

論文 プレキャスト上部工の鉄骨差込み接合における鋼管杭と差込み鋼材の相対的位置のずれが杭頭接合部の耐力に及ぼす影響

濱田 洋志*1・小林 雄一*1・田中 亮一*2・網野 貴彦*3

要旨：海上杭式構造物の鋼管杭の打込みは作業船を用いて海上から行われることが多く、打込みに高い精度を要求することが難しい。そのため、上部工のプレキャスト化にあたっては、鋼管杭とプレキャスト上部工の相対的な位置のずれに対し、柔軟な設計や施工を可能とする接合構造が必要であり、筆者らは、鉄骨差込み接合方式を採用した杭頭接合構造を開発している。本実験では、鋼管杭に内挿される差込み鋼材の相対的な位置のずれや差込み長の違いが杭頭接合部の耐力に及ぼす影響を曲げ載荷試験にて確認した。その結果、相対的位置にずれが生じた場合でも、杭頭接合部が破壊しない安全側の設計が可能であることを確認した。

キーワード：プレキャスト上部工、杭式構造物、鉄骨差込み接合、杭頭接合部、偏心、差込み長

1. はじめに

作業船を用いた鋼管杭の打込みでは、高い施工精度を要求することが難しく、一般に、設計に対して平面位置で±100mm、高さ位置で±50mm、傾斜2°で管理される。このため、栈橋やドルフィン等の杭式構造物の上部工築造においては、海上に打ち込んだ鋼管杭に大掛かりな支保工を設置して、鉄筋の組立、型枠の組立およびコンクリートの打込み等を海上にて実施するのが一般的であった。しかし、海上作業は、作業経験に長けた熟練工が必要で、かつ多大な労力を要するだけでなく、工事の進捗が気象・海象の変化や潮位変動等の時間的制約を受けるため、担い手不足が深刻化する近年では、上部工をプレキャスト化することで、海上作業の省人化・省力化、さらには安全性の向上を図ることが強く望まれている。

海上杭式構造物のプレキャスト施工では、これまで鞘管方式と呼ばれる杭頭接合が一般的に用いられてきた。しかし、鞘管方式は、構造設計上許容される鞘管内側と鋼管杭外側のクリアランスが重要であり、クリアランスを大きく設定することができないこともあるため、プレキャストコンクリートの製作途中に、杭の施工誤差に応じて、鞘管や鉄筋等の配置を微調整するなどの対応を強いられた事例も報告されている¹⁾。

そこで筆者らは、差込み鋼材を鋼管杭に差し込んで杭頭部を接合する工法（以下、本工法）を開発した²⁾。図-1に本工法における杭頭接合部の構造を示す。本工法は、プレキャスト上部工から下方に突出させた差込み鋼材を鋼管杭内部に挿入した後、コンクリート、モルタル等の中詰材および間詰材を打ち込むことで、プレキャスト上部工と鋼管杭の一体化を図るものである。なお、鋼管杭の施工誤差が大きくなった場合でも、図-2に示すように鞘管や上部工の鉄筋等の配置を調整することなく、

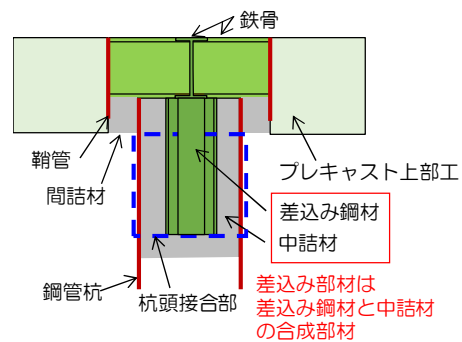


図-1 杭頭接合部の構造

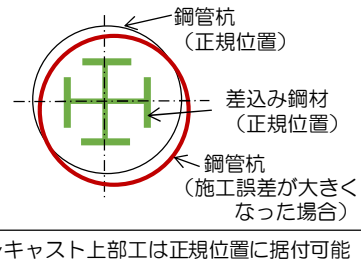


図-2 鋼管杭の打込み誤差の吸収の概念図

プレキャスト上部工を製作・構築できることが大きな特長である。

本稿では、本工法を模擬した試験体を用いた正負交差載荷実験を実施し、鋼管杭に対する差込み鋼材の平面的な位置のずれ（以下、偏心）が杭頭接合部の耐力に及ぼす影響を考察した結果を報告する。また、差込み鋼材の差込み長の違いが杭頭接合部の耐力に及ぼす影響についても考察した結果を示す。

