

## PC 圧着した栈橋杭頭接合部の力学的挙動に関する実験および解析的検討

Experimental and analytical studies on mechanical behavior of precast prestressed concrete-pile-joint for port pier

池野勝哉<sup>†</sup>, 石塚新太\*, 天谷公彦\*\*, 前嘉昭\*\*\*, 川端雄一郎\*\*\*\*, 加藤絵万\*\*\*\*, 岩波光保\*\*\*\*\*  
Katsuya Ikeno, Arata Ishizuka, Kimihiko Amaya, Yoshiaki Mae, Yuichiro Kawabata, Ema Kato, Mitsuyasu Iwanami<sup>†</sup>博 (工), 五洋建設株式会社, 技術研究所 (〒329-2746 那須塩原市四区町 1534-1)

\*五洋建設株式会社, 技術研究所 (〒329-2746 那須塩原市四区町 1534-1)

\*\*修 (工), 株式会社日本ピーエス, 技術本部 (〒914-0027 敦賀市若泉町 3)

\*\*\*株式会社日本ピーエス, 技術本部 (〒914-0027 敦賀市若泉町 3)

\*\*\*\*博 (工), 海上・港湾・航空技術研究所, 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

\*\*\*\*\*博 (工), 東京工業大学教授, 環境・社会理工学院 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1)

We proposed an assembly construction method for port pier superstructures by using precast prestressed concrete members which can be transported from factory. In this study, a series of cyclic loading experiments were conducted to confirm the structural behavior of prestressed pile joint. As a result, the proposed structure showed excellent resistance that the residual displacement was less than that of the conventional one since prestress controlled the cracking of concrete. The analytical study showed that the confining effect of the pile head was improved by prestressing in two orthogonal directions, and the damage of the precast concrete members was suppressed.

*Key Words: precast concrete, prestressed-pile-joint, cyclic loading test, finite element analysis*

キーワード: プレキャスト, PC 圧着, 交番載荷実験, FEM 解析

## 1. はじめに

港湾工事における栈橋上部工のプレキャスト化は, 工期短縮やコンクリート構造物の品質向上, 海上作業の短縮による事故リスクの低減といったメリットを享受でき, 省力化・省人化を実現できる有効な手段として期待されている. 著者らは, 過去に RC 栈橋上部工を対象に鞘管方式による杭頭接合方法を提案し<sup>1)2)</sup>, 鋼管杭と上部工との剛結条件を満足するプレキャスト工法を実用化している<sup>3)4)</sup>. この方法は, 現場打ちで設計された RC 栈橋上部工のサイトプレキャストを想定したものであり, 1 ブロックが 100t を超える重量部材となるため, 現地製作ヤードの確保と大型起重機船の調達が必要となる. しかし, 現地条件によっては, 十分な製作ヤードの確保や地形的に大型起重機船の入航が困難な場合も想定され, サイトプレキャストでは適用範囲が限定されるのが現状である.

そこで本研究では, 現地製作ヤードを必要とせず, プ

レキャスト部材を全て工場製作および陸上運搬できる方法として, 栈橋上部工を杭頭部材と梁部材の 2 種類に分割し, ポストテンション方式のプレストレスにより一体化する「PC 圧着構造」を提案している. 本構造は PC 鋼材のプレストレスによって 2 種類のプレキャスト部材を圧着接合し, プレストレスを導入した梁部材を軽量化・長スパン化することで下部工への負担を軽減できる合理的な工法として期待される. PC 圧着は建築構造物のプレキャスト柱・梁の接合に用いられており, 地震時において圧着接合面に弾性的な回転挙動を許容することで, 圧着近傍の損傷を軽微に留める損傷制御架構が提案されている<sup>5)6)</sup>. 港湾の設計基準<sup>7)</sup>において, RC 栈橋上部工はレベル 2 地震動 (以下, L2 地震動) に対して塑性領域を考慮した曲げ耐力照査が行われており, PC 圧着した栈橋杭頭部において, L2 地震動に対してフルプレストレス状態とするのは合理的ではないと考えられる. したがって, 本構造では永続および変動状態に対してフルプレストレス状態, L2 地震動の偶発状態に対して PC 鋼材の弾性状態を設計方針としている.

<sup>†</sup> 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: katsuya.ikeno@mail.penta-ocean.co.jp

本論文では、PC 圧着された杭頭接合部の力学的挙動に着目した交番載荷実験を実施し、杭頭部の固定度や部材挙動および損傷について考察した。また、プレストレスによる拘束効果や損傷抑制、杭頭部材の形状が梁部材に与える影響について FEM 解析による検討を行った。

## 2. PC 圧着構造の概要

### 2.1 構造概要

PC 圧着は、2 種類のプレキャスト部材（杭頭部材、梁部材）で構成されており、それぞれ工場製作による陸上輸送が可能な寸法（幅 2.5m、長さ 12m、高さ 2.3m、重量 20t 以下）を前提としている。図-1 に本構造の概要図を示す。杭頭部材には鋼管杭よりも径の大きな鞘管を埋設し、鋼管杭と鞘管の間には無収縮モルタルが充填される。鞘管径は鋼管杭の平面位置における打設精度 $\pm 100\text{mm}$ を考慮し、鋼管杭の直径より+200mm 程度の内径を有するものを選定する。梁部材は、軽量化と施工性に配慮した逆 U 字形断面とし、杭頭部材に梁部材を架設した後、20mm 程度の部材間に無収縮モルタルを充填し、ポストテンション方式で直交 2 方向の PC 鋼より線にプレストレスを導入することで鋼管杭を含む部材同士が圧着接合される。杭頭部材の梁受け部にはコーベル形状を採用し、逆 U 字形断面の梁部材をはめ込むように架設することで、海上での施工性を向上させている。また、コーベルは施工時の波浪や潮流等の作用による鋼管杭の動揺に対して、梁部材の落下を防止する役割を担っている。

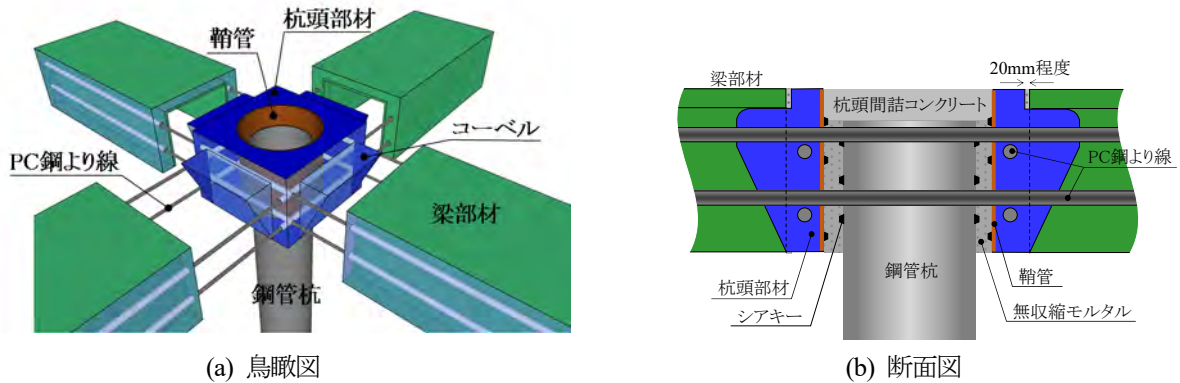


図-1 PC 圧着構造の概要図

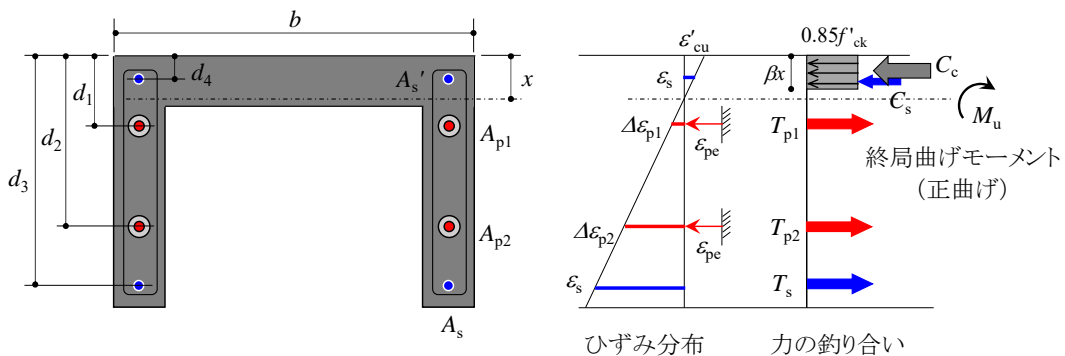


図-2 逆 U 字形梁部材のひずみ-応力分布（正曲げの場合）

### 2.2 断面設計

栈橋は鋼管杭と上部工が剛結されたラーメン構造として設計されるため、杭頭曲げモーメントが最も支配的な設計外力となる。プレストレスを導入した梁部材は道路橋示方書<sup>8)</sup>に従い、平面保持を仮定したひずみ-応力分布から力の釣合い式を立て終局曲げモーメント  $M_u$  を算定する（図-2）。なお、杭頭部材の端部に圧着接合された梁部材には、それぞれ正曲げおよび負曲げモーメントが作用するため、梁部材は正負の曲げモーメントに対して断面照査を行う。

