Architectural Institute of Japan

【論　文】

日本建築学会構造系論文報告集 第434号・1992年4月
Journal of Struct. Constr. Engng, AIJ, No. 434, Apr., 1992

PHC杭基礎の曲げ耐力の計算方法に関する研究

高強度PC杭の耐力および変形性能向上に関する研究（5）

THE CALCULATION METHOD FOR THE ULTIMATE BENDING STRENGTH OF PHC PILES

Study of the improvement in the bearing capacity and ductility of the prestressed high strength concrete (PHC) pile Part 5

堀井昌博*, 和田　章**, 林　静雄***, 坂田弘安****
香取慶一*****, 斉藤安生******, 黒正清治*******
Masahiro HORII, Akira WADA, Shizuo HAYASHI, Hiroyasu SAKATA
Keiichi KATORI, Yasuo SAITO and Seiji KOKUSHO

In order to improve the deformability of PHC piles, we proposed the details of new connecting method between the pile and the pile cap in Part 4. Some new experiments and analyses have been carried out to examine the effect of the buried depth of pile into the pile cap and the amount of longitudinal bars arranged in the pile and the hollow part of it for the ultimate bending strength of PHC pile structure under low axial loads. We took the following result.

1) The deformability of PHC pile with large buried depth becomes smaller than that with small one.

2) The ultimate bending strength and the deformability of PHC pile becomes better when circumference of longitudinal bars of pile is increased.

3) We can calculate the ultimate bending strength of PHC piles by the method shown in this paper.

Keywords : *PHC pile, deformability, bending strength, buried depth, longitudinal bars, development length*
PHC杭基礎，変形性能，曲げ耐力，埋め込み深さ，軸方向筋，定着長さ

1. 序　論

筆者らは，PHC杭基礎の水平耐力と塑性変形性能の改善を目的とし，施工性も考慮して，杭頭を軸方向筋とともに切断してパイルキャップ内へ埋め込み，杭の中空部に，中詰め軸方向筋を配した上で中詰めコンクリートを打設する構法（以下，本構法と呼ぶ）を提案し，本構法の有効性を検証するため，直径30 cmのB種PHC杭を用いて，軸力と水平力が作用するPHC杭基礎の実験を行い，その結果を報告[1)~3)]してきた。

前報までの実験結果によれば，高軸力下では，らせん筋の破断と杭体軸方向筋の座屈をともなって，杭頭が曲げ圧縮破壊し，軸力保持能力を失うため，PHC杭基礎の塑性変形性能は小さく，低軸力下では，最大水平力に達した直後に杭頭で引張側の杭体軸方向筋が破断するた

本論文の一部は，日本建築学会の九州（1989年），中国（1990年），東北（1991年）大会における学術講演会で発表している。

* 日建設計 Nikken Sekkei Ltd.
** 東京工業大学工業材料研究所　教授・工博 Prof., Research Lab. of Engineering Materials, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
*** 東京工業大学工業材料研究所　助教授・工博 Assoc. Prof., Research Lab. of Engineering Materials, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
**** 東京工業大学工業材料研究所　助手・工博 Research Assoc., Reserch Lab. of Engineering Materials, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
***** 東京工業大学工業材料研究所　助手 Research Assoc., Research Lab. of Engineering Materials, Tokyo Institute of Technology
****** 日建設計 Nikken Sekkei Ltd.
******* 福井工業大学建設工学科　教授・工博 Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Fukui Institute of Technology, Dr. Eng.

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

め，大きな塑性変形性能は得られないこと[1]が明らかになったが，これらの問題を解決するために行われた3シリーズの実験[3]から，以下の結果が得られている。なお，以下の文中の「杭体軸方向筋の定着滑り」は，杭の埋め込み部分（図—2のLの範囲）で起こる。

（a） 高軸力下での曲げ圧縮破壊の防止に必要な最小らせん筋量[3]が確認されており，最小らせん筋量を確保すれば，塑性変形性能を大幅に改善できる。この場合，水平力が急激に低下せず，大きな塑性変形性能が発揮されるのは，部材角が1/20までである。

（b） 現状の異形PC鋼棒よりも降伏応力度を下げ，降伏後の伸び能力を高めた改良型異形PC鋼棒を杭体軸方向筋として用いれば，低軸力下での杭体軸方向筋の破断を防止できる可能性がある。

（c） 低軸力下では，杭体軸方向筋は，その降伏応力度が大きいと定着滑りを起こし，小さいと定着滑りを起こさない，という挙動を示す場合がある。定着滑りを起こす場合には，水平力は一時的に低下するが，水平変位の増加とともに回復する。

（d） 実験における最大水平力時の杭頭の曲げ耐力は，どの軸力下でも，e関数法を用いた断面解析による曲げ耐力と良く一致するが，杭体軸方向筋が定着滑りを起こす場合には，前者は後者より小さくなる。

以上に示した研究の進捗状況から，本報では，主に杭体軸方向筋の定着滑りがPHC杭基礎の曲げ耐力に及ぼす影響に焦点を当てて実験を行い，その結果に基づいて，杭体軸方向筋の定着滑りを考慮した曲げ耐力の計算法を提示する。

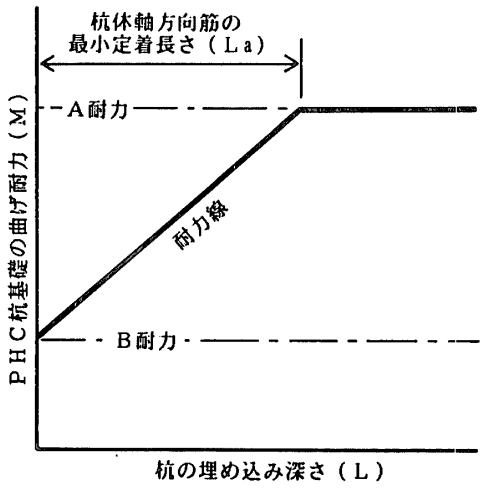
2. 実験方法

実験に先立ち，杭体軸方向筋の定着滑りを考慮した場合の，PHC杭基礎の曲げ耐力とパイルキャップへの杭の埋め込み深さの関係を予測し，実験で検証すべき項目を整理した上で，実験計画を立て，この実験計画に沿って，試験体のパラメータなどを設定した。

2.1 実験計画

杭体軸方向筋に生じる引張応力の最大値が杭体軸方向筋の定着力によって決定されるとすれば，低軸力下における，PHC杭基礎の曲げ耐力（M）と杭の埋め込み深さ（L）の関係は，図—1の概念図で表せると予測される。ただし，この概念図では，杭の埋め込み深さは杭体軸方向筋の定着長さに等しいと仮定している。

図—1において，杭の埋め込みが十分に深い場合，すなわち，杭体軸方向筋が完全に定着された場合は，杭体軸方向筋と中詰め軸方向筋が共に降伏応力度に達して，最大の曲げ耐力（A耐力）を発揮するが，杭の埋め込み深さがゼロの場合は，中詰め軸方向筋のみが耐力に寄与するので，最小の曲げ耐力（B耐力）になる。杭の埋め込み深さが小さく，杭体軸方向筋が定着滑りを起こす場合は，杭体軸方向筋が杭の埋め込み深さに比例した定着力を発揮するので，杭基礎の曲げ耐力はA，B両耐力の中間の値（図中の耐力線）を示すことになる。したがって，PHC杭基礎の曲げ耐力線は，中詰め軸方向筋量の多少に応じて上下に平行移動する。なお，同図では，PHC杭基礎の曲げ耐力が杭の埋め込み深さに比例すると仮定して，耐力線を直線で描いている。



