

細長い支持杭と太短い耐震杭を併用した損傷制御杭基礎構造

DAMAGE CONTROLLED PILE FOUNDATION USING SLENDER SUPPORT PILES AND SQUAT EARTHQUAKE-RESISTING PILES

弘中孝宜*1, 佐伯英一郎*2, 永田 誠*3
小林勝己*4, 山田 哲*5, 和田 章*6

*Takayoshi HIRONAKA, Eiichiro SAEKI, Makoto NAGATA,
Katsumi KOBAYASHI, Satoshi YAMADA and Akira WADA*

To erect pile foundation firmly is one way to satisfy its demands, - making up functions and structure of the building without losing their bearing capacity, or getting differential settlement-. But it use to be uneconomic, so reasonable way is groped for. We have been proposed damage controlled pile foundation using slender support piles and squat earthquake resisting piles. This paper presents the results of experiments using scale model of soil-pile foundation-super structure with the aim of understanding dynamic behaviour of building supported by damage controlled pile foundation. The results indicate using earthquake resisting piles controls relative distance between foundation and ground surface, bending moment of support piles.

Keywords : *Pile foundation, Damage controll, Energy input, Scale model*

杭基礎, 損傷制御, エネルギー入力, 縮小模型

1. はじめに

建物は良好な地盤上に建てるのが基本であるが、平野の少ない我国では埋立地などの軟弱な地盤にも建てざるを得ない場合が多い。建築物の基礎構造は、上部構造を支持しその機能・構造を成り立たせることが必要であり、軟弱な地盤上に建物を建てる場合、鉛直支持力確保の必要性から杭基礎が用いられる。地震時、杭基礎には上部構造の鉛直荷重だけでなく、上部構造に作用する慣性力、地盤の変形による力がはたらく。杭基礎はこれらの外力に対しても上記の要求を満たす必要があり剛強に作られてきた。しかし、近年では杭基礎の耐震性向上と合理化を目的とした研究が行なわれている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。一方、杭基礎を改良することにより、杭基礎あるいはその上部構造の損傷を低減させることを意図した研究が行なわれてきている。基礎構造にエネルギー吸収を期待することにより、上部構造の設計の自由度を高める可能性がある。

石丸らは、軟弱地盤に適用しにくい免震構造に代わるものとして地盤免震システムを提案し、実大規模の模型を用いた実験を行っている⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。この方法は、杭を免震構造における積層ゴムにみたと、これとダンパーを組み合わせることで、免震構造と同様のはた

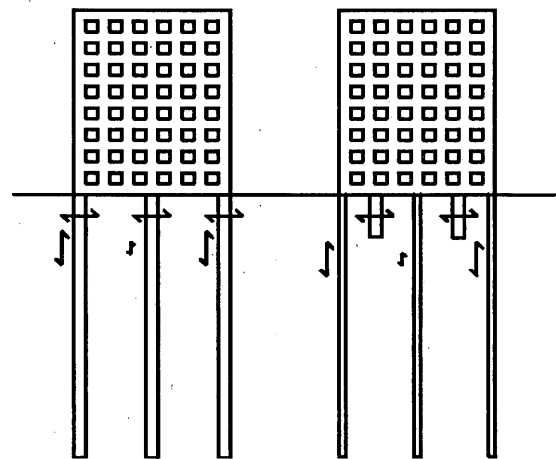


図1 損傷制御杭基礎構造の概念図

らきをさせようとするものである。

長江、林らは、杭の靱性確保を目的とした研究を元に、杭基礎と上部構造を一体とした解析を行い、支持杭の杭頭部を塑性化させる

本論文は、参考文献18), 19)に加筆し、まとめたものである。

- *1 S.FORM 構造設計事務所 修士(工学)
- *2 新日本製鐵(株) 工博
- *3 新日本製鐵(株) 修士(工学)
- *4 (株)フジタ 博士(工学)
- *5 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・博士(工学)
- *6 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

- S.FORM Structural Design Office, M. Eng.
- Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.
- Nippon Steel Corporation, M. Eng.
- Fujita Corporation, Dr. Eng.
- Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
- Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

ことで上部構造の損傷を抑えることが出来ることを示した¹¹⁾。また、杉村、平出らは支持杭の杭頭部に鉛ダンパーを組み込み、地震時の建物のロッキングを利用して建物に入力するエネルギーを吸収出来ることを示した¹²⁾¹³⁾。これらの方法は、基礎構造においてエネルギーを吸収させる方法として有効であるが、上部構造の鉛直力を地盤に伝達する杭そのものの損傷を伴う。地震後も支持杭を含めた主体構造の健全性を保ち、鉛直支持力を確保する観点からすると、支持杭を損傷させるよりも支持杭と並列にエネルギー吸収機構を設けるほうが望ましいと考える。

これまで我々は損傷制御杭基礎構造を提案してきた¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。損傷制御杭基礎構造は鉛直荷重を支持し、地震時には横方向の地盤変形に追従しやすい細長い杭（以下、支持杭）と地震時に基礎に働く水平力を負担する太短い杭（以下、耐震杭）を併用する方法である（図1）。耐震杭は常時の鉛直支持力を期待せず、地震時には杭頭部を塑性化させることにより基礎構造でエネルギー吸収を図る。損傷制御杭基礎構造の最大の特徴は、鉛直荷重を負担しない耐震杭を部分的に損傷させることで上部構造への入力エネルギーの低減を図ること。および、地震時に基礎に作用する水平力を耐震杭に負担させることにより支持杭の健全性を保つことを意図している点である。この方法は、秋山が提案した柔剛混合構造¹⁷⁾の考え方に属する。

中井らは、同様の考え方にに基づき、杭基礎に極短杭を付加することによって鉛直力と水平力を分担して支持する基礎構造の研究を行っている。極短杭を併用することにより、支持杭杭頭部のせん断力、曲げモーメントが低減されることを実験、および数値解析を用いて示した²⁰⁾。しかし、上部構造に入力するエネルギーには言及していない。そこで本論では、損傷制御構造の考え方を基礎構造に適用する可能性を探ることを目的として模型実験を行った。

2. 実験方法

2.1 実験対象及び実験変数

・地盤

地盤は地表面から G.L.-24m まで広がる粘性土地盤を想定する。G.L.-24m 以深は、せん断波速度 400m/sec 以上の工学的基盤とする。G.L.-4m および G.L.-14m で地盤の剛性が変化し、地盤の密度は 1500kg/m³ で、深さ方向に一様とする。せん断歪が微小なときの表層地盤の固有周期 T_g は 0.7sec とし、やや軟弱な地盤を想定した。

