

地盤中における杭の水平載荷実験と 解析的検討

牧 剛史¹・睦好 宏史²・佐々木 満範³・沖津 充紀³

¹正会員 工修 埼玉大学助手 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 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

繰り返し載荷を受ける杭-地盤系の挙動を評価するために、模型地盤中における鋼製杭および RC 杭の水平載荷実験を行い、主として杭体の変形性状と発生する地盤反力特性について検討した結果、杭頭水平載荷によって杭体に生じる損傷と杭体-地盤間の相対剛性との関係が明確となった。また、杭体と地盤との界面条件に着目して、数種類の地盤反力履歴特性を地盤パネに与えた骨組み解析を行った結果、地盤反力の履歴特性が杭体変形に及ぼす影響は小さいが、系の減衰性状には大きく影響することが確認された。このことは杭-地盤系の応答評価に際して地盤反力の履歴特性が重要であることを示唆するものである。

Key Words : RC pile, Maximum Damaged Depth, Earth Pressure, Hysteretic Model of Soil Resistance

1. はじめに

構造物の大型化・多様化や埋立地等の軟弱地盤上に立地する構造物の増加に伴い、また阪神大震災における被害分析結果を受けて、地震時における杭基礎構造の挙動を大変形領域まで把握する重要性が高まりつつある。また、設計手法が性能照査型へ移行するためには、杭基礎としての終局状態を定量的に照査可能な手法を早急に開発する必要性が指摘されている¹⁾。杭基礎としての終局状態は、周辺地盤の終局または杭体の終局によって規定されると考えられ、地盤の終局状態を考慮した大変形領域の載荷実験例は数多く見受けられる。しかしながら杭体の終局状態を対象とした検討は希少である²⁾³⁾。

そこで本研究では、杭体降伏後の大変形領域までを対象として、模擬地盤中における RC 杭の水平正負交番載荷実験を行い、地盤反力が杭体変形性状に及ぼす影響について検討を行った。併せて、杭体が弾性域内に留まる変位レベルにおける水平地盤反力特性を調査するために、鋼製杭を用いた実験も行っている。さらに、実験条件に合わせた骨組み解析を行い、現行道路橋示方書の地盤パラメータに関して検討を行うと共に、地盤反力特性における履歴特性が杭体の変形性状に及ぼす影響についても併せて検討を行った。

2. 鋼製杭および RC 杭の水平載荷試験⁴⁾⁵⁾

(1) 実験概要

本実験で用いた載荷システムの概要図を図-1に示す。鋼製土槽中に試験体を設置し、比較的均一な粒径を有する粒子で構成される乾燥砂(岐阜砂)を用いて模擬地盤を作成した。その後、杭頭部に対してアクチュエータによる水平正負交番載荷を行った。杭下端から地盤表面までの高さは1250mm、載荷点までは1500mmである。実施した実験ケースを表-1に示す。杭試験体は図-2に示すような断面形状を有する鋼製杭および RC 杭を用いた。地盤作成に際しては、「緩詰め」のケースでは、人為的な締固めを行わずに砂を自由落下させることによって作製した。「密詰め」のケースでは、地盤厚300mm毎にコンクリートブロックを用いて均一に締固めを施した。また、杭の深さ方向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、杭変形時の地盤反力を測定するために土圧計を設置した。

