

京都大学大学院 正会員 岡 二三生
 京都大学大学院 正会員 小高 猛司
 京都大学大学院 学生会員 小泉 智之
 京都大学大学院 学生会員 ○ 森本 良

1. はじめに 浸透破壊問題は有効応力の減少に伴って破壊に至る、広義の液状化として考えられる。また、多次元の浸透破壊問題においては大変形が生じることが余儀なくされる。そこで、本報では有限変形理論に基づく3次元液状化解析法¹⁾²⁾を2次元浸透破壊問題に適用した。またそれに先立って、数値解析結果の妥当性を検証するため浸透破壊模型実験を行った。

2. 支配方程式の定式化 本解析で用いられる土粒子骨格の変形と間隙水移動の支配方程式は、Biot(1962)の二相混合体理論に基づきu-p formulationで定式化される。また本解析ではupdated-Lagrange法を用いる。定式化された支配方程式を以下に示す。ここで、 ρ, ρ^F は全体及び液相の密度、 γ_w は水の単位体積重量、 k は透水係数、 a_i は加速度ベクトル、 b_i は物体力ベクトル、 p は間隙水圧、 S_{ij} は公称応力テンソル、 T_{ij} はCauchy 応力テンソルである。

$$\begin{array}{ll} \text{1. 運動方程式} & \rho a_i = S_{ij,j} + \rho b_i \quad (1) \\ \text{3. 構成式} & \dot{T}_{ij} = C_{ijkl}^EP D_{kl} \quad (3) \end{array} \quad \begin{array}{ll} \text{2. 連続式} & \rho^F \dot{D}_{ii} - p_{,ii} - \frac{\gamma_w}{k} D_{ii} = 0 \quad (2) \\ \text{4. 有効応力の定義} & T_{ij} = T'_{ij} + p \delta_{ij} \quad (4) \end{array}$$

支配方程式の空間離散化には有限要素法、時間離散化にはNewmark β 法を用い、要素としては6面体20節点アイソパラメトリック要素を用い、間隙水圧は格子点の8節点のみで定義した。また本解析ではOka et al.³⁾による非線形移動硬化則に基づく砂の繰返し弾塑性構成式を用いた。浸透破壊問題を考える場合、地盤の表面から水面が上昇するのを表面力を静的に載荷し、水位に対応する間隙水圧をReal timeに入力することに置き換え、解析を行う。また浸透破壊問題は従来、静的な問題として扱うが、本解析のように動的に取り扱うことにより、粘性減衰の効果を考慮でき、安定した計算が行える。

3. 浸透破壊模型実験 図1のような模型地盤を用いて浸透破壊実験を行った。実験材料には土質定数が明らかな豊浦砂を用い、間隙比が $e = 0.772 (D_r = 60\%)$ になるように模型地盤を作製する。この模型地盤の片側のみ水位を上昇速度 $\dot{h} = 0.02m/min$ で上げ(以後水位を上げる方を上流側とする)、水頭差を与えて浸透破壊させる。破壊に至る地盤の様子は次のようになった。水位が上昇して行き、水頭差17.2cmに達すると下流側で隆起し始め、その後上下流側で沈下、隆起が生じた。徐々に沈下量、隆起量が大きくなり水頭差18.5cmでボーリングに至った。図2に水頭差18cmでの地盤の様子を示す。

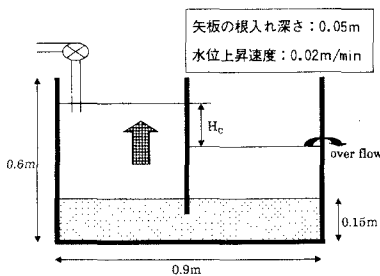


図1 浸透破壊模型実験装置

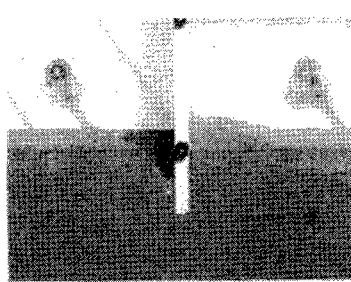


図2 実験地盤の変形

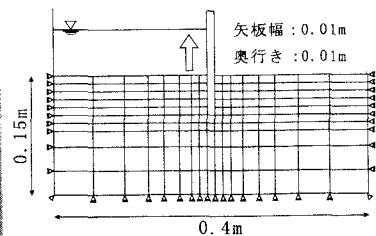


図3 2次元モデル

4. 2次元浸透破壊問題解析 図3のような矢板部を設けた2次元浸透破壊問題を考えた。解析メッシュの土の層厚、矢板根入れ深さ等の諸条件はすべて実験模型地盤と同じにしている。要素数は165、節点数は1318であり、解析パラメータは表1に示すものを用いて弾塑性解析を行った。構成式に用いる砂の諸定数は文献3)で $D_r = 60\%$ の豊浦砂を想定して求められたものを用いている。矢板の拘束条件は、矢板底面節点を除いて、x方向の変位を固定した。矢板を挟んで左側の水位を水位上昇速度 $\dot{h} = 1.0 \times 10^{-2}m/sec$ で上昇させるのだが、その地盤表面には水位に応じた表面荷重と間隙水圧を入力し、右側の地盤表面は間隙水圧が常に0となるように設定した。検討したケースについては砂地盤の透水係数 k を変化させたものと考え $k = 1.0 \times 10^{-3}m/sec$ をCASE-k3、 $k = 1.0 \times 10^{-4}m/sec$ をCASE-k4、 $k = 1.0 \times 10^{-7}m/sec$ をCASE-k7とする。図4～6に水頭差18cmにおける過剰間隙水圧(水位差0の状態からの増分値)の分布を各ケースについて示す。まず、CASE-k3、CASE-k4では、ほぼ定常浸透場の状態にあることがわかる。次にCASE-k7では前2ケースとは違う様相を示し、矢板下流側で大きく負圧が発生していることがわかる。その部分においてダイ