2. 実験概要

2.1 実験ケース

表-1に実験ケースを示す。本実験では直径D=267.4mm、厚さ6.0mmの鋼管杭を用いた。差込み鋼材

*1 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター 新材料・リニューアブル技術グループ 主任研究員（正会員）

*2 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター 新材料・リニューアブル技術グループ リーダー 博(工)（正会員）

*3 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター プロジェクトマネージャー 博(工)（正会員）

の偏心を与えた Case2 では、栈橋やドルフィン等の鋼管杭の一般的な仕様である直径 800mm~1,500mm と鋼管杭の施工誤差（平面位置、±100mm）を考慮して、偏心量を 34mm（≒100mm/800mm×D=0.125D）に設定した。

また、差込み鋼材（H-150×75×5×7mm）の差込み長は、文献 3)に示される適用範囲より、Case1, 2 では 400mm（≒1.5D）、Case3 では 270mm（≒1.0D）、Case4 では 200mm（≒0.75D）に設定した。なお、Case1~Case4 では、実際の鋼管杭の打込みを想定した杭打機のチャッキング部長さや鋼管杭の防食範囲、鋼管杭の天端高さの許容範囲を

表-1 実験ケース

Case	差込み鋼材	
	偏心	差込み長
1	無し	400mm (≒1.5D)
2	34mm (≒0.125D)	
3	無し	270mm (≒1.0D)
4		200mm (≒0.75D)

※D：鋼管杭直径（=267.4mm）

表-2 使用材料の力学的性質

使用材料	力学的性質	Case1	Case2	Case3	Case4
鋼管杭	降伏点	382	382	381	349
	引張強さ	480	480	461	445
差込み鋼材	降伏点	375			
	引張強さ	465			
中詰・間詰 Mortar	圧縮強度	87.2	85.6	89.4	95.0
	静弾性係数	27.0	26.3	26.1	27.5
梁 Concrete	圧縮強度	45.4	45.4	50.9	49.7
	静弾性係数	32.3	35.1	31.8	32.4
梁主鉄筋	降伏点	422			
梁せん断補強筋	降伏点	367			
鞘管	降伏点	296			

※単位：降伏点、引張強さ、圧縮強度は N/mm² 静弾性係数は kN/mm²。鋼材のヤング率はすべて 200 kN/mm² とした。

考慮した際に必要となる最小長さを 600mm と想定して、鋼管杭の埋込み長を 100mm（≒600mm/1,500mm×D=0.4D）とした。

2.2 試験体

図-3 に試験体の概要を示す。試験体は、鋼管杭と上部工（杭頭部と梁部）の接合部付近を模擬した形状とし、実際の杭式構造物とは天地逆向きに製作した。表-2 に使用材料の力学的性質を示す。

試験体製作に先立って、文献 3)に示す鉄骨鉄筋差込み方式による接合部の耐力算定方法に基づいて、接合部鋼管の降伏破壊、差込み部材のせん断破壊、差込み部材の曲げ破壊の3つの破壊モードに対する耐力を算定し、差込み部材の曲げ破壊耐力が最も小さくなるように仕様を定めた。差込み部材の曲げ破壊耐力は、図-4 に示すように、鋼管杭の断面は考慮せず、鋼管杭の内径を直径として差込み鋼材を鋼管杭内の載荷方向に偏心させた状態における鉄骨コンクリート断面と仮定して算出した。なお、差込み部材の曲げ破壊耐力は、差込み鋼材の断面積が等価となるように差込み鋼材の形状に沿って複数の鉄筋を配置させた断面を設定し、ファイバー要素モデルにより算出した。また、中詰モルタルの圧縮強度を 80N/mm² 程度とし、コンクリート標準示方書〔設計編〕⁴⁾に従って算出された 2,500μ をコンクリートの終局圧縮ひずみと仮定した。

接合部鋼管の降伏破壊とは、図-1 に示す杭頭接合部の範囲における鋼管杭（以下、接合部鋼管）が差込み部材との支圧力の伝達（てこ作用）により斜め方向に引張降伏する破壊を指す。このとき、鋼管杭に作用する軸方向力は、差込み鋼材から中詰材に支圧力として直接伝達されるが、差込み鋼材が偏心した場合、接合部鋼管の降

