

論文 場所打ち杭の杭頭半剛接合に与える軸力の影響に関する 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合とした場合に、軸力が変形性能に与える影響を検証するために、軸力を変動させた静的加力実験を行った。その結果、軸力によってせん断耐力や回転剛性は変動するが、部材角が 1/100 程度までは、安定した履歴性能を示すこと、終局曲げ耐力は拘束効果を考慮し、コンクリート強度を補正して計算する必要がある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, 軸力, 回転剛性

1. はじめに

杭頭の接合部を半剛接合とすることによって、7.5MPa 程度の定軸力において杭体の損傷を抑制しつつ、安定した曲げせん断性能を有することなどが確認できている¹⁾。

地震力などの水平力を受け建物が回転することによって、杭には設計軸力より高い圧縮力が作用する場合や引張力が作用する場合がある。このように杭に作用する軸力が変動した場合においても杭頭接合部が安定した履歴性能を持つことを確認することが重要となる。

本研究では杭頭接合部を半剛接とした試験体を製作し、軸力を実験変数とした静的加力実験を行った。その結果から、軸力が剛性や最大耐力、変形性能に与える影響について検証するとともに、終局耐力について考察を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の形状を図-1に、試験体の概要を表-1に示す。

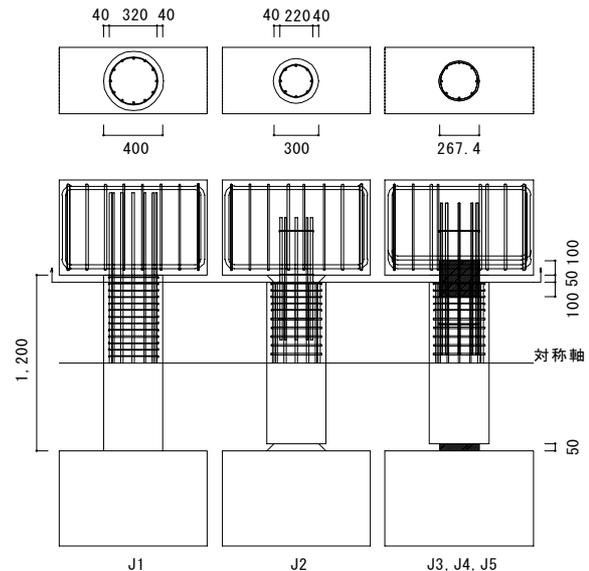


図-1 試験体形状および配筋状況

表-1 試験体概要

	杭本体	杭体せん断補強筋	杭頭部径	芯鉄筋	杭頭接合部
J1	杭径：φ400 長さ：1200 主筋：12-D16	D6@45	φ400	-	剛接合
J2		D6@60 (杭頭部 200mm は D6@45)	φ300	8-D13(部材内定着), かぶり 40	テーパ
J3			φ267.4	8-D13(部材内定着), 鋼管の内側に配筋	鋼管
J4					
J5					

*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)

杭のシアスパン比はその径や地盤強さによって、シアスパン比が最小で 1.5 程度となる場合がある。試験体のシアスパン比はこのような場合を想定し、1.5 と設定した。試験体は加力装置の関係および接合部のデータが 2 箇所計測できることを加味し、上下対称の形状とした。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。

試験体は、杭頭接合方法を 3 種類設定し、5 体製作した。J1 は主筋をスタブに定着させ、従来の剛接合タイプとした。部材角 $R=1/50$ までの変形性能を確保する事を目標とし、せん断補強筋を密に配筋し、せん断破壊を防止する設計とした。J2 は杭頭部断面積が杭体断面積の 1/2 程度となるようにテーパ加工を行い、剛性を下げ、半剛接合とした。杭主筋はスタブに定着させず、芯鉄筋を配筋しせん断力を伝達させた。J3, J4, J5 は外径 $D=267.4\text{mm}$ 、長さ 250mm、厚さ $t=6\text{mm}$ の鋼管を杭体とスタブにそれぞれ 100mm 埋め込み、半剛接合とした。また、テーパタイプと同様に芯鉄筋を配筋した。鋼管内部では実施工時にコンクリート強度が低下する可能性があるため、鋼管内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

