

論文 場所打ち杭の杭頭半剛接合に関する実験的研究

深津 尚人^{*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を半剛接とすることにより杭体に発生する応力を低減し，杭体の損傷を防止する接合方法としてテーパタイプと鋼管タイプを提案し，その効果を検証する実験を行った。その結果，最大耐力を 53～64%に低減し，杭頭部の曲げ降伏によって杭本体の損傷を抑制しつつ安定した曲げせん断性能を保持できることをひび割れの状況や回転剛性から確認した。さらに，等価粘性減衰定数を評価することにより杭頭部のエネルギー吸収能力が確認できた。

キーワード：場所打ち杭，杭頭半剛接工法，回転剛性，等価粘性減衰定数

1. はじめに

近年，場所打ち杭の杭頭を半剛接とし，杭体の損傷を防止する接合方法が注目されている。さまざまな接合方法が考えられるが複雑な構造を避け，施工性に優れるテーパ加工するタイプと鋼管を用いるタイプの2つの半剛接接合方法を選択し，静的載荷実験を行った。

この半剛接接合工法によって杭体の損傷を抑制しつつ，変形角が 1/50 まで安定した曲げせん断性能を保持できることを確認するとともに，その性能を従来の剛接合工法と比較することにより評価する事を目的とした。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状及び配筋の状況を図 - 1，試験体の一覧を表 - 1 に示す。

計算によると杭はその径や地盤の強さによって，シアスパン比が 1.5 以下となる場合がある²⁾。試験体のシアスパン比はこのような場合を想定し 1.5 とし，試験体は両端スタブ付きの長さ 1200mm，直径 400mm の場所打ちコンクリート杭とした。逆対称の形状であるので，上下2ヶ所の接合部を試験部とみなせる。試験体は5体製作し，杭頭の接合方法を実験変数とした。

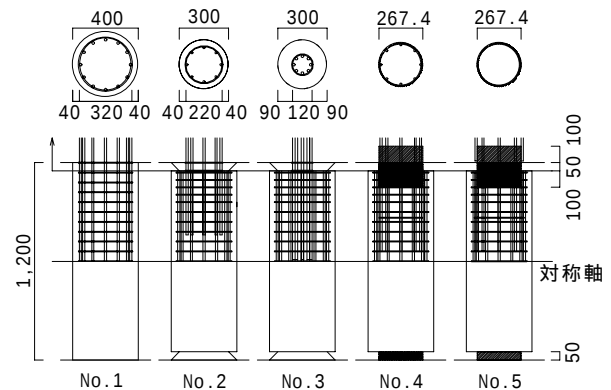


図 - 1 試験体の形状

表 - 1 試験体一覧

	杭本体形状	杭頭部径	芯鉄筋	芯鉄筋までのかぶり	杭頭部タイプ
No.1	杭径:φ 400	φ 400	-	-	剛接合
No.2	長さ:1200mm	φ 300	8-D13(部材内定着)	40	テーパ
No.3	主筋:12-D16	φ 300	8-D16(通し配筋)	90	テーパ
No.4	せん断補強筋: D6@60	φ 267.4	8-D13(部材内定着)	0	鋼管
No.5	(杭頭部 200mm は D6@45)	φ 267.4	8-D13(部材内定着)	鋼管に溶接	鋼管

*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）

No.1 は従来の剛接合タイプとし、杭体の主筋はスタブに定着した。No.2, No.3 は曲げ耐力を 1/2 程度低減することを目標とし、杭頭部断面積が杭体断面積の 1/2 となるようにテーパ加工を行った。また、杭体の主筋はスタブに定着させずせん断力を伝達させるために芯鉄筋を配筋した。No.2 は芯鉄筋のかぶり高が 40mm の位置に、No.3 は 90mm の位置に芯鉄筋を配筋した。No.4, No.5 には杭頭部に外径 $D = 267.4\text{mm}$ (厚さ $t = 6\text{mm}$) の鋼管を両端 100mm ずつ杭体とスタブに埋め込んだ。No.4 は鋼管の内側に芯鉄筋を配筋し、No.5 は鋼管の外側に芯鉄筋を溶接した。

杭本体にせん断補強筋を配筋してあるので、芯鉄筋の周囲にはせん断補強筋を配筋しなかった。また、実施工時、鋼管内に空隙ができる可能性や不良コンクリートの発生を考慮し、鋼管部には杭本体より強度が低いコンクリートをあらかじめ充填した。

