

報告 場所打ち RC 杭の変形性能に関する実験的研究

瀧口将志*1・渡辺忠朋*2

要旨：場所打ち RC 杭の施工条件が変形性能に及ぼす影響について明らかにするため、施工条件（気中施工、水中施工、泥水中施工）等をパラメータとし、円柱供試体により交番載荷試験を行った。その結果、施工条件は変形性能に大きな影響を与えないこと、また、降伏変位の算定にあたっては施工条件によるコンクリートのヤング係数の低下を適切に評価する必要があることがわかった。

キーワード：場所打ち RC 杭、変形性能、じん性率、降伏変位、耐力

1. はじめに

場所打ち RC 杭は、杭径配筋等の組み合わせが自由で、また施工性が良好で低騒音のため、都市部においては杭施工工法の大半を占めている。筆者らは、圧縮強度、ヤング係数およびせん断強度等の特性が、気中で施工される一般的なコンクリートと比べて低下することを実験的な検討により明らかにした[1,2]。一方、構造物の耐震設計を合理的に行うためには、場所打ち RC 杭等の基礎構造を構成する部材の変形性能についても定量的に評価する必要がある。しかし、場所打ち RC 杭の変形性能については、十分に定量化されていないのが現状である。

そこで、今回、場所打ち RC 杭の施工条件が変形性能に及ぼす影響について明らかにするため、場所打ち RC 杭をモデル化した供試体により交番載荷試験を行い、その耐力、変形性能について考察した。

2. 実験概要

2.1 供試体形状および諸元

供試体の形状および配筋を図-1に、諸元を表-1に示す。供試体は、場所打ち RC 杭をモデル化した直径 50 cm、杭長 150 cm の円柱とした。実験パラメータは、場所打ち RC 杭の施工条件として気中施工、水中施工および泥水中施工（ベントナイト濃度 5%）、さらに軸力、帯鉄筋比とした。供試体は、場所打ち RC 杭の施工を模擬してフォーミング部を上側にしてトレミー管を用いてコンクリー

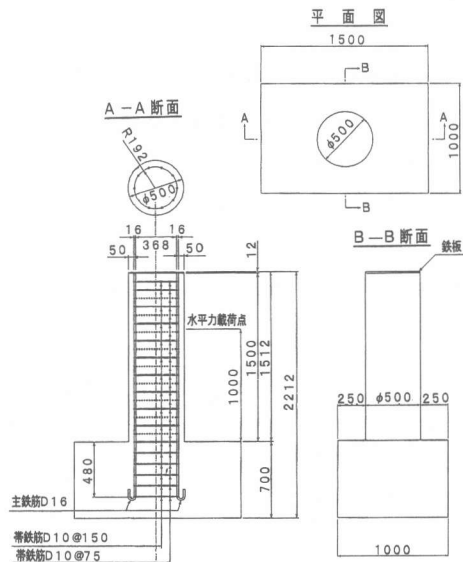


図-1 供試体形状および配筋

*1 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 橋梁担当、工修（正会員）

*2 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 橋梁担当主任技師（正会員）

トを打設し、締め固めは気中施工供試体以外には行わなかった。

2.2 載荷方法

載荷は、アクチュエータを用いた水平方向の正負交番載荷とした。加力サイク

ルは、最外縁の軸方向鉄筋が引張降伏した時点の載荷点位置の変位 δy を基準として、整数倍の δy 毎に正負各2ループ行うことを基本とした。載荷の終了は、降伏荷重の80%以下となる時点の変位を目標とした。

2.3 測定項目

測定は、荷重、変位置、鉄筋のひずみとした。

2.4 使用材料

鉄筋の引張降伏強度を表-2に、コンクリート強度を表-3に示す。ここで表-3には、標準養生試験体の値と、実験終了後に供試体杭先端部から採取したテストピースの値を示している。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れおよび破壊性状

