

高強度 PC 杭とパイルキャップとの接合部の強度と変形性状

高強度 PC 杭の耐力および変形性能向上に関する研究 (4)

正 会 員 黒 正 清 治*
 正 会 員 堀 井 昌 博**
 正 会 員 和 田 章***
 正 会 員 林 静 雄****
 正 会 員 斉 藤 安 生*****
 正 会 員 高 見 信 嗣*****

1. 序 論

プレストレストコンクリート部材である高強度 PC 杭 (PHC 杭) は、変形性能が乏しいため地震による水平力が建物に作用すると脆性的な破壊を起こす可能性がある。このような破壊は、耐震上危険なものであり、避けなくてはならない破壊であることはいうまでもない。そこで筆者らは PHC 杭の変形性能改善を目的として一連の研究を行ってきた。その結果として、PHC杭基礎の靱性を確保するためには、抗体を多量のらせん筋で補強し、杭体中空部にもコンクリートを打設すれば、非常に効果があることが分かった。一方、杭とパイルキャップを接合する際に杭体軸方向筋を残して杭をカットオフする現在の工法では、杭に損傷を与えずに施工することが困難であり、また軸方向筋がパイルキャップ内に完全定着されることでかえって、伸び能力に乏しい杭体軸方向筋が引張破断を引き起こしてしまい脆性的な破壊をきたす恐れがある。そこで杭とパイルキャップの接合法として、杭体を軸方向筋とともにカットオフし、杭頭コンクリートをある程度パイルキャップ内に埋め込み、中空部にも軸方向筋およびらせん筋を配しコンクリートを打設する接合法を考えた。杭径 30 cm の B 種杭を用いて、このような接合法を用いた杭基礎の実験を行ってきた結果、杭体軸方向筋が破断せず大変形まで耐力を確保できることが確認された^{2),3)}。本論文は、このような杭とパイルキャップとの接合法を用いた杭基礎の強度と変形性状について、変形性能を確保するのに必要な杭体

のらせん筋量を調べるとともに杭体の軸方向筋の定着性能や、軸力が強度と変形性能に及ぼす影響について調べたために行った実験結果をまとめたものである。

2. らせん筋の効果に関する実験 (シリーズ1)

2.1 目 的

既往の研究^{1),2)}において杭体中空部にコンクリートを中詰めするとともに、杭体らせん筋として異形 PC 鋼棒を使用して、杭の補強量を大幅に増加させることにより杭のせん断破壊や曲げ圧縮破壊を防ぎ、その変形性能を大幅に改善できることを確認した。しかしこの場合、らせん筋の強度と断面積を極端に増加させた場合であり、現実的ならせん筋量とはいえない。杭体のらせん筋量をどの程度まで増やせば変形性能に及ぼす効果があるのか、また、杭体らせん筋量の効果とは、らせん筋の断面積によるものなのか、らせん筋の断面積と降伏強度の積によるものなのか明らかではない。シリーズ1では、これらの点を明らかにすることを目的として実験が行われている。

2.2 試験体

試験体は表-1に示す試験体一覧の No.1~No.4の4体であり、試験体配筋を図-1に、杭体断面詳細を図-

表-1 試験体一覧

NO	試験体名	埋め込み長さ (cm)	杭体らせん筋 (mm)-(mm)	軸方向筋降伏強度 (kgf/cm ²)	軸力 (tf)
1	FB(10)-5-80-3-3	10	5.0φ@50	14405	105
2	FB(10)-7-80-3-3		6.0φ@50		
3	FB(10)-9-80-3-3		(6.0φ+3.2φ)@50		
4	FB(10)-17-80-3-3		(高張力5.0φ+3.2φ)@50		
5	FB(30)-9-80-3-0	30	*	14600	0
6	FBX(30)-9-80-3-0		(6.0φ+3.2φ)@50	10860	35
7	FBX(30)-9-80-3-1				70
8	FBX(30)-9-80-3-2				105
9	FBX(30)-9-80-3-3				

* 東京工業大学 名誉教授・工博

** (株)日建設計

*** 東京工業大学 教授・工博

**** 東京工業大学 助教授・工博

***** (株)日建設計

***** 東京工業大学 大学院生

(1989年6月10日原稿受理, 1989年11月4日採用決定)

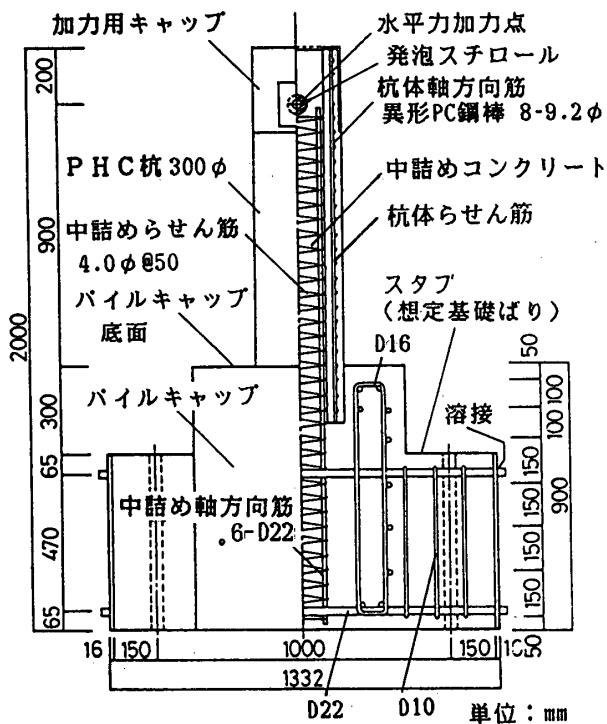


図-1 試験体配筋

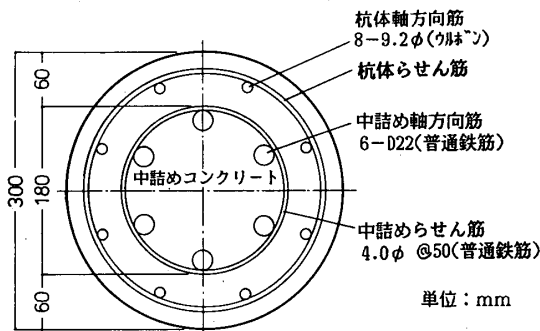


図-2 杭体断面詳細

2に示す。杭体らせん筋は表-1に示す。杭は、外径30 cmのB種PHC杭であり、軸方向筋は、異形PC鋼棒8-9.2φ、有効プレストレス80 kgf/cm²、せん断スパン比は、3とした。杭とパイルキャップとの接合方法は、前述のとおり、杭頭を、軸方向筋とともにカットオフし、杭頭をパイルキャップ内に10 cm埋め込み、杭体中空部にも軸方向筋6-D22、らせん筋4.0φ@50 mmを配し、コンクリートを中詰めしている。既往の研究²⁾においては、杭体らせん筋が4.0φ@50 mmでは変形性能があまり向上せず、3.2φ@50 mmに異形PC鋼棒6.0φ@50 mmを添え巻きするとその効果が大きかった。本実験ではその間のらせん筋量で実験を行うこととした。試験体No.1は、5.0φ@50 mm、No.2は6.0φ@50 mm、No.3は3.2φ@50 mmに6.0φ@50 mmを添え巻きしている。No.4は3.2φ@50 mmに異形PC鋼棒5.0φ@50 mmを添え巻きしている。現在、一般に使用されている杭のらせん筋は、普通鉄筋3.2φ@100 mmであり、この時のらせん筋比に降伏強度を乗

