

報告 鉄骨差込み接合方式による栈橋杭頭接合部の耐力評価実験

小林 雄一*1・田中 亮一*2・網野 貴彦*3・若松 宏知*4

要旨：海上栈橋の鋼管杭は海上打込みによる施工が一般的であり、打込みに高い精度を要求することが難しい。そのため、栈橋上部工のプレキャスト化にあたっては、鋼管杭の打込み誤差に対応しやすい上部工との接合構造が有利となる。そこで著者らは、鉄道構造物等設計標準・同解説に示される鉄骨鉄筋差込み接合方式を応用した鉄骨のみの接合構造を提案し、その接合構造を有する試験体を製作して曲げ載荷試験を行った。その結果、杭頭接合部に隣接する位置の鋼管杭断面が降伏するときの変位の約 5 倍の変位を与えた場合でも荷重の低下は見られず、本工法による杭頭接合構造は十分な耐力を有することを確認できた。

キーワード：海上栈橋、プレキャスト、杭頭接合部、鉄骨差込み接合、孔あき鋼板ジベル

1. はじめに

港湾構造物の施工では、特殊技能を有する作業員が必要で多大な労力を要すること、工事進捗が海象条件等に大きく左右されることから、海上作業の省力化と安全性の向上が課題となっている。そのため、港湾構造物の施工の合理化に寄与する施工技術の開発が望まれている。

海上栈橋の築造においては、大掛かりな支保工を設置して、上部工のすべてを現場にて施工するのが一般的である。これは、栈橋の鋼管杭と上部工の接合が重要であるのに対し、鋼管杭の海上打込みは一般に正規の位置に対して平面位置で $\pm 10\text{cm}$ 、高さ位置で $\pm 5\text{cm}$ 、杭の傾斜 2° 以内の誤差が許容され、その誤差を現場施工によって解消する必要があるためである。一方近年では、上部工をプレキャスト化して施工する事例も増えているが、鋼管杭の打込み誤差やプレキャスト部材の製作・据付誤差の吸収において課題が残されており、海上作業の削減という観点から新たな接合構造の開発が求められていた。

そこで筆者らは、図-1に示す工法の開発に着手した。開発した工法の杭頭接合部の構造を図-2に示す。本工法は、上部工の杭頭部コンクリートをプレキャスト化し（以下、杭頭ブロックと称す）、杭頭ブロックから突出させた鉄骨（以下、挿入鉄骨と称す）を鋼管杭の内部に挿入した後、鋼管杭内部の中詰コンクリートと鋼管杭周囲の間詰コンクリートを打ち込むことで、杭頭ブロックと鋼管杭の一体化を図るものである。図-3に示すように、本杭頭接合構造では、設計段階から挿入鉄骨と鋼管杭内側の離隔を上記の杭の打込み誤差以上に設定することで、海上での杭頭ブロックの据付・接合作業を削減することが可能である。なお、本工法の杭頭接合構造は、鉄道構造物等設計標準・同解説「コンクリート充填鋼管柱の接合部（鉄骨鉄筋差込み方式）」¹⁾を参考にしたものであり、

