

斜杭式栈橋上部工のプレキャスト化に関する 杭頭接合方法の提案

池野 勝哉¹・白 可²・岩波 光保³・川端 雄一郎⁴・加藤 絵万⁴

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: katsuya.ikeno@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

³ 正会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

⁴ 正会員 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

著者らは、直杭式栈橋のプレキャスト化に適した杭頭接合として「鞘管方式」を提案している。「鞘管方式」とは、鋼管杭よりも直径の大きな鞘管をプレキャスト上部工に埋設し、鞘管内に鋼管杭を杭径程度挿入するとともに、その間隙を無収縮系のモルタルで充填して一体化を図る方法である。一方、栈橋には水平剛性を高めた斜杭式も広く適用されているが、「鞘管方式」を適用しようとした場合、鋼管杭の斜角によって鞘管径が大きくなるため、杭頭部の固定度が低下する懸念がある。そこで本研究では、新たに「ソケット鉄筋方式」と呼称する斜杭用の接合方法を提案し、各方式の杭頭部の固定度を確認するための正負交番載荷実験を実施した。実験の結果、従来の現場打ち上部工による杭頭接合と比べて、「鞘管方式」は概ね同程度、「ソケット鉄筋方式」はより高い水平剛性および固定度を有することを確認した。

Key Words : raking pile, precast concrete, pile connection, cyclic loading test, rigid connection

1. はじめに

近年、建設現場の生産性を向上するため、プレキャスト施工が有効な手段として期待されている。著者らは、過去に直杭式栈橋のプレキャスト化に適した杭頭接合として「鞘管方式」を提案しており、優れたエネルギー吸収性能と高い杭頭部の固定度を有することを示している^{1)~3)}。「鞘管方式」とは、鋼管杭よりも直径の大きな鞘管をプレキャスト上部工に埋設し、鞘管内に鋼管杭を杭径程度挿入するとともに、その間隙に無収縮系のモルタルを充填して一体化を図る方法である。一方、栈橋には水平剛性を高めた斜杭式も広く適用されているが、「鞘管方式」を適用しようとした場合、鋼管杭の斜角によって鞘管径が大きくなるため、杭頭部の固定度が低下する懸念がある。そこで本研究では、新たに「ソケット鉄筋方式」と呼称する斜杭用の接合方法を考案し、試験体を用いた正負交番載荷実験から杭頭部の固定度について考察した。

2. 杭頭接合の概要

本研究で実施した斜杭用杭頭接合の概要を図-1に示す。

(1) 鞘管方式

鋼管杭の斜角を考慮した直径の鞘管をプレキャスト上部工に埋設し、鋼管杭を鞘管内に杭径程度挿入した後、鋼管杭と鞘管との間隙に現場打ちコンクリートを打設する方式である。外力モーメントに対して、鋼管杭から偶力として支圧力が鞘管に作用し、鞘管と接続された上下の主筋に力が伝達する。この方式は、直杭式のプレキャスト上部工で実績^{3),4)}があり、施工手間が少ない点で優れているが、斜杭に適用する場合には鋼管杭と鞘管との間隙が大きくなるため、杭頭部の固定度が低下する懸念がある。

(2) ソケット鉄筋方式

鞘管方式と同様の鞘管に、斜杭を挿入する代わりに、杭頭に設置した斜角に対して鉛直上向きに折り曲げられた杭頭筋を挿入する。杭頭筋はソケット管に溶接されたユニットとして鋼管杭に固定される。この時、挿入長はソケット方式⁵⁾を参考に杭径の1.5倍とする。ソケット管と鋼管杭の間隙には無収縮系のモルタルを充填し、鞘管と杭頭筋の空間には現場打ちコンクリートを打設して一体化する方式である。ソケット管が挿入された鋼管杭は2重管構造となるため、最大モーメントが作用する杭頭部が高剛性化される。

