

## PC圧着したプレキャスト栈橋の杭頭接合部に関する交番載荷実験

五洋建設(株) ○石塚 新太  
 (株)日本ピーエス 正会員 修(工) 天谷 公彦  
 (国研)海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 正会員 博(工) 加藤 絵万  
 東京工業大学 正会員 博(工) 岩波 光保

Abstract : Use of precast segmental superstructures is an effective labor-saving measure for port pier construction. Precast members are usually prepared at site yard. However, it is also necessary to prepare all precast members at factory when enough space for site yard can't be secured. We proposed an assembly construction method for port pier superstructures by using precast prestressed concrete superstructure members which can be transported by land. In this study, a series of cyclic loading experiments are conducted to confirm the effect of structural details at pile head connection on mechanical behavior of port pier structures. As a result, it is verified that the proposed precast structure has the same flexural capacity as cast-in-place RC structures, and higher degree of pile head fixation in plastic region.

Key words : Pile supported wharf, Precast concrete, Prestressed-pile-joint, Cyclic loading experiment

### 1. はじめに

近年、建設現場の担い手不足を背景にコンクリート構造物のプレキャスト化が求められている。とりわけ、港湾工事における栈橋上部工は、鋼管杭の打設後に潮位や波浪等の外的要因を受けながら、足場・型枠支保工・鉄筋組立・コンクリート打設の海上作業を繰り返して構築されるため、工期短縮、品質や安全性の向上など、プレキャスト化のメリットは陸上工事よりも大きい(写真-1参照)。一方、港湾基準<sup>1)</sup>では、栈橋上部工は鋼管杭と剛結されたラーメン構造として設計されるため、プレキャスト化においては杭頭接合部の構造が極めて重要である。池野ら<sup>2)</sup>は、RC栈橋上部工のプレキャスト化を対象に鞘管方式による杭頭接合方法を考案し、剛結条件を満足するプレキャスト施工を実現している。しかし、プレキャスト化されたRC栈橋上部工は、100tを超える重量部材であるため現地ヤードでの製作が前提であり、大型起重機船を調達できない場合や、現地ヤードが確保できない場合には適用が難しいと考えられる。現地ヤードを必要としない工法として、前ら<sup>3)</sup>は陸上運搬を可能にした軽量部材を現地で組み立て、ポストテンション方式のプレストレスによって上部工をPC圧着する方法を提案している。この工法は、水深-5.5m程度の栈橋で実績があるものの、塑性域での杭頭接合性能については検討されていない。

そこで、本研究では前らが提案している構造をさらに大水深の栈橋に展開するため、より高い杭頭接合性能が期待できる鞘管方式を導入したPC圧着構造を提案し、正負交番載荷実験を通して、杭頭接合部の損傷程度や固定条件について考察した。

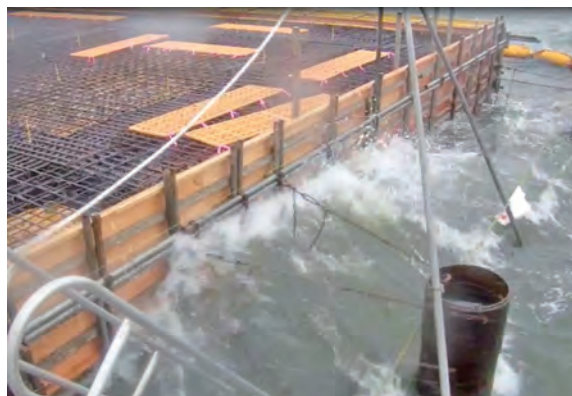


写真-1 現場打ち RC 栈橋上部工施工状況(例)

## 2. PC圧着した杭頭接合構造の概要

図-1に前ら<sup>3)</sup>が提案したPC圧着構造の概要を示す。この構造は杭頭部材と梁部材のプレキャスト部材から構成されており、打設後の鋼管杭に杭頭部材を架設する。鋼管杭と杭頭部材の間には、鋼管杭の平面的な打設誤差(±100mm)を吸収するために片側150mm程度のクリアランスを設け、ひび割れ防止鉄筋を配置し、現場打ちコンクリートを打設することで一体化を図る。その後、杭頭部材の梁受け部に梁部材を架設し、プレキャスト部材間の隙間に無収縮モルタルを充填した後、ポストテンション方式でプレストレスを与え、杭頭部をPC圧着接合する。

