

論文 RC 杭の復元力特性に及ぼす杭体-地盤間の界面挙動の影響

牧 剛史^{*1}・佐々木満範^{*2}・睦好 宏史^{*3}・沖津 充紀^{*2}

要旨：地盤中における鉄筋コンクリート杭の復元力特性に関する載荷実験結果を用いて、3次元弾塑性有限要素解析によるシミュレーションを行った。杭体と地盤の界面に生じる剥離などの局所的な挙動を、界面要素として解析モデルに組み込み、これが杭の復元力特性や変形性状に及ぼす影響について数値的な考察を行った。界面剥離や初期受働土圧を考慮することによって、総じて復元力を小さめに推定する結果となり、その主たる要因として、杭体最大損傷深さの推定精度が大きく寄与していることが明らかとなった。

キーワード：鉄筋コンクリート杭，杭頭復元力，最大損傷深さ，界面剥離，初期受働土圧

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以来、各種鉄筋コンクリート構造物の応答性状や破壊現象の解明とその解析的評価手法に関して、数多くの検討が行われ、ある程度の成果が得られてきた。付随して、橋脚や高架橋などの構造物を支持する杭基礎構造についても検討が進められているが、特に杭基礎の大変形領域における応答性状や性能評価手法の開発は若干遅れている感は否めない。今後の性能照査型設計への移行を勘案すると、杭基礎が過大地震力を受ける時の挙動を大変形レベルまで明らかにすると共に、これを精度良く追跡可能な手法の開発が急務であると考えられる。

以上の背景をふまえ、本研究は大変形領域までを包含した鉄筋コンクリート杭の杭頭水平載荷実験を行い、これを3次元有限要素解析によってシミュレートすることを試みる。併せて、杭体-地盤界面で発生する界面剥離や初期受働土圧レベルなどの局所的な条件が、杭体の変形性状や復元力特性などの構造応答に及ぼす影響度を定量的に把握することを目的として、解析的な検討を行ったものである。

2. RC 杭の水平載荷実験^{1),2)}

2.1 実験概要

本実験で用いた載荷システムの概要を図-1に示す。壁面を完全剛とした鋼製土槽中に試験体を設置し、その周囲に気乾状態の岐阜砂を用いて模型地盤を作製した。この状態で地表面に突出した杭頭部に対して、変位制御による水平正負交番載荷を行い、杭頭復元力や杭体曲率、杭体表面に作用する土圧を測定した。なお、試験体基部は完全固定とし、載荷点部は回転自由としたことを付記する。なお、実験の詳細については、既往の文献^{1),2)}を参照されたい。

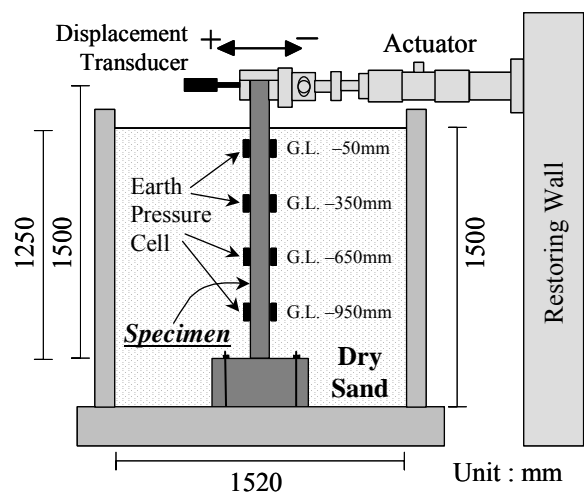


図-1 載荷システム概要図

*1 埼玉大学助手 工学部建設工学科 工修 (正会員)
 *2 埼玉大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)
 *3 埼玉大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

表-1 実験ケース一覧

No.	Name	Specimen				Soil		Relative Stiffness $K_R(10^{-3})$
		Material	Section (mm)		f_c (N/mm ²)	Long. Reinf.	Condition	
1	RCX-L	RC	Rectangle	100 × 100	43.0	4D10	Loose	55.53
2	RCR-L				45.3			55.53
3	RCR-D		Circular	100	42.3	4D6	Dense	67.27
4	RCC-D				44.3			71.28
5	STR-L	Steel	Rectangle	100 × 60			Loose	55.53
6	STR-D							Dense

