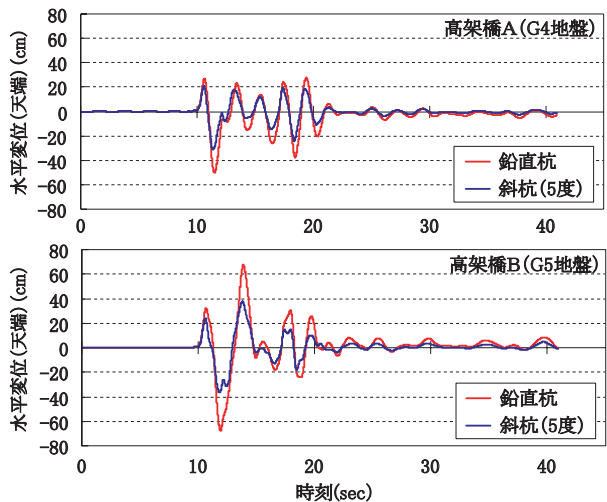


図5 天端変位量（動的非線形解析）

表3 応答値の比較（動的非線形解析）

高架橋 A (G4 地盤)		(斜杭 - 鉛直杭) / 鉛直杭 (%)				
		最大値	杭頭 Mmax 時	杭頭 Mmin 時	杭地中部 Mmax 時	杭地中部 Mmin 時
杭頭部 (左杭)	V	-38.5%	-26.7%	-42.8%	91.9%	-7.9%
	M	1.7%	0.5%	1.7%	1.6%	0.6%
杭頭部 (右杭)	V	-6.0%	-84.5%	8.6%	603.3%	-81.8%
	M	1.6%	0.6%	1.6%	1.4%	0.7%
杭地中部	V	-1.3%	-74.9%	-39.1%	1.3%	1.6%
	M	0.0%	38.5%	6.8%	-0.1%	0.0%

高架橋 B (G5 地盤)		(斜杭 - 鉛直杭) / 鉛直杭 (%)				
		最大値	杭頭 Mmax 時	杭頭 Mmin 時	杭地中部 Mmax 時	杭地中部 Mmin 時
杭頭部 (左杭)	V	-30.9%	-56.8%	-25.7%	-34.4%	-85.2%
	M	0.3%	0.3%	-1.2%	0.5%	-0.2%
杭頭部 (右杭)	V	-31.1%	-56.6%	-25.9%	-34.1%	-86.3%
	M	0.3%	0.3%	-1.2%	0.5%	-0.2%
杭地中部	V	1.1%	-78.5%	-58.2%	-63.2%	-3.1%
	M	-0.6%	-0.3%	-0.5%	3.4%	-0.6%

V: せん断力, M: 曲げモーメント, 杭地中部は左・右杭を比較して大きい値を使用

特集：構造物の耐震技術

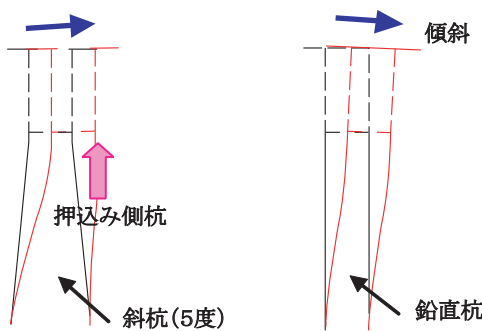


図6 モード図(1次モード)

図6は1次モード図である。鉛直杭は上部工が前方に傾斜しているのに対し、斜杭は傾斜していた押込み側杭が鉛直へと起こされ上部工を上方に押し上げる力が作用することで、上部工の傾斜が抑制されている。斜杭基礎は単に脚の広がりによって水平剛性が向上するだけではなく、このような幾何的な効果により、構造物天端の振動変位を抑制しているものと考えられる。

5. 模型静的載荷実験⁵⁾

5.1 実験条件

実験ケースを表4に示す。鉛直杭模型で鉛直交番載荷実験(Case1)により模型杭の鉛直支持力を確認後、0度、5度、10度の3ケースについて水平交番載荷実験を実施し、斜杭基礎の水平抵抗特性を調べた。地盤条件は密地盤(乾燥豊浦砂、相対密度 $Dr = 90\%$)とした。

実験概要と模型の写真を図7に示す。実験はアクリル土槽(幅2m、奥行605mm)を用いて実施した。模型基礎は、図1の高架橋Aの縮尺1/60模型とし、奥行方向は1径間(杭中心間隔180mm)として、模型フーチングに4本の模型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。フーチングと杭頭を接合するアタッチメントにより杭の角度を変化させた。あらかじめ杭を所定位置に設置し、空中落下法により模型地盤を作製後、杭とフーチングとをアタッチメントを介して剛結した。

