

杭と地盤の非線形性を考慮した単杭の設計法に関する研究†

町田幸紀* , 関崇夫**

A Study on Seismic Design for Laterally Loaded Single Pile Considering Pile and Soil Non-Linearity†

Yukinori Machida* and Takao Seki**

A behavior of a pile supported structure is affected by nonlinear dynamic soil-structure interaction during earthquake. There are two major factors which affect the nonlinear soil-structure interaction, the one is the local nonlinearity and the other is the site nonlinearity. In this paper, a seismic design for laterally loaded single pile considering pile and soil non-linearity is presented. The applicability of the seismic design are investigated by simulation analyses of the lateral load tests of 12 full-scale single piles, the centrifuge table test, the shaking table tests and pile foundation damaged by Hyogoken-nanbu Earthquake. The estimated results, load-displacement relationships and bending moment and displacement and shear force, are good agreement with observed results. From the above study results, it is confirmed that the proposed design method is useful for laterally loaded single pile considering pile and soil non-linearity.

Key Words: Seismic Design, Single pile, Lateral resistance of pile, Centrifuge model test, Large shaking table test, Simulation analysis, Pseudo-static analysis

1 はじめに

近年の地震による杭基礎構造物の被害から、杭基礎の耐震設計は上部構造物の慣性力のほかに、地震時の地盤変位を設計外力として行われている。その解析モデルには、上部構造物、杭基礎と地盤を連成させ動的に杭応答を算定する上部構造物-基礎-地盤連成系モデルや、上部構造物と杭基礎を分離し、杭応答を評価する分離型モデルに分類される。分離型モデルに属する応答変位法は構造物の慣性力と地盤変位の影響を考慮できるが、それぞれを考慮する際の地盤ばねの評価法が異なるため、これを統一して評価できれば実務設計上合理的と考えられる。

そこで本研究では、杭の耐震設計を合理化するために、統一した地盤ばね評価法に基づく、杭体と地盤の非線形性を考慮した単杭の設計法を提案し、各種実験結果、地震により被災した杭基礎構造物に対するシミュレーション解析を行うことで設計手法の妥当性を検証することを目的とする。

2 設計法の概要

2.1 杭の基本方程式

解析には、地震時の地盤変位を考慮した杭の水平抵抗および水平変位を求めるために応答変位法を採用する。

この手法は、杭体を梁要素、地盤を連続するばねに置換した弾性支承梁と仮定した杭に、杭頭水平力と地盤ばねを介して地盤変位を与える解法で、基本方程式は次式となる。

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + k_{hf} B (y - y_g) = 0 \quad (1)$$

ここに、 E_p ：杭のヤング係数、 I_p ：杭の断面 2 次モーメント、 x ：深度、 y ：杭の水平変位、 k_{hf} ：水平地盤反力係数、 B ：杭径、 y_g ：地盤変位を表す。

杭の応答計算は、杭軸方向に杭体および地盤を多層分割し、各要素内における杭体の曲げモーメント M ~曲率 ϕ 関係および水平地盤反力 p ~変位 y 関係を設定する。 $E_p I_p$ および k_h を、それぞれ M ~ ϕ および p ~ y 関係の割線勾配として与えて(1)式を解き、杭の曲げモーメント M および水平変位 y を求める。得られた M および y に対応する $E_p I_p$ および k_h を M ~ ϕ 関係、 p ~ y 関係から求め、再度(1)式を解く。これを繰り返し収斂計算することによって杭の応答を求める。

2.2 水平地盤反力係数

本研究では、水平地盤反力係数に半無限一様地盤上にある無限長の梁に荷重を作用させたときの Vesic の式を

† 原稿受理 平成 27 年 2 月 27 日 Received February 27, 2015

* 建築学専攻大学院生 (Graduate Student, Department of Architecture)

** 建築学科 (Department of Architecture)

基に、圧縮側地盤と引張側地盤の両者の抵抗を考慮して2倍した(2)式の Francis²⁾の提案式を用いる。

$$k_{hf} = 1.3 \cdot \frac{E_s}{(1-\nu_s^2) \cdot B} \cdot \sqrt[12]{\frac{E_s \cdot B^4}{E_p \cdot I_p}} \quad (2)$$

ここに、 E_s ：地盤の変形係数、 ν_s ：地盤のポアソン比、 B ：杭径、 E_p ：杭のヤング係数、 I_p ：杭の断面2次モーメントを表す。

また、地盤の変形係数 E_s は、せん断波速度から求まる変形係数を用いる。

2・3 水平地盤反力～変位関係

本研究では、単杭の実大水平載荷試験結果のシミュレーション解析で採用した水平地盤反力～変位関係を用いる³⁾。

$$p = p_u \left[1 - \left\{ \exp\left(-\frac{k_h \cdot y}{p_u}\right) \right\}^\xi \right] \quad (3)$$

ここに、 p_u ：地盤の極限水平地盤反力、 k_h ：Francisの式から評価される地盤ばね ($k_h = k_{hf} \cdot B$)、 y ：杭と地盤の相対変位、 ξ ：原点における地盤ばね値を調整するパラメーターを表す。

杭の水平載荷試験に対しては $\xi = 0.15$ とし、地震時の地盤変位を考慮する場合は、せん断ひずみによる変形係数 E_s の剛性低下を考慮して地盤ばねを算定するため $\xi = 1.0$ とする。

2・4 極限水平地盤反力

地盤の極限水平地盤反力は、砂質土を Broms⁴⁾の(4)式、粘性土を岸田・中井⁵⁾の(5)式により設定する。

$$p_u = 3 \cdot K_p \cdot \sigma'_z \quad (\text{砂質土}) \quad (4)$$

$$p_u = 2 \cdot C_u \sim 9 \cdot C_u \quad (\text{粘性土}) \quad (5)$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (6)$$

