

# 高強度 PC 杭の中空部にコンクリートを中詰めした 効果に関する研究

—高強度 PC 杭の耐力および変形性能向上に関する研究 (2)—

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 小 林 克 巳\*\*\*\*  
正 会 員 渡 辺 厚\*\*\*\*\*  
正 会 員 光 木 史 朗\*\*\*\*\*  
正 会 員 上 田 邦 成\*\*\*\*\*

## 1. 序 論

近年、高強度 PC 杭 (PHC 杭) が、現状のままでは水平力が作用したときに変形能力に乏しいぜい性的な破壊を起こす恐れのあることが指摘されており、PHC 杭の変形能力改善に関する研究が、多く行われるようになってきている<sup>1)~11)</sup>。

前報<sup>1)</sup>ではプレストレストコンクリート部材として、現状の PHC 杭の力学的性状に関する実験を行い、各種パラメーターの変化が、変形能力、軸力保持能力、破壊形式等に及ぼす影響を明らかにし、ぜい性破壊を防止して、じん性のある PHC 杭を開発するための基礎資料を得た。特に、杭の中空部にコンクリートを中詰めし、軸力と曲げモーメントによって生じる圧縮力をこれにも分担させ、中立軸の移動を少なくすることにより、ぜい性的な曲げ圧縮破壊を防止できる可能性を、断面曲げ解析により示した。

本論は前報<sup>1)</sup>に引き続き、杭の変形能力を確保することに対する杭体中空部にコンクリートを中詰めすることの効果と杭体らせん筋として異形 PC 鋼棒を用いることの有効性を確認すること、および、杭の破壊に至るまでの挙動を明らかにすることを目的とした実験と三次元有限要素法による解析の結果について述べたものである。

## 2. 実験計画

- \* 東京工業大学 教授・工博
- \*\* (株)日建設計
- \*\*\* 東京工業大学 助教授・工博
- \*\*\*\* 福井大学 助教授・工博
- \*\*\*\*\* 新日本製鐵株式会社
- \*\*\*\*\* 東京工業大学 研究生
- \*\*\*\*\* 東京工業大学 大学院生  
(昭和 62 年 9 月 10 日原稿受理)

## 2.1 試験体

本論文で報告する試験体の一覧を表-1 に示す。

V シリーズは、前報<sup>1)</sup>で報告した I' シリーズをもとに、杭体中空部に普通コンクリートを中詰めしたシリーズであり、各軸力下において、中詰めコンクリートの変形能力改善に対する有効性を調べることを目的としている。

VI シリーズは、V シリーズをもとに、中詰めコンクリートに大きな拘束を与えるため、らせん筋として 3.2 mm  $\phi$ -@50 mm に加え 6.0 mm  $\phi$  の異形 PC 鋼棒を同じ、50 mm 間隔で添え巻きしたものである。

VII, VIII シリーズは、VI シリーズのせん断スパン比をそれぞれ 2.0, 4.0 に変化させたものである。この場合、異形 PC 鋼棒の降伏耐力は普通鉄筋に比べて約 3 倍あるため、らせん筋の持ち得る引張力は 4.0 mm  $\phi$ -@50 mm のものに比べ約 7 倍となる。

V, VI, VII, VIII シリーズの試験体の杭体内部に中詰めされたコンクリートは、パイルキャップのコンクリートと連続して打設した。杭頭より杭径の長さ程度しかコンクリートの中詰めを行わない場合には、初期ひび割れが中詰めコンクリート始端部位置近くに生じ、その後、中

表-1 試験体一覧

シリーズ	No.	試験体	中詰めコンクリート	らせん筋	せん断スパン比	軸力 (tf)
I'	11	JB-3 -80-3-0	なし	4.0 $\phi$ @50mm	3	0
	12	JB-3 -80-3-1				35
	13	JB-3 -80-3-2				70
	14	JB-3 -80-3-3				105
V	35	FB-3 -80-3-0	あり	4.0 $\phi$ @50mm	3	0
	36	FB-3 -80-3-1				35
	37	FB-3 -80-3-2				70
	38	FB-3 -80-3-3				105
VI	39	FB-2u-80-3-3	あり	3.2 $\phi$ @50mm に 加え 異形 PC 鋼棒 6.0 $\phi$ @50mm	3	105
VII	43	FB-2u-80-2-3			2	105
VIII	45	FB-2u-80-4-3			4	105

詰めコンクリートが内側から杭の側壁に力を作用する状態になり、中詰めコンクリート始端部位置近くのひび割れ幅が増大して破壊に至る場合があるとの報告<sup>3)</sup>があるので、本研究においては、試験体の杭全長にわたって中

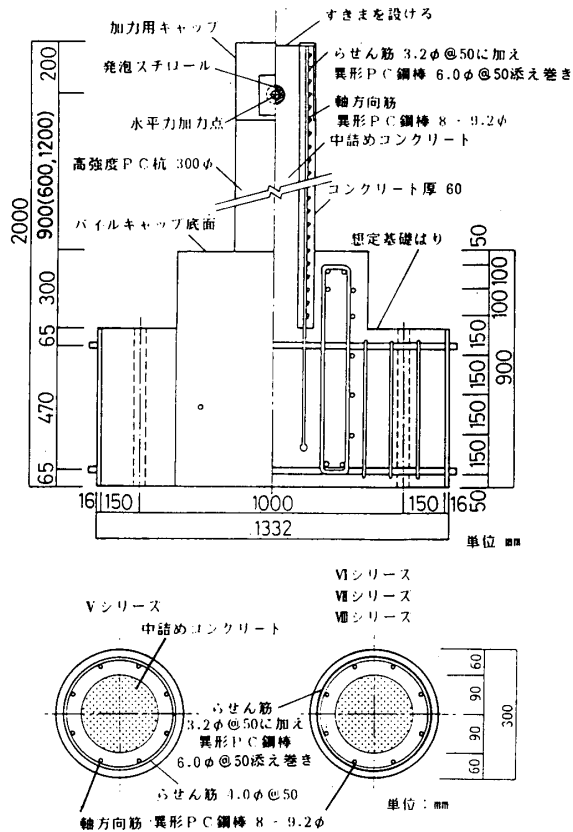


図-1 試験体形状・寸法

表-2 使用材料の力学的性質

コンクリート	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (x10 <sup>4</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
杭体	878 ~ 887	58 ~ 61	3.6 ~ 3.7
パイルキャップ 中詰め	233 ~ 293	21 ~ 26	2.0 ~ 2.7