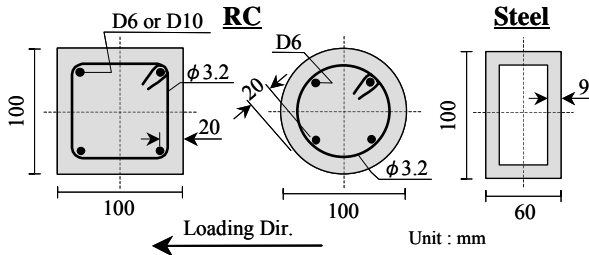


図-2 試験体の断面形状と配筋

2.2 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。杭体の断面形状と鉄筋比, および地盤の相対密度をパラメータとして, RC杭4ケース, 鋼製杭2ケースの計6ケースを本論文の対象ケースとする。いずれの試験体も荷重方向の投影幅(荷重幅)を100mmとし, RC杭は軸方向鉄筋にD6またはD10の異形鉄筋(SD345)を4本用い, 横拘束筋は3.2mmの鋼線を100mm間隔で配置した。鋼製杭2ケースは地盤反力特性把握のために補足的に行ったケースであり, 断面二次モーメントが矩形RC杭の換算断面二次モーメントと等しくなるよう設計した。各試験体の断面形状と配筋を図-2に示す。また, 地盤の相対密度は, 模型地盤作製時の締め固め状態をコントロールすることによって変化させている。使用した岐阜砂³⁾の初期せん断剛性は以下の式(1)で表される。

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

ここに,

G_0 : 初期せん断剛性(N/mm²)

e : 間隙比

σ_c : 拘束圧(N/mm²)

なお, 緩詰め条件で0.7, 密詰め条件で4.0程度の初期受働土圧が測定されており, 拘束圧 σ_c として3次元平均応力を適用することによってその影響を材料パラメータに反映させている。(1)式によって各ケースにおける模型地盤のせん断剛性を算定し, 現行道路橋示方書⁴⁾記載の式に基づいてせん断弾性波速度から平均N値を算定すると, 緩詰め条件でN=3.5程度, 密詰め条件でN=10程度となる。

また, 杭体と地盤との相対剛性を表す代表的な指標として, 各種構造物設計基準^{4),5)}で用いられている杭の特性値が挙げられるが, ここではPoulos⁶⁾が提案した相対剛性の無次元量 K_R を用いて, 各実験ケースを評価する²⁾。算定された K_R 値は表-1に併せて示している。

3. 3次元有限要素解析の概要

3.1 解析コード

本研究では東京大学コンクリート研究室で開発された3次元有限要素解析コードCOM3^{7),8)}を用いた。本コードはFiberモデルに立脚したRC構造の3次元立体骨組み解析が実現され, 併せて3次元立体要素による地盤のモデル化も可能である。Fiberモデルは平面保持の仮定の下で, 平均軸ひずみと2方向曲率から断面力を算定する。せん断変形については線形を仮定することで自由度を縮退しており, 曲げ変形が卓越する部材で構成される鉄筋コンクリート構造系の非線形挙動を, 安定した収束状況の下で予測することが可能である^{8),9)}。

3.2 解析モデルと材料構成則

本解析で用いたモデルを図-3に示す。杭体は上述したFiberモデルに基づく3次元RC梁要素によって、地盤は3次元立体要素によってモデル化している。また、杭体-地盤界面における局所的な応力・変形状態を考慮するために、RC梁要素と地盤立体要素との間に、1次元界面要素を設置している。以下、各要素に導入される構成則について概説する。

RC梁要素では、断面内各ファイバーに対して、既往の鉄筋コンクリート構成則⁷⁾を修正した構成則が導入されている^{8),9)}。また、断面内を鉄筋とコンクリートとの付着作用が及ぶ領域(RC Zone)と及ばない領域(PL Zone)に分割するゾーニング手法¹⁰⁾が取り入れられており、配筋に応じて適切な領域を設定する。なお、本解析ではかぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈・引抜けといった、高非線形域における挙動は考慮していない。地盤立体要素については、要素の偏差応力-偏差ひずみ関係に対し

ていわゆる双曲線モデルの範疇に属するOhsakiモデル¹¹⁾が導入されている。なお、単純化のため、要素の体積成分については履歴非依存型、すなわち線形弾性を仮定している。

