

(33) ソケット方式による鋼製フーチングー鋼管杭 接合部の繰り返し載荷実験

関口 修史¹・大西 弘志²・岩崎 正二³・日下 佳明⁴・横尾 彰彦⁵

¹正会員 (株) 横河住金ブリッジ 鉄構エンジニアリング技術部 (〒279-0012 千葉県浦安市入船1-5-2)
E-mail: sekiguchi-shu@ysbc.co.jp

²正会員 岩手大学准教授 大学院工学研究科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5)
E-mail: onishi@iagate-u.ac.jp

³正会員 岩手大学教授 大学院工学研究科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5)
E-mail: iwasaki@iagate-u.ac.jp

⁴正会員 岩手大学大学院 社会環境工学専攻 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4-3-5)
E-mail: t2515003@iagate-u.ac.jp

⁵正会員 ジオスター (株) 技術部 (〒112-0002 東京都文京区小石川1-28-1)
E-mail: yokoo-akihiko@geostr.co.jp

著者らは、擁壁や防潮堤など堤体の構造物構築において、構造のスリム化や施工の合理化を目的に鋼製フーチングと鋼管杭を接合する構造を検討している。杭頭接合部には、鋼製フーチングからのばした差込部材を鋼管杭の杭頭部に挿入し、コンクリートを充填することで一体化させるソケット方式接合構造を提案した。ソケット方式接合では、接合部にずれ止めを設けることが一般的であるが、差込長を大きくして鋼管杭とコンクリートの付着効果を高め、ずれ止めを省略することを検討している。本研究は、鋼製フーチングと鋼管杭の接合部を模擬した試験体による繰り返し載荷実験を実施し、ずれ止めが省略でき、かつ差込部材、鋼管杭および充填コンクリートが一体として挙動することが確認できた結果を報告するものである。

Key Words : Socket Type Connection, Shear Connector, Insertion Length, Stress Transfer Capacity

1. はじめに

擁壁や防潮堤などの堤体などの構造物においては、上部工にかかる荷重をフーチング、基礎杭を介して地盤に荷重伝達させるが、上部工が大型化すると基盤安定性の観点からフーチングが大型化する傾向にあり、基礎杭の大型化などによる工費膨大や、現地施工の長期化といった経済的損失が生じる。著者らはこれらの問題を解決すべく、構造のスリム化や施工の合理化を目的に鋼製フーチングと鋼管杭による上部工荷重の地盤伝達を目的とし、鋼製部材を適用したフーチング構造と鋼管杭の杭頭接合構造を提案した。

杭頭接合部は、鋼製フーチングからのばした差込部材を鋼管杭の杭頭部に挿入し、コンクリートを充填して一体化させるソケット方式接合構造を提案した。ソケット方式接合は、鋼材加工度が少なく、可搬性、経済性に優

れた接合構造となっており、また、建込み時の施工誤差を、鋼管杭と差込部材との隙間を利用し、接合部で吸収できるため施工性にも優れた構造となっている¹⁾。しかしながら、杭頭接合部においてはずれ止めを設けることが一般的であり、ずれ止めは杭打ち後に現場溶接により取付けるケースが多い。

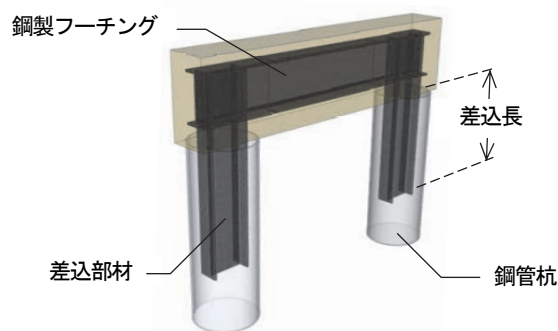


図-1 鋼製フーチングー鋼管杭 ソケット方式接合

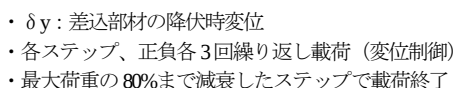
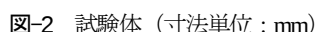


図-4 載荷サイクルの模式図

そこで、筆者らはずれ止め現場溶接の省力化を目的として、差込部材の差込長を大きくして鋼管杭とコンクリートの付着力を高め、ずれ止めを省略することを検討している。本研究では、曲げモーメント、せん断力および軸力が繰り返し作用する場合に、差込長を大きくしたソケット方式接合のずれ止め省略の効果と、接合部の応力伝達性状の把握、設計荷重に対する安全性の検証と設計法確立を目的とし、繰り返し載荷実験を実施した。本文は、実構造を想定した縮尺モデル試験体を用いて実施した繰り返し載荷実験の結果について報告するものである。

2. 繰り返し载荷実験

(1) 試験体諸元

図-2には、試験体の概要図を示す。試験体は実構造物相当の約1/3縮尺モデルとし、接合部の応力伝達性状を確認するために、鋼製フーチング、差込部材および鋼管杭から構成されるL型形状の試験体としている。差込長はH形鋼高さ(165mm)の4倍(660mm)とし、鋼管杭の径、板厚は実構造の径厚比相当とし、径は $\phi 267.4$ 、板厚は3.2mm、径厚比=84とした。