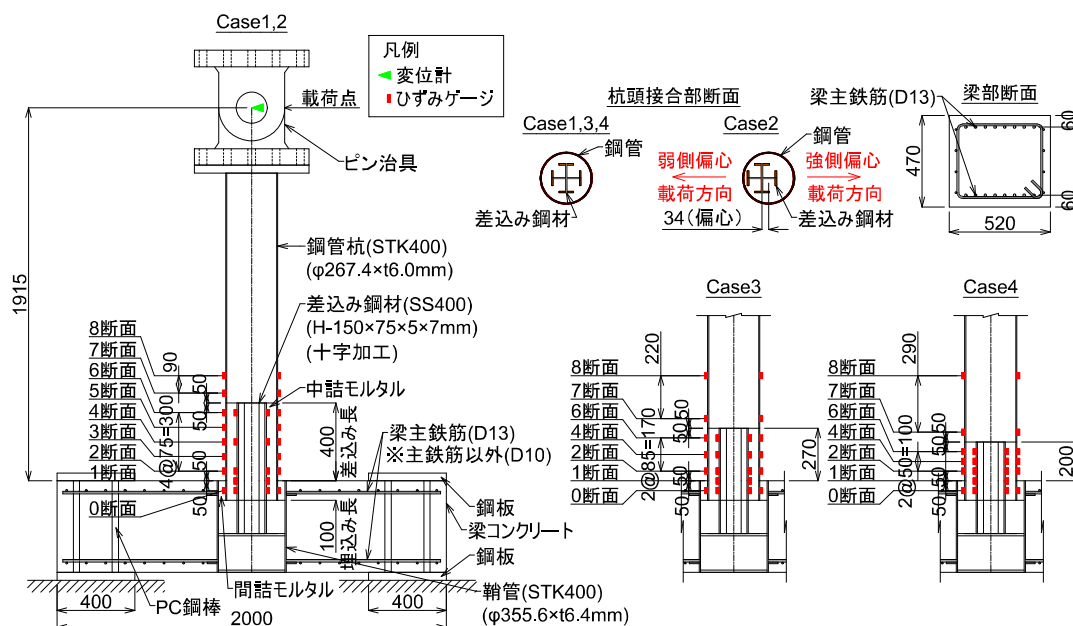


図-3 試験体の概要および計測の概要

伏破壊耐力はその影響を受けることが考えられる。

また本実験は、差込み鋼材の偏心や差込み長が杭頭接合部の耐力に及ぼす影響を評価することが目的であるため、計算上は隣接部材である梁や鋼管杭が破壊に至らない仕様とした。図-5に各種耐力の算定位置、表-3に各種耐力の計算値を示す。

2.3 荷重方法と計測項目

荷重は、試験体を実際の杭式構造物とは天地逆向きの状態で梁の両端部を反力床に固定し、鋼管杭と上部工の接合部から高さ 1.915m の位置を水平荷重点とした正負交番漸増荷重条件で行った。漸増荷重は、文献 5) を参考にピーク荷重変位を $\pm n\delta$ ($n=1, 2, 3\dots$) とした 3 サイクル繰返し条件とし、荷重速度は水平荷重点における変位制御 (2δ までは $0.1\sim 0.2\text{mm/s}$, それ以降は $0.3\sim 0.8\text{mm/s}$) で行った。なお、基準変位 δ は、表-2 に示す鋼管杭の降伏強度を用いて、スパン長 1.915m の片持ち梁条件で計算した鋼管杭降伏時の変位とした。また、図-3 に示すように、Case2 では、差込み鋼材を偏心させた方向への荷重 (荷重プラス側) を弱側偏心荷重、逆向きへの荷重 (荷重マイナス側) を強側偏心荷重として整理した。

図-3 中の 0 断面~8 断面の位置に、鋼管杭と差込み鋼材の最外縁の表面にひずみゲージを設置した。また、試験体とは独立した計測フレームに変位計を設置し、荷重点の水平変位を計測した。

2.4 3次元 FEM 解析による検証

差込み鋼材の偏心や差込み長の違いが接合部鋼管の降伏破壊耐力に及ぼす影響を検証するために、3次元 FEM 解析を実施した。なお、解析には汎用 FEM 解析ソフト「DIANA ver.10.6」を用いた。解析では、図-3 に示す試験体をフルモデル化した。拘束条件は、梁両端に設置した鋼板をモデル化し、梁下側の鋼板と床の接触面および梁上側の鋼板と PC 鋼棒の接点を完全固定とした。荷重点には剛な要素を設定し、一方向に強制変位を与えた。このとき、コンクリート、モルタルはソリッド要素とし、鋼管杭、差込み鋼材および鞘管はシェル要素とした。

