

地盤中におけるRC杭の 復元力特性と変形性状に関する研究

牧 剛史¹・睦好 宏史²・高野 光司³

¹正会員 工修 埼玉大学助手 工学部建設工学科(〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255)

²正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科

³学生会員 埼玉大学大学院 理工学研究科建設工学専攻

本論文は、RC 杭基礎-地盤系の挙動が橋脚躯体および系全体の応答性状へ与える影響を評価する手法の確立を見据え、RC 杭-地盤系の復元力特性について実験的および解析的な検討を行っている。実験は標準砂を用いた模擬地盤を鋼製土槽中に作成し、その中に設置した模型 RC 杭に対して水平正負交番載荷を行った。杭頭部での水平復元力特性や地盤中における杭本体の変形性状、杭の受ける土圧等について考察を加えている。また、実験条件に合わせて3次元非線形有限要素解析を行い、実験結果との整合性について検討し、解析の有用性の検証を行っている。

Key Words : RC pile, Hysteresis Model, Earth Pressure, 3D-FEM, Equivalent Damping Constant

1. はじめに

兵庫県南部地震では多くのコンクリート構造物が被害を受け、その中には地盤中の基礎杭が損傷を受けたものも数多く存在した。これは上部構造に働く慣性力によるスウェイロッキング挙動のみならず、地盤の非線形性や地震時のせん断変形等にも起因すると考えられる。また、この事実は基礎の挙動によって地上構造物の応答が影響を受ける可能性を示唆するものである。杭基礎の復元力特性に関して実験的、解析的な研究は以前から数多く進められている^{1)他}が、未だ定量評価されるに至っておらず、RC 構造物の設計に取り込まれているとは言い難い。将来的に性能照査型設計法へ移行することを考慮すると、精度の良い適切な応答評価手法の確立が急務であると考えられる。本研究は以上の観点から、地盤まで含めた応答評価手法の確立を将来に見据え、基礎杭の復元力特性および変形性状について実験的・解析的な考察を行ったものである²⁾。

2. RC 杭の水平載荷試験²⁾

地震時における杭変形の要因として、基盤面から入射する地動加速度による地盤自身のせん断変形、および上

部構造の応答による慣性力が挙げられる。前者についてはせん断土槽を用いた載荷試験、後者については地盤固定の条件で杭頭水平載荷試験の形で行われることが多い。本研究においては、上部構造からの慣性力による影響を想定し、鋼製土槽中における RC 杭の水平載荷試験を行った。

(1)実験概要

実験装置の概要図を図-1に示す。152cm×100cm×150cmの組立式鋼製土槽中にRC杭試験体を設置し、高さ2mの位置から均質な乾燥砂(岐阜砂)を自由落下させて模擬地盤を作成した。今回は条件を統一させるため砂の充填は自由落下のみとし、人為的な締め固めは行わないものとした。模擬地盤作成後、図に示すように杭頭部に対してアクチュエータによる水平載荷試験を行った。供試体および実験条件の一覧を表-1に示す。試験は4ケースとし、地盤の有無、載荷方法、軸方向鉄筋比をパラメータとした。RC杭供試体は10cm×10cmの矩形断面とし、軸方向鉄筋をD6またはD10の異形鉄筋をかぶり厚2cmで配筋し、スターラップにはφ3.2mmの丸鋼を用いた。杭下端から地盤表面までの高さは125cm、載荷点までは150cmである。また、杭の深さ方向ひずみ分布および曲率分布を測定するために供試体表面およ

