

論文 斜杭基礎を用いたラーメン高架橋の設計施工

曾我 大介¹・陶山 雄介¹・阪田 暁²
長谷川 利晴³・前田 龍一⁴

¹正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 (〒231-8315 横浜市中区本町 6-50-1)
E-mail: soga.dai-px82@jrtr.go.jp suyama.yus-7b3f@jrtr.go.jp

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 九州新幹線建設局 (〒812-8622 福岡市博多区祇園町 2-1)
E-mail: sakata.aki-f8r4@jrtr.go.jp

³非会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東京支社 (〒105-0011 東京都港区芝公園二丁目 4 番 1 号)
E-mail: hasegawa.tos-8m2p@jrtr.go.jp

⁴正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社 (〒532-0003 大阪市淀川区宮原 3-5-36)
E-mail: r.maeda@jrtr.go.jp

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、鉄道構造物で使用され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、列車走行安全性が問題となる場合がある。これに対し、斜杭基礎を適用することで、地震時の制振効果による構造物全体の水平剛性の向上が期待できる。これまでに、斜杭基礎の地震時挙動の詳細な評価や耐震設計法、また杭頭接合構造について検討されてきた。そこで本稿では、斜杭を用いたラーメン高架橋の開発経緯の概要を説明するとともに、新幹線構造物に本設計法を適用した設計施工事例を紹介する。

Key Words: batter pile, seismic design, railroad viaduct running safety

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、鉄道構造物で使用され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、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柱の大断面化やブレースの配置などが考えられるが、軟弱地盤の場合、上部工のみの対応では設計が困難となる場合も少なくない。これに対し、斜杭基礎を適用することで、地震時の制振効果による構造物全体の水平剛性の向上が期待できる。これまでに、斜杭基礎の地震時挙動の詳細な評価や耐震設計法、また杭頭接合構造について検討されてきた。そこで本稿では、斜杭を用いたラーメン高架橋の開発経緯の概要を説明するとともに、新幹線構造物に本設計法を適用した設計施工事例を紹介する。

(1) 模型振動実験による動的挙動の把握

鉄道構造物における斜杭基礎の制震効果に関する研究については、水平抵抗の上昇およびこれに伴う短周期化による効果を非線形応答スペクトル法により考慮する設計手法が提案されており¹⁾、平成 24 年に改訂された鉄道構造物等設計標準・同解説基礎構造物²⁾ (以下、基礎標準) に反映されている。一方で斜杭基礎の効果として、水平抵抗の上昇のほか逆ロッキング動 (図-1) や入力損失による効果があることも数値解析により定性的には確認されていたが、発生メカニズムの解明やそれらをもたらし制震効果を定量的に評価した事例はなかった。

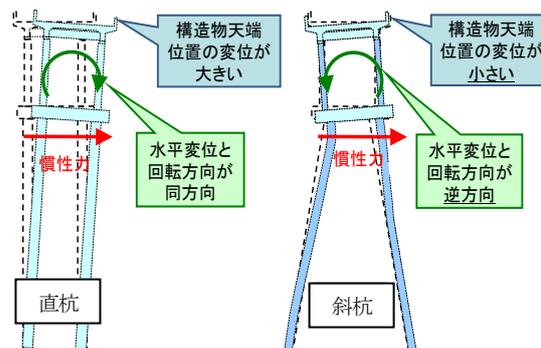


図-1 逆ロッキング動の概念

2. 斜杭ラーメン高架橋の研究開発

そこで、模型振動実験ならびに数値解析を実施し、その挙動を把握するとともに設計法の提案を行った^{3),4)}。

模型実験として、直杭基礎・斜杭基礎でそれぞれ上部工の有無による組み合わせで合計4ケースによるモデルで実施した。模型寸法としては実構造物の約1/10スケールを想定しており、1G場における相似則に基づいて諸元を設定した。斜杭の傾斜角は5度であり、これは実構造物の複線断面鉄道高架橋において杭長が30mの場合に一般的な柱位置から鉄道用地内に収まることを想定した最大の角度である。この高架橋模型をせん断土槽内に設置し、乾燥砂地盤を構築したのちに加振を実施した。

