論文　軸方向鉄筋端部に定着体を取り付けた杭・柱接合部に関する交番載荷試験による検討

森本　慎二[*1]・小林　寿子[*1]・井口　重信[*2]

要旨：鉄道用鉄筋コンクリートラーメン高架橋の杭・柱接合部において，杭と柱の軸方向鉄筋端部に定着体を取り付け，さらにその周囲を鋼管で拘束することで，両者の定着長を短くすることを検討している。杭，柱およびその接合部を模した試験体を製作し静的水平交番載荷試験を実施した。その結果，定着長が短い場合，接合部において杭と柱の軸方向鉄筋の定着体相互に挟まれる部分にすり鉢状の破壊面が生じて破壊に至ることを確認した。

キーワード：接合部，杭，柱，定着体，交番載荷試験，高架橋

1. はじめに

鉄筋コンクリート高架橋の杭と柱の接合部において接合部を鋼管で補強した構造が用いられることがある。この構造は，接合部構築の為の掘削および仮土留めの施工を省略できる利点がある。一方で近年の耐震基準を満足するために，太径化する鉄筋に対し，鋼管内への杭および柱の軸方向鉄筋の定着を満足するために，鋼管の長さも鉄筋定着長に応じて長くなり，材料費等が増大するという問題もある。そのような問題を鑑み，**図－１**に示すように，接合部の柱および杭の軸方向鉄筋に定着体を設けることにより，定着長を短くし，鋼管長を短くする構造を検討している。既往の研究[1,2]においては，接合部のみを取り出し，モデル化した要素試験を実施しており，杭および，柱鉄筋の定着体に挟まれた箇所において，定着長にかかわらず、すり鉢状の破壊面が形成され，押し抜きせん断を思わせる破壊となった。

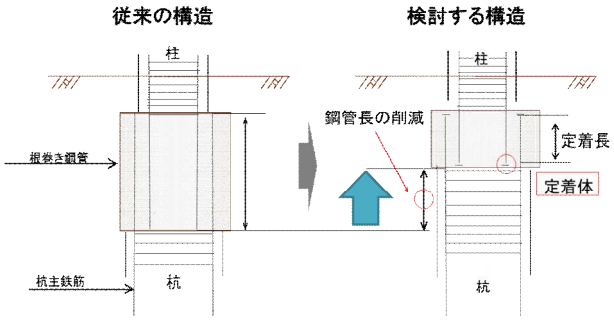
そこで，本研究では柱，柱と杭の接合部を模した供試体を作成し，柱部に水平変位を与える正負交番載荷試験により，柱や接合部の破壊形態を確認したので，その結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

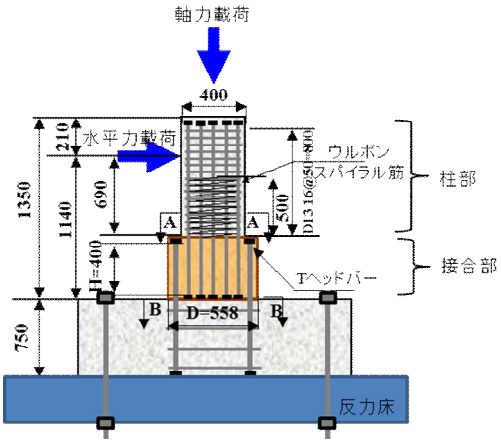
試験に用いた供試体の諸元および，材料試験の結果を**表－1**に示す。供試体は柱，鋼管で補強された杭・接合部，およびフーチング部から構成される。供試体は合計４体であり，鉄筋定着長，鋼管径，柱鉄筋と杭鉄筋の離隔等をパラメータとした。

柱の外寸および配筋は供試体によらず同一のものである。杭の配筋については No.1，No.2 および No.4 は同一であるが，No.3 のみ鋼管の径を大きくしたためそれに伴い，配置円半径を大きくしたものとしている。また，柱の変形性能を確保するために，基部から上部へ 500 ㎜