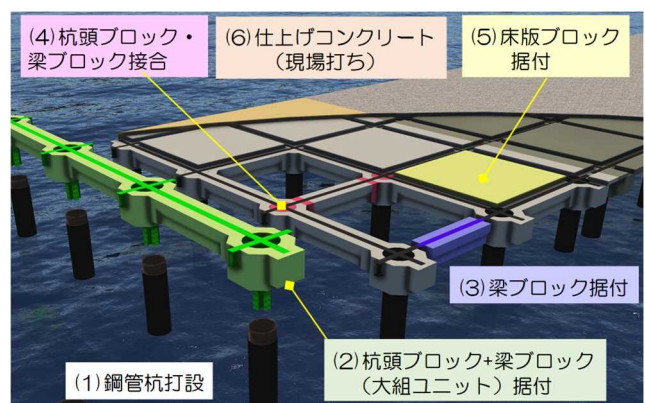


図-1 本工法の施工手順

※図中の番号は施工順序を示す

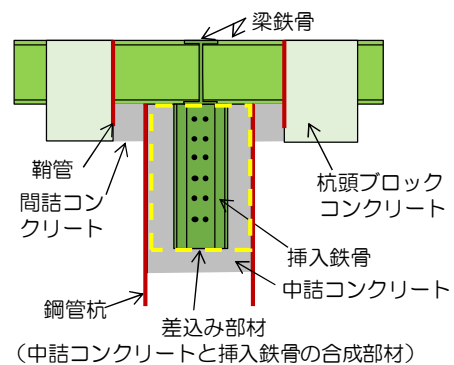
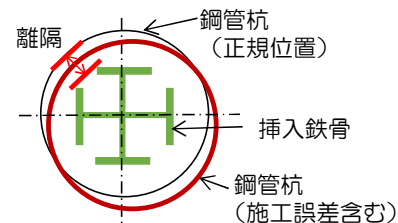


図-2 杭頭接合部の構造



杭頭ブロックは正規位置に据付可能

図-3 鋼管杭の打込み誤差の吸収概念

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

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

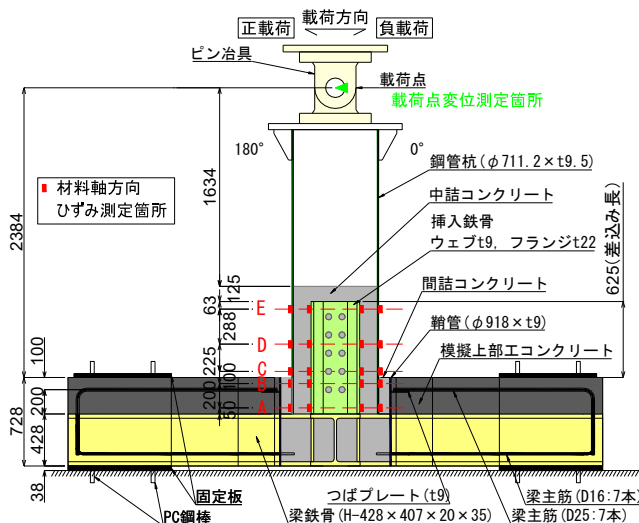
*4 東亜建設工業（株） 設計部 海上グループ 担当課長

鋼管杭の先端が上部工に埋設される点で異なる。本稿では、大型試験体を用いた曲げ載荷試験により、杭頭接合部の破壊形態や曲げ耐力を確認し、文献 1) の鉄骨鉄筋差込み方式と構造的に異なる点である鋼管杭の上部工への埋込みによる影響を中心に考察した結果を報告する。

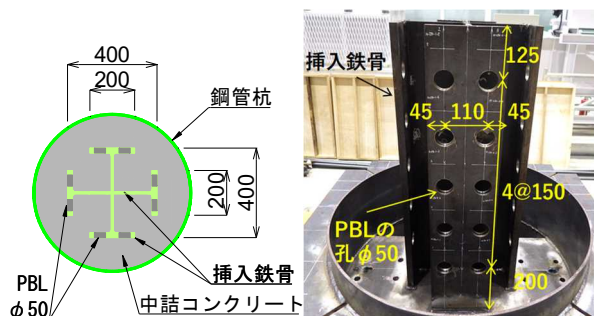
2. 実験概要

2.1 試験体

本実験で用いた試験体を図-4 に、各種材料の仕様や



(a) 側面図



(b) C 断面 (c) PBL の配置
図-4 試験体概要 (図中の寸法の単位は mm)

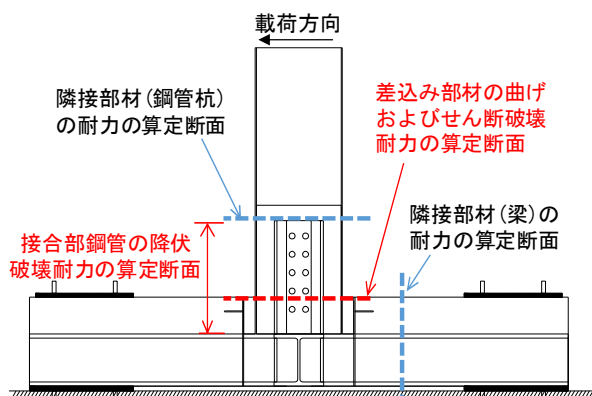


図-5 本試験体の各種破壊耐力算定位置

力学的性質を表-1 および表-2 に示す。試験体は実際の栈橋とは天地逆向きで製作した。なお本実験では、挿入鉄骨の定着長の低減（実施工における据付・接合作業の合理化）を図ることを期待して、挿入鉄骨のフランジ部に孔あき鋼板ジベル（以下、PBL と称す）を配置した。