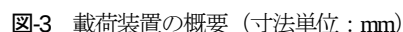


表-1 充填コンクリートの材料特性

コンクリート		材 齢 (日)	圧縮強度 (N/mm2)	ヤング係数 (kNmm2)
供 試 体	A	9	32.5	32.1
	B	9	35.1	32.3
	C	9	32.8	30.4

表-2 鋼材の材料特性

鋼材	材質	降伏点 (MPa)	破断強度 (MPa)
鋼 管 t=3.2	SS400	320	442
H形鋼 t=12	SM400A	286	461

(2) 実験方法

a) 載荷方法と載荷サイクル

図-3には、載荷装置の概要を示す。載荷は、500kNの油圧ジャッキを用いて、L型試験体の対角線上に荷重を加える。なお、接合部に曲げモーメント、せん断力および押し引きの軸力を与えるように正負の繰り返し載荷とする。

図-4には、載荷サイクルの模式図を示す。あらかじめ行った鋼材の引張強度およびコンクリートの圧縮試験の結果より算出した差込部材の降伏荷重に達したときの変位を降伏変位 δy として、その後 $1\delta y$, $2\delta y$ …と変位量を増やしつつ、各ステップで押し引き3回の繰り返し載荷を行う。最大荷重の80%まで減衰するステップまで載荷を行う。

b) 使用材料の材料特性

使用した充填コンクリートおよび鋼材の材料特性を、表-1、表-2に示す。コンクリートは、呼び強度30N/mm²とした。鋼材は接合部の主部材となる鋼管およびH形鋼について示す。