び軸方向鉄筋表面にひずみゲージを貼付し、杭変形時の主働・受働土圧を測定するために図中の位置に土圧計を設置した。

(2)実験結果

a)杭頭部における荷重－変位関係

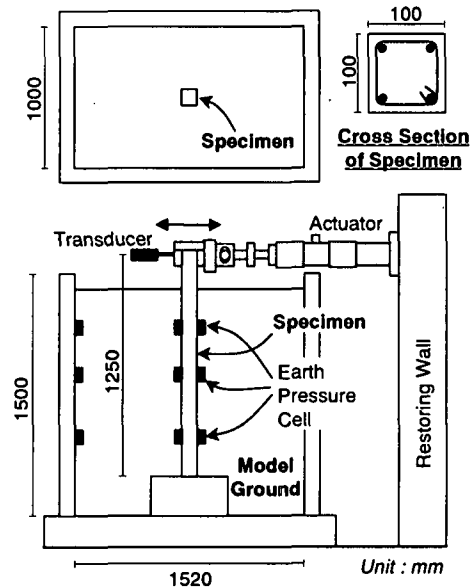
各試験ケースにおける水平荷重－水平変位の骨格曲線を図－2に、SP-3の履歴曲線を図－3に示す。SP-3, 4について、正側・負側ともほぼ同程度の杭頭荷重であったため、図－2においては正側のみの変化を示している。SP-2,3については地盤反力の影響により、SP-1よりも大きく荷重が増大している。また、単調荷重を行ったSP-1,2では降伏点が明確でないのに対し、正負交番荷重を行ったSP-3,4ではどちらも杭頭変位40mm付近で明確な降伏点が見られるのが分かる。さらに、単調荷重を行ったSP-2は正負交番荷重を行ったSP-3に比べ、杭頭変位60mmを過ぎてもさらに荷重が増加していく傾向が伺える。これは正負交番荷重の場合、ある深さで両方向とも降伏すると完全に塑性ヒンジとなり、それまで杭体の全表面で受けていた地盤反力は塑性ヒンジ以浅に再分配され、全体として荷重の増加が頭打ちとなるのに対し、単調荷重の場合は一方方向に降伏しても杭体表面で受ける地盤反力は再分配されないため、荷重が増加していくと考えられる。図－3のように、RC杭の履歴は通常のRC部材と同様のトリリニア型で表されるが、各サイクルの最大変位から除荷を開始すると急激に荷重が低下し、大きな残留変位を示すことが分かる。この原因について詳細は後述するが、杭体背面に砂が入り込んだために、除荷時に背面で逆向きの地盤反力（すなわち主働土圧）が発生したことによるものと考えられる。

b)杭体の深さ方向曲率分布

鉄筋ひずみより算出した杭の深さ方向曲率分布を図－5(a)(b)に示す。(a)図は各ケースの杭頭変位50mm時の曲率分布、(b)図はSP-3における変位10mm～50mmでの曲率分布の変化を示している。SP-1,2の比較から、地盤の存在によって杭頭変位に伴う塑性ヒンジの発生位置が浅い方ヘシフトすることが分かる。また、SP-3,4の比較により、杭剛性が高いと変形は全体的に均一化され、ヒンジ発生位置は深い方ヘシフトすると言える。載荷方法の影響について、確かにヒンジ位置はSP-2とSP-3で異なっているが、どのようなメカニズムでこの現象が発生するかについてはさらなる検討の余地がある。

c)杭体表面に作用する受働土圧

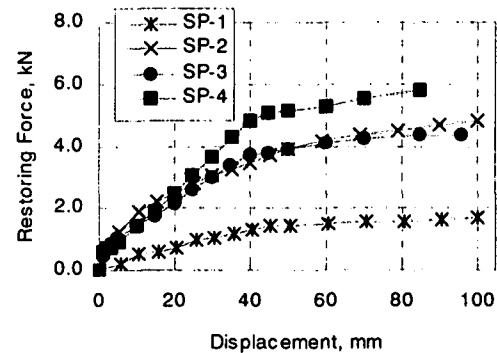
杭体表面に設置した土圧計によって計測された受働土圧履歴の骨格曲線を図－6(a)(b)に示す。土圧計は地盤表面から5cm, 35cm, 95cmの深さに設置したが、正負交番荷重中、地盤表面の杭体近傍にすり鉢上の窪みが生成され測定不能となったため、結果を省略する。SP-3,4



