

論文 地盤中における鉄筋コンクリート杭の水平復元力特性に関する研究

牧 剛史^{*1}・睦好宏史^{*2}・佐々木満範^{*3}

要旨: 鉄筋コンクリート構造物の耐震評価手法の確立を将来に見据え、特に RC 杭-地盤系の水平挙動を明らかにするために、模擬地盤および模型杭を用いた静的正負交番載荷試験および動的正弦波載荷試験を行った。今回の実験条件下では、杭頭における水平復元力特性は杭体と地盤剛性の相対関係に依存すること、動的載荷時には杭体降伏後に復元力が低下すること等が明らかとなった。

キーワード: 鉄筋コンクリート杭, 乾燥砂地盤, 復元力特性, 曲率最大点深さ

1. はじめに

兵庫県南部地震が発生してから5年間、様々な実務者や研究者の手によって、被災構造物の損傷分析および原因の特定が行われてきた。その成果や結果には、地盤や基礎の応答や損傷が地上構造物の応答に少なからず影響を及ぼすことを示唆するものも見受けられる。特に現行の道路橋設計においては、橋脚の保有水平耐力を上回る水平耐力を基礎に与えるといった手法により設計が行われている¹⁾が、実現象として基礎の応答が橋脚応答に影響を及ぼす場合、橋脚と基礎を別個に考えるのではなく、全体を一つの系としてこの全体系応答を正確に評価しうる手法が必要となると考えられる。本研究は以上の点を将来に見据え、地盤中における RC 杭が杭頭部で水平荷重を受ける際の復元力特性について、正負交番載荷および動的載荷試験による検討を行ったものである。

杭の水平載荷試験およびそれに付随する解析的な研究は、特に 1960 年代後半から 1970 年代にかけて盛んに行われてきた^{2),3)}が、それらの大部分が鋼管杭等の弾性杭を想定したものであり、RC 杭を対象とした実験は希少である^{4),5)}。よって、本研究で行った実験結果は今後、基礎-地盤間の相互作用を明らかにするための貴重

な基礎的データと成り得ると考えられる。著者らは以前にも同様の試験を行っており、本論文は一部既発表⁶⁾のデータも用いて杭頭における復元力特性という観点から結果を整理したものである。

2. 実験概要

2.1 実験システムと実験ケース

実験で用いたシステムを図-1に示す。鋼製土槽中に模型杭試験体を固定し、気乾状態の岐阜砂を充填することにより模型地盤を作成した。地盤条件が緩づめの試験ケースでは、バケットを用いて一定高さから砂を自由落下させることにより充填を行い、密づめのケースでは 30cm 程度の厚さごとに 30cm 角のコンクリートブロックを用いて締め固めを行った。杭頭部は回転自由としてアクチュエータにより水平載荷を行い、試験体表面および軸方向鉄筋に貼り付けたひずみゲージと土圧計により杭体の変形および地盤反力を測定した。

実験要因は、杭体の断面形状(矩形,円形)、地盤の締め固め状態、載荷方法とし、鋼製杭 4 ケース、RC 杭 8 ケースの計 12 ケースの載荷試験を行った。各実験ケースを表-1に示す。各試験体断面図を図-2に示す。各 RC 試験体と

*1 埼玉大学助手 工学部建設工学科 工修(正会員)