3. 交番载荷実験

(1) 実験概要

実験では、上部工（厚さ 340 mm×幅 600 mm×長さ 1700 mm）と 2 本組の斜杭（STK400, $\phi 165.2 \times t4.5$, 斜角 10 度）およびスタブで構成された試験体を用い、スタブを反力床に固定した状態で、上部工を水平载荷ジャッキ（1,000 kN）により加力した（図-2）。上部工の両端面には剛性の高い鋼板を PC 鋼棒で連結した载荷治具を配置し、载荷ジャッキに接続された図中左側の载荷治具を正負に加力することで交番载荷実験を実施した。

(2) 実験ケース

実験ケースを図-3 に示す。実験に用いた試験体は、現場打ち上部工による(a)従来方式、プレキャスト上部工の(b)靴管方式および今回新たに考案した(c)ソケット鉄筋

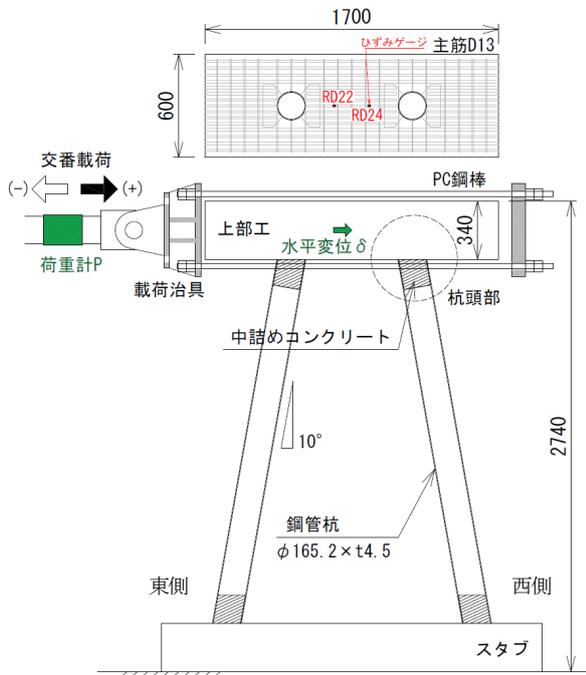
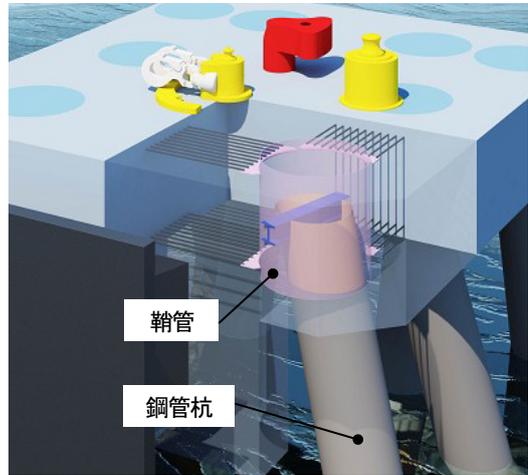
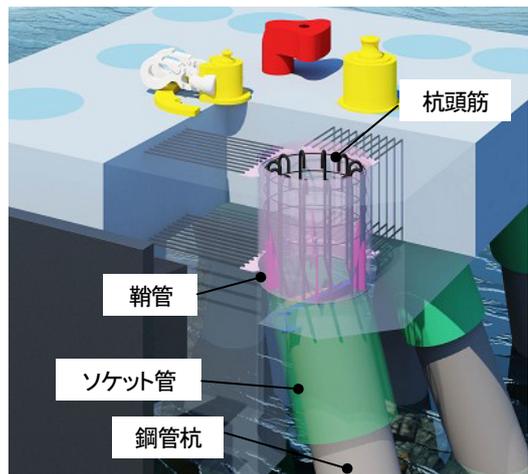


図-2 交番载荷実験の一般構造 (単位: mm)