じた値を基準の補強量として1とすると、No.1が5、No.2が7、No.3が9、No.4が17という値になる。試験体記号の2番目の数字** (FB(10)-**-80-3-3)がこの値を意味する。また、前述したように、本実験での基本とした杭体らせん筋が4.0φ@50 mmの場合は3、3.2φ@50 mmに異形PC鋼棒6.0φ@50 mmを添え巻きとした場合は24となっている。使用材料の力学的性質を表-2に示す。

2.3 加力・測定方法

加力装置を、図-3に示すが、前報³⁾とまったく同様である。試験体の製作に際しては、杭を下にしてパイルキャップのコンクリート打設を行っているが、加力に際しては天地を逆にしてしている。加力は、片持ち梁方式で試験体先端に正負の水平力を荷重制御で2.6 tf、5.2 tf、10.4 tfとし、それ以降は変形制御で、加力点の変位でδ=6 mm、9 mm、12 mm、15 mm、18 mm、30 mm、45 mm (部材角R=1/150、1/100、1/75、1/60、1/50、1/30、1/20)として正負交番繰返し载荷として、最終的に正方向に60 mm (R=1/15)まで変形させることを原則とした。また曲げ圧縮破壊を起こしやすいように杭先端に極限支持力に相当する105 tfの軸力を作用させ、加力中一

表-2 使用材料の力学的性質 (シリーズ1)

鉄筋	直径 (mm)	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁶ kgf/cm ²)
軸方向筋	9.2φ(高張力)	14405	14965	2.154
	D22	3644	5581	1.966
らせん筋	6.0φ	4207	5177	1.945
	5.0φ(高張力)	13857	14839	2.034
	5.0φ	5875	6434	2.106
	4.0	5224	5686	2.239
	3.2	6057	6455	2.169

コンクリート	圧縮強度 (平均) (kgf/cm ²)	弾性係数 (平均) (×10 ⁶ kgf/cm ²)	引張強度 (平均) (kgf/cm ²)
杭体	864~904 (882)	3.61~3.69 (3.66)	59.3~61.6 (60.3)
中詰め・パイルキャップ	283~320 (302)	2.54~2.73 (2.65)	24.0~26.9 (25.2)

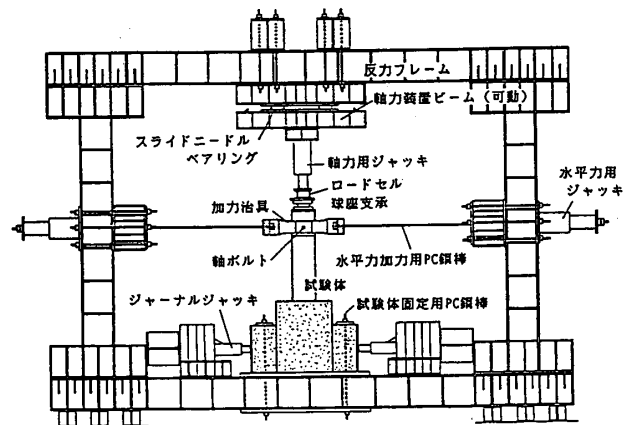


図-3 加力装置

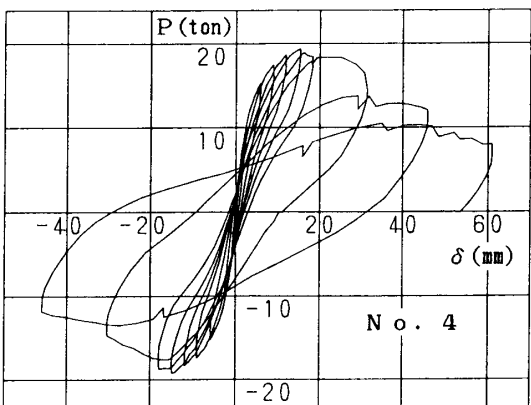
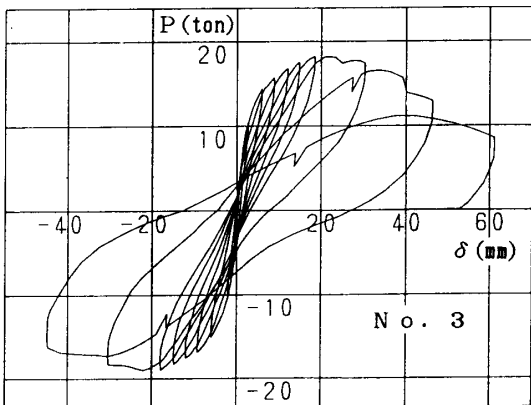
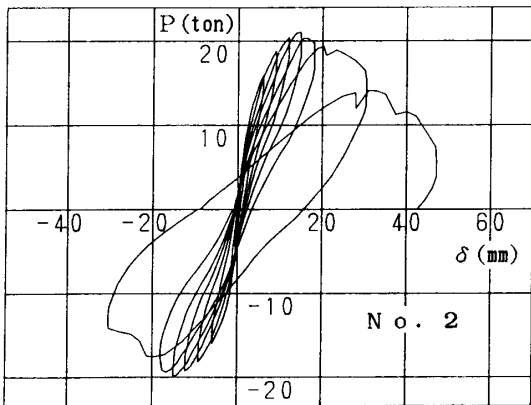
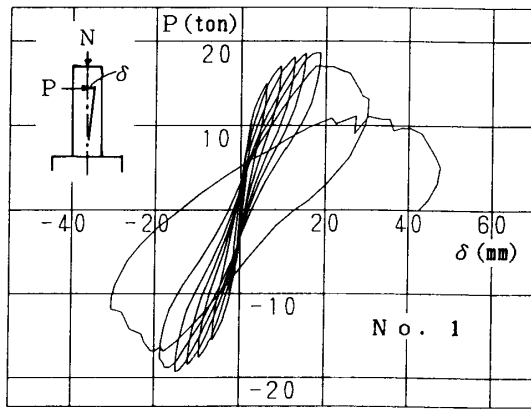


図-4 P-δ関係

定に保った。また、杭のパイルキャップへの埋め込み長さを10cmとしたのは、これまでの研究^{21,3)}によれば、軸力105tfの場合には埋め込み長さ10cm以上あれば杭

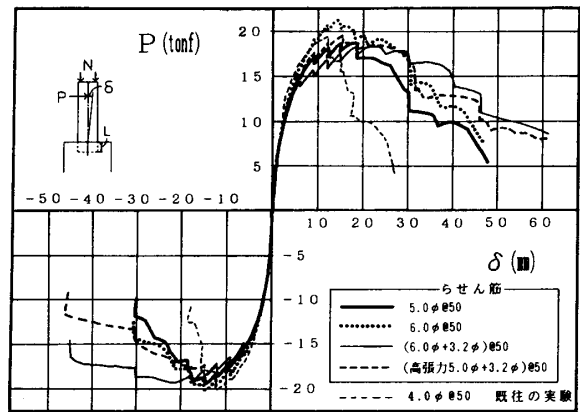
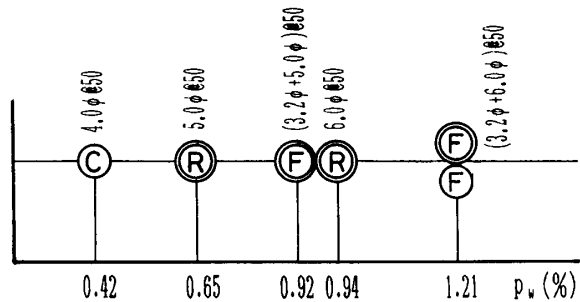