また、材料物性値は、表-2 に示す値を用いた。コン

クリート、モルタルの圧縮特性は、圧縮破壊エネルギー G_c^0 を考慮した Parabolic モデル $^7)$ を用い、鋼管の横拘束による圧縮強度の増加を Hsieh-Thing-Cheng 破壊曲面により考慮した。引張特性は、Hordijk モデル $^8)$ を用いた。コンクリート、モルタルのひび割れの進展は固定ひび割れモデルにより表現し、鋼材の特性はバイリニアモデルを用いた。鋼材とコンクリート、モルタル間の接触面には、複合構造標準示方書 $^9)$ に従って、付着力 $c=0.7\text{N/mm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=20^\circ$ のクーロン摩擦則を設定した。

3. 実験結果

3.1 水平荷重と水平変位の関係

図-6~図-9 に各ケースにおける水平荷重と水平変位の関係を示す。Case1 では、差込み鋼材の引張降伏、隣接部材 (以下、鋼管杭) の引張降伏を経て、最大荷重に達した。実際の杭式構造物の条件として $\phi=1,500\text{mm}$,

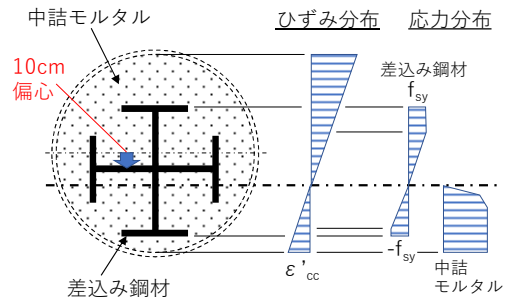


図-4 差込み部材の曲げ耐力の算定

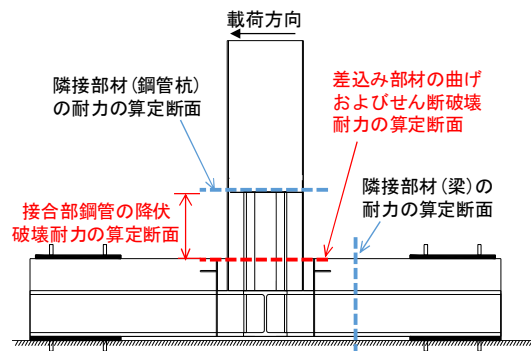


図-5 各耐力の算定位置

表-3 各種破壊耐力の計算値および実験値

項目	単位	耐力 $^{※4}$					
		Case1	Case2		Case3	Case4	
			弱側偏心	強側偏心			
計算値	隣接部材 梁の曲げ破壊耐力 $^{※1}$	kN・m (kN)	171 (89.3)	171 (89.3)		171 (89.3)	171 (89.3)
	鋼管杭の曲げ降伏耐力 $^{※2}$	kN・m (kN)	120 (79.2)	120 (79.2)		120 (72.9)	110 (64.1)
	杭頭接合部 接合部鋼管の降伏破壊耐力	kN・m (kN)	335 (174.9)	335 $^{※3}$ (174.9)		197 (102.9)	120 (62.7)
	差込み部材のせん断破壊耐力	kN・m (kN)	(303.9)	(303.9)	(303.9)	(303.9)	(303.9)
	差込み部材の曲げ破壊耐力	kN・m (kN)	87 (45.4)	64 (33.4)	119 (62.1)	88 (46.1)	91 (47.5)
実験値	終局 (最大荷重) 時の荷重	kN	73.0	65.3	90.2	79.1	78.9

※1 梁の曲げ破壊耐力は、図-5 に示す断面における曲げ耐力、せん断耐力のうち、先行破壊する曲げ耐力の値を示した。

※2 鋼管杭の曲げ降伏耐力は、図-5 に示す断面において中詰材を無視した杭断面のみを考慮した計算値である。

※3 差込み鋼材を偏心させた Case2 の接合部鋼管の降伏耐力は、Case1 の計算値を引用した。

※4 () 内の数値は、各破壊耐力の抵抗モーメントを荷重位置から計算断面までの距離で除して水平荷重に換算した値である。

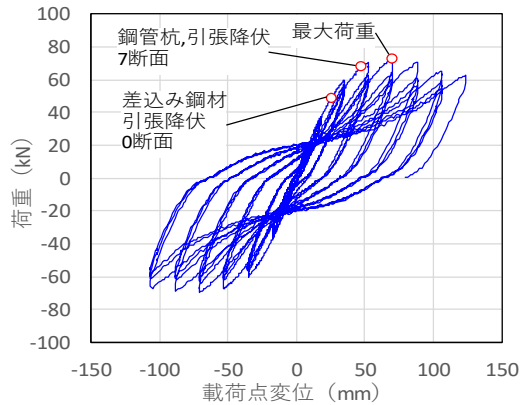


図-6 荷重変位曲線 (Case1)