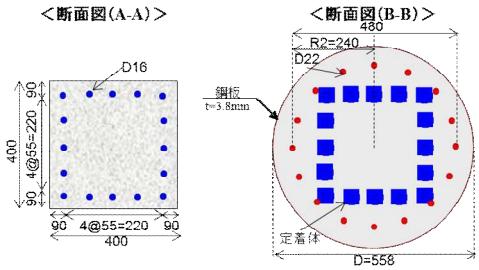


図－１　杭と柱の接合構造

の区間にウルボンスパイラル筋（鉄筋径 9.0 ㎜外径 200 ㎜）を 20 ㎜ピッチで配置した。供試体の正面図および，断面図を**図－２**および**図－３**に示す。



図－２　供試体正面図（No. 1）



図－３　供試体断面図（No. 1）

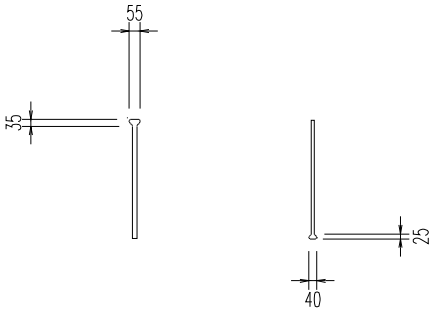
*1 東日本旅客鉄道株式会社　上信越工事事務所　工事管理室　(正会員)
*2 東日本旅客鉄道株式会社　建設工事部　構造技術センター　(正会員)

表－1　供試体諸元

試験体名称	諸元													材料試験結果					
	鋼管							t/Ri	柱鉄筋		杭鉄筋			コンクリート（柱）	コンクリート（フーチング）	鋼管		柱鉄筋	
	外径 D(mm)	内径 Di(mm)	内半径 Ri(mm)	定着長 H(mm)	厚さ t(mm)	規格	定着長/柱鉄筋径		規格	本数	配置円半径 R2(mm)	規格	本数	圧縮強度 f'c(N/mm^2)	圧縮強度 f'c(N/mm^2)	降伏ひずみ ε_{sy}(μ)	降伏応力 f_{sy}(N/mm^2)	降伏ひずみ ε_{sy}(μ)	降伏応力 f_{sy}(N/mm^2)
No.1	558.8	551.2	275.6	400	3.8	SM400	25	0.014	SD345　D16	16	240.0	SD390　D22	16	22.8	22.6	2113	280.8	2043	364.1
No.2	558.8	551.2	275.6	190	3.8	SM400	12	0.014	SD345　D16	16	240.0	SD390　D22	16	18.8	20.7	1734	282.5	1941	370.2
No.3	818.8	811.2	405.6	190	3.8	SM400	12	0.009	SD345　D16	16	370.0	SD390　D22	16	24.7	22.2	1814	361.6	1945	371.9
No.4	558.8	551.2	275.6	240	3.8	SM400	15	0.014	SD345　D16	16	240.0	SD390　D22	16	26.8	30.2	1831	375.5	2251	407.7

2.2 定着体

本供試体の特徴として，柱および杭の軸方向鉄筋の端部に定着長の低減を目的として，機械式定着体を設けていることが挙げられる。本研究の供試体で用いた定着体は第一高周波工業㈱の T ヘッドバーである。柱鉄筋には TH16 を，杭鉄筋には TH22 を用いた。**図 - 4** に本試験で用いた T ヘッドバーを示す。



