

# 論文 プレキャスト化した栈橋杭頭部の半剛接合に関する交番載荷実験

池野 勝哉\*1・石塚 新太\*2・前田 一成\*3・宇野 剛志\*3

**要旨：**本研究では、プレキャスト化した栈橋上部工の杭頭接合として、建築基礎で適用されている半剛接合に着目し、杭頭部の断面縮小（絞り部）をパラメータとした正負交番載荷実験を行った。半剛接合は地震時の杭頭モーメントを低減させ、その効果を設計に反映させることで杭や梁の合理化を図ることができる接合方法である。実験より、半剛接合は杭頭部の絞り部で杭頭固定度を任意に設計できること、杭頭曲げモーメントによる損傷を絞り部に集中させ、梁部の損傷を軽微に抑えることが可能な接合方法であることが分かった。  
**キーワード：**栈橋上部工、プレキャスト、半剛接合、杭頭固定度

## 1. はじめに

栈橋上部工における杭頭接合は、上部工に杭径以上の鋼管杭を挿入する方法（方法 A、図-1(a)）が広く適用されており<sup>1)</sup>、実用化されているプレキャスト（以下、PCa）施工においても方法 A をベースとした接合方法が主流である<sup>2)</sup>。一方、基礎杭のほとんどが地中部となる橋梁基礎では、フーチング内への鋼管杭の埋込みを 100mm 程度に留め、中詰め補強鉄筋を介してフーチングと接合する方法（方法 B、図-1(b)）が一般的である<sup>3)</sup>。方法 B は、格子状に配筋された上部工の主鉄筋と円周状の中詰め補強鉄筋が干渉しやすく、また栈橋梁部に中詰め補強鉄筋の定着長を確保することが困難なため、栈橋上部工には積極的に採用されていないのが現状である。著者らは、この方法 B をベースとした栈橋上部工の PCa 化を実現するため、既報<sup>4)</sup>において孔あき鉄筋定着鋼板を用いた接合方法（本工法、図-1(c)）を考案している。本工法は、孔あき鉄筋定着鋼板によって中詰め補強鉄筋と上部工の主鉄筋の干渉を回避し、中詰め補強鉄筋の定着にアンカープレートによる機械式定着を用いる方法である。しかし、方法 B の杭頭固定度は溶接プレートで主鉄筋と接続された方法 A よりも小さい傾向<sup>4)5)</sup>にあり、

鋼管杭との剛接合を前提とする栈橋上部工において、本工法の適用には杭頭接合の設計的な合理化が必要であると考えられる。そこで本研究では、方法 B の杭頭固定度が低い特性を積極的に活用し、杭頭部の断面を縮小することで杭頭固定度を制御する半剛接合<sup>6)</sup>に着目した。半剛接合は建築分野で既に実用化されており、地震時の杭頭モーメントを低減させるだけでなく、その効果を設計に反映させることで杭や梁の合理化を図るものである。本報では、孔あき鉄筋定着鋼板を用いた半剛接合に関する正負交番載荷実験を実施したので報告する。

## 2. 孔あき鉄筋定着鋼板を用いた接合方法

### 2.1 本工法の概要

本工法は、上部工内の主鉄筋を孔あき鉄筋定着鋼板に溶接した PCa 梁を製作し、クレーンで所定の鋼管杭に架設したのち、孔あき鉄筋定着鋼板に設けた貫通孔に中詰め補強鉄筋を挿入することで、上部工の主鉄筋との干渉を回避するものである。また、中詰め補強鉄筋の上端にアンカープレートを設置することで、孔あき鉄筋定着鋼板を介した機械式定着により中詰め補強鉄筋を上部工へ定着する。本工法の模式図を図-2 に示す。