水平交番載荷実験では、鉛直交番載荷実験で得られた鉛直支持力の1/6の鉛直荷重(長期使用限界状態の安全率3の半分の死荷重を想定)を一定に保持し、載荷点の水平変位を漸増させながら交番で作用させた。

表4 実験ケース(静的載荷実験)

Case	杭角度(°)	地盤 Dr (%)	載荷方法
Case1	0	90	鉛直正負交番
Case2	10	90	水平正負交番
Case3	0	90	水平正負交番
Case4	5	90	水平正負交番

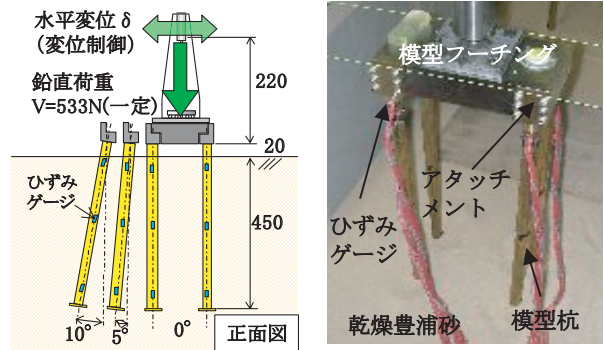


図7 実験概要と模型基礎(静的載荷実験)

このとき載荷点水平荷重の他、各模型杭の頭部、中間部、先端部に設置したひずみゲージにより杭に発生する軸力と曲げモーメントを測定した。

5.2 実験結果

図8にCase1の鉛直交番載荷実験から得られた鉛直荷重と鉛直変位の関係を示す。最終サイクルの押込み載荷時の曲線は、その直前の引抜き荷重除荷後の残留変位により負側に約1mmずれているが、これを除去すると概ねそれまでの曲線の延長上に位置する。押込み側では曲線の折れ点が鉛直荷重が3200N付近で生じていることから、本模型の鉛直支持力を3200N(杭4本分)とした。なお、その時の変位量3mmは杭先端羽根径30mmの10%に相当する。また、各杭の先端圧縮軸力は600~840Nであった。一方、極限引抜き抵抗力は472N(杭4本分)であり、その時の各杭の先端引張り軸力は50~190Nであった。

図9に、水平交番載荷実験から得られたフーチング中心での作用モーメントと回転角との関係を示す。回転角が2度程度までは、斜杭の角度が大きいほど回転抵抗が大きいが、それ以降は斜杭の抵抗力はさほど伸びず、最終的には鉛直杭との差がなくなる。杭先端部の軸力を調べると、斜杭が途中で剛性低下する点では、引抜き側杭の引張軸力が急激に減少しており、その値はCase1で得られた極限引抜き抵抗力時の値(50~190N)程度であった。したがって、斜杭の剛性低下点では引抜き側杭が極限引抜き抵抗力に達したものと考えられ、このことが斜杭の全体剛性を低下させた要因と考えられる。

図10はフーチング中心での作用モーメントと抵抗モーメントの関係である。図を概観すると、本実験の抵抗モーメントは杭の軸力によるものが支配的であり、各模型基礎は主に杭の軸力によって回転抵抗を得ていることがわかる。さらに、杭の軸力による抵抗モーメントについて斜杭と鉛直杭を比較すると、支持降伏するまでは、斜杭の軸力による抵抗モーメントは鉛直杭のそれよりも明らかに大きい。このことから、斜杭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が確認できる。

一方、このことは、斜杭は鉛直杭よりも小さな水平変位で、押込みや引抜きに支持降伏に達することを意味している。支持降伏すると斜杭の水平剛性は鉛直杭と同程度となってしまうことから、斜杭を効果的に適用するためには、支持降伏を発生させない範囲での使用が前提となる。したがって、羽根を有し先端の引抜き抵抗が期待できる回転杭は斜杭に適した工法と考えられる。

図11は杭頭部に発生した曲げモーメントである。斜杭角度が大きいくほど杭頭部での曲げモーメントが小さいことが確認できる。この結果は、静的非線形解析で慣性力のみを作用させた場合の結果と一致している。

また、水平震度 K_h と水平変位の関係を用いて、例えば $K_h = 0.4$ (L1地震応答相当)での等価固有周期 T_{eq} を算定し比較すると、5度斜杭で7.8%、10度斜杭で15.6%、

