

# 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性能評価

池野 勝哉<sup>1</sup>・岩波 光保<sup>2</sup>・川端 雄一郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 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)  
 E-mail: iwanami@cv.titech.ac.jp

<sup>3</sup> 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)

栈橋上部工のプレキャスト化には、鋼管杭との接合部において現行基準を踏襲した剛結条件を満足しつつ、架設時の施工性を損なわない接合方法が望ましい。その一つの方法として、プレキャスト化する上部工に鋼管杭よりも径の大きな鞘管を埋設し、架設時に鞘管内へ鋼管杭を所定の長さ挿入するとともに、その間隙をグラウト等で充填する「鞘管方式」が提案されている。著者らは過去に、実物の1/6縮尺を模した逆T形模型による交番載荷実験を実施し、「鞘管方式」が「従来方式」と同等以上の接合耐力およびエネルギー吸収性能を有していることを示している。本研究では、主として「鞘管方式」の交番載荷実験について三次元の非線形有限要素解析を行い、シアキーの有無や鞘管内への鋼管杭挿入長の影響、および接合部の耐荷機構に関する考察を行ったので報告する。

**Key Words :** *finite element analysis, pile connection, sleeve tube type, performance evaluation*

## 1. はじめに

近年、建設工事における担い手不足を背景に、省力化・省人化の取組みが求められている。とりわけ、海上に構築される栈橋工事では、気象海象の影響を受けやすく、海上での作業を最小限に抑えるプレキャスト施工が有効な手段である。栈橋上部工のプレキャスト化には、鋼管杭との接合部において現行基準<sup>1)</sup>を踏襲した剛結条件を満足しつつ、架設時の施工性を損なわない接合方法が望ましい。その一つの方法として、プレキャスト化する上部工に鋼管杭よりも径の大きな鞘管を埋設し、架設時に鞘管内へ鋼管杭を所定の長さ挿入するとともに、その間隙をグラウト等で充填し一体化する「鞘管方式」が提案されている(図-1)。図-2には比較として、現場打ちによる「従来方式」とプレキャストによる「鞘管方式」の模式図を示す。前者は鋼管杭と下側の主筋が接続されているのに対して、後者は上下の主筋が接続された鞘管内に鋼管杭が挿入されている。著者らは過去に、「鞘管方式」の構造性能について、実物の1/6縮尺を模した逆T形模型による交番載荷実験を実施し、「従来方式」と同等以上の接合耐力およびエネルギー吸収性能を有していることを実験的に明らかにしている<sup>2)</sup>。

本研究では、主として「鞘管方式」の交番載荷実験に

ついて三次元の非線形有限要素解析を行い、シアキーの有無や鞘管内への鋼管杭挿入長の影響、および接合部の耐荷機構に関する考察を行ったので報告する。

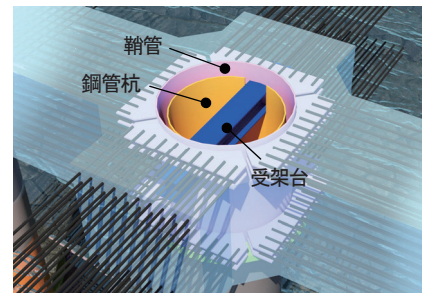


図-1 鞘管方式の杭頭接合

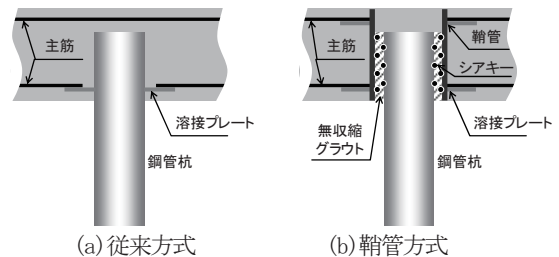


図-2 栈橋上部工の杭頭接合に関する比較

## 2. 交番载荷実験の概要<sup>2)</sup>

### (1) 実験概要

解析対象とした実験概要を以下に述べる。実栈橋の鋼管杭 ( $D=1.4\text{m}$ ) を含む RC 梁 ( $B=1.4\text{m}$ ,  $H=1.8\text{m}$ ) の 1 スパン ( $a=5.0\text{m}$ ) を概ね縮尺比 1/6 としてモデル化し、天地を反転した逆 T 形試験体の正負水平交番载荷実験を実施した。実験ケースのうち、本稿では「従来方式」と「鞘管方式」の 2 ケースについて示す。各ケースの諸元を表-1、側面図を図-3 に示す。