(2) 相対剛性の定義

ここで、各試験ケースにおける杭体-地盤間の相対剛性を定義しておく。道路橋示方書における杭の特性値 β も杭体と地盤の相対剛性を評価する一指標と見なすこ

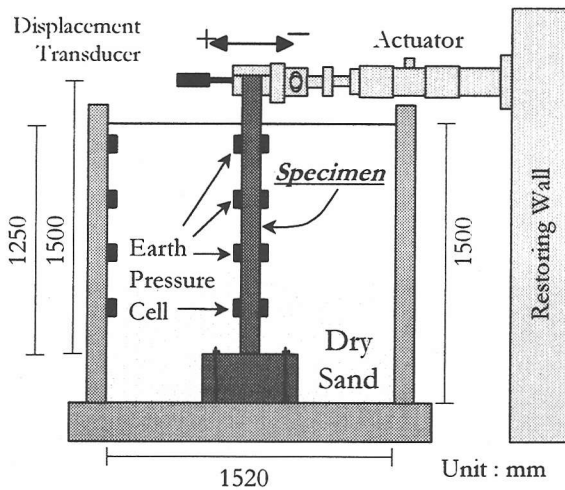


図-1 荷重システム概要図

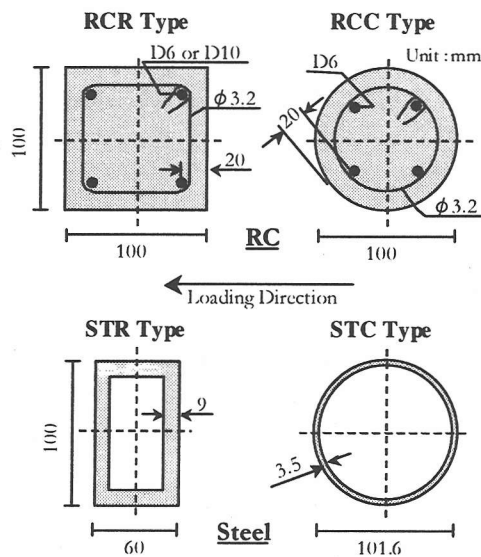


図-2 試験体断面

とが出来るが、ここでは以下の式(1)に示すような、Poulosら⁶⁾が提案した無次元量 K_R を用いて評価する。

$$K_R = \frac{E_p I_p}{E_s L^4} \quad (1)$$

ここに、 K_R : 杭と地盤の相対剛性
 E_p : 杭体の弾性係数
 I_p : 杭体の断面二次モーメント
 E_s : 地盤の弾性係数
 L : 杭の根入れ長

上式中、杭体の特性値については、RC杭の弾性域～塑性域までを平均的に評価するために、杭体断面の降伏モーメントと降伏曲率から得られる降伏剛性を適用した。鋼製杭については弾性剛性を用いている。また、地盤の弾性係数については、線形/非線形の遷移点が明確でないことを踏まえ、ここでは地盤の相対密度と拘束圧から

表-1 実験ケース

No.	Type	Reinf.	Soil	$K_R(10^{-3})$	Name
1	STR	----	Loose	1.497	STR-L-R
2	STR	----	Dense	1.212	STR-D-R
3	STC	----	Dense	1.303	STC-D-R
4	RCR	D10	Loose	0.636	RCX-L-R
5	RCR	D6	Loose	0.400	RCR-L-R
6	RCR	D6	Dense	0.341	RCR-D-R
7	RCC	D6	Dense	0.203	RCC-D-R

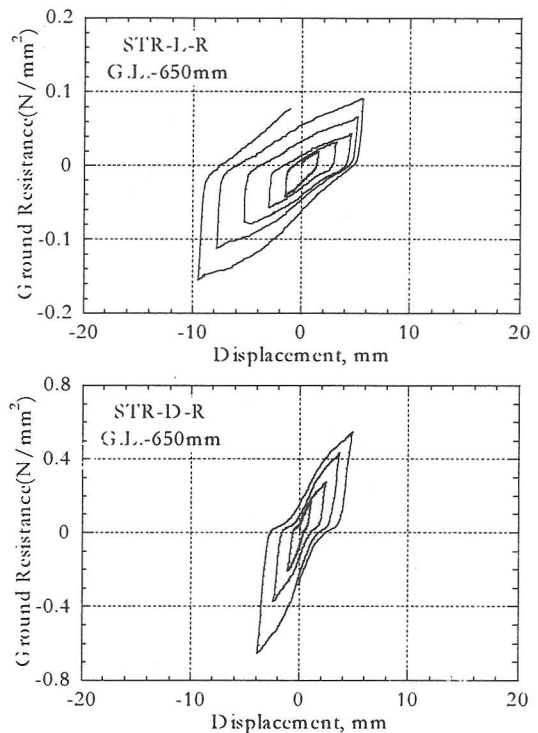


図-3 水平地盤反力の測定結果

算定される初期弾性係数を用いて評価することとした⁷⁾。根入れ長は全ケースを通じて 1250mm としている。以上により算定した各試験ケースにおける相対剛性値は表-1に併せて示してある。