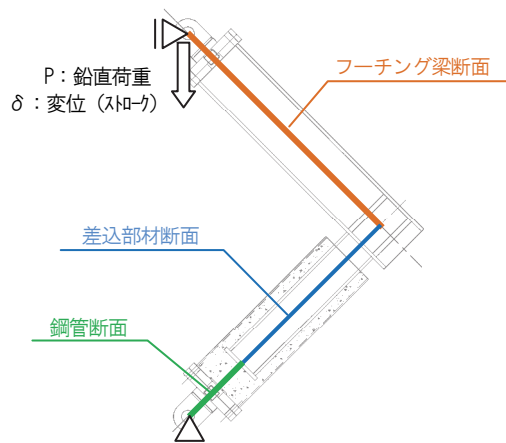


図-5 骨組モデル

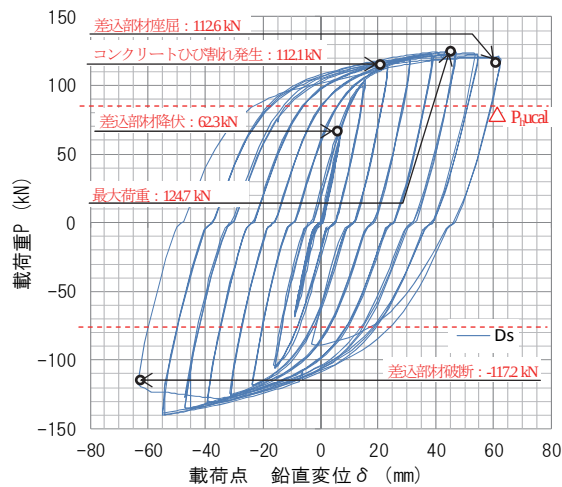


図-6 荷重—鉛直変位曲線

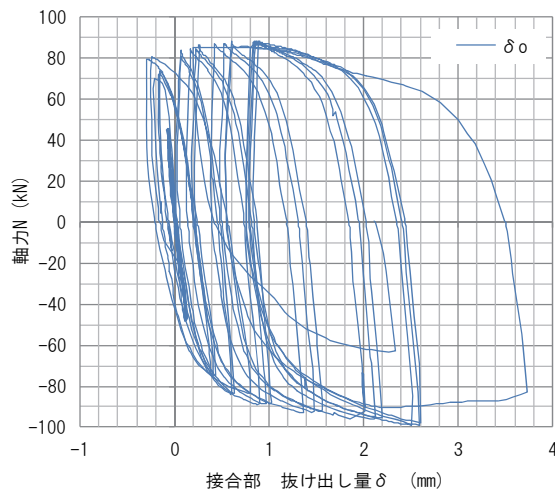


図-7 差込部材の抜き出し量履歴

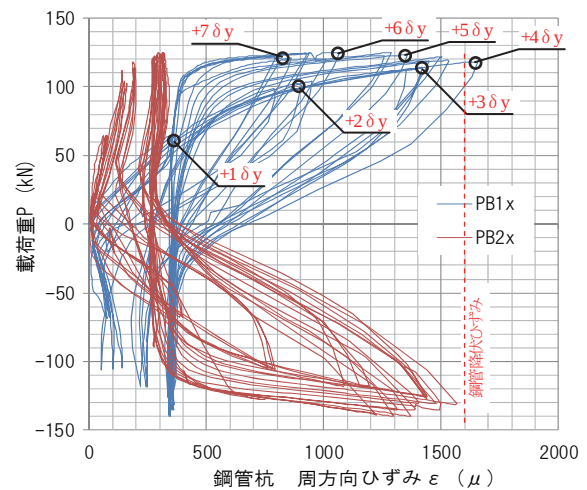


図-8 鋼管上端の周方向ひずみ履歴

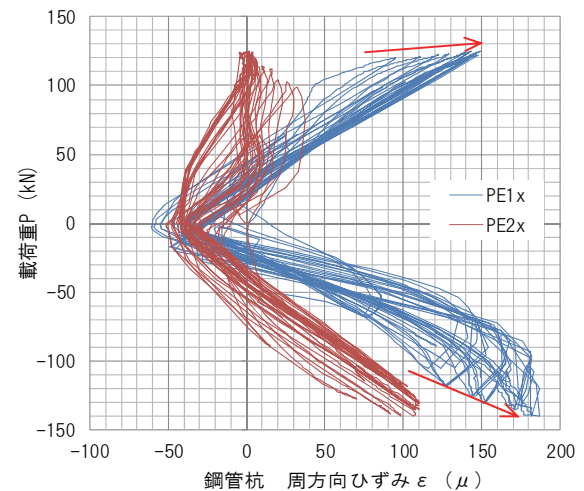


図-9 鋼管 1.5D 貫入位置の周方向ひずみ履歴

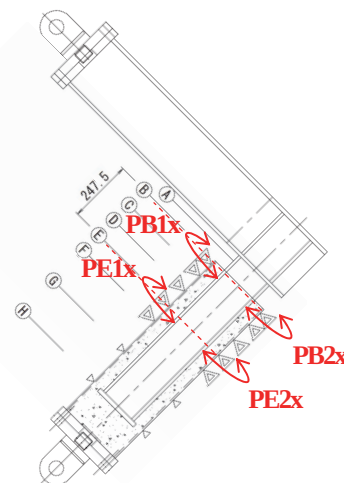


図-10 周方向ひずみ計測位置

c) 差込部材とソケット接合部の耐力に相当する荷重

差込部材の耐力に相当する荷重は、図-5に示す骨組モデルにより求めた。載荷点における鉛直荷重を P 、変位を δ とすると、差込部材の耐力に相当する荷重は、

- ・差込部材降伏荷重： $P_{iy \text{ cal}} = 62.0 \text{ kN}$
- ・差込部材終局荷重： $P_{iu \text{ cal}} = 80.6 \text{ kN}$

となる。なお、差込部材降伏時には骨組モデルは

弾性限にあるとして、

- ・差込部材降伏変位： $\delta_{iy \text{ cal}} = 6.8 \text{ mm}$

と求められる。

ソケット接合部の耐力に相当する荷重は、既往のソケット式接合部設計マニュアル²⁾に準拠し求め、降伏荷重および終局荷重は、

- ・接合部降伏荷重： $P_{jy \text{ cal}} = 134.5 \text{ kN}$

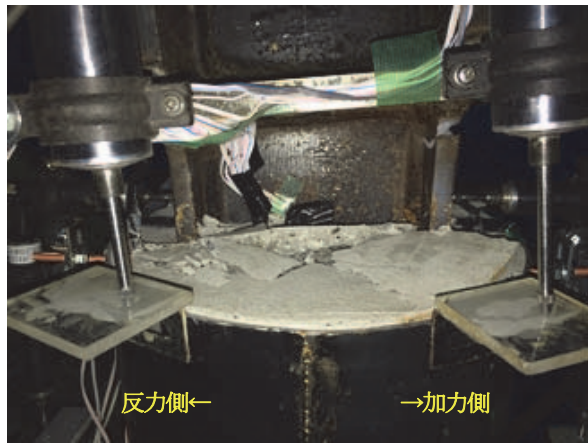


図-11 充填コンクリート上面ひび割れ

・接合部終局荷重： $P_{\text{gucal}} = 190.9 \text{ kN}$

となる。

以上の結果から、本試験体の最大耐力は差込部材の終局時の耐力に相当する。

3. 実験結果および考察

(1) 接合部の全体的な挙動

図-6に載荷点の荷重 - 鉛直変位曲線（以下、 $P - \delta$ 曲線という）を示す。

差込部材の降伏点（286MPa）に達したときの荷重 P_y と鉛直変位 δ_y は、押し込み時は $P_y = 62.3 \text{ kN}$ 、 $\delta_y = 6.8 \text{ mm}$ 、引抜き時は $P_y = -68.1 \text{ kN}$ 、 $\delta_y = -8.9 \text{ mm}$ であった。2 δ_y 以降は、押し込み引抜き時の鉛直変位平均（ $\delta_y = 7.8 \text{ mm}$ ）として整数倍の変位量で繰り返し載荷を実施した。

