

圧縮および引張り軸力作用下における PHC 杭の曲げ破壊特性

三浦房紀

正会員 工博 山口大学大学院理工学研究科 環境共生工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

This paper presents the bending characteristics up to the ultimate state of PHC piles subjected to compressive and tensile axial loads. The diameters of the piles are 400mm, 600mm, and 800mm, which are commonly used. The relationships between bending moments-deflections and bending moments-curvatures are examined with respect to the axial load. The results will provide useful information for the ultimate state design of pile foundations.

Key Words: PHC pile, bending characteristics, ultimate state, axial load,

1. はじめに

建築物あるいは土木構造物の上部工の設計は、限界状態設計法へと移行しつつある。合理的な耐震設計を行うには上部工とバランスをとりながら下部工、基礎も限界状態設計を行うことが理想である。限界状態設計を行うには、終局状態に至るまでの特性を明らかにしなければならない。しかしながらこれまでのところ基礎に関しては必ずしも限界状態設計に耐えるだけのデータの蓄積はなされていない。特に杭基礎は地震時においては変動軸力の作用を受け、しかも杭は軸力によって大きくその特性が異なるにもかかわらず、軸力に依存した形で系統的に杭の曲げ破壊特性は整理されていないようである。このような観点から、本研究では圧縮および引張り軸力作用下における杭の破壊に至るまでの曲げ特性を実験的に明らかにすることを試みた。

2. 実験概要

(1) 実験ケース

実験の対象としたのは現場で一般に良く用いられている既製杭の B 種 PHC 杭で、杭径 400, 600, 800mm の 3 種類である。軸力は、0, 長期荷重 N1, 短期荷重 N2, および引張である。ただし径 800mm の杭については引張軸力載荷曲げ試験は設備の関係で実施しなかった。実験は軸引張りについては再現性を見るために 2 回ずつ行い、合計 13 ケース行っ

表-1 実験概要

試験 No.	杭径 (mm)	長さ (m)	軸力 (kN)	設計ひびわれモーメント (kN・m)	設計破壊モーメント (kN・m)
1	400	8	-500	42.7	94.0
2			0	79.4	158.1
3			600	122.6	226.1
4			1180	166.2	265.2
5	600	8	-1000	143.4	264.9
6			0	255.0	469.7
7			1300	400.5	707.5
8			2600	545.8	855.0
9	800	10	0	577.6	1118.9
10			2000	882.9	1599.3
11			4000	1188.1	1910.3
12	400	8	-500	42.7	94.0
13	600	8	-1000	143.4	264.9

表-2 杭の諸元

杭径 (mm)	杭長 L (m)	単位長さ当たりの重量 W (kN/m)	重量 W (kN)	断面二次モーメント I ($\times 10^{-4} \text{m}^4$)
400	8	1.744	13.95	9.9577
600	8	3.675	29.40	48.3427
800	10	6.077	60.77	146.6121