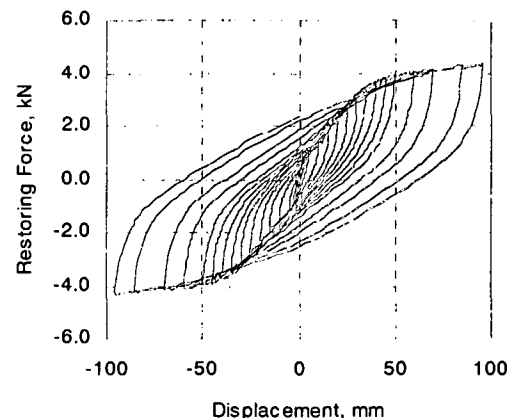
図－1 実験装置概要

表－1 実験条件

No.	Longitudinal Reinforcement	Concrete Strength	Ground	Type of Loading
SP-1	D6	41.9 MPa	none	Monotonic
SP-2	D6	44.2 MPa	Sand	Monotonic
SP-3	D6	45.3 MPa	Sand	Reversed Cyclic
SP-4	D10	43.0 MPa	Sand	Reversed Cyclic



図－3 荷重－変位関係の骨格曲線



図－4 荷重－変位履歴曲線(SP-3)

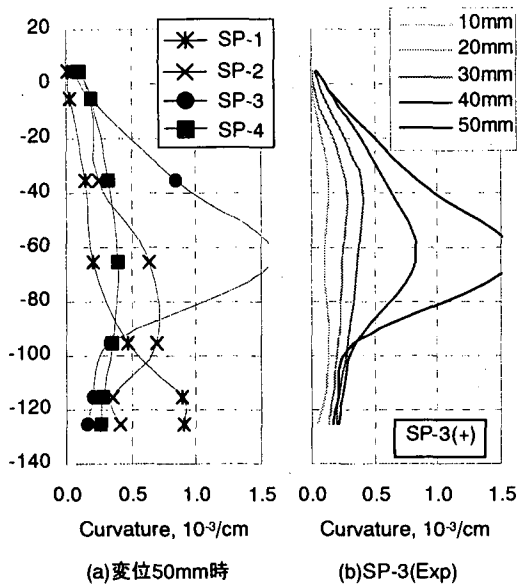


図-5 杭体の深さ方向曲率分布

については両方向の測定結果を同じ図上に示してある。SP-2 と SP-3 を比較すると、SP-3 において非常に大きな受働土圧が作用していることが分かる。これは正負交番载荷を行うことによって地盤が締め固め作用を受け、結果として杭体近傍の地盤が密になったためと考えられる。軸方向鉄筋比の異なる SP-3 と SP-4 では顕著な差が見られなかった。また、深さ 35cm において、杭頭変位 40mm ~ 50mm 近辺にで一旦土圧が低下しているが、深さ 95cm ではこの傾向が見られない。図-4 の結果と併せ考えると、これは深さ 35cm ~ 95cm の間で杭体が降伏したことに起因すると考えられる。杭体降伏後、深さ 35cm の地点では再び土圧が増加し始めるが、深さ 95cm においては土圧の増加が頭打ちとなる。これは a) で述べたように塑性ヒンジ生成位置より下方では杭変形が小さくなり、杭頭変位に起因する受働土圧がヒンジ位置から上方の範囲内で再配分されるためと考えられる。

3. 3次元有限要素解析

(1) 解析手法および解析モデル

以上の実験結果をどの程度解析的に追跡可能であるかを検討するため、東京大学で開発された3次元有限要素解析プログラム COM3 を用いて解析を行った。図-7 に解析に用いた要素分割図を示す。RC 杭は3次元 RC 梁要素、地盤は3次元ソリッド要素を用いてモデル化している。3次元 RC 梁要素は、载荷・除荷・再载荷を含むコンクリートの圧縮履歴モデル、Tension-Stiffening 効果を考慮した引張履歴モデル、除荷・再载荷履歴およびバウジナガー効果を表現する鉄筋履歴モデルを組み込んだ RC 3次元弾塑性構成則³⁾が導入されている。また、地盤要素の構成モデルとして砂質土・粘性土に適用可能な Osaki モデルが導入されている。