次に、本研究で提案する構造を図-2に示す。本構造は杭頭部材に鋼管杭よりも径の大きい鞘管を埋設し、鋼管杭と鞘管の間は無収縮モルタルを充填して一体化を図る。鞘管は鋼管杭の打設誤差を考慮して鋼管杭径+200mm程度の内径とし、池野ら<sup>2)</sup>と同様に接合部の曲げ耐力を鋼管杭の全塑性モーメントよりも大きく設定する。

また、杭頭部材の梁受け部はコーベル形状とし、梁受け部に梁部材を被せる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。ここで、コーベルは波浪や潮流等の作用で鋼管杭が動揺した際に、梁部材が落下することを防止する。梁部材架設後は、プレキャスト部材間の隙間に無収縮モルタルを充填した後、ポストテンション方式でプレストレスを与え部材の一体化を図る。

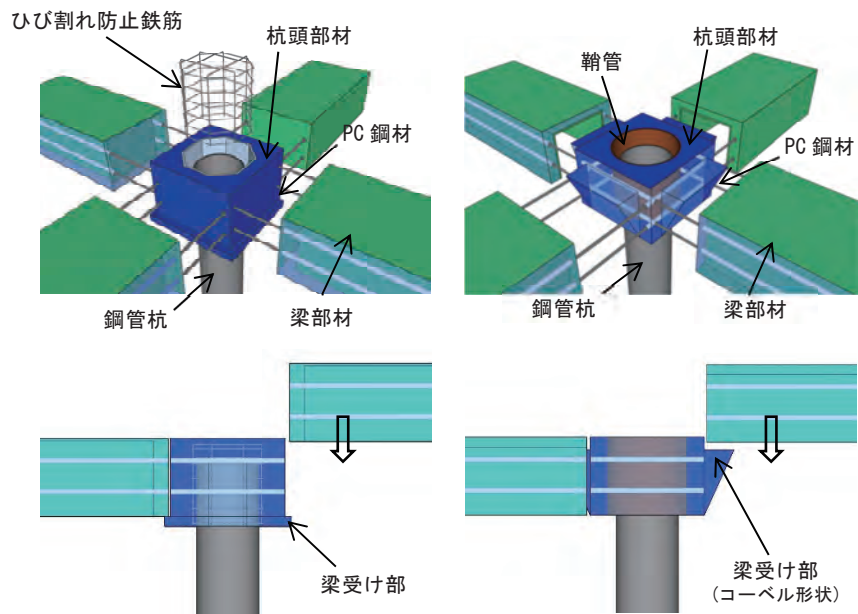


図-1 前らの構造概要

図-2 本構造概要

## 3. 実験概要

### 3.1 実験ケースと試験体概要

鞘管方式を採用したPC圧着構造について、概ね縮尺比1/4でモデル化した逆T形試験体による正負交番載荷実験を行った。図-3に試験体側面図を示す。従来のRC栈橋上部工と比較するため、現場打ちRC構造をCase1、PC圧着構造として前らの構造をCase2、本研究で提案する構造をCase3とした。鋼管杭の挿入長は、いずれも1.0D(D:杭径=320mm)である。PC圧着の2ケースは、緊張材にPC鋼より線(SWPR7BL)を用い、試験体の設計曲げ終局耐力がCase1と同等になるようにプレストレスを与えた。なお、実構造物では杭頭部に面内・面外の2方向からプレストレスを導入するが、実験観察の都合上、面内方向のみプレストレスを与えている。実験に使用した鋼材の機械的性質を表-1に、コンクリートおよびモルタルの材料物性値を表-2に示す。