2.2 実験方法

載荷は図 - 2 に示す逆対称加力装置を用いて行った。載荷は部材角制御で行い、鉛直アクチュエーターを 2 基用い、軸応力 σ_N を与え、水平アクチュエーターを用い静的加力を行った。杭に作用

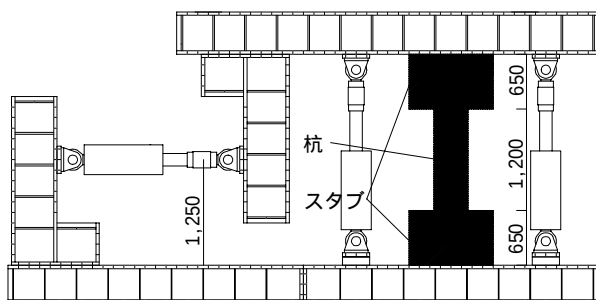


図 - 2 載荷装置



写真 - 1 載荷状況

する σ_N は杭底杭などの場合には、7.5MPa を想定することもあるため、実験では杭に作用する負荷が大きな場合を想定して 7.5MPa とした。

加力サイクルは部材角 R が 1/1000, 1/400 で正負載荷を各 1 回、1/200, 1/100, 1/50, 1/25 で正負載荷を各 2 回、1/20 で正負載荷を 1 回とした。

2.3 使用材料および製作方法

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。

試験体の製作は、No.1 ~ No.3 は、杭本体、スタブと 2 段階に、No.4, No.5 は、鋼管部、杭本体、スタブと 3 段階に分けてコンクリートの打設を行い、杭本体は縦打ちとした。

表 - 2 材料特性(コンクリート 加力時)

使用箇所	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	養生方法
杭	29.7	27.4	現場封緘養生
鋼管	20.2	-	標準養生

表 - 3 材料特性(鋼材)

	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	弾性係数 (GPa)	使用箇所
D16	427	590	192	杭主筋 No.3 ~ 5 芯鉄筋
D13	354	536	193	No.2 芯鉄筋
D6	313	492	183	せん断補強筋
鋼管	353	451	-	No.4, No.5 杭頭部

3. 実験結果および考察

実験によって得られた結果を表 - 4 に示す。No.1 の剛接合タイプと比較し、テーパタイプと鋼管タイプの半剛接合はせん断力 Q_e が 53 ~ 64% であった。No.1 のみせん断破壊し、他の試験体は曲げ降伏し崩壊には至らなかった。

テーパタイプでは、芯鉄筋を中央に配置した No.3 は No.2 より Q_e は高い値となった。また、鋼管タイプでは、芯鉄筋を鋼管に溶接した No.5 は No.4 より Q_e は高い値となった。

表 - 4 実験結果

	最大せん断力 Q_e (kN)	最大せん断力時の 変形角	破壊モード
No.1	401	1/100	せん断破壊
No.2	212	1/50	曲げ降伏
No.3	236	1/50	曲げ降伏
No.4	223	1/25	曲げ降伏
No.5	256	1/25	曲げ降伏

3.1 荷重—変形関係および破壊性状

図 - 3 にせん断力 Q と水平変位 δ の関係を示す。また、図 - 4 に 1/100 サイクル、実験終了時それぞれのひび割れの発生状況を示す。

No.1 は $R=1/200$ で、せん断ひび割れが発生し、1/50 サイクルの加力途中でせん断破壊した。

No.2 は、1/100 サイクル終了時、杭頭部に縦ひび割れは生じているが、せん断ひび割れは生じていない。1/20 サイクルではせん断力が Q_e より 20% 程度低下しているが、安定した挙動を示した。また、実験終了時ではテーパ部分に圧壊や杭本体とテーパ部の接合部に目開きが生じた。しかし、杭中央部にはほとんどひび割れが生じていない。また、芯鉄筋は降伏歪に達しており、杭頭部が曲げ降伏したと考えられる。

No.3 は、ほぼ No.2 と同様な挙動を示したが、1/20 サイクルではせん断力が Q_e より 32% 低下し、No.2 より大きく低下した。これは芯鉄筋を中央よりに配筋したため、杭本体とテーパ部の接合部に目開きが No.2 より拡大し、圧縮コンクリートの断面積が少なくなったことにより曲げせん断力の伝達能力が減少している事が原因であると考えられる。しかし、崩壊には至らず安定した挙動を示した。