試験体製作に先立って、文献 1) に記載の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、接合部鋼管降伏破壊、差込み部材せん断破壊、差込み部材曲げ破壊の 3 つの破壊モードに対する耐力を算定した。ここで、差込み部材とは“中詰コンクリートと挿入鉄骨からなる合成部材”を指し、接合部鋼管降伏破壊とは“図-5 に示す杭頭接合部の範囲における鋼管杭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”を指している。表-3 には、文献 1) に示される耐力式を用いて、図-5 に示す断面において試験体条件から計算した各種破壊耐力を示す。また本試験体

表-1 鋼材の力学的性質

部材名称	仕様	降伏点 (N/mm ²)
鋼管杭	STPY400	320
挿入鉄骨	フランジ	SS400
	ウェブ	SS400
梁鉄骨	SS400	310
梁主筋	上側	SD345
	下側	SD345

※試験成績書による

表-2 コンクリートの力学的性質

部材名称	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
中詰・間詰コンクリート	39.1	40,300
模擬上部工コンクリート	37.9	37,700

※テストピースを用いた試験結果による

表-3 各種破壊耐力の算定値

項目	耐力	
	PBL の孔による断面欠損考慮あり	PBL の孔による断面欠損考慮なし
隣接部材		
梁の曲げ破壊耐力	2531kN・m (1018kN)	
鋼管杭の曲げ降伏耐力	1162 kN・m (638kN)	
杭頭接合部		
接合部鋼管降伏破壊耐力	3144 kN・m (1319kN)	
差込み部材のせん断破壊耐力	3955kN	4016kN
差込み部材の曲げ破壊耐力	1054 kN・m (433kN)	1481kN・m (608kN)
※差込み部材の曲げ降伏耐力	663 kN・m (278kN)	1008 kN・m (414kN)

※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。
※鋼管杭の降伏耐力は、図-5 に示す断面において、中詰コンクリートを無視した杭断面のみを考慮した算定値である。
※() 内の数値は、各破壊耐力の抵抗モーメントを載荷位置から算定断面までの距離で除して水平荷重に換算した値である。

では、差込み部材の曲げ耐力算定断面の位置付近に PBL の孔を配置したことから、差込み部材の曲げ破壊耐力および曲げ降伏耐力の算定にあたっては、孔による挿入鉄骨の断面欠損を考慮した場合と考慮しない場合の算定値を並記した。なお、本工法による杭頭接合構造は、鋼管杭の先端が上部工に埋め込まれており、また PBL の配置により挿入鉄骨の断面が欠損している箇所もあるため、実際の差込み部材の曲げ破壊耐力は表-3 に示した算定値とは異なる可能性が考えられた。そのため本実験では、杭頭接合部と隣接部材（鋼管杭）の破壊順序については特に考慮しないこととした。なお、後述の載荷試験の結果では、差込み部材の曲げ破壊を確認できなかったため、以降の考察のために、表-3 には差込み部材の曲げ降伏耐力の算定値も付記した。

2.2 曲げ載荷試験の方法

本試験では、栈橋とは天地逆向きで試験体を固定板の上に設置し、試験体中央部を浮かせた状態で、図-4 (a) に示す載荷点位置に水平ジャッキで加力した。水平荷重は、正負交番載荷により漸増させた。なお、軸力は作用させない条件とした。

2.3 計測項目

図-4 (a) 中の A~E の位置に鋼管杭と挿入鉄骨の最外縁の表面にひずみゲージを設置し、杭頭接合部に位置する範囲の鋼管杭および挿入鉄骨の部材軸方向の変形を確認した。また、載荷点位置に変位計を設置し水平変位を測定した。

3. 試験結果

3.1 水平荷重と水平変位の関係

水平荷重と載荷点位置における水平変位の関係を図-6 に示す。なお、白抜きデータのデータは、載荷方向の正負を切り替えた際の各ステップにおける最大荷重を示している。この結果によれば、水平荷重 480kN のときに B 断面の挿入鉄骨の引張縁が降伏し、次いで 643kN のときに E 断面の隣接部材（鋼管杭）の引張縁が降伏した。試験終了までに E 断面の隣接部材（鋼管杭）が降伏したときの変位の約 5.1 倍まで変位を与えたが、荷重の低下は見られず、図-7 に示すように、試験終了後の試験体の切断面を確認したところ、杭頭接合部および隣接部材（梁）においてコンクリートの圧壊等の痕跡は見られなかった。

