

杭体周囲の土圧が鉄筋コンクリート杭の 靱性能に及ぼす影響

牧 剛史¹・沖津 充紀²・中村 光寿³・睦好 宏史⁴

¹埼玉大学工学部建設工学科 助手 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

E-mail: maki@mtr.civil.saitama-u.ac.jp

²川崎市 川崎区役所 建設センター [元埼玉大学大学院] (〒210-0834 川崎市川崎区大島1-25-10)

³埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

E-mail: nakamura@mtr.civil.saitama-u.ac.jp

⁴埼玉大学工学部建設工学科 教授 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

E-mail: mutuyosi@mtr.civil.saitama-u.ac.jp

杭基礎と周辺地盤の影響を考慮した構造物全体系の耐震性能評価の観点からは、地盤中におけるRC杭基礎の塑性変形挙動を精度良く評価することが必要である。本研究はその一貫として、杭体周囲の土圧が及ぼす拘束効果について、実験的検討を行った。その結果、RC部材の軸方向鉄筋座屈やかぶりコンクリートの剥落挙動に影響を及ぼす拘束圧力は、正負の部材変形の間を通して作用していることによって発揮され、杭頭載荷実験のように杭体と地盤との間に空隙が生じるような条件下では、地盤の拘束効果は期待できないことが明らかとなった。

Key Words : reinforced concrete pile, confining soil pressure, plastic hinge, buckling of reinforcement, spalling of cover concrete

1. はじめに

近年の性能設計への移行に伴い、基礎と地盤を含めた構造物全体系の耐震性状を強非線形域まで予測できる手法の確立が求められ、基礎構造、特に杭基礎の非線形応答性状を精度良く評価する必要性が高まっている。2000年に土木学会から発刊された「土木構造物の耐震設計法に関する第3次提言と解説」においても、地上構造物の保有耐力上昇に伴って、従来の設計では基礎に非線形応答が生じる可能性が指摘されており[1]、2002年に改訂された土木学会コンクリート標準示方書耐震性能照査編においても、基礎-地盤系の非線形応答およびそれが地上構造物の応答に及ぼす影響を考慮するために、基盤波形入力による構造物全体系の地震応答解析を行うことが規定されている[2]。以上の背景を受けて、基礎の地震時挙動、特に杭基礎の地震時非線形応答を定量的に評価しようとする試みが、近年急速に増加しつつある[3][4]。特に、軸力部材である杭の高軸力下または変動軸力下における水平挙動などについての検討が行われている[5]。

RC杭体の塑性変形挙動に影響を及ぼす可能性のある項目の一つに、杭体が周辺地盤から受ける拘束圧が挙げられる。すなわち、杭体変形時に周囲から

受ける土圧作用によって、コンクリートの圧壊ひずみの増大やかぶりコンクリートの剥落・軸方向鉄筋の座屈性状に影響を及ぼす可能性がある。従来、杭基礎の水平挙動解析や性能照査においては、気中のRC部材に対する実験結果から決定される部材モデルが用いられている。これはあくまでも、地中RC部材の塑性変形挙動が、気中RC部材のそれと同じであるとの仮定の下で可能となる手法であるが、これについて詳細な検討を行った事例は稀少である。

そこで本研究では、杭体周囲の地盤から作用する土圧が、RC杭の塑性変形挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、実験的検討を行った。

2. RC梁の交番載荷実験

正負交番載荷を受けるRC部材の塑性ヒンジ部における周囲からの拘束圧力が、部材の靱性能に及ぼす影響を探ることを目的として、塑性ヒンジ部の周囲からの拘束度を変化させたRC梁の正負交番載荷実験を行った。本実験は図-1に示すように、地盤中におけるRC杭体に生じた塑性ヒンジ部に、周辺地盤から土圧が作用した状態を想定したものである。

(1) 実験概要および実験要因

本実験においては図-1に示すように、両端をヒンジ条件とした単純梁形式で荷重を行った。ヒンジの外側から、軸応力換算で2MPaの一定軸力を荷重した状態で、梁中央部に2点荷重による正負交番荷重実験を実施した。