・上部構造

上部構造は 4 スパン×4 スパン、一辺 24m の正方形平面を持つ鉄筋コンクリート構造とする。

上部構造固有周期 T_s は、想定する地盤の固有周期よりも固有周期の短い 6 層（固有周期 0.4sec）の建物と、固有周期が等しい 10 層（固有周期 0.7sec）の建物を想定し実験変数とする。

・杭基礎

25 本の支持杭で建物を支持させる。支持杭は、想定する建物に対してその重量を支持しうるように直径を算出する。耐震杭は支持杭の代わりに水平力を負担するように設定する。ここでは、杭頭を剛接合とした耐震杭の杭頭水平剛性が少なくとも支持杭の杭頭水平剛性と同等となるよう、直径 2m、長さ 5m の鋼管杭を 25 本設置することとする。

支持杭の杭種は、鋼管杭および場所打ちコンクリート杭の 2 つの

モデルを考える。同じ建物に対して設定した鋼管杭と場所打ちコンクリート杭の曲げ剛性は、鋼管杭よりも場所打ちコンクリート杭の方が大きい。杭頭接合条件は、杭と基礎を剛接合、およびピン接合の 2 種類を考える。耐震杭については、耐震杭がない場合（以下、耐震杭なし）、耐震杭が弾性の場合（以下、弾性耐震杭）、耐震杭杭頭部を塑性化させる場合（以下、弾塑性耐震杭）を実験変数とする。

表 1 に実験変数について、表 2～4 に実物諸元についてまとめて示す。

2.2 モデル化

2.2.1 モデルの概要

本研究では修正 Penzien model を参考にしつつ、地盤-杭基礎-上部構造連成系を図 2 に示すような質量とバネより構成されるモデルに置換する。モデル化は、杭先端より上にある地盤、杭基礎、上部構造を対象とする。地盤は、自由地盤と杭周辺地盤より構成される。自由地盤および杭周辺地盤は多質点系であり、自由地盤は杭基礎および上部構造の影響をほとんど受けない状態で振動する。杭周辺地盤は建物周囲の地盤を建物面積の 2 倍と仮定し、深さ方向に等面積で切り出した土柱である。杭基礎は、基礎と杭より構成される。基礎は剛と仮定し、杭は曲げ系とする。自由地盤と杭は相互作用バネで連結する。杭周辺地盤と杭は剛に接続され杭と一体に動く。上部構造は 1 質点系とした。

地盤-杭基礎-上部構造連成系の実験は、これまで数多くなされているが²¹⁾、質点とバネより構成される模型は著者等の知る限りこれまで例を見ない。模型は、地盤-杭基礎-上部構造連成系を抽象化したものであり、地盤の細かな動きを再現しないが大まかな挙動を再現し、実験変数の差異に対する実験結果の差異を最も明確にすると考えた。

2.2.2 相似比

相似比を用いて 2.1 に設定した実物の諸元を模型諸元に変換する。模型実験における相似比は、質量、長さ、時間についてそれぞれ任意に設定することが可能である。本研究では、建物重量の対応から質量の相似比を 1/4608000、想定する地盤の深さと模型の大きさとの対応から長さの相似比を 3/80、模型の挙動を視覚的に確認するために時間の相似比を 1/1 とする。模型の制作にあたって用いる相似比を表 5 に示す。実験は、重力場で行われるから模型に作用する重力加速度は、実物と模型で対応しないが、縮尺の過程で重力加速度に関する相似比を無視し、地震時の構造物の鉛直方向の挙動および杭にはたらく変動軸力については考慮せず、系の水平方向の挙動のみに注目する。

2.2.3 モデル化

次に具体的なモデルの諸元について述べる。なお、特に断らない限り、以降は模型のスケールで議論を進める。

・地盤

自由地盤模型は上部構造模型の影響をほとんど受けないように一辺が建物の幅の約 10 倍²²⁾（面積が建物面積の 94 倍）とする。地盤を多質点せん断系に置換する際には、地盤の浅い部分で杭に生じる曲げモーメント分布が滑らかな分布になるように、自由地盤上層部を細かく分割する。すなわち、G.L.-15cm（実物では G.L.-4m）以浅で 2.5cm（実物では 0.67m）、それ以深で 5cm（実物では 1.3m）の厚さに分割する。各質点を連結するせん断バネは、地震時における地盤の

有効歪から地盤のせん断剛性を低減し、バネの剛性を決定する。

杭周辺地盤は建物の2倍の面積を持つ土柱とする。これと先ほど定めた建物面積と自由地盤の面積の比率より、杭周辺地盤：自由地盤の質量の比率は1:46となる。杭周辺地盤は自由地盤と同様に分割し、これを多質点系に離散化する。杭周辺地盤は杭と剛に連結する。

・上部構造

建物の質量は、単位床面積あたりの質量を154g/m²(実物では1000kg/m²)として計算した。上部構造の質点の質量は2階以上の全質量とし、質点と基礎をつなぐせん断バネの剛性は、上部構造模型の固有周期と上部構造実物の一次固有周期が同一になるように決める。

・杭基礎

支持杭は実物の杭の初期曲げ剛性と模型杭の初期曲げ剛性が相似比を介して対応する。モデル化はまず、実物の杭1本の曲げ剛性を模型諸元の値に変換し、得られた値に杭の本数(25本)を掛け合わせて模型杭全体の曲げ剛性を得る。実物の25本の杭を模型杭4本(耐震杭の場合は2本)に集約するとして、模型杭全体の曲げ剛性を模型杭の本数で割り、模型杭1本あたりの曲げ剛性を得る。耐震杭も支持杭と同様の方法で2本の耐震杭模型に集約した。次項で求める相互作用バネも実物の杭の本数を模型杭の本数分に集約していることから、実物と相似な曲げモーメントの分布形状が得られる。

基礎の質量は上部構造の2層分の質量とする。基礎模型に曲げ変形は生じず、杭模型に対して剛とした。

・相互作用バネ

相互作用バネは振動数に依存しない静的バネである。相互作用バネのバネ定数は、地震時における自由地盤のせん断波速度と地盤の密度から $G = \rho V_s^2$ としてせん断弾性係数を求め、飽和粘性土地盤を想定し、ポワソン比を0.5として地盤の変形係数を求める。これを(1)式²⁾に代入して水平地盤反力係数を求めた。このようにして求めた相互作用バネの剛性は、N値などから求められる変形係数を用いて計算した相互作用バネの剛性よりも大きく、mindlin解から求められる相互作用バネの剛性よりも小さい。

$$k_{h0} = \alpha \cdot \xi \cdot E_0 \cdot \bar{B}^{-3} \quad (1)$$

k_{h0} : 基準水平地盤反力係数 [kN/m³]