また、表-3 に示した隣接部材（鋼管杭）の曲げ降伏耐力時の水平荷重の算定値 (638kN) と実験値はほぼ一致していた。しかし、差込み部材の曲げ降伏時の水平荷重の算定値 (278kN [断面欠損考慮], 414kN [断面欠損考慮なし]) に対して実験値 480kN は乖離しており、差込み部材の曲げ破壊時の水平荷重の算定値 (433kN [断面欠損考慮], 608kN [断面欠損考慮なし]) に対して実験では

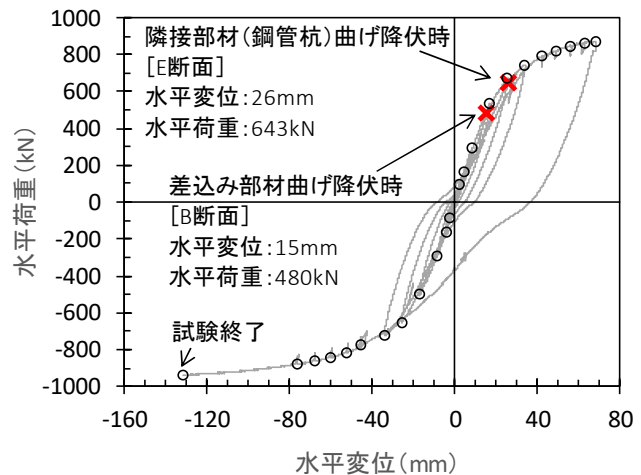


図-6 水平荷重と水平変位の関係

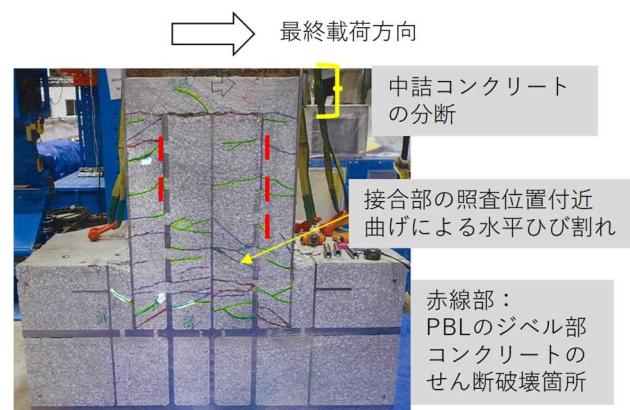


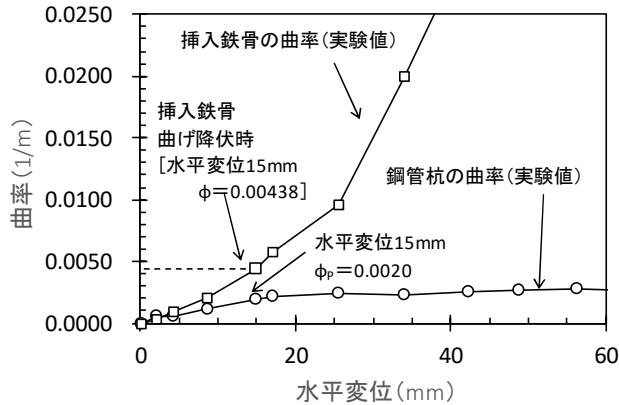
図-7 載荷試験後の試験体切断状況

破壊が確認されなかった。このことから、文献 1) に示される評価式によって、本工法の杭頭接合部の耐力を評価しておけば、実際の杭頭接合部の耐力を過大に評価してしまうことはないと考えられた。