(3) 実験結果

a) 水平地盤反力特性

杭体表面に貼付した土圧計によって測定された水平地盤反力の例を図-3に示す。ここで横軸の水平変位は、測定された杭体曲率分布を3次スプライン関数近似し、これを深さ方向に2回積分することによって算定した土圧計位置における水平変位である。地盤剛性が低い(緩詰め)ケースでは履歴曲線が平行四辺形の形状を示すのに対し、地盤剛性が高い(密詰め)ケースでは逆S字(スリップ型)の履歴を描く。また、変位振幅の増加に伴い、履歴の骨格曲線の傾きが上昇していく。これは杭体周辺地盤の締め固め現象によるものと考えられ、同様の傾向は既往の研究³⁾でも示されている。

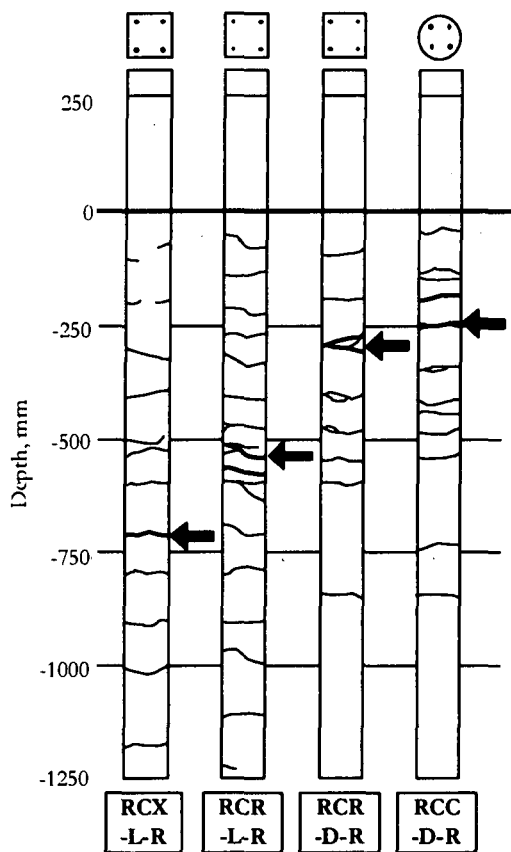


図-4 RC試験体のひび割れ状況

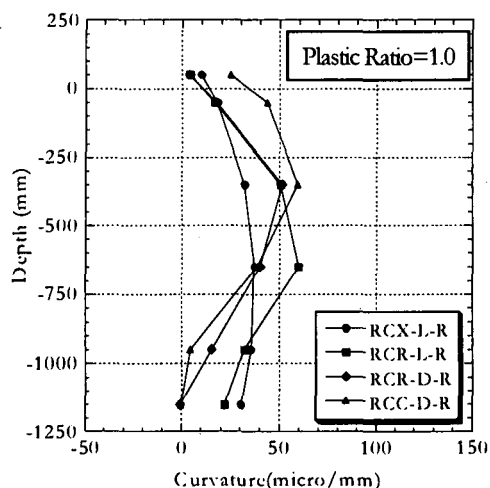


図-5 杭体降伏時の深さ方向曲率分布

b) 杭体の損傷状況と深さ方向曲率分布

RC杭試験体を用いた4ケースについて、損傷状況を図-4に示す。図中には、試験後の目視観察の結果最も損傷の大きかった位置を矢印で示すと共に、(2)で定義した相対剛性の大きなケース順に並べてある。これより、地盤剛性が低いケース（緩詰め）では杭体基部までひび割れが広く分布しているのに対し、高剛性のケース（密詰め）では最大損傷点付近にひび割れが集中しているのが分かる。杭体降伏時の深さ方向曲率分布を示した図-5からもこの傾向は明らかであり、相対的に杭体剛性が