た。その一覧を表-1に示す。また杭の諸元を表-2に示す。

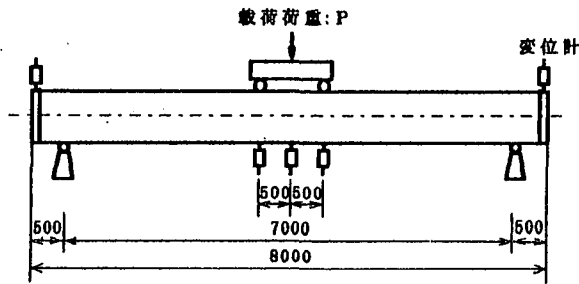


図-1 載荷方法（杭径 400mm, 600mm）

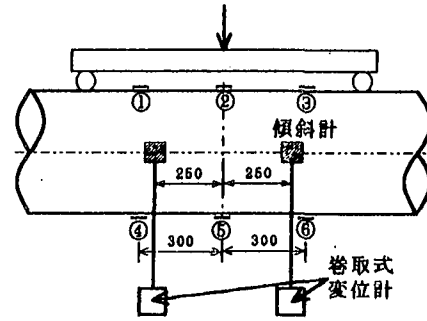


図-2 ひずみゲージおよび傾斜計取付位置

表-3 使用機器材

機 材 名	能力又は型式	メーカ ー	備考
曲げ試験機	油圧式 2000KN	(株)森試験機製作所	—
テンションロッド	クロムモリデン鋼	東洋重機工業(株)	軸力・軸引張試験
油圧ポンプ	油圧電動 (5.6KW)	東洋重機工業(株)	軸力・軸引張試験
油圧ジャッキ	油圧式 (4500kN)	東洋重機工業(株)	軸力・軸引張試験
ひずみ測定器	TDS-302	(株)東京測器研究所	—
スイッチボックス	ASW-324B	(株)東京測器研究所	—
変 位 計	SDP-100B, SDP-100R	(株)東京測器研究所	—
傾 斜 計	PMP-S10LX-1	(株)緑測器	—
ストレインゲージ	PL-60-11	(株)東京測器研究所	—

(2)載荷および計測方法

曲げ試験は図-1に示すとおり2点支持2点載荷の単純梁方式で行う。杭径 400mm, 600mm についてはスパン長 7m, 杭径 800mm の杭についてはスパン長 8m で行った。

測定項目は変位 8 点, ひずみ 6 点, 傾斜角度 4 点である。図-2にひずみゲージおよび傾斜計の取り付け位置を示す。それぞれの測定点は, 変位が図-1に示した変位計による測定 5 点, 巻取式変位計による測定 2 点 (図-2), およびトランシットによる測定 1 点の合計 8 点である。ここにトランシットによる測定というのは, 杭直下の変位計が破損するのを防ぐために, 杭が破壊する直前にこれらを取り除き, それに変わって離れた距離から杭の変位をトランシットにより測定したものである。ひずみは図-2に示すように杭の上部, 下部それぞれ 3 点ずつの合計 6 点, 傾斜角度は図-2に示すように片側 2 点の両側合計 4 点である。試験に用いた機器材を表-3にまとめて示す。

(3)軸引張力の導入

本研究の特徴の一つは, 軸引張力下で杭の終局状態に至るまでの曲げ特性を明らかにすることである。この目的のため, 新しくその装置を作成した。図-3にその概要を示す。図-3(a)は軸力導入装置であり, 図-3(b)は杭 (径 600mm) を試験装置に装着した状態である。軸力の導入は, 図-3(a)に示すように, 杭両端部に取り付けた緊張材 (テンションロッド) をジャッキにより緊張し, この反力を周辺に取り付けたフレームを介して杭供試体に与える。ジャッキは供試体に所定の荷重を与えたあと取り除く。曲げ荷重載荷方法, 計測点は前述の通りである。

(4)載荷過程

載荷荷重は, 設計破壊曲げモーメントを与える荷重を杭径 400mm は 6 等分以上, 杭径 600mm, 800mm は 12 等分以上とし, 各荷重段階を 1 分以上かけて連続的に破壊まで一方向に載荷した。その過程を表-4に示す。