+3 δ_y （ $P = 112.1 \text{ kN}$ ）で充填コンクリート上面のひび割れが確認された。その後、押し込みは+6 δ_y で最大荷重（ $P = 124.7 \text{ kN}$ ）に達し、その後、荷重が低下し始めた。引抜きは-7 δ_y まで荷重は上昇した。+8 $\delta_y \cdot 1$ 回目（ $P_u = 112.6 \text{ kN}$ ）で差込部材は座屈を起こし、-8 $\delta_y \cdot 1$ 回目（ $P = -117.2 \text{ kN}$ ）で差込部材が破断したため、載荷を終了した。差込み部材降伏時の荷重は $P_y = 62.3 \text{ kN}$ 、変位は $\delta_y = 7.8 \text{ mm}$ であり、骨組モデルにより算出される降伏荷重（ $P_{\text{ycal}} = 62.0 \text{ kN}$ ）、降伏時変位（ $\delta_{\text{ycal}} = 6.8 \text{ mm}$ ）ともよく一致した結果が伺える。

図-7には、軸力とソケット接合部の差込部材の拔出し量の履歴を示す。

引抜き時に着目して、差込部材降伏時の-1 δ_y では拔出し量 $\delta_o < 0.1 \text{ mm}$ であり、ほとんど変状は確認できなかった。充填コンクリート上面にひび割れが確認できた-3 δ_y では、拔出し量 $\delta_o \approx 0.6 \text{ mm}$ 確認された。最大荷重時の-6 δ_y では、拔出し量 $\delta_o \approx 2.0 \text{ mm}$ 確認され、充填コンクリートのひび割れ進展とともに拔出しが進展したと推察される。終局時の-8 δ_y では差込部材に座屈変形や破

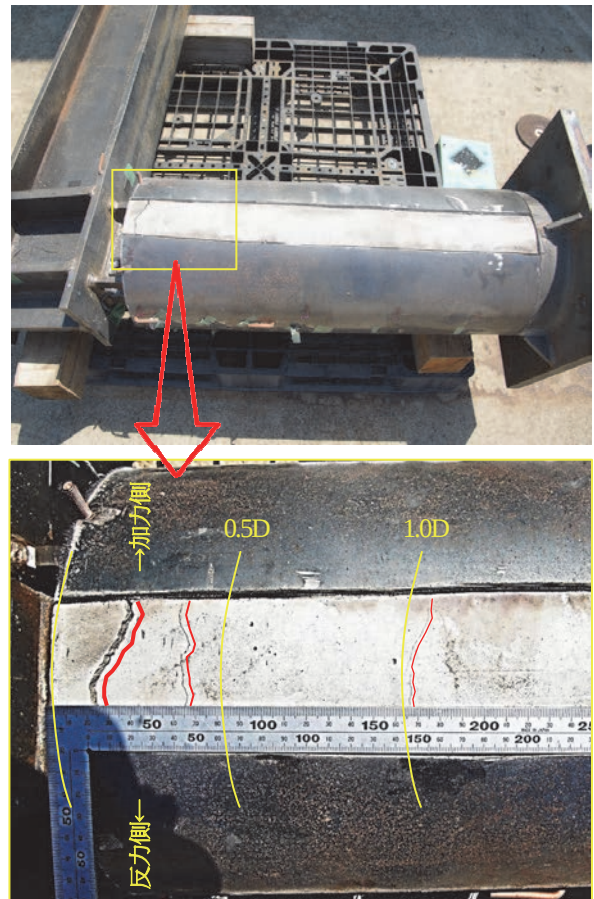


図-12 鋼管内部のコンクリートひび割れ

断が生じていたので、最終的な拔出し量は、-7 δ_y での拔出し量 $\delta_o \approx 2.6 \text{ mm}$ と確認されたが、拔出しが原因での著しい荷重低下を引き起こすような現象はみとめられない。

図-8には、荷重と鋼管上端の周方向ひずみの履歴を示す。鋼管の加力側の周方向ひずみをPB1x、反力側の周方向ひずみをPB2xで示す。

押し込み時には、差込部材からの支圧力が充填コンクリートを介して鋼管の加力側を周方向に広げるように伝えられるため、PB1xの周方向ひずみが卓越することが確認される。一方、引抜き時には鋼管の反力側を周方向に広げるため、PB2xの周方向ひずみが卓越することが確認される。また、双方は押し引きで対象に挙動していることが確認できる。充填コンクリートへのひび割れが確認された次の+4 δ_y において、周方向ひずみは最大1656 μ を示し、以降は載荷荷重は上がるものの周方向ひずみは低下する傾向にあり、充填コンクリートのひび割れが進展し、徐々に支圧力を伝達する機構が失われているものと推察される。図-9には、1.5D貫入位置（247.5mm）における周方向ひずみの履歴を示す。鋼管の加力側の周方向ひずみをPE1x、反力側の周方向ひずみをPE2xで示す。