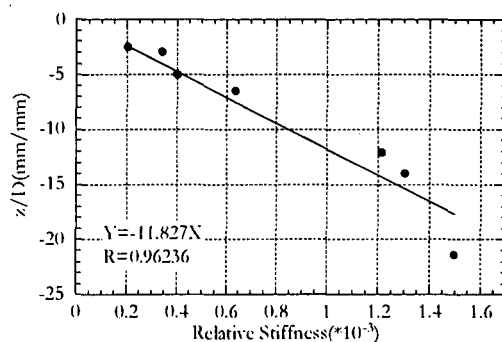


図-6 相対剛性の変化に伴う最大損傷点の移動

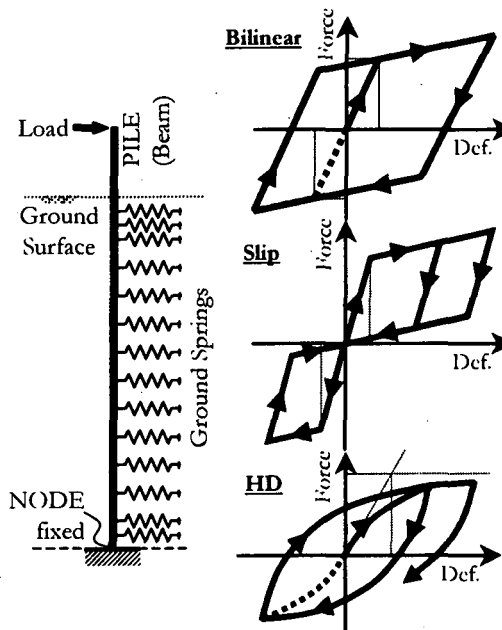


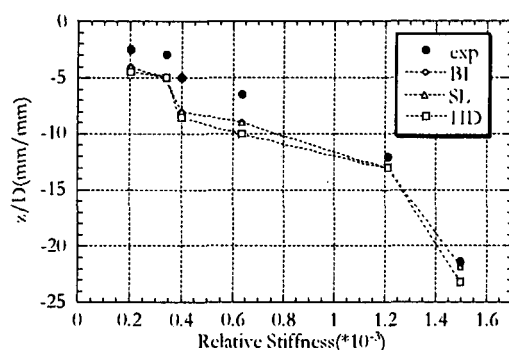
図-7 解析モデルと地盤バネ特性

高いほど杭体損傷は深さ方向に分散し、地盤剛性が高いほど杭体損傷が局所化するとと言える。全試験ケースにおける最大損傷深さ（鋼製杭のケースは最大曲率発生深さ）を相対剛性に対してプロットした結果を図-6に示す。一般性を持たせるために、深さは杭径D（载荷方向の杭断面高さ）で正規化した。最大損傷点は相対剛性の上昇と共にほぼ比例的に下方へ遷移することが分かる。この結果は杭体-地盤間の力の伝達が相対剛性によって評価可能であることを示唆するものである。

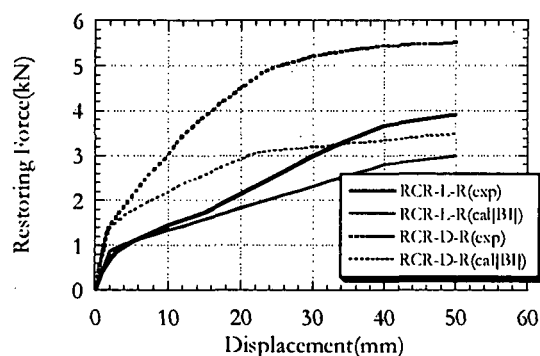
3. 骨組みモデルによる解析的検討

(1) 解析モデル

用いた解析モデルを図-7に示す。杭体は梁要素とし、モーメント-曲率関係に Takeda モデルを適用し、地盤バネ特性は道路橋示方書に基づいてバイリニアモデルを適用した。また、地盤反力特性の測定結果を踏まえ、履歴則として移動硬化型、スリップ型、Hardin-Drnevich 型の3種類を適用し（図-7）、杭体-地盤界面における力の伝達特性が及ぼす影響についても検討を行った。