#### a) 実験ケース

試験体は鋼管杭 (外径  $D=216.3\text{mm}$ , 肉厚  $t=4.5\text{mm}$ , STK400) と、RC 梁 (断面幅  $230\text{mm}$ , 高さ  $300\text{mm}$ , 長さ  $2000\text{mm}$ , 引張鉄筋比  $0.7\%$ ) が接合された逆 T 形構造である。ここでは、RC 梁に純粋な曲げモーメントが作用するように、実栈橋よりもせん断スパン比を大きく設定している。Case1 は、鋼管杭の溶接プレート (SM400, 板厚  $t=6.0\text{mm}$ ) に模型上主筋を溶接し、コンクリートを打設した。Case2 は鞘管 (外径  $D=267.4\text{mm}$ , 肉厚  $t=6.0\text{mm}$ , 長さ  $300\text{mm}$ , STK400) の溶接プレートに模型上主筋および下主筋を溶接してコンクリートを打設し、後から鞘管内にシアキーを有する鋼管杭を  $1.0D$  ( $L=220\text{mm}$ ) 挿入して、無収縮グラウトの充填により一体化を行った。

#### b) 载荷方法

载荷ジャッキ ( $1000\text{kN}$ ) は模型梁上面から高さ  $H=1662\text{mm}$  に設置し、基準降伏変位  $\delta_y$  の整数倍として  $\pm 1\delta_y$ ,  $\pm 2\delta_y$ ,  $\dots$ ,  $\pm 5\delta_y$  をそれぞれ 3 サイクル繰り返し载荷した。ここで、基準降伏変位  $\delta_y$  は、鋼管杭基部の

外縁に貼り付けた任意のひずみゲージが降伏ひずみ ( $\epsilon_y=2,006\mu$ ) に達した時の変位として定義した。「鞘管方式」の実験状況を写真-1 に示す。

### (2) 主な実験結果

代表的な結果として、载荷点における荷重  $P$ -変位  $\delta$  関係を図-4 に示す。なお、図中には、STK400 材の設計引張降伏応力度を  $f_{yd}=235\text{N/mm}^2$  とした時の設計降伏荷重および全塑性荷重を示している。図中より、従来方式の Case1 は明確な逆 S 字形状を示すのに対し、鞘管方式の Case2 は紡錘形の履歴ループを示しており、エネルギー吸収性能の違いが確認できる。両ケースともに設計荷重を満足し、 $3\delta_y \sim 4\delta_y$  の変位ステップで最大荷重を迎えたあと、 $5\delta_y$  にかけて徐々に剛性が低下した。このように、「鞘管方式」による杭頭接合は、「従来方式」と比較しても同等以上の接合耐力を有しており、優れたエネルギー吸収性能を示している。

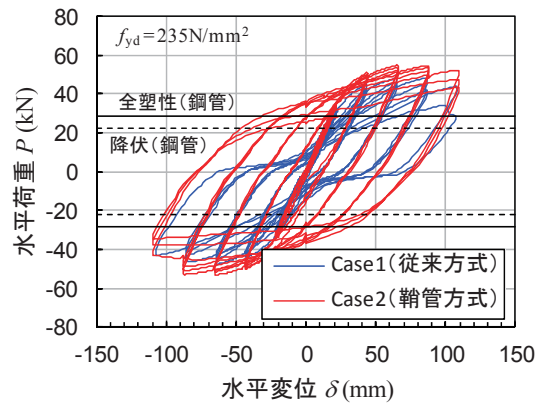


図-4 荷重-変位関係 (実験結果)