3.3 杭体-地盤間の界面挙動のモデル化

1次元界面要素は、杭体-地盤界面に生じる剥離や受働土圧などの局所的な挙動を考慮するために導入したものである。界面要素の概要を図-4に示す。本界面要素は面内2方向および面外方向の計3自由度を有し、開口方向以外の2方向については微小剛性を有する線形弾性特性を付与した。開口方向(図-4の(A)方向)に対しては、実験で見られた界面における現象をふまえ、図-5に示す4種類の非線形特性を与えた。MODEL EPは杭体に作用する初期受働土圧を擬似的に考慮したものであり、MODEL EPCは、界面に生じる隙間に砂が流れ込み、除荷時に圧縮応力が生じる現象を簡易にモデル化したものである。なお、圧縮剛性については全モデルを通じて大きな値を設定している。

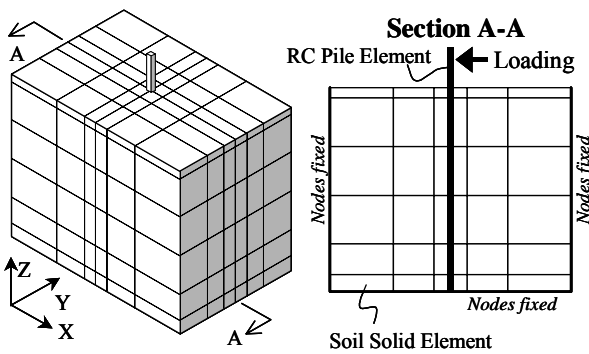


図-3 杭-地盤系の構造モデル

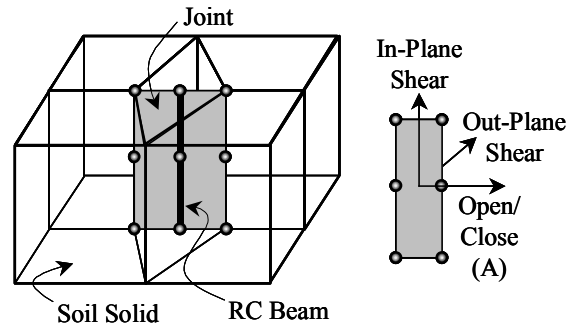


図-4 杭体-地盤間の界面要素

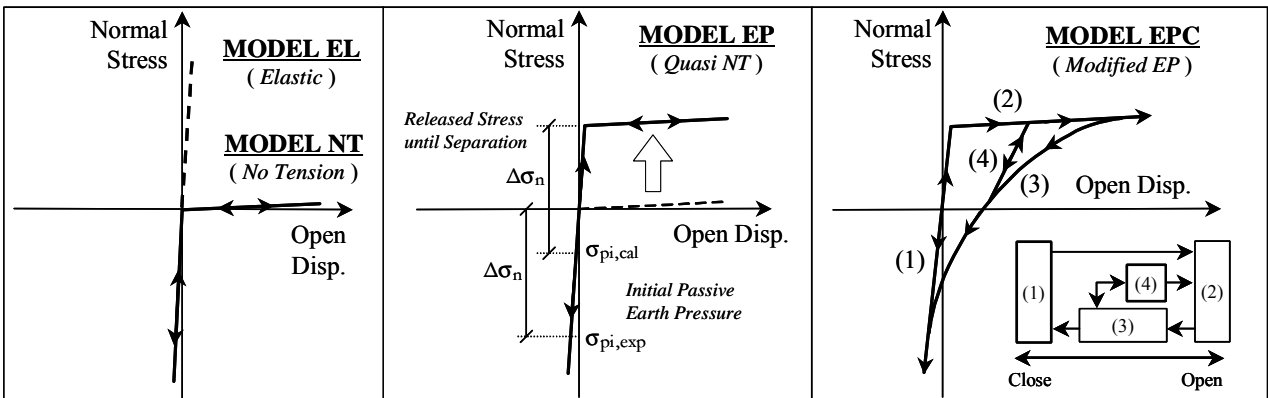


図-5 界面要素の構成則

4. 杭の応答性状に及ぼす界面挙動の影響

4.1 実験結果との比較

2.の正負交番載荷実験より、杭体に最も大きな損傷が生じる位置（以下、最大損傷深さ）は杭体と周辺地盤の相対剛性 K_R に依存することが明らかとなっている^{1), 2)}。各解析ケースにおいて得られた杭体の最大損傷深さと相対剛性との関係を、実験結果と併せて図-6に示す。ここでは、最大損傷深さ L_{max} を杭体の載荷方向断面高さ D で正規化して表している。この結果から、本解析手法によって、相対剛性の上昇と共に最大損傷が深い位置へシフトする傾向を表現しうることが分かる。また、界面の様々な非線形挙動を考慮することによって、最大損傷深さが深めに推定されることを示している。