### 3.2 載荷方法および測定項目

載荷方法は、鋼管杭の外縁に貼り付けた任意のひずみゲージが降伏ひずみに達した時の降伏変位 $\delta_y$ を基準に $\pm 0.5\delta_y$ 、 $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ … $\pm 5\delta_y$ を各3サイクルずつ繰り返し与えた。ここで、 $\pm 0.5\delta_y$ は試験体が弾性挙動を示すと考えられ、鋼管杭の降伏ひずみ $\epsilon_y$ で定義している。なお、 $\pm 5\delta_y$ の載荷終了後も荷重低下が見られない場合は、安全に載荷できる最大変位(+9 $\delta_y$ )まで単調載荷を実施した。

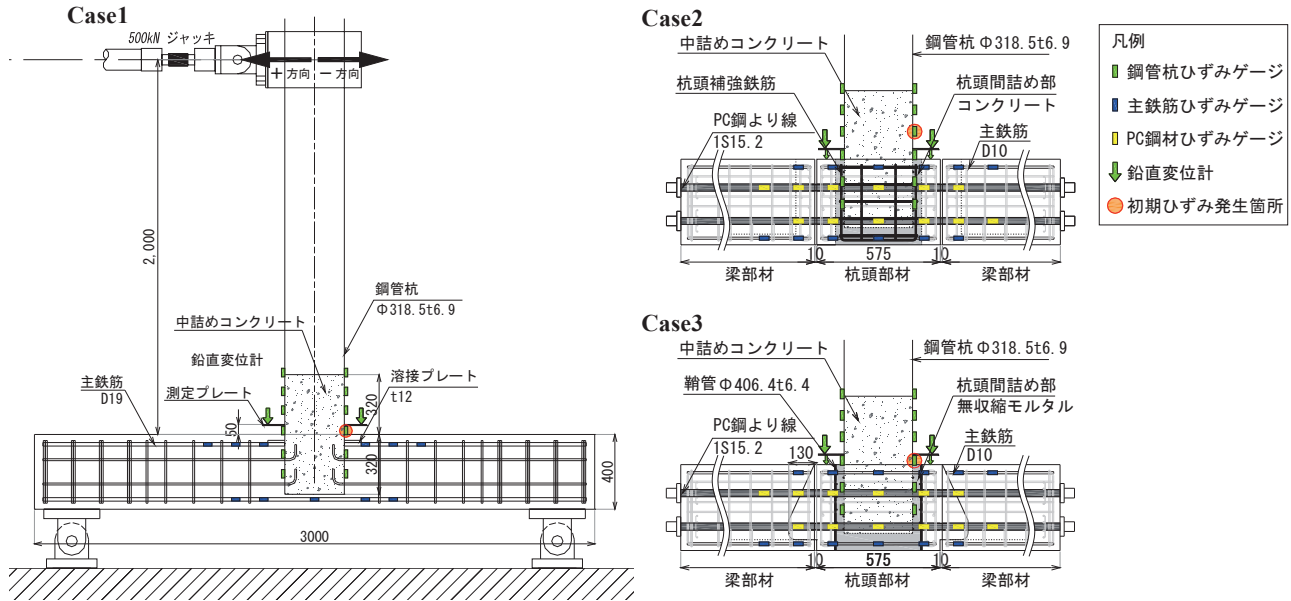


図-3 試験体側面図(単位:mm)

表-1 鋼材の機械的性質

鋼材の種類	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	$210 \times 10^3$	$\phi 406.4 \times 6.4$
杭頭補強鉄筋	452.9	591.8	$190 \times 10^3$	D6
主鉄筋	387.2	555.5	$184 \times 10^3$	D19(Case1)
主鉄筋	387.2	594.0	$184 \times 10^3$	D10(Case2,3)
PC鋼より線	1816.9	2011.5	$194 \times 10^3$	IS15.2

表-2 コンクリートおよびモルタルの材料物性値

実験ケースと部位	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> )
Case1 梁部	39.3	2.9	$32.9 \times 10^3$
プレキャスト部材	58.2	3.6	$34.9 \times 10^3$
Case2 杭頭間詰め部	39.3	2.9	$30.9 \times 10^3$
PCシース内(グラウト)	102.9	2.0	$18.7 \times 10^3$
プレキャスト部材	59.5	3.4	$35.9 \times 10^3$
Case3 杭頭間詰め部(モルタル)	71.2	4.5	$27.6 \times 10^3$
PCシース内(グラウト)	99.7	3.5	$20.3 \times 10^3$