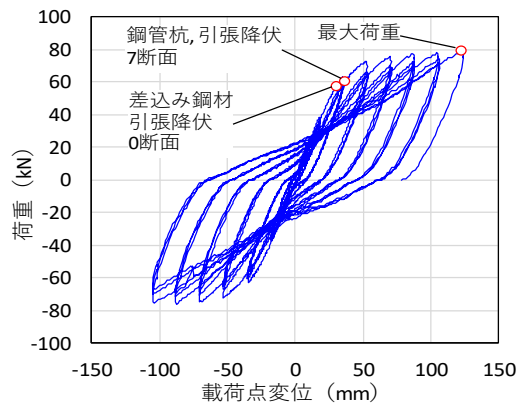


図-8 荷重変位曲線 (Case3)

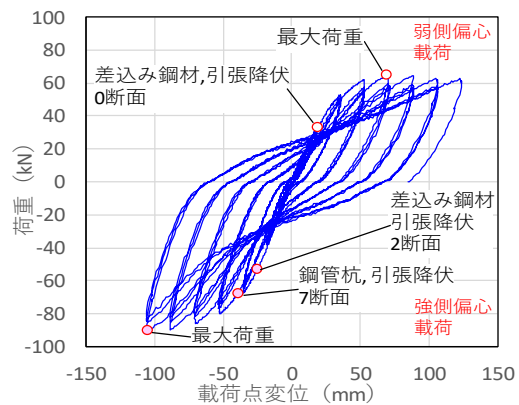


図-7 荷重変位曲線 (Case2)

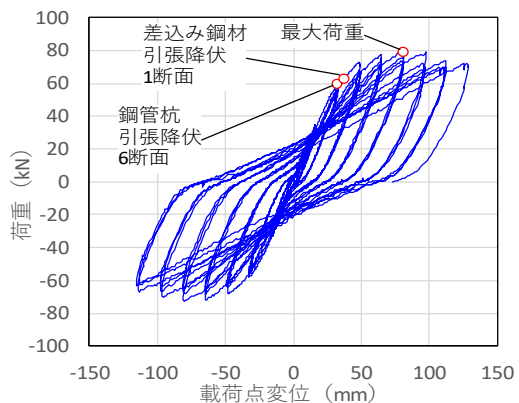


図-9 荷重変位曲線 (Case4)

$t=15\sim 25\text{mm}$ の鋼管杭を想定した場合の肉厚径比 (t/D) は $1.00\sim 1.67\%$ 程度であるのに対し、本実験では鋼管杭の t/D が 2.24% と大きい。これにも関わらず差込み部材の曲げ破壊に対して鋼管杭の曲げ降伏が先行したということは、実際の杭式構造物の条件では、本工法の杭頭接合部において、鋼管杭の曲げ降伏に先行して差込み部材の曲げ破壊が生じる可能性はほとんどないと考えられる。

Case2 の弱側偏心荷重 (荷重プラス側) では、差込み鋼材の引張降伏が生じた後、鋼管杭の引張降伏が生じることなく最大荷重に達した。このことから、差込み鋼材が偏心した方向に水平力が生じた場合、鋼管杭の曲げ降伏より杭頭接合部の破壊が生じやすくなると考えられる。一方、Case2 の強側偏心荷重 (荷重マイナス側) では、鋼管杭の曲げ降伏が先行し、杭頭接合部の破壊が生じにくくなると考えられる。

また、差込み長 $1.0D$ の Case3、 $0.75D$ の Case4 では、差込み長が $1.5D$ の Case1 と同様に差込み鋼材の引張降伏、鋼管杭の引張降伏を経て最大荷重に達したが、差込み鋼材の引張降伏とほぼ同時のタイミングで、鋼管杭の引張降伏が生じた。すなわち、差込み長が短いほど鋼管杭の引張降伏が先行しやすい傾向になると考えられる。

3.2 実験値と計算値の比較

表-3 に各ケースの終局時における荷重の実験値を示す。ここでは、荷重が最大となった時点 (荷重低下がなかったケースでは載荷試験における最大変位となった時

点) を終局時と称している。これより、終局時において、強側偏心荷重では荷重は増加し、弱側偏心荷重では減少する傾向が見られた。また、差込み鋼材の差込み長について、終局時の荷重は、Case1 で若干小さい値であるものの、いずれのケースもほぼ同じ値であり、差込み長は終局時の荷重にほとんど影響を及ぼさないことが分かった。なお、全てのケースで差込み部材の曲げ破壊耐力の計算値を上回った。