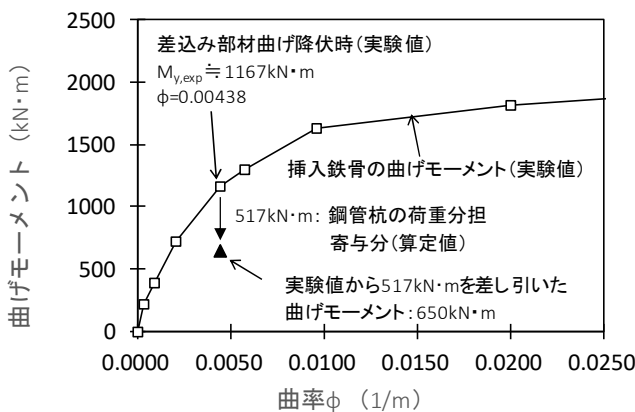
3.2 鋼管杭の上部工への埋込みが差込み部材の曲げ耐力に及ぼす影響に関する考察

本節では、3.1 において、差込み部材の曲げ破壊耐力および曲げ降伏耐力の実験値と算定値が大きく異なったことに対して考察した。

図-8 に、杭頭接合部の範囲において挿入鉄骨に最も大きなひずみが確認された B 断面における挿入鉄骨および鋼管杭の曲率と水平変位の関係を示す。曲率は、図-6 でプロットした正負交番載荷の各ステップの最大荷重時と挿入鉄骨の曲げ降伏時に、挿入鉄骨および鋼管杭の圧縮縁および引張縁で計測されたひずみから算出した。これによれば、水平変位が 5mm より小さいときは、挿入鉄骨および鋼管杭の水平変位と曲率の勾配はほぼ同じ程度であったが、それより水平変位が大きくなると両者の勾配は乖離し始める傾向が認められた。また、水平変位が 15mm に達したとき（差込み部材の曲げ降伏時）鋼管杭の曲率の増加が小さくなる傾向が見られた。これは、



図－8 挿入鉄骨と鋼管杭の水平変位と曲率の関係 (B断面)

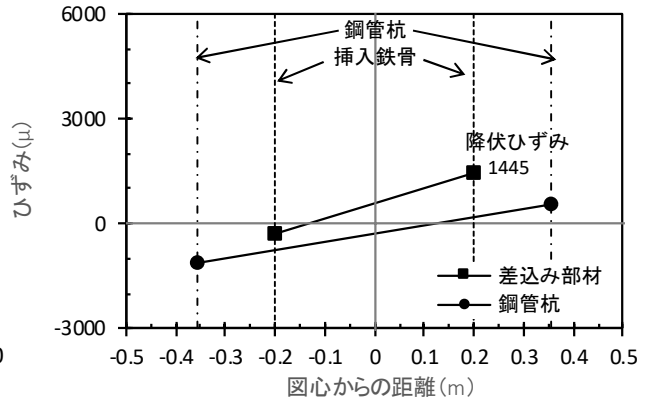


図－10 差込み部材の曲率と曲げモーメントの関係 (B断面)

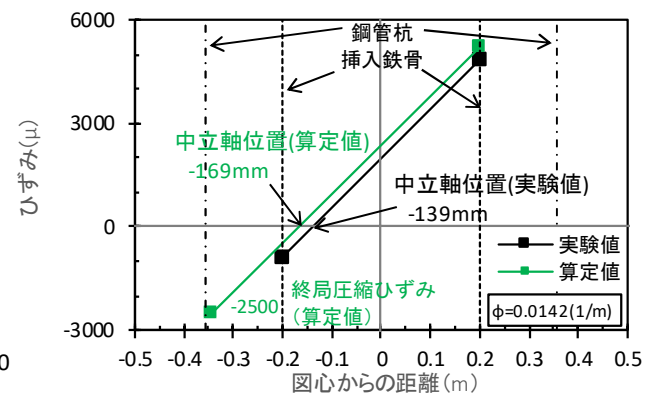
水平変位 5 mm の時点から図－5 に示す杭頭接合部の範囲における鋼管杭内面と差込み部材(中詰コンクリート)の間、ならびに鋼管杭外面と間詰コンクリートの付着等に変化が生じ始め、水平変位 15mm を上回るとその付着等が失われ、差込み部材断面のみが曲げ変形に抵抗するようになったためと考えられる。

