

論文 場所打ち RC 杭の変形性能評価

渡辺 忠朋*1・瀧口 将志*2・佐藤 勉*3

要旨：場所打ち RC 杭の施工条件が変形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、円形断面を有した柱供試体による交番載荷試験結果を用いて施工条件が場所打ち RC 杭の変形性能に及ぼす影響を調査し、場所打ち RC 杭の変形性能算定手法の検討を行った。その結果、施工条件は、終局変位等に大きな影響を与えないことを明らかにした。

キーワード：場所打ち RC 杭, 変形性能, 降伏変位, 終局変位

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円柱供試体および梁供試体を用いた実験的な検討により明らかにした^{1), 2)}。また、場所打ち RC 杭の変形性能に関する実験結果についても報告している³⁾。

近年、構造物の耐震設計を合理的に行うためには、上部構造と基礎構造の部材性能を同一の指標で評価する必要があると考えられる。

しかし、場所打ち RC 杭の変形性能については十分に明らかにされていないのが現状である。

そこで、今回、

場所打ち RC 杭の施工条件や軸方向力が変形性能に及ぼす影響について明らかにするために場所打ち RC 杭をモデル化した供試体による交番載

荷試験結果³⁾を用いて、変形性能について検討を行ったので以下に報告する。

2. 実験概要³⁾

供試体は、実構造物の杭頭付近の曲げモーメント分布をモデル化して、せん断スパン比 2.0 の直線分布の曲げモーメントが生じるような片持ち梁にモデル化した。

軸方向力については、実構造物の杭に作用する軸方向力の範囲を概ね包絡するように設定した。

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 50cm、杭長 150cm 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

表-1 供試体概要

供試体	杭対部の施工条件		杭体部直径とせん断スパン	杭本体の鉄筋		軸力 (10 ³ KN)
	打設状況	締固め		主鉄筋	帯鉄筋	
A-1	気中	有	φ=50cm a=100cm	SD345 10-D16	D10@150 Pw=0.2%	1.67
A-2	水中	無				1.57
A-3	泥水中(10%)					1.67
A-4	水中				無	D10@75 Pw=0.4%
B-1	気中	0				
B-2	水中	D10@150 Pw=0.2%				0
B-3		0.76				
B-4		D10@75 Pw=0.4%				0.74
B-5		泥水中(10%)			D10@150 Pw=0.2%	0.74

*1 北武コンサルタント(株) (正会員)

*2 鉄道総合技術研究所構造物技術開発事業部 工修 (正会員)

*3 鉄道総合技術研究所構造物技術開発事業部主任技師 工博 (正会員)

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

してフーチング部を上側にしてトレミー管を用いてコンクリートを打設し，締め固めは気中施工供試体以外は行わなかった。

荷重は，アクチュエータを用いた水平方向の正負交番荷重とした。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 δ_y を基準として，整数倍の δ_y 毎に正負各 2 ループ行うことを基本とした。測定は，荷重，変位量，鉄筋のひずみとした。

鉄筋の機械的性質を表-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。

供試体のひびわれ状況は，水中施工と泥水中施工の供試体が気中施工の供試体に比べて曲げひび割れが少なかったものの，いずれの供試体とも圧縮側コンクリートの圧壊により破壊に至っていた。実験結果の概要を表-4に，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-2に示す。なお，図-2は，軸力による二次モーメントの影響（P- Δ 効果）を補正したものである。