図—1 PHC杭基礎の曲げ耐力（M）と杭の埋め込み深さ（L）の関係（概念図）

ここで，杭体軸方向筋が定着滑りを起こさない最小の定着長さを「杭体軸方向筋の最小定着長さ」と定義すると，最小定着長さは（1）式で表すことができる。

$$L_a=\frac{\sigma_y \cdot R}{4\,\tau_a} \quad \cdots\cdots(1)$$

ここに，L_a：杭体軸方向筋の最小定着長さ

σ_y：杭体軸方向筋の降伏応力度

R：杭体軸方向筋の直径

τ_a：杭体軸方向筋の最大付着応力度

（1）式によれば，杭体軸方向筋の最大付着応力度を一定とすると，杭体軸方向筋の最小定着長さは杭体軸方向筋の直径と降伏応力度に比例する。杭体軸方向筋の最小定着長さがその降伏応力度に比例することは，1章に示した（c）の現象と関連があると考えられる。

図—1において，A耐力とB耐力を一定とした場合，耐力線とA耐力の交点における杭の埋め込み深さは，杭体軸方向筋の最小定着長さに等しいので，杭体軸方向筋の直径または降伏応力度を小さくして，その最小定着長さを小さくすれば，耐力線の勾配が増加し曲げ耐力が上昇する。この場合，A耐力を一定とするために杭体軸方向筋の本数を増す必要があるので，結果的に杭体軸方向筋の総周長はその直径または降伏応力度の減少率に反比例して増加する。したがって，曲げ耐力の上昇は杭体軸方向筋の総周長が増加した結果ともいえる。

（1）式を変形すると，（2）式が得られる。

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

$$\tau_a=\frac{\sigma_y \cdot R}{4\,L_a} \quad \cdots\cdots(2)$$

したがって，杭体軸方向筋の最小定着長さ（L_a）を実験により確認できれば，（2）式から杭体軸方向筋の最大付着応力度（τ_a）を求めることができる。

以上の予測結果を要約して列記する。

（a） 杭体軸方向筋が定着滑りを起こさない最小の定着長さを「杭体軸方向筋の最小定着長さ」と定義する。

（b） 実験により杭体軸方向筋の最小定着長さが分かれば，その最大付着応力度は（2）式により求められる。

（c） 中詰め軸方向筋量の多少に応じて，図—1 に示す耐力線は上下に平行移動する。

（d） 図—1 において，A耐力とB耐力を一定とした場合，杭体軸方向筋の直径または降伏応力度を小さくすると，耐力線の勾配が増加する。

（e） 図—1 に示すA耐力とB耐力が一定ならば，杭体軸方向筋の総周長が大きいほど曲げ耐力は増加する。

本報では，これらの予測結果を検証するため，実験全体を以下の4つの実験シリーズで構成する。

・杭の埋め込み深さの影響（シリーズ1）
・杭体軸方向筋の降伏応力度の影響（シリーズ2）
・杭体軸方向筋の直径の影響（シリーズ3）
・中詰め軸方向筋量の影響（シリーズ4）

なお，シリーズ1は，上記の（b）に基づいて，杭体軸方向筋の最大付着応力度を求めることも目的としており，シリーズ2では，1章の（b）に示した，改良型異形PC鋼棒が低軸力下での杭体軸方向筋の破断を防止する可能性についても調べる。

また，杭体軸方向筋の定着滑りの影響を把握しやすくするため，いずれのシリーズについても，試験体には軸力を作用させない。

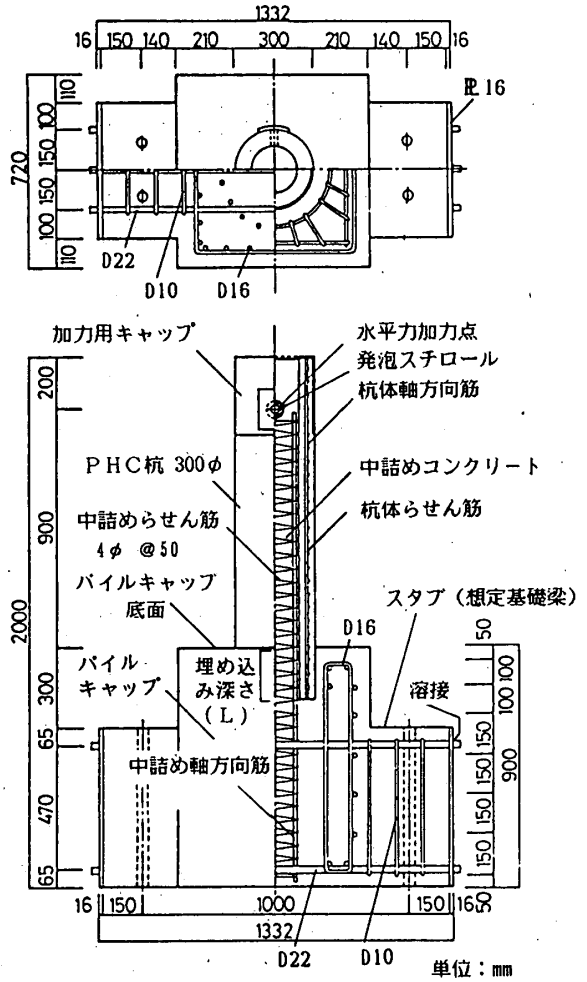
2.2 試験体の概要

試験体の形状・配筋を図—2 に，全シリーズの試験体のパラメータを表—1 に示す。

各試験体には外径 30 cm の PHC 杭を用い，杭のせん断スパン比を 3，有効プレストレスを 80 kgf/cm² とし，杭体らせん筋を 3.2φ@50 mm＋6φ添え巻き（No.1-10 のみ 6φ@50 mm），中詰めらせん筋を 4φ@50 mm とする。また，中詰め軸方向筋は異型棒鋼（SD 30）とする。これらのパラメータおよびパイルキャップの寸法・補強筋はすべての試験体に共通である。

表—1 に示すように，実験シリーズごとにパラメータを変え，同一シリーズの試験体では，杭の埋め込み深さを変化させる。

シリーズ1の杭には現状のB種PHC杭を用い，標準シリーズと位置付ける。シリーズ2では，杭体軸方向筋として，標準シリーズよりも，降伏後の伸び能力が大きく（1.38倍），降伏応力度が低い（74.4％），改良型の



図—2 試験体形状・配筋図

表—1 試験体一覧

シリーズ	試験体No.	試験体名	杭体軸方向筋	中詰め軸方向筋	埋め込み深さ
1	1-10	FB-07-80-3-0-10	8-9.2φ 従来型 PC鋼棒	6-D22 異形棒鋼 (SD30)	10cm
	1-20	FB-09-80-3-0-20			20cm
	1-30	FB-09-80-3-0-30			30cm
	1-35	FB-09-80-3-0-35			35cm
	1-40	FB-09-80-3-0-40			40cm
	1-45	FB-09-80-3-0-45			45cm
2	2-20	FBK-09-80-3-0-20	10-9.2φ 改良型 PC鋼棒		20cm
	2-30	FBK-09-80-3-0-30			30cm
	2-45	FBK-09-80-3-0-45			45cm
3	3-10	FBT-09-80-3-0-10	12-7.4φ 従来型 PC鋼棒		10cm
	3-20	FBT-09-80-3-0-20			20cm
	3-30	FBT-09-80-3-0-30			30cm
	3-45	FBT-09-80-3-0-45			45cm
4	4-10	FB(13)-09-80-3-0-10	8-9.2φ 従来型 PC鋼棒	6-D13 異形棒鋼 (SD30)	10cm
	4-20	FB(13)-09-80-3-0-20			20cm
	4-45	FB(13)-09-80-3-0-45			45cm

杭体らせん筋 ：No.1-10…6φ @50
その他 …3.2φ @50に6φを添え巻き。

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

異形 PC 鋼棒を使用し，シリーズ 3 では，杭体軸方向筋として，直径の小さな従来型の異形 PC 鋼棒を使用する。また，シリーズ 4 では，標準シリーズに比べ，中詰め軸方向筋の断面積だけを減少させる。