A-1~A-3供試体の2 δy におけるひび割れ状況を、図-2に示す。気中、水中および泥水中施工供試体ともに、曲げひび割れより進展したせん断ひび割

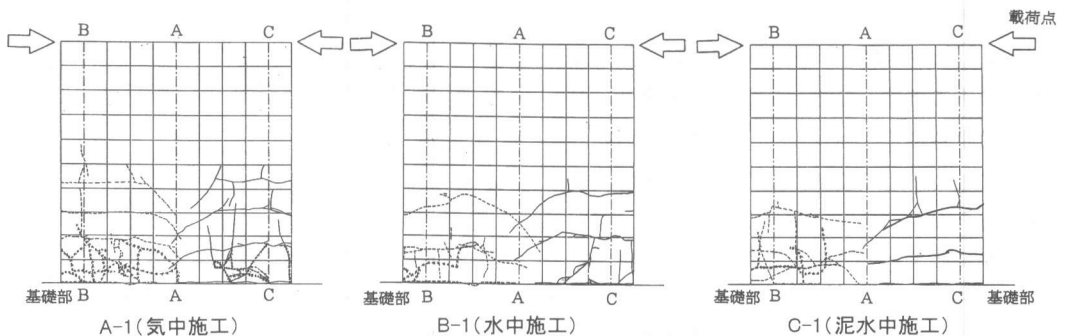


図-2 ひび割れ状況 (A-1~A-3 2 δy 時)

表-1 供試体概要

供試体	杭体部の施工条件		杭体部直径とせん断スパン	杭体部の鉄筋		軸力 (tf)	V·a/Mu		
	打設状況	締固め		主鉄筋	帯鉄筋				
A-1	気中	有	$\phi=50\text{cm}$ $a=100\text{cm}$	SD345 10-D16	D10 @150 Pw=0.2%	170	0.99		
A-2	水中	無				160	0.94		
A-3	泥水中(10%)					170	0.97		
A-4	水中				D10 @75 Pw=0.4%	170	1.23		
B-1	気中	有			無	D10 @150 Pw=0.2%	0	1.73	
B-2	水中	無					0	1.73	
B-3							78	1.14	
B-4							D10 @75 Pw=0.4%	75	1.66
B-5							泥水中(10%)	D10 @150 Pw=0.2%	75

表-2 鉄筋の強度

供試体	主鉄筋			帯鉄筋	
	種類	降伏強度 (kN/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	種類	降伏強度 (kN/mm ²)
A-1~A-4	SD345 D16	402	1.9×10^5	SD345 D10	390
B-1~B-5	SD345 D16	376	1.9×10^5	SD345 D10	394

表-3 コンクリート強度

供試体	標準養生		供試体(杭先端部)
	f_c'	f_c'	E_c
A-1	33.9	29.9	2.22×10^4
A-2	32.1	35.6	2.45×10^4
A-3	34.6	31.7	2.13×10^4
A-4	33.8	41.4	2.61×10^4
B-1	29.3	35.3	3.02×10^4
B-2	29.7	36.3	2.77×10^4
B-3	31.2	39.6	3.13×10^4
B-4	30.0	37.7	2.45×10^4
B-5	29.8	31.6	2.79×10^4

単位: kN/mm²

供試体(杭先端部)は、試験終了後に杭先端部からコア抜きしたテストピースの値

れの発生が観察された。また、水中施工・泥水中施工は、気中施工と比べてひび割れが少ないが、これは筆者らが行った梁供試体の実験[2]と同様の傾向であった。これは主に鉄筋とコンクリートの付着の影響と考えられ、水中施工・泥水中施工では、気中施工と比べてコンクリートと鉄筋の付着が低下しているものと考えられる。なお、いずれの供試体もコンクリートが圧壊し、破壊に至った。