模型実験の結果として、まず上部工がない基礎模型における応答特性について、直杭の場合はフーチングの回転挙動はほとんど発生していないのに対し、斜杭基礎の場合には明確な逆ロッキング動が生じており、斜杭基礎の逆ロッキング動は地盤変位の影響によって生じることが明らかとなった。斜杭基礎の場合杭がハの字型となっているため、杭の軸直角方向に出たたわみを全体座標系に変換すると、押し込み側では隆起方向、引抜き側では沈下方向の変位となる点からも、逆ロッキング動は発生すると考えられる(図-2)。

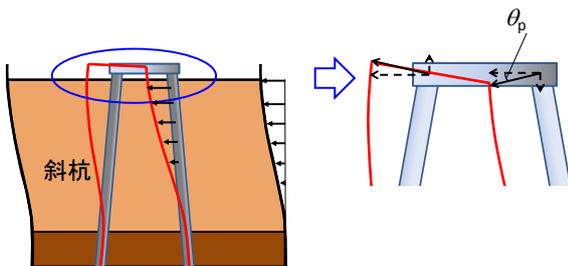


図-2 逆ロッキング動の発生メカニズム³⁾

また、直杭基礎と斜杭基礎における有効入力係数(地表面地震動に対する基礎の水平応答加速度のフーリエ振幅比)を比較したところ、斜杭基礎の入力損失は直杭基礎よりも大きくなることが確認された。この傾向は実構造物を対象とした解析的検討の結果とも一致することが示されており、斜杭基礎の制振効果として期待できる。

次に上部工がある状態における斜杭基礎の制震効果について示す。上部工ありの場合での振動実験を実施してはいるが、直杭と斜杭基礎の場合で固有振動数が異なるため、単純に実験結果を比較するだけでは逆ロッキング動や入力損失による効果を評価することはできない。そこで数値解析モデルを構築し、数値実験により実験ケースを補完することで、斜杭基礎による逆ロッキング動と入力損失の効果が高架橋全体に及ぼす制震効果について評価を試みた(図-3)。

解析の結果、直杭基礎と斜杭基礎における入力損失ならびに逆ロッキング動が高架橋天端の応答加速度に与える影響は、直杭基礎の場合、入力損失ならびにロッキン

グ動の効果が確認できなかったのに対し、斜杭の場合には入力損失ならびに逆ロッキング動により応答が低減されており、その中でも逆ロッキング動による低減効果の方が相対的に大きいことが明らかとなった(図-4)。

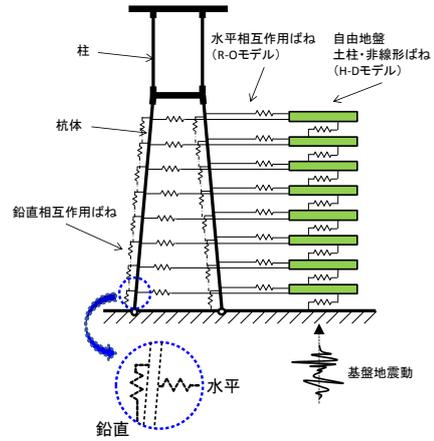


図-3 数値解析モデル³⁾

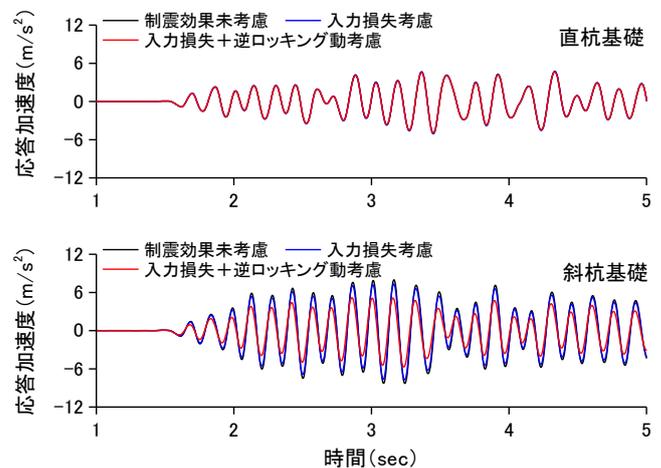


図-4 数値解析から求められた斜杭基礎の制震効果³⁾

(2) 耐震設計手法の提案

多点入力モデルを用いた動的解析により斜杭ラーメン高架橋の地震時挙動を再現できることが示されたが、設計実務への適用を考え、静的解析法による応答値算定手法を提案した⁵⁾。鉄道構造物の設計では、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が用いられる。斜杭の逆ロッキング動による応答低減効果を簡易に考慮する手法として、地盤変位のみを静的作用として与えた解析(図-5)から近似的に評価する式を提案した。