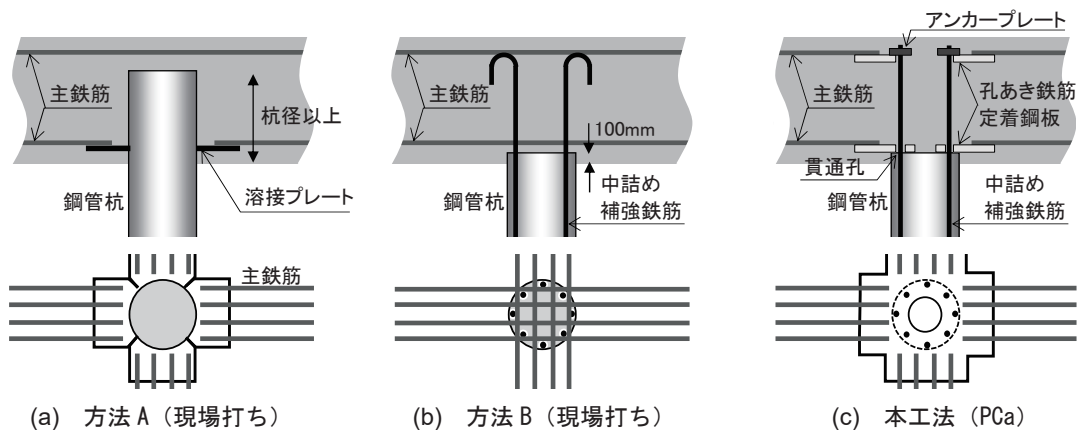


図-1 杭頭接合の概要

\*1 五洋建設（株）技術研究所 博士（正会員）

\*2 五洋建設（株）技術研究所

\*3 五洋建設（株）本社土木部門

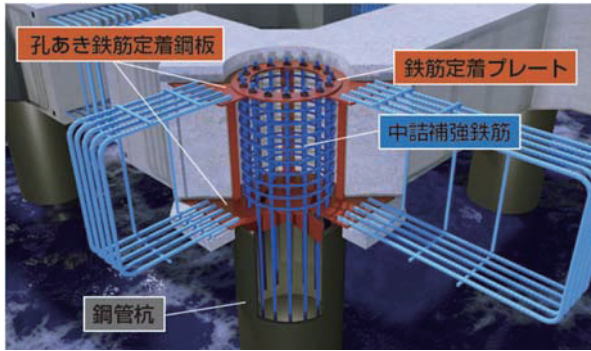


図-2 本工法の模式図

## 2.2 半剛接合の概要

### (1) 半剛接合のコンセプト

半剛接合は、剛接合とピン接合の中間に位置する構法である。杭頭の回転に対する拘束度を杭頭固定度 $\alpha$ とした栈橋上部工の杭頭固定度と曲げモーメント分布の関係を図-3に示す。剛接合は $\alpha=1.0$ 、ピン接合が $\alpha=0.0$ となり、半剛接合は $0.0 < \alpha < 1.0$ の範囲に属する。杭頭曲げモーメント $M_p$ は $\alpha$ が1.0に近づくほど大きく、反対に地中部最大モーメント $M_{max}$ は $\alpha$ の低下とともに卓越する。このように、杭頭 $M_p$ と地中部 $M_{max}$ の曲げモーメントをバランス良く制御する構法が半剛接合である。

本工法における半剛接合のイメージを図-4に示す。図中に示すように、鋼管杭と上部工の接合部に緩衝材(例えばEPS)を設け、杭頭部を断面縮小した絞り部を形成し、杭頭曲げモーメントを絞り部に集中させることで杭頭固定度を任意に制御する。

### (2) 杭頭回転バネモデルおよび杭頭固定度

本工法による半剛接合は、主として上部工からの中詰め補強鉄筋の抜け出しと杭頭部のロッキング挙動によって実現される(図-4)。ここでは、設計上の簡便性を考慮し、これらを絞り部の塑性ヒンジ長における曲げ変形として捉え、以下の杭頭回転バネモデルを導入する。

半剛接合による杭頭回転バネは、図-5に示すバイリニア型の杭頭曲げモーメント $M_p$ と杭頭回転角 $\theta_p$ の関係を用いた。杭頭部の $M_p-\theta_p$ 関係は、絞り部径 $D'$ を直径とする円形RC断面として道路橋示方書<sup>7)</sup>に記載の応力-ひずみ曲線(コンクリート、鉄筋)を用いて算定する。終局時の杭頭曲げモーメント $M_u$ は $M_p-\theta_p$ 関係の最大値である。半剛接合の回転剛性 $K_1$ は、絞り部の最外縁鉄筋が降伏する曲げモーメント $M_y$ となる回転剛性であり、式(1)から算定する。ここでは、実験の杭頭損傷が上部工内の絞り部であることから、塑性ヒンジ長 $L_p$ は上部工内に絞り部径 $D'$ だけ生じ、且つ、その間で曲率 $\phi_y$ が一定であると仮定した( $\theta_y = \phi_y \times D'$ )。設計時の杭頭固定度 $\alpha$ は、半剛接合の降伏曲げモーメント $M_y$ と剛接合( $\alpha=1.0$ )の降伏曲げモーメント $M_{y1}$ の比として式(2)で定義する。

$$K_1 = \frac{M_y}{\theta_y} = \frac{M_y}{\phi_y \times D'} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{M_y}{M_{y1}} \quad (2)$$

