

論文 RC 杭—地盤系の静的載荷実験及び 3 次元有限要素解析

高野 光司*1・牧 剛史*2・睦好 宏史*3

要旨 : RC 橋脚—RC 杭—地盤系の地震時挙動および相互作用の効果を明らかにするために、砂を用いた模擬地盤内に RC 杭を設置して静的載荷実験を行った。また、3次元有限要素解析を行って実験結果と比較検討し、地盤中における RC 杭の復元力特性や変形性状、杭に作用する土圧、等価粘性減衰等について考察を行った。

キーワード : RC 杭基礎、模擬地盤、正負交番載荷実験、3次元有限要素解析

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、中でも視覚的把握が困難な地盤内の基礎杭にも被害が及んだ¹⁾。これは地震時の上部構造物が受ける慣性力によるスウェイ・ロッキング作用だけではなく、地盤の顕著な非線型性やせん断変形なども原因と考えられる。RC 橋脚—RC 杭—地盤系の全体系解析や、実験などが行われるようになってきた²⁾³⁾が、これらの地盤との動的相互作用の研究はまだ十分に明らかにされたとは言い難い状況である。本研究は、地盤内における RC 杭が一方向及び繰り返し水平荷重を受ける時の静的変形挙動や地盤に及ぼす影響を実験的に明らかにするとともに、3次元有限要素解析により実験結果を検証することを目的としたものである。

2. 実験概要

試験方法の概要を図-1に示す。152×100×150cmの組立式土槽内に RC 杭供試体を設置した。図-1に示すように RC 杭の断面は 10×10cm で高さは 155cm、側面のかぶり厚は 15mm である。なお供試体を固定するために 50×30×25cm の基部を有している。供試体 4 体の概要と実験要因を表-1に示す。RC 杭供試体に用いた軸方向鉄筋は 6mm (降伏強度 436.0MPa、引張鉄筋比 0.79%)、あるいは 10mm (同 367.5MPa、1.78%) の異形鉄筋で、スターラッ

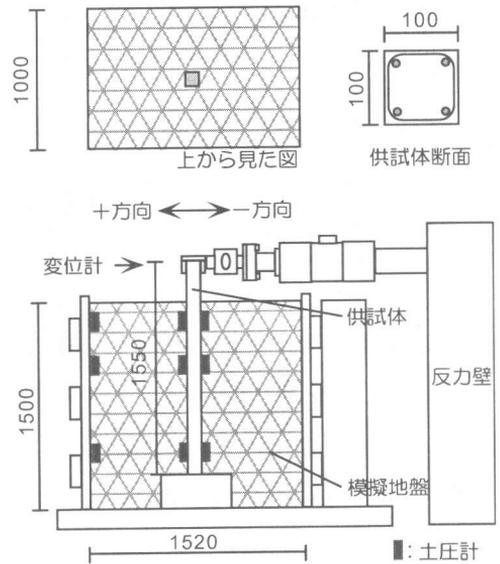


図-1 実験概要図

プには全ての供試体に直径 3mm の丸鋼を用いて、10cm 間隔に配筋した。これによる帯筋比は 0.18% であった。深さ方向のひずみ分布、曲率分布を求めるために、軸方向鉄筋と供試体表面にひずみゲージを貼付した。RC 杭供試体を設置後に土槽上端より 50cm の高さからバケツを用いて均質の乾燥砂 (岐阜砂) を自由落下させて土槽に砂を充填した。これは土槽内の砂を均一にするためである。初期静止土圧のばらつきを防ぐために載荷は砂の詰め込み終了後 24 時間以上経ってから開始することにした。載荷は変位

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 埼玉大学助手 工学部 建設工学科 (正会員)

*3 埼玉大学教授 工学部 建設工学科 (正会員)

表-1 供試体概要

	軸方向鉄筋	圧縮強度	地盤	载荷
SP1	D6	41.9 MPa	無	単調
SP2	D6	44.2 MPa	有	単調
SP3	D6	45.3 MPa	有	正負
SP4	D10	43.0 MPa	有	正負