3.3 実験結果と解析結果の比較

図-10 に Case1 (差込み鋼材降伏時、最大荷重時) および Case2~Case4 (最大荷重時) における差込み鋼材および鋼管杭に生じた高さ方向の鉛直ひずみ分布の実験結果および解析結果を示す。これによると、全ケースにおいて、解析結果は実験結果と概ね一致している傾向が見受けられた。

また、全てのケースにおいて、差込み鋼材は埋込部の天端付近でひずみが最大となり、鋼管杭は圧縮ひずみが埋込部付近、引張ひずみが杭頭接合部天端付近で最大となった。ひずみが最大となった位置は、図-5 に示す耐力の算定位置と一致しており、その位置で照査すればよいことが確認された。

3.4 曲げによる差込み部材断面の回転変形に関する考察

差込み鋼材の偏心および差込み長が杭頭接合部の回転による変形に及ぼす影響を確認するために、差込み鋼材および接合部鋼管の曲率の推移を確認した。図-11 およ

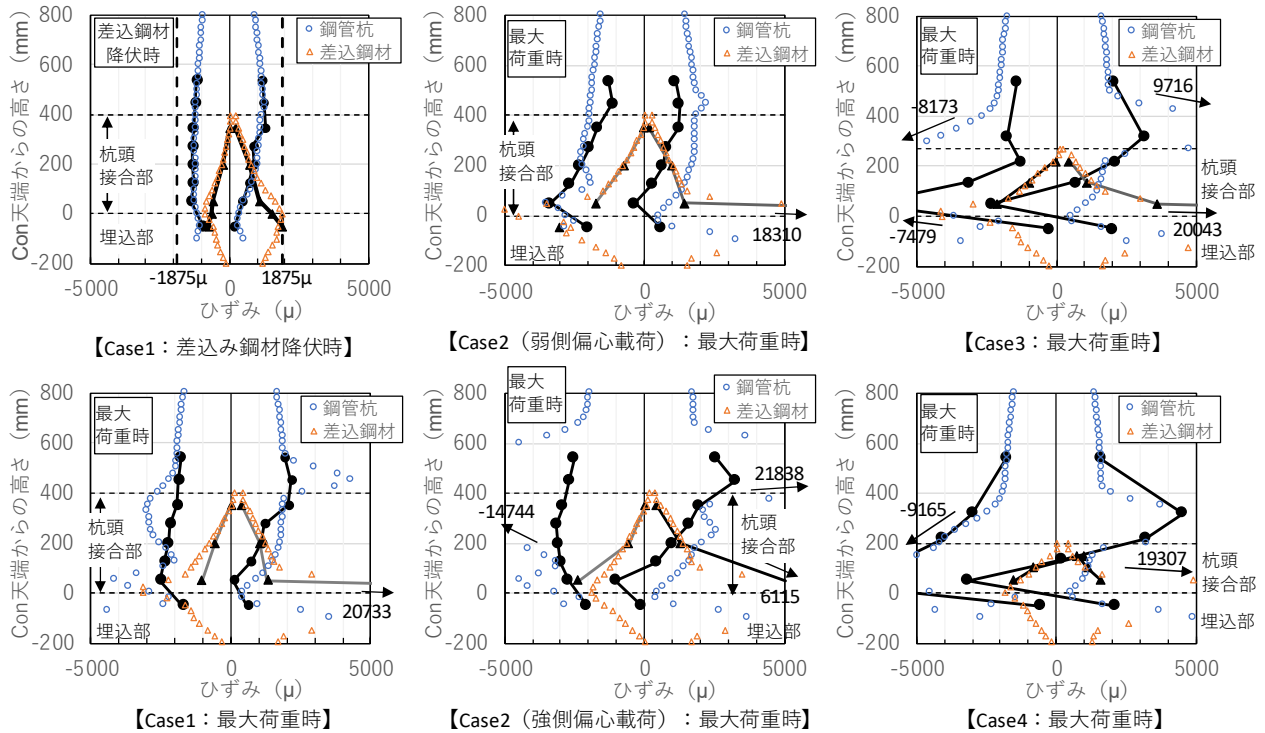


図-10 高さ方向の鉛直ひずみ分布 (塗潰し：実験値, 白抜き：解析値)