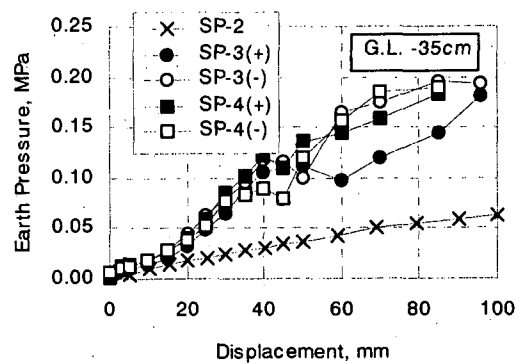


図-6(a) 杭体表面受働土圧の骨格曲線

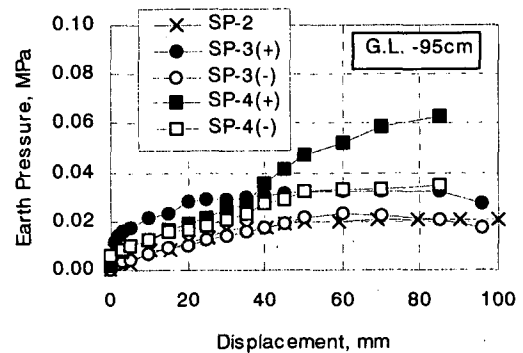


図-6(b) 杭体表面受働土圧の骨格曲線

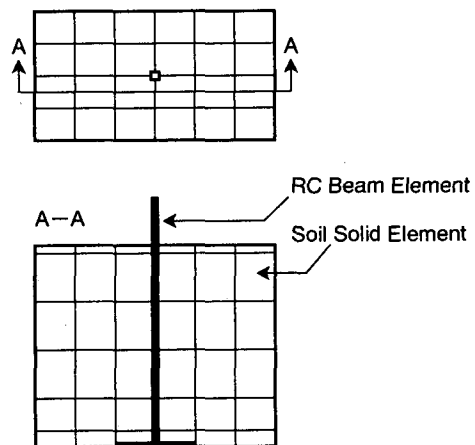


図-7 解析に用いた要素分割とモデル

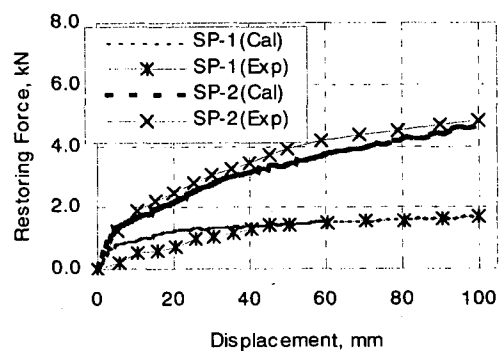


図-8 荷重-変位関係(SP-1,2)

(2)解析結果

図-8に SP-1,2 の荷重-変位関係、図-9に SP-3 の荷重-変位履歴曲線を示す。これらの結果から単調載荷および骨格曲線についてはある程度実験結果を追跡できていると言えるが、履歴ループに関しては、実験結果より非常に小さいループを描いている。これの原因に関する考察は後述する。SP-3 における等価減衰定数の変化を図-10に示すが、実験に比べて減衰が小さく評価されていることを示している。将来的に地震時応答の評価手法を確立するという観点からすると、系の減衰特性を正確に表現可能である必要があり、この点については今後改良の余地があると言える。

SP-3 における杭体深さ方向曲率分布を図-11に示す。(a)図より、ケース間 (SP-1~SP-4) における塑性ヒンジ発生位置の差異についてはその傾向を追跡できているが、(b)図の曲率分布を図-5と比較すると、塑性ヒンジ発生位置が実験よりも深い位置となった。これは、前述のループの不整合とも関連することが予想される。すなわち、正負交番載荷時に発生した地盤の締め固め現象、およびこれと関連した地盤の大変形時の履歴特性を追跡しきれていないと考えられる。この点については、RC 構成則のチェックも含めて今後さらに検討を行う必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた知見を列挙して本論文の結びとする。

