

(53) 密な飽和砂層の強震時応答に関する大型振動台実験と解析 (その2)

(株) 奥村組 川井伸泰
 (財) 電力中央研究所 当麻純一、大友敬三

1. まえがき

本報告は、密に締まった飽和砂層の地震時安定性を調べる目的で行っている研究の一部をとりまとめたものである。

前報(その1)に引き続き、本報では、非排水振動三軸試験と有効応力解析法による数値シミュレーション結果について報告を行う。

2. 非排水振動三軸試験

せん断土槽内に作成した密な飽和砂地盤の動特性を調べるため、振動台実験終了後、深さ25, 125, 225cmの三層から、ブロックサンプリングにより不攪乱試料を採取して、非排水振動三軸試験を実施した。

その結果、初期せん断弾性係数 G_0 は、拘束圧の0.5乗に比例しており、次式で表示することができた。

$$G_0 = 700 (\sigma_{m0}')^{0.5} \text{ kgf/cm}^2 \quad \dots\dots (1)$$

また、せん断弾性係数比(G/G_0)と減衰定数(h)の歪依存特性から、Hardin-Drnevichモデルのパラメーターを同定したところ、規準歪 $\gamma_r = 2.5 \times 10^{-4}$ 、最大減衰定数 $h_{max} = 20\%$ という値を得た。

次に、一定振幅の繰返し応力を加えた際の軸歪、過剰間隙水圧波形の一例を図-1に、それに対応する有効応力径路と応力~歪関係を図-2、3に示す。せん断応力の1サイクル中に過剰間隙水圧が2回激しく振動し、有効応力が回復するサイクリックモビリティ現象や、歪がゆるやかに増大していることなど、密な砂に特有な挙動が明瞭に表われている。有効応力径路における破壊線の角度を読み取ると、せん断応力の作用方向によって若干異なるものの、およそ35度であった。等方性の三軸試験における破壊角 ϕ と、異方性の実地盤の破壊角 ϕ' の間の関係は、一般に

$$\tan \phi' = \{ (1 + 2K_0) / 3 \} \tan \phi \quad \dots\dots (2)$$

とされている。今、模型地盤の静止土圧係数 K_0 を0.5と仮定すると、 $\phi = 35$ 度に対する ϕ' の値は約25度となり、前報(その1)で示した模型地盤の実験結果と良い一致を示す。

図-4は、せん断応力比 R_1 ($= \tau / \sigma_{m0}'$, τ ; せん断応力振幅、 σ_{m0}' ; 初期有効平均主応力)と液状化に至る繰返し回数 N_1 との関係の一例である。なお、ここでは液状化を軸歪両振幅1.5%で定義している。たとえば、 $N_1 = 20$ に対応する液状化せん断応力比 R_1 、 z_0 は、 $\sigma_{m0}' = 225 \text{ gr/cm}^2$

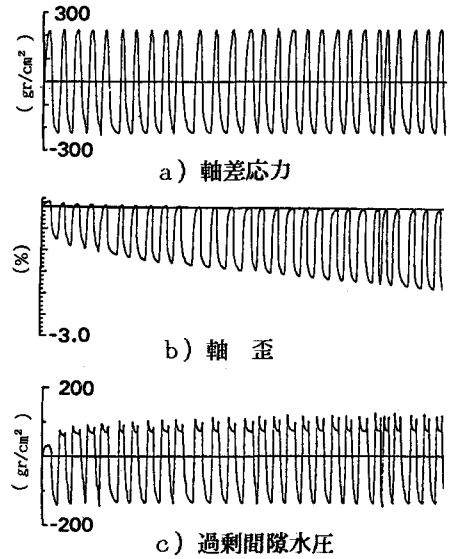


図-1 非排水振動三軸試験結果 ($\sigma_{m0}' = 125 \text{ gr/cm}^2$)

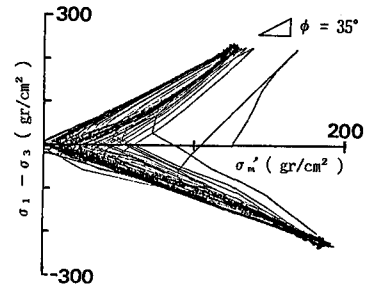


図-2 有効応力径路 ($\sigma_{m0}' = 125 \text{ gr/cm}^2$)