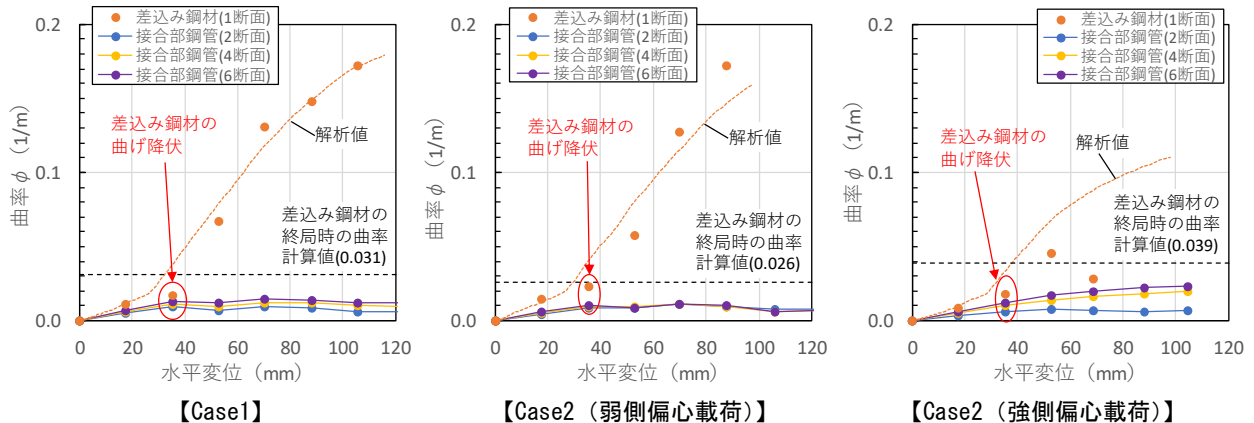


図-11 差込み鋼材と接合部鋼管における曲率φと水平変位の関係 (偏心の影響の検討)

び図-12 に差込み鋼材 (1 断面) および接合部鋼管 (2, 4, 6 断面) の曲率と水平変位の関係を示す。なお、差込み鋼材の曲率については、Case2 (強側偏心載荷) および Case4 において荷重途中でひずみゲージの異常値と思われる挙動が認められたことから、FEM 解析から得られた結果を併記した。

差込み鋼材の結果を見ると、全ケースにおいて、差込み鋼材の曲げ降伏以降で水平変位に対する曲率の増加量 (勾配) が大きくなる傾向を示したが、Case2 (強側偏心載荷)、Case3 および Case4 では、Case1 に比べて勾配が小さくなる結果となった。一方、これらのケースの接合部鋼管の曲率は Case1 に比べて勾配が大きくなる傾向を示している。すなわち、偏心が生じていたり、差込み長が短い場合ほど、曲げに対する接合部鋼管の荷重負担分は大きくなると言える。また、表-3 に示すとおり、各

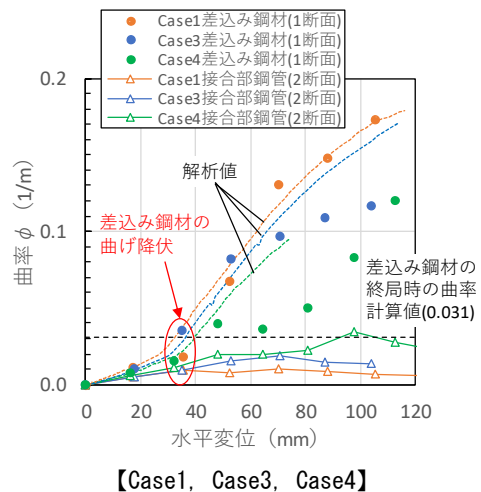


図-12 差込み鋼材と接合部鋼管における曲率φと水平変位の関係 (差込み長の影響の検討)