表-1 実験ケースの諸元

試験体名	鋼管杭						鞘管		シアキー	上部工 終局M $M_u$ (kNm)	せん断 スパン比 $l/D$	杭頭接合	摘要
	外径 $D$ (mm)	厚さ $t$ (mm)	突出長 $l$ (mm)	挿入長 $L$ (mm)	挿入比 $L/D$	全塑性M $M_p$ (kNm)	外径 $D^*$ (mm)	厚さ $t^*$ (mm)					
Case1	216.3	4.5	1662	-	1.0	80.1	-	-	-	42.6	7.7	従来方式	現場打ち
Case2	216.3	4.5	1662	220	1.0	80.1	267.4	6.0	D6@60	42.7	7.7	鞘管方式	プレキャスト

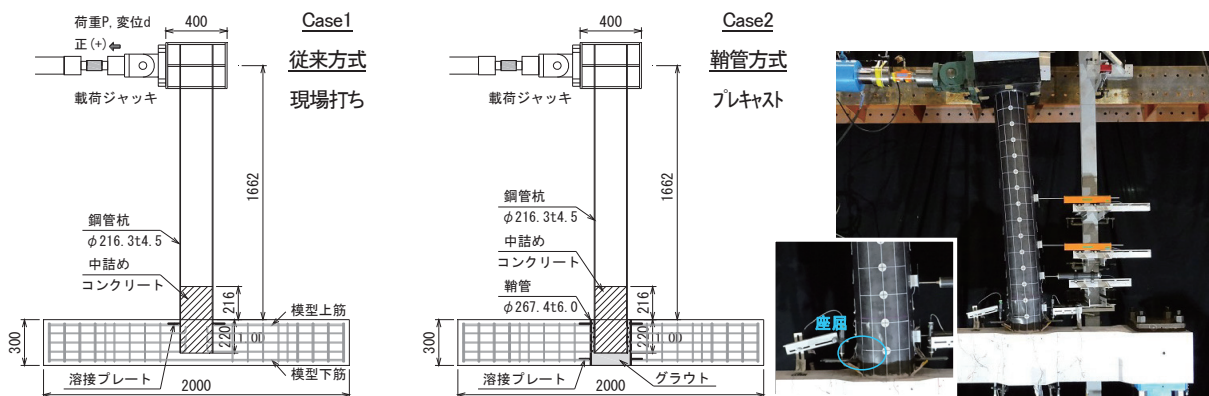


図-3 試験体の側面図 (左: Case1, 右: Case2)

写真-1 実験状況 (鞘管方式)

### 3. 非線形 FEM 解析による耐荷機構の検討

#### (1) 解析概要

実験で用いた鞘管方式の逆 T 形模型を対象に、幾何学的および材料非線形性を考慮した三次元の有限要素解析を実施した。解析には汎用 FEM 解析プログラム DIANA (Ver10.1)<sup>3)</sup>を用いた。本解析では、接合部の基本的な構造性能を検討するため単調荷重による解析を行い、シアキーの有無、鞘管内への鋼管杭挿入長の影響、および杭頭接合部の耐荷機構について考察する。

#### a) 解析モデル

解析モデルの全体を図-5、杭頭接合部の詳細を図-6に示す。解析は荷重直交方向に1/2対称モデルとし、RC梁、中詰コンクリートおよび充填グラウトをソリッド要素、溶接プレート、鋼管および鞘管をシェル要素とした。

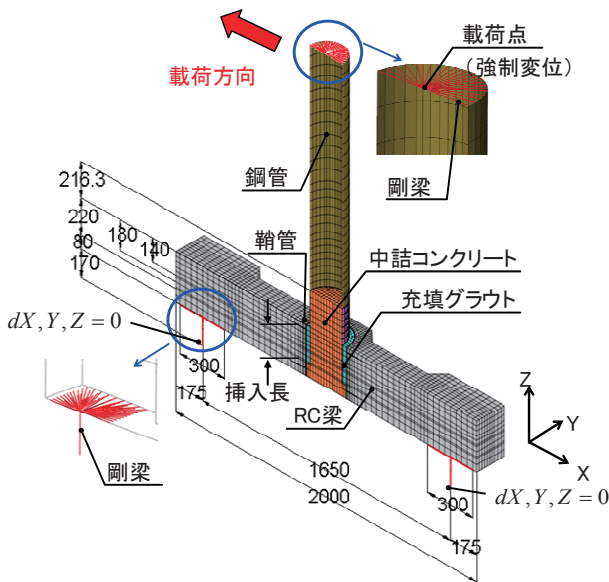


図-5 鞘管方式の解析モデル (1/2 対称)