ここで、

- $b$  : 部材幅
- $d_i$  : 有効高さ
- $x$  : 圧縮縁から中立軸までの距離
- $\beta$  :  $x$  に対する等価ブロックの高さの割合=0.8
- $A_{pi}$  : PC 鋼材の断面積
- $A_s$  : 引張鉄筋の断面積
- $A'_s$  : 圧縮鉄筋の断面積
- $\epsilon'_{cu}$  : コンクリートの終局圧縮ひずみ
- $\epsilon_{pe}$  : PC 鋼材の有効プレストレスによるひずみ
- $\Delta\epsilon_{pi}$  : PC 鋼材の  $i$  段目のひずみ
- $\epsilon_s$  : 鉄筋のひずみ
- $f'_{ck}$  : コンクリートの設計基準強度
- $C_c$  : コンクリートの圧縮合力
- $C_s$  : 圧縮鉄筋の圧縮合力
- $T_{pi}$  : PC 鋼材の  $i$  段目の引張合力
- $T_s$  : 引張鉄筋の引張合力

### 3. PC 圧着した杭頭接合部の交番載荷実験

#### 3.1 実験概要

PC 圧着による杭頭接合部の力学的挙動を確認するため、概ね縮尺比 1/4 で実構造物の天地を逆転した逆 T 形模型の正負交番載荷実験を実施した。試験体梁の両端支点条件は、杭頭接合部に損傷が生じるように支点の回転を拘束しないピン条件とした。本実験は支点条件も含め、実構造物の一部を厳密に縮尺再現したものではないが、杭頭接合部の挙動に影響を与える幾何学条件（杭径や梁断面および挿入長等）を満たすように設定した。

##### (1) 実験ケースおよび試験体諸元

実験は、従来工法である現場打ちの「RC 構造」、本研究で提案するプレキャストの「PC 圧着構造」の 2 ケースを実施した。鋼管杭は外径  $D=318.5\text{mm}$ 、肉厚  $t=6.9\text{mm}$  の STK400 材であり、模型上面から載荷ジャッキ (500kN) までの突出長を 2,000mm、模型梁への挿入長は港湾実務で一般に適用されている杭径程度 ( $L=320\text{mm}$ ) とした。交番載荷実験の概要を図-3 に示す。載荷ジャッキはヒンジを介したフランジを鋼管杭頭部の載荷板にボルト固定した。「RC 構造」は RC 梁 (幅 345mm、高さ 400mm、梁長 3,000mm、主鉄筋 D19×6 本、呼び強度 30) であり、鋼管杭の溶接プレート (板厚  $t=12.0\text{mm}$ 、SS400) に主鉄筋を溶接し、コンクリートを打設した。他方、「PC 圧着構造」は呼び強度 50 で製作した 2 種類のプレキャスト部材 (杭頭部材、梁部材) を組み立て、杭頭部材内の鞘管 (外径  $D=406.4\text{mm}$ 、肉厚  $t=6.4\text{mm}$ 、長さ  $l=400\text{mm}$ 、

STK400) 内に鋼管杭を  $L=320\text{mm}$  挿入し、杭頭間詰め部に無収縮モルタルを充填した。その後、片引きのポストテンション方式で PC 鋼より線 (SWPR7BL, 1S15.2) に初期プレストレス ( $\sigma_{pe}=1,250\text{N/mm}^2$ ) を導入し、杭頭部材および梁部材の一体化を図った。ここで、プレストレスはコンクリートの弾性変形、クリープや乾燥収縮および PC 鋼より線のリラクゼーションによる減少分を考慮した有効プレストレス ( $\sigma_{pe}=1,015\text{N/mm}^2$ ) によって、材料公称値を用いた梁断面の設計曲げ終局耐力が「RC 構造」と概ね同等になる様に設定した。なお、実構造物では杭頭部に直交する 2 方向プレストレスを導入するが、本実験においてはひび割れ観察の都合上、図-3 の面内方向のみプレストレスを導入した。なお、鋼管杭外側および鞘管内側にはシアキーとして直径 6mm の丸鋼を 60mm ピッチで溶接した。写真-1 から写真-6 に「PC 圧着構造」の製作状況および載荷状況を示す。

##### (2) 載荷方法

実験は、杭頭接合部における曲げ剛性や終局耐力、杭頭固定度を検討するため、構造部材の変形性能やエネルギー吸収性能を評価するために実施される正負交番載荷試験に倣った<sup>9)</sup>。載荷方法は、基準変位  $\delta_y$  の整数倍として  $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ 、 $\pm 4\delta_y$ 、 $\pm 5\delta_y$  をそれぞれ 3 サイクル繰り返し、 $\pm 5\delta_y$  の載荷後も荷重低下が見られない場合は、図-3 の + 方向に最大変位 190mm まで単調載荷を実施した。ここで、基準変位  $\delta_y$  は鋼管杭基部の外縁に貼り付けた軸方向のひずみゲージが降伏ひずみ  $\varepsilon_y=1,920\mu$  に達したときの水平変位として定義した (図-3 の○印)。

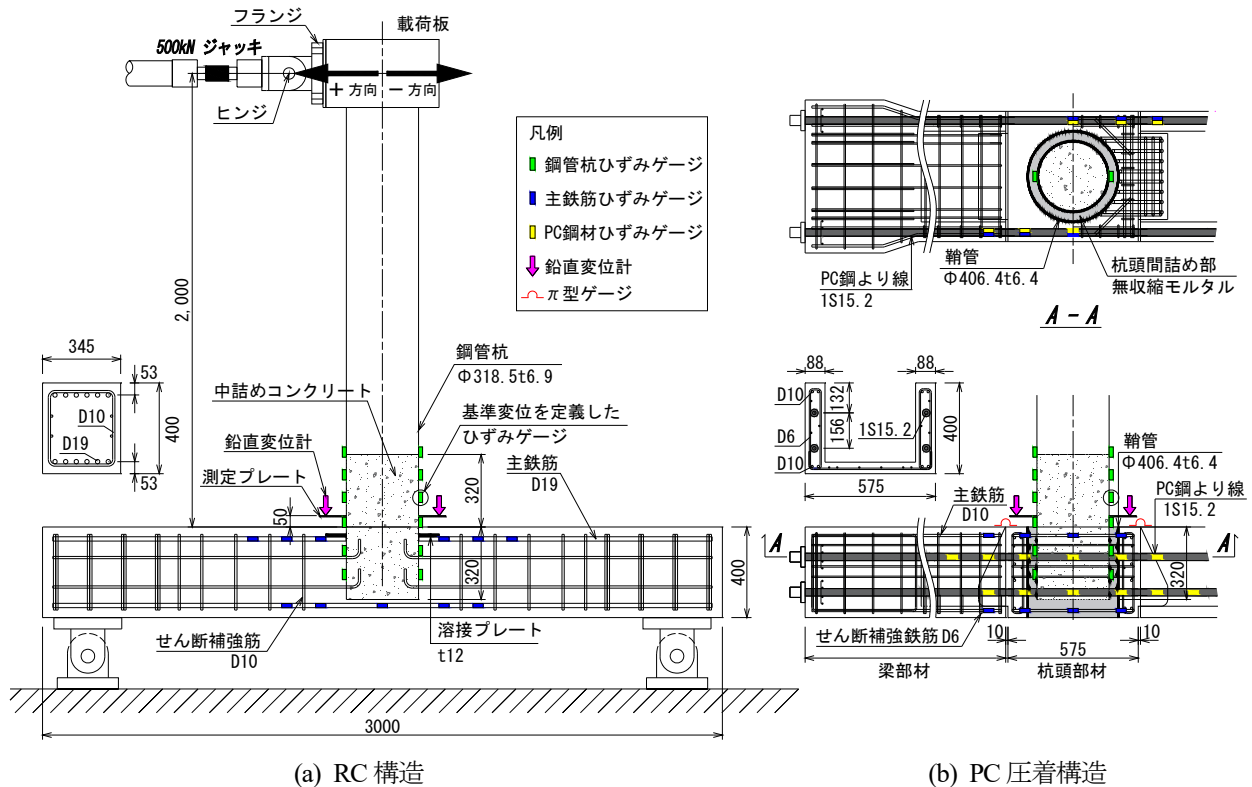


図-3 交番載荷実験の概要



写真-1 杭頭部材製作

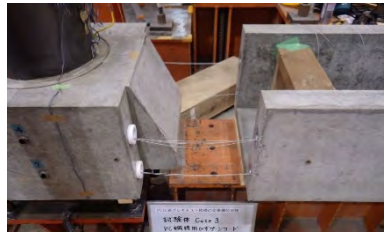


写真-2 部材組立

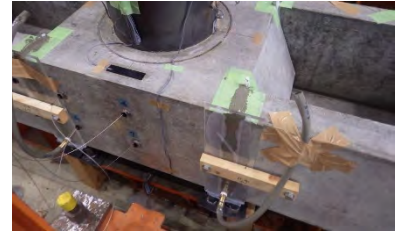


写真-3 目地部充填



写真-4 プレストレス導入



写真-5 PC グラウト養生



写真-6 載荷状況

### (3) 使用材料および計測項目

実験で使用した材料特性値を表-1 および表-2 に示す。なお、コンクリートおよびモルタルの強度は、加力前日の試験結果を示している。

計測項目は、載荷ジャッキの水平荷重および水平変位、鋼管杭・鞘管および鉄筋・PC 鋼より線の軸ひずみ、コンクリート部材のひび割れ性状である。また「PC 圧着構造」では、杭頭部材と梁部材の間に $\pi$ 型ゲージを取り付け、部材の離間を計測した。鋼管杭基部の相対回転角を把握するため、鋼管杭基部には模型梁上面から 50mm の高さに測定プレートを取り付け、梁部材から測定プレートの鉛直変位を測定した。なお、「PC 圧着構造」ではスペースの関係上、杭頭部材から鋼管杭の測定プレートを通すことが困難であったため、鋼管杭基部の絶対回転角から杭頭部材の絶対回転角を差し引くことで、鋼管杭基部の相対回転角を評価した。