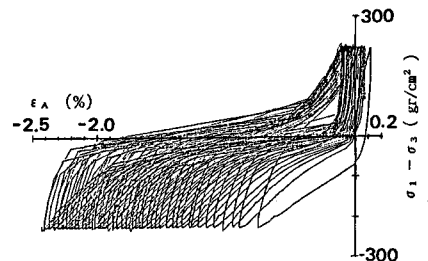


図-3 応力~歪関係 ($\sigma_{m0}' = 125 \text{ gr/cm}^2$)

の場合で約0.5, $\sigma_{mo}' = 125 \text{ gr/cm}^2$ の場合で約 0.8であり、この関係が拘束圧に依存するものであることが伺える。いずれにしても、ゆるい砂の R_1 が 0.1~0.2程度であることを考えると、この値はかなり大きなものであり、密な砂の動的強度がゆるい砂に比べてかなり高いことがわかる。

3. 数値シミュレーションの概要

振動台実験の結果に対して、サイクリックモビリティ現象を取り入れた有効応力解析法¹⁾による数値シミュレーションを実施した。以下に、解析手法の概要を記す。

地盤は一次元のバネ-マス系に置換され、Newmark の β 法 ($\beta = 1/4$) によって応答計算が行われる。その際、剛性と減衰に関するマトリクスは、各時間ステップ毎に有効応力の変動に応じて逐次修正される。地盤の応力~歪関係には、Masing則を適用した履歴型Hardin-Drnevichモデルを用いている。

過剰間隙水圧の上昇計算は、基本的には下記のSeedらによる一定応力振幅下での実験式によって行われる。

$$N/N_1 = [\{ 1 - \cos \pi (u / \sigma_{mo}') \} / 2]^\alpha \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 N ; せん断応力の繰返し回数、 N_1 ; 液状化に至る繰返し回数、 u ; 過剰間隙水圧、 σ_{mo}' ; 初期有効平均主応力、 α ; 実験定数である。

このSeed式を不規則波に適用するため被害蓄積の概念を応用している。この時、任意の応力振幅に対する液状化繰返し回数 N_{1i} が必要であるが、これは $N_1 = 20$ を規準として、次式によって計算される。

$$N_{1i} / 20 = (R_1 / R_{120})^\beta \quad \dots\dots (4)$$

ここに、 R_1 ; 与えられたせん断応力比、 R_{120} ; $N_1 = 20$ の場合のせん断応力比、 β ; 定数。

せん断応力と有効応力径路の関係を図-5に示す。せん断応力振幅の絶対値が増加する過程 (a → b) では、各時間ステップ毎に上記の方法で過剰間隙水圧の上昇計算を行い、せん断応力がピークを過ぎて下降する過程 (b → c) では、そのピークまでの水圧上昇量と等しい水圧量になるよう、直線的に変化させる。

密な砂のサイクリックモビリティ現象は、有効応力径路上で次に示すルールに従う。図-5に示したように、せん断応力が破壊線に達した以降は、有効応力径路が破壊線上を移動し、せん断応力がピーク (g) を過ぎてからは、通常の水圧上昇計算によって求まる点 (h) に向かって直線的に下降するというものである。