*2 埼玉大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

*3 埼玉大学大学院 理工学研究科建設工学専攻

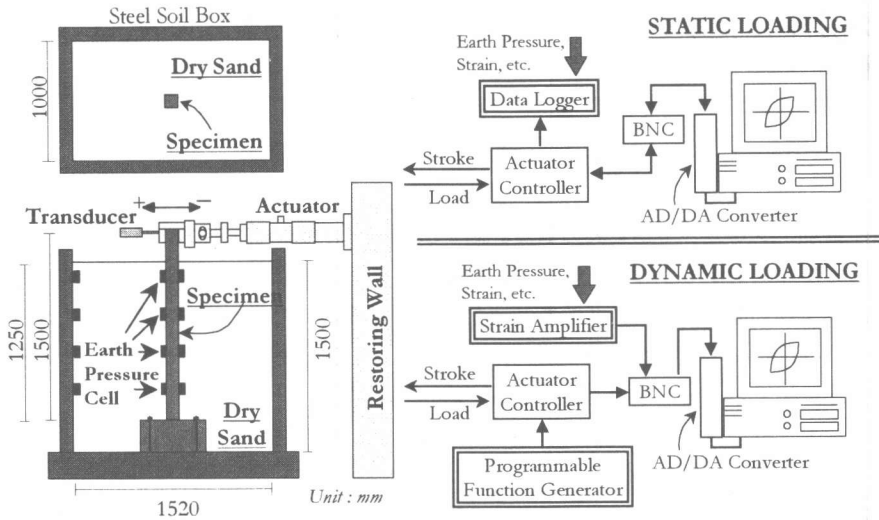


図-1 荷重実験システム概要図

も、せん断補強筋として $\phi 3.2\text{mm}$ の丸鋼を10cm間隔で配置している。なお、全ケース中No.5~No.7およびNo.10の計4ケースは著者が昨年度行った試験(既発表⁶⁾)であることを注記しておくとともに、本論文においてはRC杭の試験結果のみについて報告し、鋼製杭の試験結果については別報により報告する。

2.2 荷重方法

表-1に示したように、今回は静的荷重および動的正弦波荷重を行っている。静的荷重時は図-1に示すように、コンピュータからストローク制御信号を発生し、フィードバック変位と荷重および測定データをデータロガーに取り込んでいる。図-3(a)に静的正負交番荷重時の制御変位を示す。各振幅1サイクルとし、振幅は5mmピッチまたは10mmピッチで変化させている。動的荷重時は波形作成装置(Programmable Function Generator)から0.002秒間隔で波形信号を発信し、得られた測定データを動ひずみ計を介してコンピュータへ取り込んでいる。図-3(b)に動的正弦波荷重時の制御変位を示す。各振幅10サイクルの繰り返し荷重とし、振幅は10mmピッチで変化させている。また、RC構造物および地盤表面における速度応答スペクトルが一般的な周期帯でほぼ一定値となる⁷⁾ことか

表-1 試験ケース一覧

No.	材質	鉄筋	形状	地盤	荷重条件	記号	
1	Steel	---	矩形	緩づめ	正負交番A	STR-L-R	
2					正負交番A	STR-D-R	
3					動的正弦波	STR-D-D	
4			円形	緩づめ	正負交番A	STC-D-R	
5	RC	D6	矩形	なし	一方向単調	RCR-N-M	
6					一方向単調	RCR-L-M	
7					正負交番B	RCR-L-R	
8					正負交番A	RCR-D-R	
9			動的正弦波	RCR-D-D			
10			D10	緩づめ	正負交番B	RCR2-L-R	
11			D6	円形	緩づめ	正負交番A	RCC-D-R
12						動的正弦波	RCC-D-D