各ケースにおける解析上の降伏荷重の実験値に対する比を図-7に示す。ケースによってかなりバラツキが大きいですが、界面剥離を考慮する

ことによって10%程度の低下が見られ、緩詰め地盤のケースで特に差異が顕著である。また初期土圧の影響については密詰め地盤のケースで若干見られる程度であった。

杭頭復元力 - 水平変位骨格曲線と等価減衰数の変化を、RCX-Lを例にとって図-8, 9にそれぞれ示す。杭体 - 地盤間の界面剥離や初期受働土圧を考慮することによって、復元力は小さめに推定され、杭体降伏後の剛性も、界面剥離を考慮することによって小さくなる傾向を示している。一方、等価減衰数は、いずれのモデルにおいても実験結果よりかなり小さめに推定されるが、塑性率1~2にかけて10%程度上昇するという傾向はほぼ一致している。このことは、載荷初期における履歴ループが精度良く追跡できていないことに起因しており、地盤要素の材料特性自体の影響が表れているものと考えられる。界面挙動を考慮することによって、

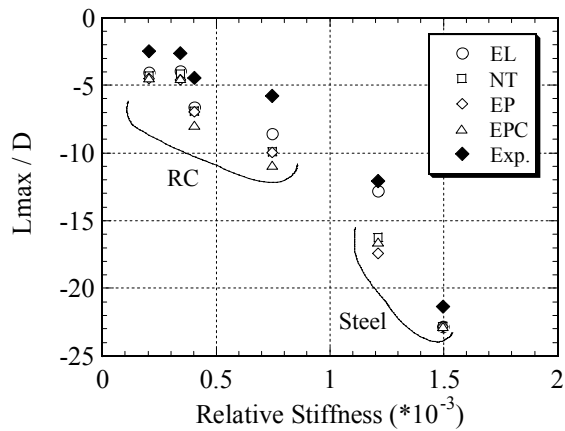


図-6 最大損傷深さの変化

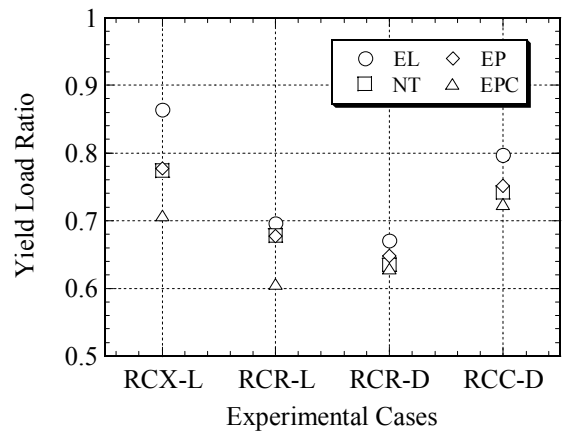


図-7 ケース毎の杭頭降伏荷重比

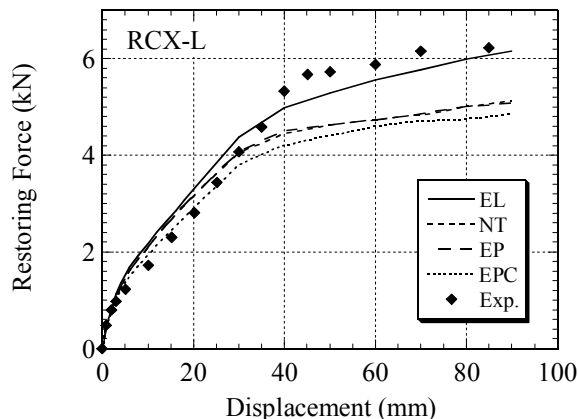


図-8 杭頭復元力骨格曲線の例

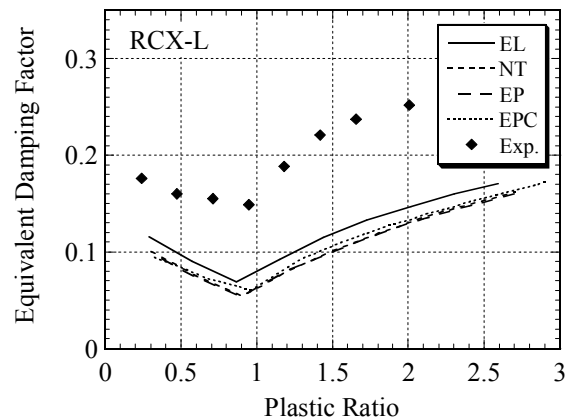


図-9 等価減衰定数の変化の例

減衰定数は数%程度減少しているが、それほど顕著な影響は見られなかった。以上の復元力および減衰に関する傾向は、RC 杭を用いた他の全てのケースにおいてほぼ同様であった。