ここに、 K_p ：受働土圧係数、 ϕ ：内部摩擦角、 σ'_z ：有効上載圧、 C_u ：非排水せん断強度を表す。

3 地盤のせん断波速度

地盤の初期剛性に用いるせん断波速度は、地盤調査でPS検層が行われる場合は測定結果を用いる。PS検層結果が無い場合は、標準貫入試験のN値を用いて今井⁶⁾の式から設定する。

$$V_s = 80.6N^{0.331} \quad (\text{砂質土}) \quad (7)$$

$$V_s = 102N^{0.292} \quad (\text{粘性土}) \quad (8)$$

また、堆積年代と土質区分が得られている場合は太田・後藤⁷⁾の式から設定する。

$$V_s = 68.79N^{0.171}H^{0.199}F_1F_2 \quad (9)$$

ここに、 N ：層の平均N値、 H ：深度(m)、 F_1 ：堆積年代(沖積層1.000, 洪積層1.303)、 F_2 ：土質に応じた係数(粘土1.000, 細砂1.086, 中砂1.066, 粗砂1.135, 砂礫1.153, 礫1.448)を示す。

4 設計法の検証事例

4・1 実大水平載荷試験結果との比較

PS検層結果がなく、標準貫入試験のN値しか得られていない杭の水平載荷試験結果⁸⁾に対し、提案手法を用いてシミュレーション解析を行う。Table1に検討に用いた12例の水平載荷試験の一覧を示す。なお、杭体の諸

元および地盤の諸定数の詳細は文献8)を参照されたい。水平地盤反力係数は(2)式とし、地盤のせん断波速度を標準貫入試験のN値から(7)式、(8)式により設定した。また、極限水平地盤反力は(4)式、(5)式から設定した。各試験地盤の地下水位については文献8)に明記されていない。そこで、解析では地下水位の影響を検討するため地表面とGL-2.0mの位置と仮定した。

ここでは、ID5514、ID5553の解析結果についての杭頭における荷重～変位関係をFig.1に示す。図中の破線は地下水位が地表面の場合、実線はGL-2.0mの結果をそれぞれ示している。(a)図の砂質土地盤では地下水位をGL-2.0mとした場合、実験結果と対応が良い。地下水位を地表面とすると、有効上載圧が低下するため解析結果は過小に評価する。一方、(b)図の粘性土地盤では砂質土地盤に比べ地下水位による影響を受けず実験結果を概ね捉えている。特に砂質土地盤の場合は、地下水位の位置が荷重～変位関係に与える影響が大きく、地盤調査の際には地下水位を確認する必要がある。

Table1 Examined lateral load test⁸⁾

ID	杭種	杭径 (m)	杭長 (m)	試験最大荷重 (kN)	試験最大変位 (mm)	土質
5501	鋼管杭	0.600	45.0	441.0	41.6	砂質土
5514	鋼管杭	0.610	23.5	588.0	106.3	砂質土
5525	鋼管杭	0.800	51.0	294.0	53.5	互層
5531	鋼管杭	0.813	36.5	490.0	113.4	粘性土
5533	鋼管杭	0.800	45.0	980.0	79.9	互層
5553	鋼管杭	0.914	26.0	784.0	56.5	粘性土
6506	鋼管杭	0.813	30.0	490.0	70.0	粘性土
6510	鋼管杭	0.600	18.0	382.2	135.0	粘性土
6531	場所打ち杭	1.000	24.0	637.0	118.8	砂質土
6534	場所打ち杭	1.200	28.9	1225.0	188.2	砂質土
互層No.2	鋼管杭	0.600	43.4	980.0	79.9	互層
土研単杭	鋼管杭	1.200	24.4	784.0	172.4	互層

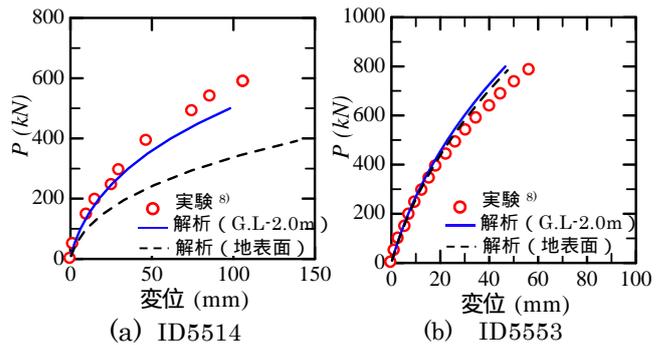


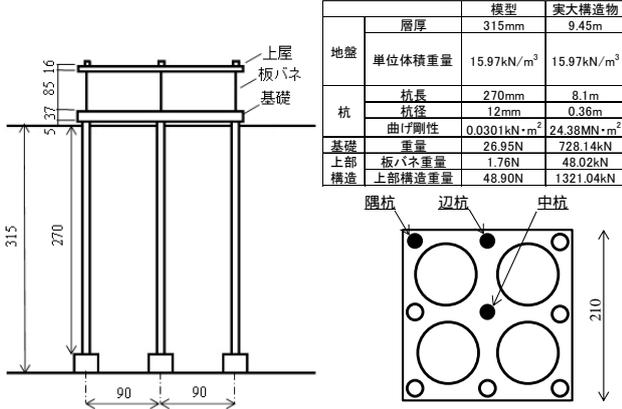
Fig.1 Relationship of load ~ displacement at pile⁹⁾

4・2 遠心模型実験結果との比較

4・2・1 遠心模型実験の概要

木村ら^{10)・12)}の行った杭基礎構造物の遠心模型実験結果に対してシミュレーション解析を行う。解析対象としたモデルの実験模型をFig.2に、杭基礎構造物模型の諸元と実構造物に換算したものをTable2に示す。また、実スケールに換算した自由地盤の解析諸元をTable3に示す。実験モデルの基礎は剛体と見なせる剛基礎モデル

Table2 Specifications of the soil-pile-structure¹¹⁾



Cross section of rigid foundation Plane of rigid foundation

Fig.2 Experimental model (Unit: mm)¹⁰⁾

Table3 Specifications of the ground(Literature 11)
Retouch in table²⁾

層レベル (m)	層厚 (m)	V_s (m/s)	規準せん断ひずみ ($\times 10^{-4}$)	等価せん断弾性係数 G (kN/m^2)	等価変形係数 E_s (kN/m^2)
0.00					
0.45	0.45	96	0.63	3651	9734
0.81	0.36	125	1.13	6230	16609
1.20	0.39	140	1.47	7883	21016
2.10	0.90	159	1.95	10601	28262
2.85	0.75	176	2.47	14229	37935
3.60	0.75	188	2.87	17654	47066
4.20	0.60	197	3.20	20513	54688
4.86	0.66	204	3.48	23793	63432
5.40	0.54	211	3.74	26407	70401
5.85	0.45	216	3.94	28489	75952
6.45	0.60	220	4.15	30906	82395
7.05	0.60	226	4.37	33926	90447
7.80	0.75	231	4.62	37532	100060
8.55	0.75	237	4.88	41412	110404
9.45	0.90	242	5.07	45111	120266