杭鉄筋Tヘッドバー（TH22）　　柱鉄筋Tヘッドバー（TH16）

図 - 4　T ヘッドバー詳細図

2.3 試験方法

供試体は，フーチング部の隅に空けた穴に PC 鋼棒を通し，反力床にボルトで固定した。試験は，柱上部に軸力 1.00N/mm^2 を載荷した状態で，**図―2** に示すように，柱基部から 690 mmの高さに水平方向に正負交番で載荷を行った。載荷方法としては，最初に荷重制御で載荷を行い，最外縁の軸方向鉄筋のひずみが降伏ひずみに達した時の変位を降伏変位（δ_y）とし，その時の荷重を降伏荷重（P_y）とした。以後，正側，負側ともに，変位制御で載荷することとし，降伏変位の整数倍の値で順次変位を増加させていった。載荷回数は各載荷変位につき，1 回の載荷を基本としたが，No4 供試体のみ，繰り返し載荷の影響を把握するために，各載荷変位に対し，3 回繰り返し載荷を行った。供試体の設置の状況写真を**写真―1** に示す。

2.4 計測項目

計測項目としては，柱および杭の軸方向鉄筋，補強鋼管のひずみをひずみゲージで計測した。また，柱水平変位を図―2 中の水平力載荷位置にてワイヤー式変位計で計測した。フーチング部にシース管を設け，柱軸方向鉄筋の定着体にワイヤー変位計を設置し，直接柱鉄筋の抜け出し量を計測した。ひずみの計測位置図を**図 - 5** および**図 - 6** に示す。

写真―1　供試体設置状況

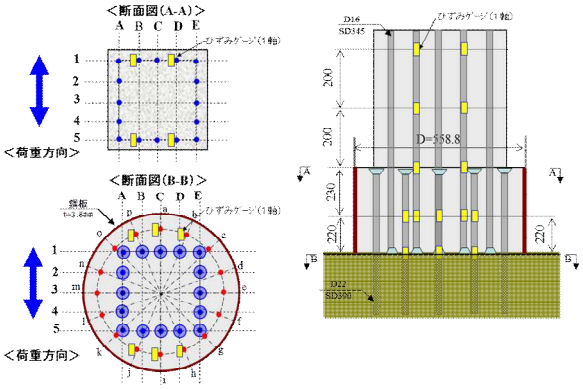


図 - 5　鉄筋ひずみ計測位置図（No. 1）

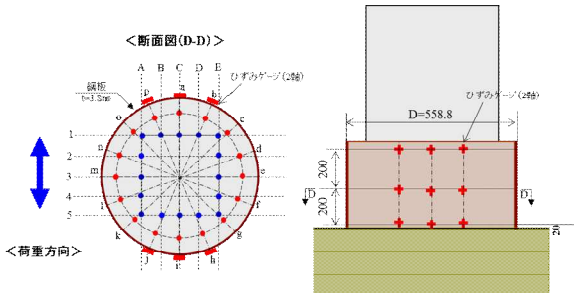


図 - 6　鋼管ひずみ計測位置図（No. 1）

3. 実験結果

3.1 荷重・変位関係および破壊形態について

図 - 7 に各供試体の荷重・変位関係のグラフを示す。また，**写真 - 2** に破壊の状況の写真を示す。No.1 供試体を標準として，No.2 供試体は定着長 H を短くしたもの，No.3 は，鋼管の径を大きくし，柱軸方向鉄筋と，杭軸方

向鉄筋の離隔を大きくとったもの，No.4 供試体には 3 回繰り返し載荷の影響を確認するためものとして実施した。

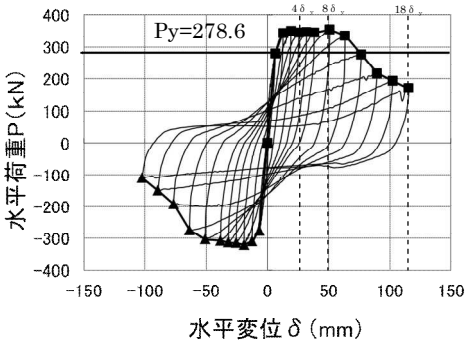
No.1 供試体は柱基部にひび割れが発生し，最外縁の柱軸方向鉄筋が降伏した。４δ_y載荷後までは，基部より高さ 400 ㎜以下で曲げひび割れが進展していったが，同時に接合部上面ので柱基部から鋼管まで放射状のひび割れが進展した。その後曲げ変形が進行し，柱側の損傷が顕著になり８δ_yで最大荷重を迎えると柱基部のひび割れが顕著に進展していき，柱基部でのかぶりコンクリートが圧壊した。それに伴い荷重が緩やかに低下していき，18δ_yで最外縁の柱軸方向鉄筋が破断し，載荷を終了した。