表-2 鉄筋の機械的性質

	軸方向鉄筋			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

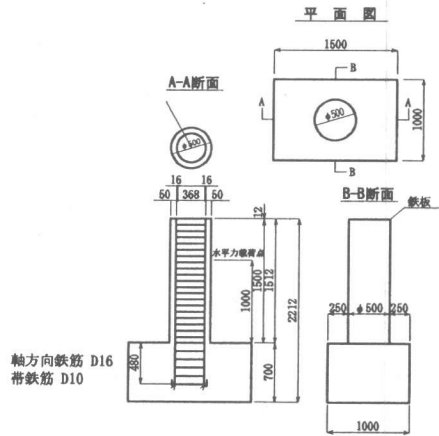


図-1 供試体形状および配筋

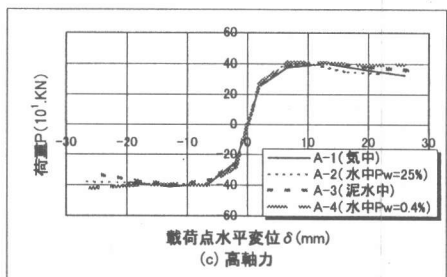
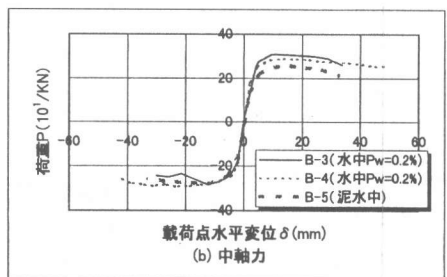
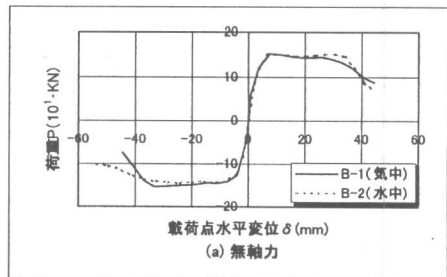


図-2 荷重変位曲線の包絡

表-3 コンクリート強度

	標準養生	供試体 (杭先端部)	
	fc'	fc'	Ec
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

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
		荷重 (k N)	変位 (mm)		荷重 (k N)	変位 (mm)	変位 (mm)
			全変位	抜出変形			
A-1	+	370	6.5	2.502	394	13.01	15.72
	-	-364	-6.5	-2.552	-405	-13	-19.50
A-2	+	373	5.5	2.064	387	11.01	11.36
	-	-381	-6.75	-2.502	-391	-13.5	-15.77
A-3	+	392	6.75	2.286	399	13.5	18.05
	-	-356	-6	-2.411	-387	-12	-13.18
A-4	+	404	6.51	2.481	386	19.5	9.41
	-	-394	-6.5	-2.446	-395	-19.5	-
B-1	+	118	3.5	1.487	141	25.92	28.50
	-	-123	-3.8	-1.674	-150	-29.61	-35.91
B-2	+	115	3.5	1.642	147	27.21	34.29
	-	-122	-4.3	-1.792	-131	-37.8	-29.28
B-3	+	271	5	1.907	296	24.01	30.81
	-	-236	-4.5	-1.859	-	-	-14.03
B-4	+	247	4.6	1.787	249	45	28.77
	-	-241	-4	-1.562	-285	-31.2	-40.00
B-5	+	218	5.5	2.361	245	21.6	-
	-	-235	-5.6	-2.663	-264	-27.5	-28.55

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

3. 変形性能の評価

3.1 降伏時

降伏時の部材の変形量を、軸方向鉄筋の抜出しによる回転変位とく体の変位に分離して実験結果の検討を行った。

それぞれの変位の計算値と実験値の比を釣合い軸力比をパラメータとして図-3および図-4に示す。

降伏時の抜出しによる部材変位の実験値は、フーチング内の軸方向鉄筋に貼り付けたひずみゲージの値を積分して算定した値をもとに算定した(δy_{lex})。く体の変位の実験値は実験から得られた部材全体の変位から抜出しによる回転変位を差し引いた値とした(δy_{0ex})。

また、降伏時の抜出しの計算値(δy_{lcal})は文献⁴⁾に示す方法で算定し、く体の変位 (δy_{0cal})は曲率を2階積分することにより算定した。なお、ここで言う降伏時は、最外縁の軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した時点とした。