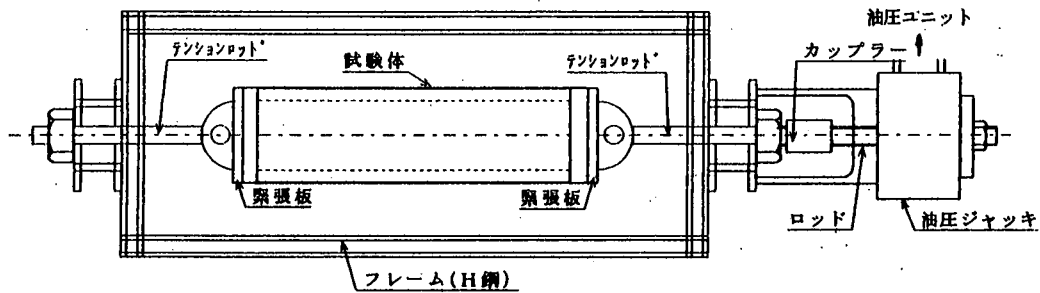


図-3(a) 軸力導入装置

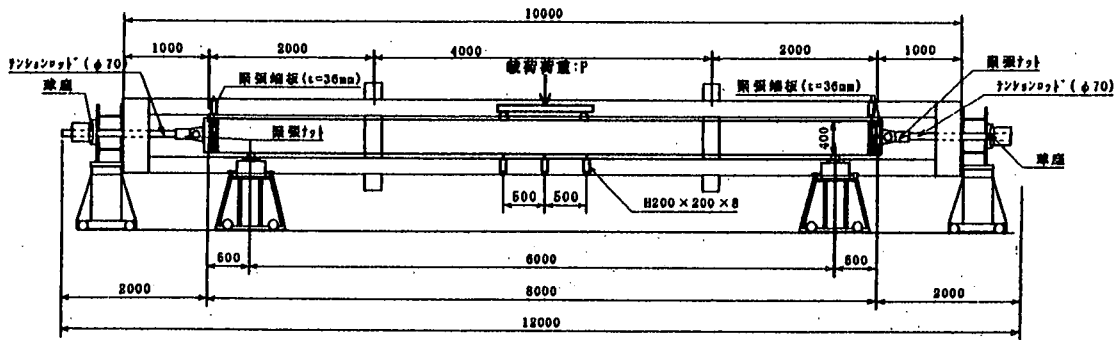


図-3(b) 引張軸力曲げ破壊実験

表-4 荷重プロセス

杭径 (mm)	軸力 (kN)	荷重階 (kN)
400	-500	0-10-20-①22-20-10-0 0-10-20-①22-実測ひび割れまで -30-40-50-60-②61-実測破壊まで
	0	0-10-20-30-40-①46-40-30-20-10-0 0-10-20-30-40-①46-実測ひび割れまで -50-60-70-80-90-②99-実測破壊まで
	600	0-20-40-60-①75-60-40-20-0 0-20-40-60-①75-実測ひび割れまで -100-120-②132-実測破壊まで
	1200	0-20-40-60-80-100-①103-100-80-60-40-20-0 0-20-40-60-80-100-①103-実測ひび割れまで -120-140-②145-実測破壊まで
600	-1000	0-10-...①10-...-80-①82-80-...②-10-...-10-0 0-10-...①10-...-80-①82-実測ひび割れまで -90-...②10-...-160-②168-実測破壊まで
	0	0-20-...②20-...-140-①156-140-...③-20-...-20-0 0-20-...②20-...-140-①156-実測ひび割れまで -160-...③20-...-280-②299-実測破壊まで
	1300	0-30-...③30-...-240-①252-240-...④-30-...-30-0 0-30-...③30-...-240-①252-実測ひび割れまで -270-...④30-...-410-②440-実測破壊まで
	2600	0-40-80-...④40-...-320-①349-320-...⑤-40-...-40-0 0-40-80-...④40-...-320-①349-実測ひび割れまで -360-400-440-480-②515-実測破壊まで
800	0	0-40-...④40-...-240-①259-240-...⑥-40-...-40-0 0-40-...④40-...-240-①259-実測ひび割れまで -280-...⑥40-...-480-②530-実測破壊まで
	2000	0-60-...⑥60-...-360-①411-360-...⑦-60-...-60-0 0-60-...⑥60-...-360-①411-実測ひび割れまで -420-...⑦60-...-720-②746-実測破壊まで
	4000	0-70-...⑦70-...-420-490-①557-420-...⑧-70-...-70-0 0-70-...⑦70-...-420-490-①557-実測ひび割れまで -560-...⑧70-...-840-②871-実測破壊まで