### 3.2 実験結果および考察

#### (1) 損傷状況の概要

実験で観察された損傷イベントの概要を図-4 に示す。「RC 構造」は鋼管杭基部の引張側で降伏し、杭頭部の模型上面および側面においてひび割れが発生した。 $2\delta_y$  で模型上側の主鉄筋が降伏し、杭頭部のひび割れが発達するとともに、梁部への進展・拡大によって  $4\delta_y$  で最大荷重を迎えた (図-4(a))。一方、「PC 圧着構造」は鋼管杭基部の引張側で降伏した後、杭頭部材の模型上面に微細なひび割れが数本生じた。 $2\delta_y$  で杭頭部材の側面および梁部材内側にひび割れが生じたが、除荷とともにひび割れは閉じる傾向が見られ、 $5\delta_y$  で最大荷重を迎えた (図-4(b))。なお、「PC 圧着構造」は  $5\delta_y$  で荷重低下が見られなかったため、最大変位  $190\text{mm}$  ( $+9\delta_y$ ) までの単調載荷を実施している。両ケースとも  $3\delta_y$  の変位ステ

表-1 鋼材の材料特性値

鋼材	降伏点 $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	仕様
鋼管杭	381.0	461.1	$199 \times 10^3$	$\phi 318.5 \times 6.9$
鞘管	473.7	580.6	$210 \times 10^3$	$\phi 406.4 \times 6.4$
鉄筋	387.2	555.5	$184 \times 10^3$	D19
	387.2	594.0	$184 \times 10^3$	D10
	424.9	615.3	$180 \times 10^3$	D6
PC鋼より線	1,816.9	2,011.5	$194 \times 10^3$	1S15.2

表-2 コンクリートおよびモルタル等の材料特性値

コンクリートおよびモルタル等		圧縮強度 $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )
RC構造	梁部材	39.4	2.9	$32.9 \times 10^3$
PC圧着構造	プレキャスト部材	59.5	3.4	$35.9 \times 10^3$
	杭頭間詰め部 (コンクリート)	39.4	2.9	$32.9 \times 10^3$
	杭頭間詰め部 (無収縮モルタル)	71.2	4.5	$27.6 \times 10^3$
	PCグラウト	99.7	3.5	$20.3 \times 10^3$

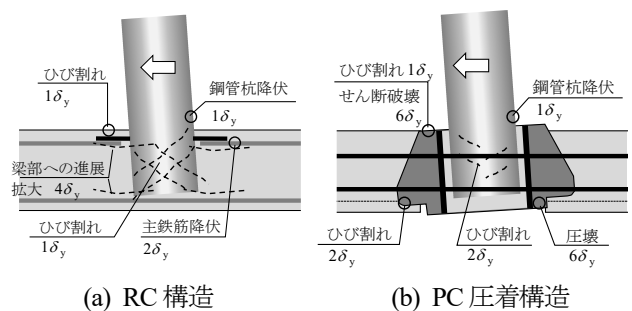
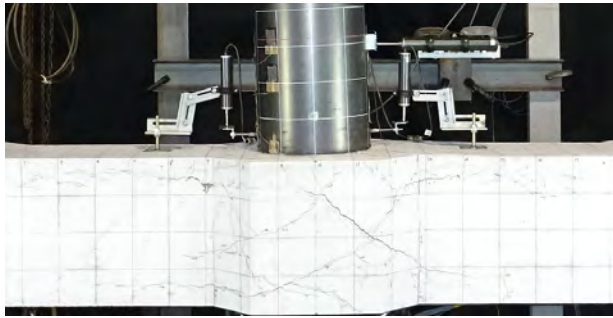


図-4 損傷イベント



(a) RC 構造



(b) PC 圧着構造

写真-7 3δy時の損傷状況

ップで、鋼管杭基部に面外変形の兆候（座屈）が確認された。3δy時の損傷状況を写真-7に示す。

(2) 荷重-変位関係

実験で得られた荷重-変位関係を図-5、設計耐力について実験との比較を表-3に示す。ここで、表-3の公称値とは鋼管杭の引張降伏応力度 $f_{yd}=235\text{N/mm}^2$ 、「RC構造」のコンクリート圧縮強度 $f'_{cd}=30\text{N/mm}^2$ 、「PC圧着構造」の圧縮強度 $f'_{cd}=50\text{N/mm}^2$ 、試験値とは表-1および表-2で示した材料特性値を用いた時の設計耐力である。図-5には鋼管杭基部が降伏した基準変位 $\delta_y$ を○、最大荷重 $P_{max}$ を●として示し、試験値を用いた時の設計耐力（鋼管杭の全塑性荷重 $P_p$ 、梁部の終局曲げ荷重 $P_u$ ）をそれぞれ併記した。図-5より、「RC構造」の履歴ループは、ややくびれた紡錘形状を示し、ステップ後半では荷重ゼロ付近で変位が進行するスリップ現象が明確に確認できる。これは、交番载荷に伴い、杭頭部および梁部へのひび割れが進展・拡大していることに起因している。一方、「PC圧着構造」は荷重ゼロ付近でのスリップ現象は見られず、履歴ループは紡錘形状を示している。これは、プレストレスによる損傷制御によって部材のひび割れ進展・拡大が抑制されるためであると推察される。両ケースとも鋼管杭基部の引張側が降伏した辺りから荷重の伸びが緩やかとなった。

表-3に示した設計耐力と実験の比較では、「PC圧着構造」の終局荷重は試験値を用いた設計に対して1.2~1.5倍の耐力を発揮しており、2.2断面設計で示した設計法によって安全側の評価が可能である。

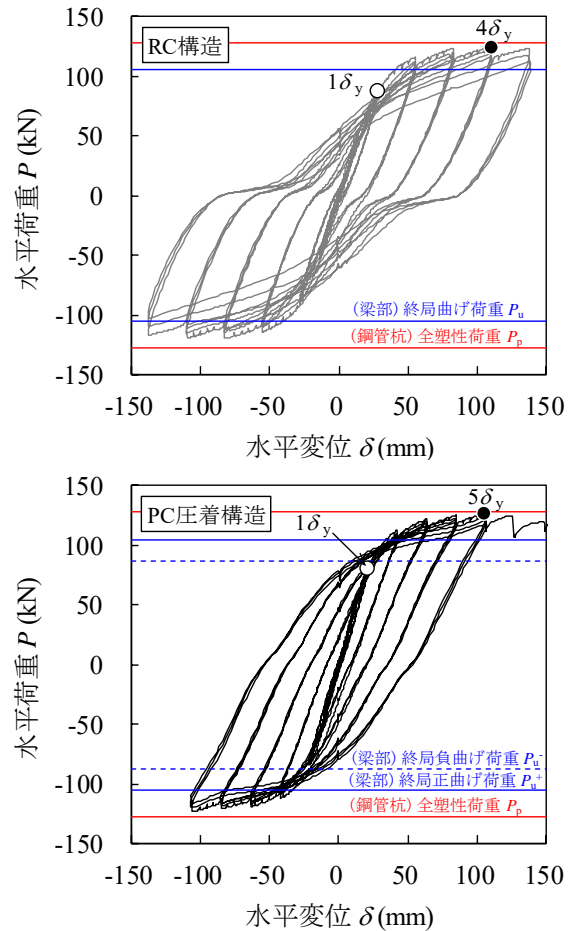


図-5 荷重-変位関係

表-3 設計耐力と実験の比較

実験ケース			降伏荷重			終局荷重			実験/設計 $P_{max} / \min(P_p, P_u)$
			設計(鋼管杭) $P_y$ (kN)	設計(梁部) $P_y$ (kN)	実験 $P_y$ (kN)	設計(鋼管杭) $P_p$ (kN)	設計(梁部) $P_u$ (kN)	実験 $P_{max}$ (kN)	
RC構造	正負曲げ	公称値	60.5	89.4	87.6	78.7	93.2	124.8	1.6
		試験値	98.1	101.6		127.6	105.7		1.2
PC圧着構造	正曲げ	公称値	60.5	68.9	81.3	78.7	97.2	127.0	1.6
		試験値	98.1	74.0		127.6	104.6		1.2
	負曲げ	公称値	60.5	64.7		78.7	81.4		1.6
		試験値	98.1	70.5		127.6	87.3		1.5

各サイクルの最大水平荷重  $P$  および除荷後の残留変位  $\delta_r$ 、各サイクルの最大水平荷重  $P$  を最大変位  $\delta$  で除して定義した見掛け剛性  $P/\delta$  について、+変位のステップで整理したグラフを図-6 に示す。両ケースの水平荷重  $P$  は概ね同様に推移しているが、変位  $\delta$  が異なるため「PC 圧着構造」の見掛け剛性  $P/\delta$  が高く、残留変位  $\delta_r$  は小さい。「PC 圧着構造」では、プレストレスによる圧着接合面の復元性により、除荷後の残留変位を抑制しているものと考えられる。次に、履歴吸収エネルギーをサイクル毎に求め、そのサイクルで吸収したエネルギーとその前までに吸収した累積吸収エネルギーの変化を図-7 に示す。サイクルが進むに従い累積吸収エネルギーは増加傾向にあるが、杭頭部の損傷が顕著な「RC 構造」の方がやや大きい。同変位のサイクル吸収エネルギーに着目すると、「RC 構造」は低下傾向にあるが「PC 圧着構造」は一定で推移しており、プレストレスによる杭頭部材の損傷抑制と圧着接合面の弾性的な開閉挙動によるものと推察される。