図-5 P-δ関係の包絡線



●: 本実験結果 ○: 既往の実験結果
 破壊モード C: 曲げ圧縮破壊
 R: らせん筋破断
 F: 部材角1/15までに急激に耐力低下せず変形

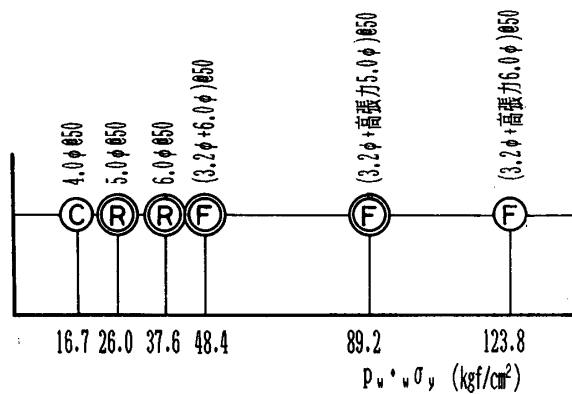
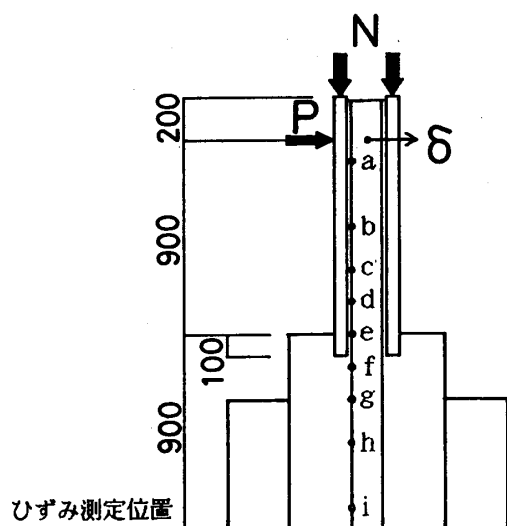
図-6 破壊状況とらせん筋比との関係

頭はほぼ完全固定とみなせるためである。

2.4 実験結果

2.4.1 水平力-水平変位関係

図-4にNo.1~No.4の水平力(P)と加力点水平変位(δ)の関係を、図-5にその包絡線を示す。図-5には、杭体らせん筋として4.0φ@50mmのものも示している。杭体らせん筋5.0φ@50mmのNo.1とらせん筋6.0φ@50mmのNo.2は、最大水平力後の耐力低下が大きく、最終変形まで加力することができなかったが、杭体らせん筋3.2φ@50mmに6.0φ@50mm添え巻きしたNo.3と3.2φ@50mmに異形PC鋼棒5.0φピッチ50添え巻きしたNo.4は最終変形まで安定した履歴性状を示した。これは、No.1, No.2が部材角R=1/20(δ=45mm)辺りで杭体の軸方向筋が座屈し、杭体らせん筋が破断して軸力保持能力を失い水平力が急激に低下したのに比べ、No.3およびNo.4は杭体らせん筋が最終変形R=1/15(δ=60mm)まで破断せず、かぶりコンクリートがはく離した後も内部コンクリートを拘束することができたためと考えられる。軸力105tfの場合、杭体らせん筋を6.0φ@50mmにすると変形性能は、4.0φ@50mmより2倍程度向上するといえる。図-6、図-7に試験体の破壊状況と杭体らせん筋比(p_w)との関係およびらせん筋比と降伏強度(σ_{sy})と



● : 本実験結果 ○ : 既往の実験結果

破壊モード C : 曲げ圧縮破壊
R : らせん筋破断
F : 部材角1/15までに急激に耐力低下せず変形

図-7 破壊状況とらせん筋比と降伏強度の積との関係

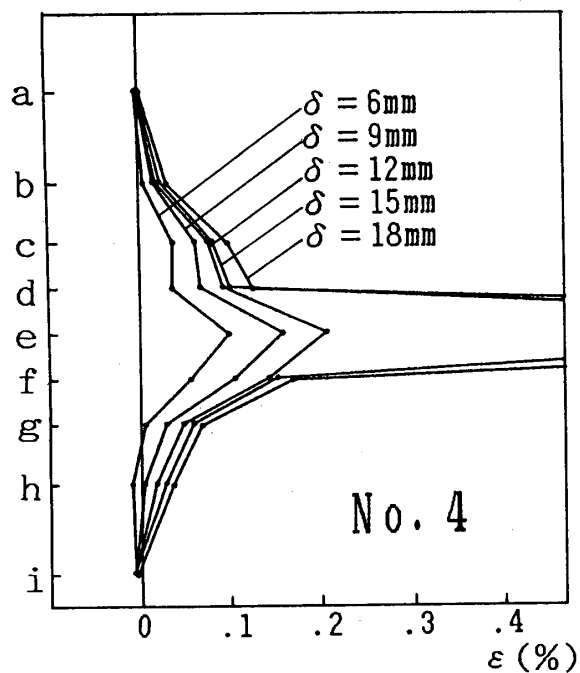
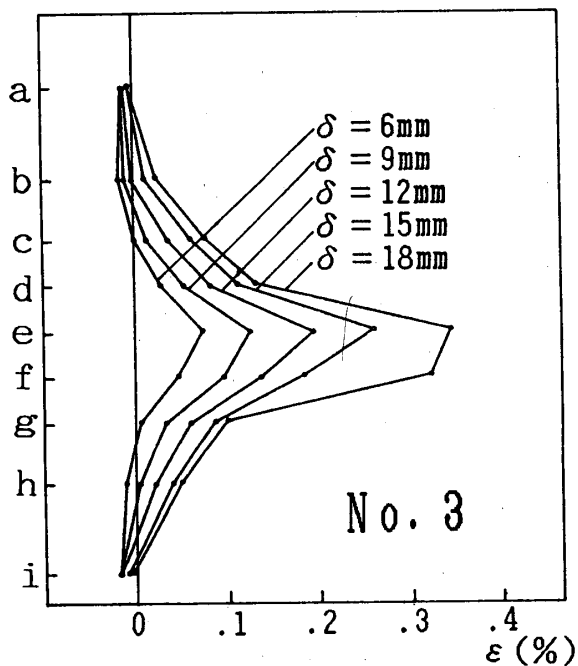
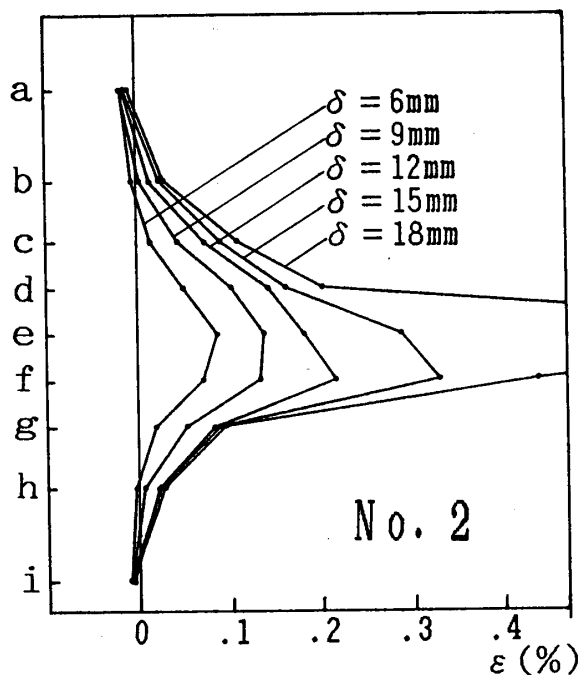
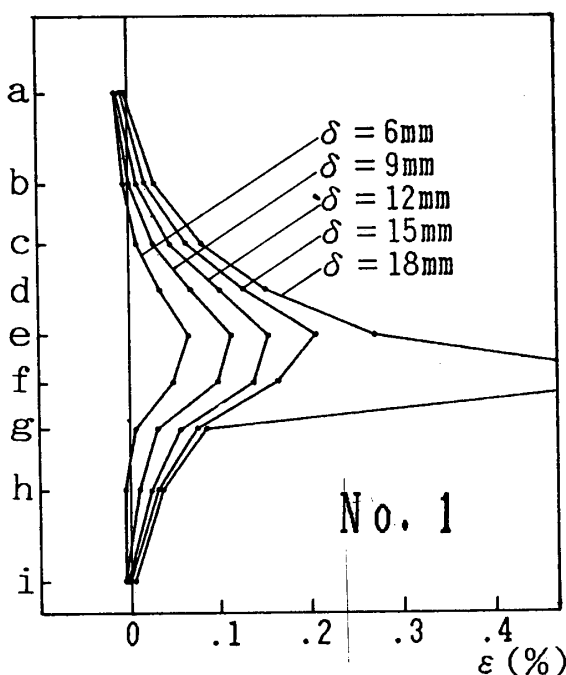