荷重状況を図-2 に示す。荷重は図に示す逆対称加力装置を用いて行った。荷重は杭体の部材角 R を制御し、鉛直アクチュエーターを 2 基用いて軸力 σ_N を与え、水平アクチュエーターを用いて静的加力を行った。

加力サイクルは、 $R=1/1000, 1/400$ で各 1 回、 $R=1/200, 1/100, 1/50, 1/25$ で各 2 回、 $R=1/20$ で 1 回、正負繰返し荷重を行った。

杭に作用する σ_N について 4 種類の軸力タイプを設定した。軸力タイプを図-3 に示す。J1 は設計軸力として、拡底杭の場合を想定し 7.5MPa とした。J3 は設計軸力の 2 倍の圧縮力 15MPa を、J4 は 1/3 倍の引張力 -2.5MPa を作用させた。J2, J5 は変動軸力として、正加力時に 15MPa、負加力時に 0MPa で作用させた。

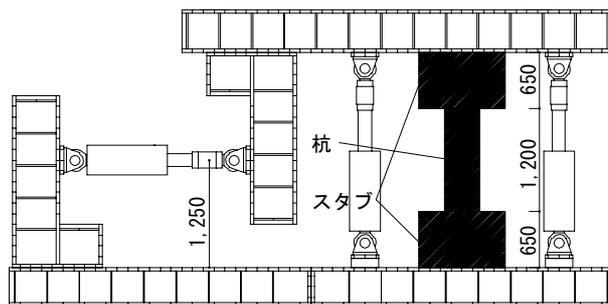


図-2 荷重状況

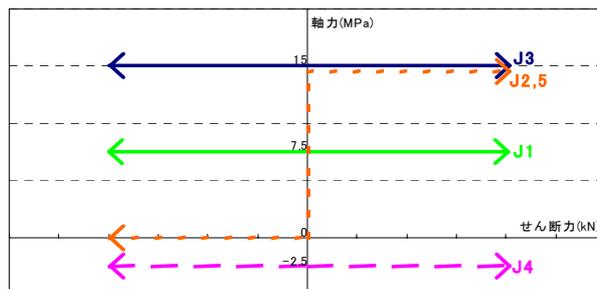


図-3 軸力-せん断力関係

2.3 製作方法および使用材料

試験体の製作は、J1, J2 は杭体、スタブと 2 段階に、J3, J4, J5 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った。

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。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。

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)	引張強度 (MPa)
杭	31.5	25.6	2.95
鋼管	15.7	19.1	1.69
スタブ	26.9	23.8	2.52

表-3 材料特性(鋼材)

	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	使用箇所
D16	433	578	181	杭主筋
D13	380	542	185	芯鉄筋
D6	432	502	175	せん断補強筋
鋼管	353	451	206*	杭頭部

* 公称値

3. 実験結果および考察

実験で得られた最大せん断力についての結果を表-4に示す。J2, J5は変動軸力を導入しているのので、軸力 15MPa時および軸力 0MPa時の最大せん断力を示している。J4において、加力の都合上、 $R=1/20$ の1回目で加力を終了した。

表-4 実験結果

	軸力 (MPa)	最大せん断力 (kN)	最大せん断力時の 部材角
J1	7.5	390	1/50
J2	15	276	1/50
	0	107	1/25
J3	15	248	1/25
J4	-2.5	86	1/25
J5	15	216	1/25
	0	135	1/25