杭体の製作方法については，杭頭切断時の亀裂の発生を防ぐため，余長を持たせて杭体を製造し，ダイヤモンドカッターにより所定の位置で切断する。

試験体の製作に当たっては，実際の施工方法に合わせて，杭を下にしてコンクリートを打設する。また，杭体中空部の内面にはスラッジが数 mm 付着するので，これを考慮して中詰め軸方向筋の位置を決める。

使用材料の力学的性質を表—2 および表—3 に示す。

2.3 加力方法

加力装置を図—3 に示す。加力方式には片持ち梁方式を採用し，試験体の天地を実際とは逆にして，杭の先端部に加力治具を介して水平力を作用させる。

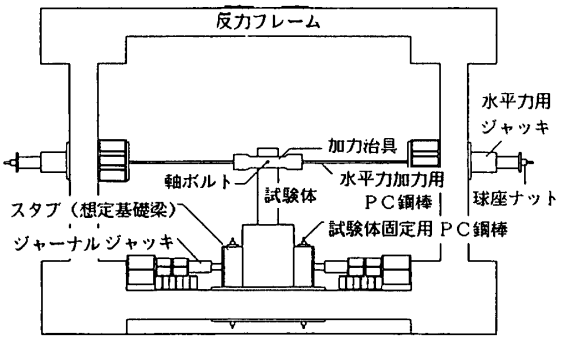
表—2 使用材料の力学的性質（1）

鉄筋名称 (mm)	降伏強度 (kgf/cm²)	引張強度 (kgf/cm²)	弾性係数 (×10⁶kgf/cm²)
7．4φ	14958	15225	2．050
9．2φ 従来型	14600	15317	2．030
9．2φ 改良型	10860	11220	——
D13	3600	5060	2．010
D22	3644	5581	1．966
3．2φ	——	6338	——
4φ	5224	5686	2．239
6φ	——	6147	——

表—3 使用材料の力学的性質（2）

コンクリート使用部位		圧縮強度 (kgf/cm²)	弾性係数 (×10⁵kgf/cm²)	割裂強度 (kgf/cm²)
杭体	①	880	3．55	61
	②	921	3．64	65
中詰め ハイルキャップ	①	300	2．64	24
	②	360	2．92	28

① No.1-10～No.1-30、No.1-45、シリーズ 2
② No.1-35、No.1-40、シリーズ 3、シリーズ 4



図—3 加力装置図

水平力の載荷は正負交番繰返し載荷とする。

載荷経路については，まず荷重制御により最大水平力を 2.6，5.2，10.4 tf と引上げ，次に変位制御に切り替えて，加力点の最大水平変位を 6，9，12，15，18，30，45 mm と増加し，最後は正方向に 60 mm（部材角で 1/15）まで変形させることを原則とする。

軸力の付加装置がないことを除けば，加力装置・加力方法・載荷経路とも前報[3]と同じである。

3. 実験結果とその考察

表—4 に，全シリーズの試験体における，最大水平力の実験値（P_{max}）・破壊形式・水平耐力の計算値（P_{cal}）を示すが，実験の考察は各シリーズごとに行う。なお，最大水平力の計算値については 4 章で述べる。

3.1 杭の埋め込み深さの影響（シリーズ 1）

3.1.1 目 的

本シリーズの実験では，杭の埋め込み深さが，PHC 杭基礎の曲げ耐力と塑性変形性能に与える影響を調べるとともに，杭体軸方向筋の最小定着長さを確認し，その最大付着応力度を（2）式により求める。

3.1.2 試験体

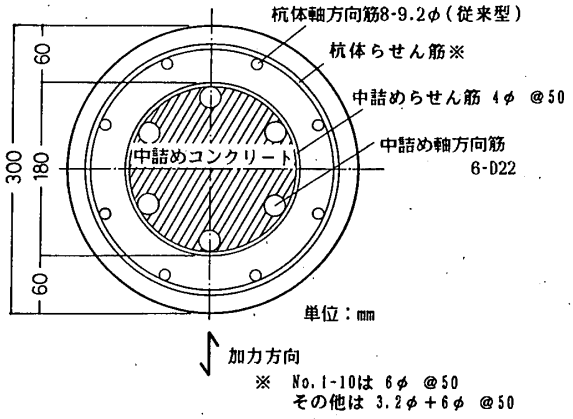
試験体は表—1 に示す No.1-10～No.1-45 の 6 体であ

表—4 実験結果・計算結果

シリーズ	試験体 No.	Pmax (tf)	破壊形式	Pcal (tf)	Pmax/Pcal
1	1-10	12．1	F	12．7	0．95
	1-20	15．5	F	14．5	1．07
	1-30	16．0	F	16．3	0．98
	1-35	16．9	B	17．4	0．97
	1-40	17．4	B	17．8	0．98
	1-45	18．4	B	17．6	1．04
2	2-20	16．8	F	15．7	1．07
	2-30	18．0	F	17．4	1．03
	2-45	17．5	F	17．4	1．01
3	3-10	12．5	F	13．1	0．95
	3-20	16．0	F	15．3	1．05
	3-30	17．6	F	17．4	1．01
	3-45	16．4	B	17．5	0．94
4	4-10	6．9	F	6．3	1．09
	4-20	12．4	F	8．5	1．47
	4-45	13．4	B	12．2	1．10

Pmax：最大水平力の実験値（正加力時）
破壊形式
F ：目標変位の60mm（部材角1/15）まで破壊せず。
B ：引張側の杭体軸方向筋が破断した。
Pcal：水平耐力の計算値（4章参照）

NII-Electronic Library Service



図—4 杭体断面詳細図（シリーズ1）

る。その杭部の断面を図—4に示す。杭体軸方向筋を従来型異形PC鋼棒8-9.2φ，中詰め軸方向筋を6-D22とし，杭の埋め込み深さを10～45 cmの6段階に変化させる。

3.1.3 破壊形式と塑性変形性能

図—5に，各試験体の水平力（P）と加力点での水平変位（δ）の関係を示す。

杭の埋め込み深さが10 cmの試験体では，最大水平力に達した後も，ほぼ同じ水平力を保持し，水平変位が60 mm（部材角で1/15）に至っても杭体軸方向筋は破断しなかった。また，定着滑りによると思われる音は発生せず，定着滑りに特有の挙動である水平力の一時的な低下も見られなかった。これは，実際には定着滑りを起こしているが，定着滑り時の定着力を保ちつつ，変形に追随しているためと考えられる。

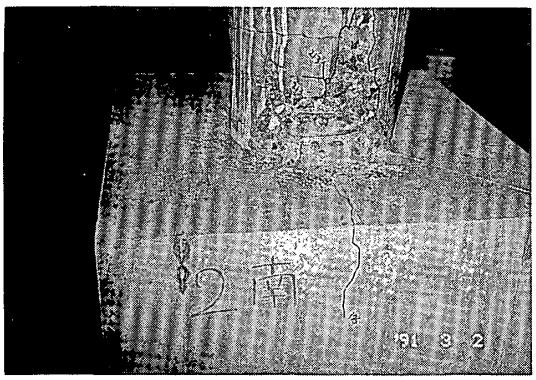
杭の埋め込み深さが20 cmと30 cmの試験体では，最大水平力に達する辺りから，定着滑りによると思われる音の発生と水平力の一時的な低下を繰り返したが，水平変位が60 mm（部材角で1/15）になっても，杭体軸方向筋は破断せず，大きな塑性変形性能を示した。