表-2 材料物性値の一覧

	弾性係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	$3.25 \times 10^4$	0.2	37.1	2.6
充填グラウト	$2.80 \times 10^4$	0.2	80.4	4.3

鋼材	弾性係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$	降伏強度 $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	板厚 $t$ (mm)
鋼管 (STK400)	$2.06 \times 10^5$	0.3	396.7	4.5
鞘管 (STK400)	$1.89 \times 10^5$	0.3	379.2	6.0
溶接PL (SS400)	$1.89 \times 10^5$	0.3	379.2	6.0

鉄筋 (SD345)	弾性係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	断面積 $A$ (mm <sup>2</sup> )
主鉄筋-D10	$1.83 \times 10^5$	393.8	71.3
せん断筋-D6	$1.80 \times 10^5$	402.6	31.7

RC 梁内の鉄筋は島ら<sup>4)</sup>の付着-すべりを考慮した埋込鉄筋要素とし、溶接プレートと剛結した (図-7)。また、RC 梁-鞘管、中詰コンクリート-鋼管、充填グラウト-鋼管/鞘管の間にはせん断方向に抵抗しないインターフェース要素を配置し、鋼管外側と鞘管内側に設けたずれ止めシヤキーには、別途、インターフェース要素を分散的に配置した。

#### b) 荷重条件および拘束条件

荷重位置となる逆 T 形模型の鋼管天端には、鋼管天端に剛梁要素を放射状に設け、その中心節点に強制変位を与えた。また、実験では RC 梁の両端支承がピン条件で実施しているため、RC 梁の両端支承部に剛梁要素を設け、剛梁下端にピン条件を与えた (図-5 参照)。

#### c) 材料特性および構成則

コンクリートのひび割れには分散ひび割れモデル<sup>5)</sup>を用い、圧縮特性には圧縮破壊エネルギー $G_c$ を考慮した Parabolic モデル<sup>6)</sup>、引張特性には引張破壊エネルギー $G_t$ を考慮した Hordijk モデル<sup>7)</sup>を用いた。ここで、圧縮破壊エネルギー $G_c$ は中村ら<sup>8)</sup>より算出し、引張破壊エネルギー $G_t$ はコンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に従い算出した。鋼材は降伏条件に Von Mises 基準を用い、2次勾配を  $E/100$  としたバイリニアモデルとした。シアキーのインターフェース要素には、付着強度 $\tau_t$ を最大値とするバイリニア型の付着-すべりモデルを適用した。表-2に材料物性値の一覧を示す。なお、溶接プレートは、材料引張試験を実施していないため、ここでは鞘管と同じ物性値としている。

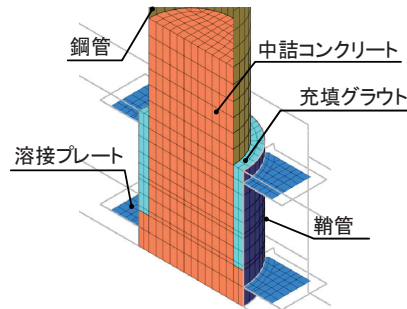


図-6 杭頭接合部の解析モデル

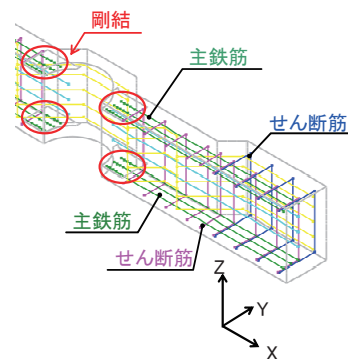


図-7 RC 梁モデル



d) 検討ケース

鞘管方式の検討ケースを表-3に示す。シアキーの有無による付着強度は複合構造標準示方書<sup>10)</sup>に準じて算出し、鞘管内への鋼管杭挿入長を1.0D, 0.6Dと変化させた。ここで、Dは鋼管径であり、シアキー有りの挿入長1.0Dが実験の鞘管方式に相当している。

