

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

牧 剛史¹・睦好 宏史²

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 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255)

地震を受ける RC 構造物全体系の耐震性能評価手法の確立を将来に見据え、杭-地盤間の非線形相互作用を明らかにするために、乾燥砂中における RC 杭の杭頭水平正負交番載荷実験および動的正弦波載荷実験を行った。その結果、杭体の最大損傷位置は杭体と周辺地盤との相対剛性によって決まること、RC 杭の杭頭復元力特性に及ぼす載荷速度の影響は小さく、繰返し載荷の影響が卓越することが明らかとなった。また 3 次元有限要素解析を行い、復元力特性と変形性状の観点から比較した結果、本解析手法がある程度の推定精度を有していることが明らかとなった。

Key Words: reinforced concrete pile, restoring force, dry sand, maximum damaged depth, relative stiffness, dynamic loading, repetition of cycles, 3-dimensional FEM analysis

1. はじめに

1995 年 1 月の兵庫県南部地震では多くの RC 構造物が甚大な被害を受けた。特に阪神高速道路 3 号神戸線等では 5 ケ所での落橋をはじめ、多くの RC 橋脚が倒壊・損傷するとともに、それらを支持する基礎構造物も損傷を被ったことが報告されている^{1),2)}。ただしこれらの報告によると、橋脚が受けた損傷に比べ、基礎構造物、特に杭基礎が受けた損傷は比較的軽微とされており、この理由はその設計体系にあると考えられている。すなわち、基礎構造物の補修・補強は非常に困難であるため、設計上は基礎構造物の保有水平耐力を橋脚躯体の 1.1 倍とするよう規定されており³⁾、実際には橋脚躯体へ損傷が集中したものと考えられる。しかし極度の損傷を受けた橋脚はその後の復旧過程で種々の補修・補強が施されたにも拘わらず、このような震後および補強後の構造系の耐震性能については未だ詳細な検討は行われていない。一般に耐震・地盤工学の領域で古くから行われている、いわゆる「地盤と構造物の動的相互作用」に関する一連の研究^{4),5)}では、地上構造物の応答は基礎構造物に大きく影響されること自体は明ら

かにされているものの、既往の研究成果が設計体系に陽な形で組み込まれていないのが現状である⁶⁾。今日の性能照査型設計法移行の流れを勘案すると、設計段階および震後・補強後の耐震性能の正確な評価のためには、基盤波入力による構造全体系応答解析が不可欠であり、信頼性の高い解析手法を早急に確立する必要があると言える。特に性能設計の場合、弾性域のみならず塑性域、大変形領域までの系全体の挙動を定量的に評価する手法が不可欠である⁷⁾。

杭基礎の挙動や基礎を含めた構造物全体系の応答評価手法としては数多くの手法が提案されているが、総じて Sway-Rocking モデル⁸⁾ や骨組みモデル^{9),10)} のように地盤バネを用いる質点系手法と、FEM^{11)~14)}、BEM、FEM-BEM 連成モデル等¹⁵⁾、系の材料特性に立脚してモデルを構築する分布質量系手法とに二分される¹⁶⁾。いずれの手法を用いる場合も、構造物については部材の諸元から、地盤バネや地盤要素については N 値やせん断波速度などの原位置試験結果からその力学パラメータを設定し、実際に損傷を受けた実構造物をモデル化して応答解析を行うという手順が一般的である。しかし、杭体変形と地盤反力の関係や地盤変形によって杭体に生じる断面力、杭基

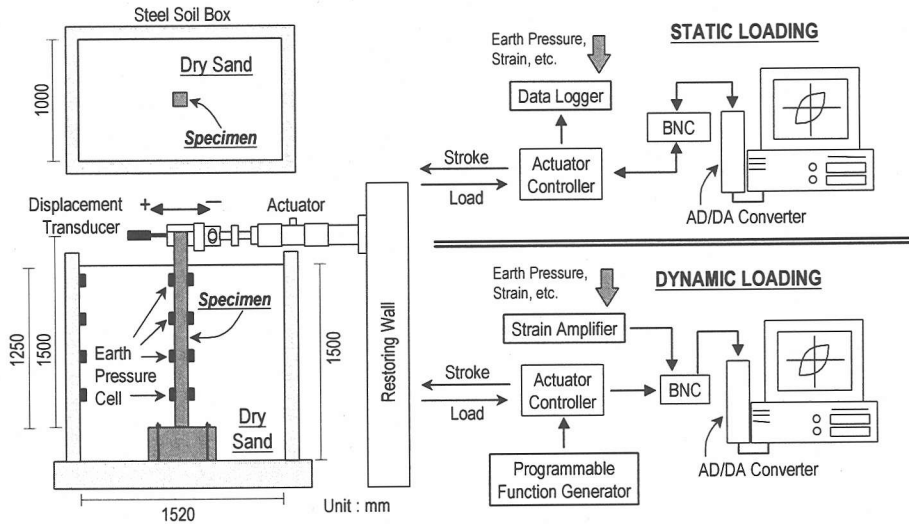


Fig.1 Experimental loading setup and system

礎～橋脚間の相対的な力の伝達など、個々の材料間・部材間の力の授受と変形状との関係が正確に評価されているとは言い難く、個々の部材間の力学的な相互作用を実験および解析の両面から検証する必要があると考えられる。

以上の背景をふまえ、鉄筋コンクリート構造物全体系の地震時弾塑性応答評価手法を確立することを最終的な目標として、本研究ではまず杭地盤間の非線形挙動に着目した。すなわち、杭頭部における水平復元力特性および地盤反力の発生に伴う杭体変形に着目し、杭体が大きく塑性化する領域までを対象とした荷重実験を行った^{26)~28)}。さらに、3次元FEM解析を用いて、杭頭部で水平力を受ける杭体と周辺地盤との間に生じる相互作用を解析的に明らかにした。

2. 砂地盤中における杭の水平荷重実験

(1) 実験の目的

杭の水平復元力特性に関する荷重実験や解析的な研究は、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^{17)~20)}。この種の実験は、実杭を用いるケース^{2),21)}と模型杭を用いて試験室で行うケース^{17),18),22),23)}がある。実地盤および実杭と等価な室内実験を行うための物性値を決定する相似則も提案されている^{24),25)}が、前節で述べたような非線形領域、大変形領域における適用性は不明である。そのため既往の検討結果の多くは、特に室内実験では、地盤材料として含水状態をコントロールした砂や粘

土を用い、杭体は鋼管杭などの弾性杭を対象として鋼製やアルミ製の模型を用いるケースが多い^{11),17),18)}。また、その荷重方法についても大半が一方単調荷重であり、杭体材料としてRCのような非線形材料を用いて正負交番荷重を行った実験報告は非常に希少である^{22),23)}。

本研究で行った荷重実験は以上の背景を踏まえ、地盤中におけるRC杭の水平復元力特性や変形状、さらには杭基礎～地盤間の相互作用を明らかにし、精度の高い評価手法を開発するための基礎的データ取得を念頭において行ったものである^{26)~28)}。

(2) 実験方法と実験要因

本研究で用いた実験システムをFig.1に示す。幅1520mm、奥行き1000mm、深さ1600mmの鋼製土槽底面に模型杭試験体を固定し、比較的単一粒径に近い粒径分布を有する気乾状態の岐阜砂を充填することにより模型地盤を作製した。試験体を底面に固定した理由は、杭体が深部の岩盤層に十分根入れされていることを想定したものである。杭頭部を地盤表面から突出させ、杭頭回転自由の状態であクチュエータによる水平荷重実験を行った。実験要因は杭体に関する要因として断面形状(矩形、円形)および杭体鉄筋比、地盤の要因として地盤剛性(緩詰め、密詰め)、荷重の要因として一方単調、正負交番および動的正弦波荷重とした。また、杭体を受ける地盤反力特性を把握するための補足的な実験として、鋼製杭を用いた実験を4ケース行った。ここでは杭体が弾性域に留まる変位レベルまでの荷重とした。全実験ケースをTable 1に示す。

Table 1 Experimental variables of test cases

No.	Material	Cross Section		Concrete Strength f_c (N/mm ²)	Reinforcement		Soil		Loading Type	Specimen Name	
		Shape	B*H (mm)		Long.	Stirrups	Condition	Rel. Dens. (%)			
1	RC	Rect.	100*100	41.9	4-D6	ϕ 3.2 @ 100mm	None	-----	Monotonic	RCR-N-M	
2				44.2						Loose	RCR-L-M
3				45.3							RCR-L-R
4				42.3							RCR-D-R
5				51.3							RCC-D-D
6				43.0							4-D10
7		Circ.	ϕ 100	44.3	4-D6		Dense	71.28	Cyclic		RCC-D-R
8				48.4			Dense	77.01	Dynamic	RCC-D-D	
9	Steel	Rect.	100*60 ($t=9.0$)	/	/	/	Loose	55.53	Reversed	STR-L-R	
10									Cyclic	73.49	STR-D-R
11		Dense	79.18				Dynamic	STR-D-D			
12			Circ.				ϕ 101.6	67.27	Rev. Cyclic	STC-D-R	