図-3は、く体の変位の実験値と計算値の関係を示した。釣合い軸力比が大きくなるほど計算値は実験値を過小評価する傾向が見受けられる。

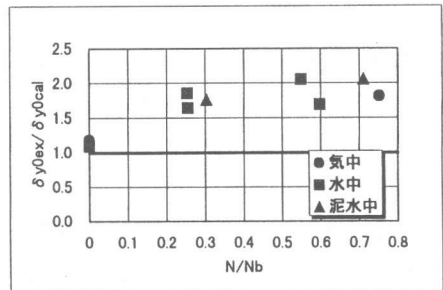


図-3 く体の変位の実験値/計算値

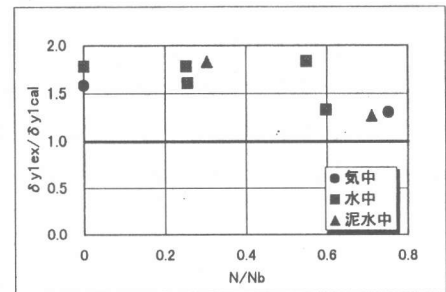


図-4 抜出しによる回転変位の実験値/計算値

図-4は、軸方向鉄筋の抜出しによる回転変位の実験値と計算値の関係を示した。く体の変位とは逆に、釣合い軸力が大きくなると計算値は実験値に近づいていることが分かる。

なお、施工条件による顕著な差異は認められない結果となっている。

3.2 降伏以降の柱基部変位

施工条件が部材の変形に及ぼす影響を検討するために、部材基部の軸方向鉄筋の拔出しによる回転変位に着目して実験結果を整理した。

部材角（载荷点の水平変位をスパンで除した値）と軸方向鉄筋の拔出しによる基部回転角の関係を図-5に示す。

軸方向鉄筋の拔出しによる基部回転角は、フーチング内の軸方向鉄筋に貼り付けたひずみゲージのひずみを積分して算出した圧縮鉄筋と引張鉄筋の拔出し量から求まる回転角と、供試体基部の圧縮縁および引張縁に設置した変位計による供試体基部とフーチングとの相対変位から算出される回転角の2つの値を示した。すなわち、前者は軸方向鉄筋のフーチング内からの拔出しであり、後者は軸方向鉄筋のフーチング内からの拔出しのほかに柱く体からの拔出しを含んだ値であると考えられる。

施工条件および軸力の程度に関わらず、いずれの供試体とも、フーチングからの拔出しによる基部回転角は、最大荷重時程度以降は増加しない傾向となっている。

フーチングからの拔出しによる基部回転角は施工条件による大きな差異はないものの、高軸力の場合、気中施工 (B-1) に比べて、水中施工・泥水中施工 (B-2,3) は部材からの拔出しが大きくなる傾向が認められる。

これは、水中施工および泥水中施工の場合は、気中施工に比べてコンクリートと鉄筋の付着強度が低下することによる影響と考えられる。

3.3 終局時

部材の終局の定義には種々のものがあるが、ここでは、降伏荷重を下回らない最大部材角と定義することとした。本検討における降伏時は、引張側軸方向鉄筋の重心位置の鉄筋が降伏ひずみに達した時点と定義した。各供試体の終局時の部材角は終局変位をスパンで除した値である。

図-6は、釣合い軸力比と終局時の部材角の関係を示している。図中には正載荷時に着目し、

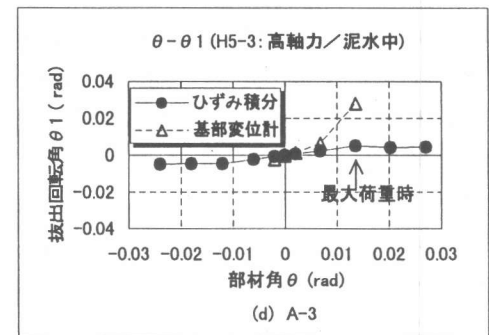
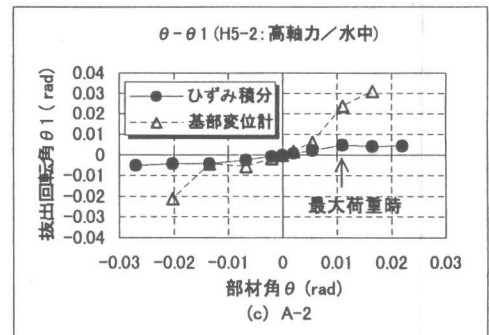
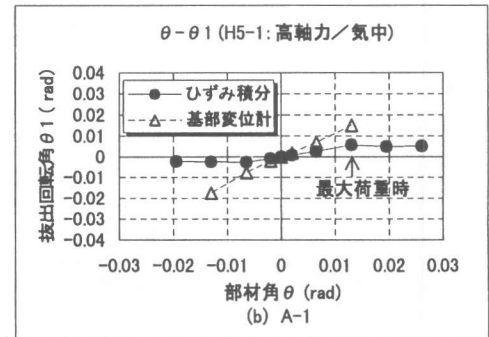
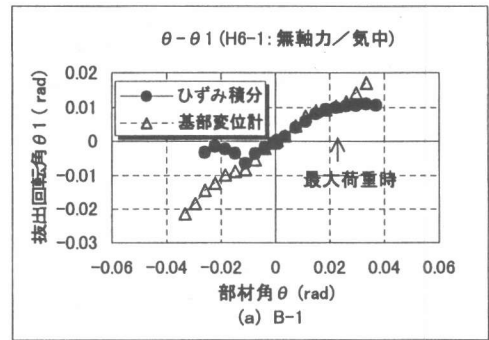