表-3 検討ケース (鞘管方式)

シアキー	挿入長	構成式	物性値 <sup>※1)</sup>
有り	1.0D <sup>※2)</sup> 0.6D	付着-すべり	$\tau_r=18.4\text{N/mm}^2$
無し	1.0D 0.6D	クーロン摩擦	$\phi=20^\circ$ $c=0.7\text{N/mm}^2$

※1)複合標準示方書(2014)に準じて算出  
 ※2)実験ケースに相当, Dは鋼管径

(2) 実験挙動との比較

実験ケースに相当する解析結果の荷重 P-変位 $\delta$  関係について、交番载荷実験で得られた包絡線と比較して図-8に示す。図中には従来方式についても併記している。従来方式では、変位後半にRC梁杭頭部の損傷が進行し、荷重低下する様子まで再現できているが、主筋の降伏が実験よりもやや遅れている。鞘管方式では、RC梁杭頭部の損傷が軽微であり、鋼管基部の座屈により荷重低下する様子が実験で観察されている(写真-1)。解析では鋼管降伏イベントや主筋が降伏しない点で良い整合が見られたが、変位90mm以降の座屈による荷重低下を再現するには至っていない。次に、鞘管方式の杭頭部における代表的な鋼管、鞘管および主筋の軸方向ひずみ挙動を図-9に示す。ここで、鋼管および鞘管はMises応力である。ひずみ挙動は実験の履歴曲線に包絡しており、比較的良い整合が見られた。なお、図示しないが従来方式の解析結果も同様に実験の履歴曲線に包絡していた。