最大減衰定数 $h_{max}=0.25$

とし、地盤は相対密度 93%の気乾状態の豊浦砂で構成されている。剛基礎モデルの基礎は厚さ 37mm のアルミ板で、地表面より 5mm 離して設置している。また、上部構造物は断面 3mm×10mm、長さ 85mm の板ばね 9 枚に支持されている。杭基礎は杭径 12mm(実換算 360mm)、肉厚 0.5mm(実換算 15mm)、杭長 270mm(実換算 8.1m)、杭間隔は 90mm (実換算 2.7m、杭径の 7.5 倍) の、正方位列の 9 本群杭である。この 9 本のうち 3 本の杭(隅杭、辺杭、中杭)を解析対象とした。

実験は、遠心加速度 30G 場(縮尺 1/30)において底部より実換算で最大加速度が約 1.40m/s^2 の臨海波を与えている。また、自由地盤系の 1 次固有振動数は 4.3Hz、杭構造系モデルの 1 次固有振動数は 1.6Hz である¹⁰⁾。

4・2・2 自由地盤の応答変位と杭頭水平力

Fig. 3 に自由地盤の応答変位分布を示す。地盤の非線形特性を規準ひずみと最大減衰定数から修正 R-O モデルで近似した。自由地盤の変位分布は、Table 2 に示された各層の等価せん断弾性係数に対応する有効せん断ひずみから最大せん断ひずみを算定し、その値に層厚を乗じた層間変位を地盤深部から地表面へ順次加算して求め

る。その際、文献 10)、11)では等価せん断弾性係数を求める時のせん断ひずみについて明記されていないため、有効せん断ひずみが最大せん断ひずみの 0.65 倍と仮定して計算すると、実験結果と応答解析結果の変位分布が良く対応する結果が得られた。そこで、このようにして求めた杭先端に対する相対変位を地盤ばねを介して杭体に与えた。

また、水平地盤反力係数の算定に用いる地盤の変形係数 E_s は、各層の最大せん断ひずみ時の最大せん断弾性係数とポアソン比 (=0.333) から算定した。

杭頭水平力は、実験から得られた杭頭部に作用するせん断力分布図¹⁰⁾から、隅杭に 133kN、中杭に 108kN、辺杭に 118kN を与えた。

解析にあたり、杭体は弾性、境界条件として杭頭、杭先端とも固定とした。

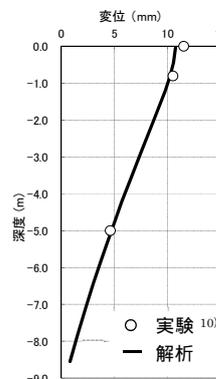


Fig.3 Distributions of ground displacement²¹⁾

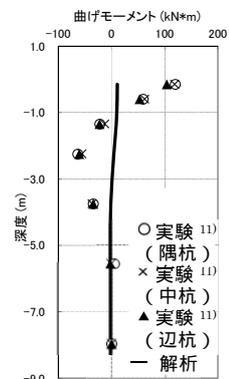


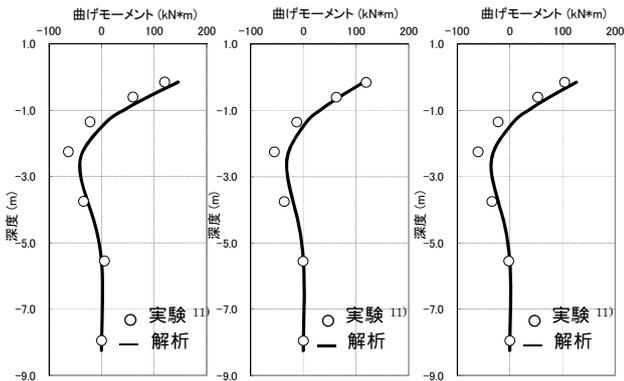
Fig.4 Distributions of bending moment²¹⁾
(Ground displacement)

4・2・3 解析結果

実験結果の杭応力分布に与える杭頭水平力と地盤変位の影響を検討するため、地盤変位のみを与えた場合の杭体の曲げモーメント分布を Fig.4 に、各杭に杭頭水平力のみを与えた場合の曲げモーメント分布を Fig.5 に示す。Fig.4、5 を比較すると、杭頭水平力による杭応力が大きいことから上部構造物からの慣性力が杭応力に対して支配的であることが分かる。

杭頭水平力と地盤変位の与え方は、解析による自由地盤の 1 次固有振動数が 5.27Hz、杭構造系モデルの 1 次固有振動数が 1.68Hz¹¹⁾と、構造物の周期が地盤の周期より長いいため二乗和平方根 (SRSS) で評価した。各杭を二乗和平方根で重ね合わせた杭体の曲げモーメント分布の解析結果と実験結果を比較して Fig.6 に、Fig.7 にせん断力の実験結果と解析結果の比較をそれぞれ示す。杭体の曲げモーメント分布図には、比較のために同時載荷の結果も併記した。隅杭、辺杭では、杭頭曲げモーメントは解析結果が実験結果より大きく評価している。また、地中部の最大曲げモーメントは実験結果より小さく評価しているが、その発生深度はほぼ等しい結果が得られた。一方、中杭の杭頭曲げモーメントは実験結果より小さく評価している。地中部の最大曲げモーメントは、

隅杭，辺杭と同様に実験結果より小さいが，その発生深



(Shear force)

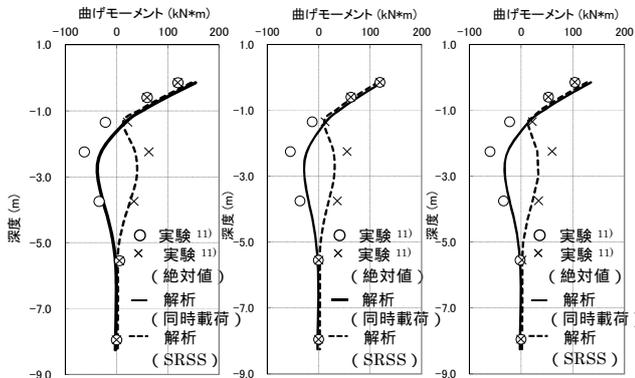


Fig.6 Distributions of bending moment 21)