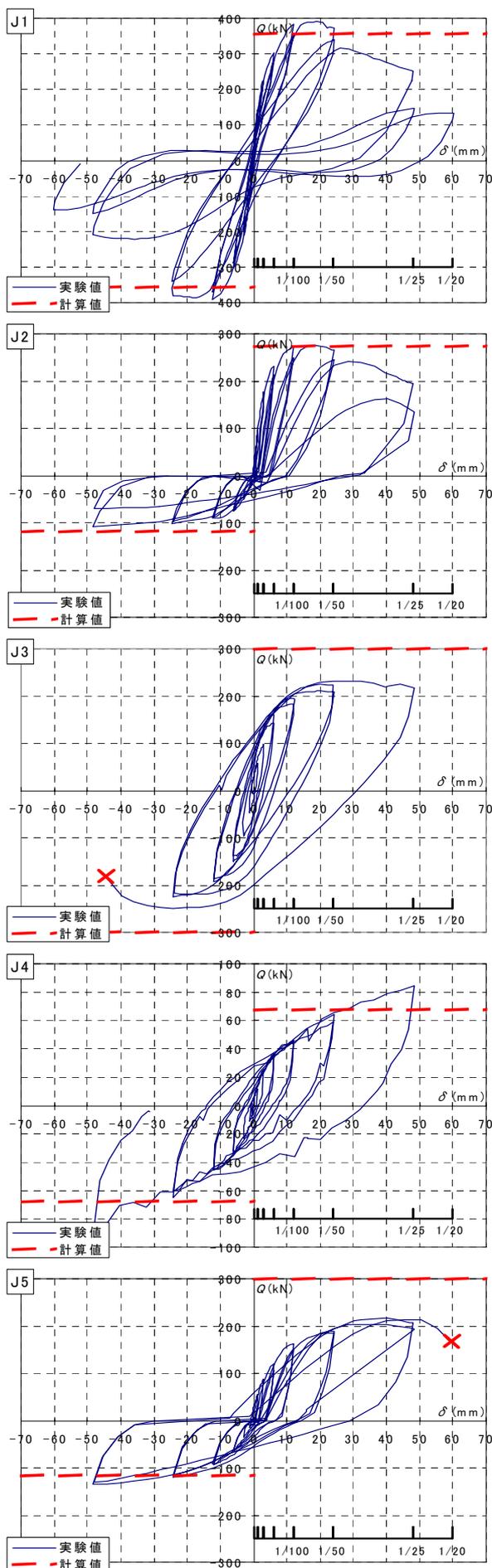
3.1 せん断力-変形関係および破壊性状

せん断力と水平変位の関係を図-4に示す。また、図-5に1/100サイクル終了時、加力終了時のひび割れの状況を示す。

J1は $R=1/200$ でせん断ひび割れが発生し、 $R=1/50$ でせん断ひび割れの目開きが進展した。その後、端部の圧壊やカバーコンクリートの剥落など損傷は多数発生し、せん断耐力は最大せん断力の35%程度低下したが、 $R=1/20$ までせん断崩壊せず、軸力支持能力を維持した。

J2では正加力時に試験体の軸方向にひび割れが発生、テーパ部分が圧壊した。負加力時には杭体にはひび割れがほとんど発生しなかった。しかし、テーパ部分と杭体の接合面で目開きが発生した。 $R=1/25$ 終了後、軸力を導入した時点で軸力支持能力を失った。引張軸力時の最大せん断力は圧縮軸力時の最大せん断力の40%程度と大きく低下している。

J3では、 $R=1/1000$ で杭体の端部に軸方向のひび割れが、 $R=1/400$ で鋼管の埋め込み端部に沿って円周方向にひび割れが発生した。 $R=1/25$ 加力途中で、軸力支持能力を失った。