$$\lambda_{\theta} = 1 - \frac{L\theta_f}{u_g + u_b} \quad (1)$$

ここで、 λ_{θ} は斜杭応答低減係数、 L は構造高さ、 θ_f は基礎の回転角、 u_g は地盤変位のみを作用(慣性力を除いた応答変位法)させた際の杭頭における地盤変位であり、 u_b は基礎位置での入力地震動の最大変位である。この低減係数を応答塑性率に乘じることで低減(実務上は便宜的に所要降伏震度スペクトルを読み取る際の降伏震度を

割り増す⁶⁾させるなどを行い、静的解析法による斜杭ラーメン高架橋の耐震設計を行うことが可能となった。

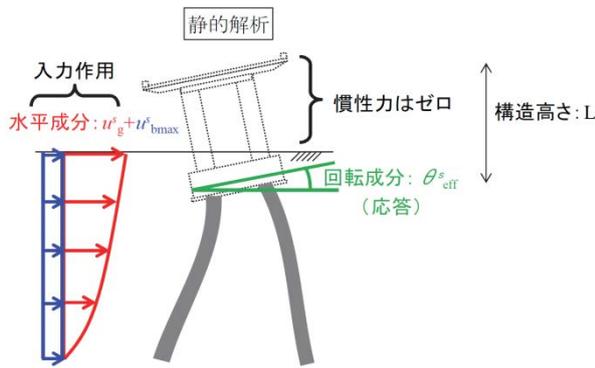


図-5 斜杭高架橋の所要降伏震度スペクトル低減のための解析の概要

3. 斜杭高架橋の設計事例

(1) 概要

斜杭高架橋の設計事例として、北陸新幹線（金沢・敦賀間）の花堂高架橋を紹介する。花堂高架橋は高崎起点424km82m、福井駅より約3km終点方に位置している。花堂高架橋は2層4径間のラーメン高架橋で、前後は北陸本線と隣接しており、特に花堂高架橋は北陸本線の駅ホームと平面的に一部が輻輳する構造である（図-6）。また、約300m起点側で市道と交差するため、柱高が約15mと高い構造となっている。図-7に柱状図を示す。表層20m程度はN値0～10以下の粘性土であり、支持層はN値50程度の砂礫層だが、層厚が10m程度と薄く、下層にはN値15程度の粘性土が25m程度堆積している。そのため、当該地盤の地盤種別はG5地盤（地盤の固有周期 $T_g=0.75\sim 1.0$ ）であり、柱高が高いこともあり、地震時の列車走行安全性の照査が厳しいことが予想された。