4.2 パラメトリック解析

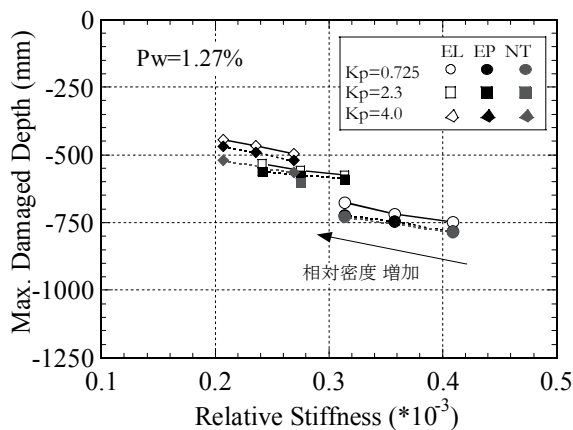
杭体 - 地盤間の界面挙動を定量的に把握するために、各条件を変動させたパラメトリック解析を行った。変動要因を表 - 2 に示す。表中、地盤の相対密度 D_r の変動は地盤のせん断剛性自体に影響を及ぼし、初期受働土圧係数 K_p はせん断剛性および界面要素における剥離発生応力レベルに影響を及ぼすパラメータである。各パラメータの組み合わせに対して、MODEL EL / NT / EP による解析を行った。

各解析ケースにおける杭体最大損傷深さと相対剛性との関係を、軸方向鉄筋比別に図 - 10

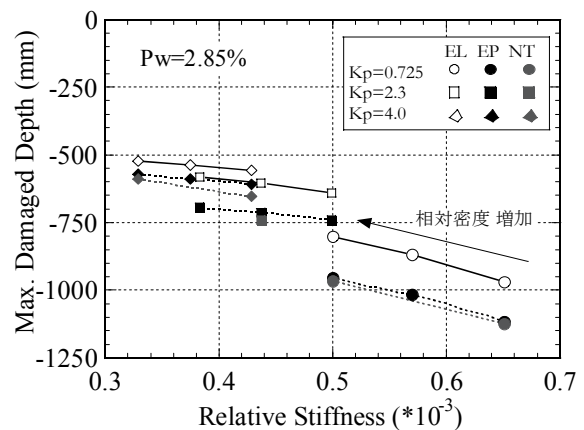
(a), (b) に示す。初期土圧が小さい $K_p=0.725$ のケースでは、剥離の影響 (EL vs. EP) が顕著に見られるが、初期土圧の影響 (EP vs. NT) は殆ど見られない。それに対して、 $K_p=4.0$ のケースでは、剥離の影響はそれほど大きくないが、初期土圧の影響もそれと同等の差異を示している。また、剥離や初期土圧の影響度は地盤の相対密

表-2 パラメトリック解析における変動要因

変動要因	変動項目	変動範囲
地盤	相対密度 D_r	55% / 70% / 85%
	初期受働土圧係数 K_p	0.725 / 2.3 / 4.0
杭体	軸方向鉄筋比 P_w	1.27% (4D6) / 2.85% (4D10)
界面要素	構成則タイプ	EL / NT / EP