α : 評価法によって決まる定数 [m⁻¹]

ξ : 群杭の影響を考慮した係数

E_0 : 変形係数 [kN/m²]

\bar{B} : 無次元化杭径 (杭径を [cm] で表した無次元数値)

以上より求めた模型諸元から模型を作成する。表2~4の実物諸元に対応する模型諸元について表6~9にまとめた。

2.3 模型の概要

自由地盤模型は質点が鉄、せん断バネが積層ゴムからなる多質点系である。地震時の地盤のせん断剛性の低下を考慮した地盤模型の固有周期は0.92secである。したがって、建物の固有周期 T_b と地盤の固有周期 T_g の関係は、6層、10層の両者について $T_b < T_g$ である。自由地盤模型全体の質量は400kgである。地盤模型の1層分を図3に

表1 実験変数

上部構造固有周期	0.4[sec], 0.7[sec]
支持杭杭種	鋼管杭、場所打ちコンクリート杭
杭頭接合条件	剛、ピン
耐震杭	耐震杭なし、耐震杭弾性、耐震杭弾塑性

表3 上部構造の諸元

構造形式	鉄筋コンクリート造	
階数[層]	6層	10層
一次固有周期[sec]	0.4	0.7
質量[kg]	3456000	5760000

表4 杭基礎の諸元

基礎質量[kg]	1152000		
杭種	鋼管杭	場所打ちコンクリート杭	耐震杭
杭径[m]	6層建物: 1.0[m]×25[本]	6層建物: 1.1[m]×25[本]	2.0[m]×25[本]
×本数[本]	10層建物: 1.2[m]×25[本]	10層建物: 1.3[m]×25[本]	

表5 相似比

	単位	次元	模型/実物
質量	[kg]	M	1/4608000
長さ	[m]	L	3/80
時間	[sec]	T	1/1
変位	[m]	L	3/80
せん断力	[N],[kg·m/sec ²]	MLT ⁻²	3/(80·4608000)
曲げモーメント	[Nm],[kg·m ² /sec ²]	ML ² T ⁻²	3 ² /(80 ² ·4608000)
剛性	[N/m],[kg/sec ²]	MT ⁻²	1/4608000

表2 地盤の諸元

深さ G.L.-z[m]	層厚 H[m]	単位体積重量 γ [kgf/m ³]	せん断波速度 V_s [m/sec]	ポワソン比 ν	土質
0~4	4	1500	90	0.5	粘性土
4~14	10	1500	140	0.5	粘性土
14~24	10	1500	160	0.5	粘性土
24~		1800	400	0.5	砂質土

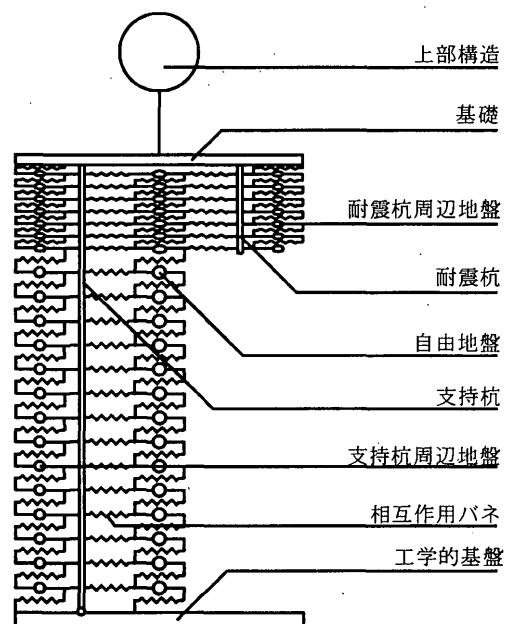


図2 実験模型の概念図

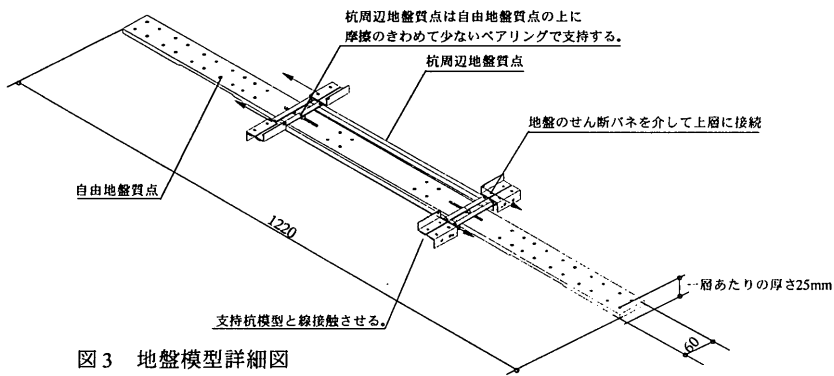


図3 地盤模型詳細図

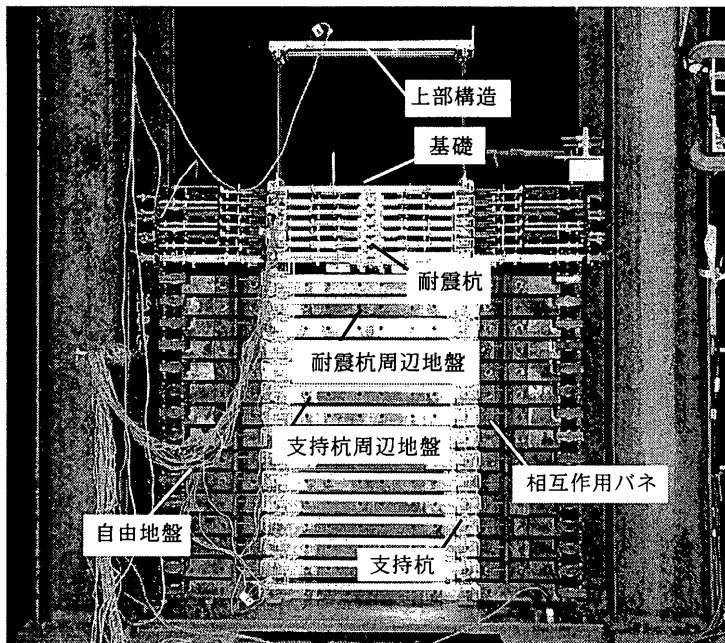


写真1 地盤-杭基礎-上部構造連成系模型

表6 地盤(実物及び模型)の諸元

地震時の表層地盤の固有周期[sec]	実物		模型
	深さ	G.L.~G.L.-4m	G.L.-4m~G.L.-24m
せん断波速度[m/sec]	76	105	-
単位体積重量[kgf/m ³]	1500	1500	-
ポワソン比	0.5	0.5	-