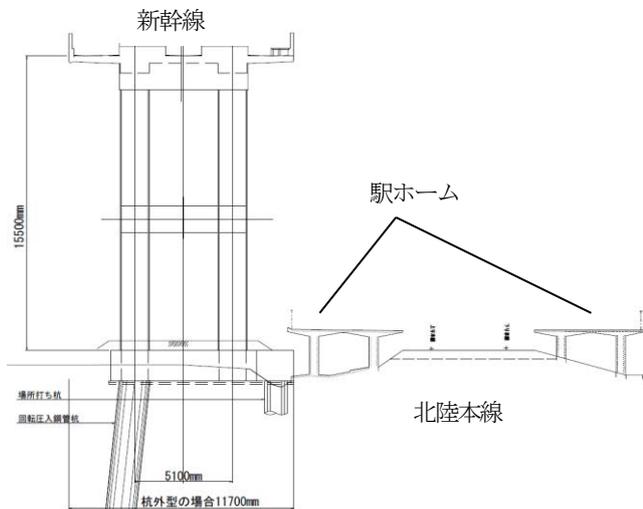


図-6 構造一般図

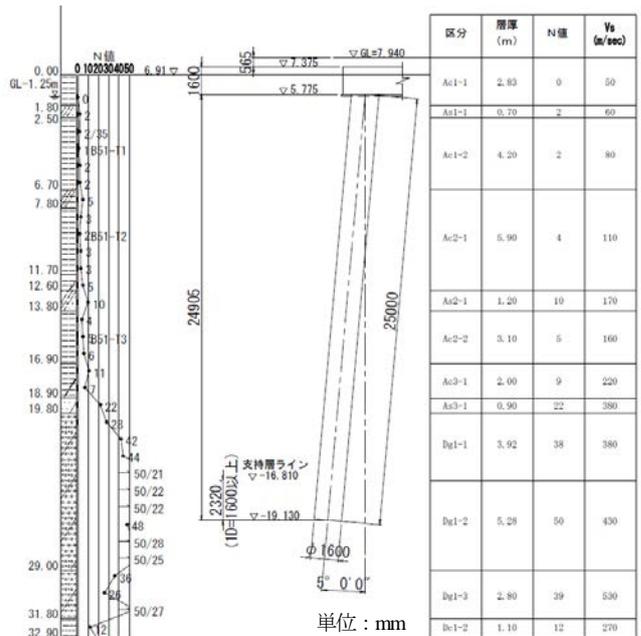


図-7 柱状図および杭一般図

構造物の固有周期の低減および軌道面の不同変位抑制を目的として通常の杭と柱の中心軸が同一である1柱1杭方式のラーメン高架橋でなく、横地中梁を張出し、杭を柱より外側に配置した（杭外型）ラーメン高架橋も検討したが、隣接に北陸本線の駅ホームが杭およびフーチングの施工に支障してしまうため採用できなかった。そのため、回転鋼管杭による斜杭での設計が採用された。

(2) 設計

花堂高架橋の杭径は基礎標準で認められている回転鋼管杭の最大径である $\phi=1,600\text{mm}$ で設計を行った。杭の傾斜は新幹線用地内に収まる様に5度で設計を行った。構造モデルは通常のラーメン高架橋の設計に用いられている骨組みモデルで応答値を算定し、照査を行った。基礎については、支持層の層厚が薄いため、不完全支持の照査を行った。

地震時の走行安全性の照査として振動変位の照査を行った。鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計⁷⁾にもある通り、構造物の損傷レベルおよび安定レベルが1（弾性領域）であることを確認した。非線形応答スペクトル法により求めた構造物の等価固有周期 $T_{eq}=1.195\text{sec}$ で当該地盤はG5地盤のため、応答スペクトル強度としては $4,265\text{s/mm}$ であった（図-8）。等価固有周期 $T_{eq}=1.195\text{sec}$ での限界スペクトル強度 SI_L は $4,100\text{s/mm}$ である。ここに、本来ならば前章の(1)式より求める斜杭応答低減係数 $\lambda_0=0.9$ によって応答値を低減すべきであるが、便宜的に λ_0 で限界スペクトル強度を割り増した⁶⁾結果、修正限界スペクトル強度 SI'_L は $4,556\text{s/mm}$ であり、照査を満足する結果となった。躯体寸法等が同一で直杭と斜

杭のみが異なる構造物であっても、等価固有周期が一致しないため、直杭と斜杭を単純には比較できないが、本設計では斜杭応答低減係数を割り増したことにより照査を満足しており、十分に斜杭が有効であることがわかる。