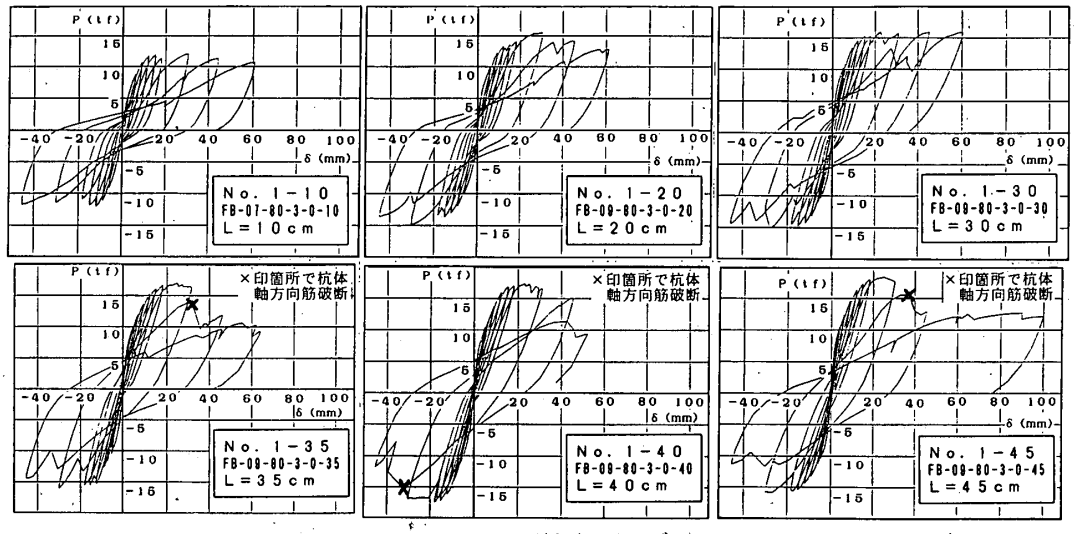
杭の埋め込み深さが35 cmの試験体では，$\delta=-30$ mmのサイクルで杭体軸方向筋が定着滑りを起こし，$\delta=+45$ mmサイクルのときに，杭体軸方向筋が大きな音とともに破断した。また，杭の埋め込み深さが40 cm，45 cmの試験体では，それぞれ$\delta=-45$ mm，$\delta=+45$ mmのサイクルで杭体軸方向筋が破断した。杭体軸方向筋の破断は実験中に目視により確認された。

杭の埋め込み深さが35 cm以上の試験体では，杭体軸方向筋の破断と同時に水平力が急激に低下した。引き続き水平変位を60 mm（No.1-45では100 mm）まで増加させたが，水平力は低下後の値を保つ程度で，低下前の最大水平力へ回復することはなかった。

表—4によれば，杭の埋め込み深さが大きくなるにつれて，最大水平力が増加している。各試験体は杭の埋め込み深さが異なるだけなので，最大水平力の変化は杭の埋め込み深さの影響であると判断される。

なお，後述の他のシリーズを含め，水平力の載荷にともなって，試験体のパイルキャップにはひび割れが発生し，パイルキャップ底面にはコンクリートの層状のはく離が生じた。しかしいずれも軽微で，試験体の耐震性能に影響を与える程ではなかった。実験終了後のパイルキャップ底面の状態を写真—1に示す。

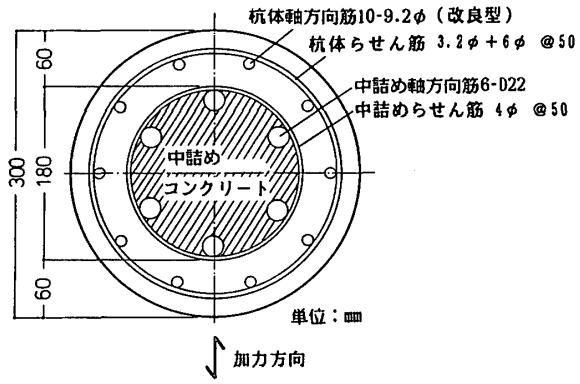




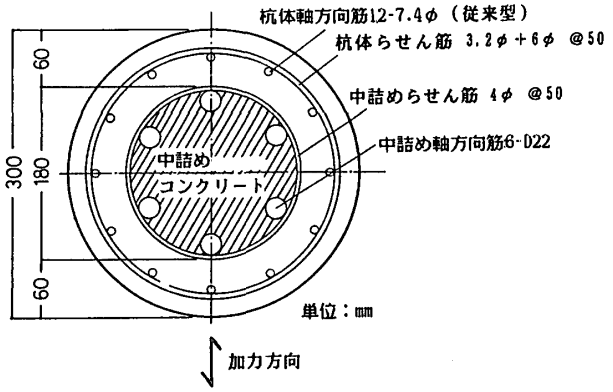
図—5 P-δ関係（シリーズ1）

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan



図—6 杭体断面詳細図（シリーズ2）



図—7 杭体断面詳細図（シリーズ3）

3.1.4 杭体軸方向筋の最大付着応力度

2章の（b）に示したように，杭体軸方向筋の最小定着長さ（L_a）が分かれば，（2）式を用いて，杭体軸方向筋の最大付着応力度（τ_a）を求めることができる。

本シリーズの実験結果によれば，杭体軸方向筋の最小定着長さは35 cm と40 cm の間にあるので，L_a=37.5 cm とすると，その最大付着応力度は τ_a=90 kgf/cm² になる。

3.2 杭体軸方向筋の直径と降伏応力度の影響（シリーズ2，シリーズ3）

3.2.1 目 的

本シリーズの実験では，PHC 杭基礎の曲げ耐力に与える，杭体軸方向筋の降伏応力度の影響（シリーズ2）と杭体軸方向筋の直径の影響（シリーズ3）を確認する。また，杭体軸方向筋破断の防止に対する改良型異形 PC 鋼棒の効果を調べる。

3.2.2 試験体

シリーズ2の試験体は，表—1に示す No. 2-20～No. 2-45 の3体で，その杭部の断面を図—6に示す。標準シリーズの杭体軸方向筋だけを，従来型異形 PC 鋼棒 8-9.2φ から改良型異形 PC 鋼棒 10-9.2φ に変える。

シリーズ3の試験体は，No. 3-10～No. 3-45 の4体である。杭部の断面を図—7に示す。杭体軸方向筋だけを標準シリーズの 8-9.2φ から 12-7.4φ へ変える。

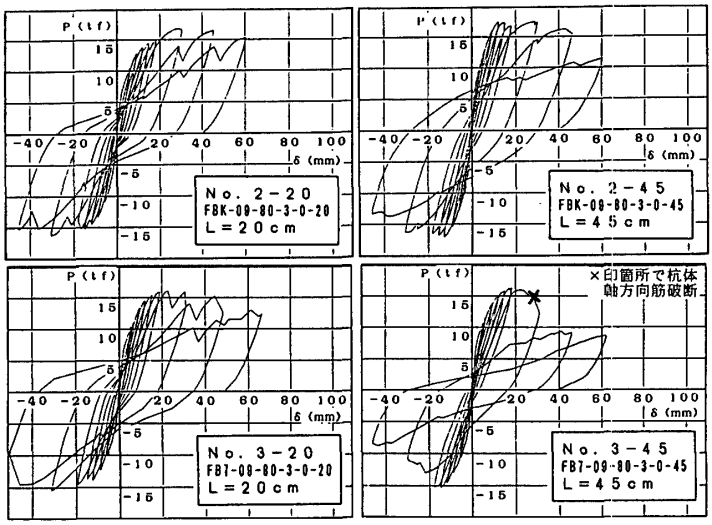
杭の埋め込み深さを，シリーズ2では20～45 cm に，シリーズ3では10～45 cm に変化させる。

両シリーズとも，杭体軸方向筋の直径または降伏応力度の減少による曲げ耐力の低下を補うため，断面解析を行って，図—1に示すA耐力が標準シリーズとほぼ等しくなるように，杭体軸方向筋の本数を増している。