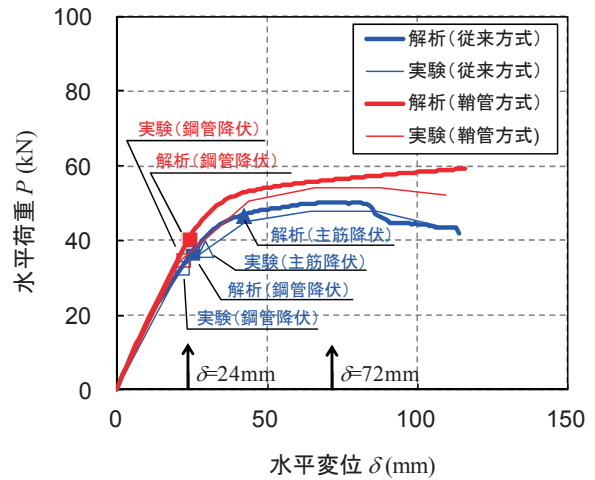


図-8 荷重 P - 変位 $\delta$ 関係の比較

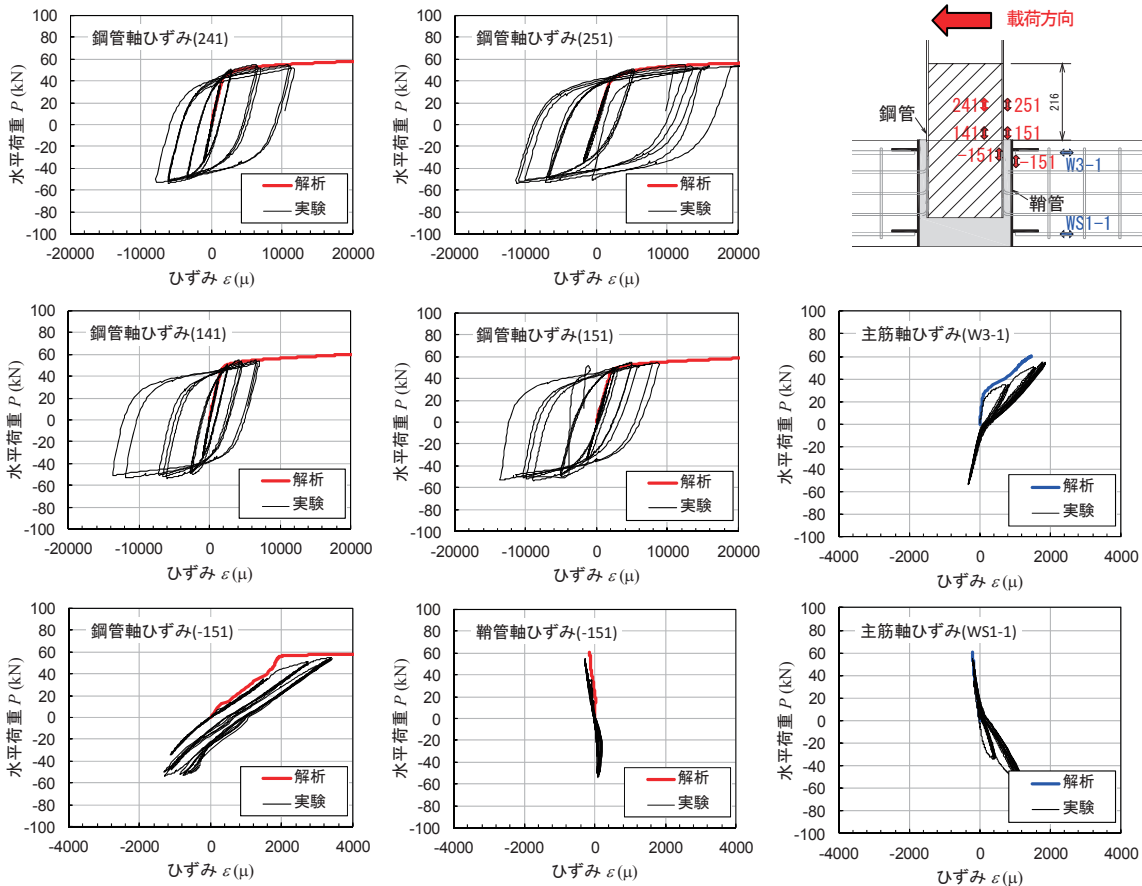


図-9 荷重 P - ひずみ $\epsilon$ 関係の比較 (シアキー有り, 挿入長1.0D)

(3) 検討ケースの比較

シアキーの有無および挿入長を変化させた検討結果を図-10に示す。図中より、挿入長1.0Dの場合には、シアキー無で若干、荷重が低下しているがシアキーの有無による違いは軽微であった。一方、挿入長0.6Dの場合では、シアキー無で変位後半に鋼管の引抜けによる荷重低下が確認された。一般に、栈橋上部工に鋼管杭が1.0D程度挿入されていることを考慮すると、鞘管方式においてシアキーの有無に関わらず、1.0D程度挿入することが望ましいと考えられる。なお、本検討結果は挿入長1.0Dの場合に、必ずしもシアキーが必要でないことを示唆しているが、軸力作用を考慮していないことに注意が必要である。

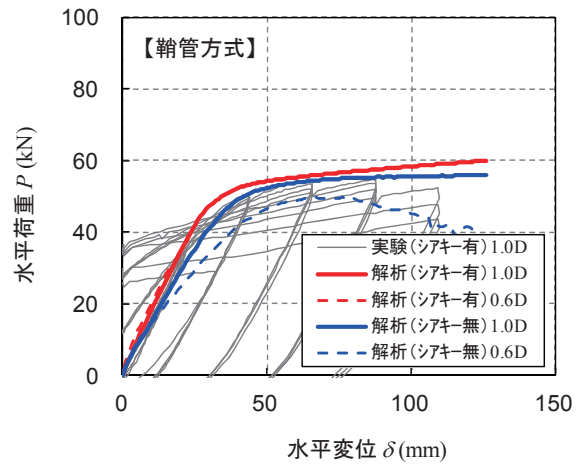


図-10 シアキー有無および挿入長の比較 (鞘管方式)

(4) 鞘管方式の耐荷機構

従来方式と鞘管方式における杭頭接合部の耐荷機構について考察するため、図-8で示した変位 ( $\delta=24\text{mm}$ ,  $72\text{mm}$ ) の応力・ひずみコンターを図-11に示す。ここで、鋼材のうち主鉄筋以外はMises応力であり、赤色コンターが各材料試験による降伏値以上を表している。また、中詰コンクリートは最大主ひずみを示している。図中より、概ね弾性ステップと考えられる $\delta=24\text{mm}$ では、両ケ