※ Shape ... Rect.: Rectangular, Circ.: Circular

※ ex) RCR-L-R: RC Rectangular - Loose - Reversed Cyclic Loading

Table 2 Mechanical properties of pile specimens and soil

No.	Specimen Name	Yield Stiffness EI ($10^{10}N^*mm^2$)	Yield Moment M_y (10^6N^*mm)	Yield Curvature ϕ_y (micro/mm)	Ultimate Moment M_u (10^6N^*mm)	Ultimate Curvature ϕ_u (micro/mm)	Relative Stiffness K_R (10^{-3})
1	RCR-N-M	5.461	2.141	39.2	2.170	235.9	/
2	RCR-L-M	5.596	2.172	38.8	2.201	241.0	
3	RCR-L-R	5.553	2.185	39.3	2.215	243.9	
4	RCR-D-R	5.445	2.146	39.4	2.176	236.7	
5	RCR-D-D	5.811	2.261	38.9	2.292	257.2	
6	RCX-L-R	8.840	3.949	44.7	3.971	176.8	
7	RCC-D-R	3.368	1.731	51.4	1.801	151.3	
8	RCC-D-D	3.509	1.775	50.6	1.853	155.4	
No.	Case Name	Initial Stiffness EI ($10^{10}N^*mm^2$)	Yield Moment M_y (10^6N^*mm)	Yield Curvature ϕ_y (micro/mm)	Moment of Inertia I (10^6mm^4)	Relative Stiffness K_R (10^{-3})	
9	STR-L-R	20.813	17.297	83.1	1.297	/	
10	STR-D-R					1.212	
11	STR-D-D					1.230	
12	STC-D-R					1.303	

用いた模型杭試験体の断面形状と配筋を Fig.2 に示す。いずれの試験体も載荷方向の投影幅（載荷幅）が矩形、円形でほぼ同一（100mm）となるように寸法を決定した。鋼製杭については載荷幅一定の条件を満たし、かつ矩形、円形で断面二次モーメントが等しくなるような中空断面とした。RC杭は軸方向鉄筋として D6 および D10 異形鉄筋を計 4 本配置し、横拘束筋には ϕ 3.2mm の鋼線を 100mm 間隔で配置した。以上の配筋は実杭の鉄筋比に極力近い値となるように決定した。また、本実験では試験体のせん断スパンがケース毎に異なることを想定して、最も厳しいせん断スパン 250mm（＝地表面からの突出長）でもせん断耐力が曲げ耐力を十分に上回るよう設計したことを付記する。各試験体断面の力学特性を Table

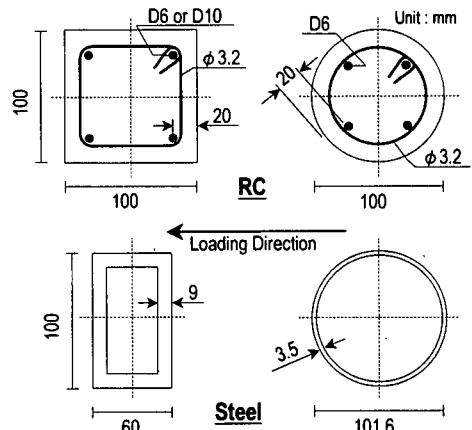


Fig.2 Cross sections of specimens

Table 3 Mechanical properties of reinforcement

Diameter	Yield Strain $\epsilon_y (\mu)$	Yield Stress $f_y (N/mm^2)$	Young's Modulus $E_s (N/mm^2)$
D6	2213	378.9	171270.4
D10	2300	363.1	157886.0

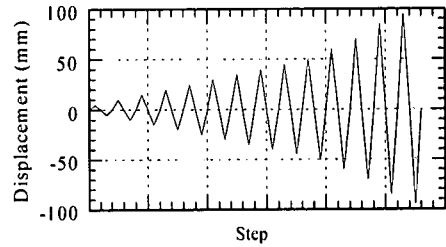
Table 4 Properties of Gifu sand²⁹⁾

Specific Gravity	2.643
Maximum Diameter (mm)	0.84
60% Diameter D60 (mm)	0.35
30% Diameter D30 (mm)	0.31
10% Diameter D10 (mm)	0.22
Uniformity Coefficient U_c	1.59
Maximum Void Ratio	1.126
Minimum Void Ratio	0.717

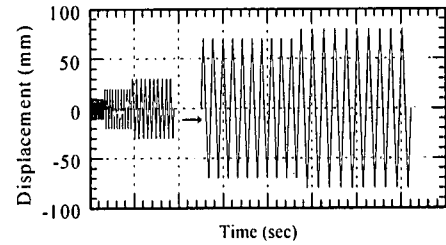
2に、使用した鉄筋の機械的性質を Table 3 にそれぞれ示す。Table 2 における RC 杭のモーメントや曲率は、Table 3 に示した特性値を用い、ファイバーモデルを適用した断面計算によって算定した。

地盤剛性は、乾燥砂地盤の締固め状態をコントロールすることによって変化させた。緩詰めの場合では、バケットを用いて土槽上一定の高さから砂を自由落下させ、締固めは行っていない。密詰めの場合では同様に砂を落下させ、地盤厚 300mm ごとにコンクリートブロックを用いて一定回数、均一に締固める動作を繰り返すことにより地盤を作製した。ケース間で大きな差が発生しないよう、全く同一の手順や締固め回数としている。用いた岐阜砂の基本的物性値²⁹⁾を Table 4 に、各ケースで作製した地盤の相対密度を Table 1 に併せて示す。

載荷方法について、静的正負交番載荷実験における制御変位の概略を Fig.3(a)に示す。振幅を 5mm または 10mm ピッチで変化させ、繰返し回数は各サイクル 1 回とした。動的正弦波載荷時は Fig.1 に示すように、波形作成装置から 0.002 秒間隔で波形信号を発生し、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。動的正弦波載荷実験における制御変位の概略を Fig.3(b)に示す。振幅は 10mm ピッチで変化させ、各振幅 10 サイクルの繰返し載荷とした。また、RC 構造物や地盤表面における速度応答スペクトルは通常想定される周期帯でほぼ一定値であるという報告³⁰⁾をふまえ、各サイクルで最大変位速度が一定値 (200mm/sec) となるように載荷周波数を設定した。なお、地盤材料の物性は一般にひずみ依存性やひずみ速度依存性を有しているが、



(a) Static loading test



(b) Dynamic loading test

Fig.3 Input displacement patterns

乾燥砂地盤の(せん断)剛性に影響を及ぼすのは載荷速度よりもむしろ繰返しひずみ振幅に伴う締固め作用であると言われている³¹⁾。減衰特性についても同様であり、総じて乾燥砂地盤においては繰返し載荷による影響が支配的になることが予想される。これに対し粘性土におけるせん断剛性は、ひずみ速度の上昇に伴い増加し、繰返しひずみ振幅の増大に伴い低下すると報告されている³¹⁾。以上を踏まえ、本動的正弦波実験は乾燥砂地盤中の RC 杭の復元力特性における載荷速度依存性の有無を確認し、併せて繰返し載荷依存性を検討することを目的として行ったものである。

なお、実験における測定項目として、杭頭反力、水平変位の他に、杭体の深さ方向曲率分布を測定するために、試験体表面および軸方向鉄筋にひずみゲージを貼付し、杭体変形時の主働・受働土圧を測定するために試験体表面に土圧計を設置した (Fig.1)。

一般に実地震時に発生する杭体の変形は、地上構造物の応答に伴う慣性力による影響と、基盤波入射に伴う地盤自体の(せん断)変形による影響とがあると言われている。前者のみを対象とした実験としては周辺地盤固定の条件下における杭頭水平載荷実験^{11),22),23)}が、後者の影響も加味した実験としてはせん断土槽を用いた載荷実験や振動実験^{32),33)}が行われるが、本実験は前者に属する。すなわち上部構造応答による慣性力が杭頭部に作用することを想定して、地盤全体としてのせん断変形を拘束した状態で水平載荷を行ったものである。また、2.(2)で述べ