また、過剰間隙水圧の消散は、一般的な一次元熱伝導方程

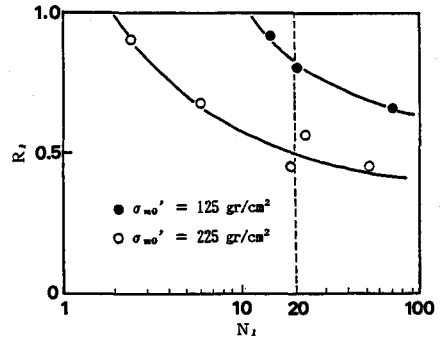


図-4 せん断応力比 R_1 と液状化繰返し回数 N_1 の関係

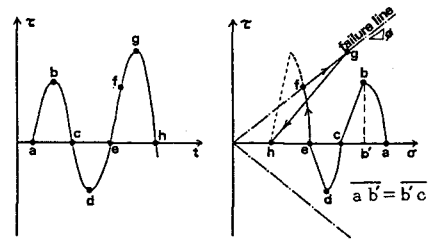


図-5 間隙水圧上昇モデル

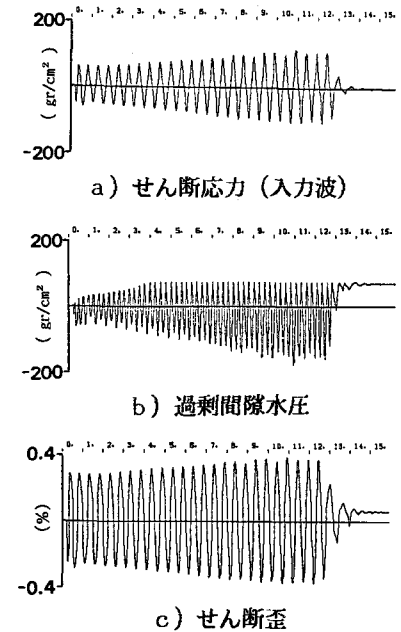


図-6 正弦波加振のシミュレーション結果

式型の計算式によって評価される。

以上示した応力～歪と過剰間隙水圧上昇のアルゴリズムを検証する為、振動台実験の結果を利用して予備解析を実施した。正弦波加振の実験ケースについて、前報（その1）で示した方法により、加速度波形をもとにせん断応力波形を推定し、これを入力値として、過剰間隙水圧とせん断歪を計算した。図-6に、せん断応力、過剰間隙水圧、せん断歪の波形を示す。これらは、（その1）で示した実験値とは大きさがやや異なるが、実験値の傾向を比較的良く表現している。過剰間隙水圧が、せん断応力の1サイクル中に2回激しく振動し、有効応力が回復する現象や、せん断歪がゆるやかに増大する様子は、実験値や先に述べた三軸試験結果とも対応しており、密な砂に特有なサイクリックモビリティ現象を正しく表現できたことを示している。また、過剰間隙水圧比がほぼ100%に達した以降も、これらの挙動は継続されており、本解析法によってこうした厳しい応力条件下での密な砂の挙動を模擬し得ることが確認された。

図-6の波形をもとに、有効応力径路と応力～歪関係を描いてみた。これを図-7に示す。有効応力がほとんど0に近づいてからも、せん断応力の载荷によって有効応力が破壊線に沿って回復する様子や、応力～歪におけるハードスプリング型の履歴特性など、密な砂の特性が概ね表現されている。

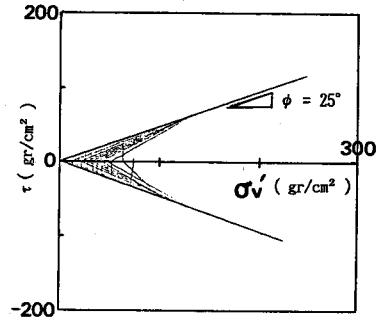
4. 数値シミュレーション結果

今回、数値シミュレーションの対象としたのは、EL CENTRO波（時間軸を1/5に縮尺）の最大加速度300galによる実験ケースである。解析用の入力波には、振動台テーブル上で収録された加速度波形を用いた。地盤は6質点の集中質量系モデルに置換し、各物性値は振動三軸試験の結果を参考にして表-1のように定めた。

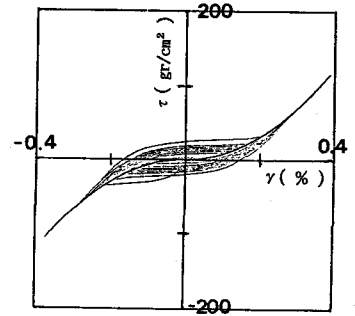
表-1 解析用地盤物性

No.	m(t)	G ₀ (t/m ²)	τ _f (t/m ²)	R ₁₂₀
1	0.051	900.0	0.2250	0.6
2	0.102	1570.0	0.3925	0.6
3	0.102	2020.0	0.5050	0.5
4	0.102	2390.0	0.5975	0.5
5	0.102	2710.0	0.6775	0.4
6	0.102	2990.0	0.7475	0.4

$k = 4 \times 10^{-5} \text{ (m/s)}, m_v = 0.003, \phi_{CM} = 25.0^\circ,$
 $\alpha = 0.6, \beta = -5.0, K_0 = 0.5, \text{粘性減衰} = 2.0(\%)$



