

論文 場所打ち杭の杭頭半剛接合部の曲げ終局強度に関する実験的研究

伴 幸雄^{*1}・山本 俊彦^{*2}・山田 和夫^{*3}・岡田 亨^{*4}

要旨：場所打ち杭の杭頭部において、鋼管を用い半剛接合とした場合に、その曲げ性能を正しく評価することが重要となる。そこで、鋼管の厚さを実験変数として、半剛接合部に純曲げを作用させる要素実験を行い、曲げ終局強度についての検証を行った。その結果、本研究で用いた鋼管の厚さの範囲内において、曲げ耐力については同程度の値となったが、その破壊形式に違いが有ること、鋼管の拘束効果を考慮したコンクリートの圧縮強度は鋼管の厚さに比例しないことなどを明らかにした。

キーワード：場所打ち杭, 杭頭半剛接工法, 曲げ終局強度

1. はじめに

場所打ち杭の杭頭部を半剛接合とした場合、その曲げ性能を正しく評価することが重要となる。しかし、曲げ終局強度を計算するためには、鋼管によるコンクリートの拘束効果や鋼管の軸応力負担など、さまざまな要因を定量的に評価する必要がある¹⁾。

そこで、本研究では半剛接合部に純曲げを作用させる要素実験を行い、拘束効果を定量的に評価するとともに、曲げ終局強度を決定する要因について検証を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の概要を表-1に形状および配筋の状況を図-1に示す。

試験体は、長さ1125mm、直径400mmの杭体に、コンクリートをあらかじめ充填した長さ250mm、直径 $D=267.4\text{mm}$ の鋼管をそれぞれ100mmずつ杭体端部に埋め込み、半剛接合とした形状である。また、接合部に応力を伝達させるために、鋼管の内側に沿わせて、芯鉄筋を配筋した。なお、鋼管と芯鉄筋は溶接していない。実験変数は鋼管の厚さ t として4種類($t=6.0$,

3.2, 1.6, 0)を設定し、鋼管によるコンクリートの拘束効果の影響などについて検証した。

表-1 試験体概要

	鋼管厚	杭体	芯鉄筋
E1	6.0mm	杭長 1125mm	8-D13
E2	3.2mm	杭径 400mm	部材内定着
E3	1.6mm	主筋 12-D16	鋼管内側に配筋
E4	無	せん断補強筋 D6@45	

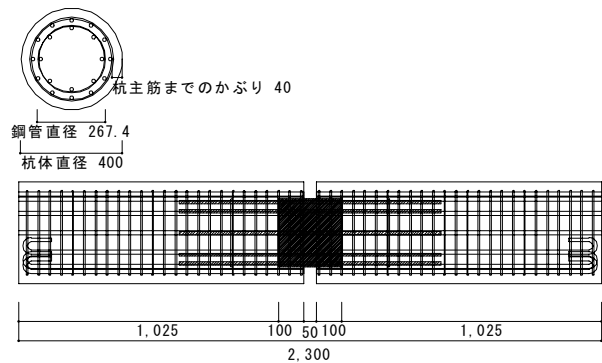


図-1 試験体形状および配筋状況

2.2 実験概要

載荷状況を図-2に示す。載荷は、鉛直アクチュエーターを2基使用し、支持点と試験体中央部の部材角 R を制御し静的加力を行った。支持点、加力点ともに回転支承を使用し、接合部

*1 矢作建設工業(株) 建築技術部 (正会員)