鉄筋	降伏耐力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (tf/cm <sup>2</sup> )
軸方向筋 9.2φ	14400	15100	2050
らせん筋 3.2φ	—	4720	—
4.0φ	4400	5400	—
異形PC鋼棒 6.0φ	13900	14600	2070

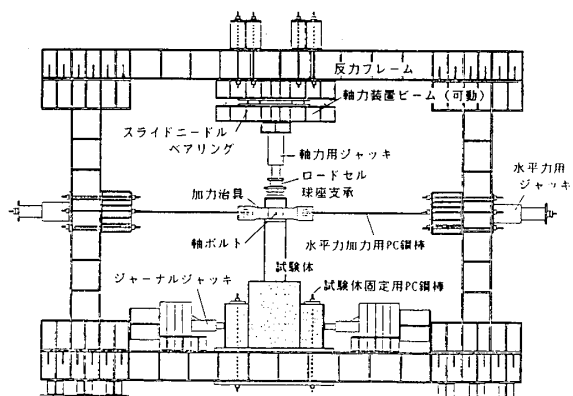


図-2 加力装置

詰めすることにした。

試験体の形状および寸法を図-1に示す。

使用材料の力学的性質を表-2に示す。

2.2 加力測定方法

加力装置を図-2に示すが、前報とまったく同様の方法によるものである。軸力の載荷に当たっては、実情として中詰め始端以深では杭体だけに軸力が加わっていることを配慮し、外力としての軸力は杭体に作用させ、直接には中詰めコンクリートへ作用させないようにした。また、水平力加力用の治具を試験体に設置するためのピンが、中詰めコンクリートと杭体との間の変形を拘束しないよう、図-1に示すように、ピンの周りに発泡スチロールを巻いた。

載荷経路についても前報<sup>1)</sup>と同様に、軸力を一定に保ち、外径 30 cm B種 PHC 杭の長期許容曲げモーメントが生じる水平力の 0.5 倍、1.0 倍、2.0 倍で荷重制御を

表-3 実験結果一覧

シリーズ	No.	P max (tf)	M max (exp) (tf・m)	M u (cal) (tf・m)	$\delta_{pu}$ (mm)	P f (tf)	P bc (tf)	破壊形式
I'	11	10.0	9.0	9.9	27.2	10.0	6.8	B (D)
	12	13.9	13.4	12.7	24.2	10.6**	11.0	F
	13	15.0	15.4	15.0	14.7	13.5	13.1	C (d)
	14	19.5	18.8	16.8	11.5	19.3	15.4	C (d)
V	35	10.0	9.0	9.9	25.1	9.5	6.8	B (D)
	36	14.7	13.2	12.7	17.5	11.9	9.6	B (D)
	37	16.8	16.2	15.0	15.4	5.0**	12.4	F
	38	20.0	19.3	16.8	12.0	9.7	16.8	C (D)
VI	39	19.1	18.4	16.8	11.7	10.6**	14.9	F
VII	43	30.6	19.4	16.8	9.8	20.5*	26.6	B (D)
VIII	45	13.3	17.7	16.8	16.3	5.7	9.8	B (D)

P max : 最大水平力  
M max(exp) : 最大水平力時の軸力によるパイルキャップ底部位置における付加曲げモーメントを考慮した曲げモーメント実験値  
M u (cal) : 最大曲げ耐力計算値  
 $\delta_{pu}$  : 最大水平力時変形  
P f : 破壊時水平力  
P bc : 曲げひび割れ時水平力  
\* : 経時加力中、それまでに経過した最大変形に達する前に破壊した  
\*\* : 部材角 1/20 以上まで加力できた (破壊形式 F)

破壊形式  
F : 軸力を保持し、部材角 1/20 以上まで加力できた  
B : 引張軸力方向が破壊した。軸力方向外力は保持しており、らせん筋も破壊しなかった。  
C : 曲げ圧縮破壊し、軸力方向外力を保持できなくなった

破壊形式において ( ) 内に示す記号は、最大水平力に達したのが部材角 1/50 の繰り返し加力後のもの、それ以前のものは F とする

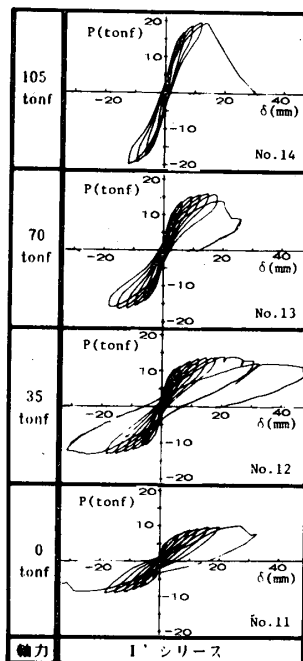


図-3 水平力と水平変位の関係 (I'シリーズ)