表-2 岐阜砂の材料物性⁴⁾⁵⁾

真比重	2.643
密度 (g/cm ³)	1.444
変形係数 (MPa)	1.225
礫分 (%)	0
砂分 (%)	99
シルト分 (%)	
粘土分 (%)	1
最大粒径 (mm)	0.84
60%粒径 D_{60} (mm)	0.350
30%粒径 D_{30} (mm)	0.310
10%粒径 D_{10} (mm)	0.220
均等係数 U_c	1.59
最小間隙比	1.126
最大間隙比	0.717

制御とし、SP1、SP2 は一方向単調载荷、SP3、SP4 は正負交番载荷である。表-2 に岐阜砂の材料物性を示す。なお供試体下端の境界条件は固定としているので、これを支持層と見なしている。RC 杭供試体が地盤に及ぼす影響を調べるために土圧計を図-1 のように設置した。この実験において実構造物と異なる点は、1. 杭頭部は回転フリーであるが、実構造物ではフォーミングを有するので回転が拘束されている、2. 杭頭部に水平载荷をすることで橋脚基部からの慣性力のみを想定して、地震時の周辺地盤の変形による影響は加味していない、3. 円形断面ではなく矩形断面の基礎杭を使用している、4. 地盤に砂を用いているため本来の地盤に比べてはるかに軟弱である、等である。本実験では基礎的データを得る観点から土に比べ粒径が均一であり、物性値が明確である砂を用い、地盤と RC 杭との相互作用を把握しやすくするために矩形断面を採用した。

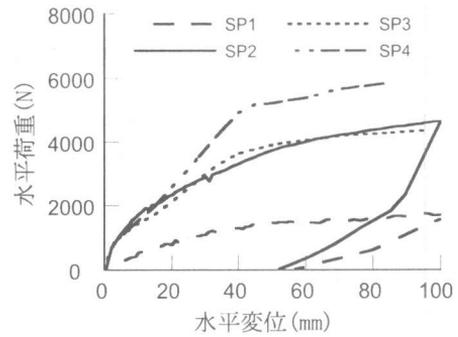


図-2 荷重-変位の履歴曲線と骨格曲線

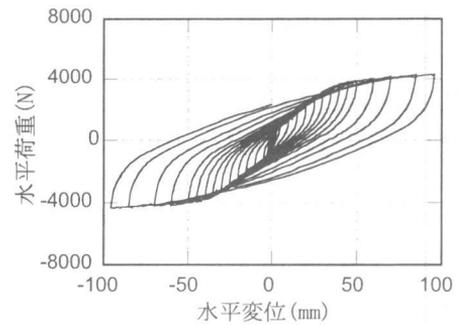


図-3 荷重-変位の履歴曲線 [SP3]

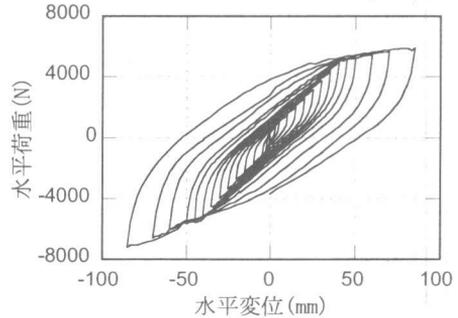


図-4 水平荷重-変位の履歴曲線 [SP4]