No.2 供試体は, No.1 供試体同様に, 柱基部のひび割れ, 最外縁の柱軸方向鉄筋の降伏および，かぶりコンクリートの圧壊に伴う荷重低下が見られた。接合部に着目すると，１δ_y載荷終了時に，柱基部から鋼管へ向けての放射状のひびわれが発生し，２δ_y載荷終了時に鋼管内のコンクリートの浮き上がりが見られた。その後放射状のひび割れおよび，鋼管内のコンクリートの浮き上がりが進展し，１０δ_y載荷終了時には接合部上面のコンクリートが粉砕化した。１２δ_y終了時には杭軸方向鉄筋の端部につけた定着体のまわりのコンクリートがえぐり出され，定着体がほぼむき出しの状態になるまで，コンクリートが破壊した。この 12δ以後に特に急激な荷重の低下が見られ，軸方向鉄筋の破断を待たずに載荷を終了した。

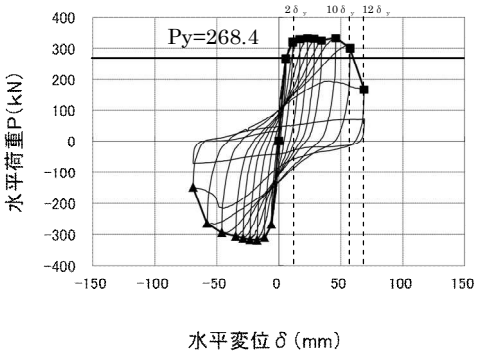
No.3 供試体は軸方向鉄筋降伏後，基部でのひび割れの進展を経て，9δ以後急激な荷重の低下が見られた。この際, かぶりコンクリートの圧壊はさほど見られなかった。接合部内については No.2 供試体と同様に柱基部から鋼管方向への放射状のひび割れが発生し，鋼管内のコンクリートの浮き上がりが見られ，柱基部周辺のコンクリートが粉砕化していった。その後，９δ_y載荷終了時には杭軸方向鉄筋の定着体を結ぶように円周方向のひび割れが発生し，接合部内での破壊が顕著となった。

No.4 供試体については，各載荷変位において 3 回繰り返し載荷を実施したが，No.3 供試体のような，急激な荷重の低下および，接合部内での破壊はみられず，緩やかに荷重が低下していき，柱軸方向鉄筋の破断をもって載荷を終了した。

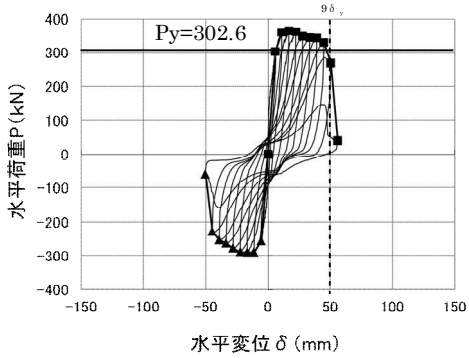
No.2 および No.3 供試体での急激な荷重の低下は後述する鉄筋の抜け出しにより接合部内が破壊していることに起因していると考えた。　接合部内の破壊の状況として供試体 No.3 の接合部上面のコンクリートが浮き上がった状況の写真および，試験終了後に吊り上げた写真を**写真 - 3** に示す。接合部内ですり鉢状の破壊面が形成されていることを確認した。