図-8 中詰め軸方向筋ひずみ分布

の積 ($p_w \cdot w \sigma_y$) との関係を示す。杭体のらせん筋量を p_w で評価した場合、杭体らせん筋 $3.2 \phi @ 50 \text{ mm}$ に異形 PC 鋼棒 $5.0 \phi @ 50 \text{ mm}$ を添え巻きした No.3 が、らせん筋破断を起こさず部材角 1/15 までの変形に耐えたのに対し、それよりも杭体らせん筋比の大きな $6.0 \phi @ 50 \text{ mm}$ がらせん筋破断し、変形能力が劣っている。よってらせん筋の効果は、 p_w のみで決まるのではないことが分かる。杭体らせん筋を $p_w \cdot w \sigma_y$ で評価した場合、らせん筋量が 37.6 kgf/cm^2 以下だとらせん筋が破断し、 48.4 kgf/cm^2 以上だと急激な耐力低下をせず部材角 1/15 までの変形に耐えている。これらのことから杭体らせん筋量は、らせん筋比に降伏強度を乗じた値 $p_w \cdot w \sigma_y$ で評価すべきである。しかし、杭が曲げ圧縮破壊する場合、杭体らせん筋は杭体軸方向筋の座屈を抑える働きが大きいので、杭体らせん筋の量のみでなく、間隔も変形性能の改善には重要なものと考えられる。

2.4.2 中詰め軸方向筋のひずみ分布

図-8 に各水平変形ピーク時の中詰め軸方向筋のひずみ分布を示す。全試験体とも水平変形 15 mm 以上になると中詰め軸方向筋が降伏しており、曲げモーメントを有効に負担していることが分かる。ひずみの最も大きくなる位置は、パイルキャップ底面位置 e 、またはパイルキャップ内へ 15 cm 入った部分 f となっている。このパイルキャップ位置ではなくパイルキャップ内 15 cm の部分の方がひずみが大きくなる原因には、以下のことが考えられる。

杭頭部はパイルキャップ内に 10 cm 埋め込んでいる。杭はパイルキャップ底面位置で完全固定されるのではないので、変形の増大に伴って杭頭に生じる回転によりパイルキャップ内杭頭部にも回転が生じる。杭頭に生じる曲げモーメントによる引張力は中詰め軸方向筋のみで負担するが、パイルキャップ底面では、中詰め軸方向筋と杭体の軸方向筋の両方が負担しているため、中詰め軸方向筋の杭頭部に近い f 位置の鉄筋応力がパイルキャップ底面位置 e の応力より大きくなると考えられる。

2.5 まとめ

杭体らせん筋量としては断面積に降伏強度を乗じた値で評価でき、今回実験を行った杭径 30 cm のものに関していえば、らせん筋量を現状の杭の 7 倍程度まで増やせば、高軸力下での変形性状は著しく改善される。

3. 杭体軸方向筋の強度の影響に関する実験 (シリーズ 2)

3.1 目的

杭頭部を軸方向筋とともにカットオフする工法の場合、パイルキャップに杭体軸方向筋が完全に定着されるわけではないので、特に、低軸力下においては定着すべりを起こし、軸方向筋の引張能力を十分発揮できなくなる可能性がある。ここでは、軸方向筋降伏強度と定着す

べりの関係、そしてそれが耐力と変形性状に及ぼす影響について検討する。

3.2 試験体

試験体は、表-1 の No.5 と No.6 の 2 体である。試験体形状はシリーズ 1 と同様であるが杭頭のパイルキャップへの埋め込み長さを 30 cm にしている。杭体断面詳細を図-9 に示す。パラメーターは、杭体軸方向筋の降伏強度とその本数であり、No.5 は降伏強度 14.6 tf/cm^2 で 8 本、No.6 は降伏強度 10.86 tf/cm^2 で 10 本として、杭体軸方向筋が定着すべりを起こさないとして仮定した時の杭の曲げ耐力がほぼ同等になるように計画している。杭体のらせん筋は、シリーズ 1 でらせん筋量をらせん筋比に降伏強度を乗じた値 ($p_w \cdot w \sigma_y$) として評価した場合に通常量の 7 倍以上あれば、脆性的な破壊を起こさないことが分かっているので、ここでは 9 倍のらせん筋量とした。その他、杭体軸方向筋の有効プレストレス、中詰め軸方向筋およびらせん筋に関してはシリーズ 1 とまったく同様である。なお、コンクリートおよび鋼材の力学的性質を表-3 に示す。

3.3 加力・測定方法

実験装置は軸力装置部分を外した以外は、シリーズ 1 と同じものであり、载荷履歴についても同様とした。

3.4 実験結果

表-4 に実験結果および計算結果一覧を、図-10 に水平力 (P) と加力点水平変位 (δ) の関係を示す。なお、計算値 Q_{cal} は、 e 関数法により杭の断面解析を中詰め軸方向筋、中詰めコンクリートを杭と一体として行い、