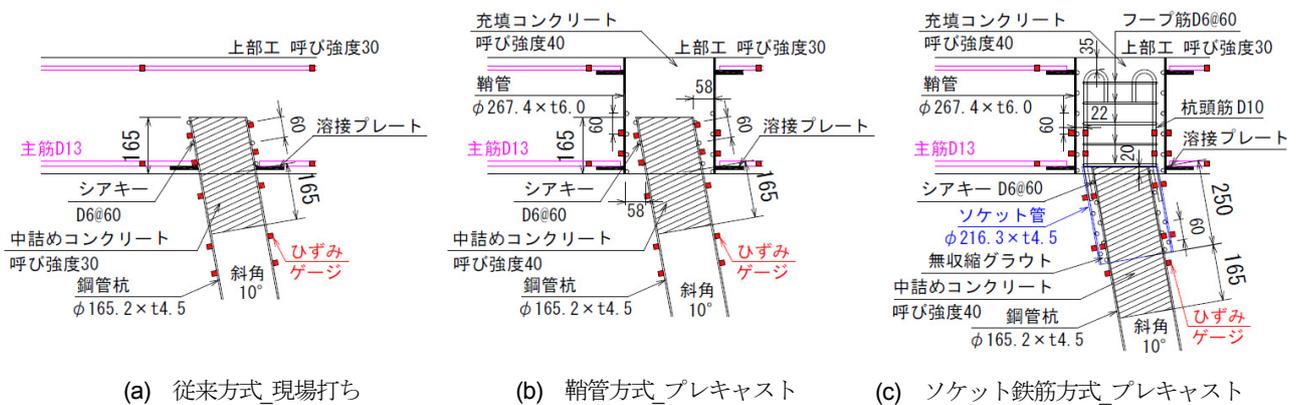


(a) 靴管方式



(b) ソケット鉄筋方式

図-1 斜杭用杭頭接合の概要



(a) 従来方式_現場打ち

(b) 靴管方式_プレキャスト

(c) ソケット鉄筋方式_プレキャスト

図-3 実験ケース_杭頭部 (単位: mm)

したプレートにそれぞれ主筋 D13 をフレア溶接し、呼び強度 30 のプレキャスト上部工を製作した。その後、鞘管内に鋼管杭を 1.0D (D : 杭径) 挿入し、呼び強度 40 の充填コンクリートを打設することで一体化を図った。(c)ソケット鉄筋方式は、ソケット管 (STK400, φ216.3×t4.5) と杭頭筋 (SD345) D10×24 本で構成されたユニットを杭頭部に 1.5D (D : 杭径) 挿入させ、その間に無収縮グラウトを充填した後、鞘管方式と同径の鞘管内に杭頭筋を挿入し、呼び強度 40 の充填コンクリートを打設した。中詰めコンクリートは上部工下端あるいはソケット管下端から 1.0D まで打設した。なお、各方式の杭頭部にはシアキーとして丸鋼 D6 を 60 mm ピッチで溶接した。試験体の一例として「ソケット鉄筋方式」の製作状況を写真-1 に示す。

(3) 荷荷条件

荷荷条件は、杭頭部の任意のひずみゲージが降伏値 ($\epsilon_y=1718 \mu$) に達した時の上部工中心の水平変位を δ_y とし、 $\pm 0.5 \epsilon_y$, $\pm 1 \delta_y$, $\pm 2 \delta_y$, $\pm 3 \delta_y$ の其々を 3 サイクルを繰り返した。ここで、 $\pm 0.5 \epsilon_y$ は試験体が弾性挙動を示すと考えられる荷荷ステップであり、水平変位 δ_y ではなく杭頭部のひずみ ϵ_y から定義している。実験では上記の交番荷荷を実施した後、毎秒 0.1mm の速度で一方向の単調荷荷を行った。荷荷プログラムの模式図を図-4 に示す。

(4) 使用材料および計測項目

実験で使用した鋼材の機械的性質を表-1、コンクリートおよび無収縮グラウトの材料特性を表-2 に示す。なお、鋼材の引張試験およびコンクリート等の圧縮試験は JIS 規格に準じて行い、コンクリートおよび無収縮グラウトの圧縮強度は、加力前日の試験結果を示している。