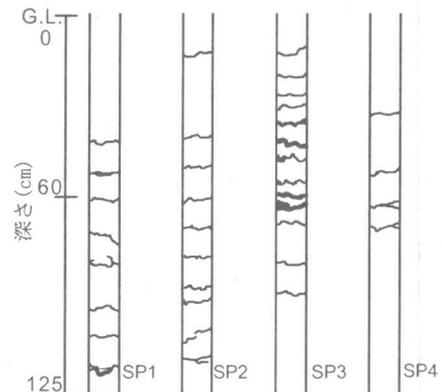


図-5 載荷面クラック分布比較

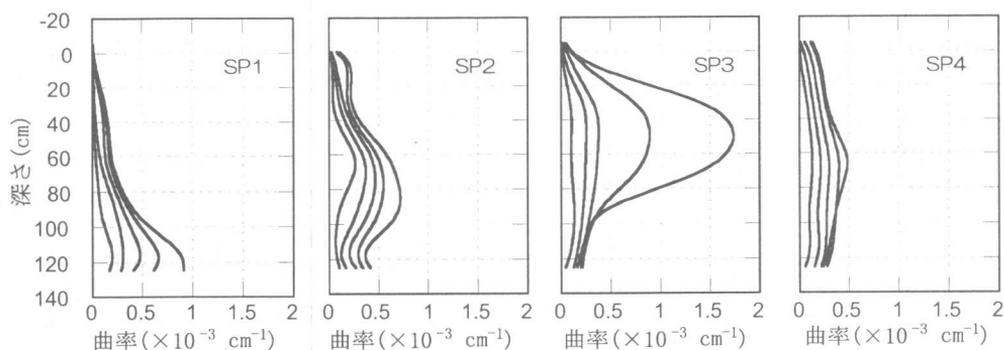


図-6 鉄筋ひずみより算出した曲率分布 (水平変位 10mm ごと 50mm まで)

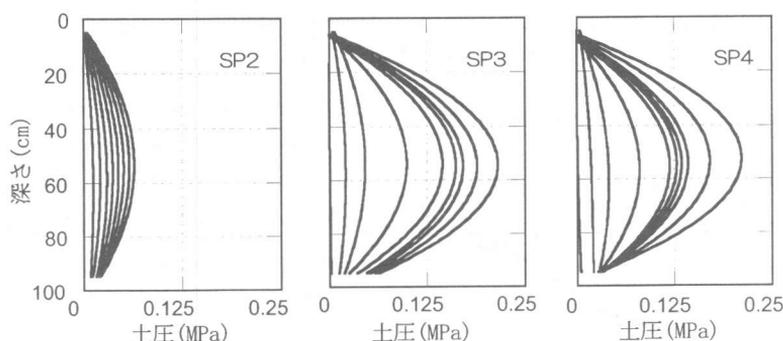


図-7 受働土圧分布 (水平変位 10mm ごと 100mm まで)

3. 実験結果

3-1 荷重-変位関係

載荷点における水平荷重-水平変位の履歴曲線を図-2～4に示す。図-2にはSP3、4の+方向(図-1)骨格曲線も示した。SP1～SP4ともに45mm近辺でRC杭が降伏しているが、SP2～SP4は降伏後も荷重が増加している。SP1とSP2の差は周辺地盤により水平荷重が分担されたためである。SP2の包絡線はSP3とほぼ一致しており、正負交番載荷が荷重変位関係に及ぼす影響は小さいと言える。

3-2 損傷状況

図-5に杭体載荷面側のひびわれ損傷分布、図-6に鉄筋ひずみから算出した水平変位 10mm ごと 50mm ステップまでの曲率分布、図-7には水平変位 10mm ごと 100mm ステップまでの載荷面反対側の面に生じた受働土圧分布を示す。

なお図-6、7には計測点間をStineman関数を用いてスムージング処理を施した。図-5、6よりSP1では杭体先端部でモーメントが最大となり剥離が生じた。最も剥離が顕著だったのはSP3の杭体中央部で、最も軽微な損傷はSP4で微小ひびわれが生じただけであった。SP2～4において、地盤表面には杭体中心から半径30cm以上に渡って水平載荷による沈下が生じており、例えば深い所でSP2では10cm程度、SP3、4では20cm程度の沈下が見られた。曲率に関して、単調載荷のケースと比較するためにSP3、SP4の+側曲率分布を表記した。SP2では初期ステップから杭体中央部に曲げを受け、徐々に曲げが杭下端にシフトしている。SP3では凸型に分布しているが、これは曲げによる降伏後、杭体中央部において急速に塑性ヒンジ化したためである。SP4では杭全体が弓状に変形している。