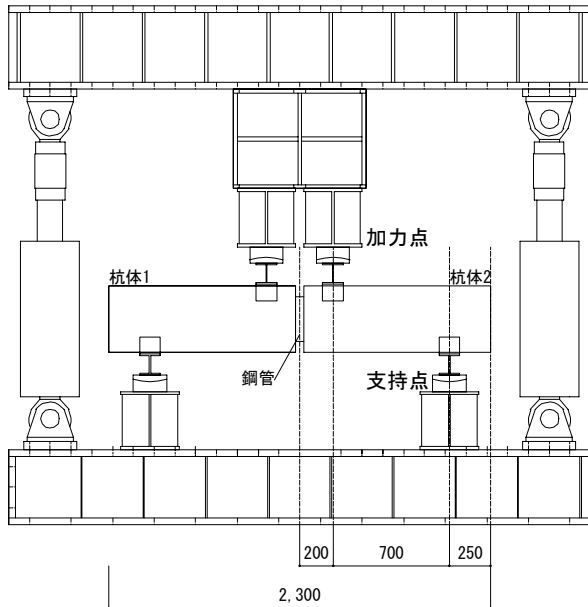
*2 大同工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 愛知工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*4 ヨーコン(株) 技術部 (正会員)

には曲げモーメントのみが作用するようにした。

加力サイクルは、 $R=1/1000, 1/400$ で 1 回、 $R=1/200, 1/100, 1/50, 1/25, 1/20$ で 2 回、 $R=1/10$ で 1 回、1 方向繰返し载荷を行った。



図－２ 载荷状況

2.3 使用材料および製作方法

本実験で使用したコンクリートおよび鋼材の材料特性を表－２、表－３に示す。E1 は $t=6.0$ の鋼管の既製品を使用し、E2, E3 は $t=3.2, 1.6$ の平鋼を加工し、鋼管としたものを使用した。

製作の都合上、杭体は片側ずつ 2 回に分けて打設を行っている。コンクリートのテストピースは全て現場封緘養生とした。

鋼管内部のコンクリートは、実施工時において強度低下の可能性がある。そこで、鋼管内部にはあらかじめ強度の低いコンクリートを充填した。

表－２ コンクリートの材料特性(加力時)

使用箇所	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
杭体 1	31.5	25.6	2.95
杭体 2	26.6	23.1	2.48
鋼管内部	15.7	19.1	1.69

表－３ 鋼材の材料特性

	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	使用箇所
D16	433	578	181	主筋
D13	380	542	185	芯鉄筋
D6	432	502	179	せん断補強筋
t6.0	353	451	206*	鋼管(E1)
t3.2	328	404	201	鋼管(E2)
t1.6	224	351	189	鋼管(E3)

* 公称値

3. 実験結果概要および考察

実験から得られた最大曲げモーメントについての結果を表－４に示す。鋼管を使用したタイプでは、最大曲げモーメントを E1 と比較すると 1.03(E2), 0.96(E3)程度であり、鋼管の厚さによっては大きな差は見られなかった。しかし、鋼管を使用していない E4 は E1 と比較し、0.74 程度と大きく低下している。この結果から、径厚比 (t/D) が 0.0060 から 0.0224 の間では、鋼管厚さが最大曲げモーメントに与える影響は小さく、鋼管が無い場合、最大曲げモーメントは大きく低下することが分かる。

表－４ 最大曲げモーメント

	最大モーメント(kN・m)	E1 との比
E1	75.0	1.00
E2	76.9	1.03
E3	72.2	0.96
E4	57.7	0.74

3.1 モーメント－部材角関係および破壊状況

モーメント－部材角の関係を図－３に、 $R=1/100$ 終了時、加力終了時のひび割れの状況を図－４に示す。

E1 では、 $R=1/200$ において杭体端部に軸方向ひび割れが、 $R=1/100$ において杭体中央部下面に曲げひび割れ、鋼管の埋め込み端面に沿ったひび割れが発生した。その後、軸方向のひび割れ