### (3) ひび割れ性状

図-8 に  $+1\delta_y \sim +3\delta_y$  の各3サイクル目におけるひび割れスケッチを示す。ひび割れスケッチは、+変位で生じたものを赤破線、-変位を青実線で記している。

「RC 構造」は初期の変位ステップから杭頭部にひび割れが発生し、その範囲は梁部に進展・拡大している。杭頭部のひび割れ進展・拡大は、図-6 における残留変位  $\delta_r$  を増加させるため、図-5 の荷重-変位関係における荷重ゼロ付近でのスリップ現象に影響を与えるものと考えられる。「PC 圧着構造」は、杭頭部材に生じた微細なひび割れが除荷とともに閉じ、梁部材への進展は限定的であった。ただし、 $2\delta_y$  以降で梁部材内側(図-8 の a 部)

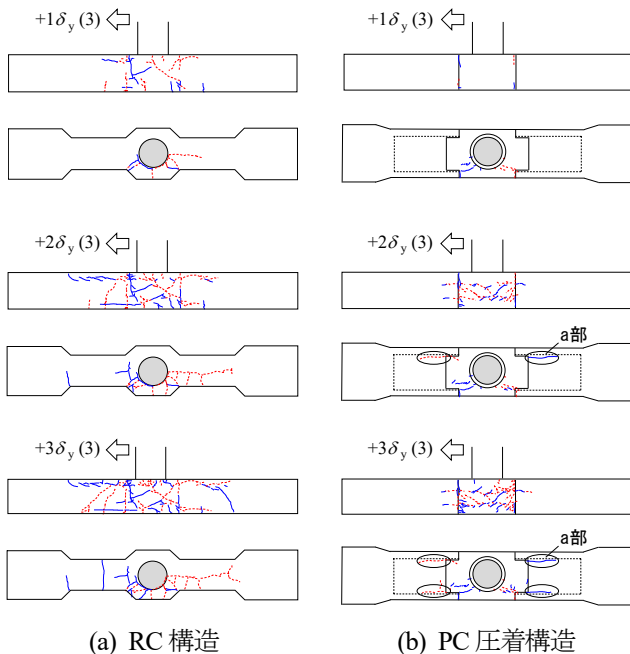


図-8 ひび割れ性状のスケッチ

にコーベルの支圧が要因と推察されるひび割れが梁軸方向に確認されており、コーベルの影響については次章で考察する。

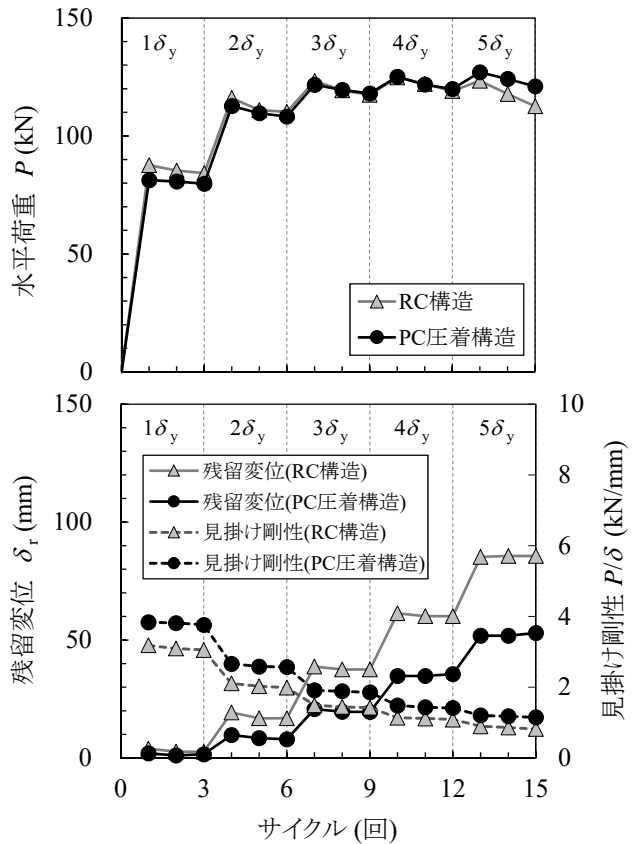


図-6 水平荷重と残留変位および見掛け剛性

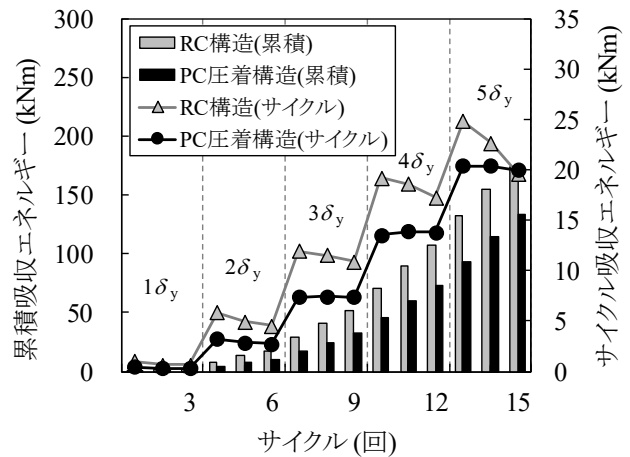


図-7 履歴吸収エネルギー



写真-8 PC 圧着構造の損傷形態(実験終了後)

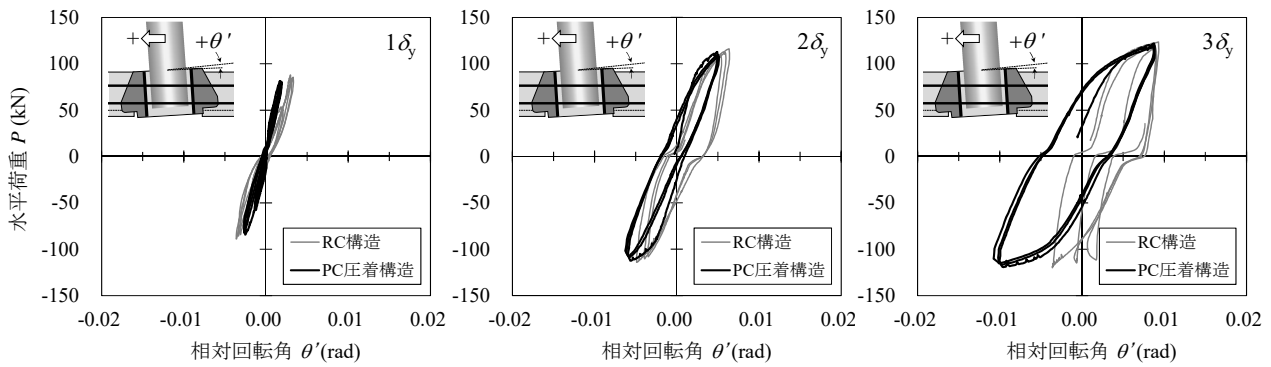


図-9 鋼管杭基部の相対回転角

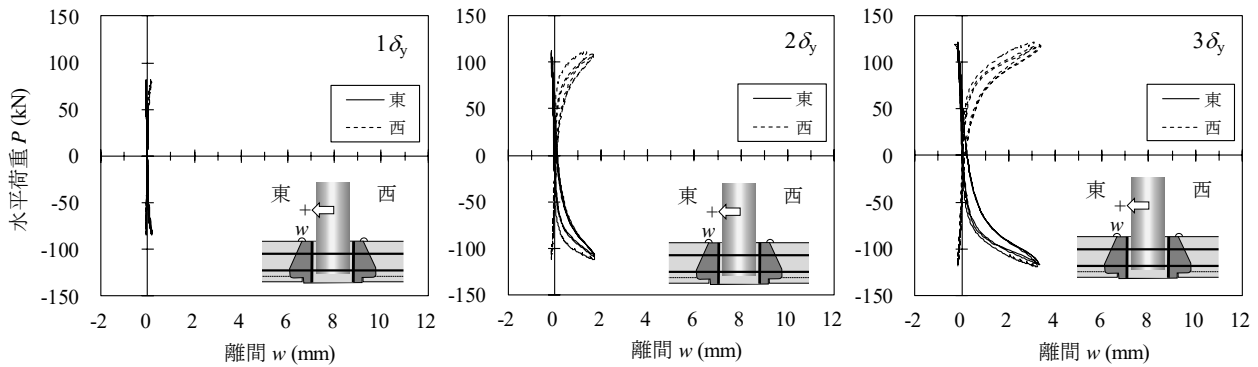


図-10 杭頭部材の離間 (PC 圧着構造)

「PC 圧着構造」は  $5\delta_y$  で最大荷重を迎えた後、 $6\delta_y$  に杭頭部材の上面でせん断破壊、下面で鞘管の支圧による圧壊が見られ、杭頭部材の損傷が耐力の決定要因となっている (写真-8)。

#### (4) 鋼管杭基部の相対回転角および杭頭固定度

図-9 に  $1\delta_y \sim 3\delta_y$  における鋼管杭基部の相対回転角、図-10 に「PC 圧着構造」の模型上面に取り付けた部材間  $\pi$  型ゲージの計測値を示す。図-9 より、「RC 構造」は変位ステップの進行に伴い、杭頭部の損傷により相対回転角が原点に対して非対称な挙動に変化しているが、「PC 圧着構造」は対称的である。図-10 の離間挙動を見ると、除荷時にはほぼゼロとなる原点指向を示しており、「PC 圧着構造」はこの弾性的な開閉挙動により変形を吸収するため、鋼管杭基部の相対回転角は対称的な挙動を示している。