表8 杭基礎(模型)の諸元

基礎質量[kg]	0.25		
杭材料	アクリル板(支持杭模型)		
厚さ[mm]×幅[mm]×本数[本]	6層建物: 2[mm]×34[mm]×4[本] 10層建物: 3[mm]×21[mm]×4[本]	6層建物: 3[mm]×16[mm]×4[本] 10層建物: 3[mm]×30[mm]×4[本]	アルミニウム板(耐震杭模型) 3[mm]×15[mm]×2[本]

表9 相互作用バネの諸元

杭	支持杭				耐震杭			
	実物		模型		実物		模型	
位置	G.L.~G.L.-4m	G.L.-4m~G.L.-24m	G.L.~G.L.-15cm	G.L.-15cm~G.L.-89cm	G.L.~G.L.-4m	G.L.-4m~G.L.-5m	G.L.~G.L.-15cm	G.L.-15cm~G.L.-89cm
層厚[m]	0.67	1.33	0.025	0.050	0.67	0.67	0.025	0.025
杭全体、地盤の1層あたりの水平地盤ばね[N/m]	8.06E+08	3.23E+09	175	700	9.77E+08	1.95E+09	212	424

示した。地盤模型はこれと同様のユニットを上下に重ね、地盤のせん断ばねで連結して構成する。上部構造模型はアクリル板を板バネとして用いて1質点系を実現する。支持杭模型はアクリル板を用いる。耐震杭は、アルミニウムの板を用いた。杭頭部を塑性化させる場合、杭体をアルミニウムとし、杭頭部に直径3mmの鉛針金を用いてこの部分を塑性化させる。鉛針金の両端を銅の円管で固定し、塑性化させる区間を限定する(図4)。模型全体写真を写真1に示す。この弾塑性耐震杭杭頭部を弾塑性回転バネと考え、上部構造固有周期が0.4secの場合、実物の耐震杭杭頭部では、回転剛性が 1.8×10^{11} Nm、全塑性モーメントが 2.4×10^6 Nmに相当する回転バネである。

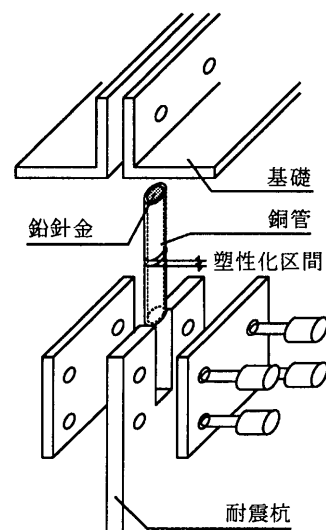


図4 耐震杭弾塑性杭頭部詳細図

表7 上部構造(模型)の諸元

上部構造	模型	
階数[層]	1質点	
固有周期[sec]	0.4	0.7
質量[kg]	0.75	1.25

2.4 加振方法

加振は、油圧サーボ水平振動試験機を用いて行う。

実験に用いる地震動を表10に示す。損傷制御構造においては、系に入力するエネルギーを効率よく吸収するために主体構造が降伏する以前に塑性化しエネルギー吸収を始める必要があり、入力地震動は限界耐力計算法における損傷限界レベルの大きさを想定する²⁴⁾。表層地盤を含めた地盤-杭基礎-上部構造連成系に地震動を入力する際には、地震動を工学的基盤で規定するのが妥当であると考えられる。しかし、本研究で扱うモデルでは地盤の減衰を考慮しておらず、地盤表面で得られる地震動が過大となるため、地盤表面で地震動のレベルを規定することとした。

損傷限界レベルの入力は、解放工学的基盤における非減衰の加速度応答スペクトルに表層地盤の増幅率をかけ合わせて表層地盤における非減衰の加速度応答スペクトルを得る。建物が限りなく剛に近く地盤とともに動く場合、この建物の加速度応答の最大値は、地盤表面における加速度の最大値と一致するから、地表面の最大加速度は加速度応答スペクトルから得ることができる。モデルの地震動はこの値について実物と対応させる。実地盤の表面における最大加速度は124cm/sec²である。加速度の相似比は3/80であるから、これを模型に変換すると4.65cm/sec²となる。

しかしこのままだと計測、観察が困難であるため、入力地震動を大きくする。入力地震動の倍率は模型の変形を可能な限り大きく見せるため、模型の変形の限界より決定する。すなわち、上部構造固有周期が0.4secの場合は倍率を86倍、0.7secの場合は43倍とし、地盤模型の最上部で得られる最大加速度をそれぞれ400cm/sec²、200cm/sec²とする。これにあわせて、地震動によって地盤模型の最上部で得られる加速度には多少のばらつきはあるが、振動台に与える振動の最大加速度をそれぞれ100cm/sec²、50cm/sec²とした。なお、本論で示す実験結果は全て入力地震動の倍率を含んだ数値である。

2.5 計測方法

本実験では支持杭に発生する曲げモーメント、および上部構造に入力するエネルギーに着目する。計測は以下の項目について行なう。計測位置を図5に示す。

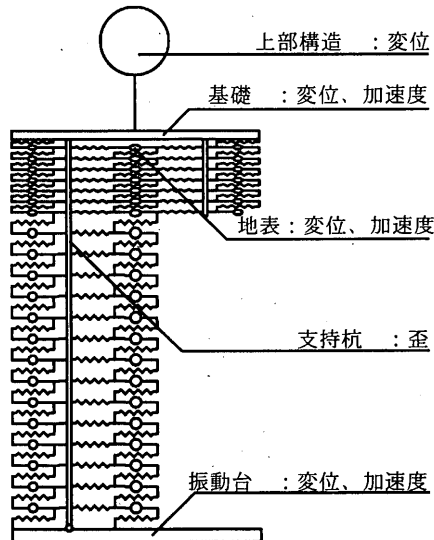


図5 計測位置

- ・支持杭の歪： アクリル板にプラスチック用歪ゲージを添付して計測する。計測した歪とアクリル板の板厚から支持杭模型の曲げモーメントを計算する。
- ・振動台、地盤表面、基礎の加速度： 加速度計を模型のそれぞれの部位に設置して加速度を計測する。
- ・振動台、地盤表面、基礎、上部構造の変位： 振動台の変位はばね式変位計、その他の変位はレーザー変位計を用いて計測する。