緩づめ： 相対密度 $D_r = 57.4\%$ 程度
 密づめ： 相対密度 $D_r = 72.6 \sim 80.4\%$ 程度

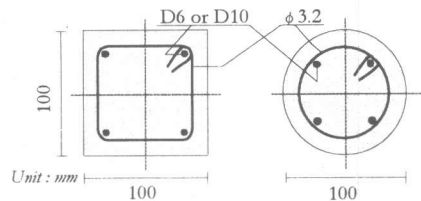


図-2 RC試験体断面諸元

ら、荷重周波数は最大荷重速度が各振幅間で一定値(20kine)となるように設定した。振幅と周波数の関係を表-2に示す。

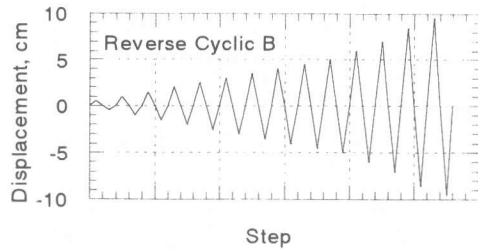
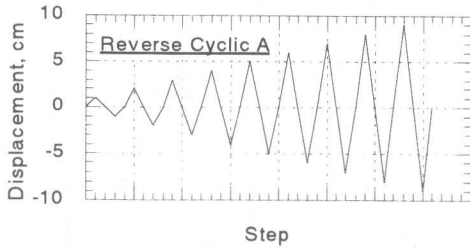


図-3(a) 静的載荷における制御変位

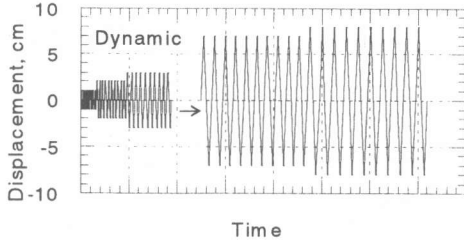


図-3(b) 動的載荷における制御変位

表-2 各振幅における設定周波数

Amplitude (cm)							
1	2	3	4	5	6	7	8
3.183	1.592	1.061	0.796	0.637	0.531	0.455	0.398

(Hz)

表-3 静的試験4ケースの相対剛性比順位

	杭剛性	地盤剛性	杭/地盤剛性比順位
RCR2-L-R	高	低	1
RCR-L-R	中	低	2
RCR-D-R	中	高	3
RCC-D-R	低	高	4

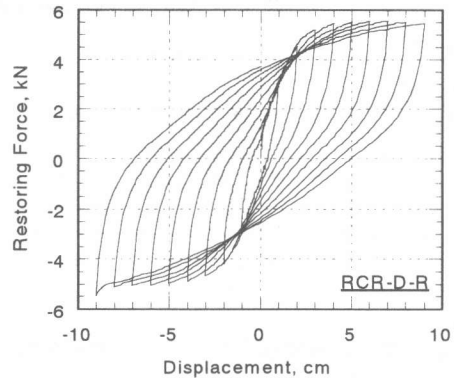


図-4 復元力-変位関係の履歴曲線

3. 静的正負交番載荷実験結果

3.1 復元力-変位関係

既往の研究⁶⁾により、RC杭-地盤系の挙動は杭体と地盤の相対剛性比に依存すると考えられることから、静的載荷を行った4ケースに対して相対剛性比の順位付けを行った結果を表-3に示す。本来は相対剛性を具体的なパラメータで表すことが望ましいのであるが、現時点で適したパラメータが定義されていないため、今回は以上のような順位によって相対剛性を評価する。以下、定義した相対剛性比の順位を単に相対剛性と呼び、順位の高いケースほど相対剛性が大きいものとする。

RC試験体を用いて静的載荷を行った全試験ケース(No.7, 8, 10, 11)のうちRCR-D-R(No.8)

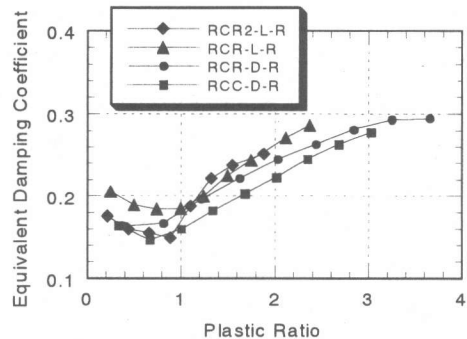


図-5 等価減衰係数の変化

における変位関係の履歴曲線を図-4に示す。既報⁶⁾における復元力-変位関係(RCR-L-R(No.7))と同様、除荷時に急激に荷重が低下し、

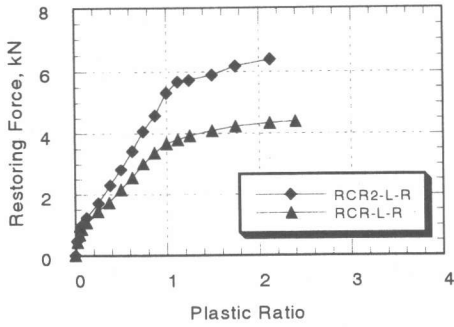


図-6(a) 復元力-変位関係の骨格曲線
(緩づめ地盤)