計測項目は、荷荷荷重 P や上部工中心の水平変位 δ 、鋼管杭・ソケット管および杭頭筋・主筋の軸ひずみ ϵ 、上部工のひび割れ性状である。また、杭頭部の固定度を評価するため、上部工下端から 65 mm 下方の高さにフラットバー (80 mm×40 mm) を取付け、鉛直変位を計測することで、式(1)より杭頭部の相対回転角 θ_r を算出した (図-5)。

$$\theta_r = \frac{\delta_{r1} - \delta_{r2}}{L} \quad (1)$$

表-1 鋼材の機械的性質

		降伏点 f_y (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	弾性係数 E (N/mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)
STK400	鋼管杭	384.1	447.3	223×10^3	1718
	ソケット管	423.5	457.2	217×10^3	1955
	鞘管	377.1	430.6	211×10^3	1792
SD345	主筋	375.9	553.7	181×10^3	2082
	杭頭筋	384.8	560.4	192×10^3	2007



(a) 上部工の鞘管および配筋状況



(b) ソケット鉄筋



(c) 上部工架設

写真-1 試験体の製作状況 (ソケット鉄筋方式)

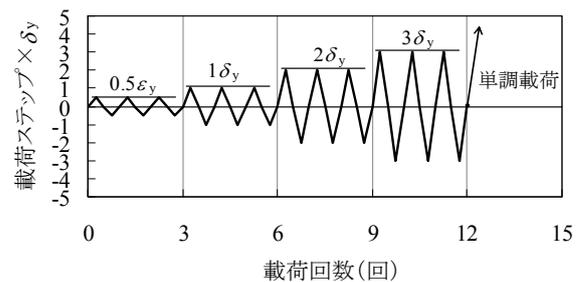


図-4 荷荷プログラムの模式図

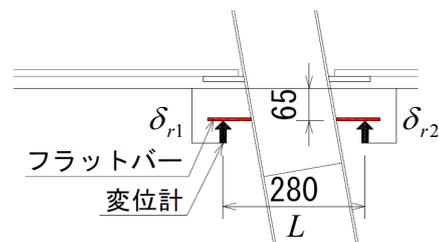


図-5 杭頭部の計測方法 (単位: mm)

表-2 コンクリートおよび無収縮グラウトの材料特性

	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	割裂強度 σ_t (N/mm ²)	弾性係数 E (N/mm ²)	方式
上部工 コンクリート	32.6	2.8	28.8×10^3	従来
	33.2	2.8	28.7×10^3	鞘管
	31.2	2.8	30.2×10^3	ソケット鉄筋
充填 コンクリート	48.6	3.6	32.8×10^3	鞘管
	47.6	3.6	31.9×10^3	ソケット鉄筋
無収縮グラウト	67.5	4.8	25.5×10^3	ソケット鉄筋

4. 実験結果

(1) 荷重-変位関係とひび割れ性状

+3 δ_y の3回目(±3 δ_y (3)と表記)の繰り返し直後のひび割れ性状, 実験状況を示した写真, 荷重 P -変位 δ 関係を図-6, 降伏イベントを表-3に示す. なお, ひび割れの色別は荷重方向による区別を表しており, 数字は±3 δ_y (3)におけるクラックゲージで計測したひび割れ幅の最大値を示している. ひび割れ性状を見ると, 従来方式では上部工底面に杭頭部を中心とした放射状のひび割れが多数発生しているのに対して, 鞘管方式およびソケット鉄筋

方式は荷重方向に直交したひび割れが数本程度発生し, ひび割れ幅の最大値も比較的小さいことが分かる. これは, 図-7に上部工下側の主筋ひずみ挙動を示すが, 鞘管方式およびソケット鉄筋方式の主筋ひずみが従来方式よりも小さいことから, 上部工に埋設された鞘管の拘束力によって, 主筋に伝達される力を緩和しているためだと推察される. 荷重 P -変位 δ は, 各方式ともに紡錘型の履歴曲線を描いているが, 鞘管方式では若干, 荷重0付近で変位が進行する兆候が認められる. なお, ソケット鉄筋方式は, 他よりも同変位における荷重が大きいことから, 高い剛性を保持していると考えられる.