B断面における差込み部材の曲げ降伏時における挿入鉄骨と鋼管杭のひずみ分布を図－9 に示す。図を見ると、挿入鉄骨と鋼管杭のひずみ分布の傾きが異なっている。すなわち、前述したように、この時点に至る前から差込み部材と鋼管杭は合成断面としての挙動は示さなくなっていたものの、B断面において鋼管杭も荷重分担に寄与していたことがわかる。ここで、水平変位 15mm (差込み部材の曲げ降伏時) のときの鋼管杭の曲率 ϕ_p (0.002m⁻¹) を用いて鋼管杭の荷重分担寄与分を推定すると、その寄与分は 517kN・m [$E \cdot \phi_p \cdot D/2 \cdot Z = 200\text{kN/mm}^2 \times 0.0020 \text{ (m}^{-1}) \times 0.356 \text{ (m)} \times 3,630,000 \text{ (mm}^3)]$ となる。ここに、E: 鋼管杭のヤング係数、D: 鋼管杭の直径、Z: 鋼管杭の断面係数を表す。

次に、差込み部材の曲げ降伏時の B 断面における差込み部材断面の曲げ荷重の分担寄与分を推定するため、図



図－9 差込み部材曲げ降伏時における挿入鉄骨および鋼管杭のひずみ分布の実験値 (B断面)



図－11 差込み部材のひずみ分布の実験値と算定値の比較 (B断面)

－10 に B 断面内における差込み部材の曲率と曲げモーメントの関係を整理した。図－8 において、差込み部材の曲げ降伏時の曲率は 0.00438m⁻¹ であり、このときの曲げモーメントは 1167kN・m であった。この実験で得られた曲げモーメント 1167kN・m から先に述べた鋼管杭の荷重分担寄与分 517kN・m を差し引くと 650kN・m となる。この値は、本試験体における差込み部材の曲げ降伏耐力を意味しており、表－3 に示した文献 1) に基づき、断面欠損を考慮した差込み部材の曲げ降伏耐力の算定値 663kN・m とほぼ一致していた。

このことから、本工法の杭頭接合構造では、鋼管杭の上部工への埋込み効果によって鋼管杭も作用曲げモーメントの一部を負担しているため、差込み部材断面の曲げ耐力のみを考慮しておけば、十分に安全側の耐力を評価できることがわかった。

3.3 差込み部材断面の平面保持の仮定に関する考察

表－3 に示した差込み部材の曲げ破壊耐力の算定では、文献 1) に基づき、挿入鉄骨と中詰コンクリートの合成部材と仮定しているが、この仮定が本試験体においても成立していたことを確認する必要がある。そこで、文献 1) に基づいて算定した差込み部材の曲げ破壊時における

ひずみ分布と、その曲率と同じ曲率に達した時点の実験値を比較した結果を図-11に示した。なお、算定に用いた中詰コンクリートの終局圧縮ひずみは、文献 1) に基づき、鋼管杭の拘束効果を考慮して求めた 2500μ とした。その結果、差込み部材の曲げ破壊時の曲率の算定値 ($\phi=0.0142\text{m}^{-1}$) に達したときの中立軸の位置は、実測の中立軸位置と概ね一致していた。このことから、本杭頭接合構造においても、差込み部材の平面保持の仮定は文献 1) によって求まる終局状態の曲率に達した場合でも成立していたと考えられる。

なお、図-7に示したように、試験体切断面の目視観察では、中詰コンクリートには圧壊した痕跡は認められなかった。実際の終局圧縮ひずみは表-3の算定に用いた 2500μ よりも大きかったことが、試験体において差込み部材の曲げ破壊が生じなかった理由と推察される。

4. FEM 解析に基づく PBL のずれ止め効果に関する考察

図-7に示した荷重試験後の試験体の切断面を見ると、PBL のジベル部コンクリートのせん断破壊（以下、PBL 破壊と称す）が挿入鉄骨先端部から 2 または 3 段目まで生じていた。そこで、PBL 破壊のタイミングを FEM 解析によって検討し、PBL のずれ止め効果について検証を試みた。なお、解析には汎用 FEM 解析ソフト「DIANA ver.10.3」を用いた。

4.1 解析モデル

解析では、図-4に示した試験体をフルモデル化し、支承条件も忠実にモデル化した。このとき、コンクリートはソリッド要素、鋼管杭、挿入鉄骨、梁鉄骨はシェル要素とした。なお、挿入鉄骨の PBL による断面欠損は、PBL が位置するメッシュに中詰コンクリートの材料特性を与えることで考慮した。また、図-7に示したように、挿入鉄骨先端の中詰コンクリート（125mm の範囲）は分断していたことから、この範囲の中詰コンクリートはモデル化しないこととした。また、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。