また，シリーズ2，3の杭体軸方向筋の総周長は，それぞれ標準シリーズの1.25倍，1.21倍である。

3.2.3 破壊形式と塑性変形性能

杭の埋め込み深さが20 cm と45 cm の両シリーズの試験体を代表として選び，水平力（P）と加力点の水平変位（δ）の関係を，図—8に示す。両シリーズの実験結果は，杭の埋め込み深さが45 cm のシリーズ2の試験体を除き，標準シリーズと類似している。



図—8 P-δ 関係（シリーズ2，3）

杭の埋め込み深さが10 cm の試験体（シリーズ3）では，水平力が最大値に達した後も，ほぼ同じ値を保ち，水平変位が60 mm（部材角で1/15）に至っても，杭体軸方向筋は破断せず，杭体軸方向筋の定着滑りによる，音の発生と水平力の一時的な低下は認められなかった。

杭の埋め込み深さが20 cm と30 cm の試験体（両シリーズ）では，定着滑りによる水平力の一時的な低下を繰り返したが，水平変位が60 mm になっても，杭体軸方向筋は破断せず，大きな塑性変形性能を示した。

杭の埋め込み深さが45 cm の場合は，シリーズ3の試験体では，＋30 mm のサイクルで杭体軸方向筋が破断したのに対し，シリーズ2の試験体では，水平変位が60 mm に至っても杭体軸方向筋は破断しなかった。杭体軸方向筋の定着滑りによる一時的な水平力の低下が見られないことから，両試験体の杭体軸方向筋は完全に定着されていたと判断され，シリーズ2の杭体軸方向筋が破断しなかったのは，破断に至るまでの伸び能力が大きい，改良型異形 PC 鋼棒による効果と判断される。

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

しかしながら，シリーズ2の試験体では，水平変位が45 mm（部材角で1/20）を超えると，水平力が大幅に低下するので，低軸力下で塑性変形性能が十分に発揮されるのは，部材角で1/20までと考えるのが妥当であろう。

3.2.4　曲げ耐力への影響

杭体軸方向筋が定着滑りを起こした試験体の，最大水平力（P_{max}）と杭の埋め込み深さ（L）の関係を，標準シリーズと比較して，図—9に示す。前述のように，シリーズ2，3の杭体軸方向筋の総周長は，それぞれ標準シリーズの1.25倍，1.21倍である。

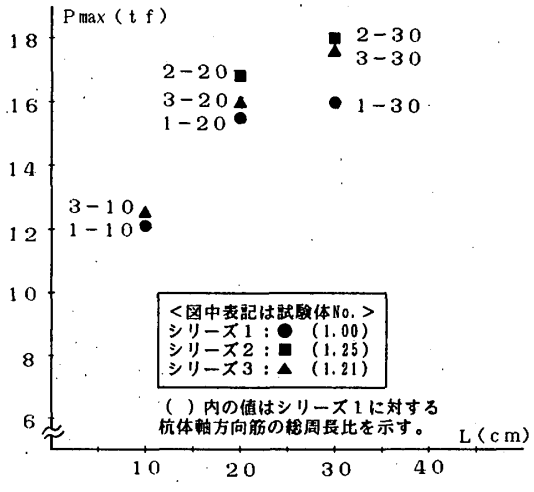
杭の埋め込み深さが等しい試験体の最大水平力を比較すると，どの埋め込み深さでも，杭体軸方向筋の総周長が増すほど，最大水平力は上昇している。

シリーズ2，3の杭体軸方向筋の本数を増した結果，シリーズ1～3のA耐力の実験値（表—4におけるシリーズごとのP_{max}の最大値）は17.6～18.4 tfでほぼ等しく，中詰め軸方向筋が同じなので，シリーズ1～3のB耐力は一致する。したがって，この実験結果は2章の（e）の予測を裏付けていると判断される。

3.3　中詰め軸方向筋量の影響（シリーズ4）

3.3.1　目　的

本シリーズの実験では，PHC杭基礎の曲げ耐力と塑性変形性能におよぼす，中詰め軸方向筋量の影響を確認する。



図—9　最大水平力（P_{max}）と杭の埋め込み深さ（L）の関係（シリーズ1，2，3）

3.3.2　試験体

試験体は表—1に示すNo.4-10～No.4-45の3体で，その杭部の断面を図—10に示す。標準シリーズの中詰め軸方向筋6-D22を，本シリーズでは6-D13とする。他の条件は標準シリーズと同じである。各試験体の杭の埋め込み深さを10～45 cmに変化させる。

3.3.3　破壊形式と塑性変形性能

図—11に，各試験体の水平力（P）と加力点での水平変形（δ）の関係を示す。

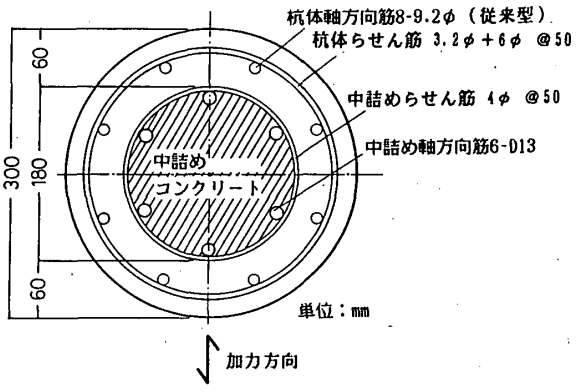
各試験体の実験結果は，中詰め軸方向筋量の減少により最大水平力がかなり低下したことを除けば，標準シリーズとほとんど変わらないので，考察を省略するが，杭の埋め込み深さが45 cmの試験体では，$\delta=-30$ mmのサイクルで杭体軸方向筋の破断が確認され，水平力が急激に低下したことを付記する。

3.3.4　曲げ耐力への影響

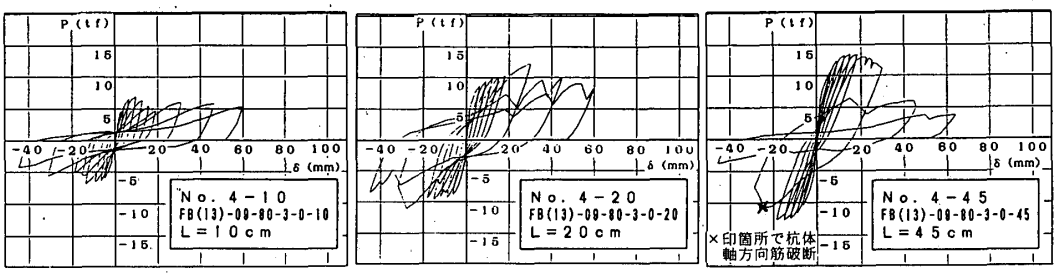
各試験体の最大水平力（P_{max}）と杭の埋め込み深さ（L）の関係を，杭の埋め込み深さが等しい標準シリーズの試験体と比較して，図—12に示す。

杭の埋め込み深さが等しい試験体の最大水平力を比較すると，中詰め軸方向筋量が少ない本シリーズの最大水平力は，標準シリーズの試験体よりも低下しており，杭の埋め込み深さにかかわりなく，その差はほぼ一定である。この結果から，2章の（c）で予測したように，「中詰め軸方向筋量の多少に応じて，図—1示す耐力線は上下に平行移動する」ことが定性的に確認された。