ここでは、荷重増に応じて周方向ひずみも増加する傾向にあり、充填コンクリートのひび割れによる影響は殆

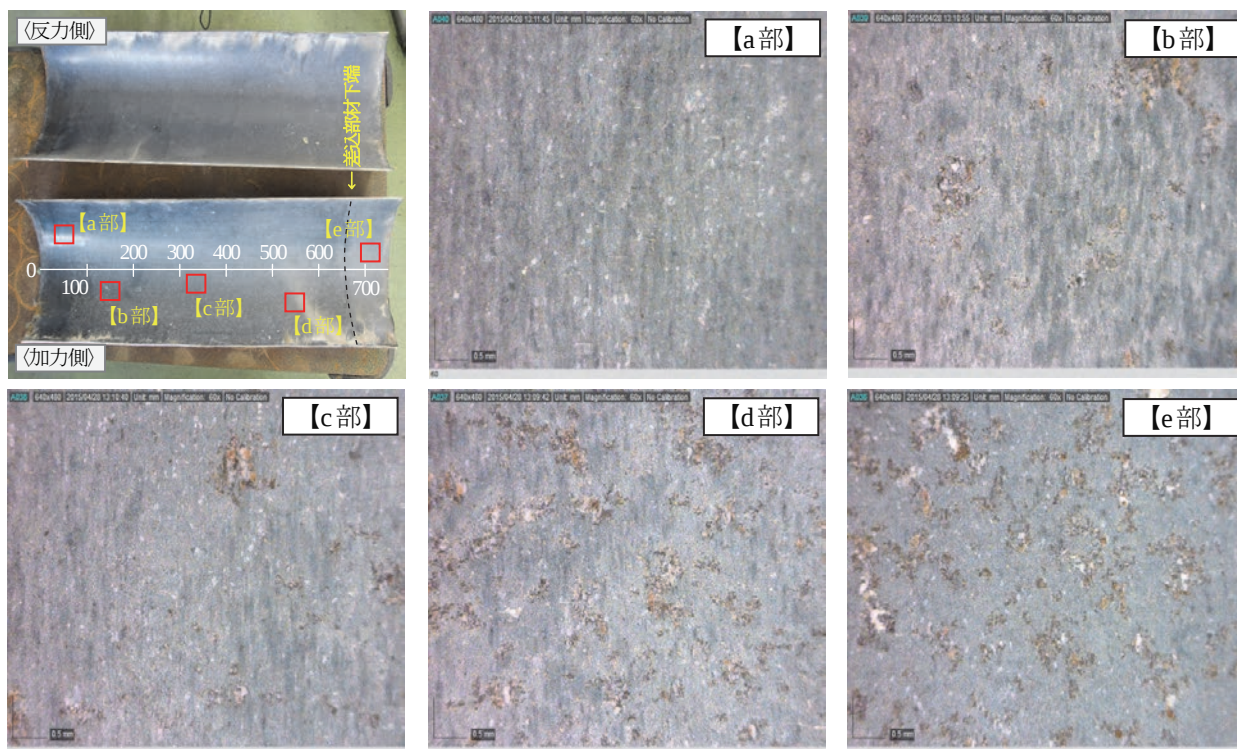


図-13 鋼管内部の状況と Microscope による摩擦跡分布状況

どないと推察される。

全体的な挙動として、 $P-\delta$ 曲線は終局時まで安定した紡錘型のループを示していることが確認できる。荷重交番点においてわずかにスリップしているが、これは載荷装置クレビスのピンのガタがよるものである。鋼管の周方向伸び開きや充填コンクリートのひび割れに起因する、差込部材の抜け出しや鋼管の塑性変形などのソケット接合部の脆性的な破壊に至らず、差込部材の終局状態で荷重を終了した。

(2) 破壊性状

a) 充填コンクリート

図-11に、 $-8\delta_y$ で差込部材が破断した時点の充填コンクリート上面のひび割れ状況を示す。充填コンクリート上面は、差込部材のフランジ端から斜め方向にひび割れが発生し、繰り返し載荷による差込部材の抜け出しと共に表面が剥がれるようにひび割れが確認された。

図-12には、載荷終了後の鋼管内の充填コンクリートのひび割れ状況を示す。なお、試験体側面方向からの確認状況である。鋼管内部のコンクリートのひび割れは、差込口から深さ165mm (1.0D貫入) 程度の範囲に集中しており、特に上端50mmまでのコンクリートひび割れが顕著であるが、全体的に損傷は少なく、抜出しも確認できない。

