

## 斜杭基礎の鉄道高架橋への適用性

構造物技術研究部 基礎・土構造  
研究室長 神田 政幸

### 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。しかし、鉄道構造物で用いられるラーメン高架橋は、一般に桁式橋脚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。構造物の水平剛性を向上させる方法としては、例えば柱の大断面化などが考えられるが、高架

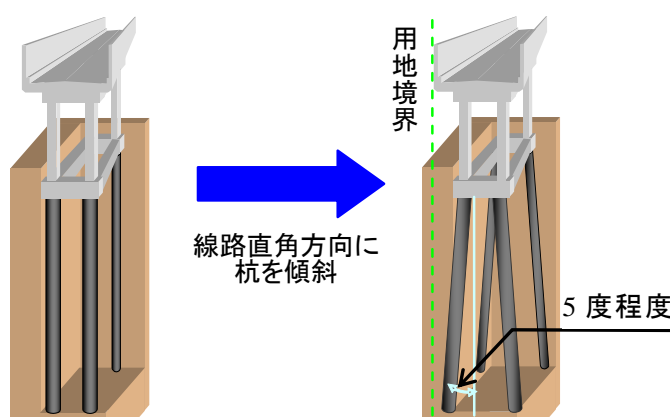


図1 斜杭基礎の鉄道高架橋への適用の概要

下利用の阻害や見た目の圧迫感・違和感などの問題が生じ、軟弱地盤では上部工のみでは現実的に対応が困難となり、構造形式の変更など大幅な見直しが必要とされる場合もありうる。

これに対し、斜杭基礎を鉄道構造物へ適用することで、構造物の水平剛性が向上し、列車走行安全性を高められることが期待できる。従来は斜杭の施工方法が打込み工法に限定され、騒音・振動などの問題を伴うなどの理由からほとんど採用されていなかったが、近年の工法開発の成果として、打込み工法よりも騒音・振動が小さい回転杭工法等により、斜杭の施工が可能となってきた。

このような施工面の課題が解決しつつあることを踏まえ、本研究では1柱1杭式のRCラーメン高架橋を対象とし、図1に示すように相対的に剛性の低い線路直角方向のみに杭の傾斜角度を持たせた構造を研究対象とした。なお、線路直角方向に杭を傾斜させる場合、杭体自体を鉄道用地内に納めるためには傾斜角度をそれほど大きくすることが出来ない。そこで本研究では、杭長が約30mの場合に複線断面の一般的な柱位置から鉄道用地内に納まることを想定して、5度程度の比較的小さい角度を検討対象とした。このほかにも、斜杭基礎構造を実用化する上での施工面での課題として、杭頭の接合構造が複雑となることがある。そこで本研究では各部材の鉄筋が密集する中で施工性に優れ、かつ確実に斜杭を一体化するための新しい杭頭接合構造を開発した。

本報告では、斜杭基礎構造を鉄道構造物基礎として適用するための一連の研究結果<sup>1)</sup>のうち、室内模型実験および杭頭接合部の部材実験について示すとともに、実構造物を想定した試設計結果について説明する。

### 2. 室内模型実験による補強効果の確認

室内模型実験では、幅2m、奥行0.6mの土槽中の実構造物の約1/60スケールの模型を用い、斜杭基礎の水平抵抗特性と地震時挙動の確認を行うため、静的載荷実験と振動実験を実施した。

模型基礎は、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）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（乾燥豊浦砂、相対密度  $D_r=90\%$ ）を作製後、杭とフーチングを剛結した。

## 2.1 静的載荷実験

静的載荷実験は、0、5、10 度の 3 ケースについて、鉛直支持力の 1/6 の鉛直荷重を一定に保持しながら、高架橋天端に相当する位置に水平変位を交互に与える水平交番載荷を行った。

図 2 に、水平交番載荷実験から得られたフーチング中心に作用するモーメントとフーチング回転角の関係を示す。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、それ以降は斜杭の抵抗力はさほど伸びず、最終的には直杭との差がなくなっている。これは斜杭の引抜き抵抗の降伏に起因していることを軸力計測結果から確認している。