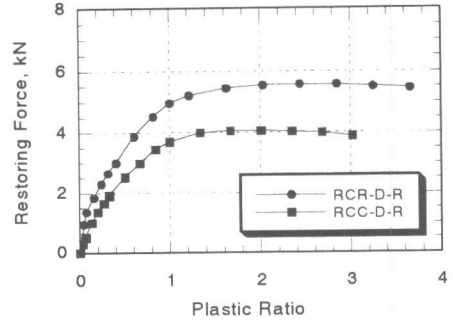


図-6(b) 復元力-変位関係の骨格曲線
(密づめ地盤)

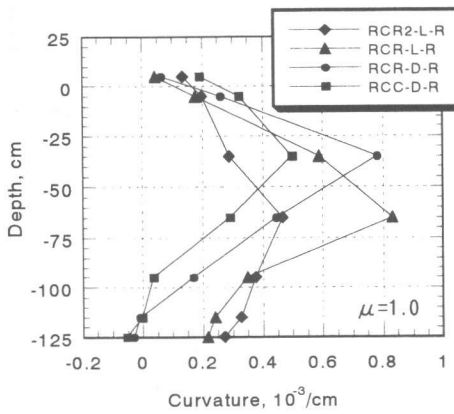


図-7 杭体降伏時の深さ方向曲率分布

最大変位の 1/2 程度の残留変位を生じつつ、大きなヒステリシスを描くことが観察される。他の試験ケースにおいても同様の履歴曲線が得られた。図-5は各ケースの履歴ループから算定した等価減衰定数を各試験体の塑性率に対してプロットしたものである。ここで、塑性率は振幅を各試験体の降伏変位で除した値として定義した。また、降伏変位は降伏前および降伏後の骨格曲線をそれぞれ直線近似したときの交点における変位として算定している。等価減衰について、試験体間で最大約 5%程度の差が見受けられる。この結果から、砂地盤を締め固めたケースの方が小さな履歴減衰を示しており、杭体の剛性が小さいものほどやはり減衰は小さくなっていることが分かる。つまり、杭-地盤系の履歴減衰は系の相対剛性の増加とともに大きく

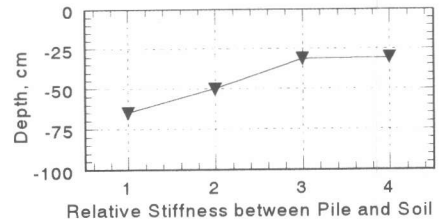


図-8 曲率最大点深さと相対剛性の関係

なると言える。

図-6(a),(b)は各ケースの復元力-変位関係の骨格曲線を示している。各ケースによって最大塑性率が異なるのは、アクチュエータの最大ストロークと試験体の降伏変位との関係によるものである。地盤の締め固め状態の相違によって杭体降伏後の荷重増加傾向に違いが見受けられるが、この差が地盤条件に起因するのか、塑性率の違いによるものかは明確ではない。

3.2 杭体の変形と曲率最大点位置

図-7に各ケースの降伏時(塑性率 $\mu=1$)における杭体の深さ方向曲率分布を示す。曲率は軸方向鉄筋に貼付したひずみゲージの値から算定したものである。緩づめ地盤の2ケースでは曲率最大点が深さ 50~80cm 付近に位置しているのに対し、密づめ地盤のケースでは深さ 20~50cm 付近に位置していると予想される。また、RCR-L-R と RCR2-L-R, RCR-D-R と RCC-D-R を比較すると、杭体剛性が大きいケース(RCR2-L-R および RCR-D-R)では、曲率分布が下方へ拡大する傾向が見られる。測定点数が