中詰め軸方向筋量はPHC杭基礎の曲げ耐力を決定す

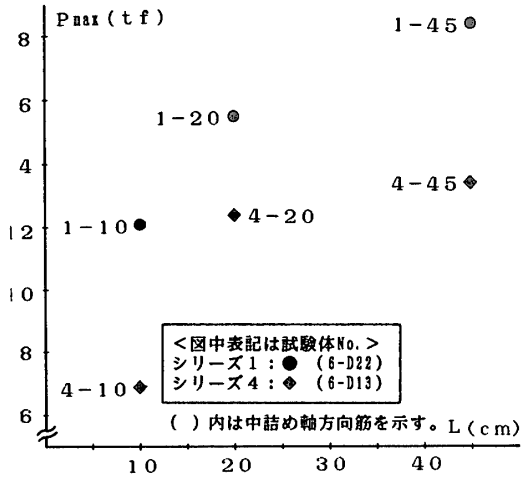


図—10　杭体断面詳細図（シリーズ4）



図—11　P-δ関係（シリーズ4）

NII-Electronic Library Service



図—12 最大水平力（P_{max}）と杭の埋め込み深さ（L）の関係（シリーズ1，4）

る要因の1つと言える。

4. PHC杭基礎の曲げ耐力の計算法

2章で予測した，杭体軸方向筋の定着滑りを考慮した場合の，本構法によるPHC杭基礎の曲げ耐力と杭の埋め込み深さの関係が，3章の実験により定性的に確認されたので，本章では，杭体軸方向筋の定着滑りを考慮したPHC杭基礎の曲げ耐力の計算法を提示し，この計算法を3章の実験に用いた全試験体に適用して，その妥当性を定量的に確認する。

4.1 曲げ耐力計算法の仮定条件

本構法によるPHC杭基礎の曲げ耐力の計算を行う際には，3章の実験結果を反映させて，以下の仮定条件を設定する。

（a） 杭基礎の曲げ耐力は，らせん筋量およびプレストレス量の影響を受けない。

（b） 杭体と中詰め部を構成するコンクリート，軸方向筋はすべて一体として挙動し，平面保持される。

（c） コンクリートの応力度-ひずみ関係は，圧縮側についてはe関数法でモデル化し，引張側については，割裂強度までを完全弾性とし，それ以降は応力を負担しないと仮定する。引張側の初期剛性には圧縮側の原点での剛性を用いる。

（d） 軸方向筋の応力度-ひずみ関係は，圧縮側，引張側とも完全弾塑性でモデル化する。

（e） 杭体軸方向筋の最大付着応力度は，シリーズ1の実験結果に基づき，τ_a=90kgf/cm² とする。

（f） 杭体軸方向筋の定着長さは，杭の埋め込み深さに等しく，その定着力は定着長さに比例する。杭体軸方向筋の最小定着長さは（1）式で表せる。

（g） 杭の埋め込み深さが杭体軸方向筋の最小定着長さよりも小さいと，杭体軸方向筋は定着滑りを起こすが，この時の定着力はその後も保持される。

なお，杭基礎の曲げ耐力はプレストレス量の影響を受けないとしたのは，プレストレス力が内力であることによる（参考資料（A-1）参照）。また，コンクリートの応力度-ひずみ関係を表すe関数は，(3) 式による。

$$\eta=-6.75(e^{0.812\xi}-e^{1.218\xi}) \quad \cdots\cdots(3)$$

ここに，η：存在応力度と圧縮強度の比

ξ：存在ひずみと圧縮強度時のひずみの比

4.2 定着滑りを考慮した曲げ耐力の計算法

本構法によるPHC杭基礎の曲げ耐力は，杭体と中詰め部を一体の断面と考え，この断面の中心軸位置において軸方向ひずみと曲率を変化させた時に，断面に生じる軸力が作用軸力に等しく，断面に生じる曲げモーメントが最大になるときの曲げモーメントを計算することによって得られる。ただし，この計算を行う際には，杭体軸方向筋の定着滑りを考慮する必要がある。

（1）式を変形すると，（4）式が得られる。

$$\sigma_y=\frac{4\,\tau a\cdot L_a}{R} \quad \cdots\cdots(4)$$

したがって，杭体軸方向筋の定着力が杭の埋め込み深さに比例することを考慮すると，（5）式が成立する。

$$\sigma^*=\frac{4\,\tau_a\cdot L}{R} \text{ かつ } \sigma^*\leqq\sigma_y \quad \cdots\cdots(5)$$

ここに，σ^*：定着滑りを考慮した杭体軸方向筋の降伏応力度

L：杭の埋め込み深さ

杭体軸方向筋の降伏応力度を（5）式によって補正し，その応力度-ひずみ関係を完全弾塑性でモデル化すれば，定着滑り時の定着力は定着滑り後も保持され，前節の（g）の仮定条件が満足される。

図—13に，PHC杭基礎の曲げ耐力を計算するためのフローチャートを示し，参考資料（A-2）に，コンクリートの要素の分割方法を記す。

4.3 曲げ耐力の実験値と計算値の比較

杭基礎の曲げ耐力を計算するプログラムを，図—13のフローチャートに従って作成し，3章の実験に用いたすべての試験体の曲げ耐力を計算した。この曲げ耐力を杭のせん断スパン（0.90 m）で除して，水平耐力（P_{cal}）に換算し，表—4に示した。

曲げ耐力の計算に際しては，表—2および表—3に示す材料定数を用いた。コンクリートの圧縮強度時のひずみについては，材料試験の結果をもとに，杭体，中詰めコンクリートのひずみをそれぞれ0.30 %，0.26 %とした。

表—4によれば，No.4-20の試験体を除いた場合，最大水平力の実験値（P_{max}）と水平耐力の計算値（P_{cal}）の比 P_{max}/P_{cal} の値は，0.94～1.10の範囲にあり，その平均値は1.02となっている。