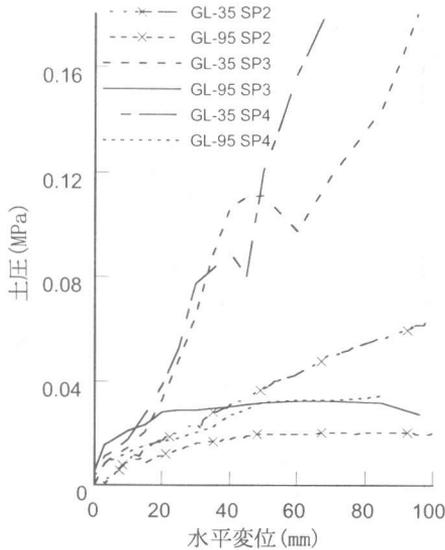


図-8 土圧-変位の骨格曲線

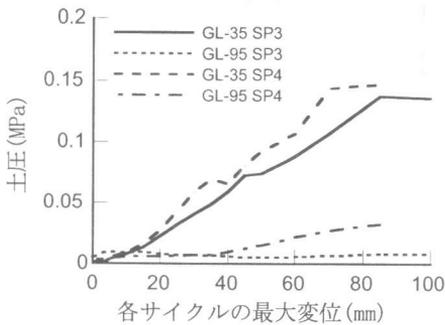


図-9 杭頭部の変位が0となったときの土圧

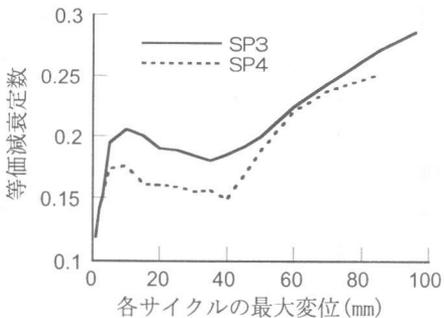


図-10 各変位ステップ毎の等価粘性減衰定数

図-7よりSP2とSP3、SP4を比較した場合、正負交番荷荷によるほうが周辺地盤がRC杭から受ける受働土圧が大きくなる事が分かる。図-8に受働土圧と各サイクルの杭頭部最大変位の関係を示す。G.L.= -35cmではどの供試

体でも受働土圧は変位の増大とともに増加する傾向にある。SP3、4はSP2よりも大きな土圧が作用しているが、これは正負交番荷荷により徐々にRC杭近傍地盤が締め固められ、結果的に締め固まった地盤をRC杭が押しつける形となったためと考えられる。またSP3は水平変位が45mm、SP4では50mmの時、土圧が極大を迎えた後、一時的に低下している。これはほぼ荷重-変位関係で表れる降伏変位に対応している。RC杭が降伏することで受働土圧が低下しているが、その後も強制的に変位が作用するので再び土圧が上昇する。G.L.= -95cmにおいてSP2、SP4の土圧は漸増、SP3では70mmから減少傾向にある。これはG.L.= -40cm付近での塑性化が著しくなったため、杭頭部の水平変位によるせん断力が伝達しなくなったためと考えられる。図-9に杭頭部の水平変位が0の時の土圧を示す。RC杭が各変位ステップ毎の最大変位に向かうとき、地盤表面のRC杭周辺の砂は土のように粘性がないために、RC杭に向かって吸い寄せられるように沈下が生じるのを観察できた。最大変位より反転してからそれらの砂は密になり、てこのような役目を果たすために杭頭部が変位0に戻っても土圧が作用している状態になる。SP3よりもSP4の方が砂の沈下量が多かった。これはSP4が剛性が高いために塑性化するのが遅く、地盤内のRC杭の変形がSP3よりも線形的であるためであると思われる。したがって、砂の沈下量が多いほど、このてこによる作用が大きくなり結果として受働土圧が大きくなる。これらがRC杭の著しい塑性化をもたらす要因の一つであると思われる。