b) 鋼管と充填コンクリートの付着面

鋼管と充填コンクリートの付着面の性状を確認するた

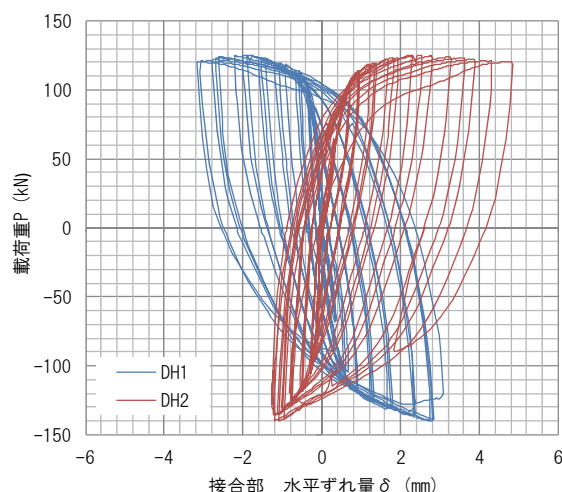


図-14 接合部差込部材と鋼管の相対変位

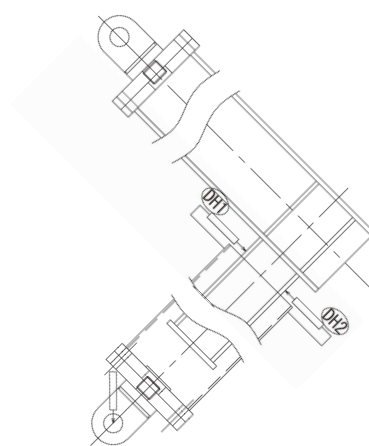


図-15 相対変位の計測位置

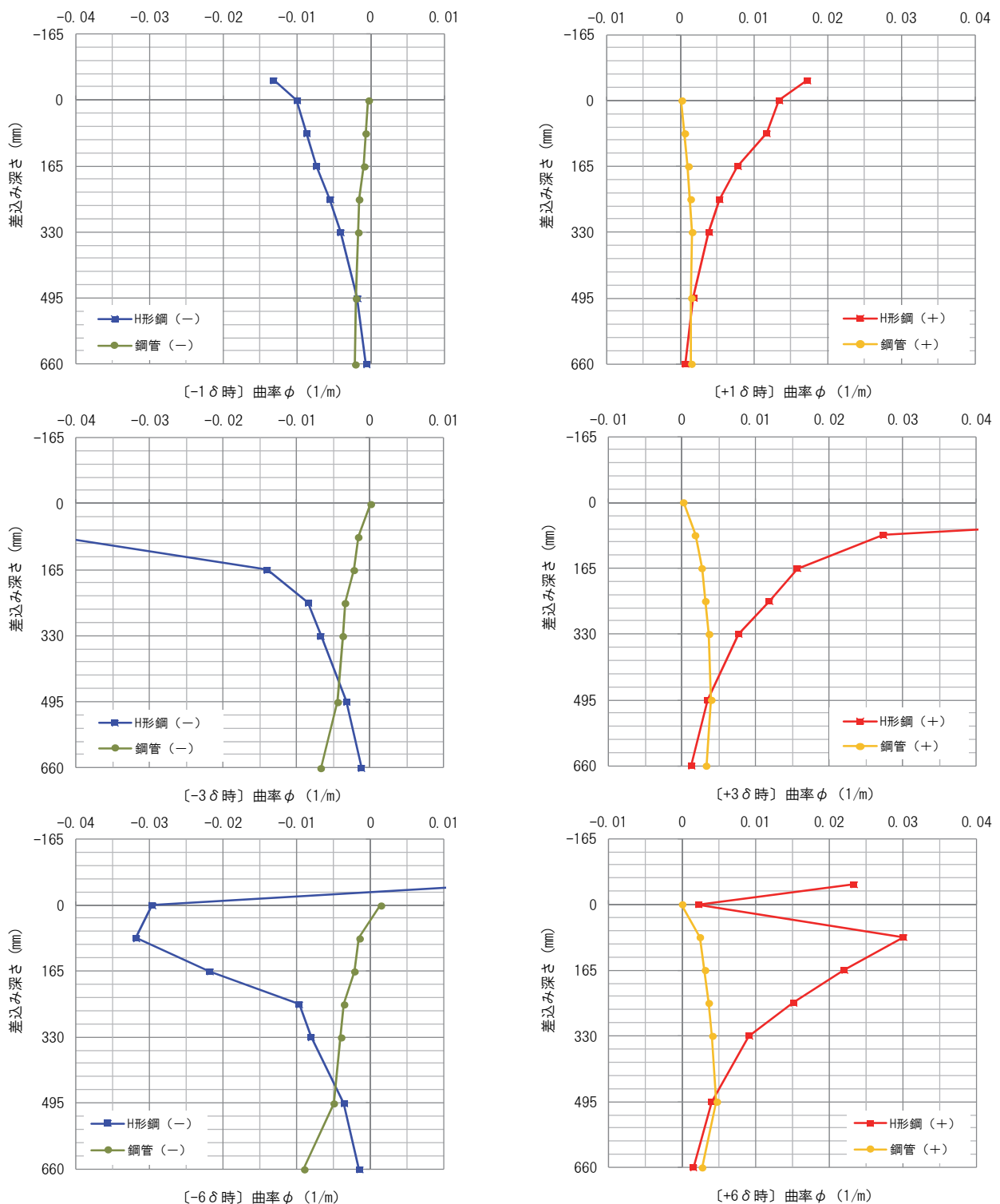


図-16 差込部材と鋼管の曲率分布と推移 ($\pm 1\delta y \rightarrow \pm 3\delta y \rightarrow \pm 6\delta y$)

め、荷終後の試験体の鋼管を解体し、目視観察を行った。図-13に解体後の鋼管内部状況を示す。

各部位の鋼管内面摩擦の観察から、ソケット接合部（鋼管上端）より50mm程度の箇所に位置する【a部】から165mm（1.0D貫入位置）の【b部】、330mm（2.0D貫入位置）の【c部】までは、充填コンクリートと鋼管内面の摩擦跡が顕著に確認できる。一方、3.0D～3.5D貫入相当に位置する【d部】にはやや摩擦跡が確認できるもの