が多数発生し鋼管の抜け出しが目視で確認できたが、 $R=1/10$ まで耐力は低下することも無く安定した曲げ性能を示した。

E2 は E1 とほぼ同様な挙動を示した。鋼管厚が E1 の 1/2 程度であるが、曲げ耐力は E1 より僅かであるが高い値をとった。

E3 のひび割れ状況は E1, E2 とほぼ同じであった。しかし、 $R=1/25$ で鋼管の上部で局部座屈が発生した。

E4 では、杭体中央部下面に曲げひび割れが発生したが、杭体端部には軸方向ひび割れがほとんど発生してなかった。これは、軸方向ひび割れは鋼管を杭体端部で拘束することによって発生していることを示している。 $R=1/10$ 加力途中で最下段の芯鉄筋が破断した。その結果、大きく耐力は低下したが、脆性的な破壊をすることは無かった。

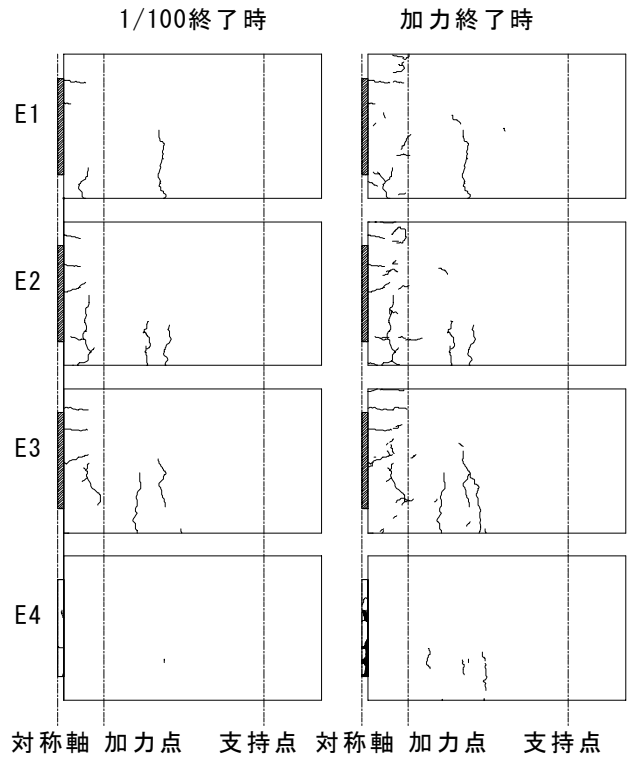


図-4 ひび割れ状況(展開図)

