

軸力変動を考慮したRC杭の 非線形特性に関する実験的検討

西村友次¹・武田智吉²・嶋田昌義²・志村聡²・佐藤正行¹

¹ 正会員 東電設計株式会社 技術開発本部 (〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

² 正会員 東京電力株式会社 電力技術研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)

RC杭の復元力特性は杭の実挙動との比較によって十分に検証されているとは言い難く、特に変動軸力下の非線形特性は十分解明されていない。そこで、RC杭の復元力特性を把握することを目的とし、特にせん断力の影響を廃した状態の純曲げ載荷試験を実施した。載荷試験は $\phi 500$ のRC杭の試験体を用いて一定軸力(3ケース)および変動軸力(2ケース)の場合について実施し、無次元化した平均曲率 $\phi \cdot D$ が6.0%となるまで正負交番載荷を行った。変動軸力下の試験の場合には、載荷軸力は載荷する曲げモーメントと比例関係となるように設定した。実験結果から、RC杭の一定軸力下および変動軸力下の復元力特性について検討した。

Key Words : pile, cyclic loading test, variable axial force

1. はじめに

高レベル地震動に対する杭基礎構造物の動的な挙動を、地盤および構造物の非線形性を考慮した動的解析により検討を行うには、杭の復元力特性をモデル化する必要がある。この際、一定軸力下における曲げモーメントと曲率の関係($M-\phi$ 関係)で杭体の非線形性を考慮し、杭の物性を設定することが多い。

しかし、実際には、上部構造物の転倒モーメントにより杭の軸力が変動し、杭の挙動に影響を及ぼすことが考えられる。このような変動軸力下の杭の非線形特性は十分に解明されているとは言い難い。

そこで本検討では、RC杭の復元力特性を得ることを目的とし、特にせん断力の影響を廃した状態の純曲げ載荷試験を一定軸力下および変動軸力下において実施した。

2. 実験方法

$\phi 1200\text{mm}$ のの変圧器基礎のRC杭を実物と想定し、実験設備の制約から、1/2.4の縮小モデル

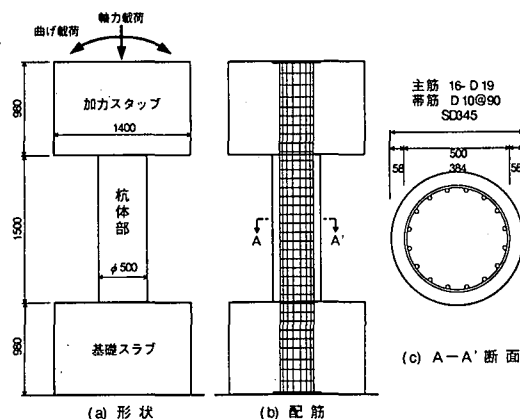


図-1 載荷試験に用いた試験体

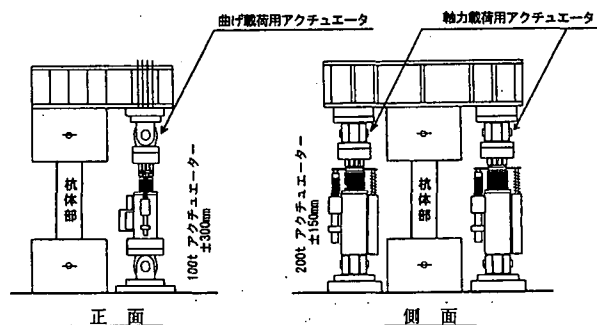


図-2 載荷試験に用いた加力装置

となるφ500の試験体を用いた。載荷試験に用いた試験体を図-1に示す。試験体は、杭体部に直接曲げモーメントを作用させるために、杭体部の上下に加力スタップと基礎スラブを取り付けた構造となっている。載荷方法は、図-2の加力装置に示すように、試験体の両脇にある2本の軸力載荷用アクチュエータにより試験体に軸力を導入しながら、試験体から1.5m離れた位置にある曲げ載荷用アクチュエータにより試験体に曲げモーメントを与えた。