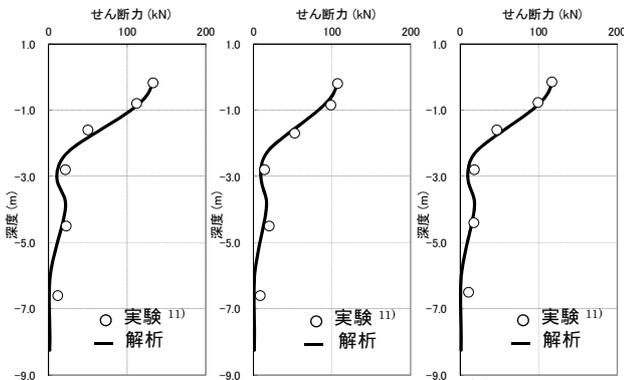


Fig.7 Distributions of shear force 21)

度はほぼ等しい．比較のために示した同時載荷の解析結果でも同様な傾向が得られた．また，杭体のせん断力分布についても実験結果と対応が良い結果が得られた．

4・3 大型振動台実験結果との比較（非液化化地盤）

4・3・1 大型振動台実験概要

本節と次節では時松ら^{14)・19)}の実施した大型振動台実験の試験結果に対してシミュレーション解析を行う．非液化化地盤と液化化地盤の実験モデルを Fig.8 に，杭体の諸元を Table 4 に示す．非液化化地盤の解析対象としたモデルは 4 ケースとし，基礎の根入れ無と根入れ有（0.5m），地盤の固有周期（ $T_g=0.16s^{18)}$ ）に対して構造物の固有周期が短周期と長周期に分類される．せん断土槽は幅 11.6m 奥行き 3.1m で，非液化化地盤は乾燥状態で相対密度 80%の日光 5 号硅砂（ $e_{max}=0.98, e_{min}=0.65, D_{50}=0.42mm$ ）で作製されている．

一方，液化化地盤は 3 層モデルで，底面から 1.5m までを砂礫層，その上部を 4m の飽和砂層，表層を 0.5m の乾燥砂層からなる．飽和砂層および乾燥砂層は霞ヶ浦砂（ $e_{max}=0.96, e_{min}=0.57, D_{50}=0.31mm, F_c=5.4\%, D_r=60\%$ ）で作製されている．

杭基礎は杭径 165.2mm 肉厚 3.7mm の 4 本の鋼管杭を用いており，杭間隔は加振方向で 1.8m，加振直交方向で 1.2m（それぞれ杭径の約 10.9 倍，7.3 倍）．杭頭は基礎に剛接，杭先端は土槽底面にピン接合されている．基礎および上部構造物は鋼材で作製され，重量はそれぞれ 20.58kN，139.2kN である．

実験における入力地震波は，最大加速度を $2.4m/s^2$ に調整した RINKAI92²⁶⁾を与えている．

地盤のモデル化は，非液化化地盤の場合，最大加速度が $0.2 \sim 0.3m/s^2$ の加速度波形を入力したときの地盤の卓越周期が 0.16 秒であることから，地盤の平均せん断波速度を算定し，この値から平均せん断弾性係数を求めた．液化化地盤では，自由地盤の卓越周期から換算したせん断波速度が砂礫層で 230m/s，飽和砂層で 91m/s であり¹⁵⁾，この値から層の平均せん断弾性係数を求めた．深度方向の地盤の初期せん断弾性係数は，平均せん断弾性係

Table4 Specifications of the pile

杭径 (mm)	肉厚 (mm)	杭長 (m)		曲げ剛性 (kN・m ²)	降伏強度 (N/mm ²)
		非液化化地盤	液化化地盤		
165.2	3.7	4	5.5	1225	440

実験モデル	非液化化地盤		液化化地盤
	根入れ無	根入れ有	根入れ有
構造物固有周期	DAS ($T_b=0.06s$) DAL ($T_b=0.7s$)	DBS ($T_b=0.06s$) DBL ($T_b=0.7s$)	SBL ($T_b=0.8s$)

Fig.8 Experimental model (Literature16) Retouch in Fig.1)

数と拘束圧の影響を考慮して算定した。非液化化地盤における地盤材料の動的変形特性については、日光5号珪砂のデータが文献14)・19)に記載されていないため、振動実験などで地盤材料として使用されることが多い豊浦標準砂の試験データ使用し、岩崎・龍岡ら²³⁾の提案式に基づき拘束圧依存性を考慮して設定した。

地盤のN値は、Meyerhofの式²⁴⁾(10式)より算定した。内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$ は、得られたN値から建築基礎構造設計指針¹⁾に基づき算定した。

$$D_r = 21 \left(\frac{N}{\sigma'_{v0}/98+0.7} \right)^{0.5} \quad (10)$$

$$\phi = \sqrt{20N_1 + 20} \quad (3.5 \leq N_1 \leq 20) \quad (11)$$

$$\phi = 40^{\circ} \quad (N_1 > 20) \quad (12)$$

$$N_1 = N \cdot \sqrt{\frac{98}{\sigma'_v}} \quad (13)$$

ここで、 D_r : 相対密度(%), σ'_v : 有効上載圧(kN/m^2), N_1 : 換算N値を表す。

4・3・2 自由地盤の応答変位と杭頭水平力

非液化化地盤における地盤の応答変位は、実験結果の地盤の最大変位分布図¹⁶⁾から、同一の地盤モデルや加振条件であっても自由地盤の変位分布に差異が見られることから(Fig.9の(c)、(d)を参照)モデルごとに地盤の初期せん断剛性を調整せず、SHAKE²⁵⁾を用いてDAS, DAL, DBSとDBLモデルの地表面変位がそれぞれ7.2mm, 7mm, 10mmと9mmになるようにRINKAI92の最大加速度を調整して求めた。各モデルの自由地盤の応答変位分布をFig.9に示す。解析結果の地盤変位分布は実験結果のそれにほぼ対応している。応答変位法による杭応答解析時には、杭先端に対する相対変位を地盤ば