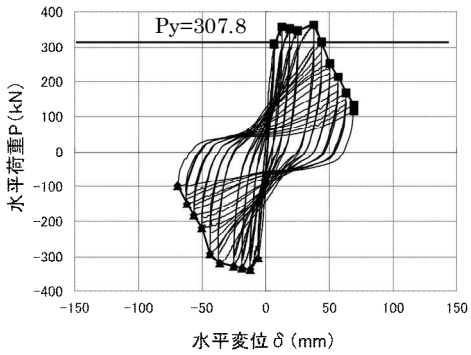
（供試体 No. 1）



（供試体 No. 2）



（供試体 No. 3）



（供試体 No. 4）

図 - 7　荷重・変位関係

最大荷重時　　終局時

（供試体 No. 1）

最大荷重時　　終局時

（供試体 No. 2）

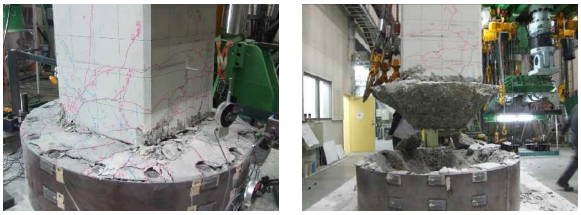
最大荷重時　　終局時

（供試体 No. 3）

最大荷重時　　終局時

（供試体 No. 4）

写真 - 2　供試体破壊状況写真



接合部上面　　接合部内

写真 - 3　接合部での破壊の状況（No. 3）

以上より，今回の交番載荷試験での破壊形態は次の 2 つのタイプに分類できる。

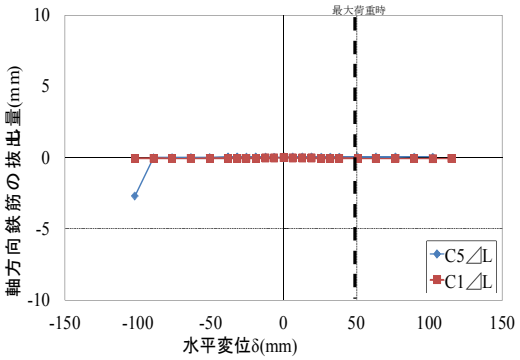
① 基部での曲げ破壊（No.1，No.4）

② 杭・柱接合部内での破壊（No.2，No.3）

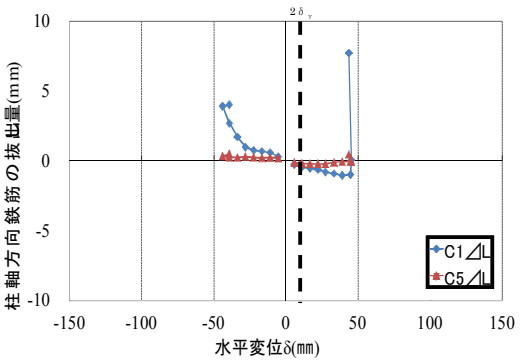
タイプ①は，鋼管内への軸方向鉄筋の定着長が鉄筋径の 15 倍以上ある供試体であり，タイプ②は 12 倍と定着長が短く，破壊形態の違いは定着長によるものと推察された。すなわち、定着長が 15 倍以上あれば基部での曲げ破壊となると考えた。