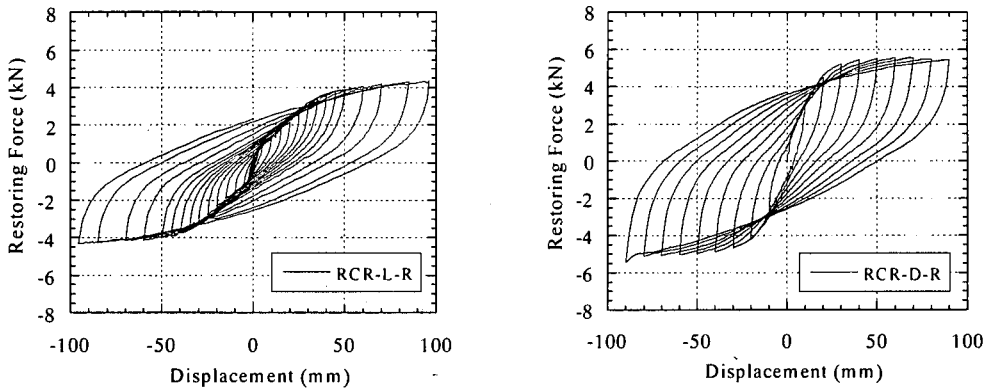


Fig.4 Restoring force vs. displacement hysteresis curves

たように、本実験は杭体が岩盤層に十分根入れされていることを想定したものであるが、根入れされていない杭の場合は杭体の変形状態や地盤反力分布などが変化しうることを記しておく。さらに、実構造物では杭頭部はフーチングに剛結され、回転が拘束された状態にあるが、今回は簡単のため杭頭回転自由の条件下で載荷実験を行っている。本研究は主として杭体と周辺地盤との相対的な力の伝達に焦点を置いており、これが評価出来れば杭頭部や杭基部の条件は単なる境界条件として処理出来ることを前提として議論を進めるものである。

(3) 相対剛性の定義

杭体損傷位置が杭体と周辺地盤の相対剛性に依存するとの報告^{26)~28)}を踏まえ、本実験における全ケースの相対剛性 K_R をここで定義しておく。杭体や地盤の非線形性を考慮した定義は未だ例を見ないが、RC杭の場合は初めに鉄筋降伏を生じた断面から損傷が拡大していくこと、地盤材料については線形/非線形の遷移点(降伏点)が不明瞭であること等を踏まえ、杭体については降伏剛性、地盤については初期剛性を用いて評価することとし、Chen and Poulos³³⁾が用いた無次元量 K_R を適用した。

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

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 : 地盤の初期弾性係数

L : 杭の根入れ長

地盤の弾性係数 E_s は次の手順で算定した。すなわち、作製した地盤の間隙比 e から以下の式(2)²⁹⁾を用い

て初期せん断剛性 G_0 を求め、弾性体の関係式(3)により弾性係数 E_s を算定した。また、根入れ長 L については全ケースを通じて1250mmとして計算した。

$$G_0 = 630 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma'_c{}^{-0.321} \quad (2)$$

$$E_s = 2(1 + \nu)G_0 \quad (3)$$

ここに、 G_0 : 初期せん断剛性

e : 間隙比

σ'_c : 鉛直拘束圧

ν : ボアソン比 (=0.3)

地盤のボアソン比 ν は0.3とし、拘束圧 σ'_c は地表面からの深さ350mm付近の平均的な値を用いた。使用した $E_p I_p$ の値および K_R の算定結果はTable 2に示してある。平均N値10程度の地盤に施工された杭径1m、根入れ長10mの実杭(RC杭)において $K_R = 0.7 \times 10^{-3}$ 程度となることから、本実験における杭体および地盤の条件は、寸法の影響を無視すれば、RC杭のケースでは地盤剛性がやや高め、鋼製杭のケースでは杭体剛性が高めと判断される。また、道路橋示方書³⁾において定義されている杭の特性値 β は、やはり杭と周辺地盤との相対剛性を反映する係数であると考えられるが、物理的な意味がより明確であるという理由から前述の無次元量 K_R を用いて評価することとした。

なお、本指標を用いた場合、杭径が異なるケースでも剛性 $E_p I_p$ が同じであれば全く同等の評価となる。しかしながら実際には杭体の載荷幅によって地盤反力特性が変化し、その依存性についても研究が行われている⁴²⁾。本実験ではこの影響については研究対象外とし、載荷幅は全試験体で同一としたことを付記する。

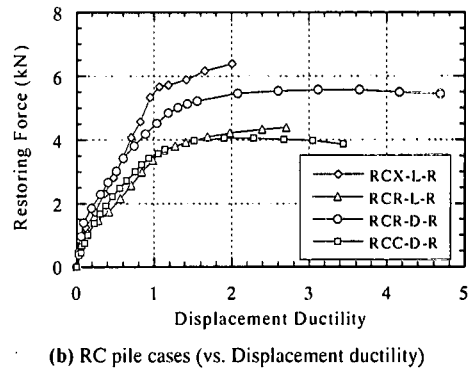
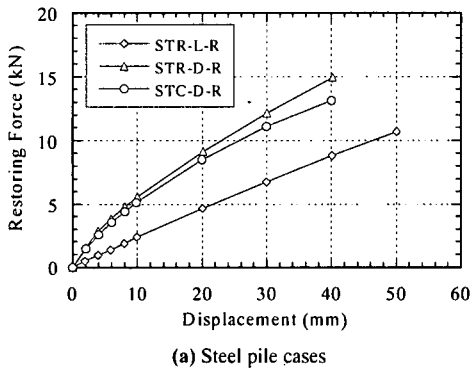


Fig.5 Restoring force vs. displacement skeleton curves

3. 静的載荷実験結果

ここでは前章で挙げた全実験ケースのうち、主に静的正負交番載荷を行ったケース (No.3, 4, 6, 7, 9, 10, 12) について考察を行う。

(1) 杭頭復元力-変位関係

杭頭復元力-水平変位関係の履歴曲線の例を Fig.4 に示す。図から分かるように、骨格曲線は通常の RC 部材のようなトリリニア型の形状を示し、除荷直後に急激な荷重低下を生じつつ大きなループを描く。この基本特性は RC 杭を用いた全てのケースに共通している。また、特に地盤が密なケースにおいて杭体降伏後に正負非対称な残留変位 (復元力が 0 となる変位) が発生している。この現象については、特に今回用いたような乾燥砂地盤の変形特性が大きく影響しているものと考えられ、このような地盤の非対称履歴モデルを構築する試みも行われている³⁴⁾。また、緩詰め地盤のケースでは履歴ループが平行四辺形となるのに対し、密詰め地盤のケースでは逆 S 字型〜スリップ型の形状を示すことが確認された。これは、周辺地盤が自立するケースほど、杭体と地盤との間に隙間が生じやすいために履歴特性がスリップ型に近くなるものと考えられる。

各ケースの復元力-変位関係の骨格曲線を Fig.5 に示す。Fig.5(a)は鋼製杭を用いた 3 ケース、Fig.5(b)は RC 杭を用いた 4 ケースの結果を示しており、Fig.5(b)については杭頭変位を降伏変位で除した塑性率に対してプロットした。その際用いた RC 杭の 4 ケースにおける降伏変位と降伏荷重を Table 5 に示す。降伏変位については、杭体軸方向鉄筋ひずみの値が降伏ひずみに達した点 (初期降伏) として定義した。Fig.5(a)より、地盤が緩詰めの場合 (STR-L-R) ではほぼ直線状の骨格曲線を示すのに

Table 5 Yield displacement and load in RC pile cases

Specimen Name	δ_y (mm)	P_y (kN)
RCX-L-R	42.3	5.48
RCR-L-R	35.5	3.46
RCR-D-R	19.2	4.46
RCC-D-R	26.1	3.51

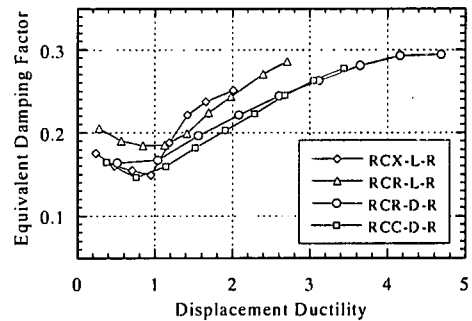


Fig.6 Equivalent damping factor

対し、密詰めとした STR-D-R や STC-D-R では杭体が弾性域内に留まっているにも拘わらず、骨格曲線は緩いカーブを描き、地盤の非線形性の影響が表れている。また、杭体の断面形状 (矩形、円形) の影響については、変位の増加と共に復元力に若干の差が生じるものの、ほぼ同等の復元力を有することが分かる。Fig.5(b)において各ケース間で最大塑性率が異なっているが、これはアクチュエータの最大ストローク ($\pm 100\text{mm}$) によるものであり、最大点は必ずしも終局変位を示していない。2.(3)で定義した相対剛性 K_R の値が最も大きい RCX-L-R が最も大きな復元力を示しているが、最大復元力は必ずしも K_R の値と比例関係にあるわけではなく、例えば K_R 値が比較的小さい RCR-D-R でも大きな復元力を示しているのが分かる。