4.2 材料特性および構成則

材料物性値は、表-1および表-2に示す値を用いた。コンクリートの圧縮特性は圧縮破壊エネルギー G_R ²⁾ を考慮した Parabolic モデル³⁾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⁴⁾を用いた。また、コンクリートのひび割れの進展は固定ひび割れモデルによ

り表現した。鋼材の特性はバイリニアモデルを用いた。

(1) 挿入鉄骨以外の鋼材における接触面モデル

挿入鉄骨と中詰コンクリートの接触面を除いた鋼材とコンクリート間の接触面には、複合構造標準示方書⁵⁾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。

(2) 挿入鉄骨における接触面モデル

本検討では、PBL および PBL 以外の挿入鉄骨のフランジと中詰コンクリートの界面に対して、表-4に示す 2 種類のケースで解析を行った。具体的には、PBL の破壊が荷重の初期段階から生じていたケース（解析 A）と、隣接部材（鋼管杭）の曲げ降伏時まで PBL による挿入鉄骨の定着が維持されていたことを想定したケース（解析 B）の 2 ケースを検討した。

解析 A のケースでは、PBL のずれ止め効果をせん断ばねモデルとして、図-12に示すように設定した。なお、図中のせん断強度 τ_f は複合構造標準示方書⁵⁾を参考に算出したせん断耐力を PBL の孔面積（2 面分）で除した値である。なお、このせん断強度 τ_f は、実験に基づく式であり、PBL 以外の鋼材とコンクリートとの界面の付着・摩擦の影響も含まれているため、PBL 以外の挿入鉄骨のフランジ面にはクーロン摩擦則を考慮しないこととした。

一方、解析 B では、PBL の箇所ではせん断ばねは考慮せずに、PBL 以外の挿入鉄骨のフランジと中詰コンクリートとの界面にクーロン摩擦則を考慮した。

4.3 解析結果と実験結果の比較

図-13に、解析と実験で得られた水平荷重と水平変位の関係を示す。これによれば、水平変位 15mm 程度までは、解析 A および B の結果とも実験結果と一致したが、水平変位が 15mm を超えると、解析 A の結果は実験結果から乖離した。また、水平変位 26mm 以上になると、解

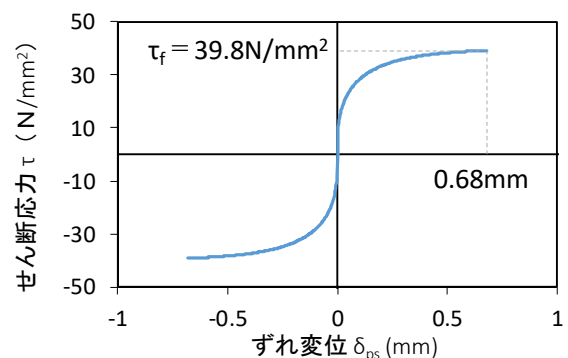


図-12 PBL の非線形せん断ばねモデル

表-4 PBL および PBL 以外の挿入鉄骨のフランジと中詰コンクリートとの接触面モデル

解析ケース	PBL の箇所	PBL 以外の挿入鉄骨のフランジ面
解析 A	非線形せん断ばね（図-12）を考慮	クーロン摩擦則を考慮しない
解析 B	非線形せん断ばねを考慮しない	クーロン摩擦則を考慮（粘着力 $c=0.7\text{N/mm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=20^\circ$ ）

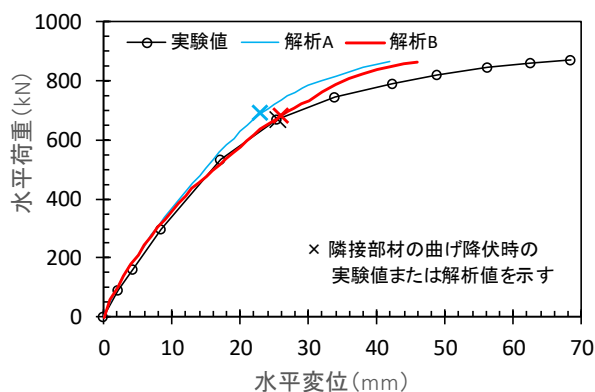


図-13 水平荷重と水平変位の関係
(実験と解析の比較)