ここで、 $K_1$  : 半剛接合の初期回転剛性  
 $M_y$  : 半剛接合の降伏曲げモーメント  
 $M_{y1}$  : 剛接合の降伏曲げモーメント  
 $\theta_y$  : 降伏時の杭頭回転角 (=  $\phi_y \times D'$ )  
 $\phi_y$  : 降伏時の杭頭曲率  
 (絞り部 $D'$ の断面解析から算定)  
 $D'$  : 絞り部径

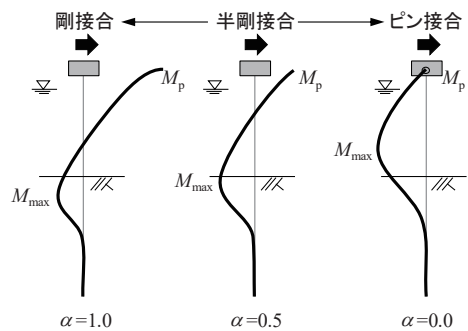


図-3 杭頭固定度と曲げモーメント分布の関係

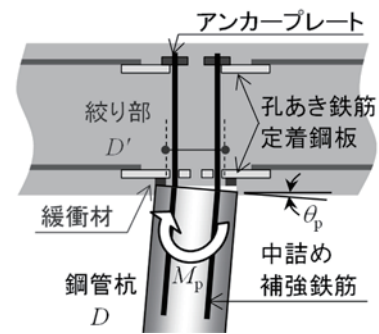


図-4 本工法による半剛接合のイメージ

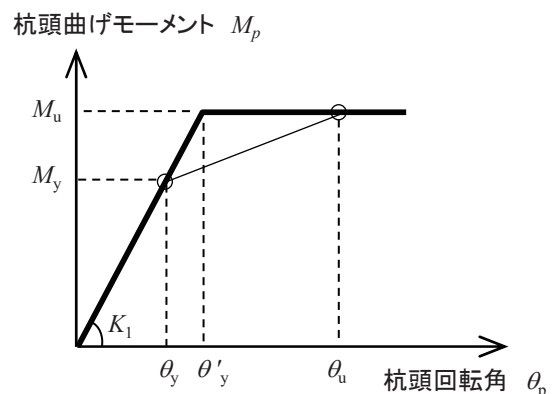


図-5 杭頭回転バネモデル

### 3. 杭頭接合部の半剛接合に関する交番載荷実験

#### 3.1 試験体概要と実験ケース

杭頭接合部の曲げ耐荷性能を把握するため、方法 B による実栈橋の鋼管杭 ( $D=1.4\text{m}$ ) と RC 梁 ( $B=1.4\text{m}$ ,  $H=1.8\text{m}$ ) を含む 1 スパンを概ね縮尺比 1/4 でモデル化した逆 T 形模型を用い、正負の交番載荷実験を実施した。実験ケースの一覧を表-1、実験概要および試験体詳細図を図-6 に示す。剛接合を想定した従来の現場打ちによる Case1 および PCa の孔あき鉄筋定着鋼板による Case2、半剛接合を想定した Case3-1 ( $\alpha=0.7$ ) および Case3-2 ( $\alpha=0.4$ ) の 4 ケースである。半剛接合の杭頭固定度  $\alpha$  は、鋼管杭と上部工の接合部に緩衝材 (EPS) を設けた絞り部内  $D'=230\text{mm}$  の中詰め補強鉄筋量を変化させて設定した。実験材料は、鋼管杭は  $\phi 18.5\text{-t}6.9$  (STK400)、上部工の主鉄筋は D19 (SD345)、中詰め補強鉄筋は D16-D13 (SD345)、呼び強度 30 のコンクリートである。鋼材およびコンクリートの材料試験結果を表-2 および表-3 に示す。