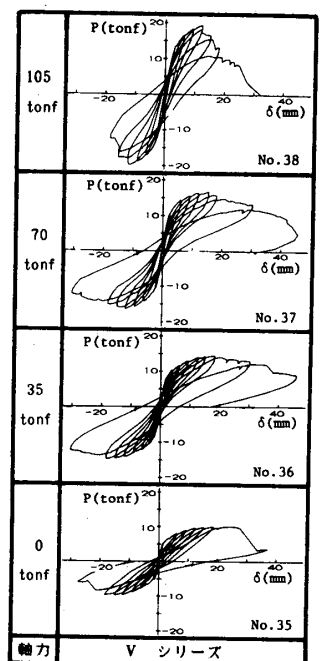


図-4 水平力と水平変位の関係 (Vシリーズ)

行った後、杭の部材角 1/150, 1/100, 1/75, 1/50 の変形制御で漸増繰り返し载荷を行い、最終的に 1/20 程度まで変形させることを原則とした。

変位の測定についても、前報<sup>1)</sup>と同様に行った。

### 3. 中詰めコンクリートの有無の影響について

#### 3.1 水平力と加力点での水平変位の関係

実験結果一覧と破壊形式を表-3 に示す。I' シリーズと V シリーズの水平力  $P$  と加力点での水平変位  $\delta$  との関係を図-3, 図-4 に示す。ただし、図-3 は前報<sup>1)</sup> 図-4 からの抜粋である。

V シリーズと I' シリーズを比較するために、図-3 と図-4 の正側包絡線を比較して図-5~図-8 に示す。軸力 0 tonf の試験体 (No. 11, No. 35) は引張側軸方向筋の破断により保持水平力が低下し、中詰めコンクリートの有無による違いは見られなかった。軸力 35 tonf を与えた試験体 (No. 12, No. 36) も中詰めコンクリートの有無によらず、ほぼ同様な性状を示したが、中詰めコンクリートの無いもの (No. 12) がコンクリートの圧壊により保持水平力が低下したのに対比、中詰めコンクリートが有るもの (No. 36) は大変形時の軸方向筋破断で保持水平力が低下した。これは、中詰めを行って、圧縮域コンクリートの圧壊を遅らせた結果、水平変位が増加するためには、コンクリートが圧壊を起こさない分だけ多く引張側の軸方向筋が伸びる必要がある。そのために、中詰めコンクリートのない試験体では、水平変位 50 mm まで軸方向筋の破断が生じなかったにもかかわらず、中詰めした試験体では、中詰めコンクリートのない試験体よりも小さな変位で、軸方向筋の破断が生じたものと思われる。軸力 70 tonf を与えた試験体 (No. 13, No. 37) は、最大水平力に達するまでは、中詰めコンクリートの有無によらずほぼ同様な性状を示したが、さらに変形を増加させると、中詰めコンクリートの無いもの (No. 13) は保持水平力の低下が大きく、 $\delta=20$  mm (部材角 1/45) で杭体コンクリートが圧壊して軸力を保持できなくなったのに対し、中詰めコンクリートが有るもの (No. 37) は最大水平力に達した後の保持水平力の低下が小さく、 $\delta=45$  mm (部材角 1/20) に至っても、保持水平力は最大水平力の約半分になったものの、軸力を保持していた。軸力 105 tonf を与えた試験体 (No. 14, No. 38) は、最大水平力に達した後、中詰めコンクリートの無いもの (No. 14) が、直ちに軸方向筋の座屈およびらせん筋の破断を伴う極めてぜい性的な圧縮破壊をし、中詰めコンクリートが有るもの (No. 38) もかなり急激に圧壊が進行して、 $\delta=20$  mm (部材角 1/45) で軸力を保持できなくなった。