の、それより上部に位置する箇所に比べて、摩擦跡が明らかに微細である。差込部材下端より下部に位置する【e部】については、摩擦跡は確認されない。

c) ソケット接合部差込部材と鋼管の相対変位

図-14に、差込部材と鋼管の相対変位履歴を示す。加力側の相対変位をDH1、反力側の相対変位をDH2で示す（図-15参照）。

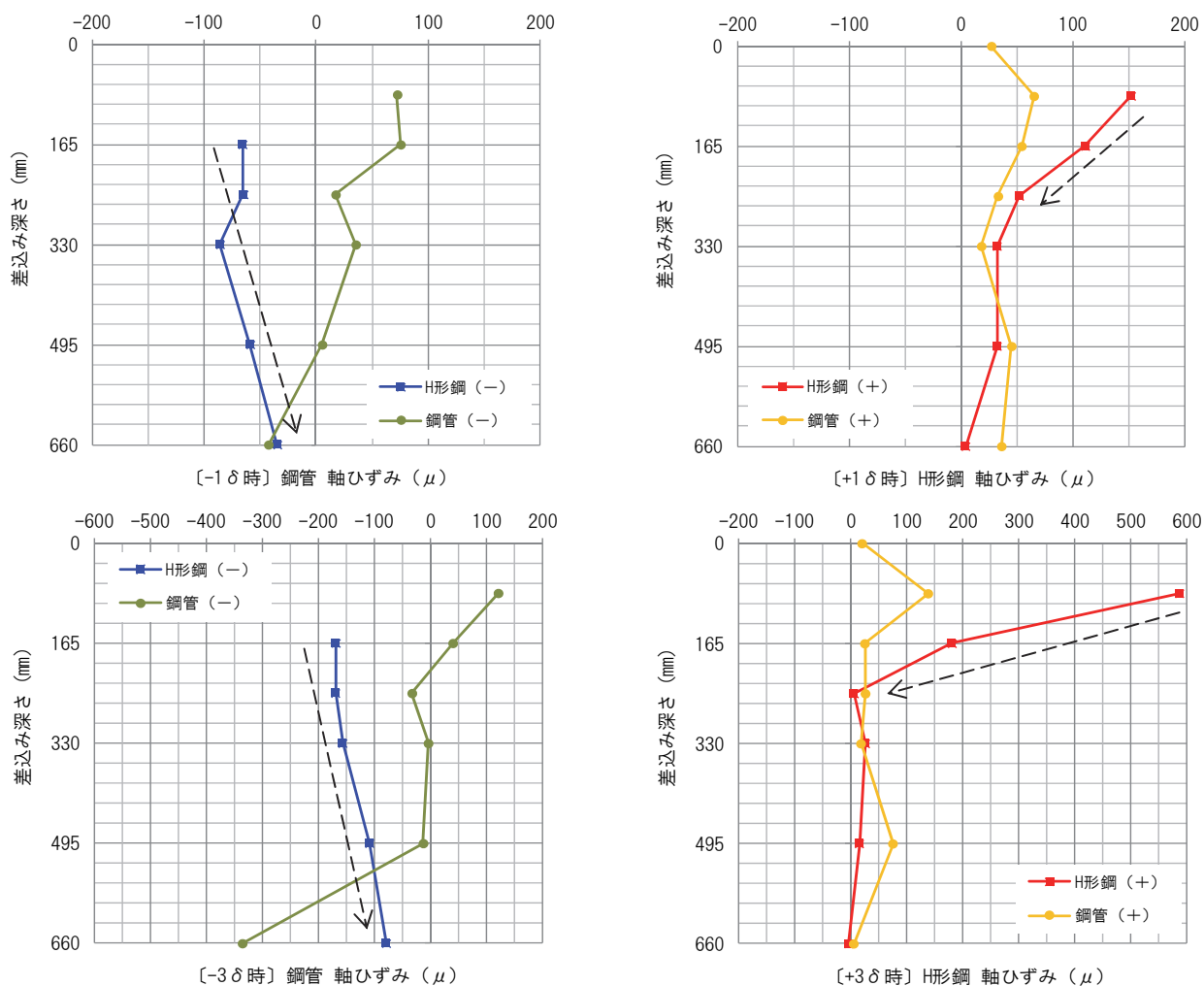


図-17 差込部材と鋼管の軸ひずみ分布と推移 ($\pm 1\delta y \rightarrow \pm 3\delta y$)

繰返し載荷により差込部材と充填コンクリートの間に隙間，ひび割れが生じた様子が伺える。加力側は相対変位ゼロ点を中心として安定した紡錘型のループを示しており，隙間等の発生により荷重低下を引き起こすような現象はみとめられなかった。一方，反力側は特に押込みの繰返し載荷により相対変位が累積していく状況が確認できる。終局時に反力側で最大4.8mmの相対変位が累積されているが，反力側についても，荷重低下を引き起こすような現象はみとめられなかった。