No.4 は 1/200 サイクルで杭頭部の鋼管に沿って水平ひび割れが発生し、1/50 サイクルで鋼管とコンクリートの縁が切れ、鋼管の抜け出しが起った。しかし、実験終了後にも杭本体にはほとんどひび割れが発生していないこと、芯鉄筋が降伏歪に達していることから、テーパタイプと同様に杭頭

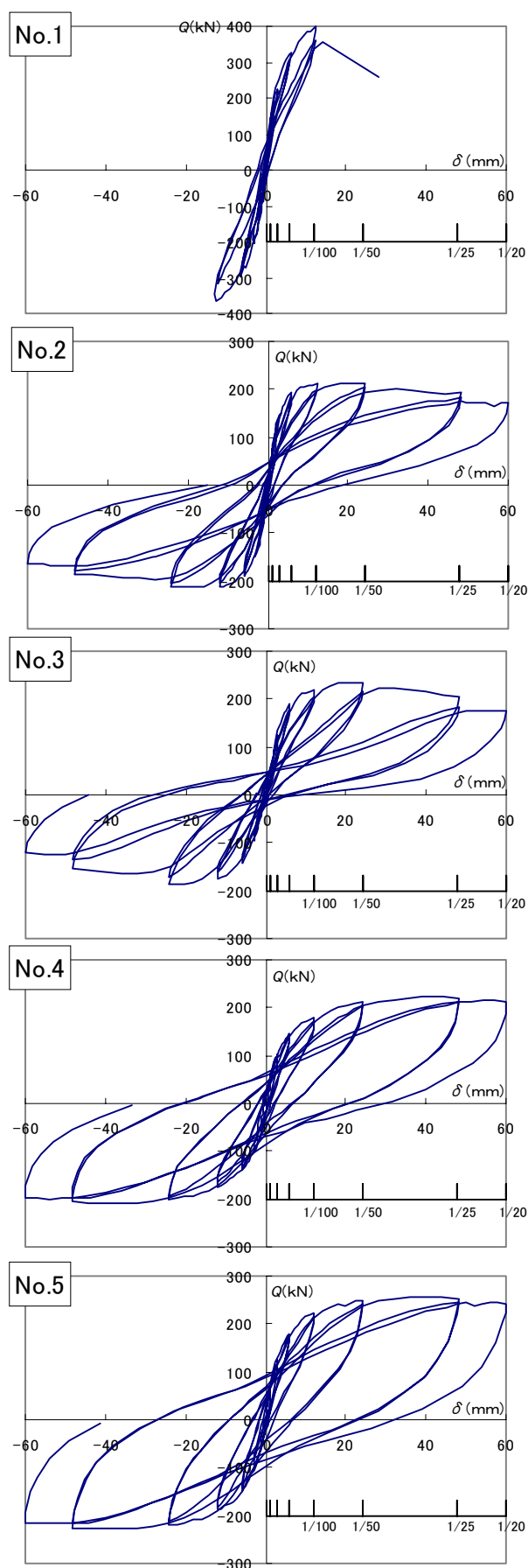


図 - 3 せん断力 - 水平変位関係

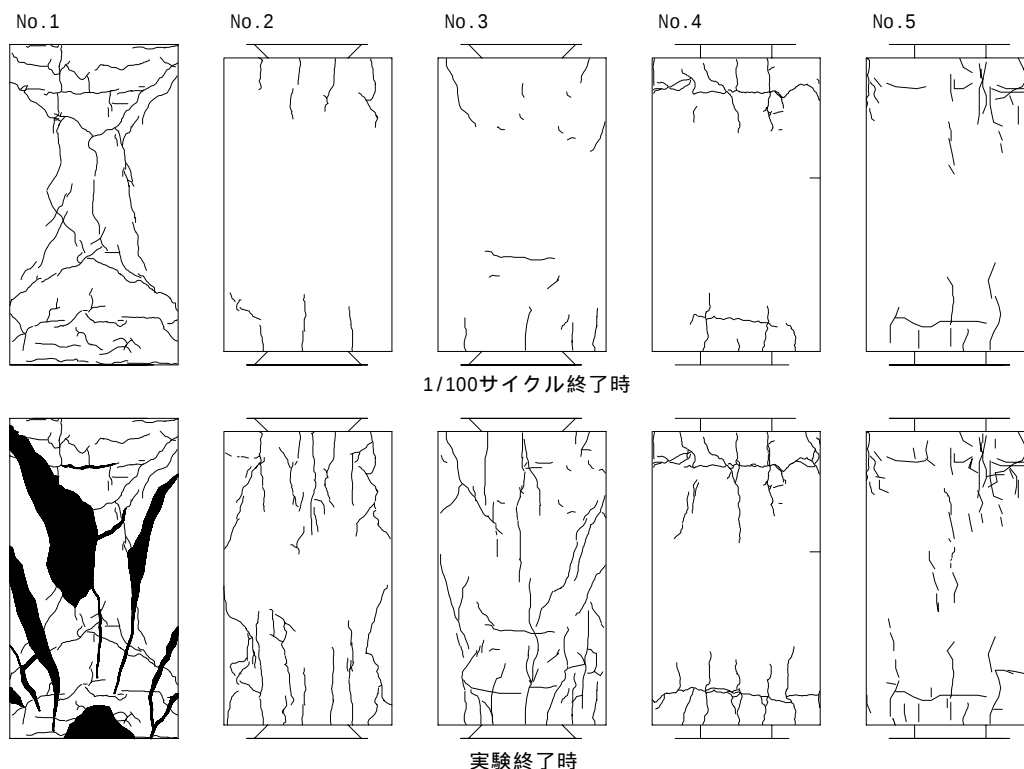


図 - 4 ひび割れ状況(展開図)

部で曲げ降伏が生じたと考えられる。No.5 は、No.4 と同様な挙動を示した。No.4 と比較すると最大せん断力が 10% 程度増加している。これは芯鉄筋を鋼管に溶接した事により、鋼管が杭体やスタブに定着し芯鉄筋に応力が分散され、鋼管の抜け出し影響が少なくなったと考えられる。

No.1 以外のすべての試験体において、杭本体の主筋は降伏歪に達しなかった。よって、このことから杭頭を半剛接にすることにより、杭頭部が曲げ降伏し杭本体の損傷を防止できることが確認できた。

3.2 等価粘性減衰定数に関する考察

