

(89) 一般化した流れ則を用いた砂の繰返しモデルと遠心载荷試験による検証

大成建設 ○正会員 田口 洋輔 正会員 立石 章
正会員 樋口 雄一
岐阜大学 正会員 岡 二三生 正会員 八嶋 厚

1. はじめに

耐震工学において、液化化に対するメカニズムの解明と数値解析による現象の再現は、重要な課題の一つである。本研究においては、著者らが新たに提案した弾塑性理論に基づく砂の繰返し構成モデルを用い、液化化現象の再現を試みている。提案した構成モデルは、Biotの二相混合体理論に基づく支配方程式をu-p形式に定式化し、水と土を連成させた解析手法に組み込んでいる。提案した構成モデルおよび連成解析手法を検証するため、遠心装置を用いた振動台実験を行った。本報は、提案する構成モデルと解析手法の概要、および遠心载荷実験とシミュレーション解析結果を示すものであり、これらは統一的な液化化解析システムを構築しようとする試みの一環として行われたものである。

2. 構成モデルと解析手法

土の有効応力とひずみの関係を記述する構成モデルは、弾塑性理論に基づいており、過圧密境界曲面、非線形移動硬化則、流れ則の一般化などの概念を取り入れた構成モデル (Oka ら;1992、Tateishi ら;1995) であり、多様な応力状態に対応する実用的な3次元および2次元液化化解析を可能としている。有効応力増分～ひずみ増分関係を式(1)に示す。

$$d\sigma'_{ij} = \left\{ D_{ijkl}^E - \frac{1}{h} D_{ijmn}^E \frac{\partial g}{\partial \sigma'_{mn}} \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{pq}} D_{pqkl}^E \right\} d\varepsilon_{kl} \quad (1)$$

ここに、

$$h = \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} D_{ijkl}^E \frac{\partial g}{\partial \sigma'_{kl}} - B^* \frac{\partial f}{\partial \chi_{ij}^*} \left\{ A^* \frac{\partial g}{\partial s_{ij}} - \chi_{ij}^* \left(\frac{\partial g}{\partial s_{pq}} \frac{\partial g}{\partial s_{pq}} \right)^{1/2} \right\} \quad (2)$$

であり、 D_{ijkl}^E は弾性の応力～ひずみ関係マトリクス、 f 、 g はそれぞれ降伏関数、塑性ポテンシャル関数で、非線形移動硬化、過圧密境界曲面を考慮した関数型である。 χ_{ij}^* は非線形移動硬化パラメーター、 s_{ij} は偏差応力テンソル、また、 A^* 、 B^* は材料パラメーターであり、破壊時の応力比や初期塑性せん断剛性と関係づけられる。流れ則は、通常のスカラー係数を一般化し、4階の等方テンソル H_{ijkl} を用い下式によって与えられる。

$$d\varepsilon_{ij}^p = H_{ijkl} \frac{\partial g}{\partial \sigma'_{kl}} = \{ a\delta_{ij}\delta_{kl} + b(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \} \frac{\partial g}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (3)$$

a 、 b は定数あるいは応力やひずみに関する状態変数である。式(3)により、液化化時のストレス～ダイレイタンスー関係をより精度良く求めることが可能となった。

解析手法は、Biotの二相混合体理論に基づいて、固相の変位 u 、液相の間隙水圧 p を未知数としたu-p formulationを用いている。Oka ら (1994)の方法に従い、釣合い式はFEMを用いて、連続の式はFDMを用いてそれぞれ空間に対して離散化し、両式はNewmarkの β 法を用いて時間離散化を行っている。解析精度については、Oka ら (1994)によりすでに検証がなされている。