(3) 差込部材と鋼管の曲率 (ϕ) 分布と推移

図-16に，差込部材および鋼管の曲率分布と $\pm 1\delta y \rightarrow \pm 3\delta y \rightarrow \pm 6\delta y$ での推移を示す。全体的な推移から，弾性限にある $\pm 1\delta y$ においては，差込部材から鋼管に緩やかに応力伝達が行なわれている状況が確認できる。 $\pm 3\delta y$ にサイクルが進むに従い，概ね深さ165mm (1.0D) の位置に塑性ひんじを形成する挙動が確認できる。最大荷重時の $\pm 6\delta y$ では，塑性ひんじは1.5Dの位置まで進展していることがわかる。鋼管の周方向ひずみの観察 (図-8, 9, 10) から，深さ1.5Dまでの区間の充填コンクリート

のひび割れにより，サイクルを経るごとに差込部材からの支圧力の伝達は低減する傾向にあるが，この区間の曲率の変化率が大きいことに着目すると，曲げモーメント伝達は深さ1.5Dまでに大半行われていると推察される。一方，深さ1.5D～4.0D区間では緩やかに曲率が変化していくことから，曲げモーメントの伝達も緩やかに行われていると推察される。最終的には，差込部材の全貫入区間で鋼管への曲げモーメント伝達が行なわれている。

(4) 差込部材と鋼管の軸ひずみ分布と推移

図-17に， $\pm 1\delta y$ と $\pm 3\delta y$ における差込部材および鋼管の軸ひずみ分布を示す。

傾向として，押込み時においては深さ1.5Dまでの間に鋼管に軸力が概ね伝達されていることが確認できる。鋼管に発生する軸ひずみが差込部材の軸ひずみに比べて小さいのは，充填コンクリートが軸力分担をしていることが理由である。一方，引抜き時においては深さ4.0Dまでの差込部材全貫入区間で緩やかに軸力を伝達する傾向が確認できる。これは，鋼管内部の摩擦跡分布状況の観察 (図-13) で3.0D～3.5Dまで摩擦跡分布が確認できた

ことと傾向として一致する。なお、引抜き時において差込部材の4.0D貫入位置において軸ひずみが確認できるが、これは差込部材端に取付けたベースプレートの影響と考えられる。

4. 結論

本研究では、ソケット方式継手の差込部材の差込長を大きくする影響を確認するため、実構造物相当の約1/3縮尺モデル試験体を用いて繰り返し載荷実験を行った。得られた主な知見を以下にまとめる。

- (1) 繰り返し載荷実験の結果、ソケット接合部の終局耐力は124.7kN程度であり、設計上の限界耐力とされる降伏耐力62.3kNの約2倍であった。この結果、今回採用した設計方法で、この差込長を大きくしたソケット接合部の強度と剛性を確保できることを確認した。また、差込長を大きくすることで付着力を高め、ずれ止めの省略に効果があることを確認した。
- (2) 曲率の分布から、正曲げ、負曲げともに、概ね深

さ1.5Dまでの区間で大半の曲げモーメントを差込部材から鋼管へ伝達しており、それ以上の区間でも緩やかに伝達を続けていることが確認できた。

- (3) 軸ひずみの分布から、押込み時においては概ね深さ1.5Dまでの区間で軸力伝達しており、引抜き時においては、差込長全域（4.0D）で軸力伝達していることが確認できた。

今後は、充填コンクリートひび割れと、差込部材と充填コンクリートとの隙間の影響が、本接合部の応力伝達性状に及ぼす影響について、3次元有限要素解析による数値解析を実施し、本研究の結果と比較することにより、応力伝達性状を明確化し、設計法を確立していきたい。

謝辞：本研究における実験にご協力いただきました日鉄住金環境株式会社の関係者に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：複合構造標準示方書，pp.401-406，2009.
- 2) 東日本旅客鉄道株式会社：設計マニュアル III 鋼・合成構造物編 ソケット式接合部設計マニュアル，pp.1-7，2006.

CYCLIC LOADING TEST ON STEEL FOOTING TO STEEL PIPE PILE CONNECTION WITH SOCKET TYPE CONNECTION

Shuji SEKIGUCHI, Hiroshi ONISHI, Shoji IWASAKI, Yoshiaki KUSAKA
and Akihiko YOKOO

In structure construction of the retaining wall and the tide embankment, authors are considering the structure for connecting a steel pipe pile to a steel footing for the purpose of simplifying of the structure and rationalization of construction. We propose the socket type joint in a pile head joint that is inserted the plug member extended from a steel footing in a steel pipe pile head and is integrated by filling concrete. The socket type joint is common to equip shear connectors at the connection. However, we are trying to omit the shear connector and considering making better the composite effect of the steel pipe piles and concrete by increasing the insertion length. In this study, the cyclic loading tests were carried out for specimens simulating the connection of a steel footing and a steel pipe pile. The results of the cyclic loading tests showed the composite effect of an insertion member consists of the plug member, the steel pipe piles and filling concrete increased. Therefore, we confirmed that the shear connector can be omitted.