3.2 荷重と変位の関係

実験結果を表-4に、各供試体の荷重変位曲線を図-3(次頁)に示す。また無軸力(B-1、B-2)、中軸力(B-3~B-5)、高軸力(A-1~A-4)それぞれの荷重変形曲線の包絡線を図-4に示す。図より、施工条件による変形性能の顕著な差は認められない結果となった。しかし、軸力比の増加に伴い、最大耐力は大きくなるものの、最大耐力以降の荷重低下は大きくなる傾向が見られる。

4. 降伏耐力および降伏変位

4.1 降伏耐力

降伏曲げモーメント実験値と計算値の関係を図-5に示す。なおここでは、せん断スパンを鋼製載荷治具下端からとして算定した。施工条件による降伏耐力の顕著な差は認められない結果となった。また、計算値は実験値を妥当に評価すると考えられる。

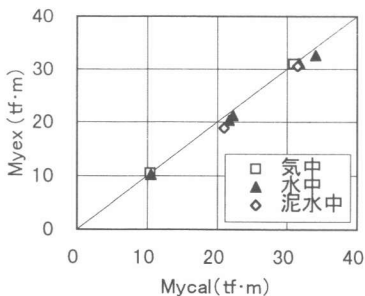
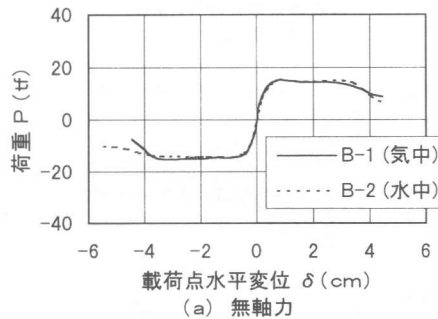


図-5 My実験値と計算値の関係

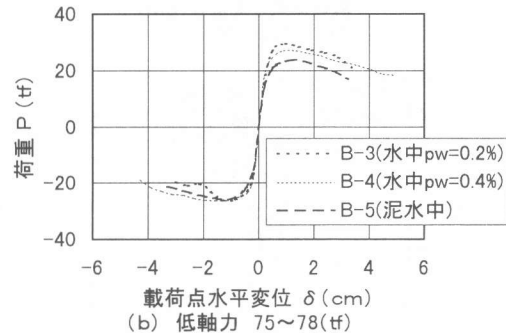
表-4 実験結果の概要

供試体		鉄筋降伏時(最外縁)			最大荷重時		終局時	じん性率	
		荷重 (tf)	変位(mm)			荷重 (tf)	変位 (mm)		変位 (mm)
			全変位	く体変形	拔出変位				
A-1	+	35.6	6.5	4.6	1.9	38.1	9.3	13.0	2.0
	-	37.2	6.5	4.6	1.9	38.4	9.0	12.5	1.9
A-2	+	36.3	5.5	3.8	1.7	38.1	7.0	10.3	1.9
	-	36.7	6.8	4.7	2.1	36.8	8.5	11.7	1.7
A-3	+	37.6	6.8	5.0	1.8	38.0	10.0	10.7	1.6
	-	34.2	6.0	4.2	1.9	36.0	9.3	11.8	2.0
A-4	+	39.0	6.5	4.6	1.9	39.0	6.5	6.5	1.0
	-	38.0	6.5	4.6	1.9	38.0	6.5	6.5	1.0
B-1	+	12.5	3.4	2.8	0.6	15.2	7.4	35.2	10.2
	-	12.2	3.7	3.1	0.6	15.3	33.3	38.8	10.5
B-2	+	11.5	3.4	3.0	0.4	15.1	30.6	37.9	11.1
	-	12.4	4.2	3.7	0.5	14.5	25.2	42.4	10.1
B-3	+	26.7	4.8	4.1	0.7	29.6	9.6	23.5	4.9
	-	12.2	4.3	4.1	0.2	26.3	12.9	-	-
B-4	+	24.2	4.5	3.6	0.9	27.1	9.0	25.7	5.7
	-	23.6	3.9	3.6	0.3	27.0	15.6	33.5	8.6
B-5	+	21.3	5.4	4.6	0.8	24.3	9.8	23.2	4.3
	-	23.1	5.5	5.3	0.2	26.1	11.0	26.4	4.8