杭頭部の固定条件を考察するため、図-9 の相対回転角を用いて式(1)より杭頭固定度  $\alpha$  を評価したり、杭頭固定度は突出杭の杭頭部における回転拘束の程度を表しており、 $\alpha=0.0$  のピンから  $\alpha=1.0$  の剛結までを示すパラメータである。サイクル毎の杭頭固定度  $\alpha$  の変化を図-11 に示す。実験では  $3\delta_y$  において、杭頭部に面外変形の兆候 (座屈) が見られたことから、 $4\delta_y$  以降は参考値として破線で示している。図中より、両ケースの杭頭固定度は概ね  $\alpha=0.85 \sim 0.95$  の範囲であり、プレキャスト化した「PC 圧着構造」において、従来の「RC 構造」と同等の固定条件を実現できることが示唆された。

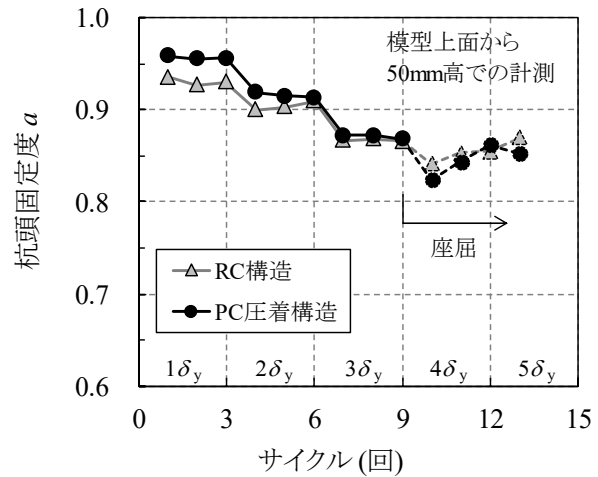


図-11 杭頭固定度の変化

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{EI}{2h^2} \times \frac{\theta'}{P}} \quad (1)$$

ここで、

- $\alpha$  : 杭頭固定度 ( $0 \leq \alpha \leq 1.0$ )
- $P$  : 水平荷重
- $h$  : 突出長 (模型上面から載荷点までの距離)
- $\theta'$  : 鋼管杭基部の相対回転角
- $EI$  : 杭体の曲げ剛性

### (5) 鋼材のひずみ分布

鋼管杭基部の軸ひずみ分布を図-12に示す。両ケースとも模型梁上端 ( $y=0$ ) をピークとしたひずみ分布を示しており、杭頭固定度が同程度だったことと概ね整合している。図-13に「RC構造」の主鉄筋および「PC圧着構造」のPC鋼より線の軸ひずみ分布を示す。ここで、PC鋼より線のひずみは有効プレストレスによるひずみを初期値として考慮している。「RC構造」では、溶接プレートに接続されている模型上側の主鉄筋  $x=272\text{mm}$  に局所的なひずみが発生し、実験では  $2\delta_y$  以降、梁部のひび割れが進展・拡大している。「PC圧着構造」は、圧着接合面の開閉挙動により、接合面 ( $x=300$ ) 前後のひずみが大きくなる傾向があるが、付着破壊の有無については実験で確認できていない。本実験では、 $5\delta_y$  のひずみにおいても降伏ひずみ  $\epsilon_y=9,370\mu$  の70%以下であり、PC鋼より線は弾性状態であったと判断される。

以上のように、「PC圧着構造」は従来の「RC構造」と同程度の耐力と杭頭固定度を有しており、杭頭曲げモーメントに対する圧着接合面の弾性的な開閉挙動によって、杭頭部の損傷を軽微に抑え、梁部材へのひび割れ進展を抑制することが分かった。ただし、実験ではコーベルの支圧が要因と考えられる梁部材のひび割れや、杭頭部材の損傷が耐力の決定要因となっていることが確認されており、次章ではこれらの影響について解析的検討を行った。

## 4. 直交2方向プレストレスを考慮した解析的検討

実構造物では、杭頭部に直交する2方向からプレストレスを導入して杭頭部材と梁部材の一体化を図るが、実験では観察の都合上、1方向のみのプレストレスを導入しており、実挙動と異なる可能性がある。実験で観察されたコーベルによる梁部材のひび割れや杭頭部材の損傷は、上記のプレストレスによる拘束効果によって大きく影響を受けるものと予想される。そこで、幾何学的・材料非線形性を考慮した三次元 FEM 解析 (DIANA<sup>10</sup>) を実施し、プレストレスの影響について考察した。

### 4.1 解析概要

#### (1) 解析モデル

解析モデルを図-14に示す。解析は载荷軸を対称面とする 1/2 対称モデルとし、杭頭部材・梁部材・中詰めコンクリート・無収縮モルタル・杭頭間詰めコンクリートを 8 節点六面体のソリッド要素、鋼管杭および鞘管を 4 節点四角形の曲面シェル要素とした。コンクリート内の鉄筋は完全付着の埋込鉄筋要素とし、PC鋼より線はトラス要素、PC鋼より線~PCグラウトは是永ら<sup>11)</sup>の付着すべり関係を適用した。鋼管杭外面および鞘管内面にはシアキーとして、線インターフェース要素を離散的に配置した。

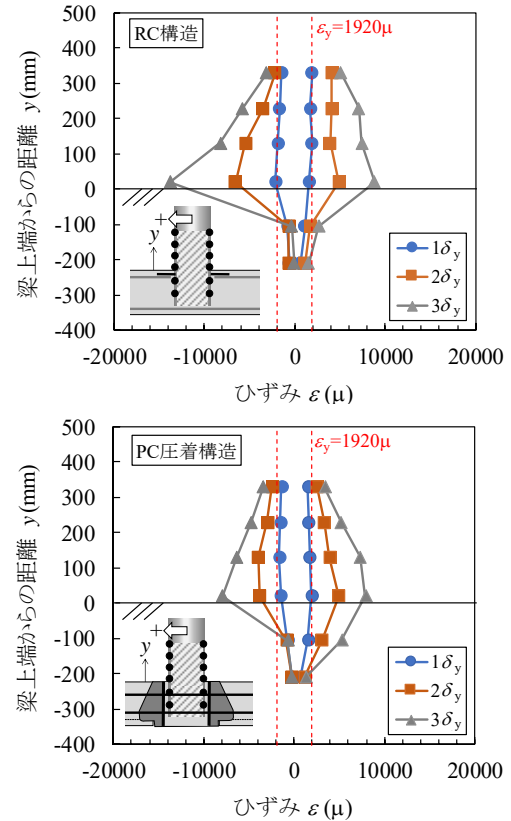


図-12 鋼管杭基部の軸ひずみ分布

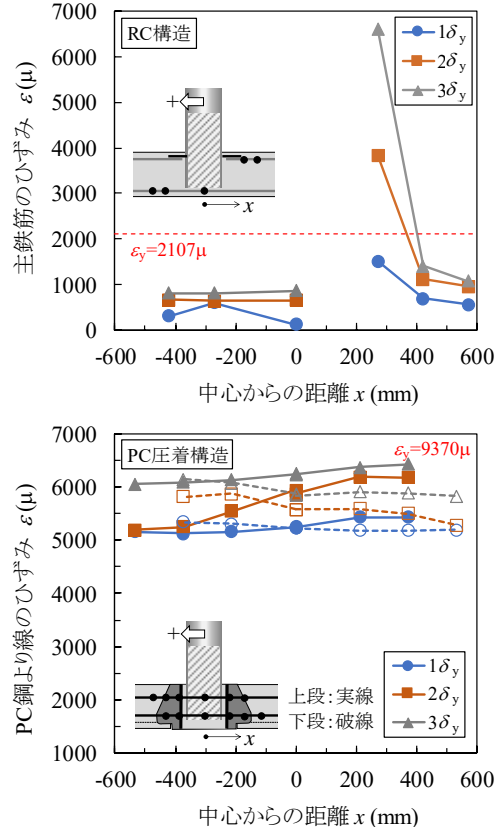


図-13 主鉄筋およびPC鋼より線の軸ひずみ分布



(2) 荷条件および拘束条件

荷位置となる鋼管杭には、模型梁上端から 2,000mm 上方に剛梁要素を放射状に設け、その中心節点に実験と同様の強制変位を与えた。実験では梁両端の支承をピン条件としているため、模型梁両端の支承に剛梁要素を設け、剛梁下端にピン条件を与えた。

(3) 構成則および解析物性値

コンクリートおよび無収縮モルタルは、分散ひび割れモデル<sup>12)</sup> (全ひずみ固定ひび割れモデル) を採用し、圧縮域には圧縮破壊エネルギー $G_c$ を考慮した Feenstra の Parabolic モデル<sup>13)</sup>、引張域には引張破壊エネルギー $G_t$ を考慮した Hordijk モデル<sup>14)</sup>を用いた。ここで、圧縮破壊エネルギー $G_c$ は Nakamura and Higai<sup>15)</sup>により算出し、引張破壊エネルギー $G_t$ をコンクリート標準示方書<sup>16)</sup>に従い算出した。鋼管杭・鞘管および鉄筋には Von Mises の降伏基準を採用し、材料引張試験より得られた応力ひずみ関係からバイリニア型(2次勾配を初期勾配 $E$ の 1/100)の構成則とした。PC 鋼より線は、実験において弾性範囲内であったため線形材料とし、自重解析において有効プレストレス ( $\sigma_{pc}=1,015\text{N/mm}^2$ ) を作用させ、荷解析で PC 鋼より線~PC グラウトの付着~すべり関係を有効にした。解析で用いた PC 鋼より線の付着~すべり関係<sup>11)</sup>を 図-15 に示す。