#### 3.2 載荷方法と測定項目

載荷方法は、最外縁の中詰め補強鉄筋が降伏したときの降伏変位  $\delta_y$  を基準に、 $\pm 0.5\epsilon_y$ ,  $\pm 1\delta_y$ ,  $\pm 2\delta_y$ ... $\pm 5\delta_y$  を各 3 サイクルずつ繰り返し与える方法とした。ここで、 $0.5\epsilon_y$  は試験体が弾性挙動を示すと考えられるステップであり、水平変位  $\delta_y$  ではなく鉄筋の降伏ひずみ  $\epsilon_y$  で定義している。また、港湾施設のレベル 2 耐震設計が一般に塑性率 3 程度<sup>8)</sup>であることを踏まえ、本実験では  $5\delta_y$  までのステップとした。測定項目は杭頭接合部の荷重-変位関係に示される変形性能や曲げ耐力、杭頭回転角、鋼管杭および鉄筋の軸方向ひずみ、ひび割れ性状である。図-6 の試験体詳細図にひずみゲージの計測位置を示す。

表-1 実験ケースの一覧

ケース名	上部工	杭頭固定度		中詰め補強鉄筋 16本 (SD345)	備考
		$\alpha$	接合方法		
Case1	現場打ち	1.0	剛接合	D16@250	孔あき鉄筋定着鋼板
Case2	PCa		剛接合	D16@250	
Case3-1	PCa	0.7	半剛接合	D16@180	
Case3-2	PCa	0.4	半剛接合	D13@180	

表-2 鋼材の引張試験結果

	降伏点 $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	備考
鋼管杭	391.4	$199 \times 10^3$	—
鋼板	320.3	$197 \times 10^3$	孔あき鉄筋定着鋼板
D19	382.7	$190 \times 10^3$	梁主鉄筋
D16	381.3	$183 \times 10^3$	中詰め補強鉄筋
D13	363.7	$184 \times 10^3$	中詰め補強鉄筋
D10	391.4	$199 \times 10^3$	せん断補強筋

表-3 コンクリートの圧縮試験結果

	圧縮強度 $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	備考
Case1	42.1	$33.9 \times 10^3$	梁部
	39.8	$30.7 \times 10^3$	鋼管杭中詰め
Case2	42.1	$32.7 \times 10^3$	梁部
	39.5	$32.2 \times 10^3$	鋼管杭中詰め
Case3-1	44.1	$33.3 \times 10^3$	梁部
	40.1	$31.3 \times 10^3$	鋼管杭中詰め
Case3-2	44.2	$33.4 \times 10^3$	梁部
	41.7	$30.3 \times 10^3$	鋼管杭中詰め