地震時の走行安全性以外の照査の結果、本構造物の決定ケースは L2 地震時の線路方向の基礎の残留傾斜であったが、所定の性能を満足する結果であった。

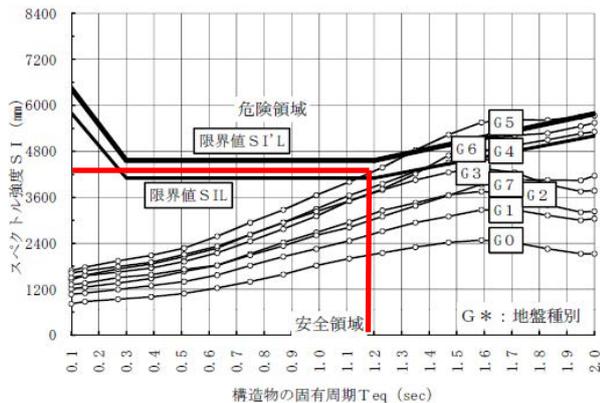


図-8 地震時の走行安全性に係る変位の限界値 S_{IL} と L1 地震動による応答値 S_I

4. 斜杭基礎の施工事例

(1) 現場概要

斜杭高架橋の施工事例として小松木場潟(南)工区の施工を紹介する⁸⁾。小松木場潟(南)工区は、石川県小松市の延長2,645mの高架橋工事である。このうち起点方の1,745mは、加賀三湖の木場潟が近接し、軟弱な沖積粘土層が厚く堆積していることから、場所打ち杭の施工が困難と予想されたため、鋼管杭基礎(写真-1)を採用している。斜杭については、水平震度が高く、列車走行安全性の照査が厳しい構造物で採用された。鋼管杭(斜杭および直杭)の施工は回転杭工法を採用し全周回転機で施工する。鋼管杭径は $\phi 1,200 \sim \phi 1,500$ 、杭長は $L=22.5 \sim 41.5$ m、斜杭の傾斜は新幹線用地内に収まる最大の4度、羽根外径は杭径の1.5倍である。鋼管杭の施工本数は364本であり、そのうちラーメン高架橋部の306本が斜杭基礎、橋脚部の58本が直杭基礎である。



写真-1 回転圧入鋼管杭(先端羽根付き下杭)

(2) 斜杭基礎の施工

a) 全周回転機の位置出し、設置

測量機器により杭芯を確認した後に全周回転機を設置するが、斜杭基礎の場合は杭芯が斜めのため、地盤高を確認し傾斜分のシフト量を決めた後、杭芯の位置出しを行った。定規鉄板設置時に全周回転機の位置が定まることから、定規鉄板の線路方向及び線路直角方向に水糸を張り、傾斜分のシフトを考慮して現地に位置出しした杭芯に合わせる(写真-2)ことにより、全周回転機の設置作業を行った。



写真-2 斜杭の杭芯セット状況

b) 先端羽根付き下杭建込み

先端羽根付き下杭をクローラクレーンで吊り込み、杭を人力で回転させながらスパイラルチャック(写真-3)を貫通させ建て込んだ後、全周回転機を傾斜させ(図-9)、下杭の圧入を行った。この際の鉛直性は、トランシット、デジタル傾斜計(写真-4)等で線路方向及び線路直角方向の2方向で確認した。



写真-3 スパイラルチャック部



写真-4 デジタル傾斜計による傾斜確認

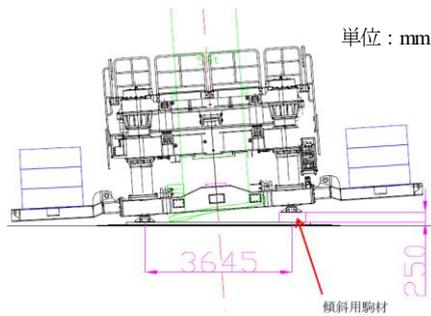


図-9 全周回転機（駒材を使用）

c) 中杭及び上杭の建込み, 溶接, 圧入

下杭圧入後, 下杭の上端部に裏当てリングを溶接で設置し, 中杭をクローラークレーンで吊り込んだ. トランシットとデジタル水準器で鉛直度, 斜角度を確認し中杭を建込み, 外周部の溶接を行った後, 回転圧入を行った (上杭の建込みについても同様) .

d) ヤットコ建込み, 圧入

本杭を施工基面下の計画深度まで圧入するため, 上杭の上にヤットコ (仮に設置する鋼管製の筒) を建込み, 回転圧入を行った. 本杭同様にトランシットとデジタル傾斜計で鉛直度, 斜角度を確認しながら施工した.

e) 支持層確認, 打ち止め, ヤットコ引上げ

回転圧入中は, 施工地盤の土質柱状図 (層質, N値) と先端貫入抵抗値 (施工トルク) 等の変化を, 施工管理システムのモニター (写真-5) にて確認し, 支持層の深度確認を行った. 打ち止め深度管理は, 直杭, 斜杭ともに上杭上端からあらかじめ設定したレベル確認標高までの長さを計算し, その長さを測りヤットコ外周にマーキングした. マーキングした位置がレベル確認標高になった時点で回転圧入完了とした. ヤットコ引上げ後は, 鉄蓋を上杭の上に落とし込み, 土砂にて埋戻しを行った.