測定項目は、荷重位置での水平荷重と水平変位、ひび割れ性状および各鋼材の軸ひずみである。また、杭頭部における鋼管杭の回転角を把握するため、試験体上面から50mmの高さに測定プレートを取り付け、鉛直変位を測定した(図-3参照)。

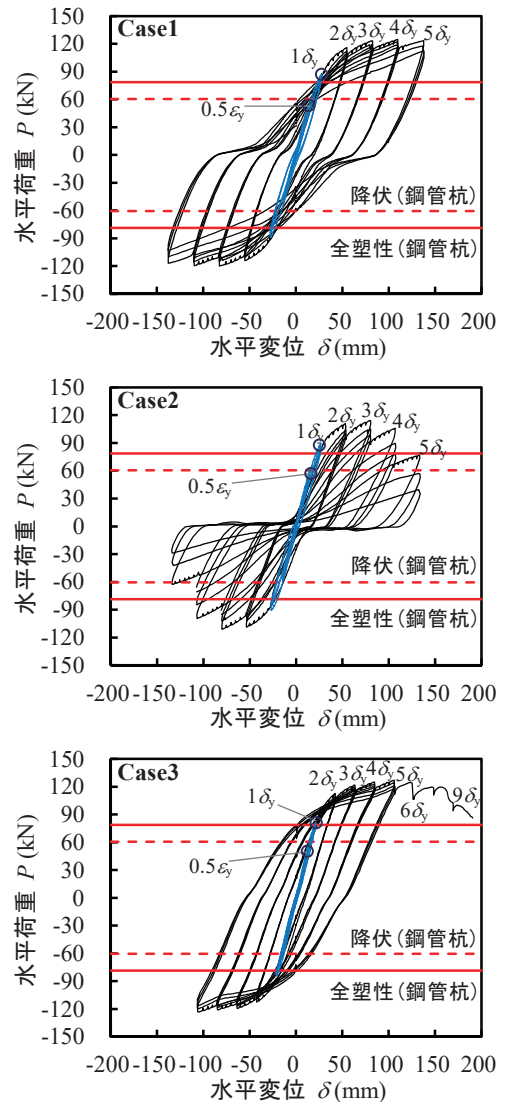


図-4 荷重-変位関係

4. 実験結果および考察

4.1 荷重-変位関係

各ケースの載荷点における荷重 $P$ -変位 $\delta$ 関係を図-4に示す。なお、図中には鋼管杭(STK400)の設計引張降伏応力度を $f_{yd}=235\text{N/mm}^2$ とした時の、鋼管杭基部における設計降伏荷重および全塑性荷重を示している。

図-4より、現場打ちRC構造のCase1はややくびれた紡錘形を示し、 $3\delta_y$ の変位ステップで鋼管杭基部の座屈が発生した後、 $4\delta_y$ で最大荷重を迎えた。Case2は $2\delta_y$ で杭頭間詰め部のコンクリートが圧壊し、変位ステップの進行に伴い原点付近でスリップ挙動を示した後、 $3\delta_y$ で最大荷重を迎えた。Case3は紡錘形の履歴ループを示し、 $2\delta_y$ で梁部材内側にコーベルの支圧が要因と推測されるひび割れが発生し、変位ステップの進行に伴い徐々に進展した(図-5参照)。また、 $3\delta_y$ で鋼管杭基部の座屈が発生し、 $5\delta_y$ で最大荷重を迎えた後、 $6\delta_y$ で鞘管の支圧による試験体下面の圧壊(写真-2参照)が確認された。