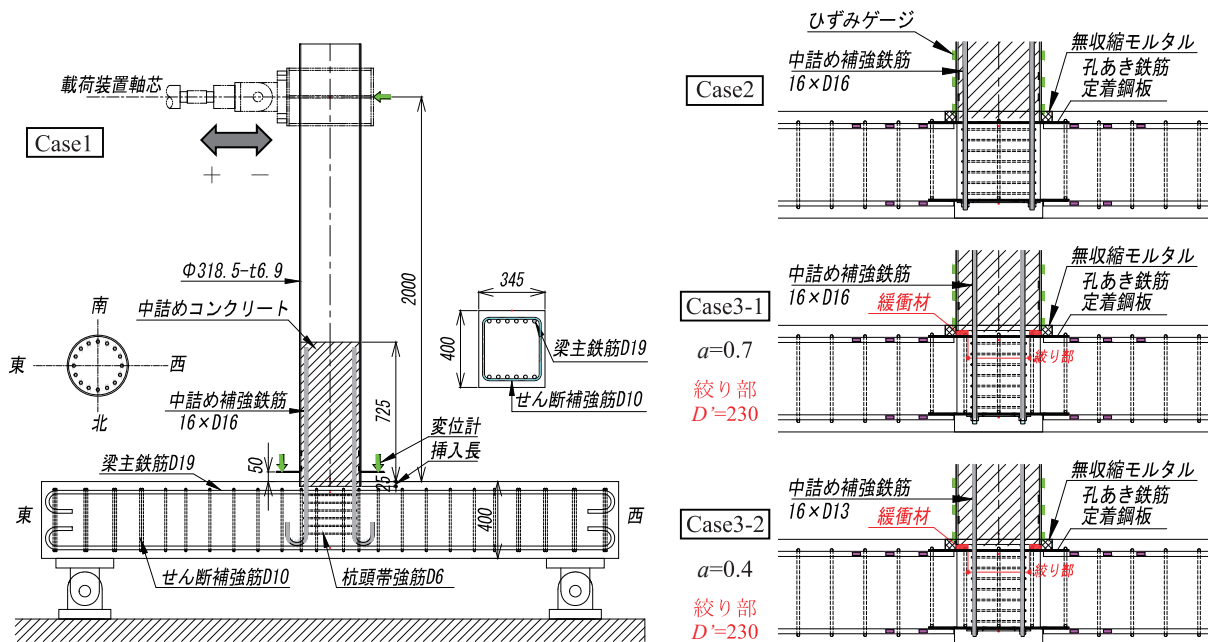


図-6 実験概要 (左図) および試験体詳細図 (右図)

#### 4. 実験結果および考察

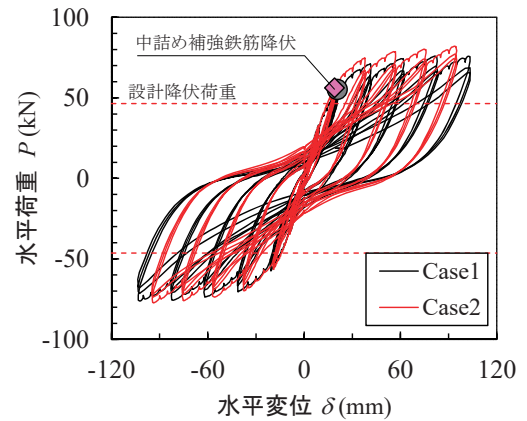
##### 4.1 荷重-変位関係

###### (1) 見掛けの剛性および降伏荷重

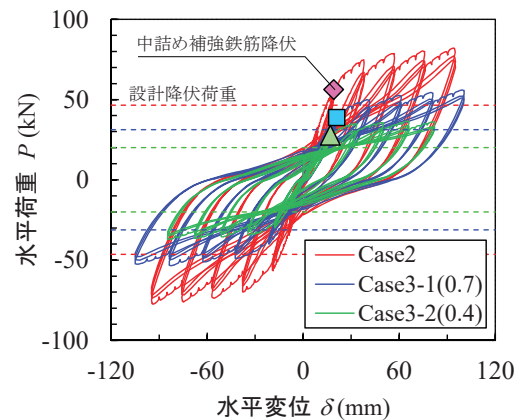
載荷点における荷重-変位関係を図-7 に示す。図-7 (a)は、剛接合 $\alpha=1.0$ を想定した現場打ち (Case1) と孔あき鉄筋定着鋼板を用いた PCa (Case2) を比較したものであるが、いずれも RC 構造物の典型的な逆 S 字形の履歴ループを示し、降伏荷重  $P_y$  を降伏変位  $\delta_y$  で除して定義した見掛けの剛性は、Case1 に比べて Case2 は 1 割程度大きい結果となった。この理由については後述するが、孔あき鉄筋定着鋼板を用いた Case2 の鋼管杭と梁の接続部の損傷が軽微であったことに起因している。他方、図-7 (b)は半剛接合を想定した杭頭固定度による比較を示したものである。杭頭固定度が小さいほど水平荷重および剛性が低下しており、半剛接合の効果が荷重-変位関係に表れている。図-7 の水平破線は、表-2 および表-3 で示した材料試験値を用いて計算した杭頭接合部における設計降伏荷重であり、RC 断面径として Case1 および Case2 は  $D$  (杭径)、Case3-1 および Case3-2 は  $D'$  (絞り部径) と仮定した。ここで、現行基準<sup>9)</sup>の仮想 RC 断面径 ( $0.25D+100$ ) は、杭径 $\phi 600\sim 1200\text{mm}$ 程度を対象にした実験データより提案されたものであり、本実験では模型スケールの影響を受けると考え、安全側の評価になるよう実際の RC 断面径を用いた。図-7 に示すように、実験の中詰め補強鉄筋が降伏した水平荷重は、RC 断面径で計算した設計降伏荷重よりやや大きくなっている。