ースのコンターに定性的な違いは見受けられない。一方、塑性ステップである $\delta=72\text{mm}$ では、鞘管方式の鋼管杭がRC梁外の部位に降伏値以上の応力が集中しているのに対して、従来方式ではRC梁内に挿入した部位にも広い範囲で応力集中が確認できる。これは、変位の進行にともない、両者において杭頭の固定度に違いが生じているためと考えられる。主鉄筋に着目すると、従来方式では溶接プレートと模型の上側主鉄筋が降伏しているが、下

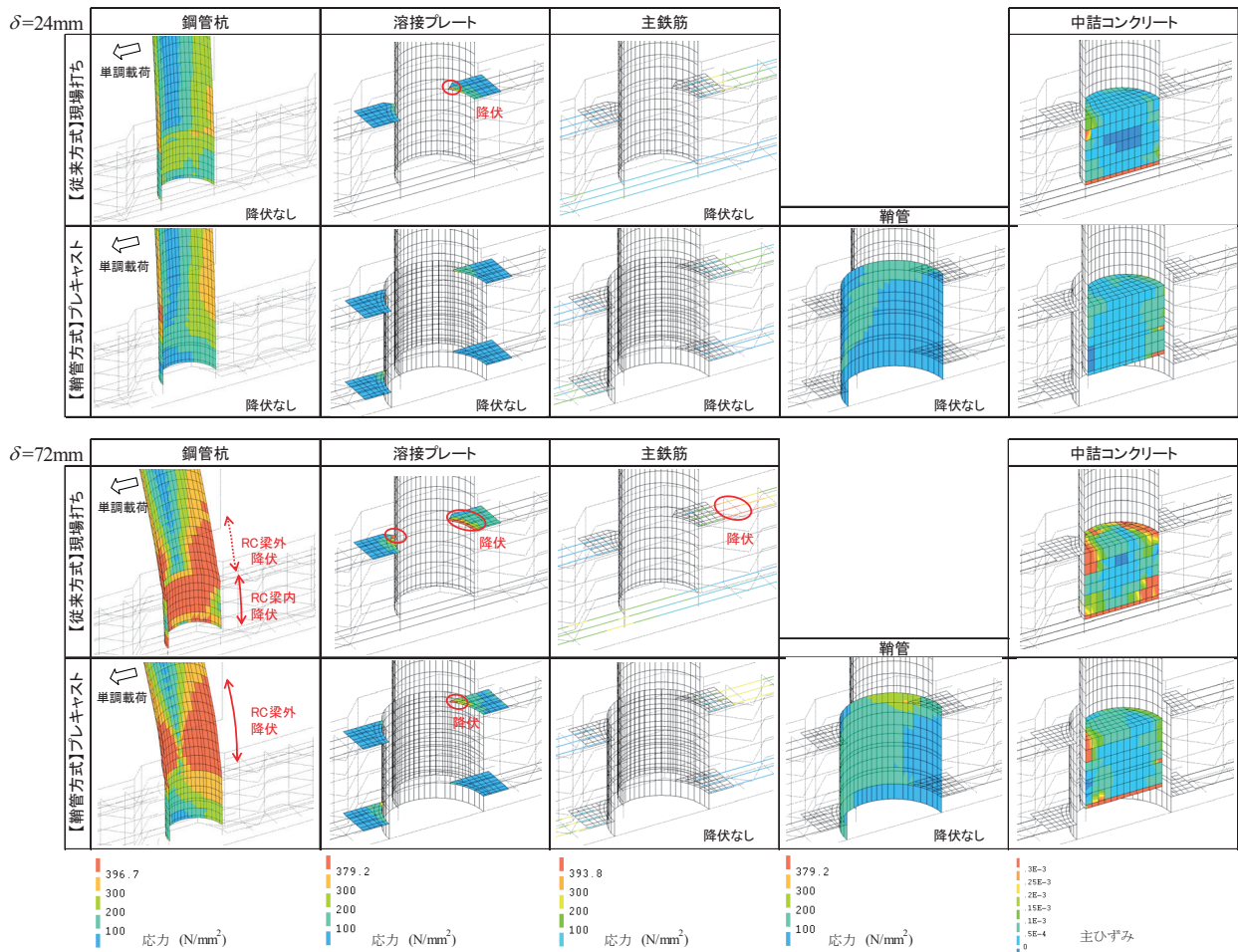


図-11 応力・ひずみコンター

側主鉄筋は降伏しておらず上下の主鉄筋で挙動が異なっている。一方、鞘管方式では上下の主鉄筋ともに弾性域であり、コンターから確認すると同程度の応力が生じている。このことから、従来方式では模型上側の主鉄筋に局所的な応力集中が生じ、主鉄筋の塑性化およびRC梁杭頭部の損傷に伴う杭頭固定度の低下が懸念される。その一方で、鞘管方式では溶接プレートを通して上下の主鉄筋にバランス良く力が伝達されるため、RC梁杭頭部の損傷程度が小さく、杭頭固定度が低下しにくい構造を有していると考えられる。なお、上述した主鉄筋への力の伝達は、交番載荷実験<sup>2)</sup>でも同様の傾向が確認されている。

#### 4. まとめ

本研究では過去に実施された交番載荷実験を対象に、三次元の非線形有限要素解析を行った。実験挙動と比較することで解析モデルの妥当性を確認し、シアキーの有無や鞘管内への鋼管杭挿入長の影響、および接合部の耐荷機構について考察した。以下に得られた知見を示す。

- ① 単調載荷による解析結果は、交番載荷実験で得られた荷重-変位関係の包絡線と概ね対応しており、また局所的なひずみ挙動も同様の整合があった。
- ② 鞘管方式の荷重-変位関係は、鞘管内への鋼管杭挿入長やシアキーの有無による影響を受けていた。一般の栈橋上部工で適用されている1.0D程度の挿入長の場合には、シアキー有無による影響は軽微であるが、挿入長が0.6Dの場合にはシアキー無で顕著に荷重低下する傾向が確認された。
- ③ 従来方式は、RC梁内の鋼管杭で降伏応力を超える部位が多く発生しており、溶接プレートと主鉄筋が降伏していた。一方、鞘管方式の鋼管杭はRC梁外

に降伏値を超える応力が見られ、RC梁の主鉄筋は降伏していなかった。

- ④ 従来方式では主鉄筋や溶接プレートに局所的な応力集中が生じ、RC梁杭頭部の損傷により杭頭部の固定度が低下するのに対して、鞘管方式では上下の主鉄筋にバランス良く力が伝達されるためRC梁杭頭部の損傷が小さく、杭頭部の固定度が低下しにくい構造を有していた。

#### 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，2007.
- 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) DIANA-10.1 User's Manual，DIANA FEA BV.
- 4) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，No.378/V-6，pp.165-174，1987.
- 5) 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.