加力サイクルは、杭全長の平均曲率φに杭の外径Dを乗じた無次元化曲率φ・D（以下この報告では単に曲率と呼ぶ）で制御を行い、載荷装置の限界である6.0%までの、全部で13サイクルとした。加力サイクルの概念図を図-3に示す。実験における測定・観察項目および試験体1体あたりの測定点数を表-1に示す。

3. 実験ケース

実験は、一定軸力下の載荷試験を3体、変動軸力下の載荷試験を2体の計5体の試験体について行った。一定軸力下の実験ケースを表-2に、変動軸力下の実験ケースを表-3に示す。

一定軸力下の載荷試験における最大軸力の設定にあたっては、軸力の変化が実験結果に大きく影響するように、考え得る範囲で最大級の軸力を考慮することとした。具体的には、杭先端支持地盤（N値50程度の地盤を想定）の極限支持力を算出し、高軸力の実験ケースの軸力として150tfを設定した。

変動軸力下の載荷試験では、変動軸力(N)は載荷する曲げモーメント(M)と比例関係となるように設定した。表-3中で、ケース4におけるM=0の時のN=20(tf)は、実杭（φ1200mmのRC杭）の常時圧縮応力と同じ値となるよう設定した軸力であり、比例定数の1.5は杭、上部構造及び地盤を考慮した動的解析（等価線形解析）によって杭に発生した軸力と曲げモーメントの関係から設定した値である。Nb.5試験体ではNb.4試験体の2倍の軸力変動に関する比例関係を考慮した。

3. 実験結果

(1)一定軸力下の実験結果

図-4はケース1～ケース3のモーメントMと曲率φ・D（杭全長の平均曲率φに杭の外径Dを乗じた無次元化曲率）の履歴曲線、およびその包絡線に目視によるひび割れ発生時(Mcr)、鉄筋のひずみゲージの計測による主筋の降伏時(My)および目視に

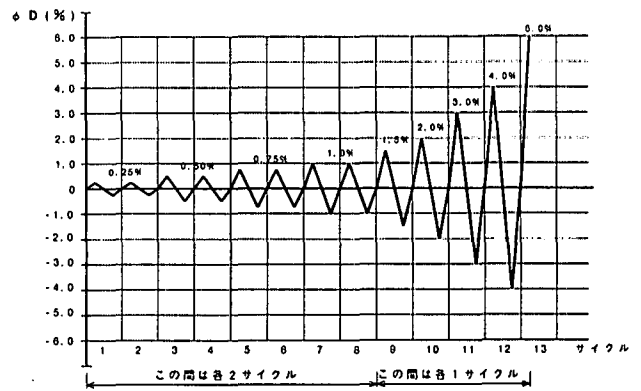


図-3 加力サイクルの概念図

表-1 測定・観察項目および測定点数

対象	計測・観察項目	使用センサー	計測点数
アクチュエータ	荷重	内蔵ロードセル	3
	変形量	内蔵変位計	3
杭体の変形	水平変位	変位計	3
	たわみ	変位計	3
	軸方向変位	変位計	4
	各部（3分割）軸方向変位（曲率測定）	変位計	6
	平均曲率（アクチュエータ制御用）	変位計	2
鉄筋ひずみ	主筋ひずみ	ひずみゲージ	31
	帯鉄筋ひずみ	ひずみゲージ	5
杭体ひび割れ	ひび割れ分布	（目視）	—
	ひび割れ幅	（目視）	—
破壊状況	コンクリートの剥離	（目視）	—
	主筋の屈曲	（目視）	—

表-2 一定軸力下の実験ケース

	軸 力 (tf)	
	試験体 (φ 500)	実 杭 (φ 1200)
ケース1(低 軸 力)	0	0
ケース2(中間軸力)	75	約 430
ケース3(高 軸 力)	150	約 860

表-3 変動軸力下の実験ケース

	曲げモーメントと軸力の関係 (N:tf, M:tf・m)	
	試験体 (φ 500)	実 杭 (φ 1200)
ケース 4	N = 1.5M + 20.0	N = 0.625M + 115.2
ケース 5	N = 3.0M + 20.0	N = 1.25M + 115.2