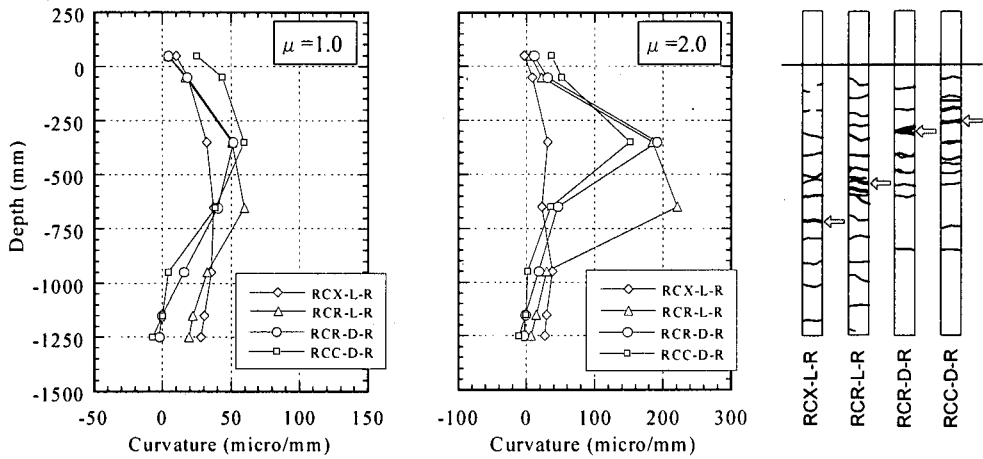


Fig.7 Distributions of curvature and cracks

各ケースの履歴ループより算定した等価減衰定数の変化を Fig.6 に示す。降伏後の減衰は同じ塑性率で比較すると地盤が緩詰めめのケースの方が大きくなっている。この原因は、同じ塑性率でも杭頭変位は緩詰め地盤のケースの方が大きく、地盤に発生するひずみが明らかに大きいためである。特に乾燥砂地盤の減衰定数は 1% 程度のひずみレベルでも 10~20% 程度にまで達する³¹⁾ ことを考慮すると、本実験における減衰特性は主として地盤自体の減衰特性に支配されていると考えられる。このことは、実際の杭-地盤系においても、地盤のひずみレベルに応じて減衰特性を評価する必要があることを示唆するものである。

(2) 杭体曲率分布

杭体の軸方向鉄筋に貼付したひずみゲージの測定結果から各断面における曲率を算定した。塑性率 1.0 および 2.0 付近における各ケースの曲率分布を Fig.7 に示す。この図より、相対剛性 K_R が小さいほど浅い位置に局部的に損傷が集中し、 K_R の増加に伴って深い方へ広く分布している。この性状は Fig.7 に曲率分布と併せて示したひび割れ図において、 K_R の大きい RCX-L-R で全域に渡ってひび割れが分布している点からも伺うことが出来る。

Fig.7 のひび割れ図において矢印が指し示す点は、実験後の試験体目視観察により、最も損傷が大きかった位置を示している。図より相対剛性の増加に伴い最大損傷深さが深い方へシフトしていくことが分かる。この最大損傷深さを K_R に対してプロットした結果を Fig.8 に示す。ここで、鋼製杭の最大損傷深さは測定された曲率分布より決定したものである。 K_R の変化に伴い、最大損傷深さがほぼ比例的にシ

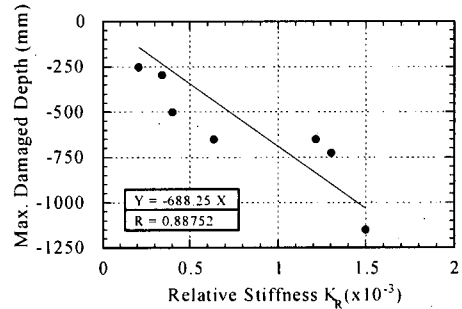


Fig.8 Maximum damaged depth

フトすることが分かる。このことは、ここで示した 7 ケースにおいて、杭体降伏までは杭-地盤間の応力伝達がほぼ同様のメカニズムの下で行われることを示唆するものである。

(3) 杭-地盤間における力の伝達メカニズム

正負交番载荷を行った RC 杭 4 ケース (RCX-L-R, RCR-L-R, RCR-D-R, RCC-D-R) における降伏荷重と、(2) で述べた最大損傷深さとの関係について、力の伝達メカニズムをふまえた簡単な考察を試みる。すなわち、Fig.9 に示すように地表面から最大損傷深さまでの範囲では土圧が直線分布すると仮定し、さらに (2) で述べた最大損傷深さにおいて杭体モーメント分布が極値を取ると仮定すると、この位置でせん断力 V が 0 となるため、杭頭復元力と土圧による合力は釣り合い条件を満たす。また、杭頭復元力 (降伏荷重) および土圧によって最大損傷深さ位置で発生する合モーメント M は杭体断面の降伏モーメント M_y (Table 2 参照) に等しい。以上の釣り合い条件は、以下の式(4)~(6)のように表される。

$$Q = q_{\max} \cdot BL / 2 \quad (4)$$

$$V = P - Q = 0 \quad (5)$$

$$M = P \cdot (L + H) - Q \cdot L / 3 = M_y \quad (6)$$

ここに、P : 杭頭復元力

Q : 地盤反力の合力

L : 最大損傷深さ

q_{\max} : 最大損傷深さにおける土圧

上式より算定した降伏荷重を実験結果と併せて Table 6 に示す。この結果より、最大損傷深さが確定できれば、上記のような簡易な方法によって杭頭降伏荷重をある程度推定することが可能であると言える。このことは、(2)で述べた最大損傷深さが杭頭反力を大きく左右し、杭体-地盤間の相互作用を如実に反映する指標であることを意味しており、地盤の非線形性を考慮しつつ、最大損傷深さを精度良く評価することの重要性を示唆するものである。

(4) 静的載荷実験のまとめ

杭頭復元力特性は杭体の変形や杭-地盤間の局所的な土圧分布、およびそれに伴う最大損傷深さなど、あらゆる要因が反映された特性である。その観点で、今回行った静的載荷実験とその考察から以下の点が結論される。

鋼製杭の載荷実験結果から、今回の実験の範囲内では断面形状(矩形, 円形)が杭頭復元力特性に及ぼす影響はほとんど見られなかった。RC 杭の杭頭復元力については、杭体と周辺地盤との相対剛性のみでその大小を表現することは出来ず、杭-地盤間の力のやり取りを厳密に評価する必要があると考えられる。また、周辺地盤が自立するケースほど履歴特性は逆 S 字〜スリップ型へと移行する傾向が確認された。その履歴ループより算定した等価減衰定数の変化から、系全体の減衰特性は主として地盤のひずみレベルに依存することが明らかとなった。

杭体の深さ方向曲率分布は、杭体と周辺地盤との相対剛性に依存する。すなわち、相対剛性の大きいケースでは深い位置まで損傷が広く分布し、相対剛性の小さいケースほど浅い位置に局所的に損傷が集中する。これと関連して、杭体の損傷が最も大きくなる深さ(最大損傷深さ)も相対剛性に依存し、地盤に対する杭の剛性が大きくなるほど、最大損傷位置は深い方へほぼ線形的にシフトする。またこの最大損傷深さをを用いて、杭-地盤間の力の伝達をふまえた簡単な考察により降伏荷重が比較的精度良く推定可能であることから、最大損傷深さは杭体と地盤との相互作用を顕著に表す指標であり、これを正確

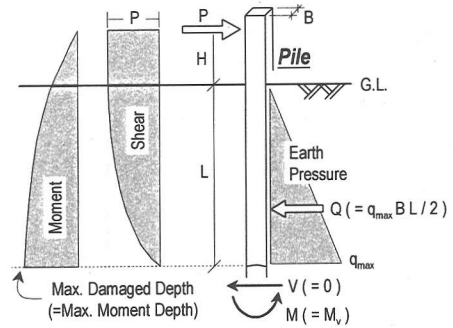


Fig.9 Mechanism of force equivalence

Table 6 Calculated results of yielding load

Specimen Name	Maximum Damaged Depth (mm)	Yield Load [Cal] (kN)	Yield Load [Exp] (kN)	Cal / Exp
RCX-L-R	650	5.78	5.48	1.05
RCR-L-R	500	3.75	3.46	1.08
RCR-D-R	295	4.80	4.46	1.08
RCC-D-R	250	4.15	3.51	1.18

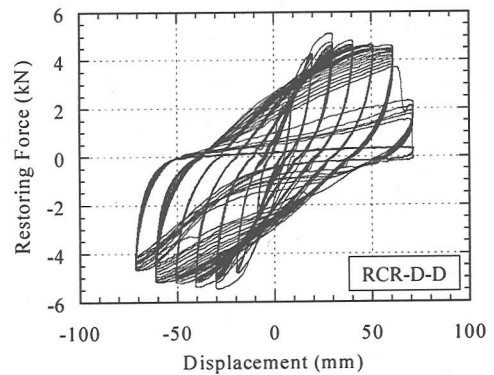


Fig.10 Restoring force vs. displacement hysteresis curve

に評価することが、杭頭復元力特性の評価において非常に重要であると言える。

4. 動的正弦波載荷実験結果

ここでは、動的正弦波載荷 (No.5, 8, 11) を行ったケースについて、主として RCR-D-D を例に静的実験結果 (No.4, 7, 10) と比較・考察する。

