

# (96) 密な飽和砂地盤・建屋系の振動台実験に基づく有効応力解析の適用性の検討

東京電力(株) 廣田 昌憲 石村 紀久雄  
 (株)大崎総合研究所 (正)○ 大槻 明 福武 毅芳  
 清水建設(株) (正) 横山 一智 佐藤 正義

## 1. はじめに

地震観測の重要性に対する認識が深まり各地に観測体制が敷かれているが、地盤のせん断ひずみが $10^{-3}$ を越えるような大地震記録は、今日まで殆ど得られていない。従って、地盤の強非線形化に伴う地盤・建屋系の動特性の変化や地盤・建屋連成系モデルに対する非線形解析手法の適用性について、実証的な検討は十分に行われていない。本研究では、強震記録の不足を補う観点から建屋モデルを含む密な乾燥砂による土槽振動台実験を行い、実測と解析の両面から、乾燥砂地盤の非線形化による建屋応答の変化や非線形解析手法に対する適用性を既に明らかにした<sup>1)</sup>。本報告では、文献(1)の乾燥砂による振動台実験と同条件下の密な飽和砂を対象とした土槽振動台実験を行い、地盤の非線形化による建屋応答の変化や有効応力解析手法の適用性について検討を行った。

## 2. 模型振動実験の概要と解析モデル

試験体および計器配置の概要を図1に示す。常時微動観測の結果から得られた地盤・建屋系の卓越振動数は15Hz付近に、地盤のみの卓越振動数は27Hz付近にある。豊浦標準砂を用いて作製したせん断土槽に対してTAFT(EW)記録の時間軸を1/4に縮小した実地震波加振試験を行った。解析モデルの概要を図2に示す。地盤および建屋は二次元FEM要素および梁要素で作成した。モデル地盤の奥行きは建屋モデルの奥行きに合わせて30cmとし、側方は水平ローラで、下方境界は完全固定でモデル化した。使用する解析コードは、有効応力法に基づいた非線形地盤・建屋相互作用解析コードALISS<sup>2)-5)</sup>である。二次元に拡張したR-Oモデルと間隙水圧を評価するためのおわんモデルを用い、陰解法による検討を行った。

## 3. 土質パラメータの設定

地盤の剛性低減( $G\sim\gamma$ )曲線および減衰増加( $h\sim\gamma$ )曲線の設定に、本実験と同条件下(相対密度98%)の密な乾燥砂地盤<sup>2)</sup>に対する正弦波スイープ加振結果を用いた。土槽地盤がせん断変形のみで振動していると仮定して、測定した各測点の質量、相対変位、絶対加速度を基に、せん断バネ・マス系モデルの運動方程式を解いて複素バネを求める。この複素バネから対応する深さのせん断剛性および減衰定数を計算した<sup>6)</sup>。せん断ひずみ $10^{-5}\sim 10^{-3}$ 間に対して得られた、 $G/G_\gamma=10^{-5}\sim\gamma$  ( $G_\gamma=10^{-5}$ :せん断ひずみが $1\times 10^{-5}$ におけるせん断剛性)および $h\sim\gamma$ 関係