ひび割れ面でのせん断伝達はコンクリート標準示方書モデル<sup>17)</sup>を用い、ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減には Vecchio and Collins モデル<sup>18)</sup>を用いた。鋼管杭外

面および鞘管内面のシアキーとして配置した線インターフェース要素は圧縮方向に抵抗し、引張方向に抵抗しない剛性とし、せん断方向には式(2)より算定<sup>19)</sup>したせん断強度 $\tau_f=16.5\text{N/mm}^2$ を上限とするバイリニア型の付着~すべり関係とした。

$$\tau_f = 1.15 + 1.72(f'_c/0.8) \cdot (h/s) \quad (2)$$

ここで、

- $\tau_f$  : シアキーのせん断強度
- $f'_c$  : 無収縮モルタルの圧縮強度=71.2N/mm<sup>2</sup>
- $h$  : 丸鋼径=6mm
- $s$  : シアキーピッチ=60mm

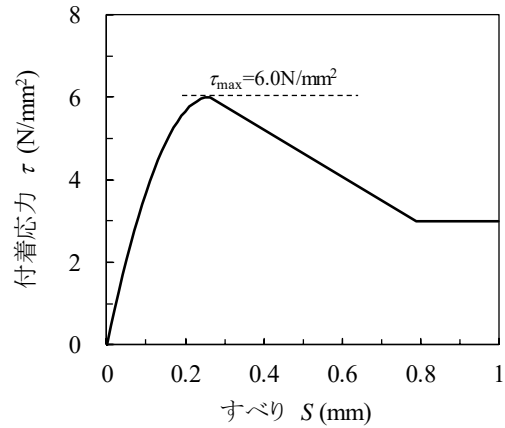


図-15 PC 鋼より線の付着~すべり関係<sup>11)</sup>

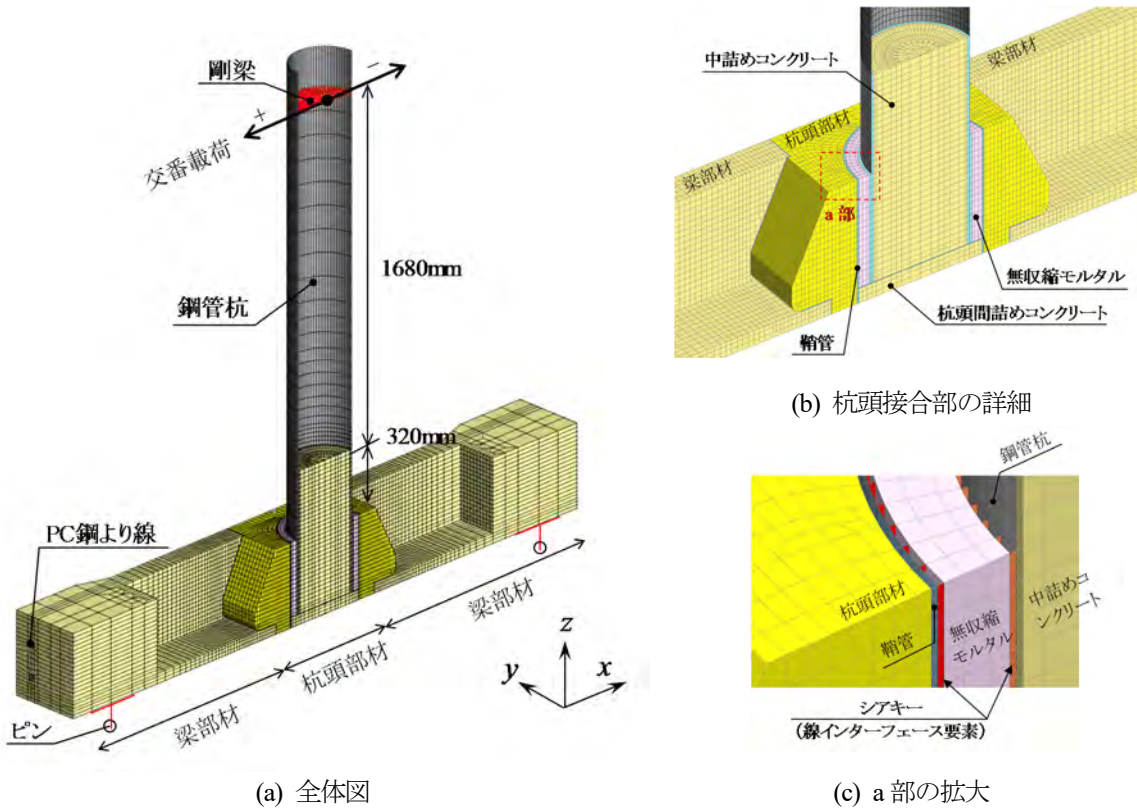


図-14 解析モデル

表-4 コンクリートおよびモルタル等の解析物性値

部 位	圧縮強度	引張強度	弾性係数	ポアソン比	破壊エネルギー	
	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )			$G_c$ (N/mm)	$G_t$ (N/mm)
杭頭部材, 梁部材	59.5	3.4	$35.9 \times 10^3$	0.2	67.7	0.0918
中詰めコンクリート 杭頭間詰め部 (コンクリート)	39.4	3.1	$31.5 \times 10^3$	0.2	55.1	0.0800
杭頭間詰め部 (無収縮モルタル)	71.2	4.5	$27.6 \times 10^3$	0.2	74.0	0.0563
PCグラウト	99.7	3.5	$20.3 \times 10^3$	0.2	55.1	0.0629

表-5 鋼材の解析物性値

部 位	降伏点	弾性係数	ポアソン比	板厚	断面積
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\nu$	$t$ (mm)	$A$ (mm <sup>2</sup> )
鋼管杭	381.0	$199 \times 10^3$	0.3	6.9	-
鞘管	473.7	$210 \times 10^3$	0.3	6.4	-
鉄筋 (D10)	387.2	$184 \times 10^3$	-	-	71.3
鉄筋 (D6)	424.9	$180 \times 10^3$	-	-	31.7
PC鋼より線	1,816.9	$194 \times 10^3$	-	-	138.7

表-6 面インターフェース要素の解析物性値

部 位	法線剛性	せん断剛性	粘着力	摩擦係数
	(N/mm <sup>3</sup> )	(N/mm <sup>3</sup> )	$c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\mu$
鋼管杭～ 中詰めコンクリート	$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^6$	-	-
鞘管～ 杭頭部材	$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$	0.7 注1)	0.36 注1)
杭頭部材～ 梁部材	$1.0 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$	-	0.45 注2)

注1)複合標準示方書  
注2)コンクリート標準示方書

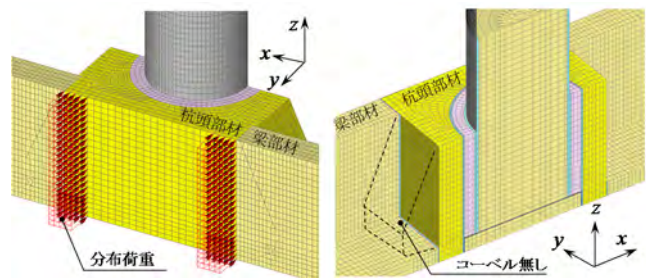
その他、面インターフェース要素として、鋼管杭～中詰めコンクリートには圧縮方向に抵抗し、引張およびせん断方向に抵抗しない構成則を適用した。ここで、鋼管杭～中詰めコンクリートにはある程度の付着力が存在すると考えられるが、適切な付着力の評価が困難なことや、中詰めコンクリートの乾燥収縮による影響を考慮し、本解析では付着力を無視した滑面とした。また、鞘管～杭頭部材および杭頭部材～梁部材の面インターフェース要素には、それぞれ複合標準示方書<sup>19)</sup>およびコンクリート標準示方書<sup>20)</sup>を参考に設定したクーロン摩擦モデルを採用した。本解析で用いた解析物性値の一覧を表-4～表-6に示す。

#### (4) 検討ケース

検討ケースを表-7に示す。C1は「PC圧着構造」の実験ケース、C2は直交2方向(x,y方向)のプレストレスを導入したケースである。ここで、y方向のプレストレスは、図-16(a)のように便宜的にプレストレスに相当する分布荷重を一定に与えた。C3は直交2方向(x,y方向)のプレストレスを導入した上で、コーベルを無視したケースである(図-16(b))。

表-7 検討ケース

ケース名	プレストレスの方向		コーベルの有無	備考
	x方向	y方向		
C1	○	-	有り	実験ケース
C2	○	○	有り	2方向の影響
C3	○	○	無し	コーベルの影響



(a) y方向プレストレス (b) コーベル無し

図-16 検討モデル (C2, C3)

## 4.2 検討結果

### (1) 解析モデルの適用性

解析 C1 の荷重-変位関係を実験と比較して図-17に示す。また、杭頭部材の絶対回転角、杭頭部材の離間、鋼管杭基部の軸ひずみ分布を図-18に示す。ここで、解析 C1 は $5\delta_y$ の除荷時に発散したため途中までの結果を示した。図-17より、解析 C1 は実験よりも荷重ピークが大きく、耐力を過大評価する結果となった。図-18より、杭頭部材の絶対回転角や離間は定性的に実験の傾向を捉えているが、圧着接合面の開閉挙動が実験よりも小さい。鋼管杭基部の軸ひずみ分布を見ると、突出部は概