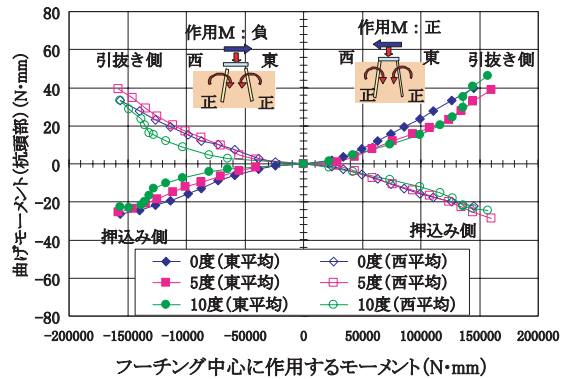


図11 作用M－杭頭モーメント（水平交番載荷実験）

鉛直杭に比べて T_{eq} が小さかった。5度斜杭の低減効果は、静的非線形解析で得られた結果と概ね一致した。

6. 模型振動実験⁶⁾

6.1 実験条件

図12に示すように、鉛直杭と斜杭角度5度の斜杭模型を用いて振動台実験を実施した。表5に実験ケースを示す。土槽（幅2m，奥行0.6m）を載せた振動台を用い、鉛直杭と斜杭を並べて2体の模型を同時に加振した。模型は、静的載荷実験で使用した模型基礎に、鉛直支持力の1/6相当の重量（533N），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）となるように上部工模型を配した。模型地盤は密地盤（ $D_r=90\%$ ）と緩地盤（ $D_r=60\%$ ，支持層 $D_r=90\%$ ）に羽根径分根入れ）とし、正弦波10波を10, 5, 2Hz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）と増加させて加振を行った。また、振動実験の途中で、衝撃振動試験も併せて実施し模型の固有振動数を測定した。

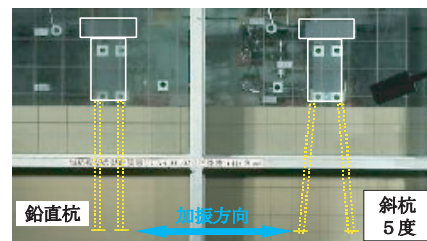


図12 実験状況（振動台実験）

表5 実験ケース（振動台実験）

Case	杭角度 (°)	地盤 D_r (%)	加振方法
Case1	0	全層 90	正弦波 2.5,10Hz
Case2	5		50,100,200,400,800gal
Case3	0	上層 60	正弦波 2.5,10Hz
Case4	5	支持層 90	50,100,200,400,800gal

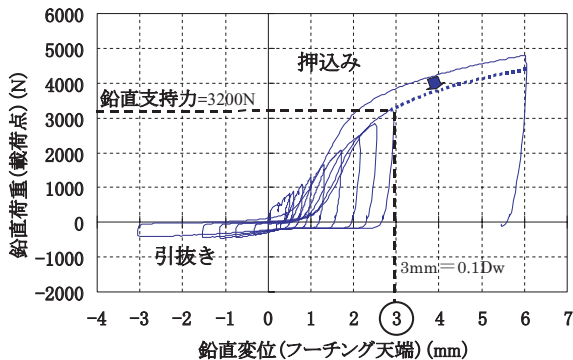


図8 鉛直荷重－鉛直変位（鉛直交番載荷実験）

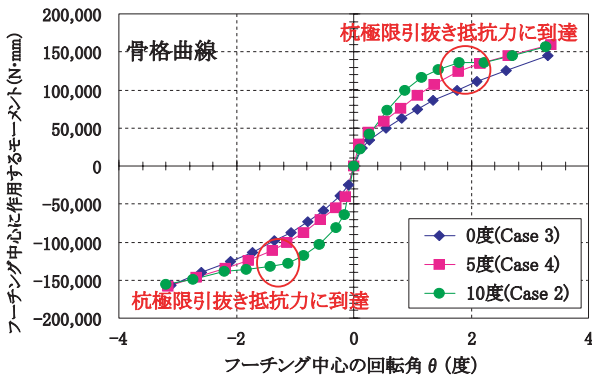


図9 作用モーメント－回転角（水平交番載荷実験）

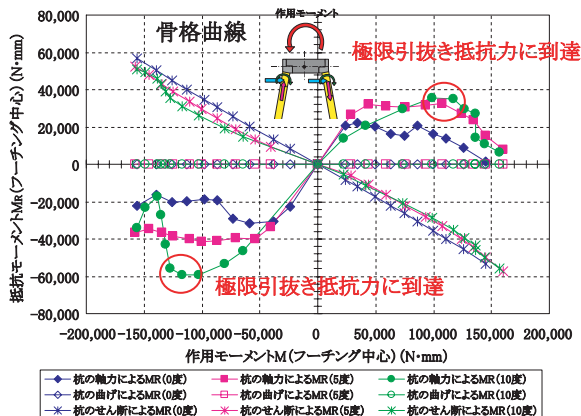


図10 作用M－抵抗モーメント（水平交番載荷実験）

特集：構造物の耐震技術

6.2 実験結果

図13に、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）を示す。100gal加振では、斜杭の水平抵抗が鉛直杭のそれに比べて大きい。400gal加振では、斜杭と鉛直杭ともに途中で剛性低下しており、剛性低下するまでは斜杭の水平抵抗が大きい。剛性低下後は同程度となっている。静的載荷実験と同様に、この剛性低下の原因は、引抜き側杭が極限引抜き抵抗力に達したためであることが杭の軸力から確認できた。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。これらは、静的載荷実験で得られた知見が振動実験からも確認できたことを意味する。