図 - 5 に等価粘性減衰定数 h_{eq} を示す。塑性率 μ は、円形断面での曲げ耐力時の変形特性を考慮し変形角 $R=1/100$ のときを $\mu=1$ とした。

変形が進行するに従い h_{eq} は増加した。しかし、No.1 を除くすべての試験体において 1/25 サイクルの 1 回目に h_{eq} は最大となり、1/20 サイクルでは僅かに低下した。これは、杭頭部周辺の破壊によって、エネルギー吸収能力が低下したと考えられる。

No.2 と No.3 を比較すると、No.2 のほうが高い値を示した。これは芯鉄筋を周囲に配筋したことにより、芯鉄筋の曲げ応力の負担量が増加したこと。および、芯鉄筋によるコンクリートの拘束領域が拡大し、エネルギー吸収量が増加した影響であると考えられる。

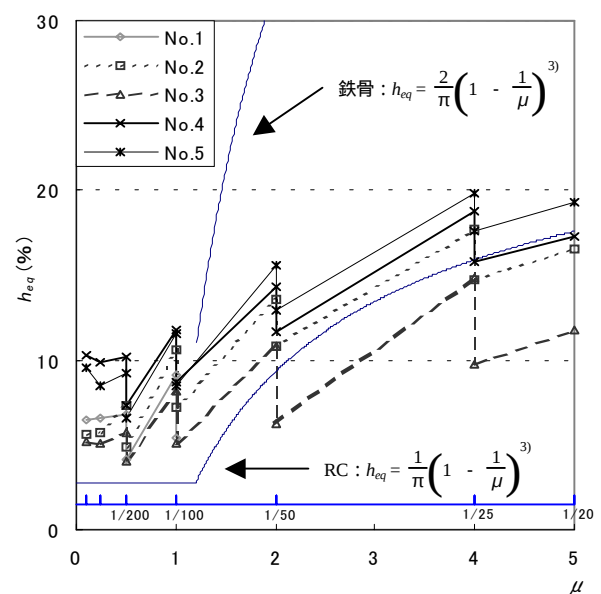


図 - 5 等価粘性減衰定数 - 塑性率関係

No.4, No.5 は他の試験体に比べ高い値を取っている。とくに，塑性率が 0.5 以下の初期の段階から h_{eq} は 10% 程度の値を示しており，比較的大きなエネルギー吸収能力を持っていることがわかる。