3 実験結果および考察

3.1 模型の挙動確認

・地盤模型の固有周期

地盤模型の固有周期を計測するために地盤-杭系の自由振動実験を行なった。表11に実験の結果を示す。地盤模型の固有周期は計画時の計算値とよく一致した。また、自由振動の時刻歴波形より求めた減衰定数は0.035である。

・基礎の水平剛性

地盤模型の変形が生じないように、地盤模型の各質点間を治具で固定し、杭基礎を水平方向に加力し、基礎の水平剛性を求めた。図6に各実験変数における杭頭水平剛性の計算値と実測値の関係を示す。両者はよい対応を示す。

・上部構造の固有周期

各加振実験において得られた基礎と上部構造の変位応答倍率のプロットから、上部構造模型の固有周期を求めた。模型で再現された上部構造の固有周期は0.37sec、0.75secであった。

3.2 支持杭に発生する曲げモーメント

模型を振動台に設置し、地震動を入力する実験を行なった。実験では、地盤-杭基礎-上部構造連成系の応答として地盤の1次固有周期に近い1次モードの振動が卓越していることが観察できた。

・地盤表面と基礎の相対変位

図7,8に各加振時における基礎と地盤表面の相対変位の時刻歴および、基礎と地盤表面の最大相対変位を示す。振動台上における入力レベルの差異を除くため、それぞれのデータは、振動台で再現された地震動の正負最大変位の絶対値の和を用いて基準化した。

図7,8より、基礎と地盤表面の最大相対変位について設定した各実験変数の影響について見ると、耐震杭の有無>支持杭杭頭部の接合条件>支持杭杭種の順で基礎と地盤の最大相対変位を抑える効果

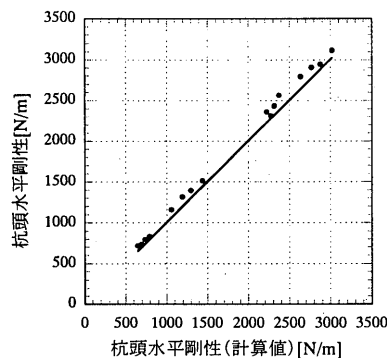


図6 基礎の水平剛性

表10 入力地震動

Elcentro NS
告示波形
JMA Kobe NS
KobeG.L.-32m

表11 地盤模型の固有周期

モード	計算値[sec]	実験値[sec]
1	0.92	0.94
2	0.32	0.31
3	0.20	0.19

が大きいことがわかる。この関係は、各実験変数と基礎の水平剛性との関係と対応しており、このことから、基礎の水平剛性が大きいほど上部構造の慣性力により生じる基礎と地盤表面の相対変位が抑えられたといえる。

・支持杭に発生する曲げモーメント

図9,10に加振時に支持杭に発生する曲げモーメントの時刻歴および、杭の歪計測点で発生する曲げモーメントの最大値の杭深さ方向の分布を示す。最大曲げモーメントの分布形状はそれぞれ杭頭部を静的に加力する時の支持杭の曲げモーメント分布と同様の形状を示す。地盤はG.L.-15cmで地盤の剛性が変化するが、この地点で支持杭の最大曲げモーメントが極端に大きくなる傾向は見られない。杭頭ピンの場合、支持杭の最大曲げモーメントの分布は地中部において小さく、主にG.L.-15cm以下で大きくあらわれ、地盤表層で支持杭の変形が大きいことを示している。

耐震杭、あるいは弾塑性耐震杭を設置する場合、杭頭部近傍で支持杭に発生する最大曲げモーメントが低減される。特に支持杭の杭頭接合条件をピンとする場合、杭頭部近傍に発生する最大曲げモーメントは地中部で発生する最大曲げモーメントとほぼ同等まで低減されることがわかる。

耐震杭を設けると、上部構造の慣性力を耐震杭に負担させることが可能である。特に本実験の場合 $T_b < T_s$ であり、地盤の1次固有周期に近い地盤-杭基礎-上部構造連成系の1次モードが卓越する。このとき上部構造と地盤の振動の同時性が高く(25)26(27)28)、支持杭の杭頭接合条件を剛とした場合には上部構造の慣性力及び地盤の変形により杭に発生する曲げモーメントはほぼ同時に最大値をとる。したがって、耐震杭に上部構造の慣性力を負担させることはそのまま全体として杭に生じる曲げモーメントの低減につながったと考えられる。逆に、杭頭ピンの場合には上部構造の慣性力及び地盤の変形により杭に発生する曲げモーメントはそれぞれ打ち消しあう関係にあるが、耐震杭を導入して支持杭にはたらく上部構造の慣性力を減少させても全体として曲げモーメントを低減することとなった。これは、地盤表層における支持杭の曲げモーメントを発生させる要因として上部構造の慣性力が支配的であるためと考えられる。

3.3 上部構造に入力するエネルギー

図11に上部構造に入力するエネルギーを示す。上部構造に入力するエネルギーは、上部構造の質量、基礎の加速度、上部構造の速度(上部構造の速度は変位の差分から求めた)、時間増分の積の積分として求め、地盤表面と基礎の相対変位を基準化するときと同じ方法を

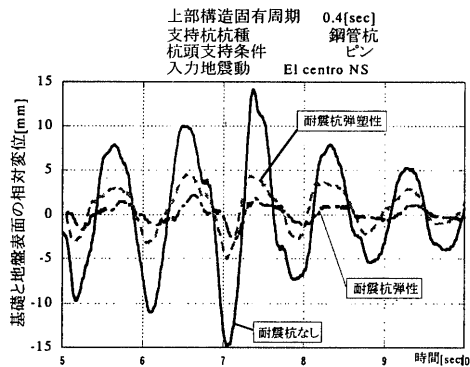


図7 地盤表面と基礎の相対変位時刻歴

を用いて基準化する。

支持杭の杭頭接合条件がピンで支持杭の杭頭水平剛性が小さい場合に上部構造への入力エネルギーが低減するケースが見られる。これは、損傷制御杭基礎構造のエネルギー吸収が弾塑性耐震杭杭頭部の塑性化によっており、基礎の水平剛性が小さく、基礎と地盤の相対変位が大きいほど耐震杭の履歴吸収エネルギーが大きくなるためである。