少ないためにデータ上は曲率最大点の移動が見られないものの、実際には曲率分布の下方への遷移に伴って曲率最大点も下方へ移動していると考えられる。密づめ地盤の2ケースでは深さ100~115cm付近で曲率が0となっている点が見られるが、これも曲率最大点の移動に起因している。以上をふまえた上で、各試験体の曲率最大点の変化を図-8に示す。ただし、ここで用いる最大点深さは曲率分布から求めたものではなく、試験後の試験体で観察して最も損傷の大きい位置を曲率最大点としている。この図より、杭と地盤の相対剛性の増加と共に曲率最大点が上昇するのが明らかである。

4. 動的正弦波載荷実験結果

4.1 試験体の損傷状況

本研究で行った動的載荷実験は載荷速度および繰り返し荷重が杭-地盤系の水平復元力特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的としたものであり、前節で述べた静的載荷実験における試験体と全く同等のRC試験体2体(矩形および円形)を用いて行った。本章では矩形試験体(RCR-D-D)の結果に限定して静的実験と比較しながら考察するが、以下述べることは円形試験体(RCC-D-D)の場合もほぼ同様の結果が得られている。

試験体の損傷状況について、正負交番載荷試験4ケースではいずれも試験体の終局には至らなかったのに対し、動的試験の2ケースはいずれも静的載荷と同等の変位レベル内で軸方向鉄筋が破断するに至った。動的載荷後の試験体損傷状況を図-9に示す。このように静的載荷と動的載荷で損傷状態が異なった要因については、次節以降で考察する。

4.2 復元力-変位関係

動的正弦波載荷実験における復元力-変位関係の骨格曲線を静的載荷時の曲線と併せて図-10に示す。杭体が降伏するまでは両載荷試験結果に違いは見られないが、降伏後は明確に復元力の低下が見られ、振幅6cmを過ぎたとこ

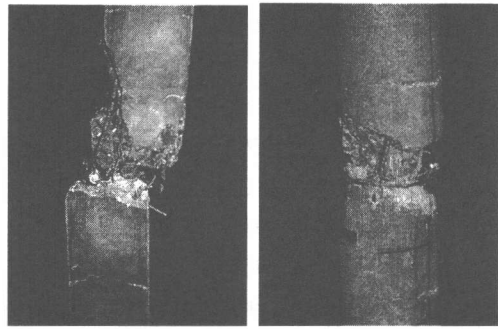


図-9 動的試験体の損傷状況

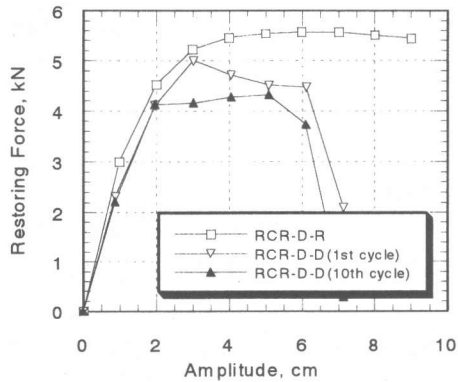


図-10 復元力-変位関係の骨格曲線

ろで急激に荷重が低下している。弾性域(杭体降伏前)における復元力が静的、動的間でほとんど差がないこと、RC単体の復元力特性は本実験で設定した程度の載荷速度では、降伏荷重が若干増大する点を除けばそれほど大きな載荷速度依存性がない⁸⁾こと等から、本実験の範囲内ではRC杭-地盤系の復元力特性は載荷速度には依存しないと考えられる。その場合、降伏後の荷重低下の主たる要因は各振幅10サイクルずつの繰り返し載荷にあると考えられる。ばらつきはあるものの、10サイクルの繰り返し載荷によって約10~20%程度の荷重低下があることが、図-10から判断される。