3. 遠心装置を用いた振動台実験の概要

提案した構成モデルおよび解析手法を検証するため、遠心装置による振動台実験を行った (樋口ら;1995)。以下に実験の概要を示す。

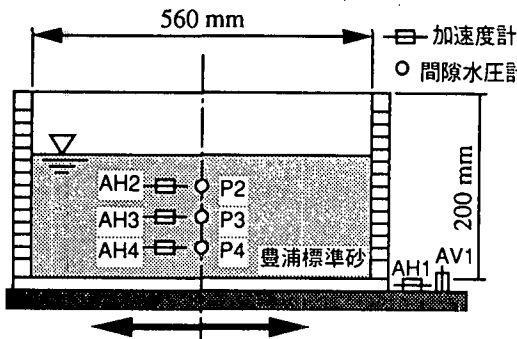


図-1 せん断土槽断面図と計器配置

表-1 実験条件

ケース	相対密度 $D_r(\%)$	地盤高さ $h(\text{cm})$	間隙液 粘性 (cSt)	遠心 加速度 (G)	加振 加速度 (G)	目的
A	40	20	50	50	12	基本ケース
B	60	20	50	50	12	相対密度の影響
C	40	20	1	50	12	間隙液粘性の影響

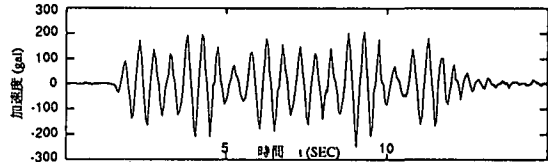


図-2 原型換算の入力加速度 (ケースA)

(1) 実験方法

使用した砂は、豊浦標準砂 ($G_s = 2.65$, $e_{\max} = 0.973$, $e_{\min} = 0.606$) であり、間隙流体としてシリコンオイルあるいは水を用いている。土槽にはせん断フレーム間の摩擦を低減した軽量アルミ製のせん断土槽 (内寸法 $56\text{cm} \times 25\text{cm} \times$ 高さ 30cm) を使用した。地盤内の間隙水圧及び加速度は、それぞれ間隙水圧計、加速度計を用いて測定した。土槽の断面図と計器の配置を図-1に示す。実験では、豊浦標準砂を相対密度 $D_r = 40\%$ および $D_r = 60\%$ で土槽に詰めて間隙流体を浸透させ、さらに土槽を真空容器に入れ飽和度を高めた後、遠心加速度 50G を与え目標加速度で加振した。加振波は VELACS Project (Arulanandan ら;1993) で用いられた波形 (原型換算の周波数 $f = 2H_z$ 、波数 $N = 25$) を補正して用いている。実験条件を表-1に、入力加速度を図-2に示す。ケースAと比較して、ケースBは相対密度を、ケースCは間隙流体をシリコンオイルから水に変化させている。なお、原型換算の実験条件が、基本ケースAと等しくなる Modeling of Models 実験を遠心加速度 30G 場において行い、相似則の成立を確認している (樋口ら;1995)。

(2) 実験結果

実験結果は、各スケールを原型 (1G) 換算して示すものとする。図-3にケースAにおいて計測された加速度および過剰間隙水圧 Δu_w の時刻歴を示す。過剰間隙水圧比 $\Delta u_w / \sigma'_{v0}$ はいずれも1に達しており、完全液状化を生じていることがわかる。また、加速度振幅は4波目 ($t=3\text{sec}$) 程度から減衰を生じており、この時点付近で急激に上昇する過剰間隙水圧と対応している。図-4にケースBにおいて計測された加速度および過剰間隙水圧 Δu_w の時刻歴を示す。 $D_r = 60\%$ においても、各深度で液状化を生じているが、ケースA ($D_r = 40\%$) と異なる点は過剰間隙水圧の初期勾配が若干小さく、また、液状化に至るまでの波数が7波に増加している点である。図-5にケースCにおいて計測された加速度および過剰間隙水圧 Δu_w の時刻歴を示す。図-5より、間隙流体としてシリコンオイルのかわりに水を用いた場合、 $d = 7.5\text{m}$ では過剰間隙水圧比が1に達しておらず、また過剰間隙水圧が消散するのに要する時間は加振終了後10秒程度で、シリコンオイルの場合 (ケースA,B) の消散速度5~10分に比較して非常に短く、間隙水として水を用いると液状化を生じる範囲や液状化後の過剰間隙水圧分布が大きく異なることがわかった。