図-5 部材角と拔出しによる基部回転角の関係

せん断補強鉄筋比が等しく曲げせん断耐力比が概ね等しい供試体の実験結果のみを示している。

これによると釣合い軸力比が大きくなると終局部材角が小さくなっていることが分かる。本実験に用いた供試体では釣合い軸力比が 0.0, すなわち無軸力の場合に比べて, 釣合い軸力比が 0.9 程度の場合で部材角が約 50% に低下する結果となった。

また, 施工条件に着目すると, 軸力の大小に関わらず顕著な差異は認められない結果となっている。

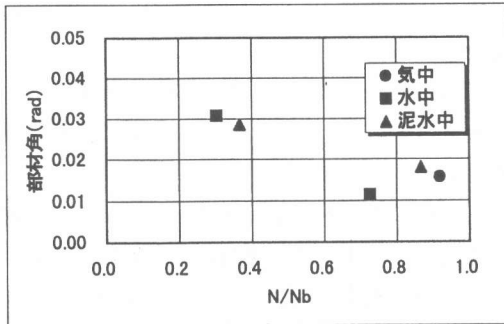


図-6 釣合い軸力比と終局部材角の関係

4. 変形性能算定手法

既往の変形性能算定手法を用いて終局変位の推定を試み, 算定手法の適応性等について検討を行う。

本検討では, 既往の変形性能算定手法として土木学会の方法⁴⁾を用いた。

$$\delta y = \delta_1 + \delta n \quad (1)$$

$$\delta n = \theta \cdot h \quad (2)$$

ここに,

δ_1 : 降伏荷重時のく体の変位

δn : 抜出しによる回転変位

θ : 抜出しによる部材基部の回転角

h : 部材長さ

$$\delta u = \mu \times \delta y \quad (3)$$

ここに,

δu : 終局変位

μ : じん性率

δy : 降伏変位

$$\mu = \mu_0 + (1 - \mu_0) (\sigma_0 / \sigma_b)$$

$$\mu_0 = 12 \left(\frac{0.5V_c + V_s}{V_{mu}} \right) - 3 \quad (4)$$

ここに,

V_c : せん断補強鋼材を用いない棒部材のせん断耐力

V_s : せん断補強鋼材により受持たれるせん断耐力

V_{mu} : 曲げ耐力に達するときのせん断力

σ_0 / σ_b : 釣合い軸力比

上記の変形性能算定手法を用いた場合の計算値と実験値を表-5に示す。

じん性率の計算値(μ_{test})と実験値(μ_{cal})の関係を図-7に示す。

じん性率の計算値は, 実験値を概ね安全側に評価していることが分かる。

終局変位の計算値と実験値の比と釣合い軸力比の関係を図-8に示す。

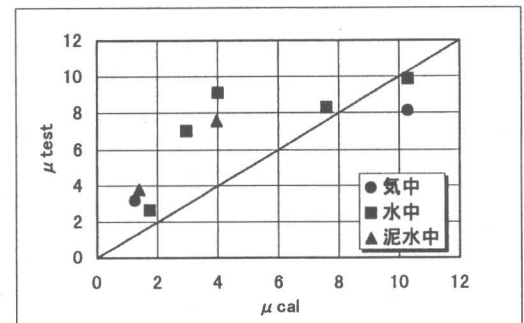


図-7 じん性率の実験値と計算値の関係

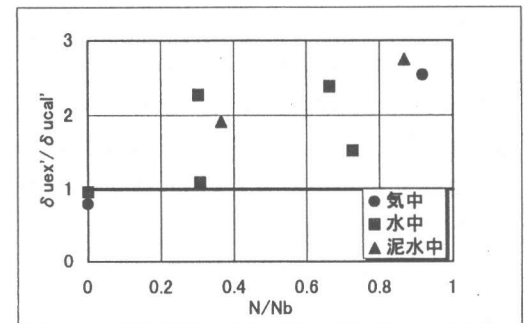


図-8 終局変位の実験値/計算値と釣合い軸力比の関係

表-5 変形性能の計算値と実験値

供試体	Pycal (kN)	δy (cm)	Vc (kN)	Vs (kN)	VMu (kN)	N/Nb	μ_0	μ	$\delta ucal$ (cm)	δuex (cm)	μex	$\frac{\delta uex}{\delta ucal}$
A-1	374	0.49	193	127	379	0.75	4.1	1.3	0.62	1.57	3.2	2.54
A-2	386	0.43	195	127	404	0.60	3.7	1.7	0.74	1.14	2.7	1.53