結局、この杭の短期軸力に相当する、軸力 70 tonf のときに、中詰めコンクリートが変形能力を大きくする効果が最もよく表れた。しかし、それよりも小さな軸力の

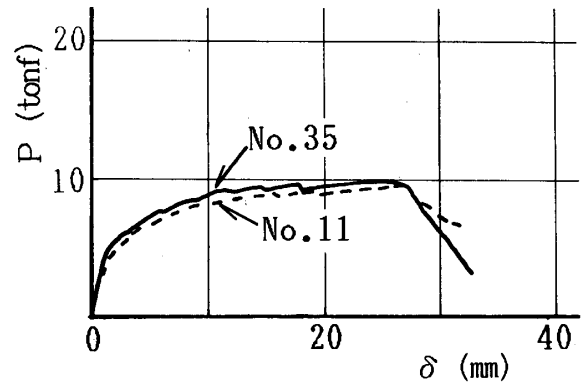


図-5 中詰めコンクリートの効果 (軸力=0 tf) — 荷重変位曲線の正側の包絡線による比較

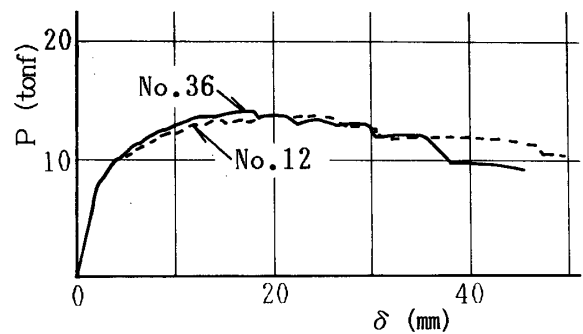


図-6 中詰めコンクリートの効果 (軸力=35 tf) — 荷重変位曲線の正側の包絡線による比較

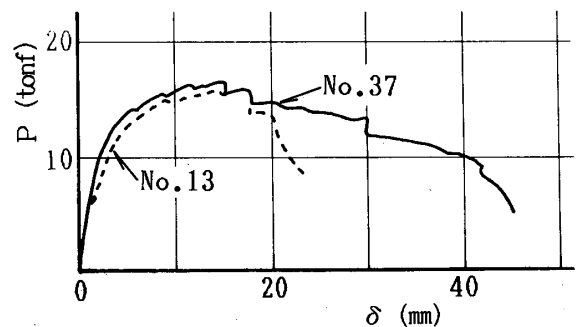


図-7 中詰めコンクリートの効果 (軸力=70 tf) — 荷重変位曲線の正側の包絡線による比較

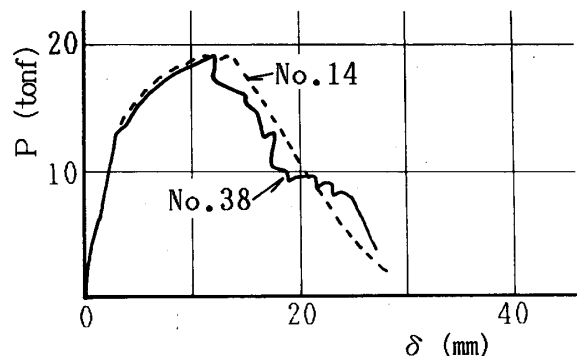


図-8 中詰めコンクリートの効果 (軸力=105 tf) — 荷重変位曲線の正側の包絡線による比較

範囲では、破壊が杭軸方向筋の破断であったために中詰めコンクリートの効果は少なかった。軸力が極限軸力と考えている、105 tonf と大きな軸力となったときには、コンクリートを中詰めしても圧縮側のコンクリートの破壊を防ぐことができず、変形能力を大きくさせることはできなかった。70 tonf を超えるような大きな軸力下では中詰めコンクリートを施した上に、さらに多くのらせん筋が必要であると思われ、4章において検討をしている。

### 3.2 杭体コンクリートと中詰めコンクリートの一体性

図-9 に示すように、杭体表面にストレインゲージをてん布し、中詰めコンクリートにはモールドゲージを埋め込んでひずみ測定を行った。図-10 に軸力のみを105 tonf まで加えたときのコンクリートのひずみ分布を No. 38 について示す。軸力だけを加えた場合、杭体および中詰めコンクリートにほぼ様なひずみが生じており、PHC 杭から中詰めコンクリートへ、軸力が伝わっているものと判断でき、軸力を伝達できる程度の一体性は確保されていたものと考えられる。

図-11 は杭体コンクリート表面の軸方向ひずみの平均値と水平力の関係を示したものである。初期の軸方向ひずみは、軸力 105 tonf をすべて杭体が負担したとす

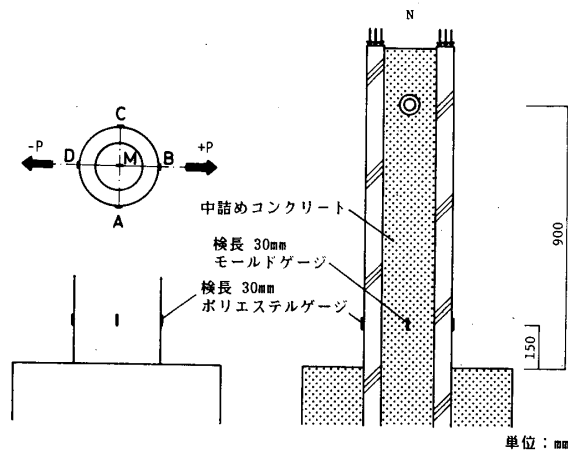


図-9 ひずみ測定位置

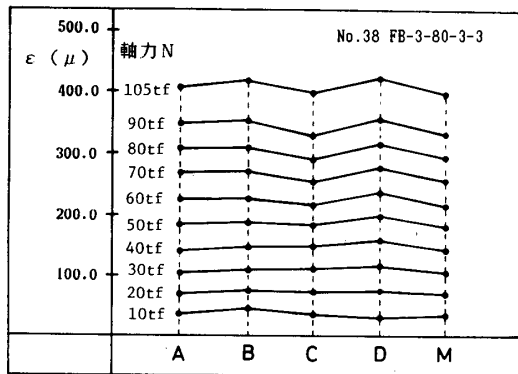


図-10 軸力による杭体および中詰めコンクリートの軸方向ひずみ分布

れば約 650 μ, 中詰めコンクリートと杭体が完全に一体であるとすれば約 400 μ となる。A, B, C 各断面における軸方向ひずみの平均値は、図-11 に示すように、水平力を加える前には、ほぼ 420 μ であり、中詰めコンクリートが一体と考えた時の初期軸方向ひずみの値 400 μ と近い。水平力の繰り返し载荷を行うと、これらのひずみは、若干増加するが、軸力をすべて杭体が負担すると考えた時の値 650 μ よりも小さかった。

図-12 は、実験終了後に、No. 37 について行った中詰めコンクリートと杭体内面のひび割れの観察の結果である。両者のひび割れ位置はほぼ対応しているが完全に一致しているとは言えない。したがって、水平力が加わってひび割れが生じる部分では、中詰めコンクリートと杭体が完全に一体であるとは言えないが、中詰めしてある範囲が長いので、初期に中詰め部分が負担した軸力はそのまま受け持ち続けていたものと考えられる。

### 3.3 3次元有限要素法による解析

#### (1) 解析の目的

実験では、中空部にコンクリートを中詰めした杭に水平力を加え、加力点の水平変位、杭表面および中詰めコンクリートのひずみ、定着部分の軸方向筋のひずみなどの測定を行い、杭中空部にコンクリートを中詰めすることの靱性への影響を調べた。軸力と水平力を受ける杭の挙動についてより一般的に考察するためには、杭体内部の応力やひずみの状態、軸方向筋のひずみと附着性状、中詰めコンクリートの応力伝達メカニズムの解明など解析的な追跡が重要である。杭を1次元部材として取り