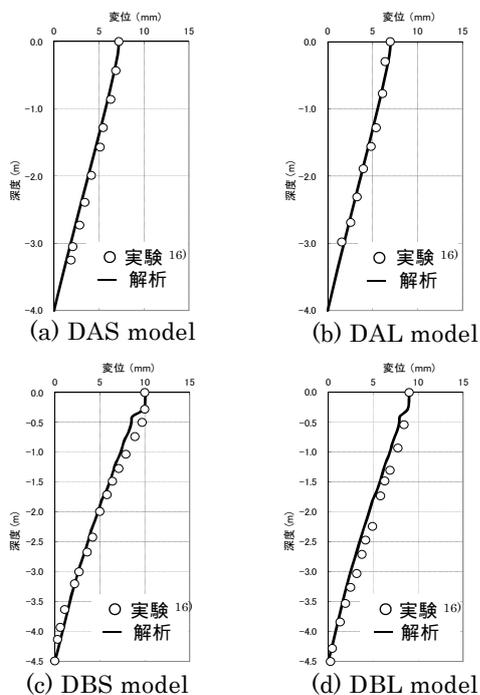


Fig.9 Distributions of ground displacement

ねを介して杭体に与えた。

また、水平地盤反力係数の算定に用いる地盤の変形係数は、地震応答解析結果より得られた最大せん断ひずみ時の変形係数とした。

杭頭水平力は、DASモデル, DALモデルでは構造物慣性力と杭頭曲げモーメントの関係図¹⁶⁾から、それぞれ125kN, 54kNを与えた。また、DBSモデルとDBLモデルでは根入れがあることから、上部構造物からの慣性力と基礎に作用する土圧を考慮した値66kN, 36kNを与えた¹⁸⁾。解析にあたり、杭体は弾性、境界条件として杭頭固定、杭先端ピンとした。

4・3・3 解析結果

各モデルに、地盤変位のみを与えた場合の杭体の曲げモーメント分布をFig.10に、杭頭水平力のみを与えた場合の杭体の曲げモーメント分布をFig.11に示す。Fig.10, 11を比較すると、短周期のDASモデルとDBSモデルでは、地盤変位のみによる杭頭曲げモーメントは実験結果に対して約1/10程度で、上部構造物からの慣性力が杭応力に対して支配的であることが分かる。一方、長周期のDALモデルとDBLモデルの地盤変位による杭頭曲げモーメントは、実験結果に対して約1/4程度である。

Fig.12に、各モデルの杭頭水平力と地盤変位を同時に作用させた場合と、杭頭水平力による杭応力と地盤変位による杭応力を二乗和平方根(SRSS)により重ね合わせた杭体の曲げモーメント分布を示す。上部構造が短周期のDASモデルとDBSモデルでは同時に作用させ、長周期のDALモデルとDBLモデルでは二乗和平方根で評価した。また比較のため、それぞれに同時載荷・二乗和平方根の結果も併記した。根入れの無いDASモデルとDALモデルでは、解析による杭頭曲げモーメントが実験結果よりも大きい値となった。これは、地盤の初期せん断剛性を上載圧を考慮して算定したが、地表面付近ではせん断剛性を実際より小さく評価した可能性が考えられる。一方、根入れのあるDBSモデルでは、杭頭曲げモーメント、地中部の最大モーメントとその発生深度ともに実験結果とほぼ対応している。また、DBLモデルでは杭頭曲げモーメントは実験結果と対応が良い。

各モデルの杭体のせん断力分布の実験結果と、同時載荷の解析結果との比較をFig.13に示す。特にDASモデルでは、杭頭から深度1.5m間の分布形状に差異が見られた。これはFig.12の杭頭曲げモーメントと同様に、初期せん断剛性や地盤の非線形特性の影響が考えられる。この点を除いては、いずれのモデルも実験結果と概ね対応していることが分かる。Fig.14に、DBSモデルとDBLモデルの実験結果と同時載荷の解析結果を比較した杭体の変位分布を示す。両者ともに実験結果と概ね対応する結果が得られた。

4・4 大型振動台実験結果との比較(液化化地盤)

4・4・1 解析モデル

液化化地盤の構造物慣性力に対する変動軸力の関係は、変動軸力が大きく上回る傾向がある¹⁹⁾。そのため、解析では基礎梁にかかる転倒モーメントを同時に考慮し

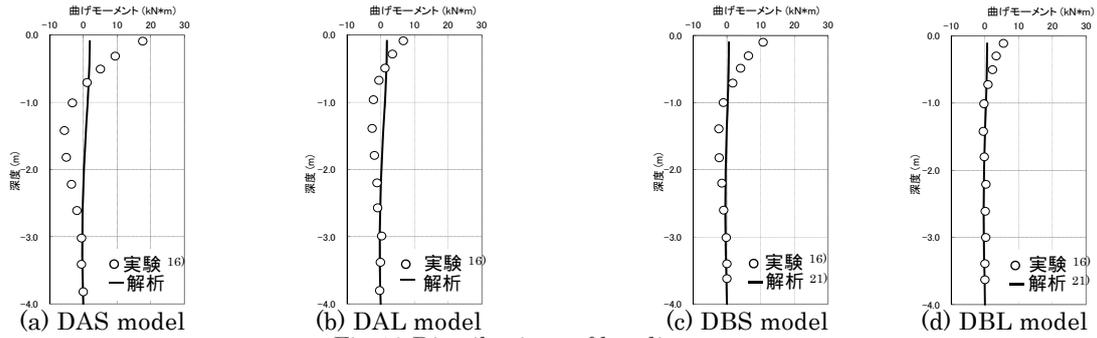


Fig.10 Distributions of bending moment
(Ground displacement)