3.3 終局耐力に関する考察

せん断耐力についての実験値と計算値を表 - 4 に示す。

終局せん断耐力の計算値 Q_s は円形断面を等しい断面積を有する矩形断面に置換し，軸力を考慮した修正荒川式⁴⁾(1)を用いて計算した。鋼管タイプは，鋼管を等しい断面積を有する主筋やせん断補強筋として置換し計算した。

$$Q_s = \left(0.098 k_u \cdot P_t^{0.23} \frac{180 + \sigma_B}{M/QD + 0.12} + 2.7 \sqrt{P_w \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_N \right) bj \quad \dots (1)$$

k_u : 断面寸法による補正係数
 P_t : 引張鉄筋比
 σ_B : コンクリート強度
 M/QD : シアスパン比
 P_w : 横補強鉄筋比
 σ_{wy} : せん断補強筋強度
 σ_N : 軸応力度
 b : 柱幅
 j : 応力中心距離

終局曲げ耐力の計算値 Q_{mu} は，杭頭部のテーパ加工や鋼管の拘束効果を考慮し，杭頭部コンクリートの圧縮縁歪が 6000 μ となった時に圧壊し終局曲げ状態になると仮定し，平面保持の仮定および e 関数法を用いて計算した。

テーパタイプでは， Q_{mu} をテーパの最小径となる位置で計算した。 Q_e と比較すると Q_{mu} は過小評価である。そこで，コンクリートの拘束効果を考慮し，実験値から逆算するとコンクリートの圧縮強度は 1.41 倍(No.2), 1.77 倍(No.3)となった。今後，さらに実験を行い，拘束効果を定量的に評価する必要がある。

鋼管タイプでは鋼管のコンファインド効果⁵⁾を(2)から(4)式を用い計算し，コンクリートの圧縮強度を約 1.7 倍，鋼管の圧縮強度を約 0.9 倍，鋼管の引張強度を約 1.1 倍として， Q_{mu} を計算した。

$${}_c \sigma_{cB} = {}_c \sigma_B + k \cdot \sigma_r \quad \dots (2)$$

$$\sigma_r = 2t / (D - 2t) \alpha \cdot {}_s \sigma_y \quad \dots (3)$$

$${}_s \sigma_z^2 - {}_s \sigma_z \cdot {}_s \sigma_\theta + {}_s \sigma_\theta^2 = {}_s \sigma_y^2 \quad \dots (4)$$

${}_c \sigma_{cB}$: 側圧を受けるコンクリートの軸方向強度
 ${}_c \sigma_B$: コンクリートのシリンダー強度
 k : 拘束係数($k = 4.1$)
 σ_r : コンクリートが受ける側圧
 ${}_s \sigma_y$: 鋼管の降伏応力
 ${}_s \sigma_z$: 鋼管の軸方向応力
 ${}_s \sigma_\theta$: 鋼管の円周方向応力

Q_{mu} はともに過大評価となった。これは， Q_{mu} は鋼管部も引張応力を負担するとして計算したが，実際には鋼管部とコンクリート部は縁が切れており，引張応力が鋼管に十分に伝達されていないことが原因と考えられる。また，芯鉄筋を鋼管に溶接した No.5 は鋼管に通した No.4 よりも Q_e に近い値を取っている。これは，芯鉄筋を溶接したことにより，鋼管へより大きな引張応力が伝達されたと考えられる。

表 - 4 耐力算定結果

	実験値 Q_e (kN)	計算値 Q_s (kN)	計算値 Q_{mu} (kN)	Q_e / Q_s	Q_e / Q_{mu}
No.1	401	290	395	1.38	1.02
No.2	212	158	175	1.34	1.21
No.3	236	120	165	1.96	1.43
No.4	223	287	350	0.78	0.63
No.5	256	283	293	0.90	0.87