(1) 杭頭復元力-変位関係

Fig.10 に杭頭復元力-変位関係の履歴曲線を、RCR-D-D を例として示す。静的載荷時と同様に大き

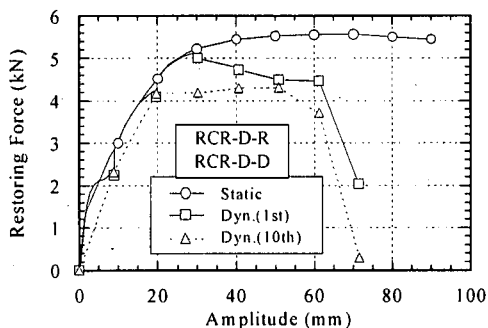


Fig.11 Restoring force vs. displacement skeleton curves

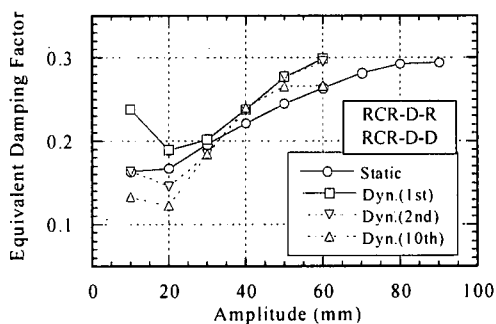


Fig.12 Variation of Equivalent damping factor

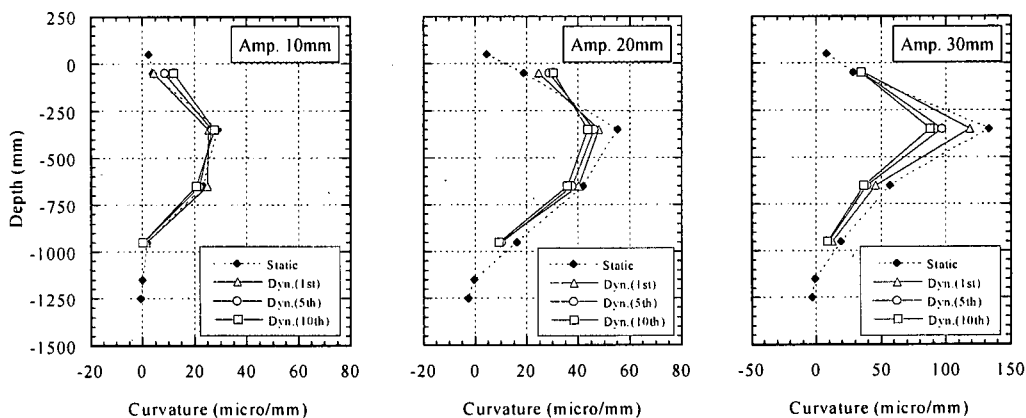


Fig.13 Curvature distributions (RCR-D-D vs. RCR-D-R)

なループを描き、変位振幅 70mm の第 1 サイクルで急激な復元力の低下が見受けられる。Fig.11 に復元力-変位関係の骨格曲線を示す。振幅が小さい範囲では、振幅最大点において静的に比較して復元力が若干低めとなっているが、これは小振幅時には杭頭変位速度の変化が非常に大きいことから、杭頭近傍の砂地盤に慣性力が発生する影響とアクチュエータの制御能力に伴う誤差が含まれているものと考えられる。杭体降伏までは繰返しによる復元力の大きな低下も見られず、若干静的時の骨格よりも大きめの杭頭反力を示すものの、ほぼ静的と同等の骨格曲線をたどる。以上の現象は鋼製杭による実験結果からも判断される。また、杭体降伏後は静的に比べ徐々に復元力が低下していき、さらに同振幅の繰返し载荷によって大きく低下する。この結果から、今回の実験条件では载荷速度が復元力に及ぼす影響は見られず、繰返し载荷による影響が支配的であると考えられる。具体的には、(2) で後述するように、杭体降伏前には周辺地盤の締め固め現象に伴う地盤反力の増大、杭体降伏後にはかぶりの剥落および軸方向鉄筋の疲労破断に伴う杭体断面力の低下が復元力特性に影響を及ぼすと言える。

Fig.12 に等価減衰定数の変化を示す。杭体降伏前においては、各振幅第 1 サイクルでのみ静的载荷時よりも大きな等価減衰定数を示すが、これは前述の復元力が低めになることと関連して、変位速度による影響と考えられる。その後、第 2 サイクルで急激に値が小さくなり、以降、静的载荷時の値よりも若干小さな値へ収束する。また、杭体降伏後は静的载荷時に比べ多少大きめの値をとり、サイクルの進行と共に若干低下して静的時とほぼ同等の値となる。復元力も同様の傾向を示していることから、杭体降伏後の減衰特性についても、载荷速度よりむしろ繰返し载荷による影響が支配的であると言える。

なお、断面形状が及ぼす影響については、静的・動的の復元力や減衰定数の比およびその変化傾向が、矩形・円形でほぼ同等の性状を示していることから、断面形状の影響は静的な復元力特性について評価されるべきであると考えられる。

(2) 杭体曲率分布と損傷状況

各振幅最大変位時における杭体曲率分布を、静的時の測定結果と併せて Fig.13 に示す。杭体降伏前(振幅 10mm)について、浅い位置での曲率はサイクル

数と共に増加するのに対し、深い位置では低下している。土圧の測定結果を踏まえると、この現象は杭体周辺地盤の締固めに起因しており、周辺地盤から受ける土圧の増加によって、損傷が浅い位置において進行するものと考えられる。RC 杭の2 ケースにおける杭体の損傷状態について、最大損傷深さは基本的に同一条件の静的荷重の場合とほぼ同じであることから、杭体降伏までは上述の点を除き静的・動的性状にそれほど大きな差異がないことを示している。

RC 杭の杭体降伏後（振幅 20mm 以降）について、局所的に曲率の急激な増加が認められた。Fig.14 に示す荷重終了後の試験体の状況を踏まえると、変位振幅レベルの増大および各振幅 10 サイクルの繰返し変形に伴って、かぶりコンクリートが剥落し、断面内の鉄筋が大きな塑性変形を繰返し受けることに起因している。このため、大変形領域で軸方向鉄筋の疲労破断が生じており、これが Fig.10 において変位振幅 70mm で急激な復元力低下が発生している原因であると考えられる。

(3) 動的荷重実験のまとめ

本動的正弦波荷重実験から得られた知見を、静的荷重実験と比較しながら以下に述べる。

まず、荷重速度が復元力-変位関係に及ぼす影響は小さいが、杭体降伏前の履歴減衰特性に若干の影響を及ぼすと考えられる。また、繰返し荷重の影響としては以下のようなメカニズムが考えられる。すなわち、杭体降伏前では杭体の繰返し変形によって杭体周辺地盤に締め固め現象が発生し、作用土圧が上昇する。これに伴い浅い位置での杭体損傷が進行し、杭体断面力が増大する。また、杭体降伏後はかぶりコンクリートの剥落によって圧縮断面が減少し、サイクルの進行と共に復元力は低下する。さらに変位レベルが増大すると、断面内軸方向鉄筋の塑性変形が進行し、最終的に鉄筋が疲労破断して急激に復元力を失う。

上述の通り、本実験の範囲内では、総じて杭頭復元力-変位関係に及ぼす荷重速度の影響は小さく、同一振幅の繰返しによる影響が卓越していると考えられる。鉄筋コンクリート部材単体の復元力特性は本実験で設定した程度の荷重速度では、降伏荷重が若干上昇する点を除きればそれほど大きな荷重速度依存性がない³⁵⁾ことを踏まえると、以上の結果は、地盤中における杭の水平復元力特性は各振幅数サイクルの繰返しを含む静的正負交番荷重実験によっておよそ評価可能であることを示唆するものである。しかし、2. で述べたように、地盤材料のせん断剛性におけるひずみ速度依存性は、本実験で用いたよ

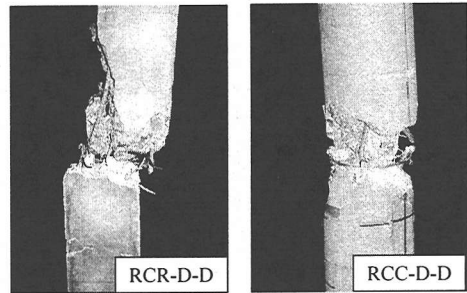


Fig.14 Damage states in dynamic loading tests

うな乾燥砂よりもむしろ湿潤砂や粘性土において顕著であること、また粘性土では繰返しひずみ履歴に伴い、逆に剛性が低下する³¹⁾こと等を踏まえると、本節で述べた結果のみでは普遍的な結論は出来ない点に注意が必要である。