- 6) Feenstra, P. H. : Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and reinforced Concrete. *PhD-thesis*, Delft University of Technology, 1993.
- 7) Hordijk, D. A. : Local Approach to Fatigue of Concrete. *PhD-thesis*, Delft University of Technology, 1991.
- 8) Nakamura, H., 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.
- 9) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，丸善，pp.41-42，2018.
- 10) 土木学会：複合構造標準示方書 [設計編]，丸善，pp.478-480，2014.

(2018.2.8 受付)

## NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS-BASED EVALUATION FOR STRUCTURAL PERFORMANCE OF SLEEVE TUBE TYPE ON STEEL PIPE PILE CONNECTION WITH SUPERSTRUCTURE

Katsuya IKENO, Mitsuyasu IWANAMI and Yuichiro KAWABATA

To precast superstructure of port piers, the connection method for precast concrete with steel pipe piles is required at the rigidity condition which is based on port design criteria. As a new method, sleeve tube with larger diameter than steel pipe is buried into superstructure in advance, and steel pipe is inserted into it during erection with the gap filled with grouting, named "sleeve tube type" has been proposed. In this study, authors conducted a three-dimensional nonlinear finite element analysis on cyclic loading experiment of "sleeve tube type", examined the effect of shear key, the insert length of steel pipe pile into sleeve tube, and discussed the stress transmission mechanism of the connection.