3-3 等価粘性減衰

図-10に各変位ステップから得られた荷重-水平変位履歴曲線の等価減衰定数の推移を示す。一般にRC構造物の初期減衰は数%程度であるが、RC杭-地盤系では地盤が受け持つ履歴吸収エネルギーが大きいために、初期段階で10%前後となり、RC杭が降伏するまでの間は地盤の非線形特性により等価減衰定数はSP3で20%、

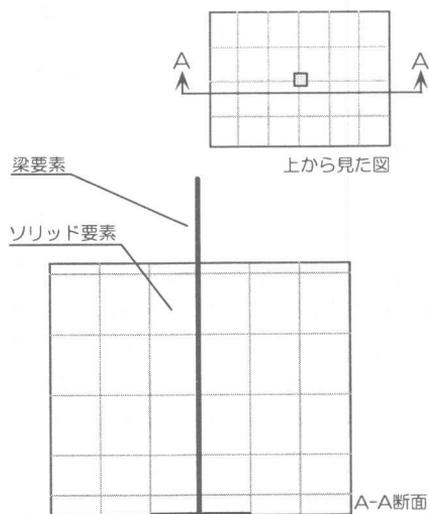


図-11 3次元有限要素解析メッシュ

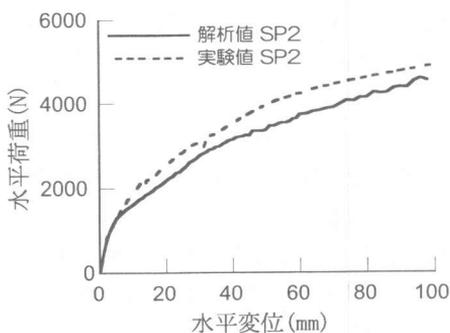


図-12 荷重-変位曲線 [SP2]

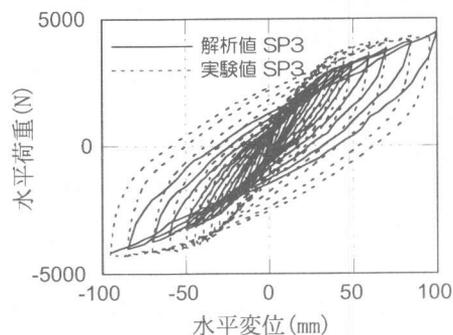


図-13 荷重-変位の履歴曲線 [SP3]

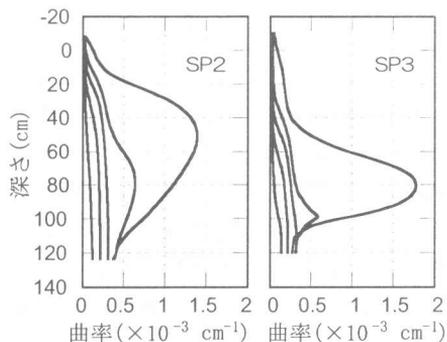


図-14 解析による曲率分布

SP4では15%程度となった。降伏後、SP4よりも塑性変形性能が大きいSP3は25%以上まで上昇した。

4. 3次元有限要素法解析

4-1 解析プログラムと構成モデル⁶⁾

今回行った実験SP2、SP3をシミュレートするために3次元有限要素法を用いた解析を行った。解析では図-11に示すような要素分割を行った。RC杭には梁要素を用い、杭下端を実験と同じ条件にするために十分に剛な線形梁要素を杭と逆T字型になるように設定し回転拘束を施した。また、解析の精度をあげるためにGauss点を用いた。解析には東京大学で開発された有限要素解析プログラム、「COM3」を用いた。橋脚および杭のモデルに使用した梁要素は、除荷・再載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・再載荷履歴およびバウジナー効果を表現する福浦・前川らの数値解析用鉄筋履歴モデルを組み込んだ鉄筋コンクリートの3次元弾塑性構成則⁷⁾が導入されている。また、地盤ソリッド要素の構成モデルには、Osakiモデルが導入されている⁸⁾。