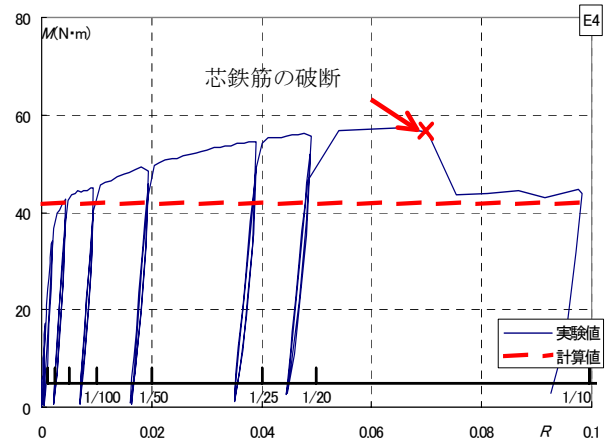
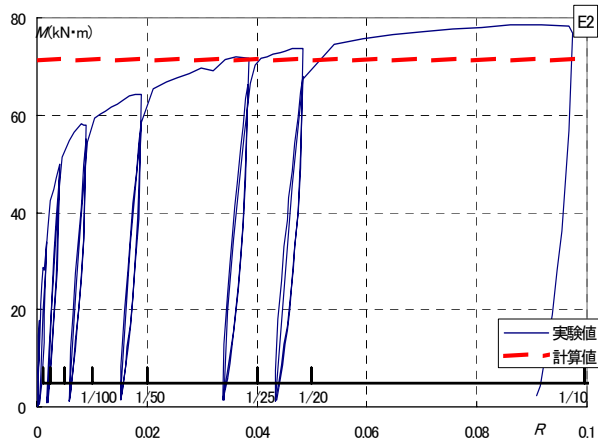
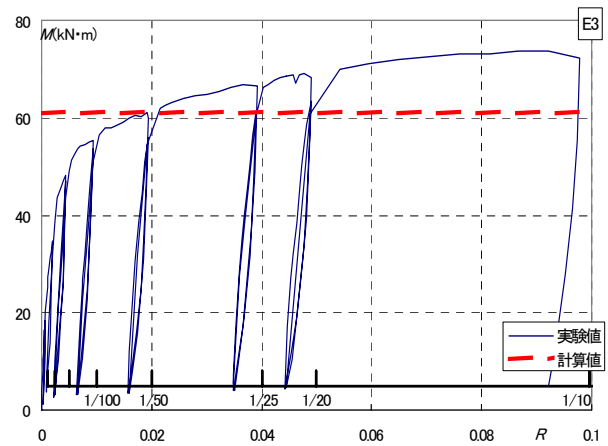
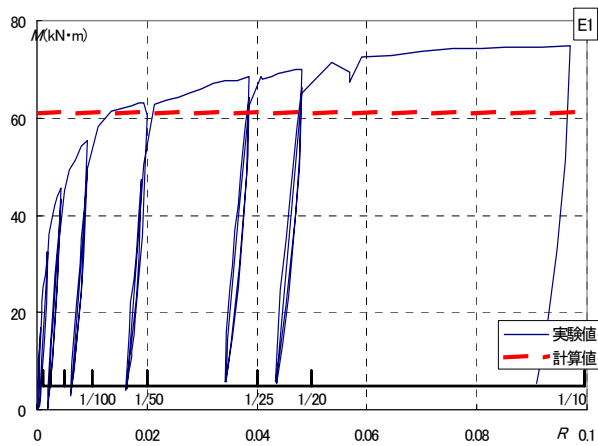


図-3 曲げモーメント-回転角関係

3.2 回転角

図-5に回転角の定義を示す。中央回転角 θ_1 は支持点と試験体中央部間の変形角を示し、加力点回転角 θ_2 は支持点と加力点間の変形角、支持点回転角 θ_3 は支持点における回転角を示している。

$$\text{中央回転角} : \theta_1 = \delta_1 / 900$$

$$\text{加力点回転角} : \theta_2 = \delta_2 / 700$$

$$\text{支持点回転角} : \theta_3 = \delta_3 / 300$$

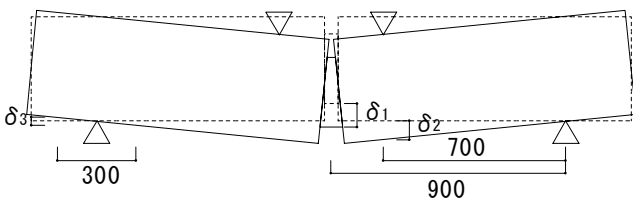


図-5 回転角定義

図-6に加力点回転角と支持点回転角の比を、図-7に中央回転角と支持点回転角の比を示す。また、表-5にそれぞれの回転角比の平均値を示す。

加力点回転角と支持点回転角の比は、加力点と支持点間の杭体の変形を表しており、この値が1に近いほど杭体は変形をしていないことを示す。

この結果、全ての試験体において1に近い値を示しているので、半剛接合とすることにより、接合部に変形が集中し、杭体の変形を抑制していることが分かる。

中央回転角と支持点回転角の比は中央接合部への変形の集中の割合を示している。つまり、杭体が完全に剛体であり、中央接合部のみが変形すると仮定した場合、この比は1となり、中央接合部の剛性が上がり、中央接合部以外が変形するとこの比は低下する。

E4は1に近い値をとっており、中央接合部に変形が集中しているのに対して、E1, E2, E3の鋼管を使用したタイプでは、E4より低い値を示している。これは、変形が中央接合部のみではな