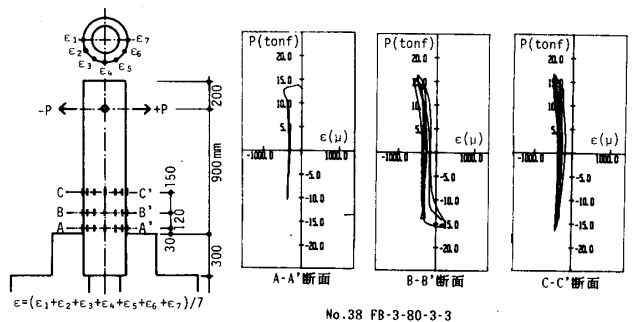


図-11 杭体表面の軸方向ひずみと水平力の関係

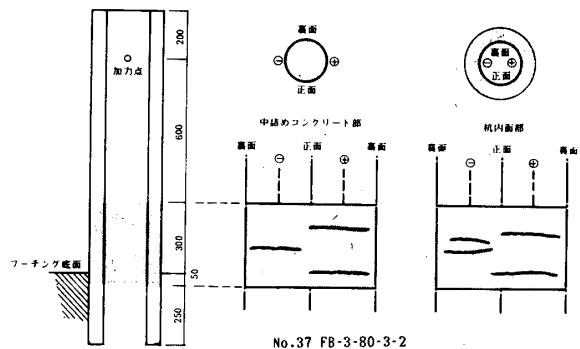


図-12 杭体および中詰めコンクリートのひび割れ図

扱地盤との連性を考えている解析例はあるものの、杭自身の内部まで含めた3次元的な力学的性状について解析した論文はほとんどない。そこで本節では、杭のコンクリートの中詰め効果を解析的に調べることを目的として、ひび割れを考慮した3次元有限要素法による解析を行った。

(2) 解析方法

解析方法は、3次元有限要素法を用いたが、以下にその仮定条件を列記する。

① コンクリート要素は、9個の非適合モードを含む isoparametric 6 面体要素とし、ひび割れについては考慮するが、圧縮側での塑性化、圧壊等は考慮しない。

② ひび割れについては、3軸状態でのコンクリートの最大主応力が引張強度を超えた場合、要素にひび割れが発生したと判断する。ひび割れの発生した要素については、ひび割れ面に垂直な方向の応力およびこの面でのせん断応力の伝達は行えないとする。

③ 軸方向筋およびらせん筋については、節点間を直線で結び軸力だけを負担するトラス部材と仮定し、応力ひずみ関係を bi-linear 型とする。

④ 軸方向筋とコンクリートとの間の付着性状については、付着応力—すべり関係が bi-linear 型の特性を持つボンドリンクによってモデル化する。

⑤ 中詰めコンクリートとPHC杭との境界部分の付着性状については、境界面でのすべりを考慮した場合(中詰めスリップ型)と、境界面ですべらないと仮定した場合(中詰め一体型)の2ケースについて比較する。

⑥ PHC杭とパイルキャップとの境界部分については、その部分に半径方向の引張力が作用した場合のみ、分離を考慮する。

⑦ 軸方向筋のパイルキャップへの定着部分については、パイルキャップに埋め込まれた軸方向筋の引き抜き力と抜け出し量との関係をあらかじめ別の解析によって求め、この関係を近似したバネ要素を軸方向筋の先端に組み込むことにより考慮する。

⑧ 解析手順として、初めに杭体だけのモデルを用いてプレストレス導入時の解析を行い、次にこの初期ひずみ、初期応力を持った杭体を、無応力のパイルキャップおよび中詰めコンクリートと結合し、解析を進める。

(3) 解析モデル

図-13 に中詰め杭の解析モデルを示す。解析に当たっては次の3ケースのモデルを用意した。

- 中詰めコンクリートを施していない杭(中空型杭)
- 中詰めコンクリートを施した杭で、中詰めコンクリートとPHC杭との境界面でのすべりを考慮したモデル(中詰めスリップ型杭)
- 中詰めコンクリートを施した杭で、中詰めコンクリートとPHC杭が境界面ですべらないと仮定した

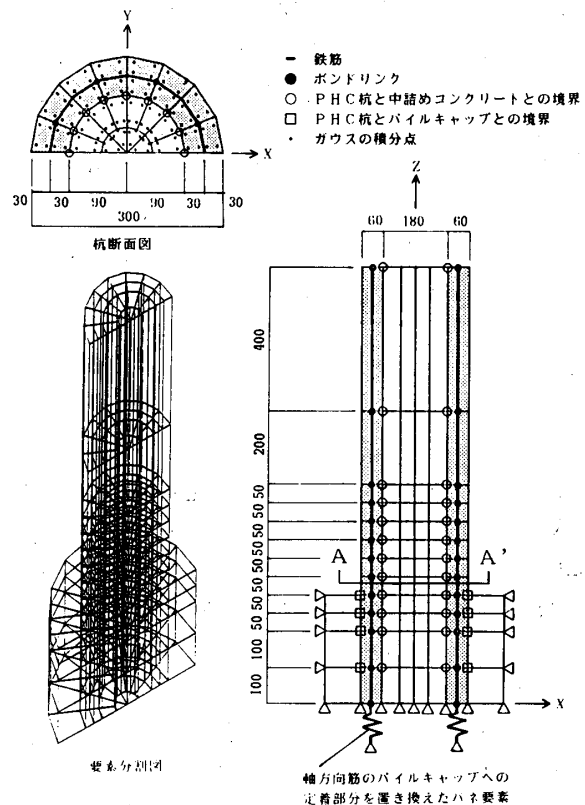


図-13 解析モデル(中詰め杭)

モデル(中詰め一体型杭)