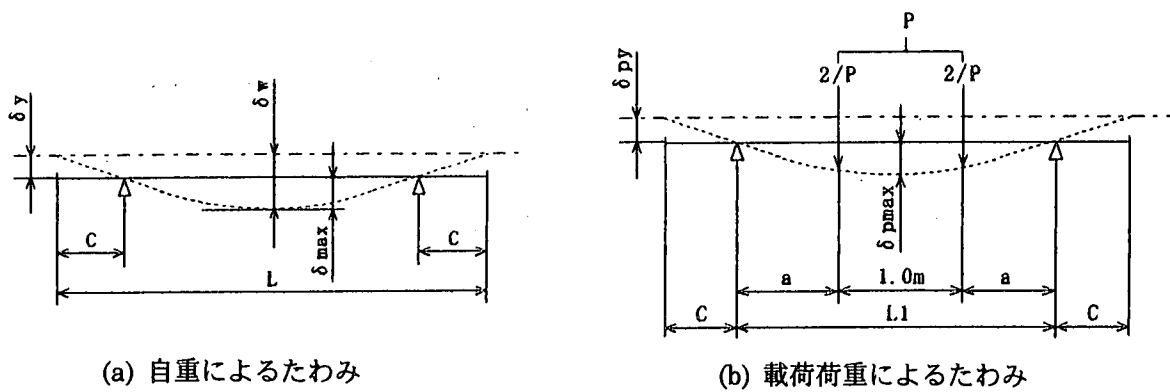


図-4 曲げモーメント算出のためのたわみ

表-5 曲げモーメント計算式

杭径 (mm)	自重による相対たわみ量			載荷荷重による相対たわみ量			曲げモーメント計算式
	中央点 δ_{max} (mm)	支承からの はね出し δ_y (mm)	合計 $\delta_{max} + \delta_y$ (mm)	中央点 δ_{pmax} (mm)	支承からの はね出し δ_{py} (mm)	合計 $\delta_{pmax} + \delta_{py}$ (mm)	
400	1.36259	-0.30914	1.05345	0.17773	0.03843	0.21616	$M=10.46+1.50P+$ $N(1.0535 \times 10^{-3} + 0.21618 \times 10^{-3} P)$
600	0.59143	-0.13418	0.45725	0.03661	0.00792	0.04453	$M=22.05+1.50P+$ $N(0.45725 \times 10^{-3} + 0.04453 \times 10^{-3} P)$
800	0.89667	-0.15872	0.73795	0.02615	0.00438	0.03053	$M=60.77+2.00P+$ $N(0.73795 \times 10^{-3} + 0.03053 \times 10^{-3} P)$

表-6 設計モーメントと実測モーメントの比較

杭径 (mm)	長さ (m)	種類	軸力 (kN)	Mcr (kN)	Mcr' (kN·m)	Mcr'/Mcr	Mu (kN·m)	Mu' (kN·m)	Mu'/Mu
400	8	B	0	79.4	97.46	1.23	158.10	194.96	1.23
			600	122.6	167.04	1.36	226.10	277.81	1.23
			1200	166.2	217.78	1.31	265.20	320.98	1.21
600	8	B	0	255	286.05	1.12	469.70	544.05	1.16
			1300	400.5	517.39	1.29	707.50	922.07	1.30
			2600	545.8	688.77	1.26	855.00	1096.86	1.28
800	10	B	0	577.6	728.77	1.26	1118.90	1376.77	1.23
			2000	882.9	1222.30	1.38	1599.30	2027.10	1.27
			4000	1188.1	1699.10	1.43	1910.30	2213.60	1.16

3. 実験結果

(1) 曲げモーメントの算定

杭の重量 W (kN), 載荷荷重 P (kN) および軸力 N (kN) による曲げモーメント M (kN·m) は次の式で与えられる。

$$M = \frac{1}{8} W(2L_1 - L) + \frac{P}{4}(L_1 - 1) + N(\delta_w + \delta_p) \quad (1)$$

ここに, L_1 : 支持スパン長(m), L : 杭長(m), $\delta_w = \delta_{max} + \delta_y$ でこれらは杭の諸元を用いて計算される(図-4(a)参照)。また, $\delta_p = \delta_{pmax} + \delta_{py}$ である(図-4(b)参照)。