図 3 に、各杭の軸力により負担される抵抗モーメントとフーチング回転角の関係を示す。斜杭の軸力による抵抗モーメントは直杭のそれよりも明らかに大きくなっていることがわかる。ただし、引抜き降伏が生じた後は両者の差が小さくなっている。

## 2.2 振動実験

振動実験は、同一の模型地盤中に直杭模型と斜杭模型（傾斜角 5 度）を並べて配置して、同時に正弦波で加振した。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 4 に示す。これより、100gal 加振では、斜杭の水平抵抗が直杭のそれに比べて大きくなっている。400gal 加振では、斜杭と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。なお、静的載荷実験と同様に、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ことであることを、別途計測した杭の引抜き側の引張り軸力から確認している。

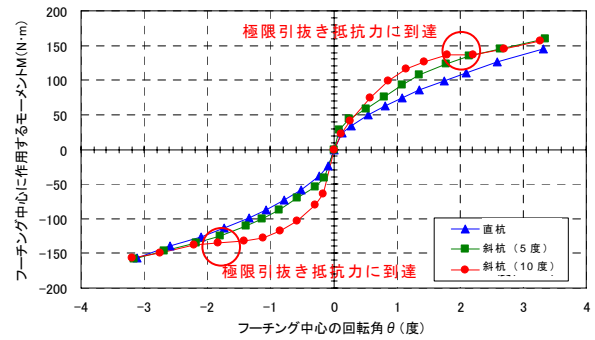


図2 作用モーメント～回転角関係

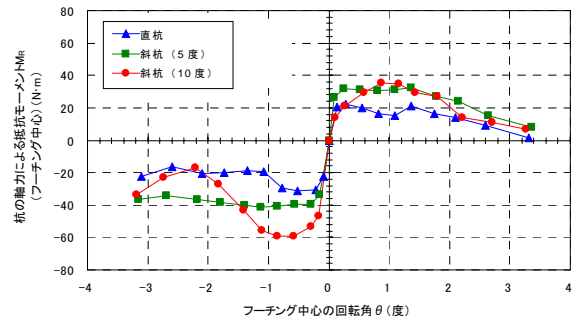
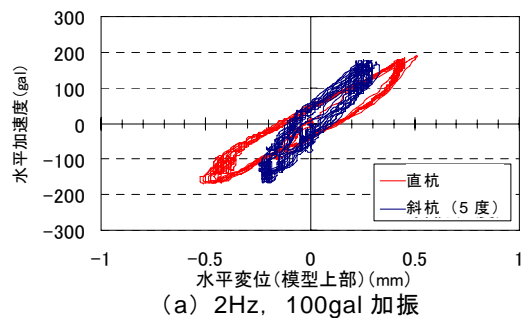
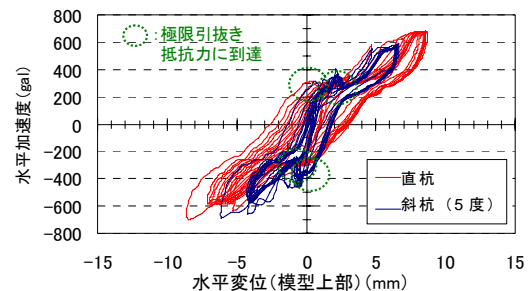


図3 軸力による抵抗モーメント～回転角関係



(a) 2Hz, 100gal 加振



(b) 2Hz, 400gal 加振

図4 構造物天端の水平加速度と水平変位の関係

### 2.3 室内模型実験による知見

室内模型実験から、斜杭の水平抵抗メカニズムとしては、5度程度と比較的小さい角度であっても、水平荷重を杭の軸線方向の力へと変換することができ、これにより大きな抵抗力を得ていることが明らかとなった。ただし、このことは斜杭は直杭よりも小さな水平変位で、押込みや引抜きの支持降伏に達することを意味している。斜杭が支持降伏してしまうと直杭との水平抵抗力の差は小さく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。