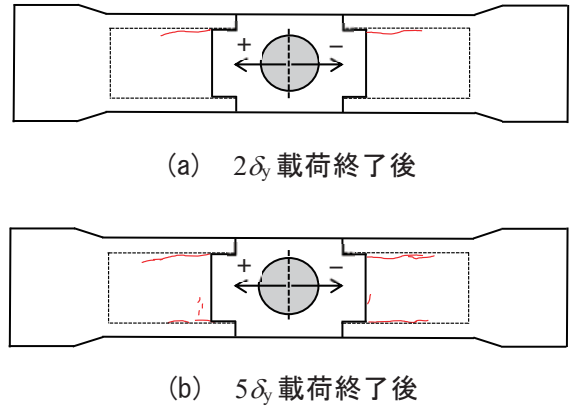


図-5 Case3 梁部材内側のひび割れスケッチ

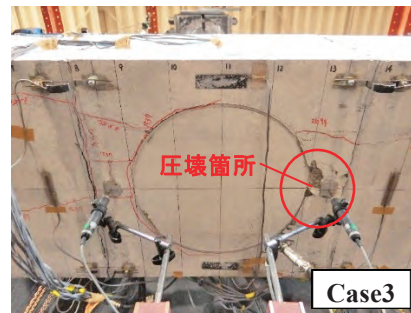


写真-2 試験体下面の圧壊状況

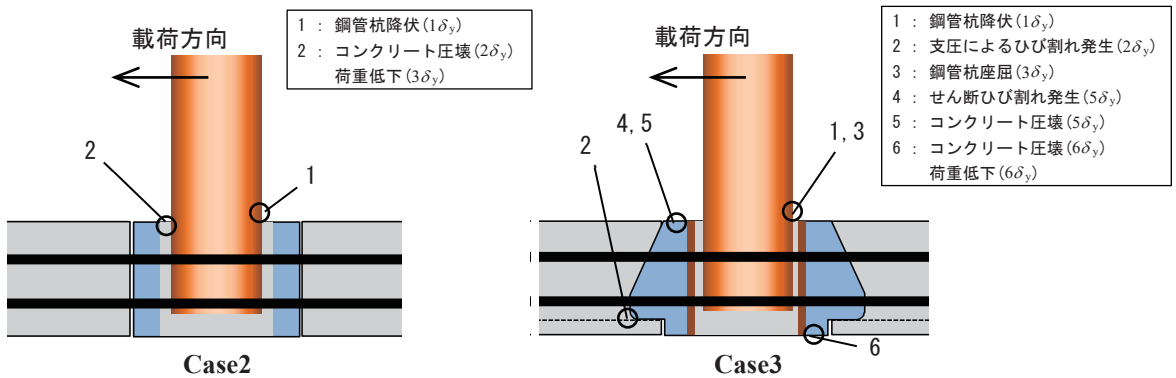


図-6 損傷イベントの整理

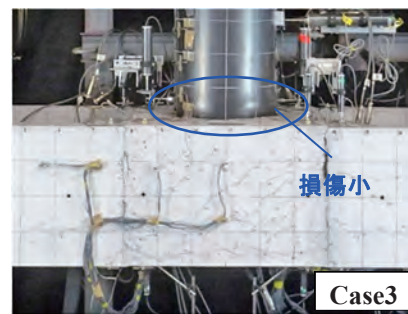
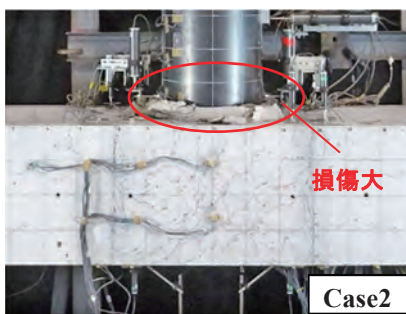


写真-3 5δy 載荷終了後



ここで、PC圧着構造であるCase2とCase3の履歴ループの違いについて考察するため、図-6に損傷イベントの発生箇所と順序を整理したものを示し、写真-3に5 $\delta_y$  載荷終了後の杭頭部材状況写真を示す。図-6を見ると、Case2は杭頭部材の損傷が進展する前に終局状態に至っているのに対し、Case3は載荷終了時(9 $\delta_y$ )においても鞘管内のモルタルに損傷は確認されておらず、鋼管杭に対する固定条件は良好に保たれていたと推測される。これは、写真-3の損傷の違いからも確認でき、履歴ループが杭頭接合部の固定条件の影響を受けているものと考えられる。