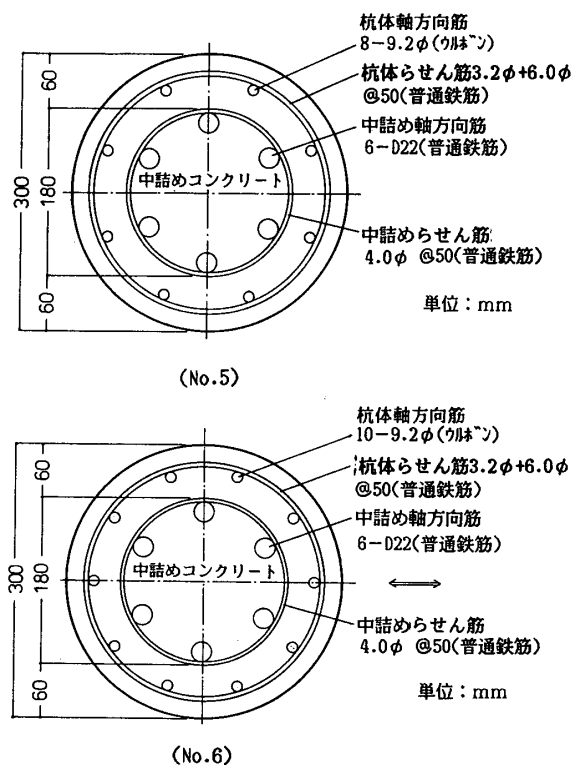


図-9 杭体断面詳細

表-3 使用材料の力学的性質 (シリーズ2)

鉄筋	直径 (mm)	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)
軸方向筋	9.2φ(高張力)	14600	15330	2.154
		10860	11220	—
	D22	3644	5581	1.966
らせん筋	6.0φ	—	5617	—
	4.0φ	5224	14839	2.239
	3.2φ	—	6406	—

コンクリート	圧縮強度(平均) (kgf/cm ²)	弾性係数(平均) ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	引張強度(平均) (kgf/cm ²)
杭 体	860~892(877)	3.52~3.59(3.56)	59.8~61.8(60.7)
中詰め・ パイルキャップ	280~312(302)	2.61~2.71(2.65)	23.1~25.1(24.5)

表-4 実験結果および計算結果一覧 (シリーズ2)

No	試験体名	P _{max} (tf)	Q _{cal} (tf)
5	FB(30)-9-80-3-0	16.0	17.7
6	PBK(30)-9-80-3-0	18.0	17.6

P_{max}: 実験値最大荷重
Q_{cal}: 計算値最大せん断力

最大曲げ耐力を算出し、危険断面を図-8の e 位置として、水平力に換算したものであり、その際に用いた材料の性質は、材料試験より得たものを使用した。No.5は、杭体軸方向筋の降伏強度が 14.6 tf/cm² で 8 本、No.6は、降伏強度 10.86 tf/cm² で 10 本であり、計算値はほぼ同等の値となっているが実験結果は No.6の方が No.5より 12% 程高くなっている。No.5と No.6の杭体軸方向筋の外形はまったく同じであり、定着長さも同じであるため、1本当たりの最大付着力は同じであるが、No.6は実験値 P_{max} と計算値 Q_{cal} が良く対応していることより、軸方向筋が定着すべりを起こす前に、その引張能力を十分生かすことができたのに対し、No.5はその降伏耐力に達する以前にパイルキャップ内で定着すべりを起こし、その引張能力を十分発揮できなかったため、実験値は計算値より 10% 程低くなったと考えられる。図-10において No.5は δ=20 mm 近辺で、No.6は δ=-20 mm 近辺で耐力が一時的に低下しているのは、杭体軸方向筋の定着すべりによるものと考えられる。これらの結果より、杭径 30 cm の B 種 PHC 杭で、曲げ耐力を十分発揮させるという意味では、杭体軸方向筋に、本実験で使用した異形 PC 鋼棒(9.2φ)を使用する場合、降伏強度がほぼ 11 tf/cm² 以内であれば、その定着長さとしては杭体軸方向筋径の約 33 倍となる 30 cm とればほぼ十分(平均付着応力度約 81 kgf/cm²)といえるが、それより高い降伏強度の軸方向筋を使用する場合には、

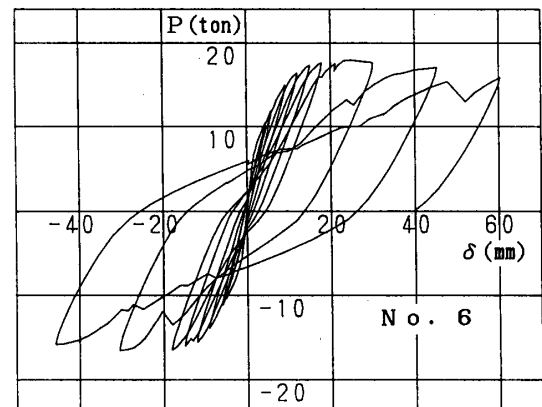
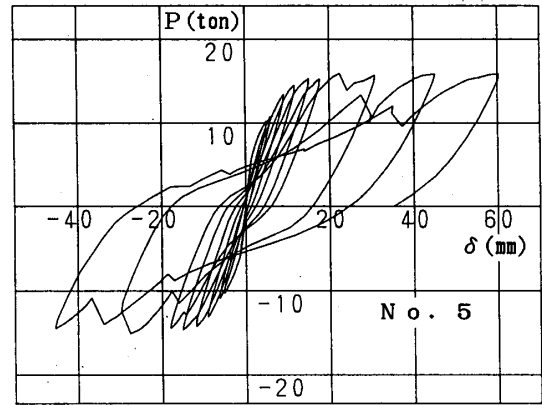


図-10 P-δ 関係

もっと定着長さをとるか杭体軸方向筋の径を小さくして本数を増やすなど、杭体軸方向筋の平均付着応力度を約 80 kgf/cm² 以下に押さえる必要があろう。

杭体軸方向筋の降伏強度を低下させることにより伸び能力を向上させることができる(降伏強度 14.6 tf/cm² で破断伸び 10%, 10.86 tf/cm² で破断伸び 13.8%) ので、本実験の狙いの一つには、杭体軸方向筋の靱性の向上もあった。しかし、No.5, No.6ともに最終的には杭体軸方向筋が、定着すべりを起こしたため、破断することなく部材角 1/15 まで、破壊を生じなかった。本工法では、適正な定着長さをとれば、杭体軸方向筋は降伏耐力は十分発揮するものの、破断強度以下で定着すべりを起こすこととなり、杭体軸方向筋の伸び能力にあまり期待することなく、靱性に富んだ杭基礎となることが分かった。

3.5 まとめ

杭頭を杭体軸方向筋とともにカットオフする工法の場合、杭体軸方向筋が定着すべりを起こす可能性があるため、定着すべりを抑え、軸方向筋に降伏耐力まで期待するためには、その降伏強度に応じた定着長さを取る必要がある。本試験体の場合、杭体軸方向筋の平均付着強度約 81 kgf/cm² であった。

4. 軸力による効果に関する実験 (シリーズ3)