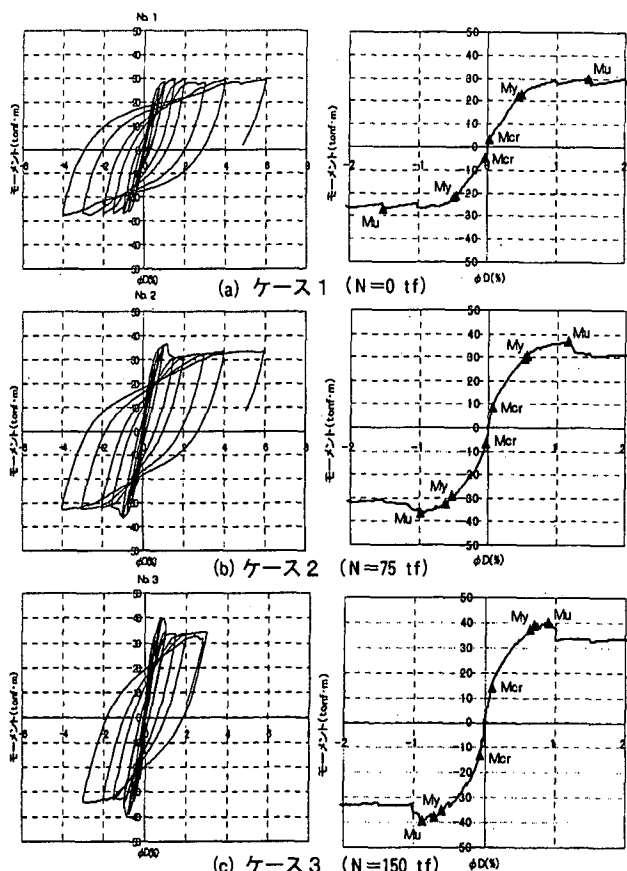


図-4 一定軸力下の $M \sim \phi \cdot D$ の履歴と包絡線

よるかぶりコンクリートの圧壊時 (M_u) を併せて示したものである。いずれの試験体も第1サイクル ($\phi D = \pm 0.25\%$) で曲げひびわれが発生し、かぶりコンクリートの圧壊が生じる直前で耐力がほぼピークを迎えている。ケース2 ($N=75\text{tf}$) およびケース3 ($N=150\text{tf}$) では、 ϕD が 1.0% 前後でかぶりコンクリート部の剥落により耐力が一度急激に低下するものの、それ以降は最終の13サイクル (ケース3は都合により12サイクル) まで耐力を概ね維持している。また軸力の値が大きいく、鉄筋降伏～耐力のピーク～かぶりコンクリート剥落の発生する各区間の曲率差が小さくなる傾向を示している。

以上の結果から、一定軸力下におけるRC杭の曲げ載荷による履歴特性を把握することができた。

(2) 変動軸力下の実験結果

ケース4及びケース5の $M \sim \phi \cdot D$ の履歴曲線を図-5に示す。履歴曲線は、ほぼ原点を中心とした点対称のループとなる一定軸力下の試験結果とは異なり、非対称のループ形状を示していることが分かる。ケース4及びケース5の最大・最小曲げモーメント及びこの曲げモーメントが作用した時の最大・最小軸力を表-4に示す。

図-6は、ケース4及びケース5の $M \sim \phi \cdot D$ 履

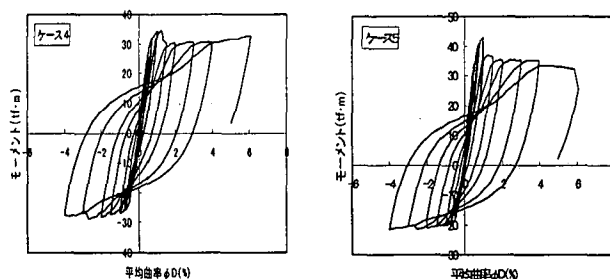


図-5 変動軸力下の $M \sim \phi \cdot D$ の履歴

表-4 変動軸力下の最大・最小曲げモーメントおよびこのときの最大・最小軸力

		曲げモーメント (tf·m)	軸力 (tf)
ケース4	最大	32.9	69.4
	最小	-28.6	-22.9
ケース5	最大	41.1	143.2
	最小	-21.8	-45.3