試験体は加力軸および材軸を含む平面に関し対称であるため、解析モデルは試験体加力軸を通る鉛直面で縦割りした1/2の部分とした。実験時にパイルキャップには大きなひび割れが発生しなかったこと、および3.3(2)で述べたようにパイルキャップに埋め込まれた軸方向筋の定着部分をバネ要素に置き換えたことを考慮し、パイルキャップ部分は底面からパイルキャップ内部へ30cm入った平面と、PHC杭表面から10cm離れた側面で切り取った部分だけをモデル化し、その外周をピン支持とした。水平力加力点より外側の部分は、弾性体として挙動することを考慮し、このモデルでは無視し、水平力加力点を先端とした。

加力軸および材軸を含む平面の節点の境界条件は、その面に垂直なY方向変位を拘束した。荷重は、杭先端に一定軸力(N/2)を与えながら、水平力(P/2)を単調載荷した。なお、実験と同じく中詰めコンクリートに

表-4 解析に用いた材料定数

コンクリート		圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (x10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
杭体		884	58.1	3.58
パイルキャップ・中詰め		233	21.1	2.02

鉄筋		降伏点 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
軸方向筋	9.2φ	14200	15100
らせん筋	4.0φ	4400	5400
	6.0φ	4500	5500

は直接には軸力を導入していない。

解析に用いた材料定数については、表-4 に示す値を用いた。

(4) 解析結果および実験結果との比較

実験結果から、中詰めコンクリートの効果が大きく表れた軸力 70 tonf を導入した場合についての解析結果について述べる。

① ひび割れ発生状況

図-14 にひび割れ発生分布図を示す。すべてのモデルに共通して、実験結果と同様に、材軸方向にほぼ垂直な曲げひび割れが先行した。パイルキャップ部分に発生したひび割れの面は、紙面にほぼ平行である。

中空型杭のひび割れ発生状況は、実験における試験体のひび割れ発生状況と良く一致していた。中詰めスリップ型杭については、中詰めコンクリートには軸力が負担されず、曲げひび割れが杭体より先に中詰めコンクリートに多く発生している。中詰め一体型杭については、中詰めコンクリートも軸力を負担し、杭体の軸方向圧縮応力が低減されるので、中空型杭・中詰めスリップ型杭に比べ、杭体のひび割れ発生荷重がやや低い。この傾向は、実験における比較にも表れていた。図-14(C) に示す中詰め一体型杭のひび割れ状況が、図-12 に示す実験終了後におけるひび割れ状況に最も近い傾向を示した。以上のことから、実験の中詰めコンクリートは、杭体とほぼ一体に挙動したものと考えられる。

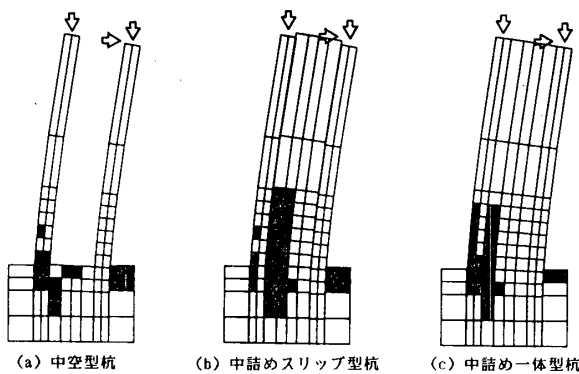


図-14 ひび割れ分布図

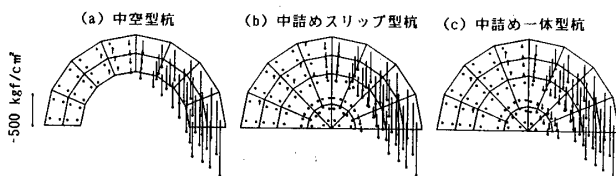


図-15 A-A' 断面での軸方向応力分布図

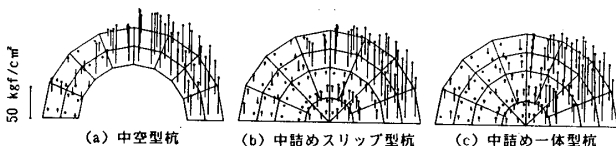


図-16 A-A' 断面でのせん断応力分布図

② コンクリートのひずみ、応力分布図

水平力 13.8 tonf 時のコンクリートの軸方向応力度分布とせん断応力度分布を図-15, 図-16 に示す。ひび割れ部分ではせん断応力を負担できないため、軸方向圧縮応力の大きい部分にせん断応力が集中しており、この傾向は図-16(a) 中空型杭に特に顕著に表れている。このことから、さらに水平力を増加させ圧壊が進行するにつれて中空型杭 (a) は、軸方向圧縮応力の大きい部分に集中していたせん断力を保持できなくなり、非常にぜい性の破壊をするものと考えられる。これに対し、中詰め型杭 (b), (c) については、中詰めコンクリートが軸力とせん断力を負担している。このことから、実験において中詰めコンクリートを施した試験体が変形能力に優れていたことを説明できる。

4. らせん筋として異形 PC 鋼棒を用いた場合

3章において、杭の変形能力を増すうえで中詰めコンクリートが効果的であることを実験と解析から示したが、軸力が 105 tonf と大きい場合には中詰めコンクリートも圧縮側のコンクリートの圧壊を防ぐうえであまり効果がなかった。軸力が大きい場合にも大きな変形能力を確保するためには、V シリーズの試験体よりもさらにらせん筋を増す必要があることが前報<sup>1)</sup>の結論から推測される。

そこで、本章では No. 38 の試験体のらせん筋を増した場合 (No. 39) について調べ、比較した。らせん筋量を、この杭に対し配筋できるほぼ最大と思われるまで増すこととし、さらに、らせん筋に降伏強度が 13 000 kgf/cm<sup>2</sup> 以上ある PC 鋼棒を用いた。