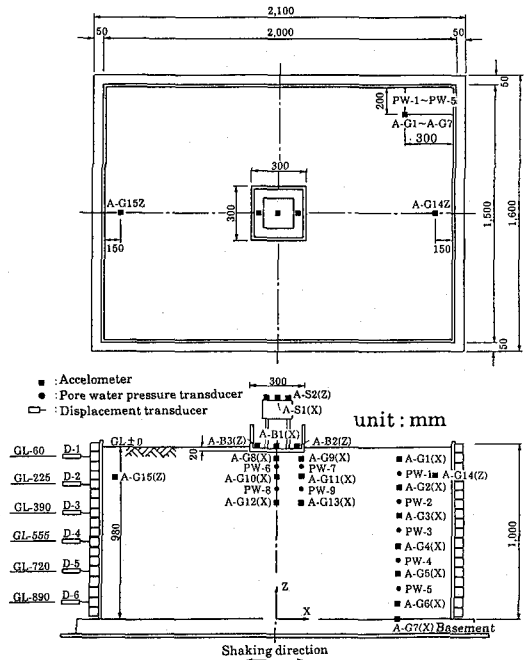


図1 実験モデルと計測位置図

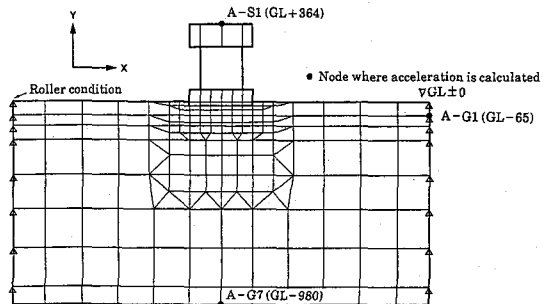


図2 二次元解析モデル

の一例を図3(a),(b)に示す。飽和砂地盤に適用するR-Oモデルのパラメータ $G_0, \gamma_L$ は、これらの図を基に各層の初期拘束圧の平方根に比例するとして求めた。おわんモデルのパラメータの値は、土槽振動台実験では深さにより密度の差異があまり無いことから全層に渡り一定とした。パラメータ $C_p/(1+e_0)$ は、圧密除荷試験における体積ひずみ $e_v$ と拘束圧の対数 $\log \sigma'_m$ の傾きであり、既往の豊浦砂の土質室内試験結果より0.006とした。 $X_L$ は液状化強度の下限値であり、図4に示す土質室内試験結果より $X_L=0.25$ とした。A, B(=1.6), C, Dはダイラタンシーを規定するパラメータであり、液状化強度を満たすように計算して決定した。この時の実験結果(軸差ひずみが2%に至ったときの液状化強度、△印)と計算結果(実線)の比較を図4に示す。この要素レベルでのシミュレーション計算に併用したR-Oモデルのパラメータは、土槽中央の層の値を用いた。表1および表2に解析に使用したR-Oモデルおよびおわんモデルパラメータの値を示す。

#### 4. 実験結果の検討

乾燥砂地盤と飽和砂地盤の動特性の違いを調べるため、TAFT記録250Gal入力に対する両者の基盤と地表間のフーリエスペクトル比を図5(a)に、また、図5(b)には地表と建屋間のフーリエスペクトル比をそれぞれ示す。常時微動観測に認められた地盤・建屋系の卓越振動数(15Hz)および地盤の卓越振動数(27Hz)は、250Gal入力による地盤の非線形化に伴い、低振動数側に移動している。乾燥砂地盤に認められた卓越振動数21Hzから26Hz付近の大きなピークは、飽和砂地盤においてはその振幅が減少し、かつ15Hz付近に移動している。地盤・建屋系の卓越振動数は、乾燥砂の場合13Hz付近であるが、飽和砂の場合10Hz付近に移動している。この原因としては以下の点が考えられる。飽和砂地盤では乾燥地盤に比べ自重による拘束圧が小さくなるため、飽和砂地盤の初期せん断剛性は減少している。さらに地震時中では過剰間隙水圧の発生により地盤のせん断剛性が乾燥地盤よりも低減したためと考えられる。

○ Values obtained from back analysis  
—  $G \sim \gamma$  curve used in nonlinear analysis

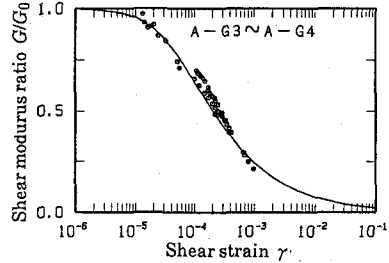


図3(a) 剛性低減( $G \sim \gamma$ )曲線

○ Values obtained from back analysis  
—  $h \sim \gamma$  curve used in nonlinear analysis

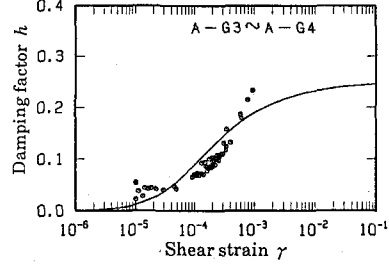


図3(b) 減衰増加( $h \sim \gamma$ )曲線

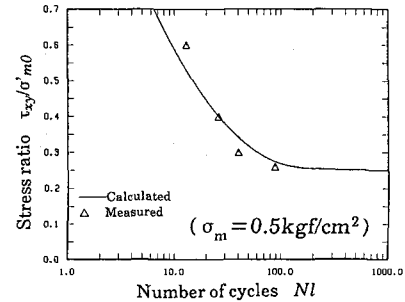


図4 豊浦砂(Dr=98%)の液状化強度曲線

表1 解析に用いるパラメータ(R-Oモデル)

Depth H (cm)	Poisson ratio v	Unit weight $\gamma_t$ ( $\text{t/m}^3$ )	Reference shear strain* $\gamma'_c (\times 10^{-4})$	Max. damping factor* $h_{max}$ (%)	Initial shear modulus* $G_0$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )
18.9	0.3	1.62	2.5	30	64.0
17.2	0.3	1.62	2.0	25	145.1
16.1	0.3	1.62	2.0	25	166.0
18.2	0.3	1.62	2.0	25	246.0
27.6	0.3	1.62	2.5	30	300.8

\*: soil parameters for R-O model

表2 解析に用いるパラメータ(おわんモデル)