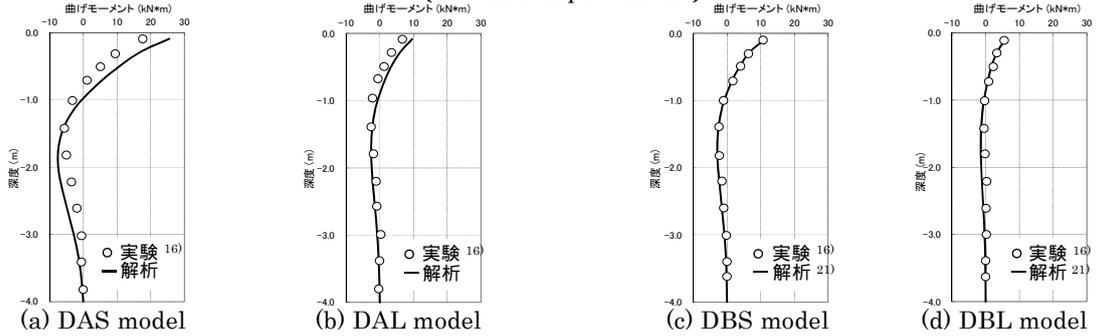


Fig.11 Distributions of bending moment
(Shear force)

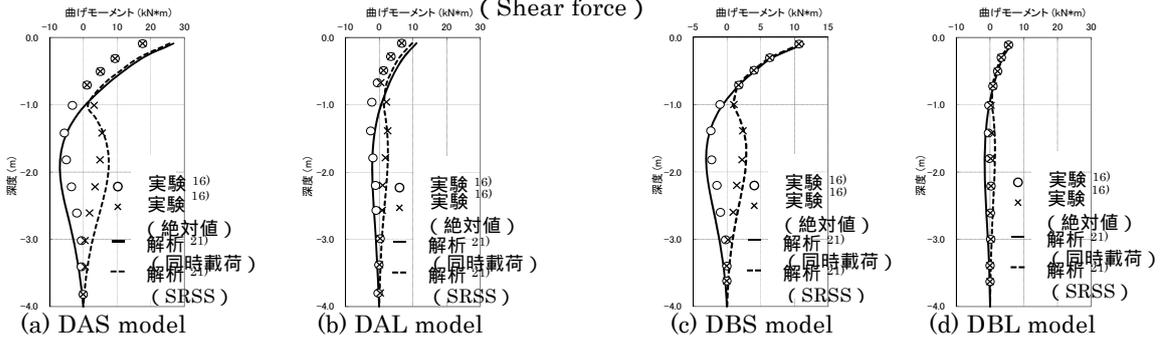


Fig.12 Distributions of bending moment

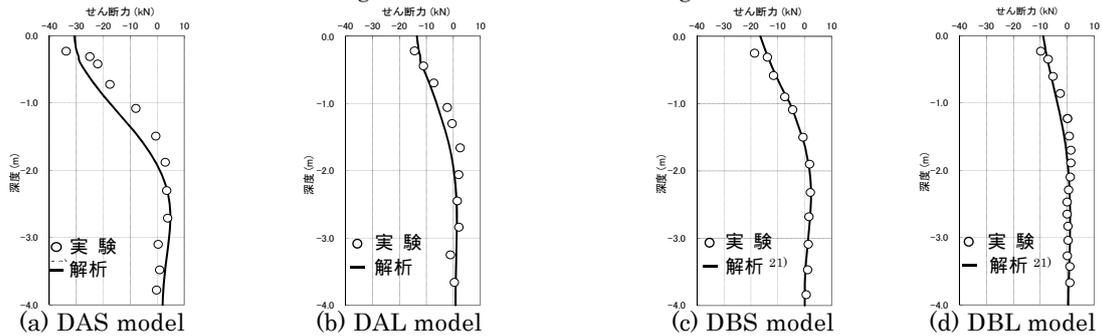


Fig.13 Distributions of shear force

なければならない．単杭モデルではこれを再現しにくい
ため，液状化地盤ではフレームモデルによって解析を行
う．

4・4・2 自由地盤の応答変位と杭頭水平力

地盤の応答変位はSHAKEによって応答を求めるべき
であるが，液状化地盤のように非常に大きな歪みの生じ
る地盤では評価することが難しいため，ここでは，Fig.15
に示す実験による推定変位深度分布を与える¹⁶⁾．

杭頭水平力は実験から得られる慣性力に全土圧を引い

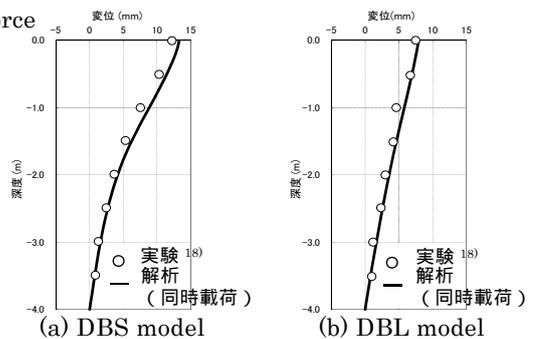


Fig.14 Distributions of pile displacement²¹⁾

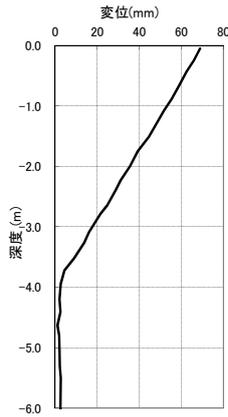
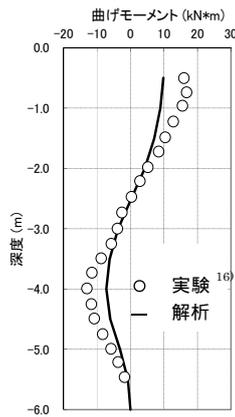
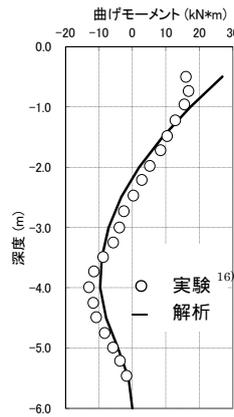


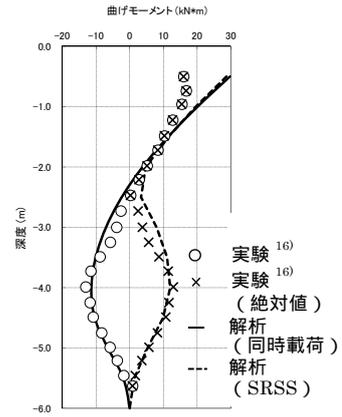
Fig.15 Distributions of ground displacement¹⁵⁾