4.1 目的

シリーズ2において、杭体軸方向筋の降伏強度が 11

tf/cm² 以内の場合、その定着長さ（杭頭のパイルキャップへの埋め込み長さ）を 30 cm（軸方向筋径の 32.6 倍）以上とれば、定着すべりを押さえ、その引張能力を十分生かせることが分かった。そこでシリーズ 3 では、No.6 とまったく同じ試験体として杭に軸方向外力を導入させた場合、杭の耐力、靱性にどのような影響をあたえるかを明らかにするために実験を行った。

4.2 試験体

試験体は 4 体であり、表-1 の No.6~No.9 である。試験体形状、配筋および杭体断面詳細はシリーズ 2 の No.6 と同じである。杭に加える軸方向外力は、杭の長期許容支持力として 35 tf、地震時の想定支持力として 0 tf、および 70 tf、そして極限状態の支持力として 105

tf の 4 種とした。また、軸力を一定に保ちながら水平力を作用させている。なお鋼材およびコンクリートの力学的性質を表-5 に示す。

4.3 実験装置および加力方法

実験装置はシリーズ 1 とまったく同様のもので、加力・測定方法も同じである。

4.4 実験結果

4.4.1 水平力-水平変位関係

表-6 に実験結果および計算結果一覧を、図-11 に水平力 (P) と加力点の水平変位 (δ) の関係を示す。これらの結果より、軸力が大きくなるに従って最大水平耐力も高くなるが、最大水平耐力時の加力点変位は逆に小さくなる傾向にある。さらに最大耐力後の耐力低下は、軸力が大きくなるほど顕著に現れている。大変形時 (1/15

表-5 使用材料の力学的性質 (シリーズ 3)

鉄筋	直径 (mm)	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁶ kgf/cm ²)
軸方向筋	9.2φ(高張力)	10860	11220	2.154
	D22	3644	5581	1.966
らせん筋	6.0φ	—	5617	—
	4.0φ	5224	14839	2.239
	3.2φ	—	6406	—

コンクリート	圧縮強度 (平均) (kgf/cm ²)	弾性係数 (平均) (×10 ⁶ kgf/cm ²)	引張強度 (平均) (kgf/cm ²)
杭体	860~906 (879)	3.51~3.67 (3.57)	59.4~64.4 (61.6)
中詰め・パイルキャップ	280~308 (299)	2.56~2.69 (2.63)	22.1~25.3 (23.7)

表-6 実験結果および計算結果一覧 (シリーズ 3)

No	試験体名	P _{max} (tf)	Q _{max} (tf)	Q _{cal} (tf)
6	FBK(30)-9-80-3-0	18.0	18.0	17.6
7	FBK(30)-9-80-3-1	19.9	20.5	20.1
8	FBK(30)-9-80-3-2	20.7	21.7	22.0
9	FBK(30)-9-80-3-3	22.3	24.8	23.8

P_{max} : 実験値最大荷重

Q_{max} : N-δ 効果を考慮した実験値最大せん断力

Q_{cal} : 計算値最大せん断力

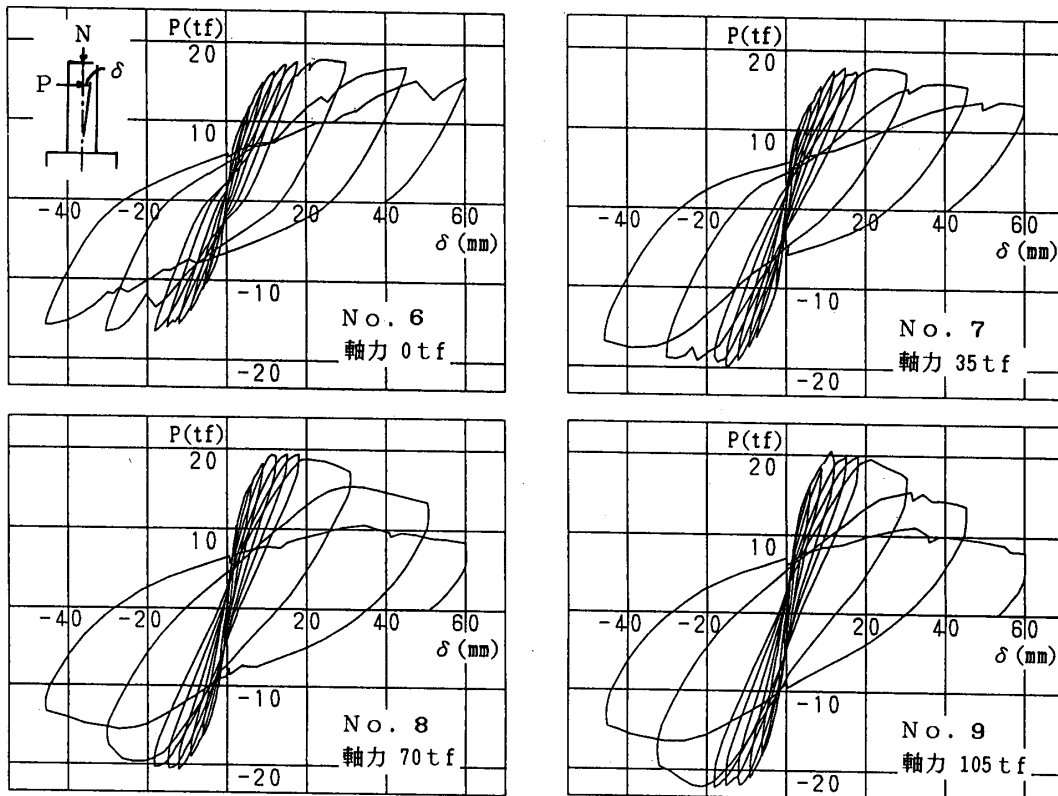
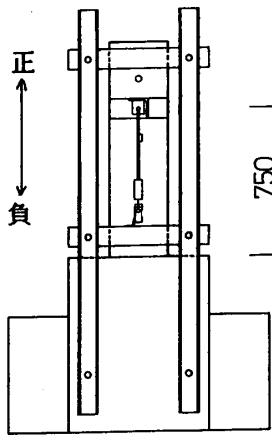


図-11 P-δ 関係

rad) に保持している水平荷重の正方向最大水平荷重に対する割合は、軸力 0 tf で 89 %, 35 tf で 75 %, 70 tf で 44 %, 105 tf で 39 % となっている。その結果、最大変形時では軸力の大きい順に耐力が小さくなっている。したがって、軸力が大きくなるほど最大耐力は高くなるが、靱性に乏しく変形性能は劣化している。

4.4.2 実験値と計算値の比較

表-6 において計算値 Q_{cal} は、軸力を考慮して、3.4 節と同様に e 関数法による求めた曲げ耐力から算出した最大せん断耐力である。さらに Q_{max} は実験における



軸方向変位測定方法

単位 : mm

各荷重時において軸力 (N) による付加曲げモーメントを考慮して水平力に換算したもののうち、最大値を記したものである。計算値 Q_{cal} と $N-\delta$ 効果を考慮した実験値 Q_{max} を比較すると、実験値 Q_{max} の計算値 Q_{cal} に対する割合は、軸力 0 tf で 1.02, 軸力 35 tf で 1.02, 軸力 35 tf で 0.99, そして軸力 105 tf で 1.04 と良く一致しているといえる。よって杭体軸方向筋の降伏強度が 11 tf/cm² 以下で、埋め込み長さが 30 cm 程度であれば杭の曲げ耐力を求めるに当たっては軸力があっても e 関数法による解析が有効であると思われる。