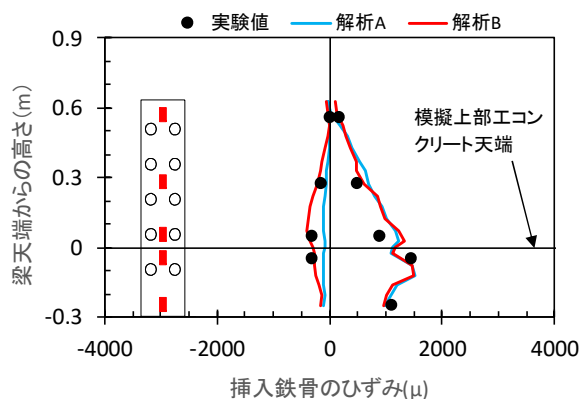
析 B の結果も実験結果と乖離する傾向が見られた。ただし、解析 B では、隣接部材（鋼管杭）の曲げ降伏が生じるまでは良好に再現できていた。

次に、図-14 に、差込み部材の曲げ降伏時および隣接部材（鋼管杭）の曲げ降伏時における挿入鉄骨の引張縁および圧縮縁のひずみ分布を示す。これによれば、いずれの状態においても、引張縁のひずみ分布は解析 A および B の結果とも実験結果と良く一致していた。しかし、圧縮縁側について見ると、解析 A の結果は圧縮ひずみがほとんど発生していないのに対して、解析 B では実験結果と良好に一致していた。このことから、本工法における杭頭接合構造では、水平変位が小さい初期の段階から PBL は挿入鉄骨の定着において有効に機能していなかった可能性が考えられた。挿入鉄骨の長さを低減するためには、PBL 以外の定着方法の検討が必要と考えられる。

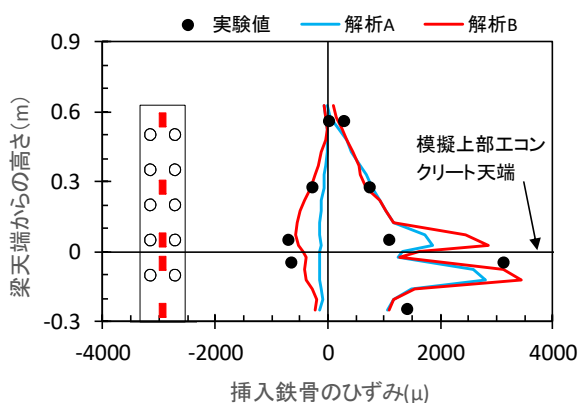
5. まとめ

本稿では、海上栈橋のプレキャスト化における施工合理化を目的として、鉄骨差込み接合方式を用いた杭頭接合構造を提案し、それを模擬した試験体を用いて曲げ載荷試験を行った。その載荷試験から得られた知見を以下に示す。

- 1) 本工法における杭頭接合構造は、隣接部材（鋼管杭）が曲げ降伏するときの約 5 倍の変位を与えても荷重低下は見られず、十分な耐力を有していることが確認された。
- 2) 本工法の杭頭接合構造は鋼管杭の先端が上部工に埋め込まれるが、この埋込みの効果により、鋼管杭も作用曲げモーメントの一部を負担することがわかった。このことから、差込み部材の曲げ耐力は、鉄道構造物等設計標準・同解説の鉄骨鉄筋差込み方式に従って差込み部材断面の曲げ耐力のみを考慮して算定すれば、十分安全側の耐力を評価できることがわかった。
- 3) 本接合構造における挿入鉄骨の定着長の低減を目的に、挿入鉄骨のフランジに孔あき鋼板ジベルを配置



(a) 挿入鉄骨曲げ降伏時



(b) 隣接部材（鋼管杭）曲げ降伏時

図-14 挿入鉄骨の高さ方向のひずみ分布

したが、ずれ止めとして有効に機能していなかった。挿入鉄骨の定着長の低減を図るためには、別の定着方法の検討が必要と考えられた。

なお本稿では、紙面の関係上、挿入鉄骨と鋼管杭の相対的な位置のずれに対する耐力を検討した結果を報告できなかった。別報にて公開していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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
- 2) P.H. Feenstra: Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and reinforced Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1993
- 3) 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
- 4) D.A. HORDIJK: Local Approach to Fatigue of Concrete, PhD thesis, Delft University of Technology, 1991
- 5) 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