Positive dilatancy		Negative dilatancy		Swelling index	Lower limit of liquefaction resistance
A	B	C	D	$C_p/(1+e_0)$	$X_L$
-20	1.6	40	80	0.006	0.25

## 5. 解析結果の検討

解析により求められた250Gal入力に対する基盤と地表間のフーリエスペクトル比および地表と建屋間のフーリエスペクトル比を観測結果と比較して図6(a),(b)に示す。(a)図の基盤と地表間のフーリエスペクトル比を見ると、解析結果は観測結果に見られるスペクトル形状を概ね表現しているが、解析結果には13Hz付近に谷が現れている。この谷は建屋系の卓越振動数に対応しており、地盤を二次元でモデル化したことにその原因があるものと考えられる。(b)図の基盤と建屋間のフーリエスペクトル比を調べてみると、解析によって求められた建屋系の卓越ピークは、実測値よりもやや高振動数側によっているが、その振幅および形状は実測値とよい対応関係にある。図7に示す地表および建屋の加速度波形を調べてみると、実測結果と解析結果は位相および振幅ともに概ね一致していることが分かる。建屋周辺地盤の間隙水圧波形を図8に示す。実験により得られた間隙水圧波形には、サイクリックモビリティに伴う振動成分が認められているが、解析でもその傾向は追えており、全体的な間隙水圧の蓄積の過程は両者よく対応している。建屋より離れた位置(PW-1)に比べ建屋直下(PW-6,7)の間隙水圧波形には、建屋応答の影響による顕著なサイクリックモビリティが認められる。最大間隙水圧比のコンターを図9に示す。建屋基礎周辺地盤に間隙水圧の発生が集中しているが、その蓄積量は初期拘束圧の40%以下である。

## 6. おわりに

本解析は相対密度98%程度の砂に対する有効応力解析であるが、解析結果は実測結果とかなり良い対応関係にあることが分かった。地震観測も含めた他の事例による検証も今後更に必要と思われるが、せん断ひずみが $10^{-3}$ レベルの密な飽和砂地盤に対して二次元非線形解析は地盤・建屋系の強非線形応答を概ね評価できている。当該飽和砂地盤は密な砂地盤であるため、250Galの大きな地震入力に対しても間隙水圧の蓄積量は初期拘束圧の40%以下で、間隙水圧の蓄積に伴う加速度の顕著な長周期化の現象は認められない。また、地震時中の間隙水圧の蓄積によるせん断剛性の減少より