A-3	382	0.47	194	127	389	0.71	3.9	1.4	0.66	1.81	3.8	2.75
A-4	415	0.39	204	255	438	0.55	6.8	2.9	1.15	2.75	7.0	2.39
B-1	139	0.35	123	128	172	0	10.3	10.3	3.61	2.85	8.1	0.79
B-2	140	0.35	124	128	172	0	10.3	10.3	3.58	3.43	9.9	0.96
B-3	278	0.34	174	128	313	0.25	5.3	4.0	1.35	3.08	9.1	2.28
B-4	271	0.35	172	257	304	0.26	10.5	7.6	2.64	2.88	8.3	1.09
B-5	263	0.38	164	128	291	0.30	5.7	4.0	1.49	2.86	7.6	1.92

終局変位の計算値は、式(3)で算定した。

また、終局変位の実験値は、実験から得られた荷重変位の包絡線において計算から求めた降伏荷重を下回らない最大変位とした。なお、降伏荷重は、引張側軸方向鉄筋の重心位置の鉄筋が降伏ひずみに達した時点の荷重の計算値である。

終局変位の実験値(δuex)と計算値($\delta ucal$)の比は、0.79~2.75 の範囲にあり、計算値が実験値を上回る試験体もあるが概ね安全側に評価できる結果となっている。しかし、釣合い軸力比が大きくなるほど計算値は実験値を過小評価する傾向が認められる。これは、既往の算定手法が釣合い軸力比1でじん性率を1と仮定していることによるためと考えられる。

また、供試体の施工条件に着目すると釣合い軸力比の大きい領域および釣合い軸力比の小さい領域ともに計算値と実験値の比に顕著な差異は認められない結果となっている。

これより、場所打ち RC 杭の変形性能は、杭体の施工条件に関わらず既往の変形性能算定手法を用いて通常の RC 部材と同様に扱って良いと考えられる。

5. 結論

本論で、明らかになったことを以下に要約して示す。

1) 降伏時の部材変位を通常の RC 部材の手法を用いた計算値と比較した結果、実験値/計算値は、施工条件に関わらず軸力により大きな影

響を受ける。

2) 終局時の部材角に、施工条件は顕著な影響を与えない。しかし、軸方向力は顕著な影響を与える。

3) 既往の変形性能算定手法として土木学会によるじん性率算定手法を用いて実験結果を評価した場合、釣合い軸力比が大きい領域では計算値が実験値を過小評価する傾向があるものの、変形性能は杭体の施工条件に関わらず概ね安全側に評価できる結果となった。

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，No4，pp.13-18，1995.4
- 3) 瀧口将志・渡辺忠朋：場所打ち RC 杭の変形性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.2，pp.801-806，1997.6
- 4) 土木学会：阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式 [阪神大震災調査研究特別委員会 WG 報告]，コンクリート技術シリーズ 12，pp.42-78，1996.7