4.4.3 曲げモーメント-水平変位の包絡線

図-12 に正方向加力時におけるパイルキャップ底面

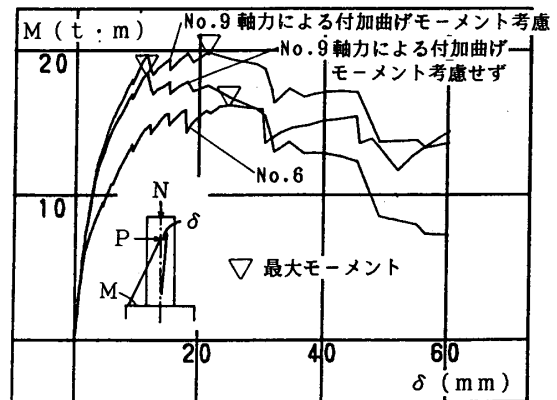


図-12 曲げモーメント-水平変位の包絡線

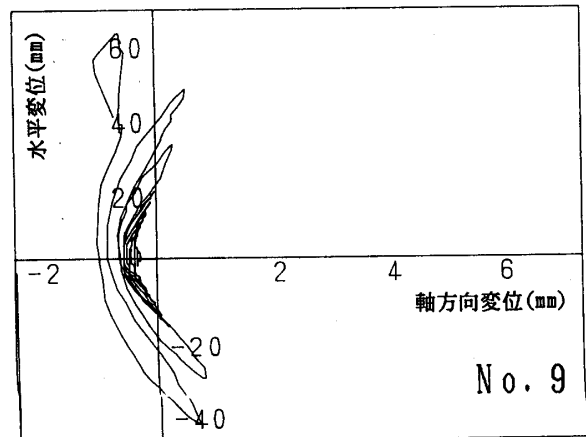
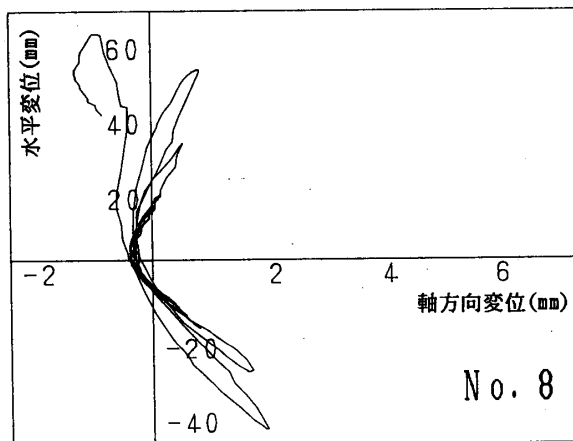
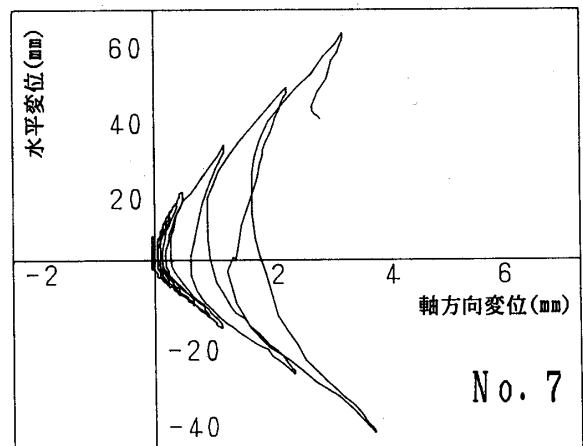
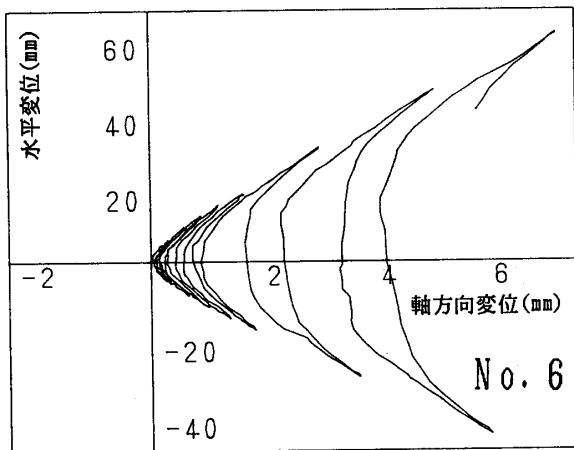


図-13 水平変位-軸方向変位関係

部の曲げモーメント (M) と加力点の水平変位 (δ) の包絡線を示す。軸力 0 tf の No. 6 と軸力 105 tf の No. 9 で N - δ 効果を考慮していない場合を比べると、No. 9 は、最大耐力時の水平変位が軸力 0 tf のそれよりかなり小さく半分以下になっている。しかし、No. 9 で N - δ 効果を考慮した場合の最大耐力時の水平変位は、 N - δ 効果を考慮していない場合の最大耐力時の水平変位より大きく、また、No. 6 のそれより小さいもののその差は少量であるといえる。よって、杭に軸力が作用した場合、実験値の水平耐力が最大値を超えて低下を始めても、まだ杭断面に加わるモーメントは上昇し続けていることになる。これらのことより、杭に軸力が生ずると危険断面の曲げモーメントが低下し始めるときの水平変位は、最大水平荷重時水平変位より大きい。したがって、杭の危険断面位置が最大モーメントとなる時の水平変位は軸力の大小にそれほど影響を受けないことが分かる。

4.4.4 杭体の軸方向変位

図-13 に示すようにしてパイルキャップ底面とそこから 75 cm の部分の間の軸方向変位の測定を行った。図-1 に示すように、中詰めコンクリートは、杭先端より少し低いところまでしか、打設しておらず、軸方向外力は、杭体のみ均等に力が加わるようにしているため、中詰めコンクリートには直接には力が加わらないようになっている。表-8 に水平加力前で軸力 105 tf 時の実験値の軸方向変位 δ_N と、軸方向筋とコンクリートの断面保持を仮定して、等価剛性を算出して求めた計算値の軸方向変位を示す。ここで、 δ_A は杭体コンクリートと中詰めコンクリートの間が完全に一体となり、中詰めコンクリートと中詰め軸方向筋も軸力を負担すると考えた時、 δ_B は杭体コンクリートと中詰めコンクリートが分離して杭体のみで軸力を負担したと考えた時の軸方向変位の計算値である。実験値軸方向変位が 0.29 mm に対し、杭体コンクリートと中詰めコンクリートが一体の場合が 0.28 mm、分離している場合が 0.45 mm である。よって杭体コンクリートと中詰めコンクリートは、杭全長にわたってほぼ一体化されていると考えてよいと思われる。図-13 に水平力が加わった時の最終変形までの加力点水平変位と軸方向変位の関係を引張り方向を正として示す。これより軸力 0 tf および 35 tf の低軸力では、水平変形の増加に伴って引張り方向に軸方向変位も大きく