本実験における実験要因を表-1に、実験で用いた試験体の配筋図を図-2にそれぞれ示す。梁の断面形状は一辺150mmの正方形断面とした。軸方向鉄筋はD6 (SD345) を8本、断面内で対角的となるように配置した。軸方向鉄筋から断面縁までの距離は15mmである。したがって、このRC梁のせん断スパン比 a/d は $900/135=6.67$ と、一般の梁に比べて非常に大きな値となっている。帯鉄筋にはD3 (SD295) を $S=75\text{mm}$ 間隔で配置した。なお、軸方向鉄筋の座屈が生じると予想される試験体中央区間では、帯鉄筋間隔を150mmとした。したがって、この区間における軸方向鉄筋径 D に対する帯鉄筋間隔 S の比 S/D は

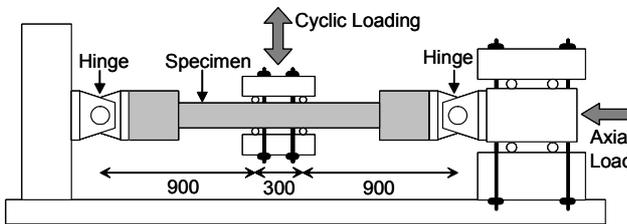


図-1 RC 梁の正負交番荷重実験

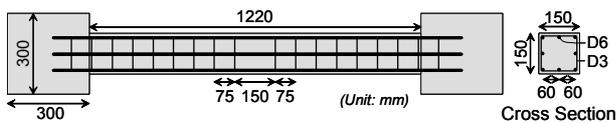


図-2 RC 梁試験体

表-1 実験ケース

Case	Cross Section (mm)	Long. Reinf. Ratio (%)	Effective Depth (mm)	Lateral Reinf. Spacing (mm)	Confinement Type
A-1	150	1.13	135	75	No Confinement
A-2	X	(8D6)			Styrol Wrapping
A-3	150				Rubber + External Rods

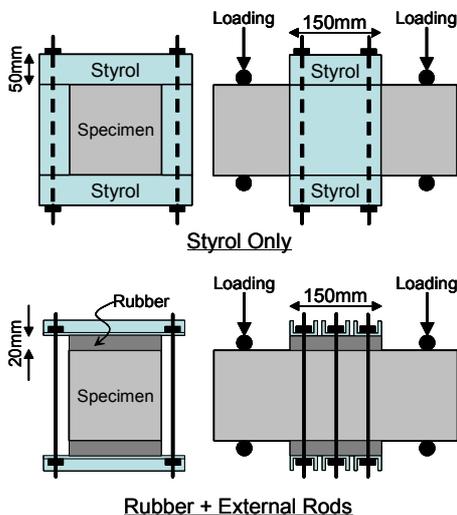


図-3 ヒンジ部の拘束タイプ

16.7とかなり大きめとなっている。コンクリートの圧縮強度は50-55MPa程度となっている。

塑性ヒンジ部（荷重点間）の拘束度は、巻き立てる材料を変えることによって変化させた。表-1に示したように、拘束タイプは無拘束、発泡スチロール巻き立て、ゴム板+ロッドの3パターンとした。拘束状態の概要図を図-3に示す。実際に生じるパッシブな拘束圧は、巻き立てた材料と試験体との間に小型圧力計を設置することによって計測している。なお、ゴム板+ロッドのケースでは、ロッド固定ネジの締付けを調整することによって、約200kPaの初期圧力を作用させた。