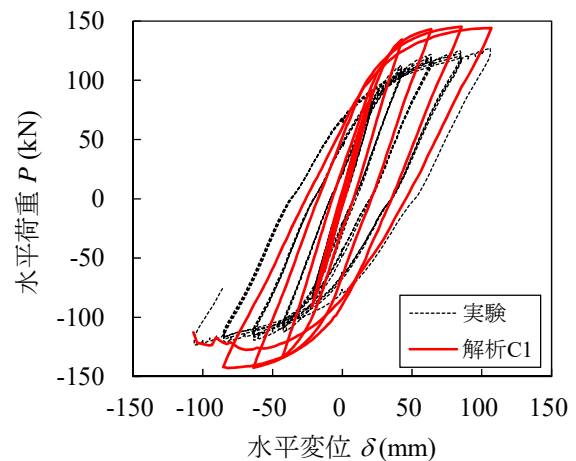


図-17 解析 C1 と実験の荷重-変位関係

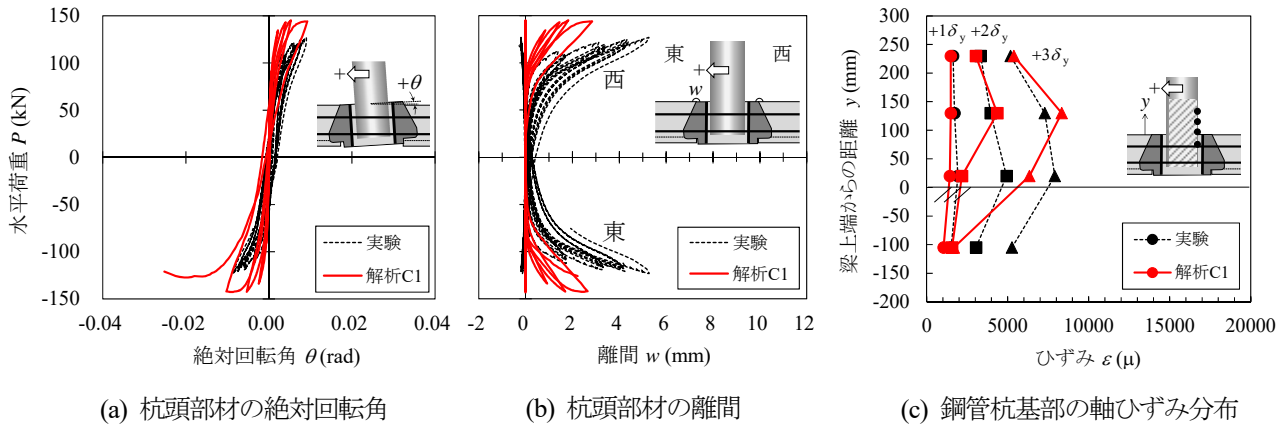


図-18 実験と解析 C1 の比較

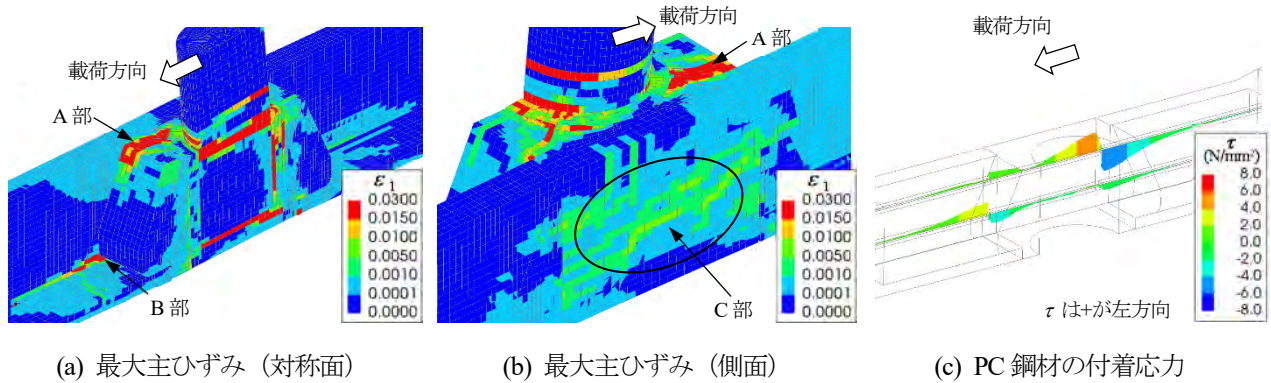


図-19  $3\delta_y$ 時の最大主ひずみコンター（変形倍率5倍）と付着応力ダイアグラム

ね良い整合が見られるが杭頭部材内における解析のひずみは小さく、鋼管杭の固定条件を完全に再現できていないものと考えられる。図-19には $3\delta_y$ 時での最大主ひずみおよびPC鋼材の付着応力を示す。中詰めコンクリートや杭頭部材上面（A部）および梁部材内側（B部）に局所的な引張ひずみが見られるが、実験で観察されたひび割れ箇所と整合している。PC鋼材の付着応力を見ると、ピーク値である圧着接合面での $\tau=5.0\text{N/mm}^2$ は図-15で設定した $\tau_{\text{max}}=6.0\text{N/mm}^2$ を超えておらず、解析は $3\delta_y$ 時点で付着破壊していない。今回の実験において、接合面付近の付着破壊の有無は不明であるが、本解析モデルで付着力をパラメータとした感度解析を実施した際、付着力が小さくなると荷重ピークが低下する傾向を示したことから、PC鋼材の付着破壊が生じず、接合面での開閉挙動が小さいことが荷重ピークを過大評価している要因の一つとして考えられる。更に、鋼管杭の面外変形（座屈）や杭頭部材のせん断ひび割れによる損傷程度などが解析結果の荷重-変位関係に影響を及ぼしているものと考えられる。

以上より、本解析モデルは実験を定量的に再現できていないが、履歴ループ形状、杭頭部材の挙動や鋼管杭のひずみ、部材に生じる損傷箇所などの傾向を捉えている

ものと考えられる。そこで、以降の検討では直交2方向プレストレスを導入した際の杭頭部材の損傷について、定性的な比較を行うこととした。

(2) 直交2方向プレストレスの効果

解析C1~C3の荷重-変位関係を図-20、 $3\delta_y$ での損傷指標 $\sqrt{J_2}$ および鋼管杭の軸ひずみコンター比較を図-21に示す。ここで、損傷指標 $\sqrt{J_2}$ はコンクリートの曲げひび割れや、斜めひび割れの発生といった引張損傷を評価する偏差ひずみの第2不変量であり、通常、要素分割の依存性を低減するため平均化される<sup>2)</sup>。本検討ではコンクリートの要素寸法が $15\sim 20\text{mm}$ であることを考慮し、平均化半径を $15\text{mm}$ とした。

図-20より、1方向プレストレスの解析C1は徐々に除荷勾配が緩やかになるが、2方向プレストレスの解析C2およびC3は、除荷勾配一定のまま紡錘型の履歴ループを描いていることが分かる。すなわち、2方向プレストレスの効果は、損傷が顕在化する塑性域の変位ステップに現れている。図-21の損傷指標 $\sqrt{J_2}$ では、解析C2はC1と比べて、杭頭部材（A部、C部）および梁部材（B部、D部）の損傷が抑えられており、その結果、杭頭曲げモーメントは鋼管杭基部に集中するため鋼管杭の軸ひずみが大きく発生している。このように、2方向プ