4. シミュレーション解析

提案した構成モデルおよび解析手法を用いて上記遠心装置を用いた振動台実験ケースA~Cのシミュレーション解析を行った。

(1) 解析モデル

本研究では、 50G 場の各ケースを原型換算し、 1G 場でモデル化を行う。振動台底部で計測された水平加速度を入力加速度とし、 $14 \times 10 = 140$ メッシュ (1メッシュは横 $2\text{m} \times$ 高さ 1m) に分割し、底面の節点変位は固定、側方は等変位境界とした。また、底面と側面は非排水境界、地表面 (水位面) を排水境界とした。Newmarkの

表-2 解析に用いたパラメーター

深度 (GL m)	土 層	単位体 積重量 t/m ³	間隙 比 e	せん断 波速度 Vs m/sec	ポア ソン比 ν	透水係数 m/sec	G/σ'_{mo} (変相角比 Mm*)	破壊角 (破壊力比 Mp*)	液状化抵抗 N=5 N=20	粘性特性 パラメータ 上段: B ₀ 中段: B ₁ 下段: C ₀	ダイレイタンス パラメータ 上段: D ₀ 下段: n	規準ひずみ(%) 上段: γ_{Ar}^0 下段: γ_{Ar}^0
0.0	豊浦標準砂			Dr=40% 66 Dr=60% 71			Dr=40% 1716 Dr=60% 1944			4800 6000 480 600 2000 2000	0.67 0.67 2.5 2.5	0.05 0.05 0.10 0.10
-2.0	▲● (-2.5m)	Dr=40%	Dr=40%	Dr=40% 89 Dr=60% 96		シリコン オイル 6.5×10 ⁻⁵ (ケースA,B)	Dr=40% 940 Dr=60% 1065	Dr=40% (ケースA,C) 30.3 (0.990)	Dr=40% (ケースA,C) 0.24 ; 0.16	3000 4000 300 400 2000 2000	0.67 0.67 2.5 2.5	0.10 0.05 0.20 0.10
-4.0	▲● (-5.0m)	Dr=60%	Dr=60%	Dr=60% 102 Dr=60% 109 Dr=40% 110	0.25	水 3.2×10 ⁻³ (ケースC)	Dr=40% 701 Dr=60% 794 Dr=60% 595	Dr=60% (ケースB) 36.0 (1.194)	Dr=60% (ケースB) 0.30 ; 0.20	2700 3600 270 360 2000 2000	0.67 0.67 2.0 2.0	0.10 0.05 0.20 0.10
-6.0		Dr=60%	Dr=60%	Dr=60% 119 Dr=40% 118 Dr=60% 127			Dr=60% 673 Dr=40% 534 Dr=60% 605			2400 3200 240 320 2000 2000	0.67 0.67 2.0 2.0	0.10 0.10 0.20 0.20
-8.0	▲● (-7.5m)	Dr=40%(ケースA,C) Dr=60%(ケースB)								2300 3000 230 300 2000 2000	0.67 0.67 1.5 1.5	0.10 0.10 0.50 0.20
-10.0												

備考 1. ▲ 加速度計 2. ● 間隙水圧計 3. 静止土圧係数 $K_0=0.5$ 4. 過圧密比 1.2

β法におけるβ、γをそれぞれ0.3025、0.6とし、Reileigh減衰5%を考慮した。各土層の材料パラメーターに関しては、豊浦標準砂に関する既往の研究結果（例えばTateishiら、1995）、あるいは同様の検討を行ったCubrinovskiら（1995）の結果を用い、表-2のように設定した。ここで、遠心力場における間隙流体の透水係数については、Sakemiら（1995）の実験結果を用いている。すべての材料パラメーターは、既往のデータと要素レベルの液状化強度のシミュレーションによりストレートフォワードに決定されている。