5. 3次元有限要素法による解析

(1) 解析の目的と意義

1. で述べたように、本研究は鉄筋コンクリート構造物全体系の応答評価手法の確立を将来に見据え、特に杭頭で水平力を受ける際の杭-地盤間の挙動に着目し、これを精度良く追跡しうる手法の開発を目標としている。既存の解析手法における地盤のモデル化として、骨組み解析では地盤バネに対して地盤反力係数と極限地盤反力によって非線形性を与えるケースが多く^{10),16)}、FEM などの離散化解析では双曲線モデルなどのせん断応力-せん断ひずみ関係を地盤要素に与えるケースが多い^{13),14)}。これらのモデルは基本的に地盤単体の要素試験もしくは原位置試験に基づいて構築されたものである。しかし前節まで述べてきたように、杭体と地盤との間には局所的な応力状態が分布して発生し、これらの応力状態を含めた杭-地盤間の力学的な相互作用を正確に評価可能かどうかの検証は十分に行われていない⁶⁾。ここでは3次元有限要素解析^{36),37)}によって、実験結果をどの程度評価可能かを確認すると共に、性能照査への適用を見据えた推定精度向上のために必要な要因を抽出することを目的として解析を行った。なお、解析は RC 杭を用いた静的荷重実験 6 ケースについて行ったが、ここでは主に正負交番荷重を行った 4 ケースについて考察する。

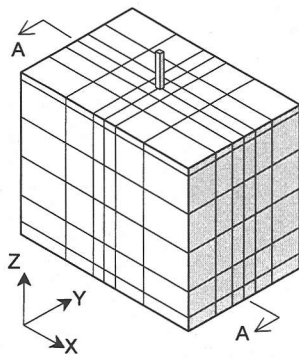


Fig.15 Finite element modeling

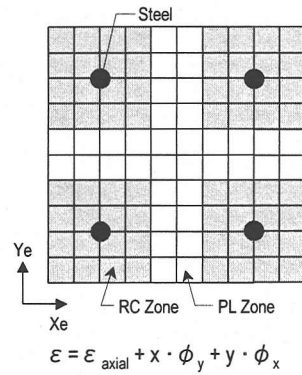
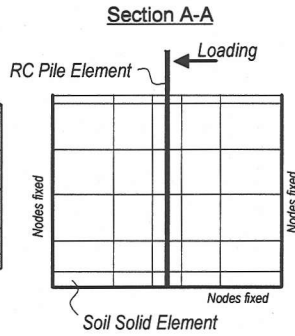


Fig.16 Zoning of cross section of RC pile element^{38),40)}

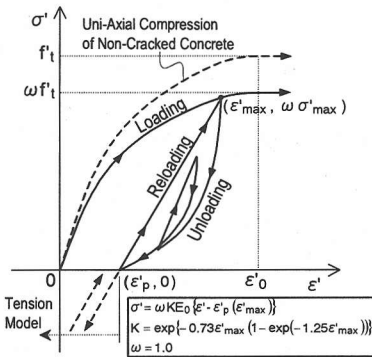


Fig.17 Constitutive law of concrete^{38)~40)}

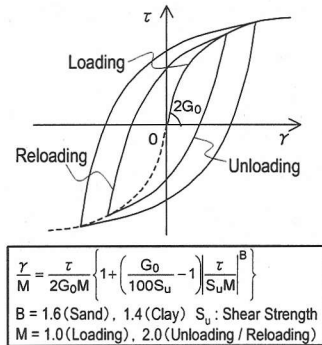
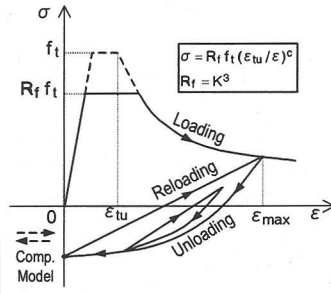


Fig.18 Constitutive law of soil⁴¹⁾

(2) 解析手法とモデル化

解析に用いた3次元有限要素メッシュを Fig.15 に示す。杭体は3節点 RC 梁要素を用いてモデル化した。この RC 梁要素はいわゆるファイバーモデルに立脚しており、断面内の平均軸ひずみと2方向曲率から当該断面における軸力と曲げモーメントを算定する³⁸⁾。その際、部材断面の配筋状態と鉄筋径に応じて Fig.16 に示すようなセル分割とゾーニング⁴⁰⁾を行うこととし、断面内各セルにおける軸応力-軸ひずみ関係として Fig.17 に示すようなコンクリートの圧縮・引張構成則が導入されている^{36)~39)}。なお、要素のせん断変形については線形を仮定している。また、地盤は20節点ソリッド要素を用いてモデル化しており、要素のせん断応力-せん断ひずみ関係(偏差応力-偏差ひずみ関係)については Fig.18 に示す Ohsaki モデル⁴¹⁾が導入されている。なお、体積応力-体積ひずみ関係については線形弾性が仮定されており、初期せん断剛性とポアソン比に応じて体積弾性係数を算定する。また、前節までの実験結果で杭体背面に隙間が生じ地盤が沈下することを報告しているが、本解析では簡単のため、RC 梁要素と地盤ソリッド要素とは完全付着とし、ジョイント要素は設

置していない。

RC 梁要素については、断面配筋に応じたセル分割を行い、コンクリート強度や鉄筋の力学特性を入力パラメータとする。また、地盤要素のパラメータとしては、初期せん断剛性およびせん断強度を入力する。ここで、初期せん断剛性は2。(3)で示した式(2)を用いて深さ毎に算定し、せん断強度については粘着力および内部摩擦角に関する既往の測定結果²⁹⁾を元に、次式(7)に示す Mohr-Coulomb の破壊規準によって深さ毎に算定した。

$$\tau_f = c + \sigma'_c \cdot \tan \phi \quad (7)$$

ここに、
 τ_f : 地盤のせん断強度
 c : 粘着力
 ϕ : 内部摩擦角
 σ'_c : 鉛直拘束圧

(3) 解析結果とその推定精度に関する検討

復元カー杭頭変位関係の履歴曲線を、RCR-L-R および RCR-D-R を例にとって Fig.19 に、また、全4ケースの骨格曲線を Fig.20 にそれぞれ示す。図中に

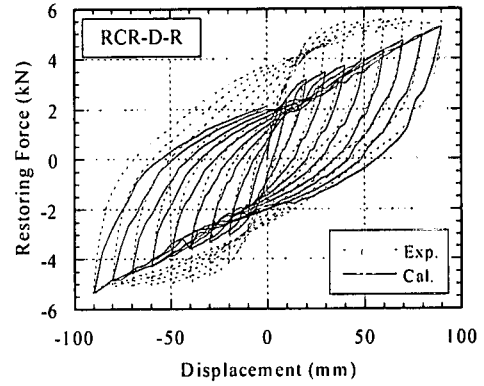
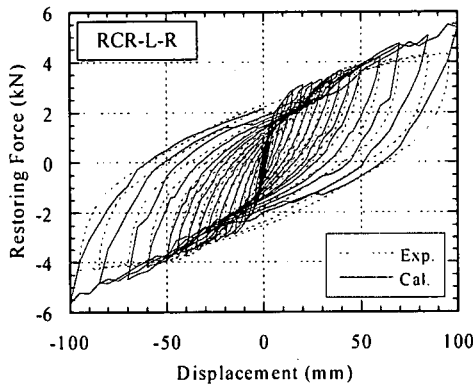


Fig.19 Restoring force vs. displacement hysteresis curves

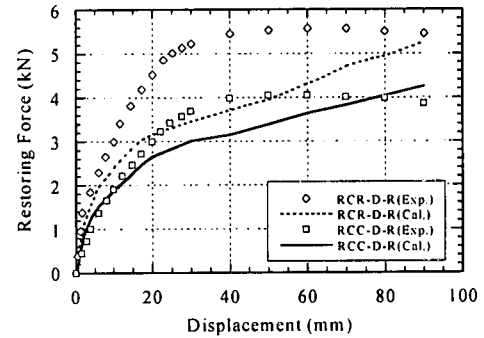
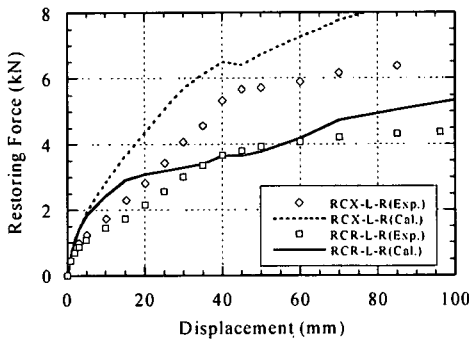