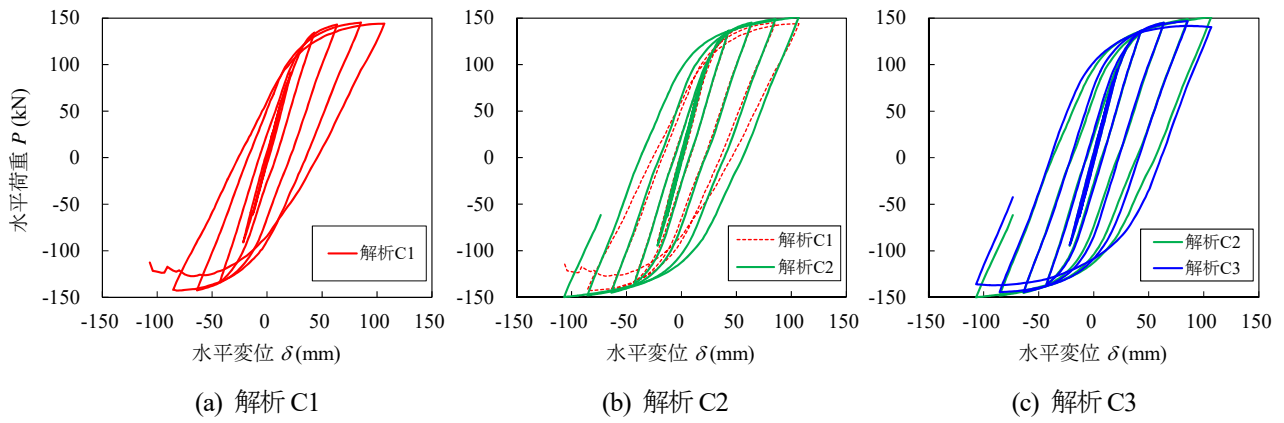


図-20 検討ケースの荷重-変位関係

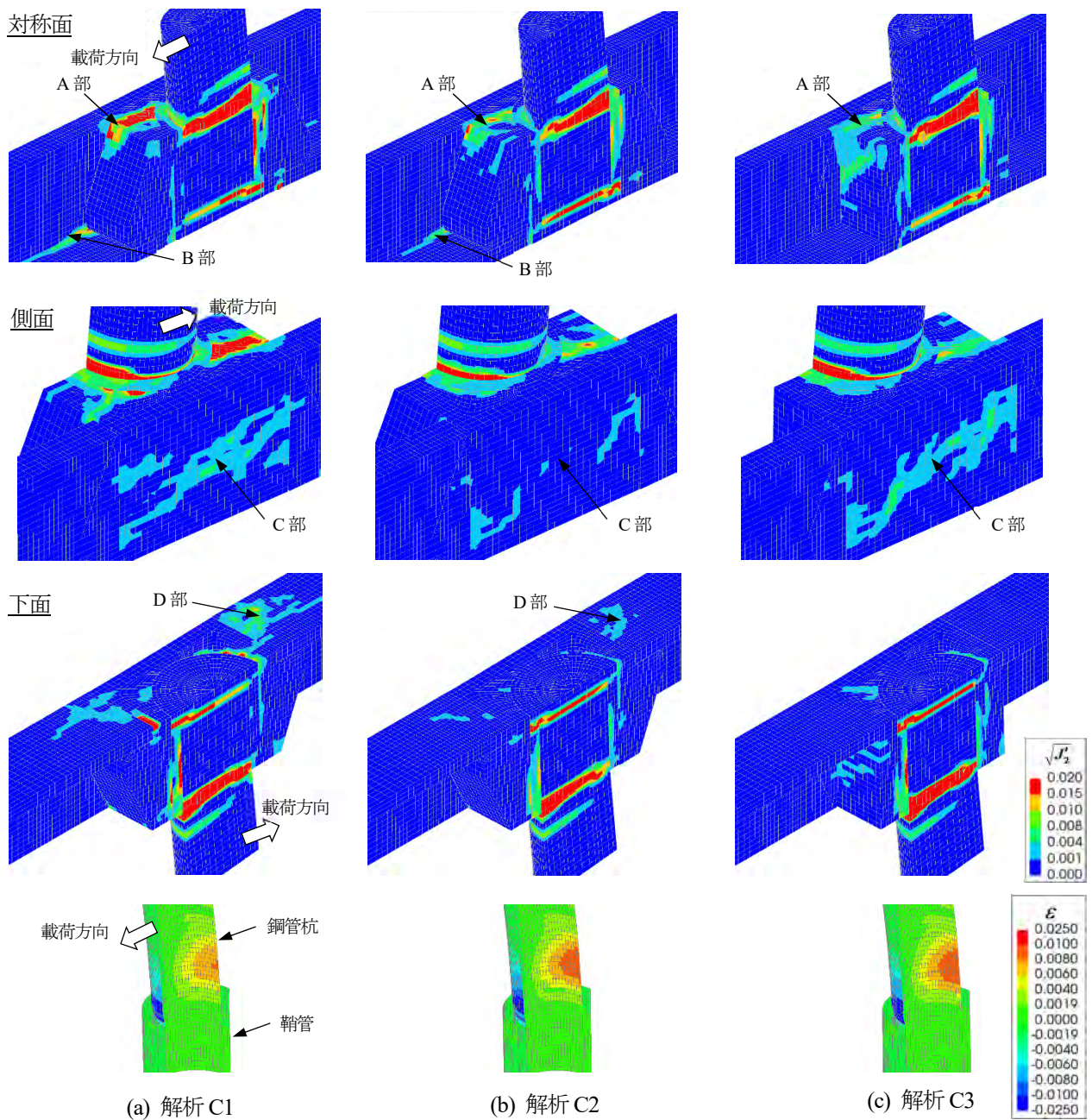


図-21  $3\delta$ 時の損傷指標および鋼管杭の軸ひずみコンター (変形倍率5倍)

レストレスによって杭頭部材の拘束力を高め、コンクリートの部材損傷を抑制する傾向が確認された。

### (3) コーベルが梁部材に与える影響

図-20 (c)より、 $5\delta_y$ で若干の差異は見受けられるが、コーベルの有無が荷重-変位関係に与える影響は小さいことが分かる。図-21 の梁部材 (B 部) に着目すると、解析 C2 は C1 に比べて損傷が軽減されており、直交 2 方向プレストレスの導入によって杭頭部材 (A 部) の損傷が抑制された結果、コーベルの支圧力が減少したためだと考えられる。一方、解析 C3 は、杭頭部材 (C 部) の損傷範囲が解析 C2 よりも広く分布しており、コーベルが無いと杭頭部材の損傷が広がる傾向が見られる。このように、杭頭曲げモーメントに対して解析 C2 は杭頭部材とコーベルを介した梁部材で、解析 C3 では杭頭部材で抵抗していることが解析的に示された。

本検討より、コーベルは梁部材の損傷要因の一つであるが、直交 2 方向のプレストレスによってその損傷が軽減される傾向を確認した。ただし、コーベルは施工時の動揺における梁部材の落下防止でもあり、コーベルの張出しを必要以上に大きくすると、梁部材の損傷が顕在化する可能性があるため、最小限の張出しに留めるべきと考えられる。

## 5. 結論

本研究では、栈橋上部工のプレキャスト部材を全て工場製作および陸上運搬できる方法として、栈橋上部工を杭頭部材と梁部材の 2 種類に分割し、現地でポストテンション方式のプレストレスにより一体化する「PC 圧着構造」を提案した。PC 圧着された杭頭接合部の力学的挙動を確認するため、概ね 1/4 縮尺の逆 T 形模型を用いた交番載荷実験を実施し、実験では確認できなかった直交 2 方向のプレストレスによる効果や、コーベルが梁部材に与える影響について解析的検討を行った。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本構造は、従来の RC 構造と比べて耐力と杭頭固定度は同程度であり、プレストレスによる杭頭部材の損傷抑制や圧着接合面の優れた復元性によって、除荷後の残留変位が少ない構造であることを確認した。
- (2) 本構造は、杭頭曲げモーメントに対して圧着接合面の弾力的な開閉挙動により変形を吸収し、梁部材へのひび割れ進展・拡大を抑制することを確認した。
- (3) 本構造は、試験値を用いた設計耐力に対して 1.2~1.5 倍の耐力が得られており、2.2 断面設計で述べた設計法の妥当性を確認した。
- (4) 解析的検討より、直交 2 方向のプレストレスによって杭頭部材および梁部材の引張やせん断に伴う損傷が抑制される傾向を確認した。したがって、実構造物の部材は、実験で観察された損傷よりも軽減さ

れる傾向にあると推察された。

- (5) 直交 2 方向のプレストレスによって、杭頭部材のコーベルが梁部材に与える影響は軽減される傾向が確認された。ただし、必要以上にコーベルの張出しを大きくすると、梁部材の損傷が顕在化する可能性が推察される。

本研究では、PC 圧着構造に杭頭曲げモーメントが作用した場合を想定し、杭頭接合部の力学的挙動に着目した交番載荷実験を実施した。しかし、実構造物にはせん断力も作用し、杭頭部材と梁部材の接合面におけるせん断耐力は重要な設計照査項目である。今後は、逆対称曲げを載荷した本構造のせん断試験を実施し、圧着接合面のせん断耐力を評価するとともに、実用的な設計法を構築する予定である。

## 謝辞

本研究の解析では、JIP テクノサイエンス株式会社の洪杰氏に貴重な御意見を頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 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に関する交番載荷実験, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.724-733, 2018.
- 2) 川端雄一郎, 池野勝哉, 加藤絵万, 岩波光保: 栈橋上部工のプレキャスト化における杭頭接合方法の提案: 港湾空港技術研究所資料, No.1359, 2019.
- 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, 土木学会建設技術発表会 2018 概要集, pp.79-85, 2018.
- 4) 川俣奨: 栈橋上部工受梁のプレキャスト化施工について, Marine Voice 21, Vol.302, pp.12-15, 2018.
- 5) 岡野大志, 松崎育弘, 坂田弘安, 池澤誠: PC 圧着関節工法を用いた損傷制御架構の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.547-552, 2005.
- 6) 中井敏文, 松崎育弘, 坂田弘安, 竹内宏次: PC 圧着関節工法を用いた T 形部分の架構の構造性能に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.535-540, 2006.
- 7) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(中巻), 日本港湾協会, pp.1199-1218, 2018.
- 8) (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.
- 9) 土木研究所 耐震研究グループ耐震チーム: 橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案) 橋脚の正負交番載荷実験方法及び振動台実験方法, 土木研究所資料, 第 4023 号, 2006.
- 10) DIANA FEABV: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, release 10.3, 2019.

- 11)是永健好, 渡辺英義 : PC 鋼より線とグラウト材の付着特性評価, 日本建築学会学術講演梗概集(中国), pp.1083-1084, 1999.
- 12)Selby, R. G. and Vecchio, F. J. : Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete, Tech. Rep. 93-02, Univ. Toronto, Dept. Civil Eng., Toronto, Canada, 1993.
- 13)Feenstra, P. H. : Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and Reinforced Concrete, PhD-thesis, Delft University of Technology, 1993.
- 14)Hordijk, D. A. : Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD-thesis, Delft University of Technology, 1991.
- 15)Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, *Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads*, ASCE, pp. 471-487, 2001.
- 16)土木学会 : 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], pp. 41-42, 丸善, 2018.
- 17)土木学会 : 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], pp.485-486, 丸善, 2018.
- 18)Vecchio, F. J. and Collins, M. P. : Compression response of cracked reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.119, No.12, pp.3590-3610, 1993.
- 19)土木学会 : 複合構造標準示方書[設計編], pp.476-480, 丸善, 2014.
- 20)土木学会 : 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], p. 462, 丸善, 2018.
- 21)土木学会 : 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], pp.507-513, 丸善, 2018.

(2020 年 9 月 15 日受付)

(2021 年 2 月 1 日受理)