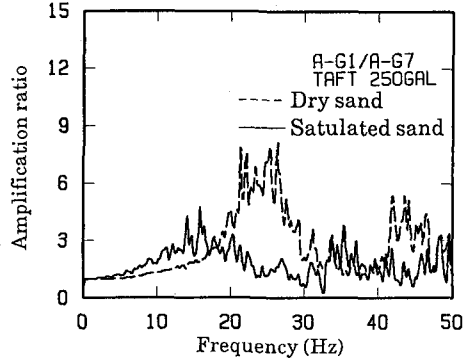


図5(a) 基盤・地表間のフーリエスペクトル比

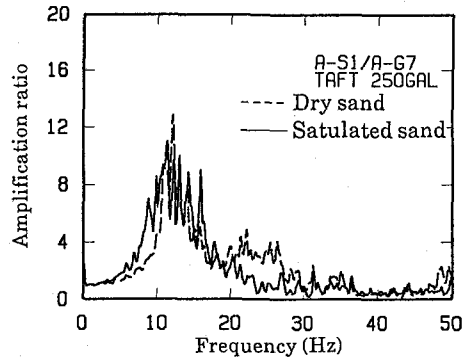


図5(b) 基盤・建屋間のフーリエスペクトル比

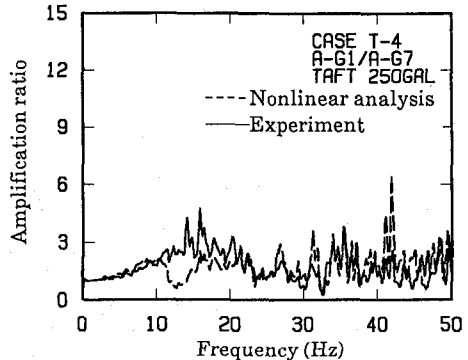


図6(a) 基盤・地表間のフーリエスペクトル比

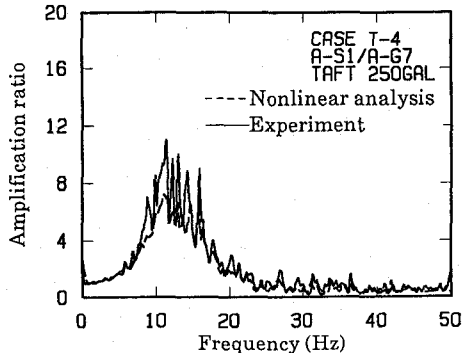


図6(b) 基盤・建屋間のフーリエスペクトル比

も浮力に伴う初期せん断剛性の減少が、地盤の卓越振動数に大きな影響を与えている。

参考文献

1) 廣田 昌憲・石村紀久雄・大槻明・他「地盤の非線形挙動に関する研究(その1)~(その4)」日本建築学会大会(1991) 2) A. OHTSUKI and T. ITOH : Two - dimensional effective stress analysis of liquefaction of irregular ground including soil-structure interaction, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol.15 345-366(1987) 3) K. FUKUTAKE, A. OHTSUKI, M. SATO and Y. SHAMOTO : Analysis of saturated dense sand-structure system and comparison to results from shaking table test, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol.19 977-992(1990) 4) 大槻 明・福武毅芳・佐藤正義・社本康広「ケーソン護岸の地震時挙動に関する液状化模型実験」第35回土質工学シンポジウム, pp.85~92 (1990) 5) 福武毅芳・大槻 明「地盤の液状化対策に関するシンポジウム, 土質工学会編, I 委員会報告, 4. 液状化に関する一斉計算, 4.7 ALISSによる解析」pp.125~134(1991) 6) 松田隆・後藤洋三「せん断土槽を用いた模型地盤の振動実験」大林技術研究所報No.32(1986)

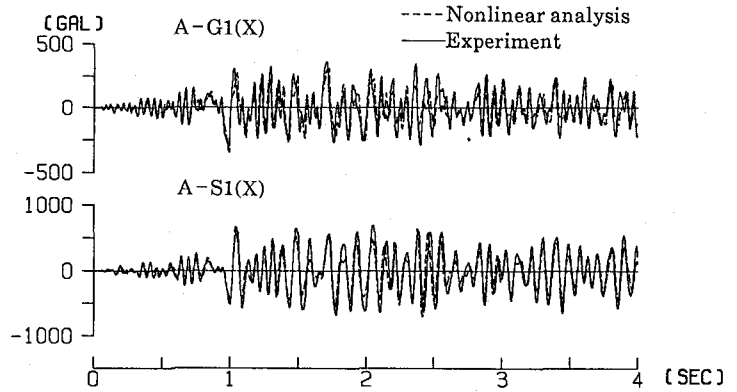


図7 地表および建屋の加速度波形

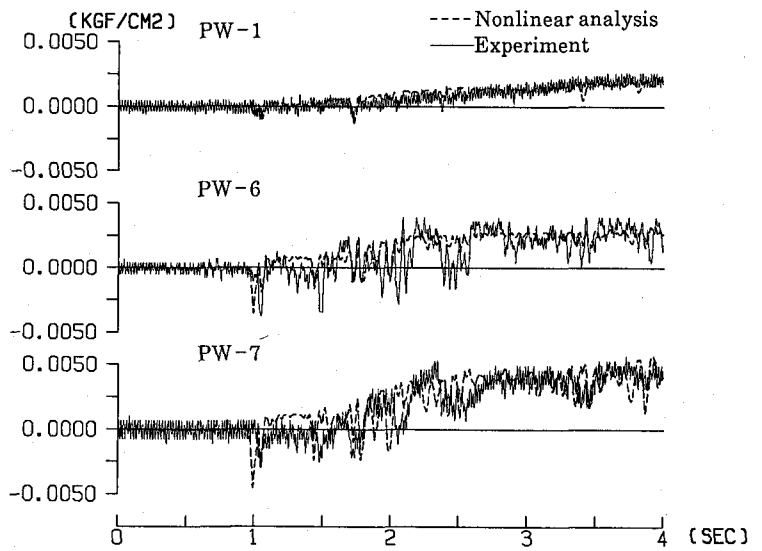


図8 間隙水圧波形

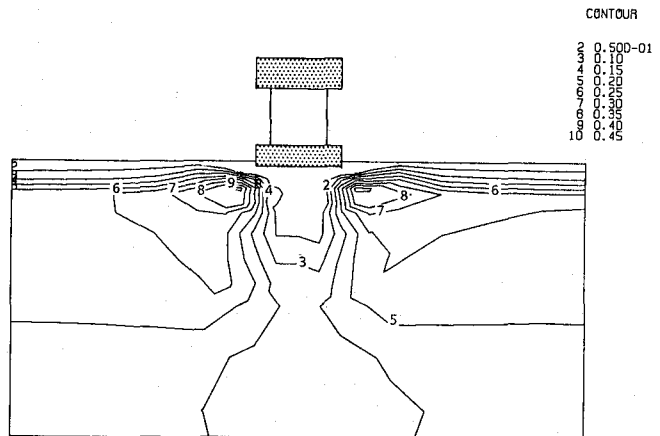


図9 間隙水圧比分布図(T=4sec)