Fig.20 Restoring force vs. displacement skeleton curves

は実験結果も併せて示した。また、解析結果から得られた降伏変位および降伏荷重の値を実験結果と併せて Table 7 に示す。解析における降伏変位についても実験結果と同様、杭体断面の鉄筋位置におけるひずみが降伏ひずみに達した点として定義している。これらの結果より、緩詰め地盤のケースでは復元力の大きさはある程度一致しているものの、変位については小さめに評価されている。一方、密詰め地盤のケースでは逆に変位に対して復元力を過小評価している。また、全ケースを通じて、大変位領域における剛性が高くなっており、復元力が増加し続ける結果となっているが、これは大ひずみ域における地盤構成則の問題であると考えられる。また、履歴ループに関しても全ケース通じて実験結果よりも小さめのループを描いている。履歴曲線から求めた等価減衰定数の変化を Fig.21 に示すが、系の減衰性状をかなり過小評価していることが分かる。

一方、杭体の変形性状について、Fig.22 に塑性率 1.0 および 2.0 時点における曲率分布を示す。ここで、解析結果において塑性率 1.0 および 2.0 となる点は、Table 7 に示した降伏変位を用いて決定した。また、3. (2) で述べたように、実験結果において大ひずみ

Table 7 Comparison of yield displacement and load between Experiment and Calculation

Specimen	Experiment	Calculation
RCX-L-R	42.3 mm	24.0 mm
	5.48 kN	4.90 kN
RCR-L-R	35.5 mm	15.0 mm
	3.46 kN	2.84 kN
RCR-D-R	19.2 mm	15.0 mm
	4.46 kN	2.90 kN
RCC-D-R	26.1 mm	19.5 mm
	3.51 kN	2.64 kN

の発生した位置での曲率値は精度があまり良くないと考えられるため、曲率値の大きな領域についてはその深さのみに着目する。緩詰め地盤のケース (RCX-L-R, RCR-L-R) では、最大損傷深さは実験と解析でほぼ一致している。3. (3) における考察結果より、杭頭復元力は杭体断面特性と最大損傷深さを用いてほぼ評価できることをふまえると、緩詰め地盤のケースで復元力の値を比較的推定できている理由は、最大損傷深さがほぼ一致している点にあると考えられる。またこれら 2 ケースの曲率分布において、深部における曲率値は実験値を過小評価して

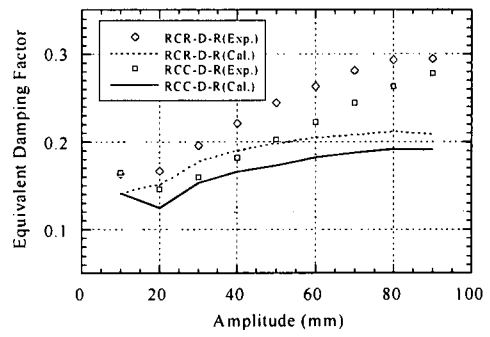
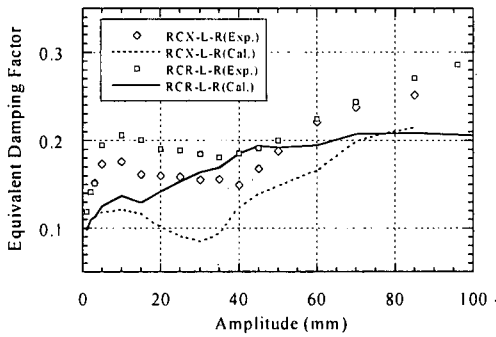


Fig.21 Variation of equivalent damping factor

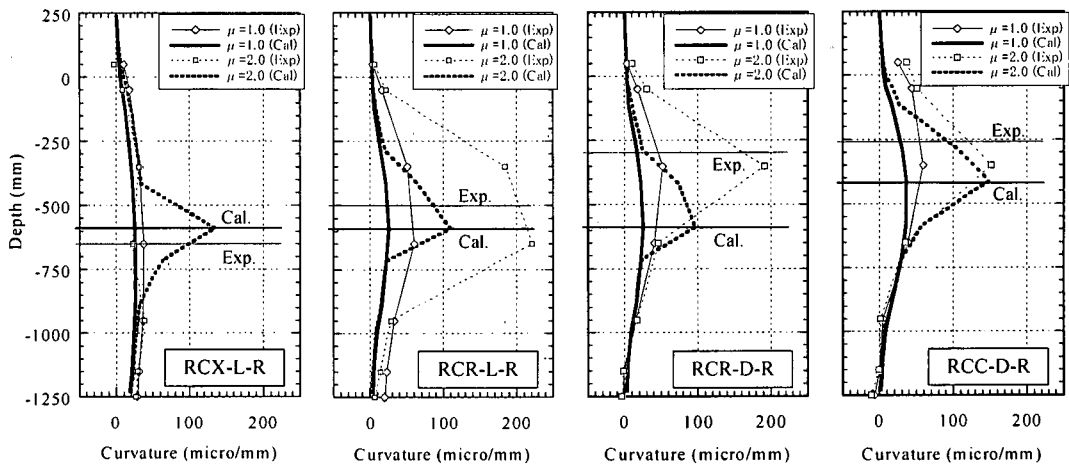


Fig.22 Curvature distributions

いる。この値が杭頭変位に大きく寄与することを考慮すると、緩詰め地盤のケースで杭頭変位が過小評価されている原因は、深部における杭体変形が正確に追跡されていない点にあると言える。一方、密詰め地盤のケース (RCR-D-R, RCC-D-R) において、深部における曲率分布が高い精度で推定されているため、杭頭変位が比較的一致する結果となっているが、最大損傷深さが実験結果よりも深い位置となっている。3. (3)における考察をふまえると、この点が杭頭復元力を過小評価している原因であると考えられる。

(4) まとめ

以上、砂地盤中における鉄筋コンクリート杭の復元力特性と変形状について実験結果との比較を行った。現状の地盤解析分野で期待される解析精度、今回行った解析のパラメータ設定、要素分割等をふまえると、本解析手法はある程度の推定精度を有していると結論される。さらに、杭体に生じる最大損

傷深さおよび杭体の変形状態が精度良く推定されることが、復元力特性を正確に評価するために重要な点であることが明確となった。しかし、この種の解析手法が性能照査型設計の過程で用いられることを勘案すると、最低限、一般的な鉄筋コンクリート構造物レベルの解析精度が必要となることも事実である。以上の観点から、今後検討・改良すべき点として以下の点が挙げられる。まず第1に、杭体と地盤を完全付着として解析を行ったことが挙げられる。実験においては杭体背面で地盤との間に隙間が発生し、杭体に作用する背面土圧はほぼゼロとなっているのに対し、今回用いた解析モデルでは杭体背面に引張応力が作用する。この点に関しては杭体要素と地盤要素の間にジョイント要素を配置するなどして対応する必要がある。第2に、地盤物性値の算定式に関する問題が挙げられる。地盤のせん断剛性を算定した式(2)は地盤単体の三軸せん断試験に基づいて導出された式であるが、構造物近傍では局所的な地盤変形が生じるため、実際の杭体周辺の応力状態を

再現できなかったことが考えられる。また、せん断強度については簡略的に式(7)の Mohr-Coulomb 式によって算定したが、ここで鉛直拘束圧として各深さにおける土被り分の自重を与えている。しかし密詰め地盤ではコンクリートブロックを用いて強制的に締め固めを行ったために、実際には自重よりも拘束圧が大きく、結果的にせん断強度を過小評価していることが予想される。そして第3に、地盤モデル自体の問題が挙げられる。今回用いた Ohsaki モデルはやはり地盤単体に対して規定されたせん断応力-せん断ひずみモデルであること、体積変形に関しては線形弾性を仮定していること等により、本実験のように杭体周辺地盤に生じる局所的な変形は追跡できない可能性が考えられる。今後は以上の点を考慮した上で、さらに検討を進める必要がある。

6. まとめ

本研究では、基礎応答が橋脚応答や橋梁全体系の応答に及ぼす影響を定量的に評価する手法の開発を将来に見据え、その第1段階として杭-地盤間の相互作用を正確に把握すべく、乾燥砂地盤中における RC 単杭の杭頭水平載荷実験を行い、その復元力特性と変形状について考察した。また、実験条件に合わせた3次元有限要素解析を行い、解析手法の推定精度について検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 今回の静的載荷実験の範囲内では、杭体の断面形状が復元力特性に及ぼす影響は小さく、載荷幅と剛性が同じであればほぼ同等の復元力特性を示す。
- 2) 履歴ループの形状は地盤が自立するケースほど逆 S 字～スリップ型へと移行し、杭体～地盤界面の挙動が大きく影響する。
- 3) 系全体の減衰特性は主として周辺地盤のひずみレベルに依存する。
- 4) RC 杭の最大損傷位置は、杭と地盤の相対剛性の増加と共に浅い位置へシフトし、この深さを元に杭頭復元力のある程度推定することが可能である。
- 5) 本動的載荷実験の結果から、杭頭復元力特性に及ぼす載荷速度の影響は小さく、小変位レベルにおける減衰特性に若干の影響を及ぼす程度である。
- 6) 繰返し載荷が復元力特性に及ぼす影響は顕著であり、具体的には弾性域では杭体周辺地盤の締め固め効果に伴う復元力の上昇、塑性域ではかぶりコンクリート剥落や杭体軸方向鉄筋の疲労破断に伴う復元力の低下が観察された。