写真-5 施工管理システムモニター

f) 杭頭処理

斜杭の杭頭接合部は逆ロック作用が十分に発揮される様に杭頭部の変形性能を確保する必要があるため, 杭本体が地震時等の変形により地中梁に干渉しないことが求められる. そのため, 4度の傾斜のある杭頭部を水平に切断し, 鋼管杭天端と地中梁下面との間に厚さ

20mmの剛性の低い目地材 (発泡スチロール) を設置して隙間を確保した (図-10) .

鋼管杭の杭頭部切断は, 床掘り及び基礎砕石を敷均した後にを行った. 鉄蓋撤去後, レベル測量にて地中梁下面-20mmの箇所に罫書き線を入れ, 罫書き線に沿ってガス切断を行った. その後, クレーンにて吊型枠を設置し, 均しコンクリート打設, 杭頭鉄筋組立, 中詰コンクリート打設を行った. 中詰コンクリート打設後に目地材設置, 地中梁部の施工を行った.

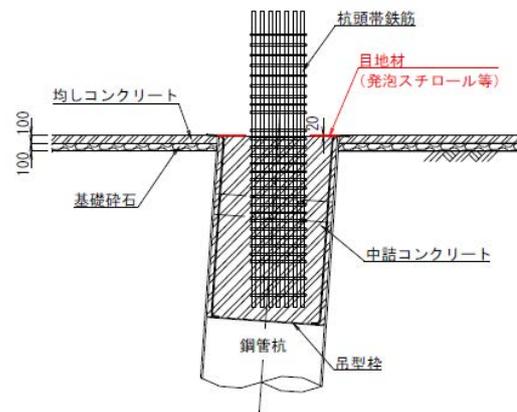


図-10 杭頭接合部の構造

単位: mm

(3) 斜杭施工に係る施工管理項目

斜杭の施工にあたっては, 傾斜量の管理が重要となる. 一般的な鋼管杭の鉛直性に係る許容誤差は $\pm 10/1000\text{rad}$ (≈ 0.57 度) である. 一方, 斜杭は, 設計上傾斜を4度としており, 線路直角方向の水平剛性を確保する設計の主旨を踏まえ, 4度に対して $+10/1000 \sim -0/1000\text{rad}$ の管理を行うこととした (誤差がプラスの場合, 角度が大きくなる) .

(4) 施工結果

回転圧入時のトルク管理について, 支持層へ予定より早く貫入し, 高トルクでの鋼管圧入が困難と判断された時は, 設計値以上の支持層への根入れがあること, 杭の段落とし及び現場溶接継手位置の作用曲げモーメントが制限値を下回っていることを確認し, 打ち止めとした. また, 支持層が想定より深くなった場合は, 低止まりとなるが, 所定の根入れ長を確保し, 杭の段落とし及び現場溶接継手位置の照査を満足することを確認し打ち止めとした. 不足した分の鋼管は, 床掘後に溶接し継ぎ足し施工した. なお, 支持層が設計より1mを超えても確認出来ない場合は, 床掘してから継杭は困難なため, 一旦施工を中断し, 調査ボーリングにより支持層の位置と継杭の範囲を確認し, 継杭を搬入してから, 再度施工を行った. 当工区では, 364本中, 高止まり6本, 低止まり6本 (内4本は1m以上) であった.