(2) 解析結果および考察

図-3にケースAのシミュレーション解析結果を示す。計測値に比べ加速度応答の減衰が比較的遅いが、加速度応答の全体的挙動あるいは間隙水圧の時刻歴はおおむねよく再現されている。図-4はケースBにおけるシミュレーション解析結果を示している。相対密度の増加により、表-2に示すとおりケースAと比較して剛性、強度が大きくなっているが、両者の差はたかだか3割程度であり、上述したとおりケースAとケースBとの実験結果に大きな差異はない。解析結果においてもケースAとケースBに大きな差異はみられないが、間隙水圧上昇の初期勾配が多少ケースBの方が小さいなど剛性・強度の増加が確認され、実験結果をよく再現している。図-5はケースCのシミュレーション解析結果である。解析的にはケースAとの差異は透水係数の値のみであるが、加速度応答・間隙水圧ともよく再現されている。特に間隙水圧の時刻歴においては透水性の違いによる消散過程をよく表現し得ている。

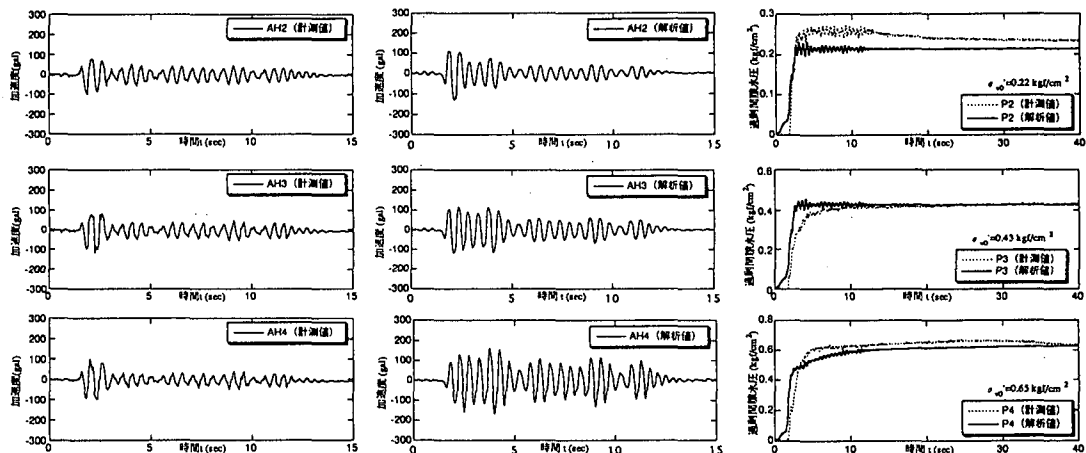


図-3 ケースA (Dr=40%, 間隙流体, シリコンオイル) の実験結果と解析結果

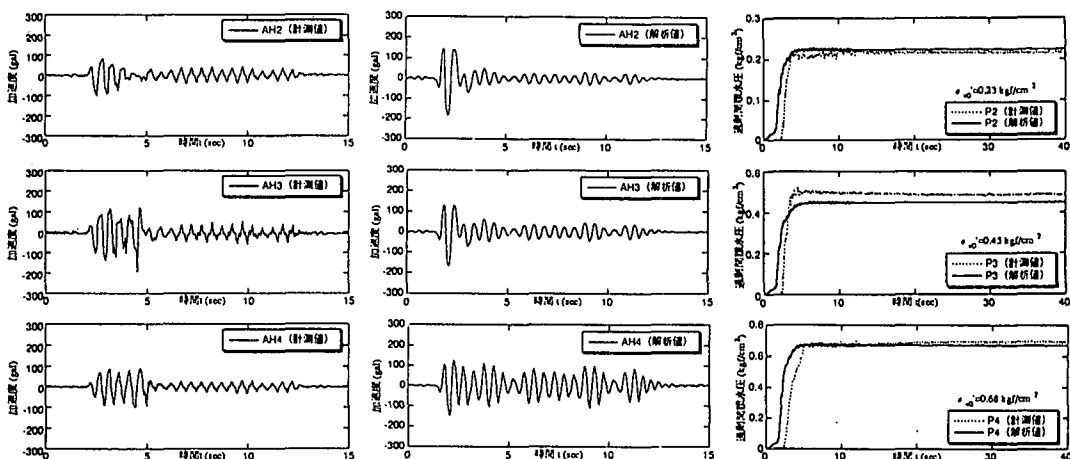


図-4 ケースB ($D_r=60\%$, 間隙流体: シリコンオイル) の実験結果と解析結果

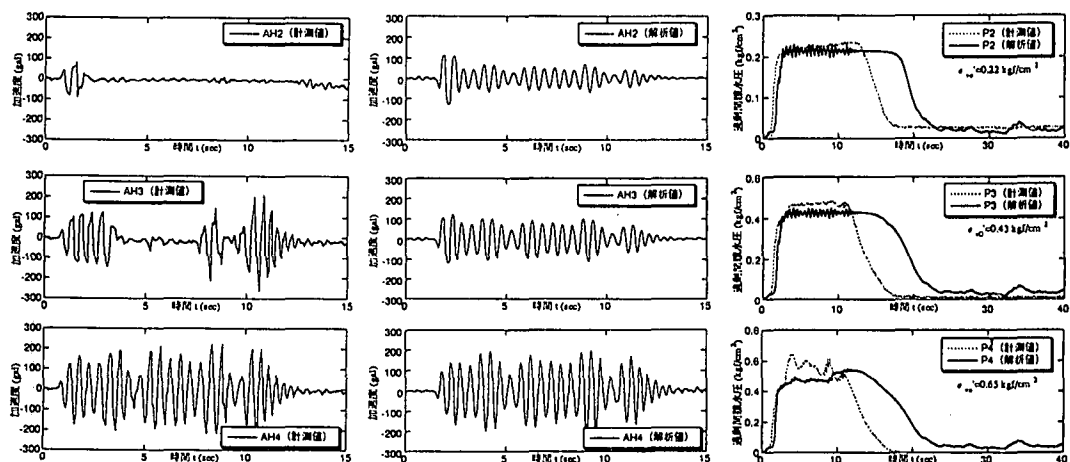


図-5 ケースC ($D_r=40\%$, 間隙流体: 水) の実験結果と解析結果

5. 結論

提案する構成モデルおよび連成有効応力解析手法を用いて、均一成層地盤の遠心載荷振動台実験のシミュレーション解析を行った。ストレートフォワードに設定した材料パラメーターを用いて相対密度、間隙流体をパラメーターとした一連の実験結果を良好に再現することができ、信頼性の高い実験手法および解析手法が確認された。

参考文献

- 1) Arulanandan and Scott(1993):VELACS Vol. 1, Balkema, 1231p.
- 2) Cubrinovski et al.(1995):"Verification of a constitutive model for sand by seismic centrifuge tests," IS-TOKYO (投稿中) .
- 3) 樋口ら(1995):"遠心装置を用いた液状化実験方法と実験結果の考察," 土木学会第50回年次学術講演会 (投稿中) .
- 4) Oka et al.(1992):"A constitutive model for sand based on the non-linear kinematic hardening rule and its application," 10th WCEE, pp2529-2534.
- 5) Oka et al.(1994):"FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model," Applied Scientific Research 52, pp209-245.
- 6) Sakemi et al.(1995):"Permeability of pore fluids in centrifuge field," 10th ARC, (投稿中) .
- 7) Tateishi et al.(1995):"A cyclic elasto-plastic model for sand and its application under various stress conditions," IS-TOKYO (投稿中) .