支持杭の杭頭接合条件がピンの場合でも地震動によっては弾塑性耐震杭のエネルギー吸収効果が顕れない場合がある。これは耐震杭の有無による構造物系の固有周期の差と入力地震動の周期特性が、構造物系への入力エネルギーに差を及ぼしたものと推定される。構造物の周期特性による入力エネルギーの差が弾塑性耐震杭のエネルギー吸収効果をキャンセルしたと考えられる。

文献6)で石丸らも指摘するように、杭基礎に許容できる基礎と地盤の相対変位は、大変位を許容する免震構造等と比べ小さく、本実験においても耐震杭のエネルギー吸収能力は限定的に顕れる結果となった。

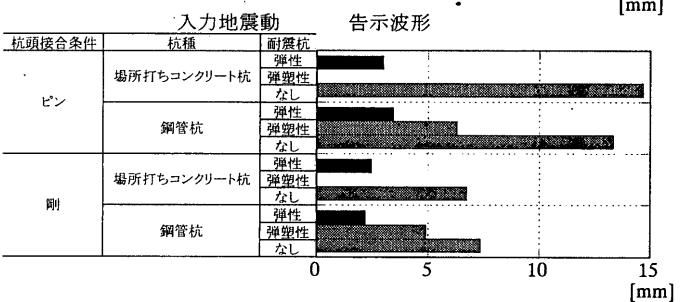
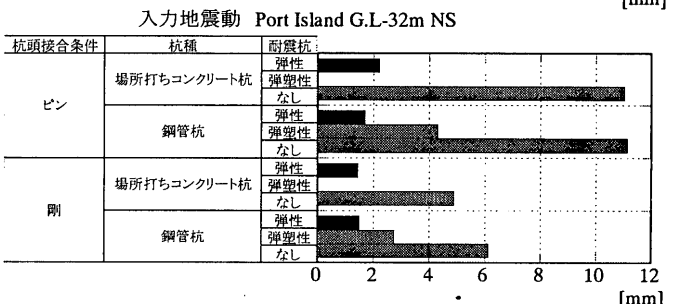
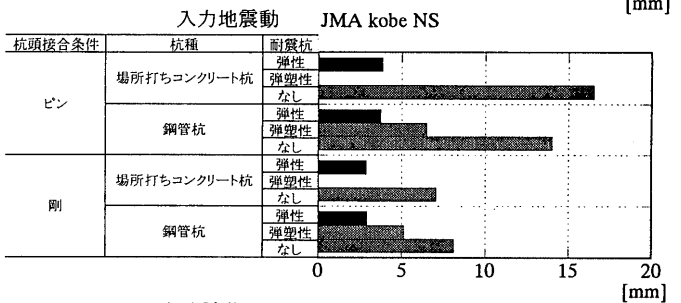
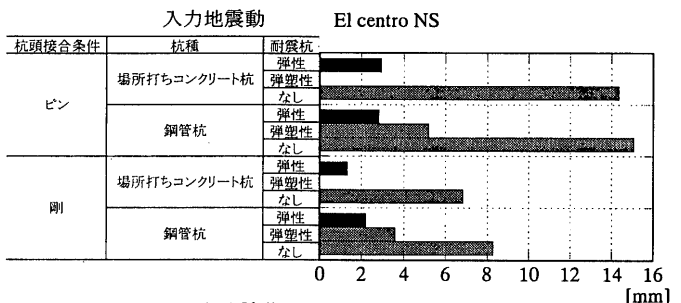


図8 地盤表面と基礎の最大相対変位

4. 結論

細長い支持杭と太短い耐震杭を併用した損傷制御杭基礎構造の動的挙動の把握を目的として、地盤-杭基礎-上部構造連成系をモデル化した模型を作成した。作成した模型を用いた加振実験から、次の知見を得た。

(1) 地盤-杭基礎-上部構造連成系の1次モードが卓越し、上部構造の慣性力、及び地盤の変形によって発生する支持杭の曲げモーメントの同時性が高い場合、細長い支持杭と太短い耐震杭を併用することにより、支持杭杭頭部に発生する曲げモーメントを低減できる。杭頭接合条件がピンの場合は、上部構造の慣性力及び地盤の変形によって発生する支持杭の曲げモーメントは打ち消しあう関係にあるが、上部構造の慣性力によって発生する曲げモーメントが支配的である場合には、耐震杭を設置することで支持杭杭頭部に発生する曲げモーメントを低減する効果が得られる。損傷制御杭基礎構造は、支持杭の健全性を確保する方法として有効である。

(2) 耐震杭杭頭部を塑性化させることにより、上部構造に入力するエネルギーを低減するケースが見られる。支持杭の健全性を確保するためには、基礎に大変位を許容しつつエネルギー吸収を図ることは困難であるが、基礎構造を局部的に塑性化させることにより上部構造に入力するエネルギーを低減する可能性を示すことができた。

提案した損傷制御杭基礎構造は、免震構造とは異なり基礎の水平剛性を確保しつつエネルギー吸収を図る方法であるので、長周期成分の卓越する地震動に対しても適用可能であると考えられる。なお、本研究の模型は弾塑性耐震杭以外の部分については弾性挙動を対象としており、地盤の液状化、支持杭あるいは上部構造の塑性化などの影響についても検討が必要である。

謝辞

本研究は、文部省科学研究費（基礎研究(A)(2)、課題番号：11305038、代表者：和田章）及び、日本鉄鋼連盟の援助を得て行なわれています。実験に際しては株式会社フジタのご協力のもと、振動台を使用させていただきました。また、時松孝次（東京工業大学教授）、中井正一（千葉大学教授）、竹内徹（東京工業大学助教授）、平田尚（新日本製鐵株式会社）にご助言を頂いており、ここに記して謝意を表します。