### 3. 斜杭基礎の杭頭接合構造

斜杭基礎に鋼管杭を使用する場合、柱や地中梁の鉄筋とアンカー鉄筋や帯鉄筋との干渉が懸念される。そこでアンカー鉄筋と柱や地中梁鉄筋との干渉の克服と、鋼管斜杭の杭頭接合構造に要求される変形性能を確認することを目的に、新たに開発した杭頭接合構造の載荷実験を実施した。

図5に示したのが提案した斜杭杭頭接合構造の概要であり、杭頭部のアンカー鉄筋を杭径よりも小さく矩形に配置することで、柱・地中梁の鉄筋との干渉を緩和した構造とした。また、杭頭部に高い変形性能が求められるため、杭頭部の変形性能向上の既往研究<sup>2)</sup>を参考に、杭頭部に杭地中部よりも小さな矩形断面の領域を形成することで隙間を設け、杭頭部付近に帯鉄筋を密に配置する新構造とした。これにより設計上は矩形仮想RC部材として取り扱うことができる。

提案構造の耐力および変形性能を検証するため、直径450mmの鋼管の接合部模型に対する載荷試験を実施した。図6に従来接合構造（直杭）と斜杭に対する提案接合構造との水平荷重と水平変位の関係を示す。提案接合構造は、最大耐力後の荷重低下が緩やかで、変形性能に優れた構造であることが分かる。一方、従来接合構造は、最大耐力が提案接合構造を上回るものの、脆性的な荷重低下を示しており、変形性能の観点では提案接合構造に劣っている。提案接合構造では、鋼管端部とフーチングに隙間を設けたことと、アンカー鉄筋周囲に密に配置した帯鉄筋による拘束効果が寄与してヒンジ構造的な挙動を示したためと考えられる。また、模型作製時には、従来接合構造の模型に比べて提案接合構造の配筋作業の施工性が良く、アンカー鉄筋と柱や地中梁鉄筋との干渉が克服されていることを確認した。

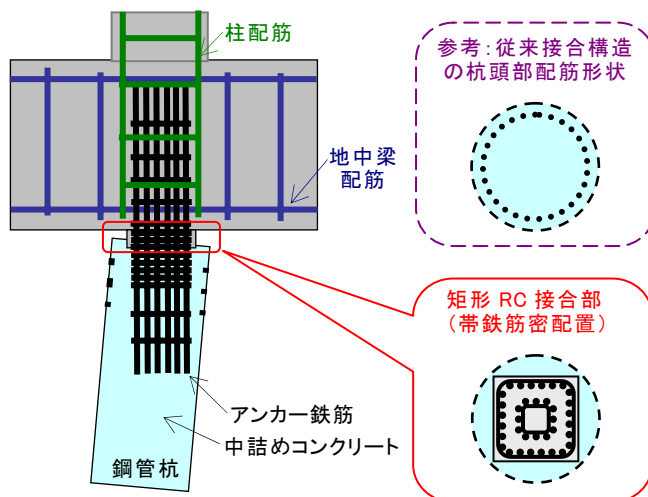


図5 提案する斜杭杭頭部の接合構造

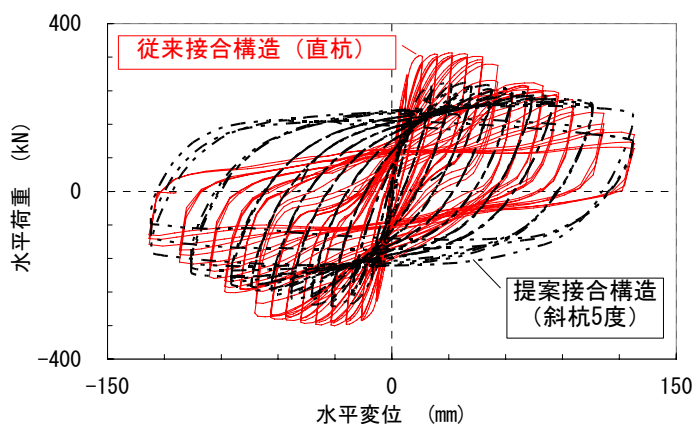


図6 杭頭接合部の水平荷重と水平変位の関係

表1 試設計の結果

Case	杭種別	杭角度	降伏変位 $\delta_y$	降伏震度 $K_{hy}$	等価固有周期 $T_{eq}$	杭形状 (mm)	柱形状 (mm)
Case-0	場所打ち杭	0 度	97.5 mm	0.382	1.010 秒	$\phi$ 1800	1600×1600
Case-1	回転圧入		95.0 mm	0.393	0.983 秒	$\phi$ 1400, 厚さ 19	1400×1400
Case-2	鋼管杭	5 度	99.0 mm	0.394	1.003 秒	$\phi$ 1200, 厚さ 19	1200×1200