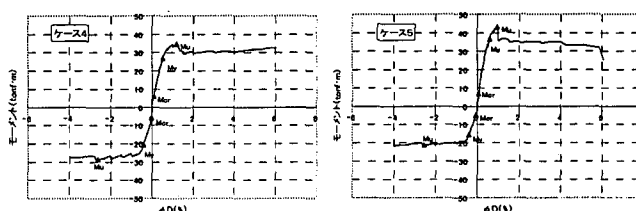


図-6 変動軸力下の $M \sim \phi \cdot D$ の履歴と包絡線

歴の包絡線に目視によるひび割れ発生時 (M_r)、鉄筋のひずみゲージの計測による端部主筋の降伏時 (M_y)、及び目視による被りコンクリートの圧壊時 (M_u) を併せて示したものである。ケース4 (図-5 (a)) の試験結果によると、軸力増大側では $M_y=26.9\text{tf}\cdot\text{m}$ 、 $M_u=34.5\text{tf}\cdot\text{m}$ となっており、ともに軸力減少時の $M_y=20.7\text{tf}$ 、 $M_u=28.8\text{tf}$ よりも大きく、軸力の増大により大きな耐力を発揮することが分かる。しかし、正負それぞれの最大曲げモーメント (M) のときの曲率に着目すると、軸力増大時には $\phi \cdot D=1.20$ であるのに対して軸力減少時には $\phi \cdot D=2.62$ となっており、軸力減少時には大きな変形性能を発揮することが分かる。また、軸力変動の激しい No.5 では、正負の最大曲げモーメントの絶対値の差が大きく、圧縮時よりも引張時の方が大きな変形性能を発揮する傾向がさらに強まっている。

図-7は、一定軸力の実験結果も含めたケース1～ケース5の $M \sim \phi \cdot D$ 履歴の包絡線を比較したものである。ケース4におけるの軸力増大側の最大モーメント発揮付近の形状はケース2の包絡線に近似した形状をしており、軸力減少側ではケース1の包絡線に似た形状をしている。ケース5では、軸力増大側はケース3の包絡線に近似した形状をしており、軸力減少側ではケース1の包絡線を20%程度下回

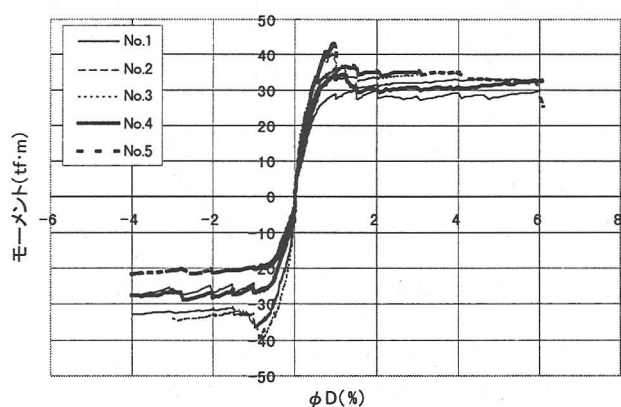


図-7 ケース1～ケース5のM～ $\phi \cdot D$ 包絡線の比較

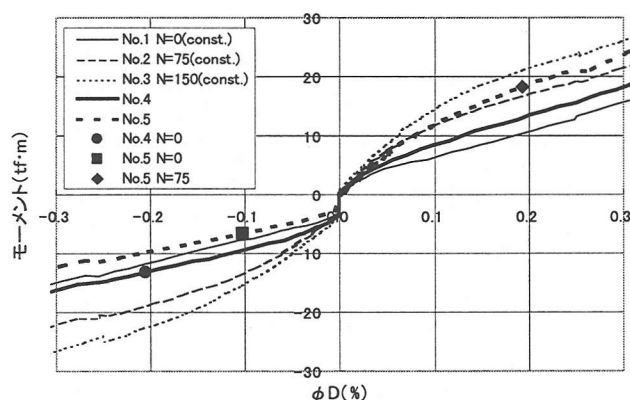


図-8 ケース1～ケース5のM～ $\phi \cdot D$ 包絡線の比較
($\phi \cdot D = \pm 0.3$ の範囲の拡大図)