3.4 回転剛性に関する考察

図 - 6 に回転角の定義を示す。杭頭部回転角は杭頭部から 100mm の位置の回転角を示し，全体回転角は，杭体と杭頭部の回転をあわせた杭全体の回転角を示す。

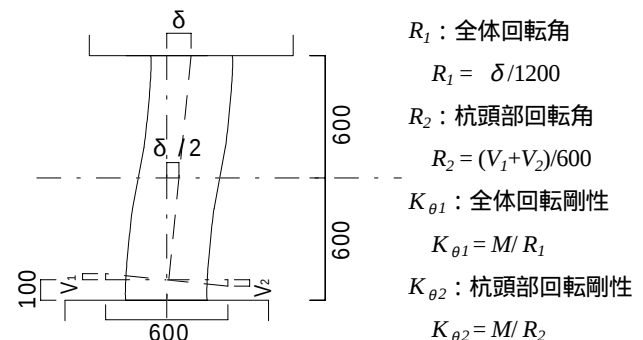


図 - 6 回転角の定義

図 - 7 に杭頭部の回転剛性を示す。変形の初期の段階ではコンクリートのひび割れによって回転剛性は大きく低下した。しかし，ひび割れが多数

発生し、ひび割れの目開きが拡大する段階となると回転剛性の低下の割合は減少した。

図 - 8 に杭頭部回転剛性と全体回転剛性の比を示す。回転剛性比は、杭頭部の回転の負担率を表している。つまり、杭頭部の剛性が低く杭本体が完全な剛体と仮定すると、回転剛性比は 1 となり、逆に杭頭部の剛性が上がり、杭本体が変形すると回転剛性比は低下する。

理論上では回転剛性比は 1.0 を超えないが実験では 1.0 を超えた試験体があった。これは、変位計の取り付け誤差と考えられる。

テーパタイプと鋼管タイプの回転剛性比は約 1.0 であった。これは、変形は杭頭部で発生し、杭体の変形を抑制していることを表している。つまり、杭頭部で曲げ応力を集中させ、杭体に発生する曲げ応力を低減している。

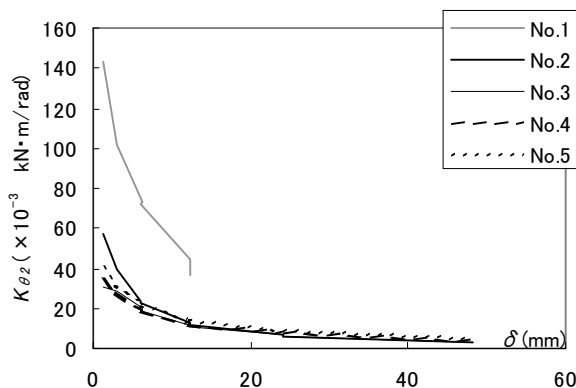


図 - 7 杭頭部回転剛性 - 変位関係

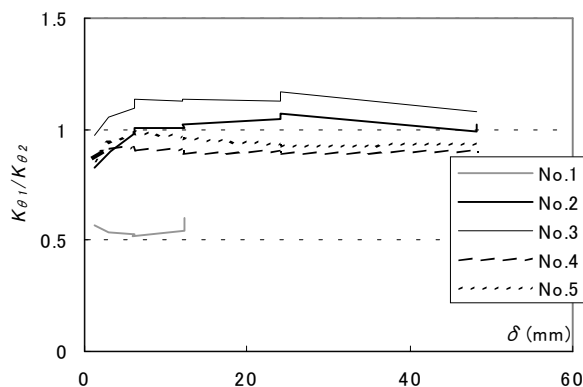


図 - 8 回転剛性比 - 変位関係

4. まとめ

本研究では、杭頭半剛接工法に関する実験から以下のことが明らかになった。

1) 杭頭を半剛接とした場合、ひび割れ状況や杭

主筋の歪から、杭頭部が曲げ降伏することにより杭本体の損傷を防いでいる。

- 2) 等価粘性減衰定数から、テーパタイプでは、芯鉄筋を周囲に配筋する方がコンクリートの拘束領域の拡大により、エネルギー吸収能力が高い。鋼管タイプは低変位の段階から、大きなエネルギー吸収能力を持っている。
- 3) テーパタイプの終局曲げ耐力の算定は、コンクリートの拘束効果を考慮しコンクリートの圧縮応力を割増して計算する必要がある。
- 4) 鋼管タイプの終局曲げ耐力は、鋼管が負担する引張応力に影響を受ける。
- 5) 回転剛性は、ひび割れの発生により大きく低下するが、ひび割れが多数発生すると低下の割合は小さくなる。
- 6) 回転剛性比を評価することにより、杭頭を半剛接とした場合、杭頭部に曲げ応力を集中させ、杭体に発生する応力を低減する。

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 4 年生の望月寿人君、荒木康博君、大隅保朋君、太田徹君、山本裕也君に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) 矢野伸司、山本俊彦、山田和夫：円形断面を有する鉄筋コンクリート部材の曲げ・せん断挙動、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.2、pp.865-870、2002
- 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) 安田聡、小室努、辰濃達、川端一三：杭主筋を基礎に定着しない杭頭接合部の構造性能、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.2、pp.1585-1590、2002