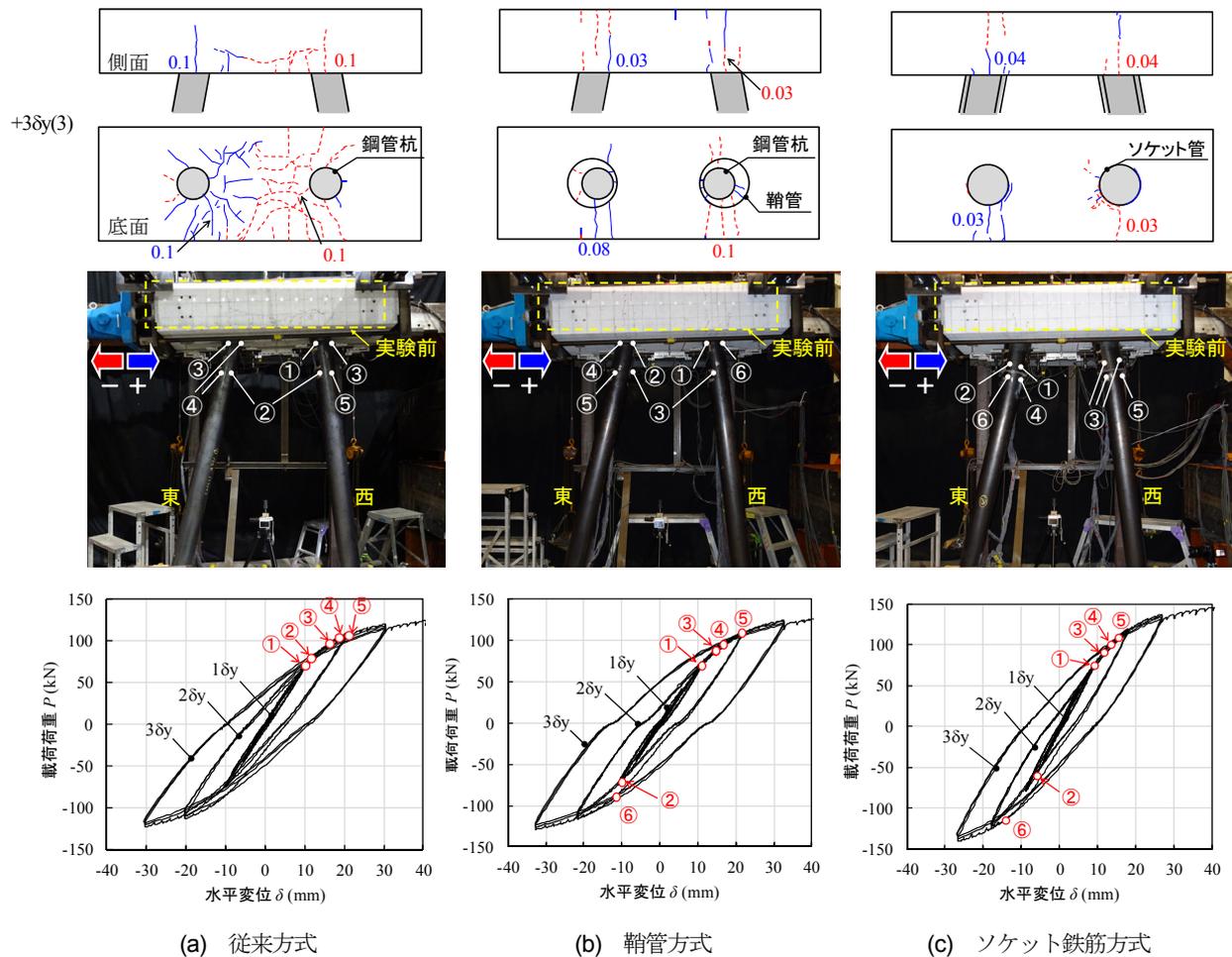


図-6 荷重-変位関係およびひび割れ性状

表-3 降伏イベント

箇所	従来方式	鞘管方式	ソケット鉄筋方式
①	杭頭部(西内側)	杭頭部(西内側)	鋼管杭(東内側)
②	鋼管杭(東西内側)	杭頭部(東内側)	鋼管杭(東外側)
③	杭頭部(東西外側)	鋼管杭(東西内側)	鋼管杭(西内外側)
④	杭頭部(東内側)	杭頭部(東外側)	鋼管杭(東内側)
⑤	鋼管杭(西外側)	鋼管杭(東外側)	鋼管杭(西外側)
⑥		杭頭部(西外側)	鋼管杭(東外側)