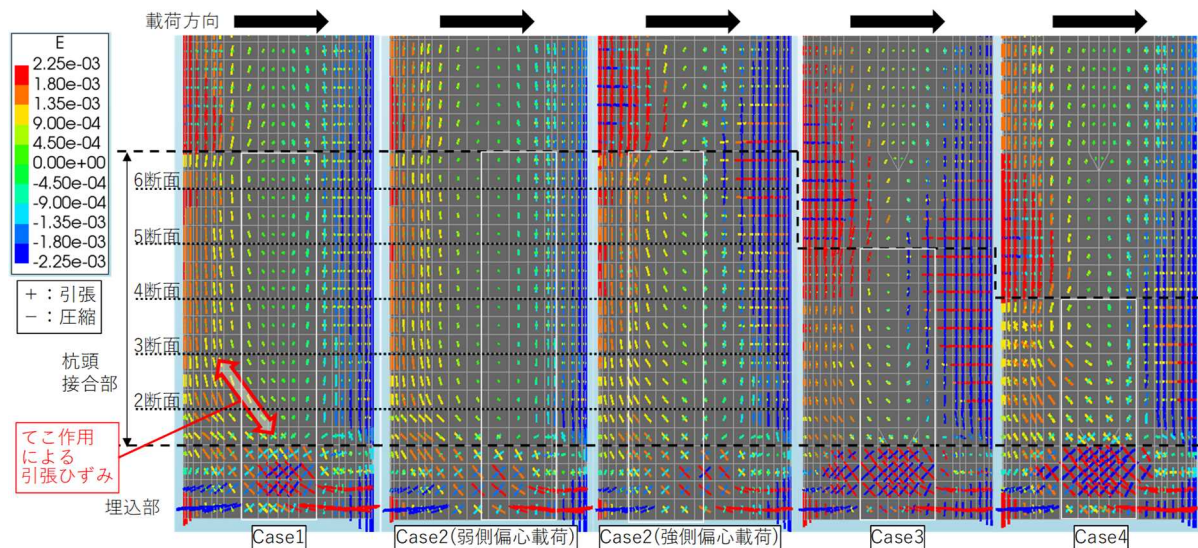


図-13 鋼管杭の主ひずみベクトル図（最大荷重時）

ケースの最大荷重（実験値）は太字で示す Case1 の計算値に対して 1.44 倍以上となっている。このことから、本実験における条件（鋼管杭の埋込み長 0.4D, 差込み鋼材の差込み長 0.75D 以上）を満足している場合には、図-4 に示したような偏心の影響を考慮せずに、杭芯に差込み鋼材が配置された鉄骨コンクリート断面を仮定した差込み部材の曲げ破壊耐力を計算値としておけば、安全余裕を持った杭頭接合部の耐力評価をできると考えられる。

3.5 接合部鋼管の降伏破壊に関する考察

図-13 に Case1~Case4 における最大荷重時の鋼管杭に発生する主ひずみのベクトル図（FEM 解析結果）を示す。図中のベクトルの向きはシェル要素内における最大主ひずみおよび直交する最小主ひずみの発生方向、長さはひずみの大きさを示す。これより、Case2（強側偏心載荷）、Case3 および Case4 では、図中の杭頭接合部上方付近における鋼管杭の引張ひずみ、杭頭接合部下方付近における圧縮ひずみが Case1 に比べて大きくなる傾向が見られたが、てこ作用により生じる斜め方向の引張ひずみへの影響は小さく、鋼管の降伏ひずみには達していなかった。このことから、本実験で設定した差込み鋼材の偏心や差込み長の範囲では、差込み鋼材の偏心や差込み長が接合部鋼管の降伏破壊に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

4. まとめ

本実験にて得られた知見を以下に示す。

- 1) 差込み鋼材が強側偏心に向かうほど、または差込み鋼材の差込み長が短くなるほど、曲げに対する接合部鋼管の荷重負担は大きくなること分かった。
- 2) 本実験で設定した差込み鋼材の偏心量 (0.125D) や差込み長 (0.75~1.5D) の範囲では、偏心や差込み長が接合部鋼管の降伏破壊に及ぼす影響はほとんど

ないことを確認した。

- 3) 鋼管杭の偏心量として 0.125D, かつ差込み鋼材の差込み長を 0.75D 以上に設定して、鉄骨コンクリート断面のみを考慮した差込み部材の曲げ破壊耐力の計算値を設計で考慮しておけば、載荷試験により得られた最大荷重に対して十分に安全余裕を持った評価ができることを確認した。

参考文献

- 1) 川俣 奨：棧橋上部工受梁のプレキャスト化施工について, MarineVoice21, V01302, pp.12-15, 2018
- 2) 小林雄一, 田中亮一, 網野貴彦, 若松宏和：鉄骨差込み接合方式による棧橋杭頭接合部の耐力評価実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, 2021
- 3) 鉄道総合技術研究所：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, 2017
- 4) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.191, 2023
- 5) 土木研究所：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), 土木研究所資料第 4023 号, pp.20, 2006
- 6) P.H. Feenstra：Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and Reinforced Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1993
- 7) Hikaru NAKAMURA, Takeshi HIGAI：Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001
- 8) D.A. HORDIJK：Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991
- 9) 土木学会複合構造委員会：複合構造標準示方書 [2014年制定], pp.74-78, 2015