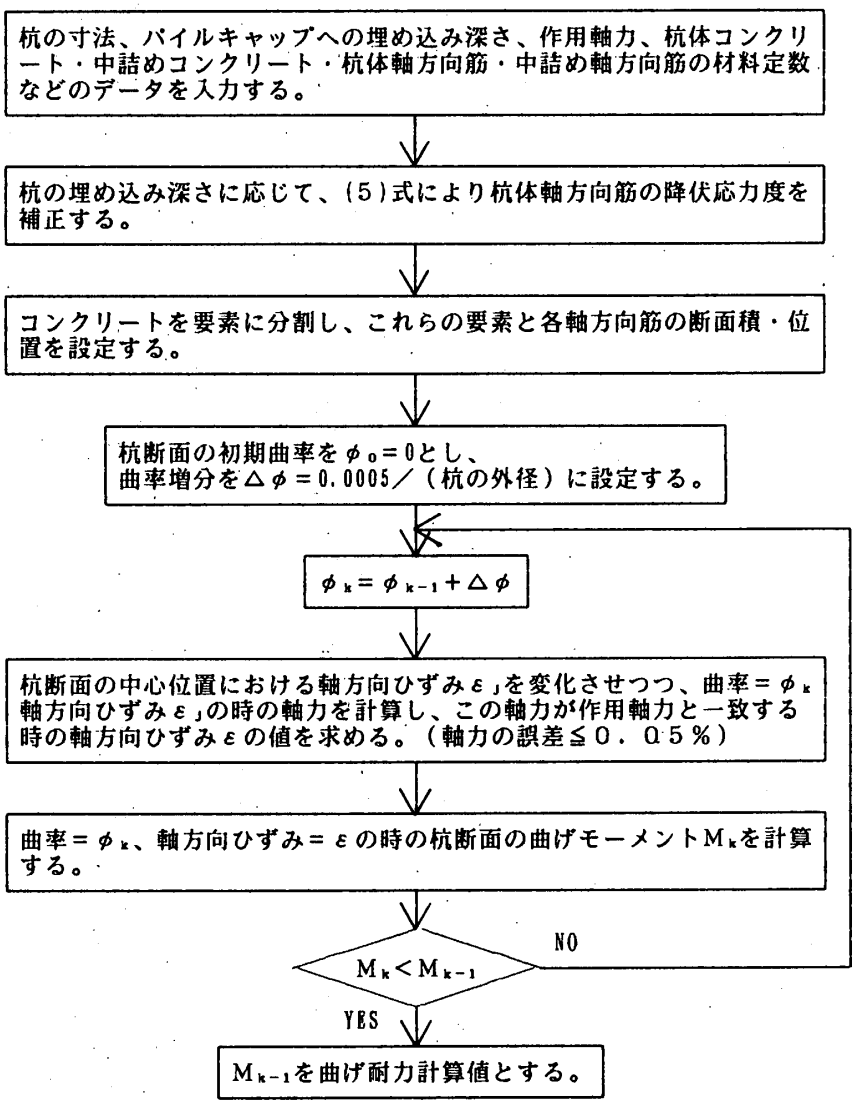
鉄筋コンクリートの試験体を用いた実験では，実験結

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

果のばらつきが不可避であることを考慮すると，水平耐力の計算値は，実験値と良く一致すると言える。

No.4-20の試験体では，水平耐力の計算値は実験値の68％で，実験値に比べかなり低い値を示している。この試験体の水平力-水平変位曲線（図—11）をよく見ると，他の試験体とは異なる挙動を示している。すなわち，水平力が約10 tf（＋18 mm サイクル）に達するまでに，包絡線はほぼ水平になるが，次の＋30 mm サイクルでは，剛性を回復するとともに，水平力が前のサイクルより約25％上昇している。この試験体では，水平力が約10 tf のときに，数回にわたって杭体軸方向筋が定着滑りを起こしている。このことから判断すると，＋18 mm サイクルでは杭体軸方向筋の定着滑りが起きかかっていたが，何らかの理由により，次のサイクルで杭体軸方向筋の定着力が増加したと考えられる。この理由としては，杭体軸方向筋に溶接されている杭体らせん筋が，たまたま溶接による接合力が大きかったため，杭体軸方向筋の定着力を増加させたとも考えられるが，確認されてはいない。しかし，現実にこのような現象が起きているので，PHC 杭基礎の耐震設計法を検討する際には，この現象を考慮に入れる必要があろう。



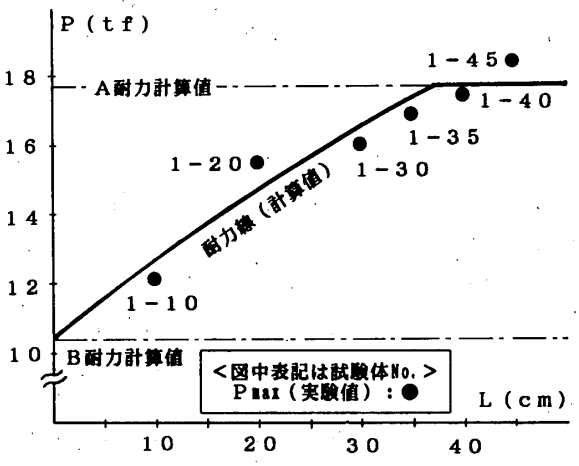
図—13　曲げ耐力を計算するためのフローチャート

4.4　耐力線と実験値の比較

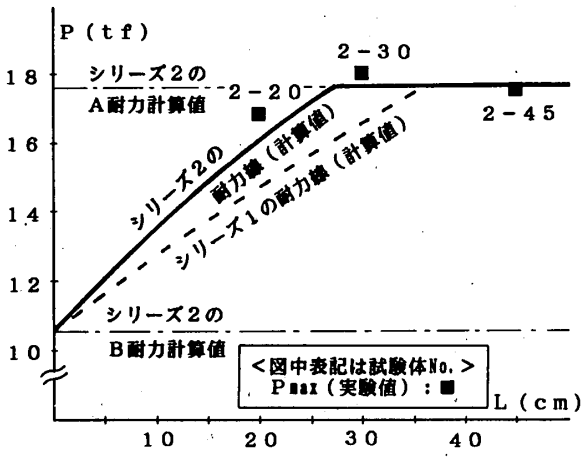
図—1の概念図に示した耐力線を，前記の曲げ耐力の計算法を用いて，実験シリーズごとに計算し，実験結果と比較して，図—14～図—17に示す。

図中の縦軸は水平力で，曲げ耐力の計算値を水平耐力に換算している。また，曲げ耐力の計算に用いた材料定数は前節と同じである。

各シリーズの耐力線は，いずれも，2章で予測した直線ではなく，若干上に凸の曲線を描いている。



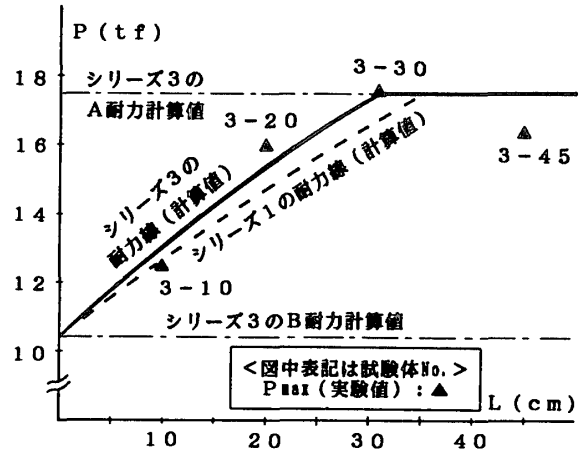
図—14　計算値と実験値の比較（シリーズ1）



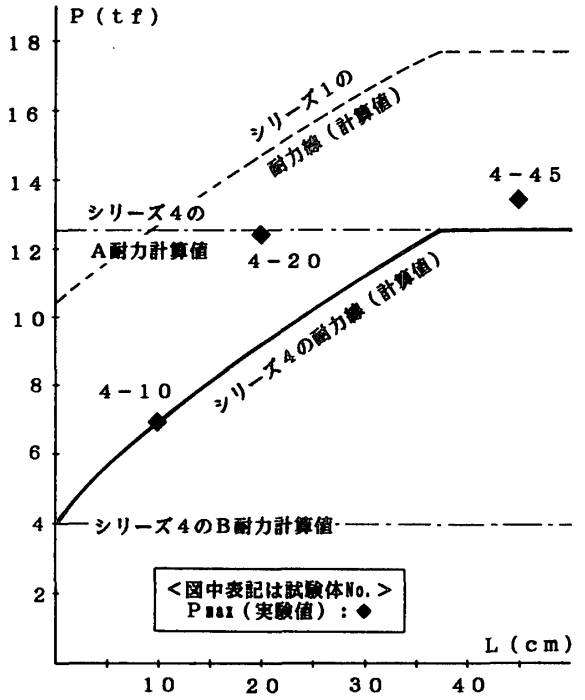
図—15　計算値と実験値の比較（シリーズ2）

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan



図—16　計算値と実験値の比較（シリーズ3）



図—17　計算値と実験値の比較（シリーズ4）

耐力線が水平に折れ曲がる点における杭の埋め込み深さは，杭体軸方向筋の最小定着長さに等しく，同じ点での水平力は図—1のA耐力時の水平力と一致する。また，耐力線と縦軸の交点における水平力は図—1のB耐力時の水平力に等しい。

どのシリーズにおいても（No.4-20を除く），実験値はほぼ耐力線に沿って分布している。また，図—15，図—16によれば，標準シリーズの試験体に比べ，杭体軸方向筋の降伏応力度が小さいシリーズ2と，杭体軸方向筋の直径が小さいシリーズ3の耐力線の勾配は，標準シリーズの耐力線の勾配より大きくなっており，2章の(d)の予測を裏付けている。

以上の検討結果から，本章で提示したPHC杭基礎の曲げ耐力の計算法は妥当であると判断される。

5. 結　論

筆者らは，PHC杭基礎の耐震性能の改善を目的として，1章に示した構法（以下，本構法と呼ぶ）を提案し，外径30 cmのPHC杭を用いた杭基礎の曲げせん断実験を行って，その結果を報告[1)~3)]してきた。