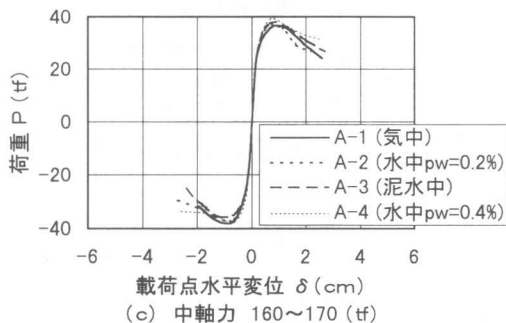
鉄筋抜け出しによる変位はフーチング内引張鉄筋ひずみを積分したものの。



(a) 無軸力



(b) 低軸力 75~78(tf)



(c) 中軸力 160~170 (tf)

図-4 荷重変形曲線の包絡線

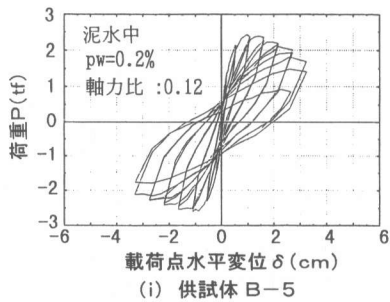
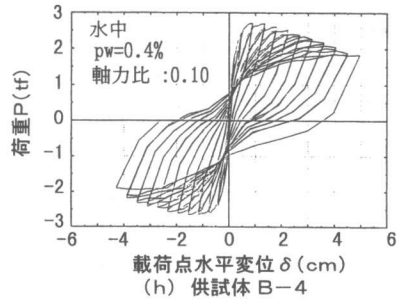
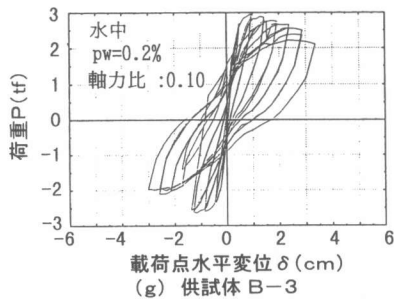
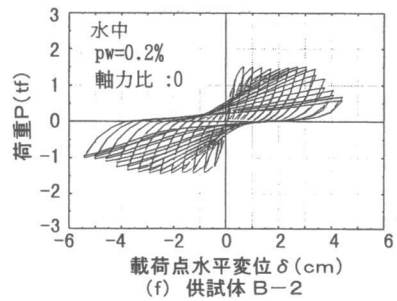
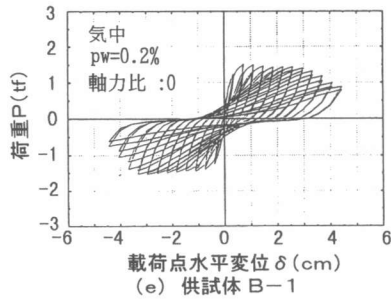
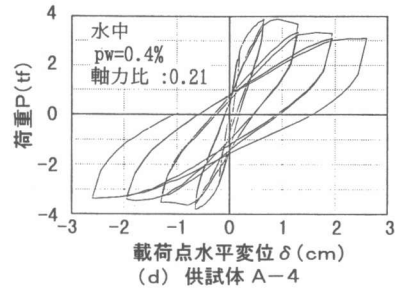
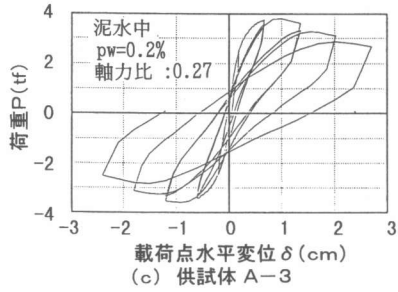
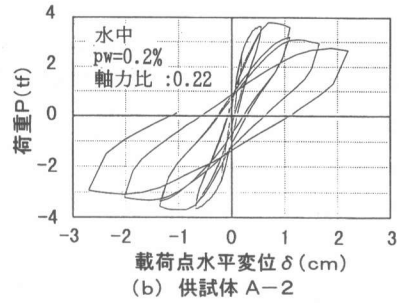
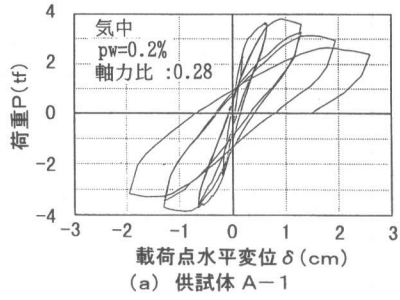