(a) Ground displacement



(b) Shear force



(c) Simultaneous loading・SRSS

Fig.16 Distributions of bending moment

た 42kN を与えた。

地盤の水平地盤反力係数および極限地盤反力は液化化による低減率 0.1 を乗じて設定した。

4・4・3 解析結果

Fig.16 に、地盤変位のみを与えた場合 (a) 図)、杭頭水平力のみを与えた場合 (b) 図)、杭頭水平力と地盤変位を同位相に載荷した杭体の曲げモーメント分布 (c) 図) を示す。杭応力の重ね合わせは、構造物固有周期が液化化時の地盤の固有周期よりも短いため同時載荷としたが、比較のために二乗和平方根の結果も併記した。(a) 図をみると、地中部における最大曲げモーメントは砂礫層と飽和砂層の境界付近で表れている。また、(b) 図では杭頭モーメントを大きく評価している。同時載荷・SRSS では (b) 図と同様に杭頭を過大に評価しているが、地中部の曲げモーメントは実験結果を捉えている。

4・5 杭基礎の被害事例の検証

4・5・1 建物・地盤概要

兵庫県南部地震において被災した杭基礎構造物²²⁾に対してシミュレーション解析を行う。対象建物は昭和 45 年に神戸市須磨区に建設された地上 12 階で杭基礎 SRC 建物の集合住宅である。基礎形式は杭基礎 (PC 杭：杭径 500mm、杭長 17m) である。敷地地盤は GL-3m までが埋め土、GL-12m までが沖積砂質土と沖積粘性土の互層で、GL-12m 以深が砂礫層で一部に洪積粘性土が介在する。地震による基礎の被害として、杭頭の曲げ破壊が確認されているほか、上部構造に 1/26rad の傾斜が生じている。

Table 5 に自由地盤の解析諸元を示す。地盤のせん断波速度は、地盤の堆積年代が得られていることから N 値を用いて(9)式の太田・後藤の式から設定した。また、地盤の動的変形特性については、沖積層・洪積層の砂質土・粘性土は文献²²⁾の大阪地点の例を参照し、砂礫については今津・福武²⁷⁾の提案式を用いた。

解析にあたり、杭体の $M \sim \phi$ 関係を Fig.17 に示すトリリニアモデルとし、境界条件を杭頭固定、杭先端自由とした。

4・5・2 自由地盤の応答変位と杭頭水平力

Table5 Specifications of the ground

		深度(m)	平均N値	単位体積重量 (kN/m ³)	S波速度 (m/s)	ポアソン比
沖積層	盛土	3	9	16.7	112	0.4
	砂質土	7	29	16.7	180	0.35
	粘性土	11	13	13.7	165	0.4
洪積層	砂礫	15	48	17.6	333	0.3
	砂礫	20	41	17.6	343	0.3
	砂礫	25	60	17.6	387	0.3
	粘性土	26	25	14.7	296	0.35
	砂礫	27	42	17.6	376	0.3
	粘性土	28	24	14.7	298	0.35
	砂礫	32	51	17.6	398	0.3

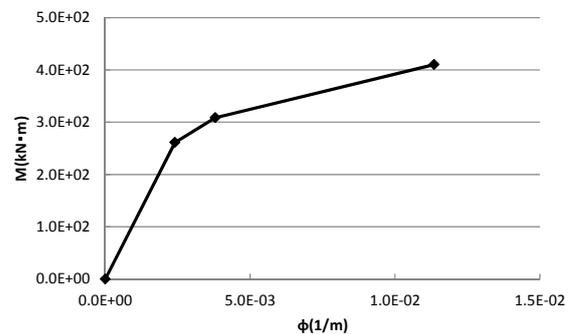


Fig.17 Nonlinearity of the pile

自由地盤の応答変位は SHAKE による地震応答解析を用いて算定した。入力地震動は、兵庫県南部地震で JR 鷹取駅の地表面で観測された記録波形 (EW 成分) を用いて、GL-32m の位置から E+F 入力とした。Fig.18 に入力加速度波形を、地盤の最大加速度分布、自由地盤の変位分布を Fig.19, 20 に示す。杭体には GL-20m の杭先端位置に対する相対変位を与えた。

杭頭水平力は、上部構造と基礎構造の慣性力と根入れによる影響を考慮して 526kN を与えた。

水平地盤反力係数の算定に用いる変形係数は、地震応答解析から得られた有効せん断ひずみ時の変形係数とした。

4・5・3 解析結果

Fig.21 に構造物慣性力と地盤変位を同位相・逆位相に作用させた杭体の曲げモーメントおよびせん断力分布を示す。同位相に載荷した場合の杭頭モーメントは終局耐

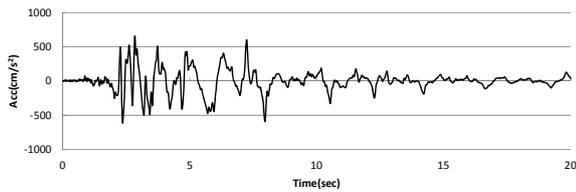


Fig.18 Input acceleration

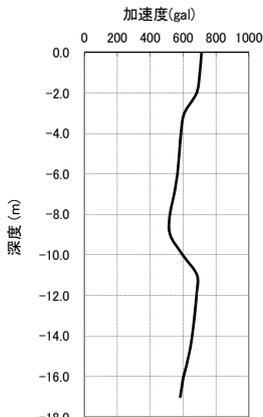


Fig.19 Distributions of acceleration

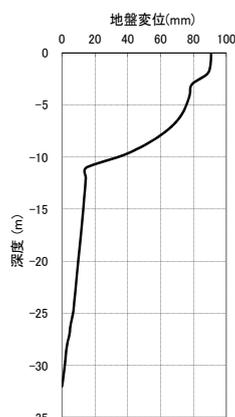


Fig.20 Distributions of ground displacement

力に達しており、杭頭から 8m の粘性土と砂礫の境界で降伏する結果が得られた。また、逆位相に载荷した場合には、杭頭のほか、杭地中部（杭頭から 3m と 8m）の 2 点で曲げ降伏に達する。せん断力は同位相、逆位相ともに杭頭で終局せん断耐力を大きく上回る応答となった。実際の被害では、杭頭のせん断破壊の他に、上部構造に大きな傾斜がみられていることから、杭地中部でヒンジが形成されることが予想される。このことから、提案手法を用いて解析を行った結果は、杭基礎の被害の傾向とほぼ対応する結果が得られた。