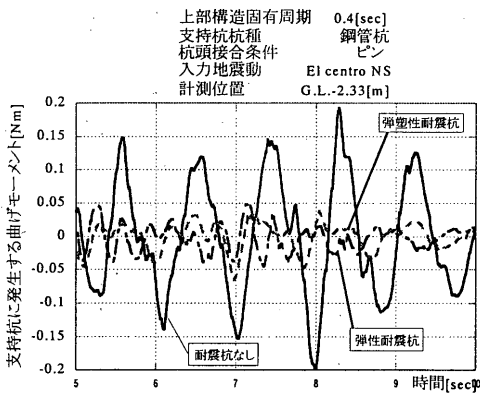


図9 曲げモーメントの時刻歴波形

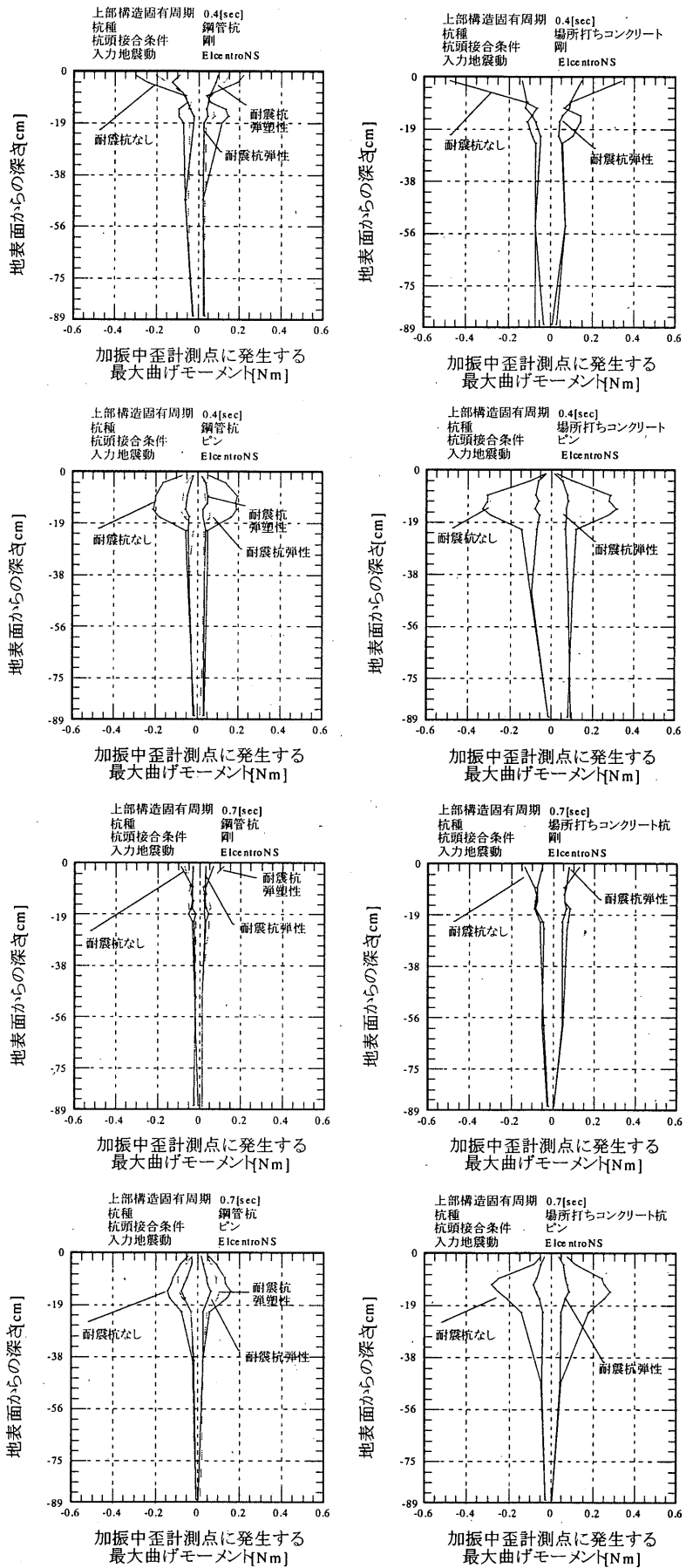


図10 加振中各歪計測点に発生する最大曲げモーメントの深さ方向の分布

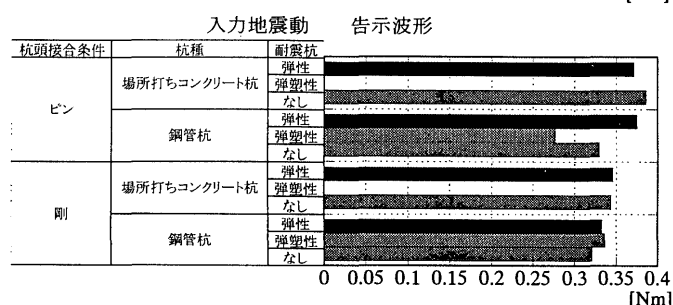
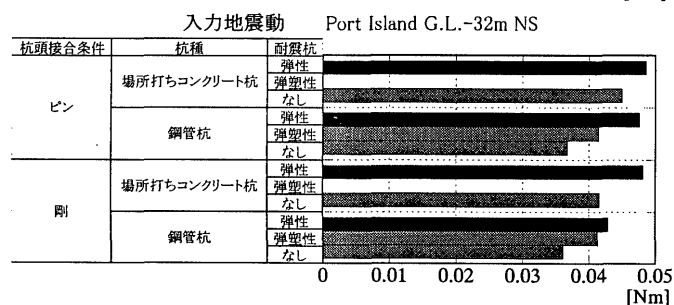
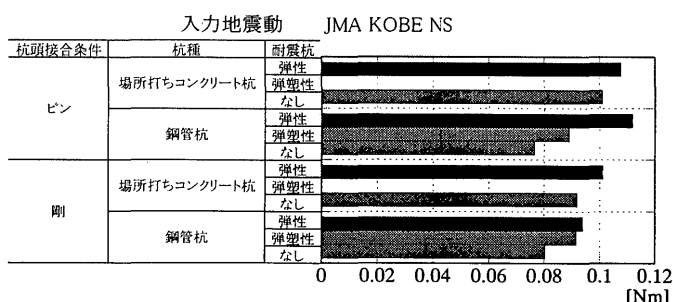
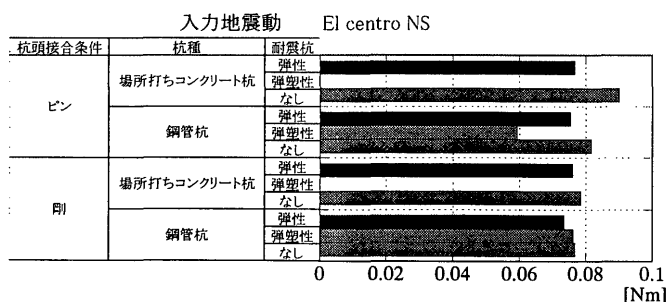