(2) 実験結果

鉛直荷重-梁中央変位関係の骨格曲線を図-4に示す。変位は降伏変位（いずれの試験体も6.8~7mm程度）で除した靱性率として表しており、荷重は軸

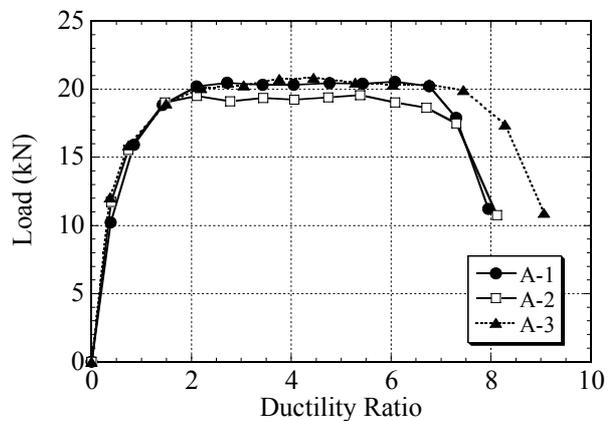


図-4 荷重-変位関係の骨格曲線

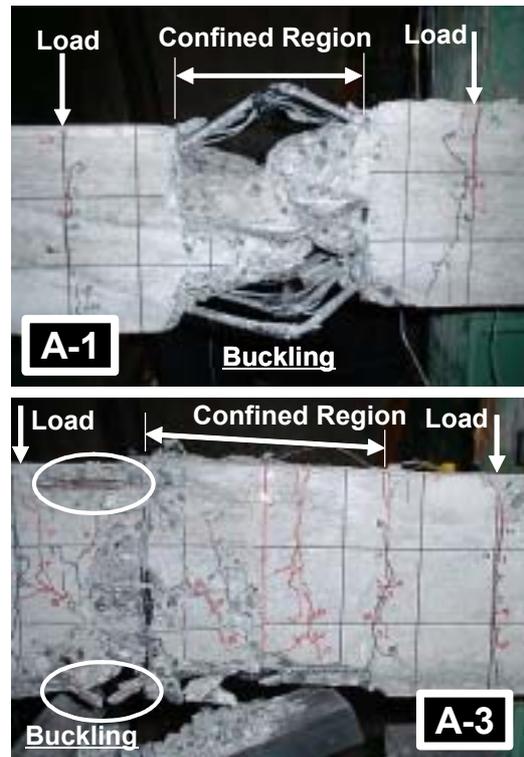


図-5 A-1 および A-3 試験体の破壊性状

力に伴うP-δ効果による荷重低下分を上乗せした値で示している。ゴム板+ロッドで拘束し、200kPaの初期圧力を与えたA-3で、靱性率が若干大きくなっている。A-1およびA-3試験体におけるヒンジ部の破壊性状を図-5に示す。A-3試験体においては、荷重点間の中央部、すなわち梁中央の帯鉄筋間隔150mmの区間に拘束を施したが、最終的には隣の帯鉄筋間隔75mm区間で軸方向鉄筋の座屈が生じ、耐力低下に至った。また、A-3における終局時の拘束圧は約300kPa程度であった。以上の結果から、200-300kPa程度の拘束圧によって、軸方向鉄筋の座屈やかぶりコンクリートの剥落を抑える効果があることが確認された。拘束圧レベルと靱性率向上との定量的な関係については、今後検討する余地がある。

3. 地盤中におけるRC杭の交番載荷実験

前章で述べたように、RC部材の塑性ヒンジ部に作用する拘束圧によって、部材自身の靱性率に影響を及ぼす可能性が確認された。しかしながら、地盤中では拘束圧の作用状態が、前章の実験ほど明確ではなく、またその拘束圧レベルも変動するものと考えられる。そこで、地盤中におけるRC杭に対して、杭頭水平荷重による交番載荷実験を行った。

(1) 実験概要および実験要因

実験セットアップの概要図を図-6に示す。壁面が剛な鋼製土槽中にRC杭試験体を設置し、湿潤状態の左官砂を用いて、十分に締め固めながら杭体周囲を満たし、模型地盤を作製した。模型地盤の間隙比は0.7程度であり、これは相対密度約80%程度に相当するものと想定される。地表面上に突出した杭頭部に、応力換算で2MPaの一定軸力を載荷した状態で、水平方向に強制変位による交番載荷を行った。杭体表面には小型土圧計を貼り付け、杭体に作用する圧

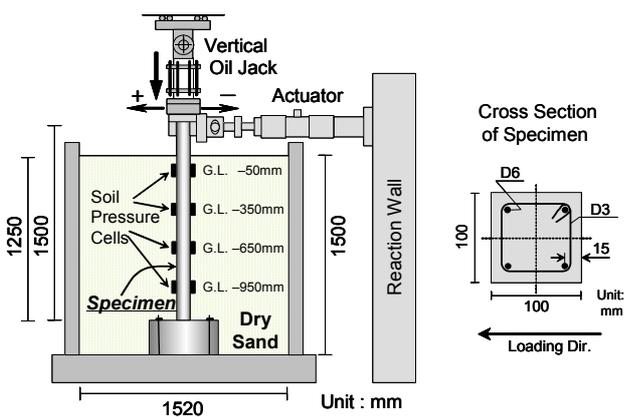


図-6 RC杭の交番載荷実験

表-2 実験ケース

Case	Cross Section	Loading Pattern	Amplitude Increment
P-1	100 X 100 mm	Reversed Cyclic	5 mm
P-2			15 mm
P-3		One-Side Cyclic	5 mm