図-17 に No. 39 の水平力と加力点での水平変位の関係を示し、また、図-18 に No. 38 と No. 39 の正側包絡線の比較を示す。らせん筋量の大きな No. 39 は、最大水平力以後の耐力低下も少なく変形 60 mm (部材角 1/15) に至っても軸力を保持することができていた。

No. 43 は No. 39 に対しせん断力の影響の大きくなるシアスパン比 2 の場合で、No. 45 は、曲げ圧縮の影響が大きくなるシアスパン 4 の場合である。図-19, 図-

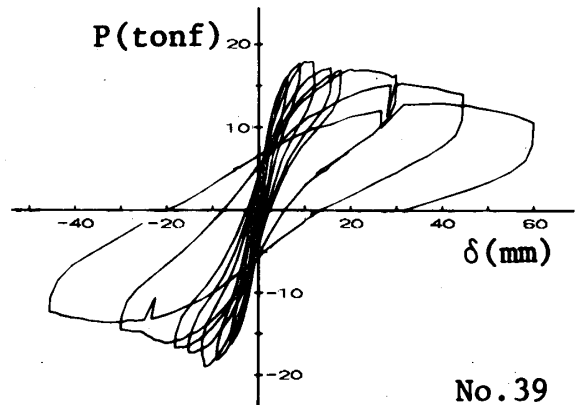
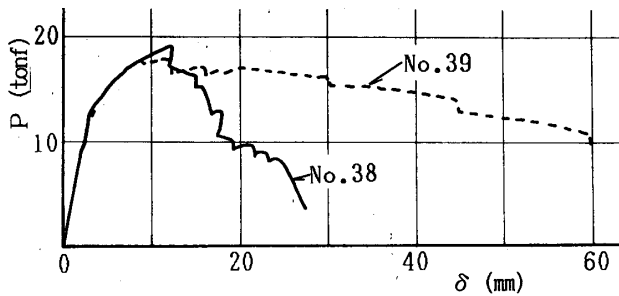
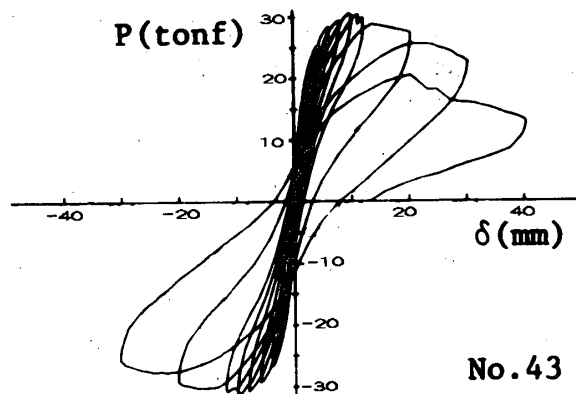


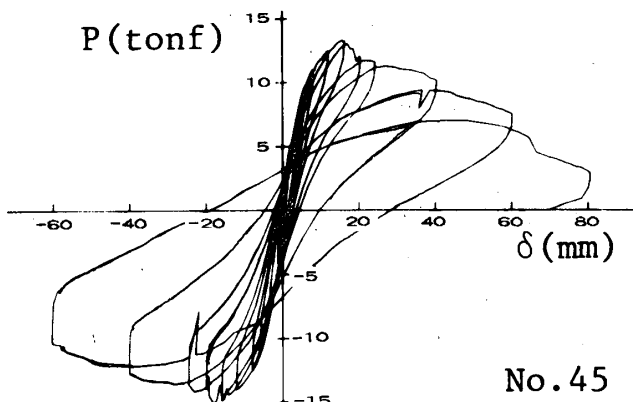
図-17 水平力と水平変位の関係 (No. 39)



図—18 高強度らせん筋の効果 (軸力=105 tf)—荷重変位曲線の正側の包絡線による比較



図—19 水平力と水平変位の関係 (No. 43)



図—20 水平力と水平変位の関係 (No. 45)

20にそれぞれの水平力と加力点での水平変位の関係を示す。コンクリートの中詰めし、これだけ大きならせん筋を配しておけば、いずれの場合も大変形に至っても軸力を保持することができており、良好な変形能力を示している。

軸力が小さい場合には、杭の軸方向筋に引張破断が生じる。これは、軸方向筋として用いたPC鋼材の、伸びが少ないという材料特性に起因している。これを防止するためには伸び能力のある高強度鉄筋を用いる必要があり、これらの材料の開発やそれを使用した杭の純曲げ時の性状に関する実験についての報告もなされている<sup>5),10)</sup>。しかし、モーメントこう配のある場合の杭の変形能力と軸方向筋の伸びの関係は、杭頭におけるひび割

れ性状や軸方向筋の定着性状などの影響も大きく、曲げ性状からだけでは明らかにできないこともあるので、今後の課題としたい。また、軸方向筋の伸びがなくとも軸方向筋のパイルキャップへの定着、すなわち、杭頭とパイルキャップとの接合方法を工夫することにより、杭基礎としての変形能力を確保することも可能であろうと考えている<sup>2),11)</sup>。

## 5. 結論

### 5.1 まとめ

杭体中空部に普通コンクリートの中詰めすること、さらにはらせん筋として異形PC鋼棒を用いることによる効果に関して行った、外径30 cm、軸方向筋8-9.2 mmφ、軸力を4段階に変えたPHC杭についての実験結果と、ひび割れを考慮した3次元有限要素法による解析結果を要約すれば次のようになる。

(1) らせん筋として、4.0φの普通鉄筋を50 mm間隔程度に入れた場合、杭の中空部に普通強度コンクリートの中詰めすれば、短期軸力相当の70 tonfのときに最大の効果が見られた。軸力がそれよりも少ないときには、杭の破壊が軸方向筋の破断により生じたために中詰めコンクリートの効果は少なく、軸力がそれを超える場合には、中詰めコンクリートを施しても、4.0φの普通鉄筋50 mm間隔程度のらせん筋ではコンクリートの圧壊を防ぐことはできなかった。