く、鋼管の抜け出しなど中央接合部以外にも変形部位が分散している可能性があることを示している。

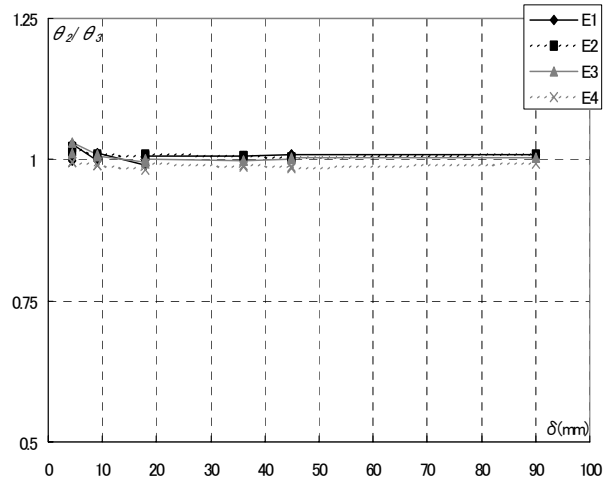


図-6 回転角比 (θ_2 / θ_3)

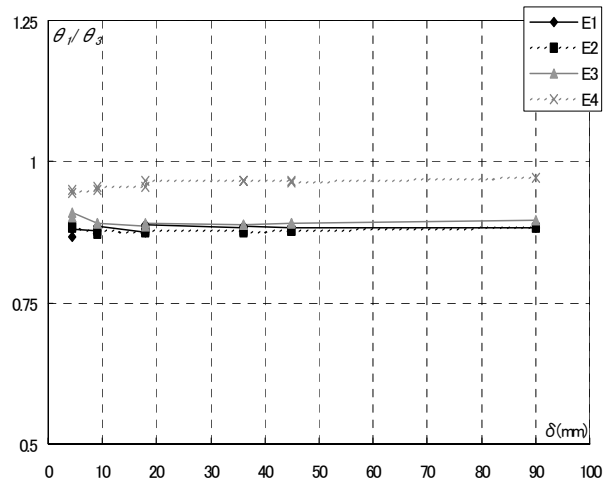


図-7 回転角比 (θ_1 / θ_3)

表-5 回転角比

	θ_2 / θ_3	θ_1 / θ_3
E1	1.01	0.88
E2	1.01	0.88
E3	1.01	0.89
E4	0.99	0.96

3.3 芯鉄筋

図-8に $R=1/100$ の芯鉄筋歪発生状況を示す。図中の $\pm 25\text{mm}$ の位置に示す縦方向の直線は杭体の端面の位置、 $\pm 125\text{mm}$ の位置に示す破線は鋼管の埋め込み端面の位置を示している。

E1, E2において、上段に位置している芯鉄筋は中央部で最大の圧縮歪を発生しているが降伏していない。下段の芯鉄筋は中央部より鋼管の埋め込み端面に近い位置で最大の引張歪を発生し、降伏している。これは、鋼管の抜け出しが発生したため鋼管の埋め込み位置での歪が最大となったと考えることが出来る。

E3において、上段の芯鉄筋が中央部で圧縮降伏している。E1, E2と比較し鋼管が薄いため、鋼管上部の剛性が低下したことが原因であると考えられる。中段および下段の芯鉄筋は中央部および鋼管の埋め込み端面の位置で 2000μ 程度の歪を発生している。よって、E1, E2と同様に

鋼管の抜け出しが発生していると判断できる。

E4において、下段の芯鉄筋は $R=1/200$ に中央部で 20000μ 程度の引張歪を発生し、 $R=1/100$ には計測不可能となっている。 $R=1/100$ に上段の芯鉄筋は圧縮で、中段の芯鉄筋は引張でそれぞれ 10000μ 以上の歪を発生し降伏している。歪は全て中央部で局所的に発生している。