5 まとめ

本研究では、統一した地盤ばね評価法に基づく、杭と地盤の非線形性を考慮した単杭の設計法を提案し、その適用性を各種の実験結果、杭基礎の被害事例に対して検証した。提案手法は、標準貫入試験の N 値しか得られていない水平載荷試験結果に対しても有効であること。遠心模型実験、大型振動台実験（非液化化地盤と液化化地盤）では杭頭モーメントを実験結果より大きく評価している傾向がみられたが、杭応答は実験結果を概ね捉えている。また、杭基礎の被害事例に対して、被害傾向と対応した結果が得られたことから、提案した設計法の有効性を確認した。

今後は、群杭効果や極限水平地盤反力などの設定が解析結果に与える影響について検討することが課題である。

最後に、本報の作成にあたり、貴重な実験データを引用させて頂いた文献の著者各位に謝意を表します。

参考文献

1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針,2001

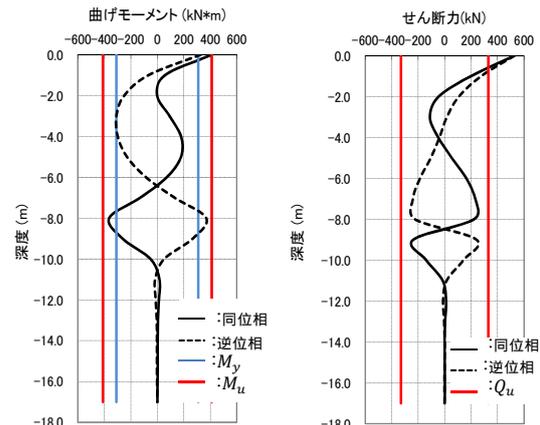


Fig.21 Distributions of bending moment and shear force

2) Francis, A.J : "Analysis of Pile Groups with Flexural Resistance," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE ,Vol.90 ,No.SM3 ,pp.1-32,
 3) 関崇夫, 元井康雄, 鈴木直子: 単杭の水平抵抗解析に用いる地盤反力変位関係のモデル化, 構造工学論文集, Vol.58B, pp.133-138, 2012 年
 4) B.B.Broms : "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils" ,ASCE ,Vol.90 ,No.SM3 ,pp.123-156 , 1964
 5) 岸田英明, 中井正一: 地盤反力 変位関係の非線形性, 土と基礎, Vol.25, No.8, pp.21-28, 1977.
 6) Imai, T.: P-and S-Wave velocities of the ground in Japan, Proc. ,9th ISSMFE, Tokyo, Vol.2, pp.257-260
 7) 太田裕, 後藤典俊: S 波速度を他の土質の諸指標から推定する試み, 物理探査, 第 29 巻 第 4 号, pp.31-41, 1976
 8) 中谷昌一, 白戸真大, 野々村佳哲, 中村祐二: 大きな変位を受ける杭基礎の地盤水平抵抗のモデル化について, 土木研究所資料, 第 4100 号, 2008.
 9) 町田幸紀, 関崇夫: 杭基礎の耐震設計合理化のための水平ばね評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.725-726, 2014.9
 10) 真野英之, 木村匠, 田中鉄也, 松井和幸ほか: 杭基礎構造物の耐震性に及ぼす基礎梁の剛性の影響(その 1 ~ その 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.713-720, 2004 年
 11) 木村匠, 社本康広, 松井和幸, 真野英之, 護雅史, 中井正一: 杭基礎構造物の耐震性に及ぼす基礎梁の剛性の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.618, pp.41-48, 2007 年
 12) 木村匠: 杭基礎構造物の動的相互作用を考慮した立体振動性状に関する研究, 千葉大学学位論文, 2009.1
 13) 町田幸紀, 関崇夫: 杭の水平抵抗解析に用いる地盤反力変位関係(その 3 : 動的問題への適用性に関する検討), 日本地震工学会大会梗概集, pp.104-105, 2012 年
 14) 時松孝次, 鈴木比呂子, 鈴木康嗣, 藤井俊二: 大型振動台実験に基づく液化化過程における杭の水平地盤反力の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 553 号, pp.57-64, 2002 年
 15) 時松孝次, 田村修次, 宮崎政信, 古澤睦博: 大型せん断土槽を用いた液化化実験における基礎根入れ部に加わる土圧合力の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 570 号, pp.101-106, 2003 年
 16) 時松孝次, 鈴木比呂子, 佐藤正義: 地盤 杭 構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 587 号, pp.125-132, 2005.1
 17) Tokimatsu, K., Suzuki, H. and Sato, M. : Influence of inertial and kinematic components on pile response during earthquakes, 11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering and 3rd

International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, pp.768-775, 2004

- 18) Tokimatsu, K., Suzuki, H. and Sato, M. : Effects of inertial and kinematic interaction on seismic behavior of pile with embedded foundation , Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25, pp.753-762, 2005
- 19) 鈴木比呂子, 時松孝次: 応答変位法に基づく大型振動台実験における杭の軸力および曲げ応力の評価, 第 39 回地盤工学研究発表会, 2004.7
- 20) 町田幸紀, 関崇夫: 地震時の地盤の非線形性を考慮した杭の水平抵抗解析に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集構, pp.567-568, 2013.8
- 21) 町田幸紀, 関崇夫: 地震時の地盤の非線形性を考慮した杭の水平抵抗解析に関する研究, 構造工学論文集, Vol.60B, pp.115-120, 2014.3
- 22) 一般財団法人ベターリビング: 基礎構造の耐震診断指針(案), 2013
- 23) 岩崎, 龍岡他: 地盤の動的変形特性に関する実験的研究(), 土木研究報告, 第 153 号, 1980
- 24) Meyerhof, G.G. : Discussion, Proc. Forth ICSMFE, Vol.3, pp.110, 1957
- 25) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B. : A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, EERC 72-12, College of Eng. University of California Berkeley, California, 1972
- 26) 日本建築防災協会: 臨海部における大規模建築物群の総合的な構造安全に関する調査・検討のうち「動的設計用入力地震動の設定に関する検討」報告書, 1992
- 27) 今津雅紀, 福武毅芳: 砂礫材料の繰返し変形特性, 第 21 回土質工学研究発表会, pp.509-512