(2) 極限軸力と考えられる105 tonfの軸力を受ける場合であっても、中詰めコンクリートを施した上で、らせん筋として異形PC鋼棒を用い、杭体および中詰めコンクリートに大きな拘束を与えれば、せん断スパン比2.0~4.0の範囲で大きな変形能力を示し、ぜい性的な破壊を防止することができた。

(3) 中詰めしてある範囲が長ければ、軸力を杭体から中詰めコンクリートへ伝達する程度の、中詰めコンクリートと杭体の一体性は確保できる。水平力が加わって曲げひび割れが生じて、中詰めコンクリートが初期に負担した軸力は保持できるものと考えられる。

(4) これら、中詰めコンクリートの挙動と効果について、3次元有限要素法により解析的にも明らかにした。

### 5.2 今後の課題

本研究で用いた試験体は、軸方向筋を残して杭頭のカットオフができることを前提としている。杭体コンクリートに損傷を与えず軸方向筋を残してカットオフすることは、現状では技術的に難しいが、このような杭頭カットオフが簡便に行えるような工法の開発が必要であろう。あるいは逆に、軸方向筋まで含めてカットオフした場合には、変形能力のある杭頭結合部のディテールの開発が必要である。また、本論文では、軸力の高い範囲でのじん性改善に主体を置いている。軸力が低い範囲でも大変形時において安定した復元力特性を得るためには軸

方向筋の破断を防ぐ必要があるが、これは、伸び能力の大きな PC 鋼棒の開発とともに、上で述べた変形能力のある杭頭結合部のディテールの開発とも密接な関係があるので、併せて今後の研究課題としたい。

なお、本研究において実験では、直径 30 cm の既製杭を用いている。実大の杭といえどもこれは、ほぼ最小の杭径であるので、さらに大きな径の杭を用いる場合には、さらに検討が必要であり、これも今後の研究課題としたい。

#### 謝 辞

基礎構造に関し、東京工業大学岸田英明教授には日頃よりご助言を頂いており、深く感謝の意を表します。

本研究に際して、(株)日建設計の木原硯美、斉藤安生の諸氏、ならびに、前田製管(株)の方々に有益なご助言を頂いた。厚くお礼申し上げます。

本研究は文部省科学研究費補助金一般研究(B)の援助を受けております。関係各位に厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

前報 1) に示した参考文献は省略する。

- 1) 黒正清治, 和田 章, 小林克巳, 光木史朗, 上田邦成: 軸力と水平力を受ける高強度 PC 杭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: 鋼製ソケットによる杭頭接合部に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集 B, pp. 981-982, 1985.
- 3) コンクリートポール・パイル協会: 既製コンクリートくいの性能確認報告第三巻, 1982. 7
- 4) 柴田拓二, 城 攻, 後藤康明, 菊地 優: 遠心力 PHC 杭のコンクリート充填効果について, 日本建築学会学術講演梗概集 B, pp. 981-982, 1985.
- 5) M. Schupack and K. Mizuma: Bond Properties of High Strength, Low Carbon Bars with Drawn-in Helical Deformation for Use in Pretensioning and as Special Normal Reinforcement, ACI Journal, February pp. 249-275, 1979.
- 6) David A. Sheppard: Seismic Design of Prestressed Concrete Piling, PCI Journal, March-April pp. 20-49, 1983.
- 7) J. F. Stanton et al.: Lateral Load Tests on Prestressed Piles, 8 WCEE, San Francisco. Vol. VI, pp. 749-756, 1984.
- 8) R. Park et al.: Strength and Ductility of Reinforced and Prestressed Concrete Columns and Piles under Seismic Loading, 8 WCEE, San Francisco Vol. VI, pp. 513-520, 1984.
- 9) O. C. Zienkiewicz: The Finite Element Method in Engineering Science, McGRAW-HILL, 1971.
- 10) 西山峰広, 六車 照, 渡辺史夫: 高一様伸び鋼棒と横拘束併用による高強度 PC くいの曲げ靱性改善, コンクリート工学年次論文報告集, No. 2, Vol. 9, pp. 477-482, 1987.
- 11) 黒正清治ほか: 高強度 PC 杭の耐力及び変形性能向上に関する研究(その 5, その 6), 日本建築学会学術講演梗概集 B, pp. 1097-1100, 1987.

## SYNOPSIS

UDC : 624. 155 : 624. 04

### THE EFFECTIVENESS OF CONCRETE FILL IN THE HOLLOW PART OF PHC PILES

Study of the improvement in the bearing capacity and deformability of the prestressed high strength concrete (PHC) pile, Part 2

by Dr. SEIJI KOKUSHO, MASAHIRO HORII, Dr. AKIRA WADA, Dr. SHIZUO HAYASHI, Dr. KATSUMI KOBAYASHI, ATSUSHI WATANABE, SHIRO MITSUGI, and KUMINARI UEDA, Members of A. I. J.

Since it was disclosed that the piles and pile caps of some buildings in Japan were damaged by an earthquake in 1978, many studies on substructures have been made in order to establish a rational design method for substructures.

In part 1 of this paper, we explained the results of experiments in which it was found that the currently used PHC piles had limited deformability. We also showed analytically that concrete fill in the hollow part of PHC piles could possibly improve the deformability of these piles.

In this paper, we report on the results of experiments in which it was found that a combination of concrete fill in the hollow part of PHC piles and high strength spiral hoop cast into the piles to confine the concrete was very effective for improving the deformability of PHC piles even under the limit magnitude of axial load. We also describe the effectiveness of concrete fill in the hollow part of PHC piles on the basis of the results of three dimensional analysis by Finite Element Method.