- 7) 実験条件に合わせた3次元有限要素解析の結果、現状の地盤解析に期待される精度を踏まえると、本手法はある程度の推定精度を有していることが確認された。

地盤中における鉄筋コンクリート杭の性能評価手法確立へ向けた今後の展開と課題を以下に列挙して本論文の結びとする。

- ① 最大損傷深さは杭体-地盤間の相互作用を顕著に反映する重要な指標であり、これを正確に評価することが杭頭復元力特性の評価において非常に重要である。
- ② 杭の動的復元力は適切な載荷履歴を設定した静的載荷実験によってある程度推定可能であると言えるが、今後は乾燥砂以外の地盤材料についても検討の余地がある。
- ③ 本研究で用いた解析手法を性能照査へ適用するためにはさらなる精度向上が不可欠であり、今後は主に地盤物性値とそのモデル化に関して更に詳細な検討を進め、精度の良い性能評価手法を確立する必要がある。

謝辞：本研究において埼玉大学 町田篤彦教授より多大な御指導・御助言を賜ったことをここに記し、感謝の意を表します。本研究で行った3次元有限要素解析は東京大学で開発された RC 構造物の非線形 FEM 解析プログラム COM3 によるものであり、本プログラムは東京大学 前川宏一教授の御厚意により御提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。また実験を行うにあたり、元埼玉大学大学院生の高野光司氏、小泉秀之氏（共に東日本旅客鉄道）、元埼玉大学卒研究生の臼井 徹氏（菊池建設）、藤松剛至氏（住友建設）、藤巻嘉和氏（新潟県）、現埼玉大学大学院生の佐々木満範氏、山田伝一郎氏に御協力頂いたことを記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：阪神高速道路3号神戸線 RC 橋脚の損傷分析 中間報告（その1）（その2）1997.3、1998.3.
- 2) 阪神高速道路公団：3号神戸線基礎構造の復旧に関する中間報告書、1997.2.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅳ（下部構造編）およびⅤ（耐震設計編）、1996.
- 4) Wolf, J.P.: 構造物と地盤の動的相互作用解析-時間領

- 域処理法一，鹿島出版会，1996.
- 5) 講座「土と構造物の動的相互作用の解析法」，土と基礎，Vol.40，No.1，1992（～Vol.41，No.3，1993）.
 - 6) 土木学会耐震工学委員会動的相互作用小委員会：基礎・地盤・構造物系の動的相互作用－相互作用効果の耐震設計への導入一，1992.9.
 - 7) 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.
 - 8) 土岐憲三，国近光生：橋梁基礎の耐震設計法に関する調査研究，京都大学耐震研究報告，No.86-2，1986.5.
 - 9) Penzien, J., Scheffey, C.F. and Parmelee, R.A.: Seismic Analysis of Bridges on Long Piles, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, EM3, pp.223-254, 1964.
 - 10) 矢部正明，川島一彦：橋脚と杭の降伏耐力比が杭基礎の塑性損傷に及ぼす影響，土木学会論文集，No.626/I-48，pp.51-68，1999.7.
 - 11) 若井明彦，鷓飼恵三：単杭の水平載荷挙動に関する模型実験と解析，土木学会論文集，No.517/III-31，pp.159-168，1995.6.
 - 12) 例えば，石原哲哉，三浦房紀：3次元構造物－地盤系の非線形地震応答解析，土木学会論文集，No.465/I-23，pp.145-154，1993.4.
 - 13) 牧 剛史，睦好宏史，高野光司：地盤の非線形性を考慮したRC橋脚の応答解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.961-966，1998.7.
 - 14) Maki, T., Takano, K. and Mutsuyoshi, H.: Response Analyses of Reinforced Concrete Pier with Pile Footing considering Nonlinear Soil, The 7th East-Asia Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Kochi, Japan, 1999.8.
 - 15) 土木学会編：動的解析と耐震設計 第2巻 動的解析の方法，技報堂出版，1989.
 - 16) 神田政幸，竹村次朗，日下部治：遠心模型実験による砂地盤中の単杭のp-y関係の測定，土木学会論文集，No.631/III-48，pp.355-369，1999.9.
 - 17) 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.
 - 18) 伯野元彦，横山功一，佐藤安一郎：模型杭基礎の復元力特性に関するオンライン・リアルタイム実験，土木学会論文報告集，第200号，pp.85-90，1972.4.
 - 19) 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.
 - 20) 富永晃司，山肩邦男：地盤およびくいの弾塑性特性を考慮した単くいの水平抵抗機構に関する理論的考察，日本建築学会論文報告集，第290号，1980.4.
 - 21) 幸左賢二，鈴木直人，木村 亮，木村嘉富，森田悠紀雄：終局挙動に着目した実物大杭基礎の水平載荷試験，土木学会論文集，No.596/III-43，pp.249-260，1998.6.
 - 22) 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載荷試験，土木技術資料，Vol.40，No.3，pp.62-67，1998.3.
 - 23) 福田秀樹他：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.
 - 24) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文報告集，第275号，pp.69-77，1978.7.
 - 25) 国生剛治，岩楯敬広：軟弱地盤の非線形震動特性についての模型振動実験と解析，土木学会論文報告集，第285号，pp.57-67，1979.5.
 - 26) 牧 剛史，睦好宏史，高野光司：地盤中におけるRC杭の復元力特性と変形状に関する研究，土木学会第25回地震工学研究発表会講演論文集，pp.565-568，1999.7.
 - 27) 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載荷実験および解析，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.
 - 28) 牧 剛史，睦好宏史，佐々木満範：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，No.3，pp.1435-1440，2000.7.
 - 29) 石田 毅，渡辺啓行，伊藤 洋，北原義浩，松本正毅：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.
 - 30) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.
 - 31) 石原研而：土質力学の基礎，鹿島出版会，1976.
 - 32) 土屋富男他：大型せん断土槽でのRC杭の杭頭・地盤同時載荷試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.531-532，1997.9.
 - 33) Chen, L.T. and Poulos, H.G.: Piles subjected to Lateral Soil Movements, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol.123, No.9, pp.802-811, 1997.
 - 34) 増田 達，龍岡文夫，山田真一：平面ひずみ水平繰返し載荷における砂の非線形応力-ひずみ履歴関係，第51回土木学会年次学術講演会講演概要集III，pp.40-41，1996.9.
 - 35) 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，No.354/V-2，pp.81-90，1985.2.
 - 36) 岡村 甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991.

- 37) Hauke, B. and Maekawa, K.: Strengthening of RC Columns – A Three Dimensional Computation Approach, Proceedings of the Sixth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Vol.3, pp.2105-2110, 1998.1.
- 38) 土屋智史, 福浦尚之, 前川宏一: Fiber Model を用いた 3次元有限要素動的解析におけ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論文集, pp.359-368, 1998.8.
- 39) 福浦尚之, 前川宏一: RC 非線形解析に用いる鉄筋の繰返し履歴モデル, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.291-295, 1997.5.
- 40) An, X., Maekawa, K. and Okamura, H.: Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, Proceedings of JSCE, No.564/V-35, pp.297-316, 1997.5.
- 41) Ohsaki, Y.: Some Notes on Masing's Law and Non-Linear Response of Soil Deposits, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo(B), Vol.XXXV, No.4, pp.513-536, 1980.
- 42) 緒方辰男, 倉知禎直, 古関潤一: 地盤変形特性の応力・ひずみレベル依存性を考慮した水平方向地盤反力係数の載荷幅依存性, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.371-381, 1999.9.

(2000.10.10 受付)

RESTORING FORCE AND DEFORMATION OF REINFORCED CONCRETE PILES

Takeshi MAKI and Hiroshi MUTSUYOSHI

In order to clarify nonlinear interaction between pile and its surrounding soil under seismic load, static and dynamic loading tests of RC piles in sand soil are conducted. As a result, the maximum damaged depth of pile, which controls the horizontal restoring force at the pile head, is governed by the relative stiffness between pile and soil. Moreover, it is clarified that the restoring force characteristic of RC pile – soil system is dependent on a repetition of cycles rather than loading velocity within the condition of these tests. Additionally, according to the results of 3-dimensional finite element analysis, the applicability of the analytical method for simulating the behavior of RC pile – soil system is verified.