#### 4. ラーメン高架橋を対象とした試設計

斜杭基礎を適用することによる経済性や耐震性向上の効果を確認するため、既設計の鉄道ラーメン高架橋を対象に、試設計を行った。試設計は、場所打ち杭基礎のラーメン高架橋を元に、杭形式を回転杭に変更し、直杭と斜杭（5 度）について最適な断面諸元を選定した。既設計構造物の諸元は地震時の走行安全性（隣接構造物との折れ角の制限値）で決定されているため、構造物の等価固有周期  $T_{eq}$  が既設計と同等（約 1.0 秒）となるように杭および柱の断面諸元を選定した。なお、斜杭の地盤ばねは、直杭として算定した値を、全体座標系で鉛直および水平方向にそれぞれ適用している。また、全ケースとも柱部材が先行降伏するように設計している。

試設計の結果得られた杭および柱の断面諸元を表 1 に、斜杭の構造一般図および柱状図を図 7 に示す。試設計の結果、鉛直の鋼管杭に比べて斜杭では 200mm 小径化され、柱断面についても縮減できることがわかった。このように、柱断面の縮減効果が期待できるのは、基礎の水平剛性が向上したことにより、構造物全体系の剛性が向上し、柱断面が小さくても同等の列車の走行安全性が確保できるためである。すなわち、列車走行安全性に必要な剛性を確保するために断面諸元が決定される場合においては、杭を小径化できるのみならず、柱断面も縮減できる可能性が確認できた。

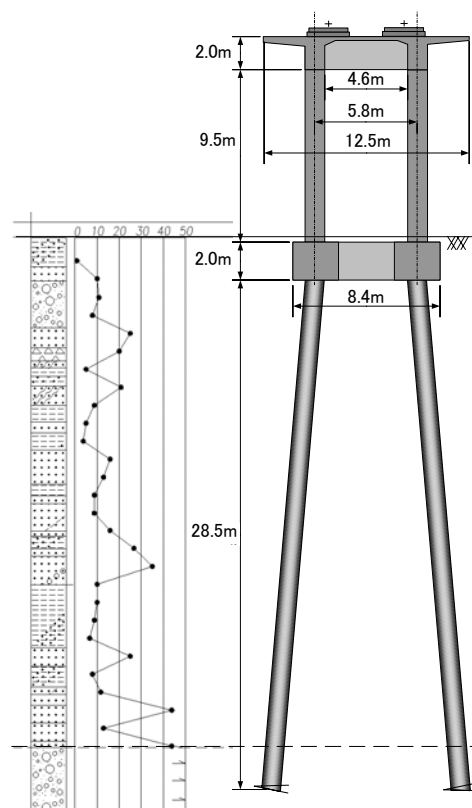


図7 構造一般図と地盤条件 (Case-2)

#### 4. おわりに

本研究では、ラーメン高架橋に 5 度程度と比較的小さな角度の斜杭基礎を適用した場合の剛性向上効果を模型実験で確認するとともに、施工上の課題である杭頭接合構造の開発を行った。また、これらの知見を踏まえて斜杭基礎の試設計を行って、建設コストの縮減が期待できることを確認した。これらの知見は、現在改訂作業中の鉄道構造物等設計標準（基礎構造物）に導入される予定である。なお、本研究は、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構からの委託研究の一部をまとめたものである。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 神田政幸, 濱田吉貞, 山東徹生, 青木一二三: 密帯鉄筋 RC 杭頭接合構造の変形性能のモデル化, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.961-962, 2005