- ①地盤中に存在する RC 杭は地盤反力の影響を受けて、杭単体での耐力よりも大きな復元力を持つ。また、杭体に発生する塑性ヒンジ位置は地盤や杭の剛性によって変化する。
- ②実験において、正負交番載荷を行うことで杭体近傍の地盤が締め固められて土圧が増大する現象が見られ、これが杭体の損傷を著しく増大させる。
- ③地盤中の RC 杭の復元力特性について、用いた解析手法は骨格曲線については実験をある程度再現可能であったが、実験で得られた荷重-変位履歴の大きなループを解析から得ることは出来なかった。原因として、②に記した地盤締め固めの影響が大きいことが考えられる。
- ④③と関連して、系としての履歴減衰は地震時の応答特性に非常に大きな影響を与えることから、個々の材料モデルを詳細に検討していく必要があると考えられる。

謝辞：本研究を実施するに際し、東京大学前川宏一教授の御厚意により、有限要素解析プログラム COM3 を使用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。また、実験に携わって頂いた臼井 徹君（菊池建設）、藤松剛至君（住友建設）に感謝の意を表します。

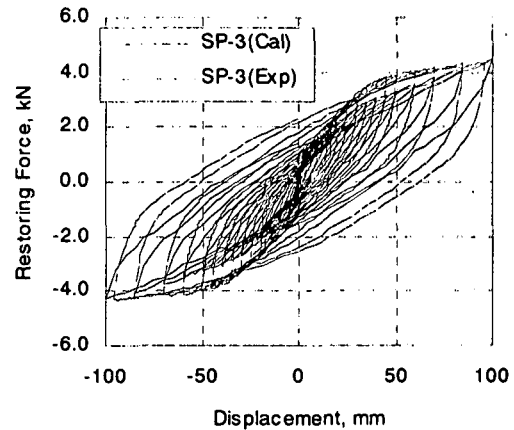


図-9 荷重-変位履歴曲線(SP-3)

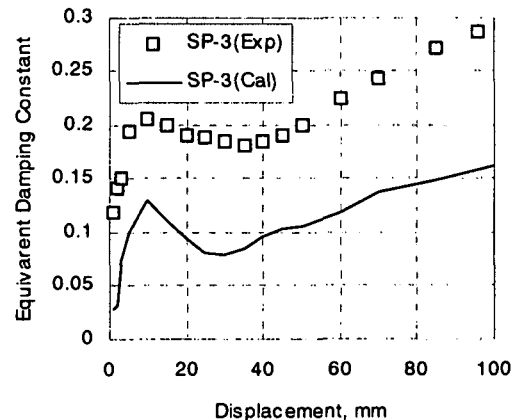


図-10 等価減衰定数の変化

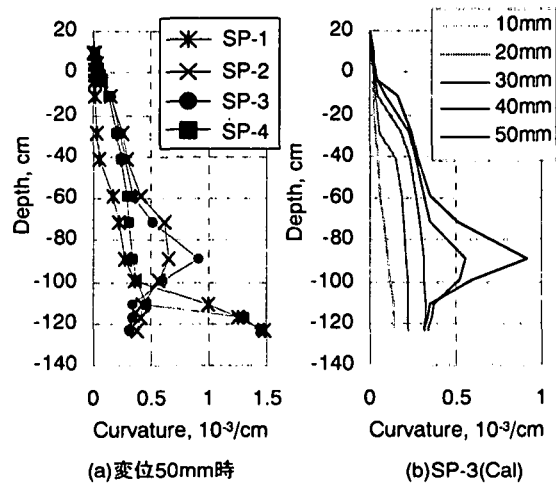


図-11 杭体の深さ方向曲率分布

参考文献

- 1) 福井他：砂地盤中における単杭の交番水平載荷試験，土木技術資料，Vol.40，No.3，1998.3
- 2) 高野，牧，睦好：RC 杭-地盤系の静的載荷試験および3次元有限要素解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，印刷中
- 3) 土屋，福浦，前川：Fiber Model を用いた3次元有限要素動的解析による多方向入力を受ける RC 橋脚の応答，JCI「塑性域の繰返し劣化性状」に関するシンポジウム，1998.8