図-11に本工区で行った回転鋼管杭の直杭および斜杭の傾斜量の精度を示す。鉛直性の施工精度については、杭頭処理時に最終確認を行っており、斜杭は直杭に比べ、傾斜量の許容誤差を半分（プラス側のみ）としたが、管理値内に収まっていることがわかる。

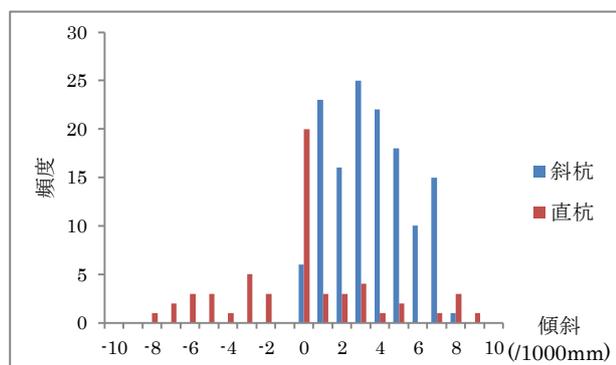


図-11 直杭,斜杭の傾斜量の精度

5. おわりに

花堂高架橋において、斜杭基礎による設計を行った。当該地は軟弱地盤でかつ北陸本線と隣接しており、厳しい条件であるが、斜杭基礎にすることで列車走行安全性の照査を満足する結果となった。花堂高架橋は平成31年2月より鋼管杭の回転圧入工事を開始する予定である。

小松木場潟（南）高架橋工区においては、鋼管杭の回転圧入を平成29年5月から平成30年1月まで行い、現在高架橋・橋脚の構築を進めているところである。新幹線本線の鋼管杭形式のラーメン高架橋において、斜杭基礎を採用する際の施工面の課題として、斜杭の傾斜量の精度確保及び杭頭接合部の施工性等が懸念されたが、小松木場潟（南）高架橋工区の施工においては傾斜量の精度は

確保され、また杭頭接合部の施工性も問題とならなかった。

今後の鋼管杭の設計では、線路直角方向の水平剛性を向上させる経済的な手法として、地盤条件等を踏まえつつ、斜杭構造導入の検討を行っていくことが望まれる。また、本報告が今後の斜杭基礎を有する鉄道構造物の設計・施工の参考になれば幸いである。

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) 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 基礎構造物, 2012.
- 3) 佐名川太亮, 西岡英俊, 本山紘希, 室野剛隆, 高野裕輔, 陶山雄介, 米澤豊司, 青木一二三: 斜杭ラーメン高架橋を対象とした地盤変位作用時に関する実験的検討, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.71, No.3, pp.163-176, 2015.
- 4) 佐名川太亮, 西岡英俊, 室野剛隆, 高野裕輔, 米澤豊司, 青木一二三: ラーメン高架橋柱端部の塑性化が斜杭基礎の制震効果に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.2, pp.302-314, 2016.
- 5) 本山紘希, 室野剛隆, 高野裕輔, 青木一二三: 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, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.1, pp.152-166, 2015.
- 6) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構編: 斜杭基礎高架橋の設計の手引き, 2014.
- 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) 長谷川利晴, 阪田暁, 山本二郎: 斜杭基礎を用いたラーメン高架橋, 橋梁と基礎 (投稿中), 2018.

(2018. 4. 6 受付)

DESIGN AND CONSTRUCTION OF RIGID-FRAME VIADUCT USED BATTER PILE FOUNDATION

Daisuke SOGA, Yusuke SUYAMA, Akira SAKATA, Ryuichi MAEDA and Toshiharu HASEGAWA

In the railway structure, in order to secure the train running safety at the time of earthquake, it is required to make it a structure with high horizontal rigidity and to reduce disparity at the structure boundary. However, the rigid-frame viaduct used in a railway structure generally has a lower horizontal stiffness in the direction perpendicular to the rail than a girder viaduct, so train running safety may be a problem in some cases. On the other hand, by applying the batter pile foundation, improvement of the horizontal rigidity of the whole structure due to the damping effect at the time of earthquake can be expected. The detailed evaluation of the behavior of the batter pile foundation at the time of earthquake, the seismic design method, and the joint structure of the pile head have been investigated so far. In this paper, we outline the development history of rigid-frame viaduct using batter piles and introduce design and construction examples applying this design method to Shinkansen structure.