杭の諸元等を代入して, 実際に用いたモーメント算定式を表-5に示す。

(2) 曲げモーメント-たわみ関係

実験から得られた曲げモーメント-たわみ曲線を図-5に示す。図(a)は杭径400mm, 図(b)は600mm,

図(c)は800mmに対するものである。図中の変位とは、式(1)右辺の $(\delta_w + \delta_p)$ の相対たわみのことである。表-6に設計および実測モーメントの比較をクラック、破壊両方についてまとめて示す。

400mmの場合、最もたわみが大きい、すなわち変形性能が最も高いのは軸力が0の時である。軸力が圧縮側にも引張側にも大きくなると破壊時のたわみは小さくなっている。杭径600mmの場合には圧縮側の傾向は400mmの場合とほぼ同様であるが、引張側は異なっており、引張軸力が最も大きい場合に変形性能は最大になっている。800mmの場合は圧縮軸力だけであるが、その傾向は400mmの場合と同じである。

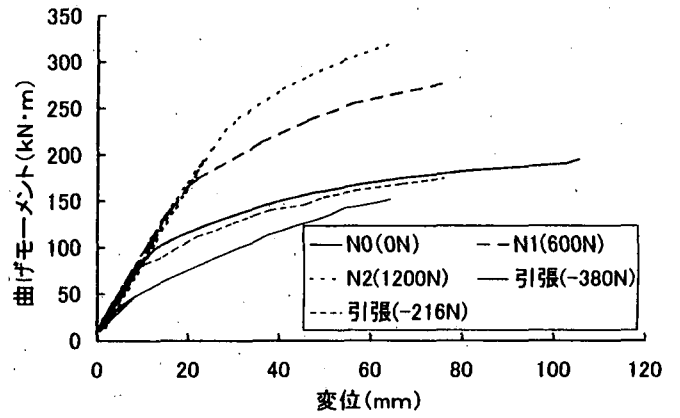
次に、杭径のちがいによる最大たわみの比較を軸力=0で比較すると、杭径400mmが約105mmで最も大きく、杭径800mmがそれより僅かに小さい約100mm、杭径600mmが最も小さく約65mmとなっている。そこで設計破壊モーメント195 kN-m, 544 kN-m, 1377 kN-mにおけるたわみを図-5から求めると、それぞれ47mm, 31mm, 35mmとなる。すなわちこの場合にも杭径600mmのたわみが最も小さくなるが、杭径800mmにおけるたわみとの差は実測破壊たわみほど大きくない。ちなみに、それぞれの杭径ごとの設計破壊モーメントに対応するたわみに対する実測のたわみの倍率は、2.2, 2.1, 2.9倍と、いずれも2倍以上である。

次に地震時に対応する短期の軸力N2について同様の検討をする。実測の破壊時のたわみは順に65.2mm, 49.5mm, 47.5mmである。これらに対して設計破壊モーメントに対するたわみはそれぞれ30.9mm, 27.8mm, 33.1mmである。実測たわみの倍率は2.1, 1.8, 1.4と軸力=0の時より小さく、しかも杭径が大きくなるほど小さい倍率になっている。

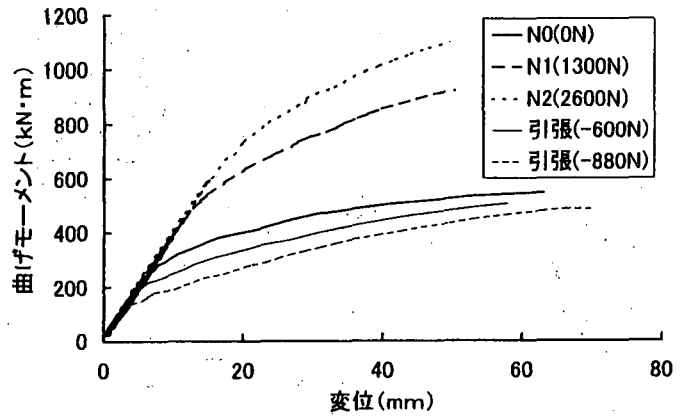
最後に引張軸力の大きい場合について同様の倍率を算出する。実測たわみは杭径400mm, 600mmそれぞれ76.0mm, 57.9mm。これに対して設計破壊モーメントに対応するたわみは15.5mm, 10.5mmである。従って倍率は4.9, 5.5であり、圧縮時に比べてかなり大きな値になっている。