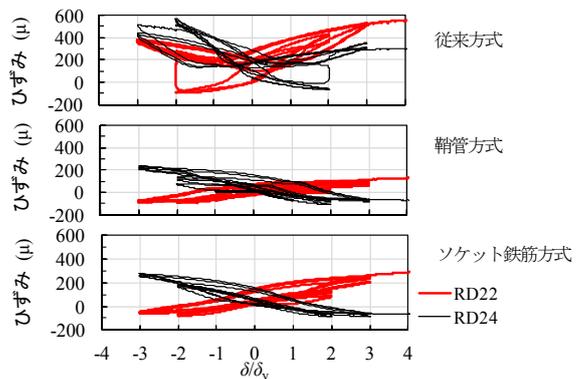


図-7 上部工下側の主筋ひずみ挙動

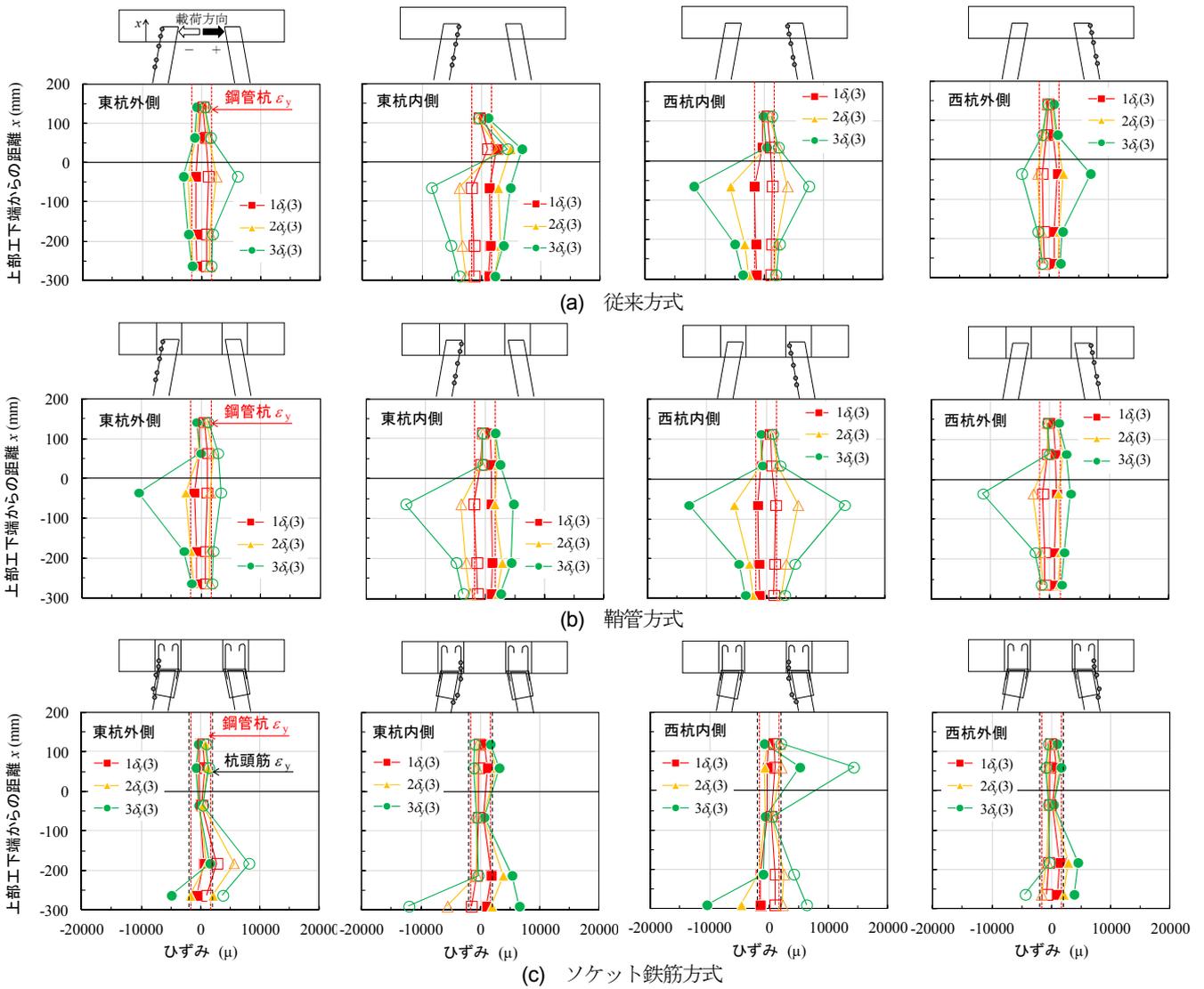


図-8 杭頭部のひずみ分布 (中塗り：荷重方向+, 白抜き：荷重方向-)

(2) 杭頭部のひずみ分布

各荷重ステップの3回目の繰り返し直後における杭頭部(鋼管杭, 鞘管, 杭頭筋)のひずみ分布(引張が正)を図-8に示す。なお, 縦軸は上部工下端からの距離 x (鉛直上向きが正), 図中の中塗りが荷重方向+, 白抜きが荷重方向-におけるひずみを表している。

荷重ステップが進むに従い, 杭頭部のひずみが増加し, 特に(a)従来方式と(b)鞘管方式では, $3\delta_y$ で上部工下端よりやや下方のひずみが局所的に発達していることが分かる。これは, 上部工内で杭頭部が拘束され, 外力モーメントによる鋼管杭のひずみの発生が上部工下端に集中していることを示唆している。一方, (c)ソケット鉄筋方式は, ソケット管と鋼管杭の2重管構造の曲げ剛性 EI が, 中詰めコンクリートを無視した場合でも鋼管杭の3.3倍となるため, ひずみが上部工下端ではなくソケット管下端($x=-300$ mm)付近に発生している。なお, $3\delta_y$ の荷重ステップでは杭頭筋の内側が降伏していた。