力を測定した。RC杭試験体は図-6に示すように、一辺100mmの正方形断面とし、軸方向鉄筋にはD6鉄筋 (SD345) 4本を、断面縁までの距離15mmとして配置した。また、帯鉄筋にはD3鉄筋 (SD295) を100mm間隔で配置した。なお、コンクリートの圧縮強度は50-55MPa程度である。

試験ケースを表-2に示す。試験体および地盤条件は全ケースで同一とした。杭体に作用する土圧が変化するように、荷重経路を3種類に変化させた。正負交番載荷のケース (P-1, P-2) は振幅増分を5mmおよび15mmとし、P-3では振幅増分を5mmとして振幅60mmまで片振り交番載荷、その後65mm振幅からは正負交番載荷を行った。いずれの振幅も2回ずつの繰り返し載荷とした。

(2) 実験結果

各ケースにおける杭体の損傷状態を図-7に示す。いずれの試験体においても、G.L.-250mm付近において、大きなひび割れが観察されると共に、軸方向鉄筋の座屈およびかぶりコンクリートの剥落が見られた (図中の灰色の部分)。また、荷重中および荷重後には、杭体と周辺地盤との間に、杭体変形に伴う空隙が観察された。

杭頭荷重-変位関係の履歴曲線を図-8に示す。図中の点線は、塑性ヒンジが地表面から-250mmの位置に生じると仮定して算定された、P-δ効果に伴う水平荷重を表している。P-1は55mm振幅の2サイクル