###### (2) 杭頭回転バネモデルの評価

実験で得られた  $M_p-\theta_p$  関係および杭頭回転バネモデルの比較を図-8 および表-4 に示す。杭頭回転角  $\theta_p$  は、鋼管杭の梁上面から 50mm の高さに取り付けた水平プレート の鉛直変位から評価した (図-6 参照)。図中の計算は実験よりも曲げモーメントがやや低いものの、概ね各ケースの  $M_p-\theta_p$  関係に対応していると考えられる。また、表-4 には式(2)より評価した杭頭固定度  $\alpha$  の比較を示しているが、実験と設計は比較的良く整合しており、本研究で用いた杭頭回転バネモデルによって杭頭固定度を概ね制御できる可能性が示唆された。



(a) 剛接合を想定した現場打ちと PCa の比較



(b) 半剛接合を想定した杭頭固定度による比較

図-7 載荷点における荷重-変位関係

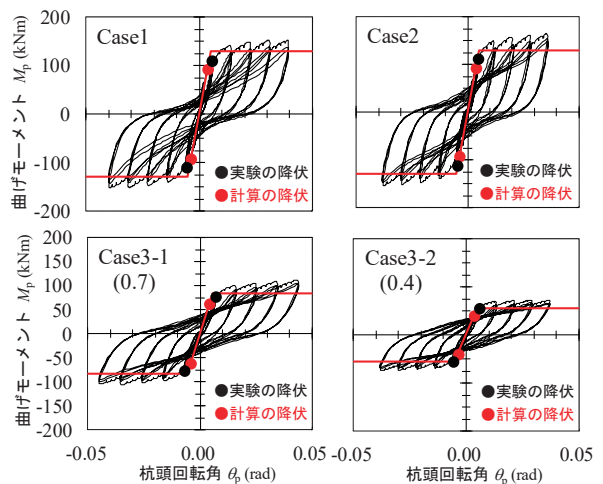


図-8 実験結果と杭頭回転バネモデルの比較

表-4 実験および設計値の比較

		杭頭固定度 $\alpha=M_y/M_{y1}$	水平荷重 $P_y$ (kN)	水平変位 $\delta_y$ (mm)	見掛けの剛性 $P_y/\delta_y$	曲げモーメント $M_y$ (kNm)	回転角 $\theta_y$ (rad)	回転剛性 $K_\theta=M_y/\theta_y$
Case1	実験	1.00	55.2	20.7	2.7	110.4	0.0056	19,813
	設計	1.00	46.4	—	—	92.8	0.0038	24,581
Case2	実験	1.02	56.2	18.9	3.0	112.4	0.0046	24,329
	設計	1.00	46.4	—	—	92.8	0.0038	24,532
Case3-1	実験	0.70	38.9	20.8	1.9	77.8	0.0069	11,292
	設計	0.67	31.2	—	—	62.5	0.0042	15,022
Case3-2	実験	0.50	27.8	16.9	1.6	55.6	0.0058	9,590
	設計	0.43	20.1	—	—	40.1	0.0037	10,943



### (3) 履歴吸収エネルギー

図-9 に荷重-変位関係から得られた履歴吸収エネルギーの累積値を示す。剛接合の Case1 と Case2 は概ね同様の吸収エネルギーを示し、現場打ちと PCa による違いは見受けられない。一方、半剛接合は杭頭固定度が小さいほど吸収エネルギーも小さく、その割合は Case2 ( $\alpha=1.0$ ) と比べて Case3-1 ( $\alpha=0.7$ ) が 8 割、Case3-2 ( $\alpha=0.4$ ) が 5 割程度である。

### 4.2 鋼材のひずみ分布

各ケースの降伏変位 $\delta_y$ (载荷方向+)における梁主鉄筋の軸方向ひずみ分布を図-10 に示す。杭頭固定度が小さいほど梁主鉄筋に生じるひずみも小さくなり、半剛接合による杭頭曲げモーメントの低減効果が確認できる。次に、鋼管杭および中詰め補強鉄筋の軸方向ひずみ分布を図-11 に示す。いずれのケースも、梁天端に近いほど鋼管杭に発生するひずみは減少し、中詰め補強鉄筋のひずみが増加している。反対に、梁天端から上方に離れるほど鋼管杭のひずみが増加し、中詰め補強鉄筋のひずみは減少する。これは、鋼管杭と梁の接続部では中詰め補強鉄筋にひずみが集中し、鋼管杭との間に平面保持が成立していないためであり、方法 B が方法 A と比べて杭頭固定度が小さい<sup>4)5)</sup>要因と推察される。