なっている。これは、杭体コンクリートの曲げひび割れと杭頭埋め込み部の抜け出し、そして杭体軸方向筋の塑性変形のためと考えられる。しかし、軸力 70 tf、105 tf の高軸力になると水平変位が大きくなって軸方向変位はそれほど増えない。これは軸力によって先に述べた杭体コンクリートの曲げひび割れ、杭頭の抜け出し、そして軸方向筋の塑性変形が抑えられたためと考えられる。また最大水平変位 ($\delta=60$ mm) 時では軸方向変位が逆に圧縮側に変形している。これは高軸力によって杭頭接合部近傍で、軸方向筋の座屈を伴うコンクリート曲げ圧縮破壊が発生したためと考えられる。

4.5 まとめ

杭に加わる軸力が大きくなるほど、最大水平耐力も大きくなる。しかし、大変形時の耐力低下が激しく、靱性は劣化する。また、軸力が加わっても杭の曲げ耐力は e 関数法による断面解析で評価してよいことが明らかになった。

5. 結論

本論文は、杭とパイルキャップとの接合方法として、杭頭を杭体軸方向筋とともにカットオフして、中空部に異形鉄筋を配し中詰めコンクリートを打設して、曲げモーメントとせん断力を伝達させる杭基礎の耐力および変形性能の向上の確認を目的として杭径 30 cm の B 種杭を用いて実験し、その結果をまとめたものである。3 シリーズ (杭体のらせん筋量、杭体軸方向筋降伏強度、軸方向力) に分けて検討を行ったが、結論を要約すると以下ようになる。

(1) 杭の脆性的な破壊、急激な耐力低下を抑えるためには、杭体らせん筋量は断面積に降伏強度を乗じた値で評価すべきであることが明らかになった。

(2) 杭体らせん筋を上記の方法で評価した場合、現行のらせん筋量の 7 倍程度まで増やせば高軸力下においても変形性能は著しく改善され、安定した履歴性状を得ることができる。

(3) 埋め込み長さを 30 cm (杭体軸方向筋の 32.6 倍) とした場合、杭体の軸方向筋の降伏強度が 11 tf/cm² 程度以内なら杭体軸方向筋の定着すべりを余り起こさないですむので曲げ強度が計算値と良い対応を示すが、それより降伏強度が高くなると定着すべりを引き起こし、計算値より低い耐力しか発揮されなくなる。

(4) 降伏強度 11 tf/cm² 以上の杭体軸方向筋を使用する場合は、杭の曲げ耐力を計算値と同じにするためには降伏強度に見合った埋め込み長さ (定着長さ) をとるなどして、最大耐力時の杭体軸方向筋の平均付着応力度を 80 kgf/cm² 以下に押さえる必要がある。

(5) 杭に加わる軸力が大きくなるに従い、最大水平耐力は高くなる。しかし、杭自体の剛性が高くなるため、最大耐力時の水平変位は逆に小さくなる。さらに、大変

表-7 軸力 105 tf 時の軸方向変位

試験体名	軸力 (tf)	δ_N (mm)	δ_A (mm)	δ_B (mm)
FBK(30)-9-80-3-3	105	0.29	0.28	0.45

δ_N : 実験値軸方向変位

δ_A : 計算値軸方向変位 (コンクリートの境界一体)

δ_B : 計算値軸方向変位 (コンクリートの境界分離)

形時の耐力低下が著しくなり、靱性は劣下し、変形性能は悪くなる。

(6) 軸力が加わった杭の曲げ耐力は、軸力の加わらない杭と同様、 e 関数法の断面解析によって求めた耐力と良く一致しており、この方法で評価して良いことが明らかになった。

6. 今後の研究課題

本実験をとおして、杭の性能を向上させるための基礎的資料を得ることができた。さらにその断面解析により、本工法の有効性を確認することができた。しかし、これは杭径 30 cm で杭体軸方向筋径が 9.2ϕ の B 種杭に限った実験である。本工法の採用に当たり、その一般化にはまだ未解明の部分が残されているといえる。今後は種々の杭径、杭体軸方向筋径とその降伏強度や定着強度、さらに杭体の肉厚等が杭基礎の挙動に与える影響を知り、本工法の一般化を図りたいと考えている。

謝 辞

本研究を進めるに際し、東京工業大学教授岸田英明博士には適切な御指導御助言を頂きました。厚くお礼申し上げます。また、降伏強度の低い PC 鋼棒の開発に関しては、高周波熱練 (株) に、杭に関する御助言と試験

体の製作は、前田製管 (株) に御協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 黒正清治ほか：軸力と水平力を受ける高強度 PC 杭基礎の力学的性状に関する実験 (高強度 PC 杭の耐力及び変形性能向上に関する研究 (1)), 日本建築学会構造系論文報告集, No. 376, pp. 71~80, 1987. 6.
- 2) 黒正清治ほか：高強度 PC 杭の中空部にコンクリートの中詰めした効果に関する研究 (高強度 PC 杭の耐力及び変形性能向上に関する研究 (2)), 日本建築学会構造系論文報告集, No. 390, pp. 134~141, 1988. 8.
- 3) 黒正清治ほか：高強度 PC 杭とパイルキャップとの接合に関する研究 (高強度 PC 杭の耐力及び変形性能向上に関する研究 (3)), 日本建築学会構造系論文報告集, No. 398, pp. 143~153, 1989. 4.
- 4) 黒正清治ほか：高強度 PC 杭の変形性能を考慮した杭頭接合部に関する実験, 第 9 回コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9-2, pp. 471~476, 1987. 7.
- 5) 堀井昌博ほか：高強度 PC 杭の耐力及び変形性能向上に関する研究 (その 7, 8, 9), 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. B, pp. 1011~1016, 1988. 10.
- 6) 堀井昌博ほか：高強度 PC 杭の耐力及び変形性能向上に関する研究 (その 10, 11), 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. B, pp. 1355~1358, 1989. 10.

SYNOPSIS

UDC : 624. 155. 113

DEFORMABILITY OF THE PHC PILE-TO-PILE CAP CONNECTION

Study of the improvement in the bearing capacity and ductility of the prestressed high strength concrete (PHC) pile, part 4

by Dr. **SEJI KOKUSHOU**, **MASAHIRO HORII**, Dr. **AKIRA WADA**, Dr. **SIZUO HAYASHI**, **YASUO SAITOH**, and **SHINJI TAKAMI**, Members of A. I. J.

In order to provide the PHC pile-to-pile cap connection with deformability, the authors have developed a new connecting method. The details of the method were reported as Part 3 in April 1989. Recently, experiments have been carried out to examine the effects of quantity of spiral hoops, yield strengths of longitudinal reinforcement and axial forces of the pile, on the maximum shear strength and the deformability of the connection.

The paper concludes with the following :

(1) The quantity of spiral hoops must be evaluated as the product obtained by multiplying the ratio of spiral hoop with its yield strength ($p_w \cdot \sigma_y$), not as the ratio of spiral hoop (p_w). In order to protect the pile from brittle rupture, it is necessary to provide spiral hoops in a quantity more than 7 times the quantity of spiral hoops generally required.

(2) With the pile 30 cm embedded into the pile cap and with the yield strength of longitudinal reinforcement being 11 tf/cm² or less, the reinforcement never slips at the pile end. In this case, the experimental maximum strength concurs with the analytical bending strength.

(3) The greater the axial force of the pile, the bending strength will become also greater, but as the axial force becomes greater, the deformability of the connection reduces.