以上の結果から、鋼管を使用した試験体は鋼管の抜け出しが発生しており、中段および下段の芯鉄筋が曲げ耐力算定の主要因と考えられる。また、鋼管の厚さによって、鋼管上部で局部座屈するなど破壊形式に違いが出る事がわかった。

鋼管を使用していない試験体は歪が中央部で局所的に発生しており損傷領域が限定的であることを示しており、鋼管を使用した場合と破壊形式が大きく異なることが分かった。

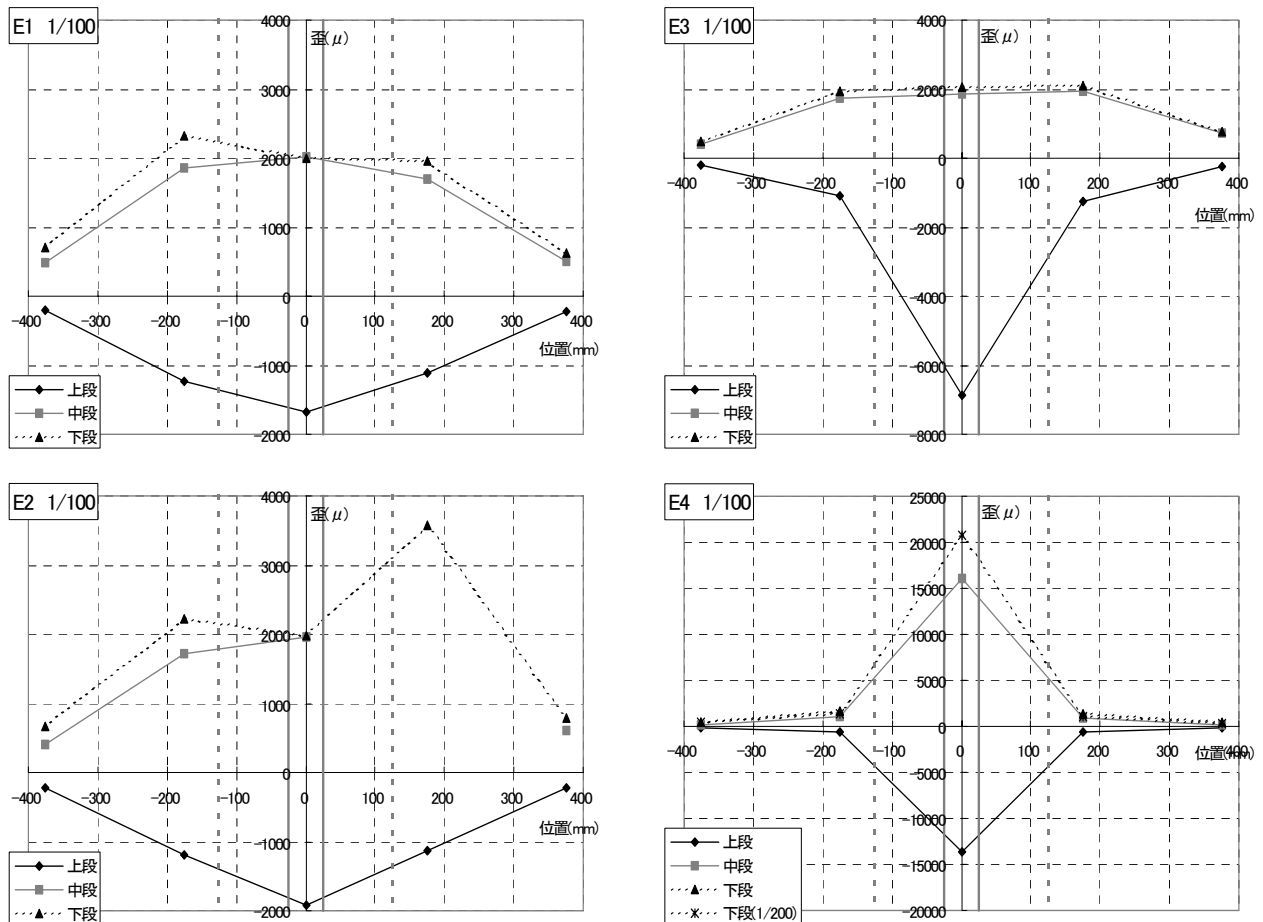


図-8 歪発生状況

3.4 耐力算定

曲げ終局強度の計算結果について表-6に示す。

終局曲げ耐力の計算値 M_{cr} は、コンクリートが圧壊する時に終局曲げ状態となるとして、平面保持の仮定を用い計算した。

鋼管部コンクリートには、鋼管の拘束効果によって、強度を補正して計算する必要がある。以下に側圧を受けるコンクリートの圧縮強度の計算式を示す。鋼管の円周方向応力は、実測値を基に計算している。

鋼管は、圧縮応力のみを負担すると仮定し、実測値を基に最大応力を計算している。

$${}_c\sigma_{cB} = {}_c\sigma_B + k \cdot \sigma_r \quad \dots(1)$$

$$\sigma_r = 2t / (D-2t) \cdot {}_s\sigma_\theta \quad \dots(2)$$

- ${}_c\sigma_{cB}$: 側圧を受けるコンクリートの圧縮強度
- ${}_c\sigma_B$: コンクリートの材料強度
- k : 拘束係数($k=4.1$)
- σ_r : コンクリートが受ける側圧
- ${}_s\sigma_\theta$: 鋼管の円周方向応力

表-6 曲げ終局強度

	実験値	計算値			
	M_e (kN・m)	M_{cr} (kN・m)	M_e / M_{cr}	${}_c\sigma_{cB}$ (MPa)	${}_c\sigma_{cB} / {}_c\sigma_B$
E1	75.0	61.2	1.22	28.0	1.79
E2	76.9	71.5	1.07	49.0	3.12
E3	72.2	61.2	1.18	33.1	2.11
E4	57.7	41.8	1.38	15.7	1.00

拘束効果を考慮したコンクリート圧縮強度は材料強度の2~3倍程度となった。鋼管が厚くなった場合、円周方向応力が減少するため、圧縮強度は鋼管の厚さに比例しないことが分かった。