また、表-3に鋼管杭の設計降伏荷重 $P_{yd}$ 、実験時の降伏荷重 $P_y$ 、降伏変位 $\delta_y$ 、降伏後除荷時の残留変位 $\delta_r$ および降伏荷重 $P_y$ を降伏変位 $\delta_y$ で除した水平剛性 $P_y / \delta_y$ を整理して示す。Case2は、Case3よりも残留変位 $\delta_r$ が大きく、プレストレスによる原点指向の程度が低下していることが分かる。なお、いずれのケースも水平剛性は概ね同程度であり、降伏荷重は設計値を上回っていた。

表-3 実験結果

試験体	設計降伏荷重 $P_{yd}$ (kN)	降伏荷重 $P_y$ (kN)	降伏変位 $\delta_y$ (mm)	残留変位 $\delta_r$ (mm)	水平剛性 $P_y / \delta_y$ (kN/mm)
Case1		87.6	27.5	3.9	3.2
Case2	60.5	90.1	26.7	3.6	3.4
Case3		81.3	21.2	1.9	3.8

#### 4.2 降伏耐力比と鋼管杭のひずみ分布

水平荷重を降伏荷重 $P_y$ で除した値を降伏耐力比として図-7に示す。Case2は、8サイクル目(3 $\delta_y$ )以降で降伏耐力比が低下し、同変位ステップの中でもサイクル毎に著しく低下している。一方、Case3は13サイクル目(5 $\delta_y$ )にピークを迎えるが、降伏耐力比は概ね横ばいで推移している。

PC圧着構造について鋼管杭基部の軸ひずみ分布を図-8に示す。なお、5 $\delta_y$  載荷時にひずみゲージが剥離した可能性があるため4 $\delta_y$ までの挙動を図示する。図-8を見ると、Case3は変位ステップの進行にともない鋼管杭のひずみが増大しているのに対して、Case2は値も小さく3 $\delta_y$ 以降で減少傾向を示している。これは、Case2において降伏耐力比低下の要因が、鋼管杭以外の部位の損傷であることを示唆している。