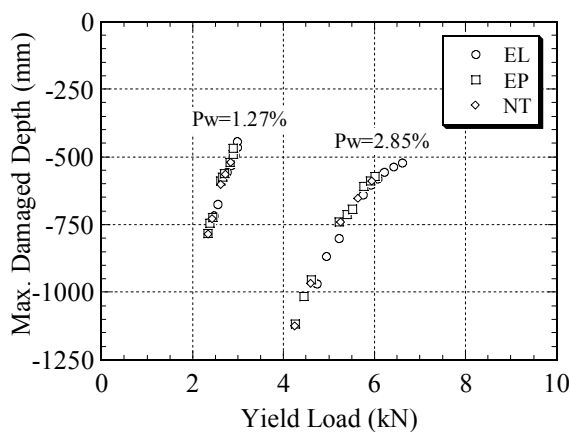


(a) 軸方向鉄筋比 1.27%

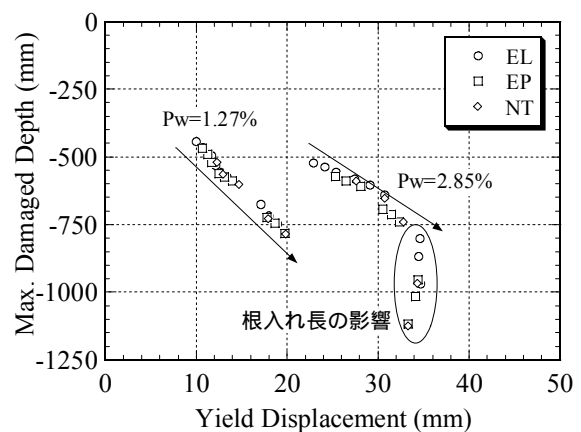


(b) 軸方向鉄筋比 2.85%

図-10 杭体の最大損傷深さの変化



(a) vs. 降伏荷重



(b) vs. 降伏変位

図-11 最大損傷深さと降伏荷重および降伏変位の関係

度には依存しないことが分かる。さらに、同一の相対剛性であっても、杭体軸方向鉄筋比の大きいケースほど、界面剥離の影響が顕著に表れると言える。地盤中における杭の復元力特性に対する杭体最大損傷深さの重要性を示唆する結果として、降伏荷重及び降伏変位に対して最大損傷深さをプロットした結果を図 - 11 に示す。界面剥離や初期土圧の考慮 / 非考慮に拘わらず、杭頭降伏荷重や杭頭降伏変位は最大損傷深さと一意的な関係にあることが明確に示されている。また、杭体の軸方向鉄筋比によってこの関係が異なることから、降伏荷重や降伏変位は最大損傷深さと杭体降伏モーメント（降伏曲率）によって定まることが示唆される。このことは、杭体に生じる最大損傷深さが杭頭復元力特性を決定づける重要な因子であることを如実に物語る結果であると言える。

5. まとめ

得られた成果を以下に列挙してまとめとする。

- (1) 本研究で用いた解析手法は杭頭復元力を過小評価するものの、相対剛性の変化に伴う最大損傷深さの移動を追跡可能である。
- (2) 界面剥離や初期受働土圧を界面要素によって考慮することによって、杭体の最大損傷深さはより深めに推定される。
- (3) 界面剥離の影響は、初期受働土圧が小さく、杭体軸方向鉄筋比が高いケースで顕著である。また、界面における初期受働土圧が復元力特性に及ぼす影響はそれほど顕著でない。
- (4) 杭頭復元力や杭頭変位は、最大損傷深さによって一意的に決定されるため、これを精度良く推定することが重要である。

謝辞

本研究で用いた構造解析ツールは、東京大学前川宏一教授の御厚意により使用させて頂いた。ここに記して感謝の意を表します。また実験に御協力頂いた埼玉大学建設材料研究室メンバー各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 牧 剛史, 睦好宏史: 鉄筋コンクリート杭の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
- 3) 石田 毅, 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
- 4) 道路橋示方書 耐震設計編, 1998.12 および 下部構造編, 1996.12
- 5) 鉄道構造物等設計標準 耐震設計, 1999.10 および 基礎構造物・抗土圧構造物, 2000.6
- 6) Poulos, H. G.: Behavior of Laterally Loaded Piles: I - Single Piles, J. of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proc. of ASCE, Vol.97, No.SM5, pp.711-731, 1971.5
- 7) 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, 1991.5
- 8) 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, pp.359-368, 1998.8
- 9) 福浦尚之, 前川宏一: RC 非線形解析に用いる鉄筋の繰り返し履歴モデル, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.291-295, 1997.5
- 10) An, X., Maekawa, K. and Okamura, H.: Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, Proc. of JSCE, No.564/V-35, pp.297-316, 1997.5
- 11) Ohsaki, Y.: Some Notes on Masing's Law and Non-Linear Response of Soil Deposits, J. of the Faculty of Eng., Univ. of Tokyo(B), Vol.35, No.4, pp.513-536, 1980