a) 有効応力径路



b) 応力～歪関係

図-7 正弦波加振のシミュレーション結果

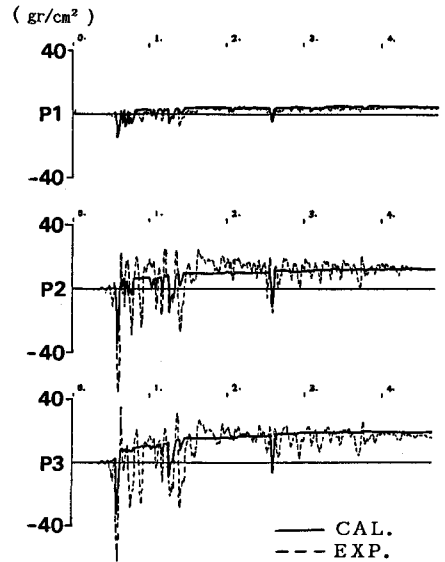


図-8 過剰間隙水圧波形の比較

解析によって得られた過剰間隙水圧比の時刻歴波形の一例を図-8に示す。この場合、間隙水圧がその上昇過程において負方向に振動する様子は、実験結果をほぼ模擬している。

図-9には、加振終了時点での残留間隙水圧比の深度分布を実験値と比較して示してあるが、両者は非常に良く一致している。また、深さ75cmの地盤における有効応力径路を図-10に示した。振動台実験の結果から推定した有効応力径路と良く対応していると見なすことができる。

次に、加速度応答の最大値分布を図-11に実線で示したが、地表面の応答が実験値をかなり下回る結果となった。この原因としては、地表近傍の極低拘束圧域での地盤の非線形特性(履歴型HDモデル)の設定が不十分であったためと考えられる。有効応力解析においては、これらの要因が地盤の加速度応答にも敏感に影響するので、十分な注意が必要である。

本振動台実験でも確認されたように、かなり密に締まった砂地盤は、地震動継続中の過剰間隙水圧の変動に起因する地盤物性の変動がさして大きくないので、全応力法による程度程度の解析は可能であると思われる。そこで、従来から広く用いられている全応力法による等価線形化解析法(SHAKE)での解析を試みた。

加速度応答の最大値分布を図-11に破線で併記した。全応力法では地盤の軟化を見込まないため、実験値をやや上回る傾向にあるが、かなり実験値に近い結果となっている。

5. まとめ

本報では、密な飽和砂層から不攪乱採取した試料による非排水振動三軸試験と、振動台実験に対する数値シミュレーション結果の概要を報告した。

密な飽和砂地盤の地震応答を過剰間隙水圧の大きさも含めて厳密に評価するには、サイクリックモビリティ現象を取り入れた有効応力解析が適切であることを示したが、さらに精度の高い解析を行うには、間隙水圧モデルや地盤物性をより詳細に検討する必要があると思われる。

また、全応力法によっても、密な飽和地盤の応答解析が可能であるという見通しを得た。

なお、動土質試験データは、(財)電力中央研究所 金谷守氏から提供して頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 国生剛治ら; 砂層の液状化現象についての数値シミュレーション, 電中研報告No.381023, 1982.1

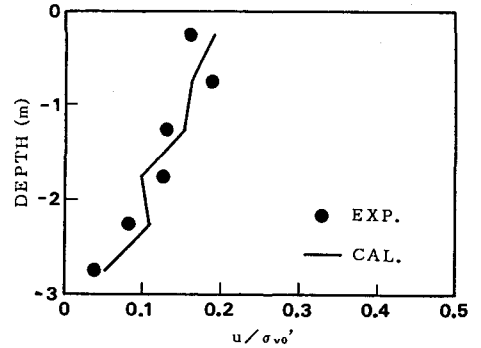


図-9 残留間隙水圧の深度分布

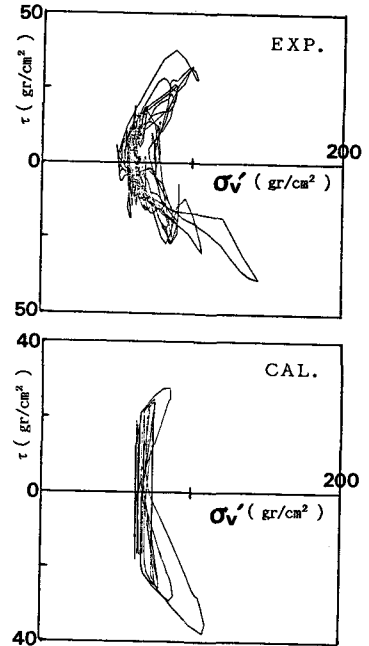


図-10 有効応力径路の比較

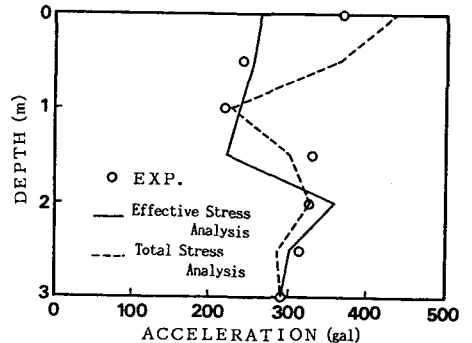


図-11 応答加速度の深度分布