また、模型に対して行った衝撃振動試験の結果は、鉛直杭の固有振動数が14～15Hzであったのに対して、斜杭は17～19Hzであり、衝撃振動試験のような小さな変位レベルでも斜杭の水平剛性が高いことが確認できた。したがって、耐震設計では、構造物全体系の降伏変位を用いて振動変位の照査を行うが、設計上は照査しない降伏変位以下の小さな変位領域においても、斜杭は水平剛性が高く地震時の走行安全性に有効であると考えられる。

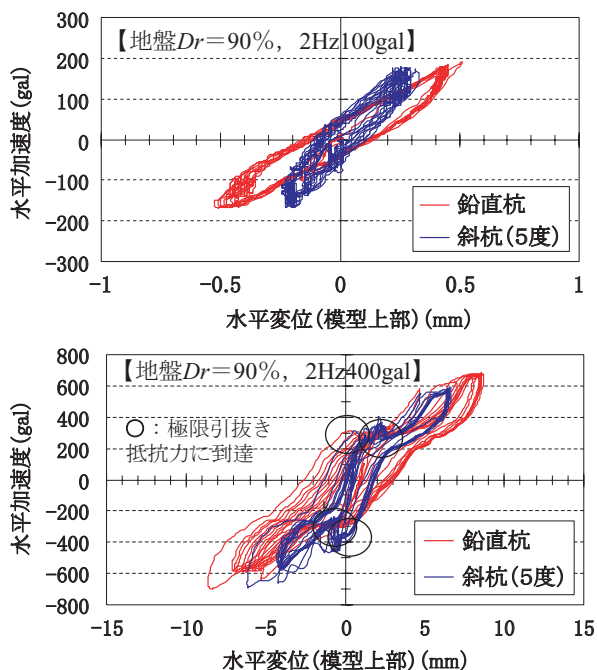


図13 水平加速度—水平変位（模型天端）

7. まとめ

斜杭基礎に対する静的非線形解析、動的非線形解析、模型静的載荷実験、模型振動実験により以下の知見を得た。

(1) 軟弱地盤であるG4, G5地盤上のラーメン高架橋において、5度程度の斜杭基礎とすることで、構造物の等価固有周期を約5～10%短くできる。

- (2) 斜杭に地盤変位と慣性力が作用する場合、杭の曲げモーメントや変形量が増加傾向にある。また斜杭は引抜き側杭においてせん断力が増加する。
- (3) 斜杭は杭の軸力により水平抵抗を得ていることから、鉛直杭よりも小さな変位で支持降伏に達する。したがって、斜杭により水平抵抗を期待するためには、十分な支持抵抗が必要である。

以上より、軟弱地盤上で地震時の列車走行安全性を改善する方策として斜杭基礎を適用する場合は、じん性や耐力の大きい鋼管杭を使用し、押し込み・引抜き降伏を生じさせない範囲で適用するのが良いと考えられる。

地震時の列車走行安全性を改善する方策は種々あるため³⁾、各対策の特徴や効果を理解して採用することが重要である。今後は、試設計等により斜杭が有効となるような適用範囲を明らかにする予定である。

なお、本内容は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構からの受託研究の一部をまとめたものである。

文献

- 1) 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，1999.10
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説変位制限，2006.2
- 3) 曾我部正道，谷村幸裕：地震時列車走行性改善のための構造物の対策，RRR，pp.20-23，鉄道総合技術研究所，2007.1
- 4) 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，土木学会第62回年次学術講演会，pp.477-478，Ⅲ-239，2007.9
- 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，地盤工学会第42回地盤工学研究発表会，pp.1241-1242，2007.7
- 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，Ⅲ-240，pp.479-480，2007.9
- 7) 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，Ⅴ-159，pp.317-318，2007.9
- 8) 吉原伸行，木下哲龍：液状化地盤における回転圧入鋼管杭の設計・施工，基礎工，Vol.34，No.11，pp.42-45，2006.11
- 9) 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.46-49，2006.11
- 10) 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，地盤工学会第40回地盤工学研究発表会，pp.1591～1592，2005.7
- 11) 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・抗土圧構造物，2000.6