(3) 曲げモーメント-回転角関係

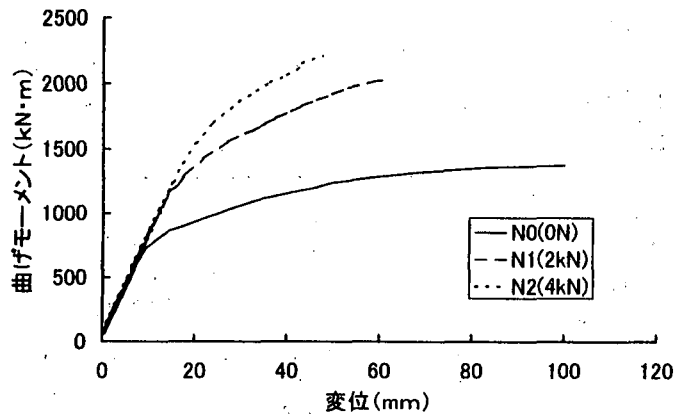
以上の実験結果を回転角(度/m)との関係にまとめたものが図-6である。図(a), (b), (c)の順に杭径400mm, 600mm, 800mmの結果である。この回転角は傾斜計から載荷点のほぼ直下(図-2参照)の回転角を直接測定して求めたものである。従ってこの回転角は載荷点近傍の値であり、スパン全