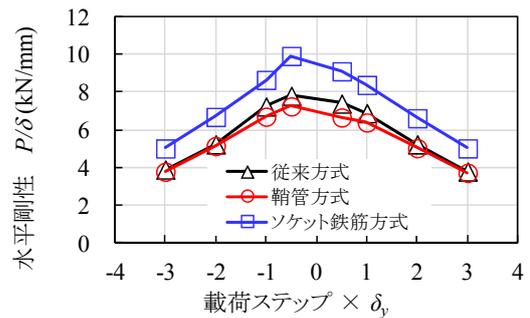


図-9 試験体の水平剛性

(3) 試験体の水平剛性

各荷重ステップの3回目の繰り返し直後における荷重 P を変位 δ で除して評価した水平剛性(P/δ)を図-9に示す。いずれの方式も荷重ステップが進むに従い, 水平剛性は低下傾向にある。鞘管方式は従来方式よりもやや低い水平剛性を示し, ソケット鉄筋方式は他に比べて, 1.3倍程度の高い水平剛性を発揮している。これは, 先述したように, 杭頭部のソケット管と鋼管杭による2重管構造が試験体の水平剛性を高めているためだと考えられる。

(4) 杭頭部の相対回転角

杭頭部の固定度が高いほど剛結条件に近似し、杭頭部の相対回転角 θ_r は小さくなるものと考えられる。そこで、式(1)で算定した東杭頭部の相対回転角 θ_r を図-10に示す。なお、図は上部工下端から65mm下方での相対回転角をプロットしたものであり、理論上、剛結条件であっても $\theta_r=0$ とはならないことを付記する。各方式ともに、相対回転角は荷重ステップの進行に伴い増加傾向を示すが、従来方式では+3 δ_y のステップで図-5のフラットバーより下方位置の座屈により相対回転角が低下した。ソケット鉄筋方式の相対回転角は、他方式よりも小さく、また荷重ステップの進行に伴う変化も小さいことから、杭頭部の固定度が高い方式であると考えられる。