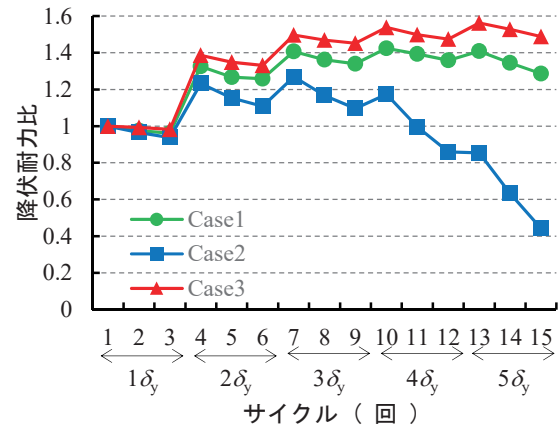


図-7 降伏耐力比

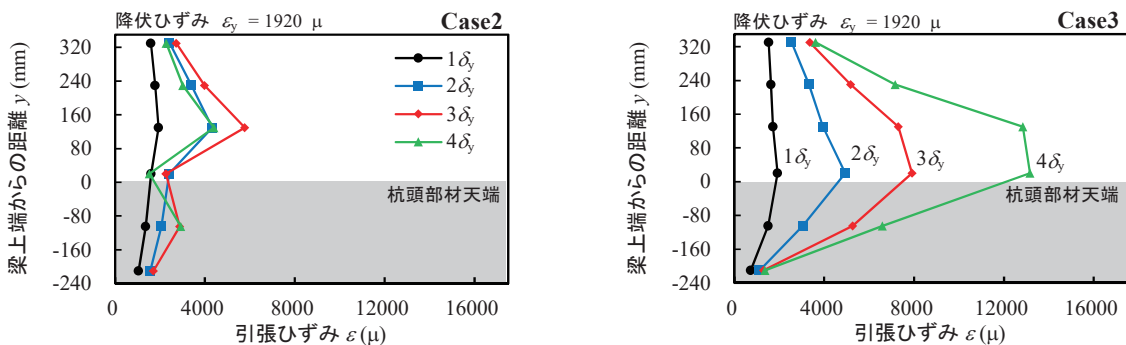


図-8 鋼管杭ひずみ分布

### 4.3 杭頭固定度

次に、杭頭接合部の固定条件を考察するため、池野ら<sup>2)</sup>に倣い式(1)から杭頭固定度 $\alpha$ を算定した。杭頭固定度 $\alpha$ とは杭頭部の回転拘束の程度を表しており、 $\alpha=1$ の剛結状態から $\alpha=0$ のヒンジ状態までを示すパラメーターである。杭頭固定度 $\alpha$ の推移を図-9に示す。なお、Case1およびCase3は $3\delta_y$ で杭頭接合部の鋼管杭が座屈したため、それ以降は参考値として破線で示した。

図-9よりCase1およびCase3は、鋼管杭が座屈するまで0.9程度の高い杭頭固定度を保持しており、Case3は現場打ちRC構造と同等の杭頭固定度を有していることを確認した。一方、Case2は他ケースよりも杭頭固定度が低く、杭頭間詰め部のコンクリートが圧壊した $2\delta_y$ 以降で低下し、最大荷重後の $3\delta_y$ から $5\delta_y$ にかけてさらに大きく低下している。

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

ここで、

- $\alpha$  : 杭頭固定度( $0 \leq \alpha \leq 1.0$ )
- $P$  : 水平荷重
- $h$  : アーム長(試験体上面から載荷点までの距離)
- $\theta'$  : 実験における杭頭回転角
- $EI$  : 杭体の曲げ剛性

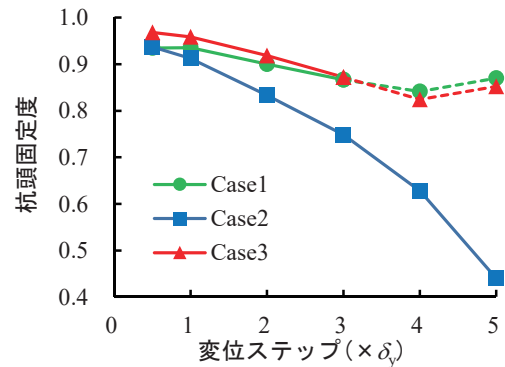


図-9 杭頭固定度

### 5. おわりに

本研究では、PC圧着した2種類(Case2, Case3)の杭頭接合部の損傷程度や固定条件を比較するため交番載荷実験を実施した。その結果、いずれも降伏荷重に至るまでは従来の現場打ちRC構造(Case1)と同等の曲げ耐荷性能を有しており、鋼管杭の設計降伏荷重を満足することが確認された。本研究で提案した鞘管方式によるCase3は、Case2と比較して塑性域まで優れた杭頭固定度を発揮していたが、コーベルの支圧が要因と推察されるせん断ひび割れが梁部材に確認されており、その影響については更なる検討が必要である。また、本実験では実験観察の都合上、杭頭部には面内方向のプレストレスのみを作用させているが、実際には面外方向のプレストレスによる拘束力も作用するため、実現よりも損傷が生じやすい条件であったと推測される。さらに、Case2で確認された杭頭間詰め部の損傷は、高強度コンクリートや繊維補強コンクリートに代替することや、補強鉄筋を配置することで改善が期待される。今後は、非線形有限要素解析を通して、2方向からのプレストレスによる拘束効果や、最適な杭頭間詰め部の充填材料について検討する予定である。

### 参考文献

- 1) 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.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に関する交番載荷実験，構造工学論文集，Vol.64A，pp.724-733，2018
- 3) 前嘉昭，青木治子，松本正之：プレキャスト部材を用いた組立式PC栈橋—開発および実施例について—，プレストレストコンクリート，Vol.60，No.3，pp.724-733，2018