終局曲げ耐力の算定値は過小評価となる傾向が確認できる。今後、3軸応力状態のコンクリート強度について、更に検証していく必要がある。

4. まとめ

半剛接合部に純曲げを作用させる要素実験を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) 接合部に鋼管を使用した場合、径厚比が0.0060から0.0224の間では、鋼管厚さが最大曲げモーメントに与える影響は小さく、鋼管が無い場合、最大曲げモーメントは大きく低下すること。
- 2) 半剛接とした場合、杭体はほとんど変形せず、接合部に集中するが、鋼管を使用することによって、中央接合部の変形だけでなく、鋼管の抜け出しが発生し、芯鉄筋が曲げ耐力を算定するための重要な要因となること。
- 3) 鋼管の拘束効果を考慮したコンクリート圧縮強度は、鋼管の厚さに比例しないこと。

謝辞

本実験とデータ整理に際してご助力を得た大同工業大学山本研究室、愛知工業大学山田研究室の皆様に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 深津尚人, 山本俊彦, 山田和夫, 岡田亨: 場所打ち杭の杭頭半剛接合に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.919-924, 2004
- 2) 山本俊彦 他: 場所打ちコンクリート杭の杭体および接合部の耐力評価に関する実験的研究(その1~その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.711-720, 1998
- 3) Clough, R.W. and S.B. Johnston, "Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility", 第2回日本地震工学シンポジウム, pp.222-232, 1966
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 5) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 1997
- 6) 色部誠, 河角誠, 安達洋: コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, 1985