(a) 杭径 400mm



(b) 杭径 600mm

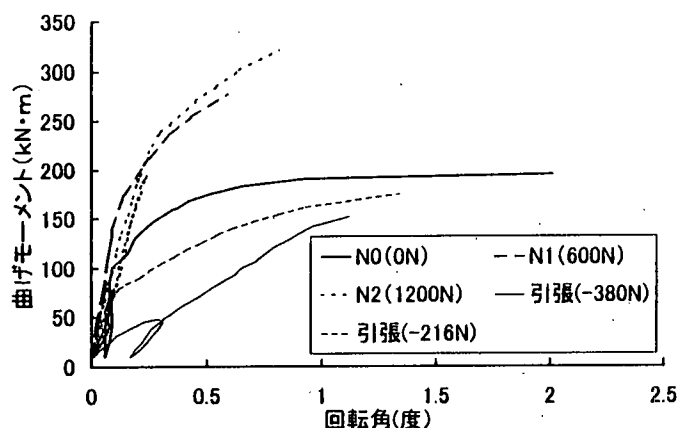


(c) 杭径 800mm

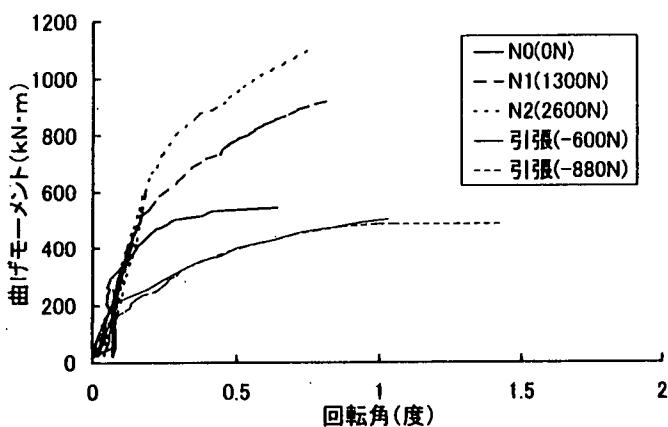
図-5 曲げモーメント-たわみ曲線

長にわたっての平均ではないことに注意を要する。

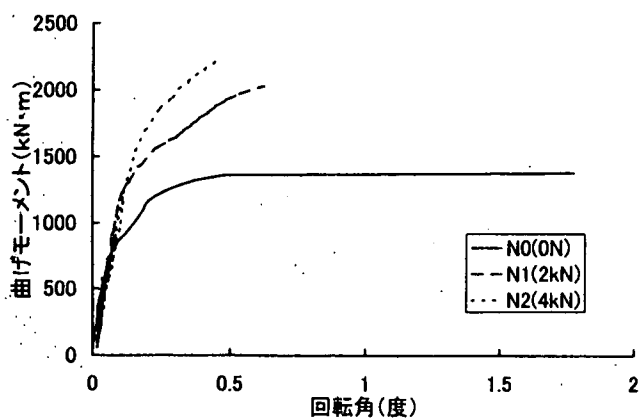
全項と同様に実測破壊時の回転角と設計破壊モーメント時の回転角を比較する。その結果を表-7にまとめて示す。これより、杭径800mmの軸力=0の場合が飛び抜けて大きな倍率になっていることが分かる。これは最後の測定時にPC鋼棒の破断する音が聞こえており、他の場合と破壊モードが異なつたため、すなわち、杭の曲げが載荷点直下に集中し



(a) 杭径 400mm



(b) 杭径 600mm



(c) 杭径 800mm

図-6 曲げモーメント-たわみ曲線

したためこのように回転角が大きくなったものと考えている。

表-6からも分かるとおり、実測破壊曲げモーメントは設計破壊曲げモーメントより約 20%程度大きくなっている。しかしながら 15%を越えると微妙な挙動を示し始める場合があり、最後の破壊時はかなり偶然性に作用される。従って設計破壊曲げモーメントに対応する変形に対する実測の変形の倍率

表-7 回転角の比較

杭径 (mm)	軸力 (kN)	設計終局 (度/m)	実測終局 (度/m)	倍率
400	0	0.35	2.01	5.7
	600	0.13	0.59	4.5
	1200	0.30	0.81	2.7
	-216	0.25	1.34	5.4
	-380	0.65	1.12	1.7
600	0	0.22	0.65	3.0
	1300	0.39	0.82	2.1
	2600	0.36	0.74	2.1
	-600	0.22	1.03	4.7
	-880	0.25	1.05	4.2
800	0	0.19	1.77	9.3
	2000	0.28	0.62	2.2
	4000	0.29	0.44	1.5

にはかなりばらつきがあり、注意を要する。

4. おわりに

本研究は杭基礎の限界状態設計を念頭に置いて、異なる軸力作用下における杭の破壊に至る過程を実験的に明らかにすることを試みたものである。実験は昨年 11 月から 12 月にかけて実施したものであり、本報告は取り急ぎとりまとめたデータをもとに、限られた範囲で検討した結果の報告に止まっているが、杭の破壊に至るまでの貴重なデータが得られたものと思っている。特に引張軸力下における破壊実験は非常に貴重なものと思われる。

今後はひずみ分布やクラックの進展等、破壊に至るプロセスを詳細に検討し、杭の破壊プロセスの軸力依存性を明らかにする予定である。そしてその結果を、杭の破壊過程のシミュレーションプログラムに導入できる形にまとめる予定である。また平成 12 年度以降の研究の参考にする予定である。

謝辞

本研究は科学技術振興調整費「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の研究費で実施したものである。研究の実施に当たっては、早稲田大学理工学部濱田政則教授、第 4 分科会委員各位、基礎研究班各位、さらに土木学会地震工学委員会・杭基礎耐震設計研究小委員会委員各位から貴重なご意見を頂いた。また実験の実施に当たっては(株)トーヨーアサノ社に全面的な協力を頂いた。特に浅井陽一氏には実験の全てにわたってお手伝いいただいた。これらの方々に深謝の意を表する次第である。