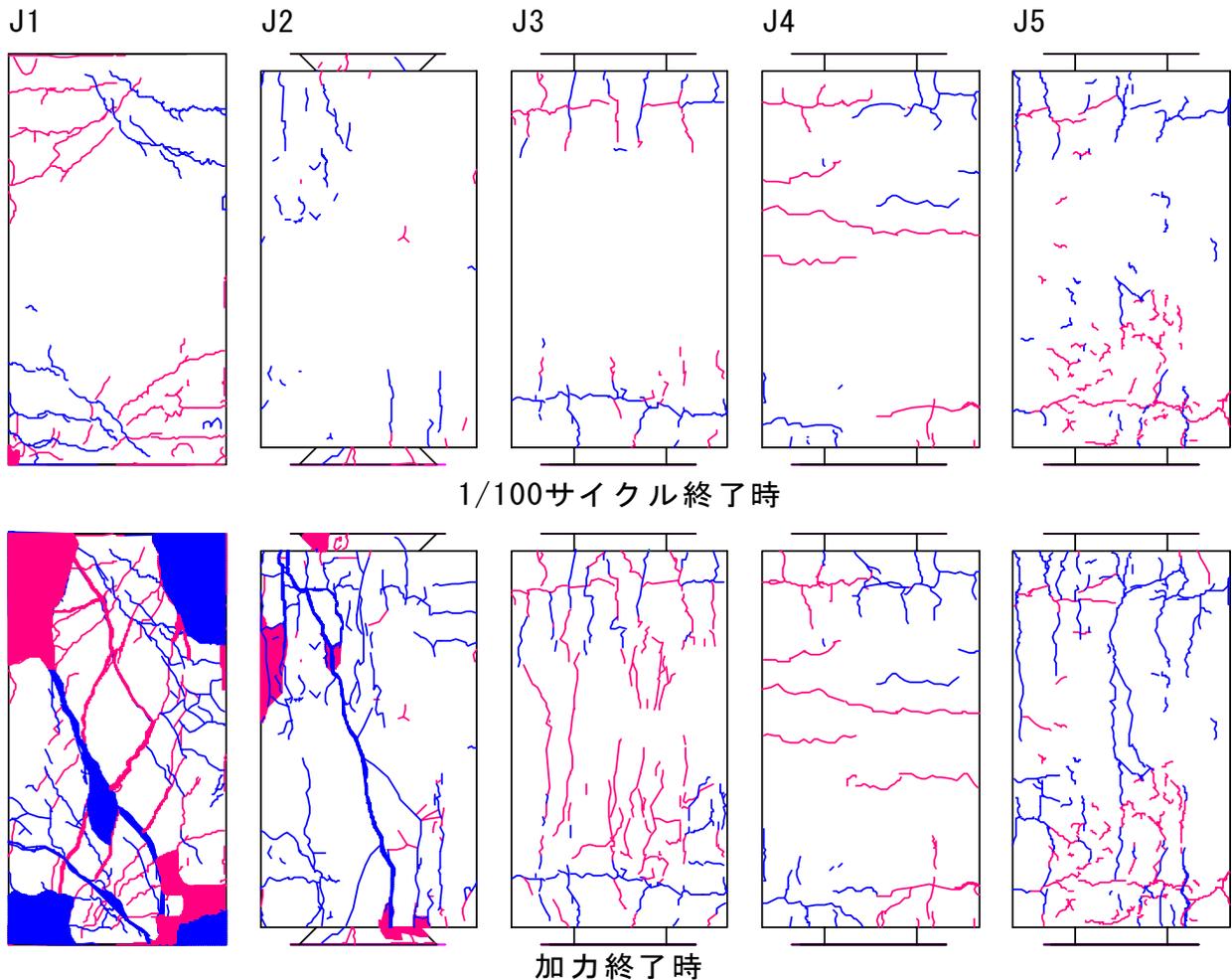


図-5 ひび割れ図(展開図)

J4では、 $R=1/400$ で試験体中央部に円周方向にひび割れが発生した。また、 $R=1/400$ の早い段階から鋼管の抜け出しが発生した。

J5では、J3と同様に杭体端部に軸方向のひび割れや鋼管の埋め込み端部に沿った円周方向にひび割れが発生した。 $R=1/20$ 加力途中で軸力支持能力を失った。軸力0MPa時の最大せん断力は軸力15MPa時のせん断力の60%程度と低下しているが、J2と比較すると低下の割合が小さい。