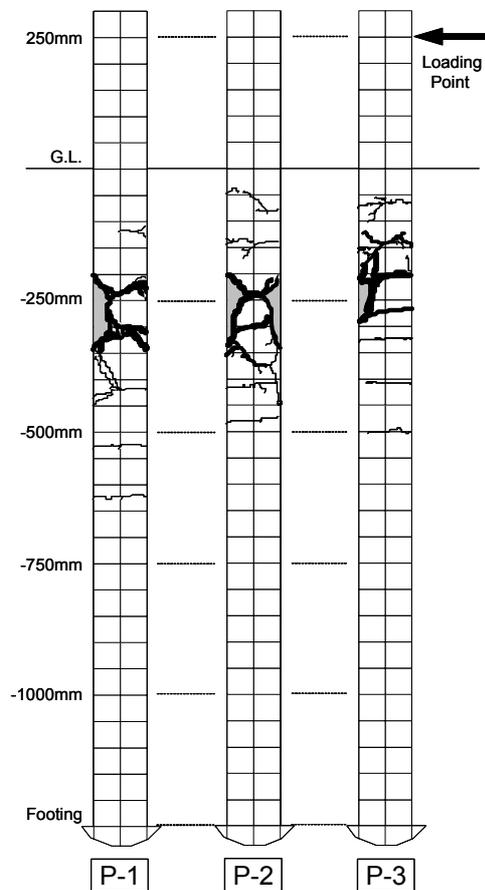


図-7 杭体の損傷状況

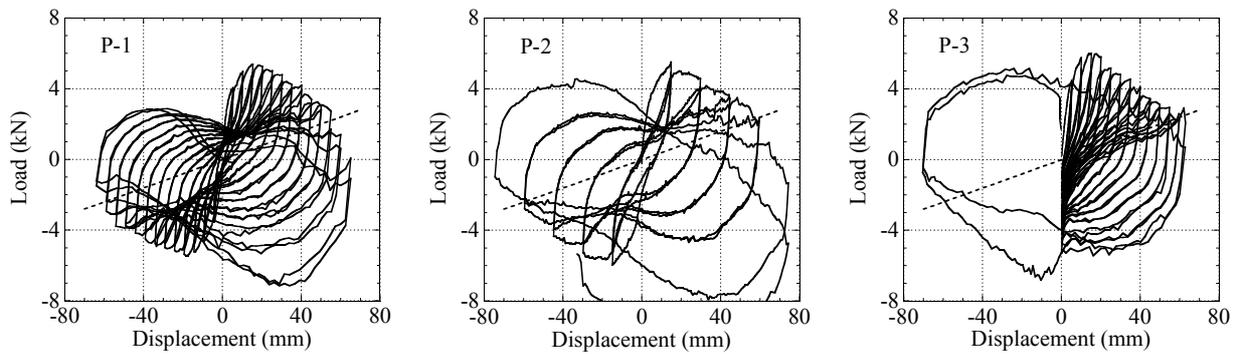


図-8 杭頭荷重—水平変位関係

ル目の途中で、P-2は60mm振幅の1サイクル目の途中で、それぞれ軸方向鉄筋の座屈が生じたものと推測される。また、P-3は片振り交番载荷終了後、65mm振幅の正負交番载荷2サイクル目途中で座屈が生じた。このように、軸方向鉄筋に座屈が生じる振幅には若干の違いが見られたものの、総じて载荷履歴による杭頭復元力特性の違いは、本実験からは確認されなかった。この理由として、軸方向鉄筋の座屈が生じた時の変位は、当該振幅の最大点ではなく、負側最大変位から正側最大変位へ向かう途中に生じており、この時には杭体と地盤との間に空隙が生じることによって、地盤による拘束圧が作用しなかったためと考えられる。

杭頭変位に対する作用土圧変化の骨格曲線を図-9に示す。ここでは塑性ヒンジ発生位置 (G.L.-250mm) を挟む2ヶ所の土圧測定結果を示している。ヒンジより浅い位置では土圧が単調増加、ヒンジよりも深い位置では杭体降伏後に土圧が低下していく傾向がある。軸方向鉄筋の座屈が発生したヒンジ位置における作用土圧を直接測定することは出来なかったが、これらの測定結果から、ヒンジ位置では各グループ最大変位時には200kPa程度の土圧が作用していることが推測される。ただし、座屈発生時点では土圧は作用してなかった可能性が高く、結果的に本実験で行ったような杭頭水平载荷のケースでは、周辺地盤からの土圧による拘束効果はそれほど期待できないものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、地盤中におけるRC杭の塑性変形挙動を評価することに主眼を置いて、RC梁試験体およびRC杭試験体の交番载荷実験を行い、塑性ヒンジ部に作用する圧力が及ぼす影響について実験的検討を行った。

ヒンジ部に拘束材を配置したRC梁の交番载荷においては、200-300kPa程度の拘束圧が作用することによって、軸方向鉄筋の座屈およびかぶりコンクリートの剥落挙動に影響を及ぼすことが明らかとなった。しかし、地盤中におけるRC杭の载荷実験においては、杭体と地盤との間に空隙が生じたため、周辺地盤からの作用土圧による変化は見られなかった。したがって今回のような杭頭载荷のケースでは、土

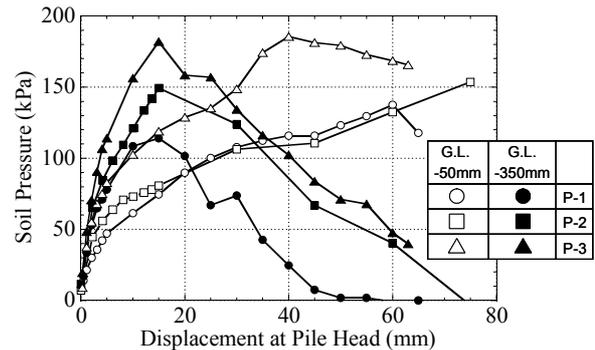


図-9 杭頭変位に伴う作用土圧の変化

圧による拘束効果は期待できないものと考えられる。

地盤変形を伴うモードに対しては、今後さらに検討を行う必要がある。また将来的には、時々刻々変化しながら杭体に作用する土圧を解析的に精度よく評価し、かつ杭体の部材特性に変動拘束圧の影響が取り込まれる、地震時における杭体の塑性変形挙動に及ぼす拘束効果を自動的に評価しうる解析手法を確立することが望ましいと言える。

謝辞: 本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) による、2002年度産業技術研究助成事業の助成を受けて実施されたことを付記する。

参考文献

- 1) 土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説, 土木学会, 1998.6
- 2) コンクリート標準示方書 耐震性能照査編, 土木学会, 2002.12
- 3) 例えば, 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载荷実験, 土木技術資料, Vol.40, No.3, pp.62-67, 1998.3.
- 4) 牧 剛史, 睦好宏史: 鉄筋コンクリート杭の水平復元力特性と変形性状に関する研究, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.103-118, 2001.8
- 5) 近藤政弘, 棚村史郎, 金森 真, 菅原 篤: 高軸力変動下における高強度せん断補強鉄筋を用いた模型杭の载荷試験, 杭基礎の耐震設計に関するシンポジウム論文集, pp.3-8, 2001.9

(2003. 10. 1受付)