本報では，杭体軸方向筋の定着滑りがPHC杭基礎の曲げ耐力に及ぼす影響を予測し，4シリーズの実験により，この予測を定性的に検証した。また，杭体軸方向筋の定着滑りを考慮したPHC杭基礎の曲げ耐力の計算法を提示し，すべての試験体に適用して，この計算法の妥当性を定量的に確認した。

以下に，本報での実験により確認された事項（*)を付す。）と，前報までに報告した事項を含めて示す。なお，らせん筋強度比は，らせん筋比（P_w）とらせん筋の降伏応力度（σ_{wy}）の積（$P_w \cdot \sigma_{wy}$）である。また，改良型異形PC鋼棒は，現状の異形PC鋼棒よりも，降伏応力度を下げ，伸び能力を高めた鉄筋である。

（1）　らせん筋強度比を現状のPHC杭の約9倍以上に増強（$P_w \cdot \sigma_{wy} \geqq 48.4$ kgf/cm^2）すれば，想定されるすべての軸力下（$N=0 \sim 105$ tf，長期軸力：35 tf）で，本構法によるPHC杭基礎のせん断破壊と曲げ圧縮破壊を防止できる。この場合，水平力が急激に低下せず，塑性変形性能が十分に発揮されるのは，部材角が1/20までである[3)]。

（2）　実験から得られた杭体軸方向筋の最大付着応力度は $\tau_a=90$ kgf/cm^2 である*)。

（3）　杭体軸方向筋の最小定着長さは（1）式で表され，その直径と降伏応力度に比例する。したがって，杭体軸方向筋の直径または降伏応力度を小さくすれば，杭の埋め込みを浅くでき，パイルキャップの高さを小さくできる*)。

（4）　低軸力下で，杭の埋め込み深さを杭体軸方向筋の最小定着長さ以上にした場合には，杭体軸方向筋に現状の異形PC鋼棒を用いると，引張側の杭体軸方向筋が破断するため，PHC杭基礎の塑性変形性能は小さいが，改良型の異形PC鋼棒を用いると，杭体軸方向筋の破断を防止できる。しかし，水平力が急激に低下せず，塑性変形性能が十分に発揮されるのは，部材角が1/20までである*)。

（5）　現状の異形PC鋼棒を用いた場合の杭体軸方向筋の破断は，杭の埋め込み深さを杭体軸方向筋の最小定着長さより小さくすることにより防止できる。この場合は，杭体軸方向筋の定着滑りによる水平力の一時的な低下は生じるものの，最大水平力に達した後の水平力の低下も少なく，部材角が1/15に達する大きな塑性変形性能が得られる*)。

（6）　本構法によるPHC杭基礎の曲げ耐力は，図—13のフローチャートに示す。杭体軸方向筋の定着滑りを考

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

慮した計算法により求められる。軸力が作用しない計15の試験体における，実験値と計算値の比は0.94～1.10（平均1.02）となっており，両者は良く一致する*)。また，作用軸力を変化（N＝0～105 tf）させた試験体においても，実験値と計算値は良く一致する[3)]。

（7） 本構法によるPHC杭基礎の曲げ耐力は，中詰め軸方向筋量によって調整可能であり，単体のPHC杭の曲げ耐力より大きくすることができる*)。また，PHC杭基礎の曲げ耐力は，作用軸力の増加とともに上昇する[3)]。

したがって，上記の方法により，せん断破壊，曲げ圧縮破壊，杭体軸方向筋の破断を防止すれば，想定されるすべての軸力下で大きな塑性変形性能を発揮するPHC杭基礎が得られ，図—13のフローチャートに示す計算法により，その曲げ耐力を求めることができる。

謝　辞

建築基礎構造の全般にわたり，東京工業大学　岸田英明教授のご指導を頂きました。また，改良型異形PC鋼棒の開発では高周波熱錬（株）に，試験体の製作では前田製管（株）にご協力を頂きました。さらに，実験，解析に際して，東京工業大学　黒正・和田・林研究室の学生諸氏の協力を得ました。記して御礼申し上げます。なお，本研究は文部省科学研究費補助金を受けています。関係各位に感謝いたします。

参考文献

1） 黒正清治，堀井昌博ほか：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）—日本建築学会構造系論文報告集，第390号，1988.8.

2） 黒正清治，堀井昌博ほか：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杭の耐力およ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，第398号，1989.4.

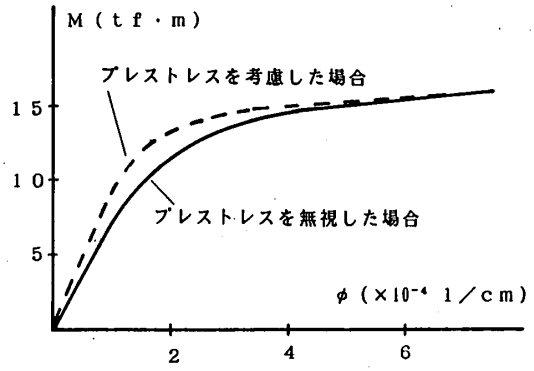
3） 黒正清治，堀井昌博ほか：高強度PC杭とパイルキャップとの接合部の強度と変形性状—高強度PC杭の耐力および変形性能向上に関する研究（4）—日本建築学会構造系論文報告集，第407号，1990.1.

参考資料

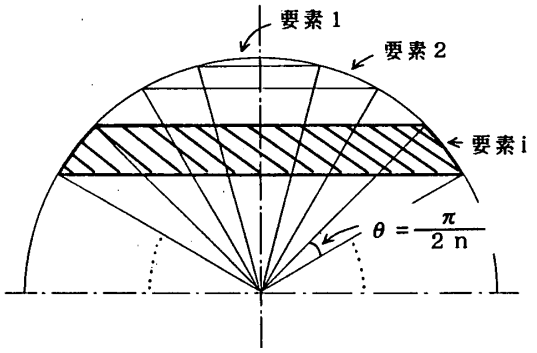
（A-1） 曲げ耐力へのプレストレスの影響

図—A1に，杭体のプレストレスを80 kgf/cm^{2}にした場合と，プレストレスを無視した場合の，No.1-45の試験体に関する杭頭の曲げモーメント（M）と曲率（ϕ）の関係を示す。図中のM-ϕ関係は，本報で提示する曲げ耐力の計算法により求めた。

初期の曲率の段階では，プレストレスによる曲げモーメントの差違が認められるが，両者の最大曲げモーメントは一致する。



図—A1　プレストレスの有無によるM-ϕ関係の違い（No.1-45）



図—A2　コンクリート要素の分割方法

（A-2） コンクリートの要素の分割方法

コンクリートの要素の分割方法は，曲げ耐力の計算精度と演算速度を左右する要因の1つである。本報で提示する曲げ耐力の計算法では，杭の断面が円形であることから，コンクリートの要素を図—A2に示す方法で分割する。すなわち，図中の扇形の中心角を$\theta=\frac{\pi}{2n}$として，斜線を付した要素を$2n$個作ると，外側からi番目の要素の面積は（6）式で表される。

$$A_i=\frac{\pi\cdot r^2}{2n}-\frac{r^2}{2}\cdot\sin\frac{\pi\cdot i}{n}+\frac{r^2}{2}\cdot\sin\frac{\pi\cdot(i-1)}{n} \quad \cdots\cdots(6)$$

ここに，A_i：外側からi番目の要素の面積

r：円の半径

n：要素数の1/2

この分割方法では，コンクリートの各要素の面積は，数列的表現で正確に表される。

なお，この分割方法を用い，要素数を100としたときの，曲げ耐力の計算時間は，パーソナルコンピュータで約5秒である。

（1991年5月10日原稿受理，1992年2月6日採用決定）

NII-Electronic Library Service