る結果となっている。これは、杭の特性が表-4に示した最大モーメント発揮時の変動軸力の値に対応しているためと考えられる。

図-8は、図-7における $\phi \cdot D = \pm 0.3$ の範囲の拡大図であり、図中には、ケース4の $N=0$ 時のM～ $\phi \cdot D$ 関係、及びケース5の $N=0$ 、 $N=75\text{tf}$ 時のM～ $\phi \cdot D$ 関係をプロットしている。ケース5の結果から、軸力の変化に伴い、その時点の軸力にはほぼ対応した軸力一定の試験結果による曲線と交差してM～ $\phi \cdot D$ 関係が変化している、すなわち、曲率が負の領域では最も小さな絶対値を示しているケース5のモーメントが、曲率が正側へ移行した段階でケース3の曲線を、また、 $\phi \cdot D = 0.1$ 近くになるとケース2の曲線を追い越し、曲率の増加に伴って、曲げモーメントが次第に大きくなっていることが分かる。

試験体の破壊状況を写真-1に示す。

4. まとめ

- ・ 曲げモーメントー曲率の履歴は、一定軸力下の試験結果では原点を中心とした点対称となるのに対して、曲げモーメントに連動して軸力を変

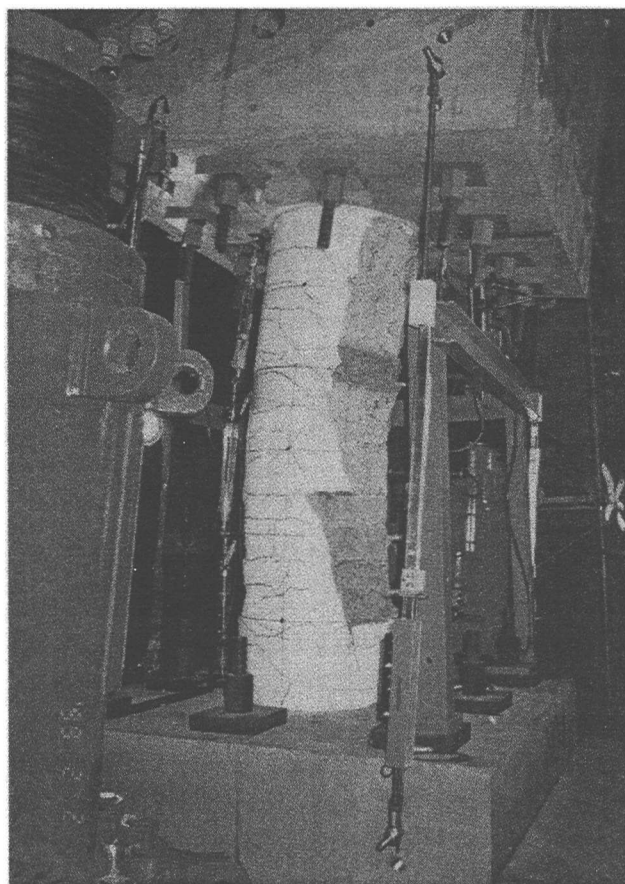


写真-1 ケース4の試験体の破壊状況

動させたケースでは非対称のループ形状となる。

- ・ 軸力増大時には曲げ耐力が大きくなり変形性能は低下するのに対して軸力減少時には曲げ耐力が減少市大きな変形性能を発揮することがわかった。
- ・ 軸力の変化に伴い、その時点の軸力にはほぼ対応した軸力一定の試験結果による骨格曲線と交差しながら、曲げモーメントと曲率の関係が変化している現象を把握することができた。

謝辞：本実験の実施に当たり、多大なご協力をいただいた、ハザマ技術研究所の坂田英一氏他関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 「酒向、宮本、池田、杭の軸力変動を考慮した杭基礎の地震応答、日本建築学会学術講演梗概集, pp. 375-376, 1998
- 2) 「棚村、近藤ら、高強度せん断補強筋を用いた場所打ち杭コンクリート杭の水平載荷試験（その2；軸力変動での試験結果）、土木学会第53回年次学術講演会, pp. 200-201, 1998