図 11 上部構造に入力するエネルギー

参考文献

- 1)長瀧慶明, 妹尾博明:建物周囲に設置した地中壁による杭基礎の水平力低減効果, 日本建築学会構造系論文集, 第467号, pp.73~82, 1995.1
- 2)藤川智, 福武毅芳:短杭併用による支持杭の応力低減効果の解析的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.781~782, 1997.9
- 3)風間了, 竹内章博:外管杭を有する耐震杭の水平挙動(その1 模型実験および解析方法), 日本建築学会構造系論文集, 第525号, pp.63~70, 1999.11
- 4)風間了, 竹内章博:外管杭を有する耐震杭の水平挙動(その2 PHC杭と鋼管杭から構成される耐震杭の水平耐力), 日本建築学会構造系論文集, 第547号, pp.97~104, 2001.9
- 5)風間了, 竹内章博:外管杭を有する耐震杭の水平挙動(その3 施工を考慮した本杭と外管杭先端の結合条件), 日本建築学会構造系論文集, 第559号, pp.113~120, 2002.9
- 6)石丸辰治, 新谷隆弘, 森川和彦, 魚津忠弘, 山崎貞弘, 吉田明義:地盤免震に関する基礎的研究(その1 基本概念と静的載荷実験), 日本建築学会大会学術講演集, B-2, pp.653, 654, 1999.9
- 7)石丸辰治, 新谷隆弘, 森川和彦, 魚津忠弘, 山崎貞弘, 吉田明義:地盤免震に関する基礎的研究(その2 動特性と簡単な解析モデル), 日本建築学会大会学術講演集, B-2, pp.655, 656, 1999.9
- 8)下村幸男, 大島快仁, 石丸辰治, 新谷隆弘:地盤免震に関する基礎的研究(その3 動的相互作用を考慮した解析的検討), 日本建築学会大会学術講演集, B-2, pp.657, 658, 1999.9
- 9)蕪木杏子, 石丸辰治, 下村幸男, 近藤龍児, 秦一平, 吉田泰光:地盤免震システムに関する基礎的研究(その1 実大規模実験結果の概要), 日本建築学会大会学術講演集, B-2, pp.577, 578, 2001.9
- 10)近藤龍児, 下村幸男, 蕪木杏子, 秦一平, 石丸辰治:地盤免震システムに関する基礎的研究(その2 実験装置および周辺地盤の動特性), 日本建築学会大会学術講演集, B-2, pp.579, 580, 2001.9
- 11)長江拓也, 内村均, 小林恒一, 吉田望, 林静雄:変形性能に優れた鉄筋コンクリート杭に支持される建物の地震応答解析, 日本建築学会構造系論文集, 第555号, pp.107~114, 2002.5
- 12)津田和義, 杉村義広, 大杉文哉, 中島隆裕, 椿原康則, 遠藤年誠:エネルギー吸収を考慮した杭頭接合法に関する研究(その9 ロッキングを利用した鉛ダンパーによる応答制御の解析モデル), 日本建築学会大会学術講演集, B-1, pp.631, 632, 2003.9
- 13)中島隆裕, 平出務, 石井修, 山崎慎介, 熊谷雄二, 田中英二:エネルギー吸収を考慮した杭頭接合法に関する研究(その10 鉛ダンパーによる応答制御の検討) 日本建築学会大会学術講演集, B-1, pp.633, 634, 2003.9
- 14)稲垣浩文, 山田哲, 和田章:縮小模型を用いた損傷制御杭基礎構造の振動台実験

- 15)谷川敬祐, 稲垣浩文, 小林勝己, 山田哲, 和田章:縮小模型を用いた損傷制御杭基礎構造の振動台実験(その2 試験体概要および実験計画), 日本建築学会大会学術講演集, B-2, pp.931, 932, 2001.9
- 16)稲垣浩文, 谷川敬祐, 小林勝己, 山田哲, 和田章:縮小模型を用いた損傷制御杭基礎構造の振動台実験(その3 実験結果及び考察), 日本建築学会大会学術講演集, B-2, pp.933, 934, 2001.9
- 17)秋山宏, エネルギーの釣り合いに基づく建築物の耐震設計:技報堂出版, 1999
- 18)小野泰寛, 弘中孝宜, 山田哲, 佐伯英一郎, 永田誠, 小林勝己, 和田章:縮小模型を用いた損傷制御杭基礎構造の振動台実験(その5 模型の改良と実験計画), 日本建築学会大会学術講演集, B-2, pp.345, 346, 2003.9
- 19)弘中孝宜, 山田哲, 佐伯英一郎, 永田誠, 小林勝己, 和田章:縮小模型を用いた損傷制御杭基礎構造の振動台実験(その6 実験結果), 日本建築学会大会学術講演集, B-2, pp.347, 348, 2003.9
- 20)中井正一, 真野英之, 松田崇, 石田理永:極短杭を有する杭基礎構造物の振動特性に関する基礎的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第567号, pp.79~84, 2003.5
- 21)小関憲幸, 水野二十一, 三浦賢治, 森信夫:杭支持建物における根入れ部・杭の地震時水平力分担率模型実験(その1) -原型の設定, 実験概要, 静的・自由振動実験結果-, 日本建築学会学術講演概要集, pp.1727, 1728, 1979.9
- 22)杉村義広, 徐挺:簡単なモデル解析による建物と地盤の動的相互作用, 建築技術, 2001.7
- 23)日本建築学会:建築基礎構造設計指針 2001.10
- 24)勅使河原正臣, 倉本洋:これならわかる限界耐力計算 建築技術 2001.12
- 25)倉持博之, 許斐信三, 三町直史:応答変位法による杭の耐震設計(その7 地震力の評価(性能設計への提案)), 日本建築学会大会学術講演集, B-1, pp.457, 458, 2002.8
- 26)三町直史, 許斐信三, 倉持博之:応答変位法による杭の耐震設計(その8 地震力の評価(非液状化地盤での検証)), 日本建築学会大会学術講演集, B-1, pp.459, 460, 2002.8
- 27)古俣翠, 鈴木比呂子, 時松孝次:大型せん断土槽実験における地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響, 日本建築学会大会学術講演集, B-1, pp.589, 590, 2003.9
- 28)鈴木比呂子, 時松孝次:応答変位法による地盤-杭-構造物系振動実験の応力評価, 日本建築学会大会学術講演集, B-1, pp.591, 592, 2003.9

(2003年6月10日原稿受理, 2003年12月24日採用決定)