図一 8 最大損傷深さの変化



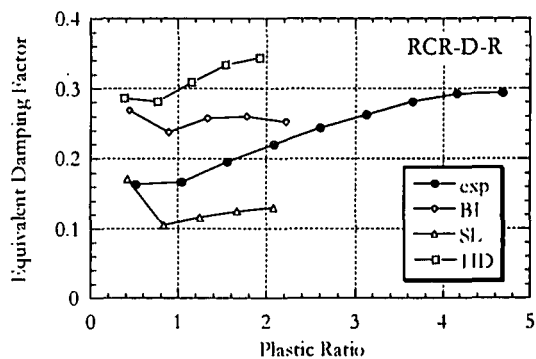
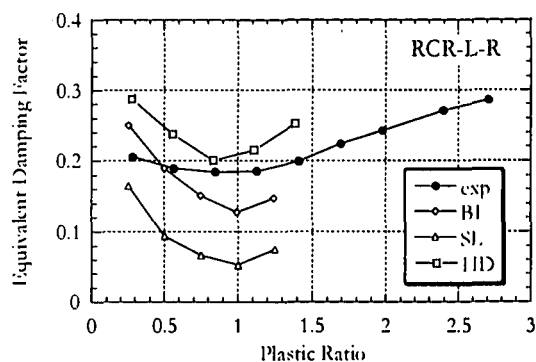
図一 9 杭頭復元力-変位関係の骨格曲線

(2) 解析結果

各ケースにおける最大損傷深さを実験結果と併せて図一 8 に示す。これより、相対剛性の変化に伴う最大損傷点の移動は解析によってほぼ再現されていると言える。また、地盤反力特性の履歴モデルの違いが杭体の変形に及ぼす影響は非常に小さいことから、杭体の変形状態は地盤剛性によって決定されると言える。図一 9 に杭頭復元力-変位関係の骨格曲線を示すが、非線形域における復元力の値が過小評価されている。変位数 mm 程度の領域において剛性が精度良く推定されていることを勘案すると、復元力が過小評価される原因は極限地盤反力の値および地盤の塑性域における反力特性の設定に問題があるものと考えられる。また、系の等価減衰定数の変化を図一 10 に示す。横軸は各ケースの降伏変位で正規化した塑性率で示している。これより、地盤剛性の低いケース（緩詰め）ではバイリニア型～HD 型、地盤剛性の高いケース（密詰め）ではバイリニア型～スリップ型の履歴特性が適していると考えられ、この傾向は実験における地盤反力の測定結果に一致するものである。

4. まとめ

(1) 鋼製杭および RC 杭を用いた杭頭水平載荷実験の結果、杭体に発生する最大損傷点は杭体と地盤の相対剛性の上昇にはほぼ比例して下方ヘシフトする。



図一 10 系の等価減衰定数の変化

- (2) 現行道路橋示方書に準拠した骨組み解析によって最大損傷点の移動を追跡出来るが、復元力自体は地盤反力特性の設定（特に塑性域）に再考の余地を残している。
- (3) 減衰性状を正確に評価するためには、地盤反力の履歴特性を地盤条件に応じて適切に設定する必要がある。

謝辞

実験に携わって頂いた埼玉大学建設工学科材料研究室のメンバー各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 例えば 土木学会地震工学委員会杭基礎耐震設計研究小委員会：杭基礎の耐震設計に関するワークショップ，1999.8
- 福田他：大型せん断土槽での模型杭の水平載荷試験（その 1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.525-530，1997.9
- 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
- 牧，睦好，佐々木：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，pp.279-286，2000.7
- 牧，睦好：鉄筋コンクリート杭の水平復元力特性と変形状態に関する研究，土木学会論文集 V，2001（投稿中）
- H. G. Poulos: Behavior of Laterally Loaded Piles: I-Single piles, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.97, No.SM5, pp.711-731, 1971.5
- 石田，渡辺他：低拘束圧下の模型実験材料（岐阜砂等）の静的・動的物性，電力中央研究所研究報告，No.380045，1981.5