3.2 鉄筋抜け出し量

No. 1 供試体と No.3 供試体の鉄筋の抜け出し量と柱の水平変位の関係を**図 - 8** に示す。抜け出し量とは，柱軸方向鉄筋端部に設けた定着体に直接設置したワイヤー変位計の計測値である。凡例に示す C 1 とは**図―5** の断面図の C 列 1 行の鉄筋の計測値を示しており，C 5 も同様である。No.1 供試体は最大荷重までは抜け出しがほとんど発生しておらず，その後も抜け出しが大きく進展することはなかった。No.3 供試体は，$2\delta_y$ 載荷後には抜け出しが生じ，載荷変位の増大に伴い抜け出しも進展していき，最終的には 7 ㎜程度と大きな抜け出し量となった。No.2，No.3 供試体で見られた水平荷重の大きな低下もこの定着体の抜け出しに対応して生じていることが確認できた。No.1 供試体に対し、No.3 供試体は鋼管径が大きく、また、定着長が短い供試体である。定着長が短いことで、抜け出しが生じやすくなったことに加え、鋼管径が大きく、鋼管による接合部の拘束効果があまり機能しなかったことが、大きな抜け出しを生じさせた原因と考えられる。



（供試体 No. 1）



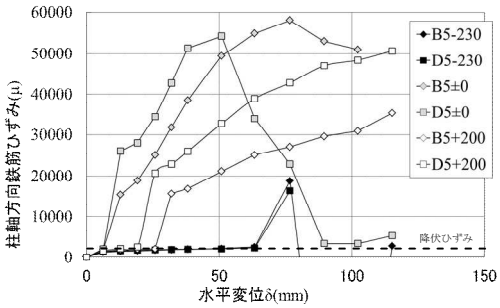
（供試体 No. 3）

図 - 8　鉄筋抜け出し量・変位関係

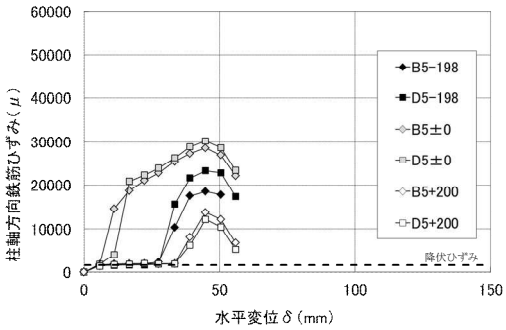
3.3 軸方向鉄筋および鋼管のひずみ

図―9 に柱軸方向鉄筋のひずみと柱水平変位の関係を示す。凡例の添え字は柱基部からの高さを示している。

No.1 供試体では柱基部が降伏し，次いで，基部よりも上部のひずみが進展し，降伏した。その後，接合部内の定着体付近の鉄筋のひずみも進展した。５δ_y以後のひずみは柱基部よりも上部が顕著となった。このことからも No.1 供試体では５δ_y以後，柱基部での曲げ損傷が進展し，接合部内での損傷は起こらず，柱基部での曲げ破壊で終局状態を迎えたものと推察された。一方，No.3 供試体では最初に，柱基部でのひずみが卓越し降伏したことについては No.1 供試体と同様であるが，次にひずみが進展したのは，接合部内の定着体付近の鉄筋であった。この時点で，接合部内の破壊を引き起こす定着体の抜け出しが顕著になったと考えられる。