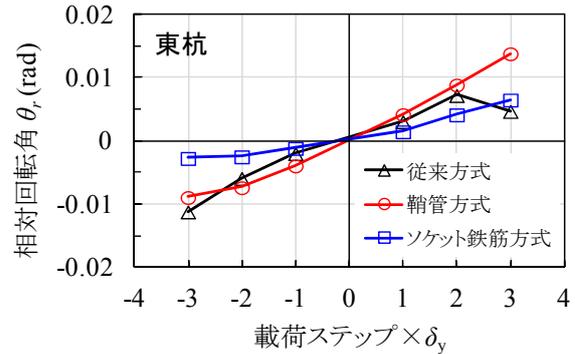


図-10 東杭頭部の相対回転角 (繰り返し3回目)

5. おわりに

本研究では、栈橋プレキャスト上部工の斜杭用の杭頭接合方法として新たに「ソケット鉄筋方式」を考案し、現場打ち上部工による「従来方式」と著者らが過去に提案した「鞘管方式」を比較対象に、杭頭部の固定度に関する交番荷重実験を実施した。

鞘管方式は、試験体の荷重-変位関係や杭頭部のひずみ分布、試験体の水平剛性 (P/δ) および相対回転角の考察から、斜角10度とした実験条件下では従来方式と概ね同程度の固定度を有していると判断される。しかし、港湾施設では斜角20~25度程度まで斜杭式が用いられており、斜角10度よりも大きい施設への適用には更なる検討が必要である。ソケット鉄筋方式は、杭頭部が2重管構造となるため、他方式よりも水平剛性が高く、杭頭筋による固定度も優れており、耐荷力の向上も期待できる方式である。一方、プレキャスト施工を鑑みると、先の鞘管方式に比べてソケット鉄筋のユニット製作が必要で

あること、それを鋼管杭に挿入する施工手間が増えること等、実用化には課題が残されている。今後は、解析的な検討も加えて、斜角10度以上への適用性の検討、および設計法の構築と部材の合理化に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 池野勝哉, 岩波光保, 川端雄一郎: 鞘管方式による栈橋鋼管杭の杭頭接合部に関する交番荷重実験, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.724-733, 2018.
- 2) 池野勝哉, 岩波光保, 川端雄一郎: 非線形有限要素解析による鞘管方式の栈橋杭頭接合部に関する構造的な性能評価, 土木学会論文集 B3(海洋開発) Vol.74, No.2, pp.I_234-I_239, 2018.
- 3) 池野勝哉, 伊野同, 岩波光保, 川端雄一郎, 加藤絵万: プレキャスト化による栈橋施工の生産性向上, 土木学会建設技術研究委員会, pp.79-85, 2018.
- 4) 川俣奨: 栈橋上部工のプレキャスト化施工について, Marine Voice 21, Vol.302, pp.12-15, 2018.
- 5) 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 鋼とコンクリートの複合構造物, 丸善, pp.365-368, 2016.

(2019.2.7 受付)
(2019.4.24 受理)

PROPOSAL OF RAKING PILE CONNECTION WITH PRECAST SUPERSTRUCTURE FOR PORT PIER

Katsuya IKENO, Ke BAI, Mitsuyasu IWANAMI,
Yuichiro KAWABATA and Ema KATO

The authors have already proposed “Sleeve tube type” as a pile head connection which is suitable for precast superstructure of vertical pile pier. However, for the case of raking pile pier, which is also widely used as port pier for its high lateral rigidity, “Sleeve tube type” is difficult to be applied for the concern of lower rigid connection of precast concrete due to larger sleeve tube diameter. In this paper, the authors proposed another “Socket rebar type” as a new type of pile head connection for raking pile pier, and cyclic loading tests are carried out to confirm the rigid connection of pile connection for both methods. As a result, under test conditions with a raking angle of 10 degrees, “Sleeve tube type” was almost the same with conventional pile head connection, and “Socket rebar type” was better in terms of rigid connection and lateral rigidity.