図-3 荷重変位曲線

4. 2 降伏変位

既往の手法を用いて降伏変位の推定を試みた[3,4]。なお、降伏変位の計算は式(1)によった。

$$\delta y_{cal} = \delta y_{0cal} + \delta y_{1cal} \quad (1)$$

ここに、 δy_0 : 降伏時のく体変形による変位 (cm)

δy_1 : 降伏時の引張鉄筋抜け出しによる回転変位 (cm) で、式(2)で算定した[3]。

$$\delta y_1 = a \cdot \Delta L_y / (d - x_{yn}) \quad (2)$$

ここに、 a : せん断スパン (cm)

ΔL_y : 降伏時の引張鉄筋の抜け出し量 (cm) で、次式で算定した[3]。

$$\Delta L_y = 0.070 - 0.0054D/\phi + 0.00017(D/\phi)^2$$

D : 引張鉄筋の中心間隔 (cm)

ϕ : 引張鉄筋の直径 (cm)

d : 有効高さ (cm)

x_{yn} : 降伏時の圧縮縁から中立軸までの距離 (cm)

また、 δy_0 算定時の曲げひび割れ発生以降の曲げ剛性は、式(3)により評価した[4]。

$$EI_e = (\sigma_{scr}/\sigma_s)^4 \cdot EI_1 + \{1 - (\sigma_{scr}/\sigma_s)^4\} \cdot EI_2 \quad (3)$$

ここに、 EI_e : ひび割れ発生以降の曲げ剛性

EI_1 : 全断面有効の曲げ剛性

EI_2 : 中立軸以下のコンクリートを無視したときの曲げ剛性

σ_{scr} : ひび割れ発生時の引張鉄筋応力度

σ_s : M_0 (過渡状態の重心軸まわりの曲げモーメント) と軸力作用時において、中立軸以下のコンクリートを無視したときの引張鉄筋応力度

降伏変位 δy の実験値と計算値の比と軸力比の関係を図-6に示す。なお、計算値のコンクリートのヤング係数は、(a)軸力加圧時の主鉄筋平均ひずみから算定した値、(b)曲げひび割れ発生時の水平方向変形量より算定した値、(c)実験終了後に供試体杭先端部から採取したテストピースの値、を用いた(表-5)。(a)(b)においては、降伏変位を概ね妥当に評価している。これより、筆者たちの梁の実験[2]と同様に、降伏変位を推定するには、場所打ちRC杭のコンクリートのヤング係数を適切に評価する必要があると考えられる。また、コンクリートのヤング係数を適切に評価すると、軸力にかかわらずこの手法で降伏変位を概ね妥当に評価できると考えられる。