試験体内部の損傷を確認するため、5 $\delta_y$  载荷終了後に試験体鉛直面をワイヤーソーで切断した。写真-1 に各ケースの鉛直切断面を示す。いずれも鋼管杭の中詰めコンクリートに水平方向の曲げひび割れが発生し、梁部の主鉄筋に沿った付着ひび割れが確認できる。剛接合 $\alpha=1.0$ の現場打ち (Case1) と孔あき鉄筋定着鋼板を用いた PCa (Case2) を比較すると、中詰め補強鉄筋の内側にコーン

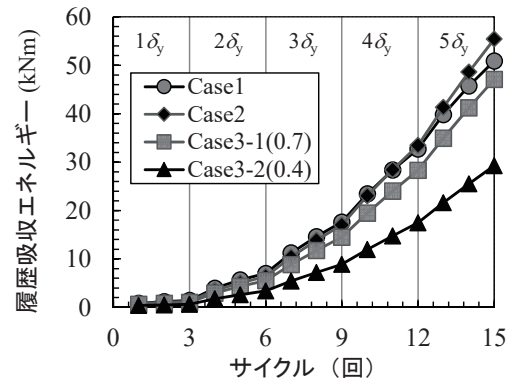


図-9 履歴吸収エネルギーの比較

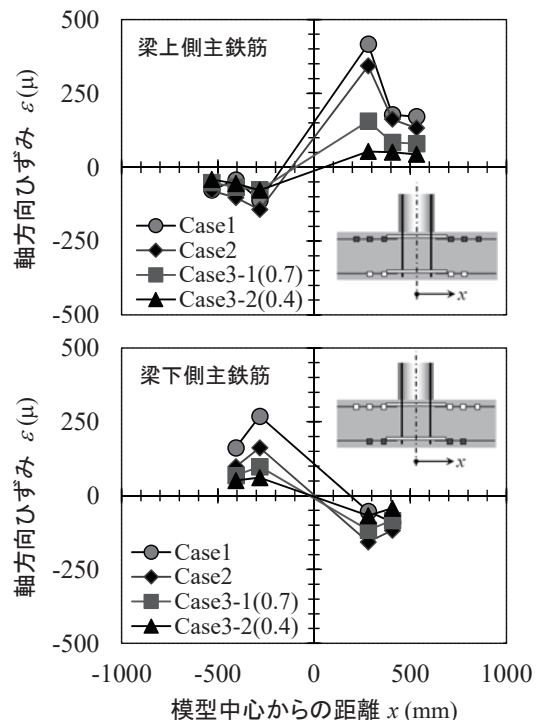


図-10 梁主鉄筋の軸方向ひずみ分布

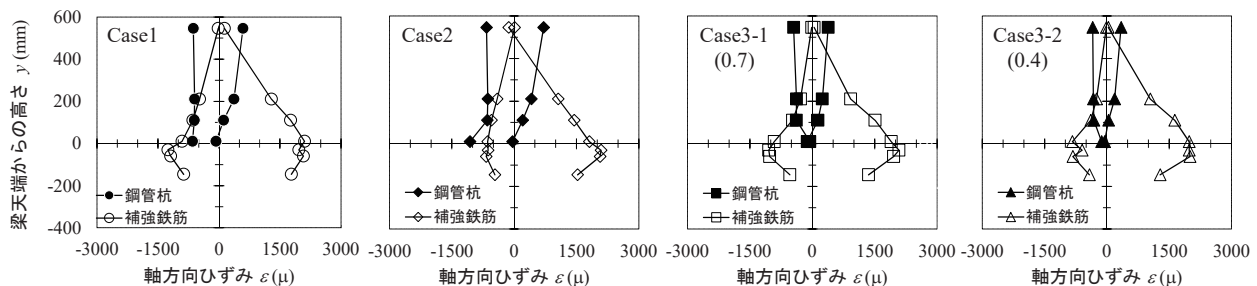


図-11 鋼管杭と中詰め補強鉄筋の軸方向ひずみ分布

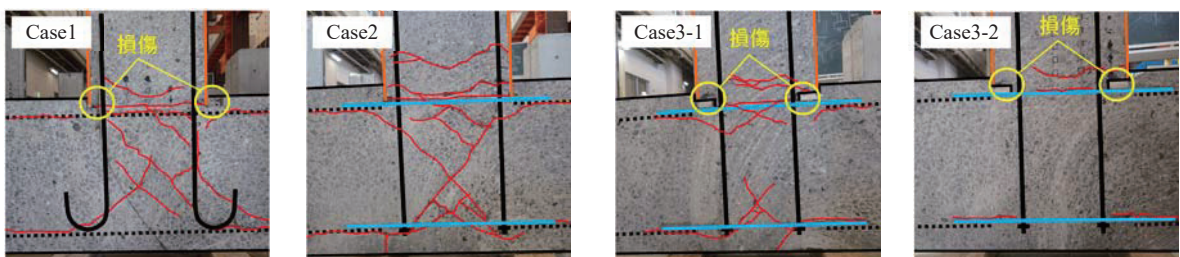


写真-1 試験体の鉛直切断面 (実験終了後)