4.2 杭体の変形

動的載荷実験における杭体降伏時の深さ方向曲率分布を図-11に示す。図中には静的載荷実験の結果も併せて示した。動的1サイクル目において、静的載荷時とほとんど同等の曲率分

布を示しており、この点からも荷重速度による影響はほとんどないことが裏付けられる。しかし、10サイクル後(10回目に降伏変位に達した瞬間)の分布は、1サイクル目の分布に比べて全体的に曲率が低減されていることが分かる。これは繰り返し荷重により逆方向降伏変位を経由したために正側(荷重面側)、負側(変位方向側)両方の軸方向鉄筋ひずみが著しく増大したためと考えられる。実際、試験終了後の試験体を観察すると、損傷の大きな断面ではすでにほとんどのコンクリートが剥げ落ちており、軸方向鉄筋のみで接続されているような状態であった(図-9参照)。

5. まとめ

RC杭-地盤系の静的および動的荷重実験結果から得られた結論を以下に記して、本論文のまとめとする。

- 1) 杭体の損傷位置、つまり曲率最大点深さは杭体と地盤の相対剛性に依存し、これを定量化することによって、RC杭-地盤系の静的水平復元力特性を定量評価することが可能となると考えられる。
- 2) 動的荷重実験の結果から、本実験条件の範囲内においては荷重速度が復元力特性に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。
- 3) 動的荷重時には杭体降伏後に大きな復元力の低下が見られたが、これは繰り返し荷重に起因するものと考えられる。このことは、実構造の耐震評価においてはこの復元力低下を考慮する必要があることを示唆するものである。

謝辞

実験を手伝って頂いた高野光司君(元埼玉大学大学院生、現東日本旅客鉄道(株))、小泉秀之君、山田伝一郎君(現埼玉大学大学院生)、藤巻嘉和君(元埼玉大学卒論生、現新潟県庁)に感謝の意を表す。

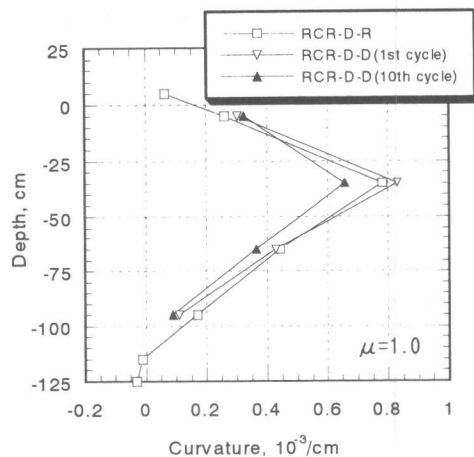


図-1.1 杭体降伏時の深さ方向曲率分布

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編およびV耐震設計編,(社)日本道路協会,1996.12
- 2) 後藤尚男,吉原 進,北浦 勝:乾燥砂中にある構造物基礎の水平復元力特性に関する実験的研究,土木学会論文報告集,第194号,pp.1-11,1971.10
- 3) 岸田英明,中井正一:地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗,日本建築学会論文報告集,第281号,pp.41-53,1979.7
- 4) 福井次郎,木村嘉富,大越盛幸,阪野 彰:砂地盤中における単杭の交番荷重試験,土木技術資料,Vol.40, No.3, pp.62-67,1998.3
- 5) 福田,土屋,山田他:大型せん断土槽での模型杭の水平荷重試験(その1~3),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.525-530,1997.9
- 6) 牧 剛史,睦好宏史:地盤中におけるRC杭の復元力特性に関する荷重実験および解析,JCI「コンクリート構造系の安全性評価」に関するシンポジウム論文集,pp.445-452,1999.9
- 7) 大崎順彦:新・地震動のスペクトル解析入門,鹿島出版会
- 8) 睦好宏史,町田篤彦:動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的挙動に関する研究,土木学会論文集,第354号/V-2,pp.81-90,1985.2