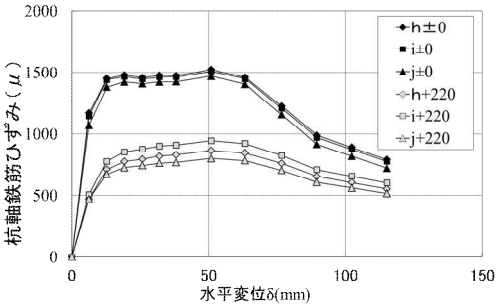
（供試体 No. 1）



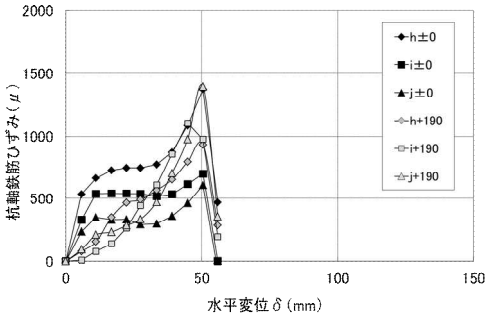
（供試体 No. 3）

図 - ９　柱鉄筋ひずみ・変位関係

次に，図－１０に杭軸方向鉄筋のひずみと柱水平変位の関係を示す。杭の軸方向鉄筋のひずみについては，最大で 1500μ程度であり，どれも降伏に達することはなかった。



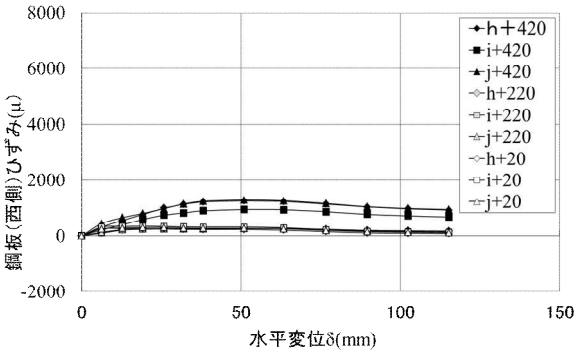
（供試体 No. 1）



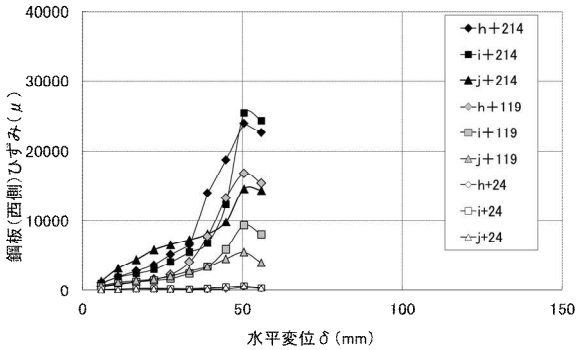
（供試体 No. 3）

図 - １０　杭鉄筋ひずみ・変位関係

次に，図－１１に鋼管の周方向のひずみと柱水平変位の関係を示す。凡例の英字は図―６中に図示した英字の位置に対応しており、添え字は鋼管下端からの高さを示している。どちらの供試体も鋼管上部でのひずみが卓越していることが見て取れる。これは，杭軸方向鉄筋端部の定着体からの応力を鋼管が拘束した効果と考えられる。No.1 供試体では，最大ひずみは 2000μ以下と小さい値であるため，接合部の拘束効果が失われることはなかったと考えられ，接合部内での破壊ではない①のタイプの破壊形態となったと考えられる。一方で No.3 供試体については，鋼管が降伏しており，上部においては 20000μを超過しており，鋼管の変形が卓越し拘束効果も弱まり鉄筋の抜け出しが発生し，②のタイプの接合部内での破壊形態となった要因の一つと推察された。



（供試体 No. 1）



（供試体 No. 3）

図 - １１　鋼管ひずみ・変位関係

4. 結論

杭・柱の軸方向鉄筋端部に定着体を取り付け，その周囲を鋼管で拘束することで定着長を短くする接合部構造について、縮小模型を用いた静的水平交番載荷試験により検討した。その結果，次のことが分かった。

①通常の柱のように基部で曲げ破壊を起こすものと，接合部で定着体の抜け出しが発生し，破壊に至る破壊形態の2種類があることを確認した。

②破壊形態を分けている要因の一つは定着長であると考えられ, 今回の試験においては鉄筋径の15倍以上あれば, 柱基部での曲げ破壊となることを確認した。

※参考文献

1) 井口重信，坂本真紀，滝沢 聡：軸方向鉄筋端部に定着体を取り付けた杭・柱・地中梁接合部に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.319-324，2012

2) 井口重信，坂本真紀，滝沢 聡：軸方向鉄筋端部に定着体を取り付けた杭・柱・地中梁接合部に関する実験的検討（曲げ載荷試験），コンクリート工学年次論文集，Vol.35 ，No.2，pp.277-282，2013