状のせん断ひび割れが生じており、両ケースの中詰め補強鉄筋は梁部内で良好に定着されていたと判断される。また、Case1 は鋼管杭と梁の接続部に損傷がみられており、荷重-変位関係の見掛けの剛性が Case2 よりも小さい主要因として考えられる。一方、半剛接合の Case3-1 ( $\alpha=0.7$ ) および Case3-2 ( $\alpha=0.4$ ) は、杭頭固定度が小さいほど中詰め補強鉄筋内側にせん断ひび割れが発生しておらず、断面縮小した絞り部にのみ損傷が集中していることが分かる。

以上より、本工法の半剛接合は、杭頭部の断面縮小(絞り部)により杭頭固定度を制御し、杭頭曲げモーメントによる損傷を絞り部に集中させることで、梁部内の損傷を軽微に抑える合理的な接合方法であると言える。

## 5. まとめ

本研究では、PCa 化した栈橋上部工の方法 B による杭頭接合として、杭頭部に絞り部を設けた半剛接合に関する正負交番載荷実験を実施した。以下に得られた知見を示す。

- (1) PCa 化した孔あき鉄筋定着鋼板による Case2 は、鋼管杭と梁の接続部の損傷を軽微に留め、従来の現場打ちによる Case1 と比較して同等以上の曲げ耐荷性能を有している。
- (2) 方法 B による杭頭接合は、鋼管杭と梁の接続部付近で中詰め補強鉄筋にひずみが集中し、鋼管杭との間に平面保持が成立しないため、方法 A よりも杭頭固定度が小さくなるものと推察される。
- (3) 杭頭部に設けた断面縮小(絞り部)は、杭頭回転バネモデルによって半剛接合の杭頭固定度を制御できる可能性が示唆された。
- (4) 栈橋上部工における半剛接合は、杭頭曲げモーメントによる損傷を絞り部に集中させ、梁部内の損傷を軽微に抑えることが可能な合理的な接合方法であると言える。

本研究では、方法 B の PCa 化を念頭に、杭頭部の断面

縮小(絞り部)によって杭頭固定度を制御できることを実験的に確認した。半剛接合は地震時の杭頭モーメントを低減し、その効果を設計に反映させることで鋼管杭や梁の合理化が可能な接合方法として期待される。ただし、仮想 RC 断面径の取り扱いが模型スケールの影響を受けると考えられるため、更に大規模なスケールの実験および評価方法の検証が必要である。また、絞り部に応力が集中することから、中詰め補強鉄筋の座屈や破断、低サイクル疲労などの確認も必要と考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(中巻)，pp.1217-1218，2018.
- 2) 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載荷実験，構造工学論文集，Vol.64A，pp.724-733，2018.
- 3) (独)土木研究所：橋梁基礎形式の選定手法調査，土木研究所資料，第 3077 号，1992.
- 4) 石塚新太，池野勝哉，又吉重克，前田一成：孔あき鉄筋定着鋼板を用いた栈橋鋼管杭の杭頭接合方法に関する交番載荷実験，土木学会第 75 回年次学術講演会，V-233，2020.
- 5) 小堀為雄，近田康夫：杭基礎の杭頭結合部における応力分布について，土木学会論文集，第 356 号/I-3，pp.295-301，1985.
- 6) (財)建築コスト管理システム研究所：「杭頭半剛接合構法」の調査報告，建築コスト研究 2008WINTER，pp.64-72，2008.
- 7) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，pp.149-157，2017.
- 8) 大矢陽介，塩崎禎郎，小濱英司，川端雄一郎：耐震性能照査における鋼管部材のモデル化法の提案，港湾空港技術研究所報告，Vol.56，No.2，2017.
- 9) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，pp.284-288，2017.