4-2 解析結果

本解析で用いた各種パラメータは表-1、2による。図-12にSP2、図-13にSP3の荷重点における水平荷重-水平変位の実験値と解析値を示す。骨格曲線ではSP2、3ともに同じような傾向が得られたが、履歴曲線に関しては実験値

の方が塑性域において履歴吸収エネルギーが大きくなった。図-14に10、20、30、50、100mmのときの曲率分布（スムージング処理済）を示す。図-6と比較すると、SP2では降伏点までは精度よく求められたが、SP3では塑性ヒンジ位置が実験値よりも深部で発生した。実験では塑性ヒンジ位置がサイクル毎に深部へ向かっていく傾向であるのに対して、解析上では塑性ヒンジ位置が地表面へとシフトしている。荷重-変位関係、曲率分布から判断すると、一方向単調載荷条件のケースについては降伏点まではある程度の精度をもって求められるが、正負交番載荷条件下では、解析上では地盤の沈下隆起、締め固め、塑性域などの挙動特性を表現できなかった。地盤履歴モデルの適用性なども視野に入れて今後、地盤部分についても検討の余地があると言える。

5 まとめ

静的載荷条件下における地盤内のRC杭挙動について、実験結果と3次元有限要素解析から以下の結論が得られた。

- ・一方向水平載荷と正負交番載荷の違いによる荷重-変位関係の骨格曲線に及ぼす影響は見られなかったが、周辺地盤にかかる主働土圧は正負交番載荷の方が大きくなった。
- ・降伏後RC杭に生じた塑性ヒンジは、更に繰り返し載荷を受けることで徐々に杭下端へ向かっていく。
- ・載荷中、地表面ではRC杭周辺で地盤沈下が生じる。この沈下した地盤が粘性のない砂の場合、地盤内でRC杭にまとわりつくような形となり、繰り返し載荷により締め固められ、結果的にRC杭の塑性化を更に進行させる原因になると思われる。
- ・RC杭-地盤系の等価粘性減衰は降伏までは地盤の影響が大きいので10%以上あり、塑性化後の減衰の増分はRC杭の変形性能に依存する。
- ・3次元有限要素解析で、一方向水平載荷のケースは降伏まで地盤内のRC杭挙動もよい精度で

求められたが、塑性化が進行するに従って地盤沈下等が顕在化してくるため挙動特性を表現しなくなった。地盤要素の構成モデルに検討の余地があると思われる。

謝辞

本研究を実施するに際し、東京大学教授前川宏一先生の御厚意により3次元有限要素解析プログラムCOM3を提供していただきました。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白井徹君、藤松剛至君に感謝の意を表します。なお本研究の一部は文部省科学研究費補助金の奨励研究(A)(課題番号:10750351、研究代表:牧剛史)によるものである

参考文献

- 1) 建設省土木研究所:土木研究所報告、Vol.5、No.196、1996.3
- 2) 福井、木村、大越、阪野: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、pp.62-67、1998.3
- 3) 福田、土屋、山田、他:大型せん断土槽での模型杭の水平載荷試験(その1~その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.525-530、1997.9
- 4) 石田、渡辺、伊藤、北原、松本:低拘束圧下の模型実験材料の静的動的物性、電中研研究報告、No.380045、1981.5
- 5) 大嶋義隆:地中構造物の地盤の非線形動的相互作用に関する研究、前田建設技術研究所報、vol35-3、1994
- 6) 岡村、前川:鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版
- 7) 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、「塑性域の繰り返し劣化性状」に関するシンポジウム論文集、JCI、pp.359-368、1998.8
- 8) Shawky,A. and Maekawa,K. : Nonlinear Response of Underground RC Structures under Shear, Proceedings of JSCE, No.538/V-31, pp.195-206、1996.5