以上の結果から、テーパタイプと鋼管タイプを比較すると、鋼管タイプでは軸力の変動による最大せん断力の差が小さいことが分かった。

3.2 等価粘性減衰定数

図-6に等価粘性減衰定数 h_{eq} を示す。塑性率 μ は曲げ耐力時の変形特性を考慮し、変形角 $R=1/100$ の時を $\mu=1$ とした。

半剛接合部は高いエネルギー吸収に能力を

持つことが分かっている¹⁾。J3, J4では、 $\mu=1$ 以下の段階から20%程度の大きな値を示しており、

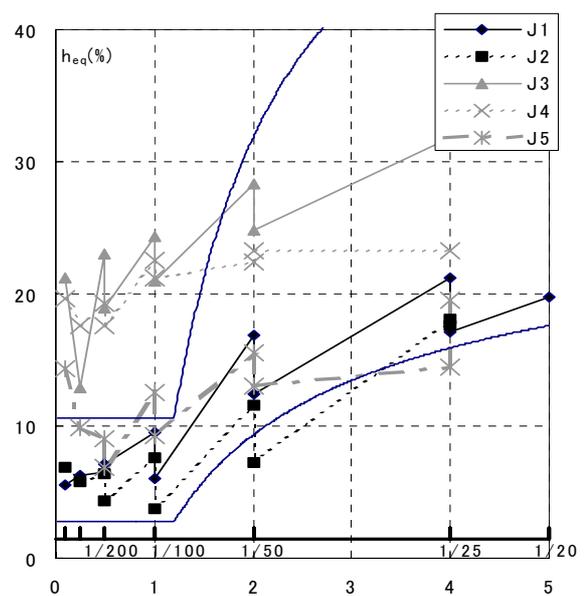


図-6 等価粘性減衰定数

高い圧縮軸力が作用した場合や引張軸力が作用した場合にも高いエネルギー吸収能力を有していることが分かる。

J2, J5 の変動軸力タイプでは, J1 と同様あまり大きな値を示しているとはいえないが, これは1サイクルの履歴面積を正加力時のポテンシャルエネルギーで除して求めているためであり, 比較の対象とならない。

3.2 回転角

図-7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合わせた杭全体の回転を示す。

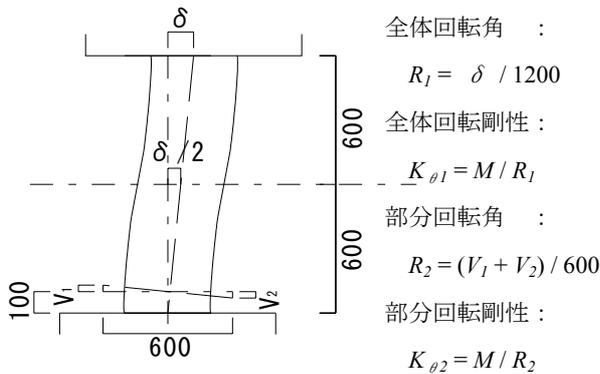


図-7 回転角の定義

図-8に杭頭部回転剛性と変位の関係を示す。J2, J5 の変動軸力タイプにおいて, 軸力 0MPa 時の回転剛性は軸力 15MPa 時と比較すると 0.21(J2), 0.29(J5)となっており, 軸力が低い場合, 回転剛性は大きく低下することが分かった。

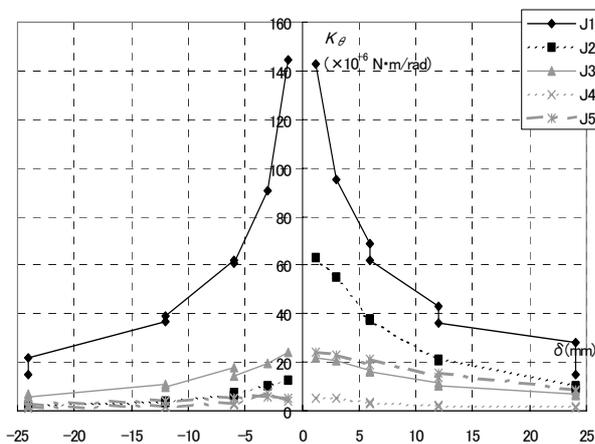


図-8 杭頭部回転剛性-変位関係

図-9は杭頭部回転剛性と全体回転剛性の比を示している。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, 杭体に変形すると回転剛性比は低下する。