表-5 コンクリートのヤング係数

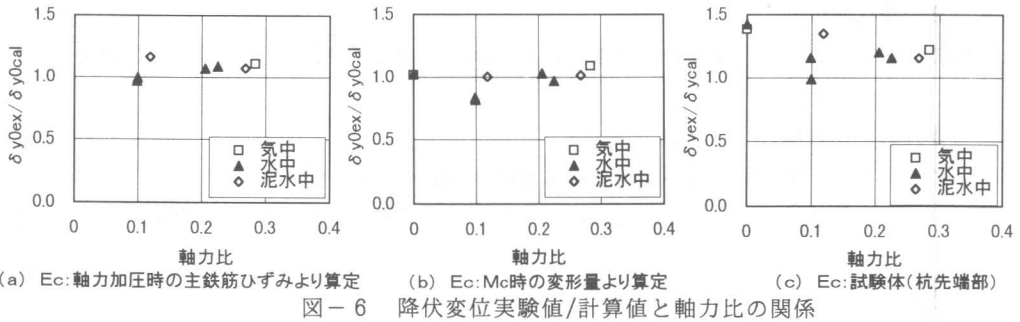
供試体	(a)軸力加圧時の値	(b)曲げひび割れ発生時の値	(c)供試体杭先端部の値
A-1	1.79×10^4	1.73×10^4	2.22×10^4
A-2	2.15×10^4	1.65×10^4	2.45×10^4
A-3	1.8×10^4	1.60×10^4	2.13×10^4
A-4	2.04×10^4	1.88×10^4	2.61×10^4
B-1	—	0.81×10^4	3.02×10^4
B-2	—	0.64×10^4	2.77×10^4
B-3	1.96×10^4	1.29×10^4	3.13×10^4
B-4	2.49×10^4	1.47×10^4	2.45×10^4
B-5	1.87×10^4	1.21×10^4	2.79×10^4

単位: kN/mm²

(a): 軸力加圧時の主鉄筋ひずみから算定した値

(b): 曲げひび割れ発生時の水平方向変形量から算定した値

(c): 実験終了後に供試体杭先端部から採取したテストピースの値



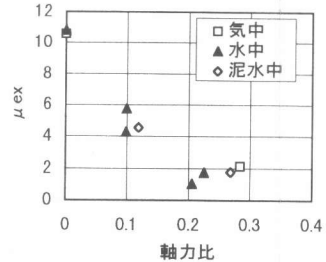
5. 変形性能の評価

各供試体のじん性率と軸力比の関係を図-7に示す。
 なお、終局変位は荷重-変位曲線の包絡線において、耐力が最外縁の鉄筋の降伏荷重を下回らない最大変位とした。じん性率の実験値 (μ_{ex}) は次式で算定した。

$$\mu_{ex} = \delta_{uex} / \delta_{ycal} \quad (4)$$

ここに、 δ_{uex} : 終局変位実験値 (cm)

δ_{ycal} : 降伏変位計算値 (cm) で、式(1)により算定した。(コンクリートのヤング係数は、曲げひび割れ発生時の水平方向変形量より算定した値を用いた。)



これより、軸力の増加にともないじん性率が低下する傾向が見られるものの、施工条件によるじん性率の顕著な差は認められない。

6. 結論

場所打ちRC杭をモデル化した供試体による交番載荷試験から、本実験の範囲内で明らかになったことを要約して以下に示す。

- (1) 降伏変位は、既往の手法により算定することができる。ただしその場合、施工条件によるコンクリートのヤング係数の低下を適切に評価する必要がある。
- (2) 場所打ちRC杭の変形性能は、軸力の増大に伴い低下するが、施工条件による顕著な差は認められない。

謝辞 本実験を行うにあたりお世話になった熊谷組技術研究所に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 谷口義則・渡辺忠朋・村田修：場所打ち杭コンクリート強度の実態強度、コンクリート工学、Vol.32、No.4、pp.22-30、1994.4
- [2] 渡辺忠朋・村田修・谷口義則：場所打ちRC杭の曲げ・せん断性状、鉄道総研報告、Vol.9、No.4、pp.13-18、1995.4
- [3] 石橋忠良・吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究、土木学会論文集、第390号/V-8、pp.57-66、1988.2
- [4] Sakai, K. and Kakuta, Y.: Moment-Curvature Relationships of Reinforced Concrete Members Subjected to Combined Bending and Axial Force, ACI Journal, Vol.77, No.3, pp.189-194, May/June 1980