杭頭を半剛接合とした場合, 回転剛性比は0.9程度の値を示しており, 回転が杭頭部に集中していることを示している。また, 僅かであるが軸力が低い場合, 回転剛性比が1に近い値となっており, より杭頭部に変形が集中する傾向にあることが分かった。

J2 では正負ともに変形が進むに従い回転剛性は低下していく傾向が確認できる。これは, テーパー部の損傷による影響と考えられる。

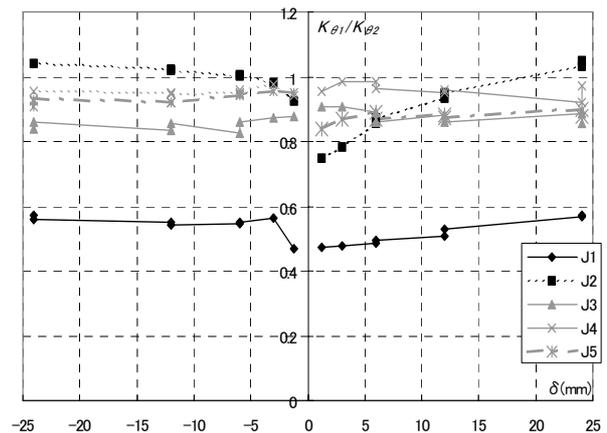


図-9 回転剛性比

3.3 最大耐力

表-5に終局せん断耐力 Q_s と終局曲げ耐力 Q_{mu} の計算結果を示す。また, 終局曲げ耐力の算定に使用したコンクリート強度 $c \sigma_{CB}$ を示す。

Q_s は軸力を考慮した修正荒川式を用い, 円形断面を等価な断面面積を有する矩形断面に置換し計算した。

Q_e と Q_s の比から半剛接合とした試験体は, せん断力に対して余裕があるため, 杭頭接合部の曲げ降伏によって, 耐力が決まったと考えられる。

表－５ 耐力算定結果

	軸力 σ_N (MPa)	実験値 Q_s (kN)	終局せん断耐力計算値		終局曲げ耐力計算値			
			Q_s (kN)	Q_e / Q_s	Q_{mu} (kN)	Q_e / Q_{mu}	$c \sigma_{cB}$	$c \sigma_{cB} / c \sigma_B$
J1	7.5	390	320	1.21	356	1.10	31.5	1.00
J2	15	276	389	0.71	273	1.01	53.8	2.00
	0	107	247	0.43	118	0.91	53.8	2.00
J3	15	248	389	0.64	301	0.82	87.6	5.58
J4	-2.5	86	223	0.38	68	1.26	21.5	1.37
J5	15	216	389	0.55	301	0.72	87.6	5.58
	0	135	247	0.54	117	1.15	42.4	2.70

Q_{mu} はコンクリートが圧壊した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。J2 ではテーパー加工による拘束効果を考慮し、杭頭径を 1.1 倍、コンクリートの圧縮強度を 2 倍し計算した。J3, J4, J5 においても、鋼管部コンクリートが鋼管の拘束効果によって、強度を補正する必要がある。以下に側圧を受けるコンクリートの圧縮強度の計算式⁴⁾を示す。鋼管の円周方向応力は、実測値を基に計算した。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た。

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

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

- $c \sigma_{cB}$: 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

鋼管を使用した場合、拘束効果によって、コンクリート強度が 1.5~5 倍程度となる計算結果となった。しかし、J3 や J5 (15MPa 時)の終局曲げ耐力の計算値は過大評価となっている。よって、鋼管による拘束効果には上限があることが考えられる。今後、上限値について検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、杭頭部を半剛接とした試験体に

軸力を変動させた静的加力実験を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) 半剛接接合とした場合、軸力の変動によって剛性に影響を与えるが、部材角が 1/50 程度まで安定した履歴性能を示す。
- 2) 鋼管を用いた試験体は、高い圧縮軸力や引張軸力が作用した場合にも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) 軸力が低い場合、回転剛性は大きく低下し、より杭頭部に回転が集中する。
- 4) 曲げ耐力を算定する際、鋼管によるコンクリートの拘束効果を考慮する必要があるが、強度の補正には上限がある。

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) 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
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 4) 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