レイタンスーが拘束され、せん断応力が増加しているために CASE-k7 では浸透破壊が起こりにくくなっている。図 7～9 に各ケースについての水頭差 18cm における相対有効応力比 $(1 - T'_m/T'_{m0})$ の分布を示す。CASE-k3, CASE-k4 では最も動水勾配が大きい矢板下流側の下端部と下流側地表部が 1 に近い値を示し、ほぼ液状化している。一方 CASE-k7 では全般的に相対有効応力比の上昇は見られず、どの部分も液状化には至っていない。また CASE-k7 での同じ水頭差における変形量も非常に少なかった。解析における水位上昇速度は実験におけるそれよりもかなり速いが、CASE-k3 および CASE-k4 の解析においてはほぼ定常浸透場になっていたことを考えると、水位上昇速度の相違がそれらの結果に与える影響は少ないと考えられる。図 10、図 11 は CASE-k4 の水位差 18cm での変位ベクトル分布、液状化要素の分布を示す。ここで液状化要素とは平均有効応力が初期平均有効応力の 1% に達した要素のことである。実験と同様に下流側地表で大きな隆起が認められ、破壊も進行しており実験結果に類似している。また液状化要素と大きく変形している要素は良く一致しており、妥当な結果であると考えられる。

表 1 解析パラメータ

Newmark β 法の β	0.3025	ポアソン比 ν	0.25
Newmark β 法の γ	0.6	重力加速度 g	$9.8m/s^2$
Reyleigh 減衰の α_0	0.0	変相応力比 M_m^*	0.707
Reyleigh 減衰の α_1	0.001	破壊応力比 M_f^*	0.990
水の単位体積重量 γ_w	$9.8kN/m^3$	塑性せん断剛性パラメータ B_0^*	3500
飽和土の単位体積重量 γ_{sat}	$18.98kN/m^3$	塑性せん断剛性パラメータ B_1^*	350
土圧係数 K_0	0.5	塑性せん断剛性パラメータ C_f^*	2000
初期間隙比 e_0	0.772	ダイレイタンスー係数べき指数 n	1.5
圧縮指数 λ	0.02	基準両振幅塑性せん断ひずみ γ_{DAr}^P	0.004
膨潤指数 κ	0.0052	基準両振幅弾性せん断ひずみ γ_{DAr}^E	0.001

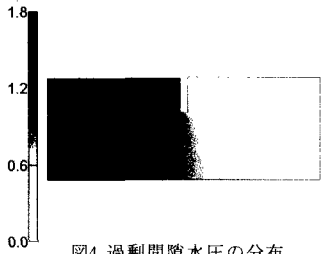


図4 過剰間隙水圧の分布
CASE-k3[kPa]

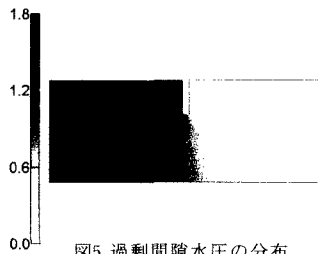


図5 過剰間隙水圧の分布
CASE-k4[kPa]

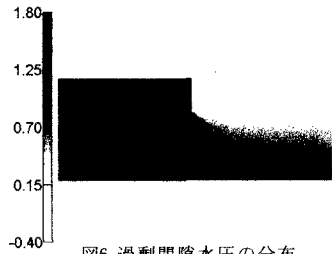


図6 過剰間隙水圧の分布
CASE-k7[kPa]

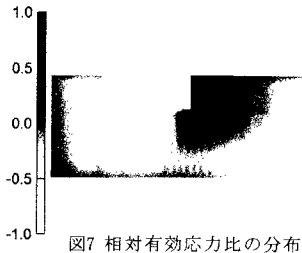


図7 相対有効応力比の分布
CASE-k3

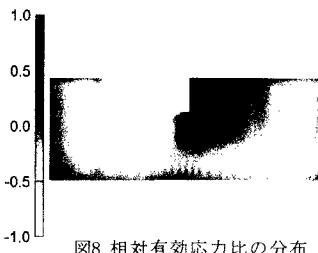


図8 相対有効応力比の分布
CASE-k4

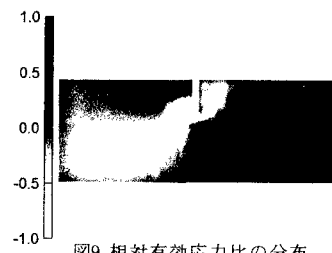


図9 相対有効応力比の分布
CASE-k7



図10 変位ベクトルの分布
(30倍拡大表示)

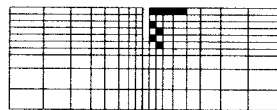


図11 液状化要素の分布

5. まとめ 本解析法を2次元問題に対して適用し、様々な点から検討した結果高い精度の浸透破壊の予測が行えることがわかった。また本解析法は3次元解析法であり、2次元での適用性が証明されれば3次元浸透破壊問題へも適用が可能である。よって、今後は3次元問題に対する適用性を検討する。

参考文献

- 1) 岡二三生・小高猛司・大島貴充:有限変形理論に基づく砂地盤の3次元液状化解析法,第34回地盤工学研究発表会概要集,pp.2107-2108,1999.
- 2) 岡二三生・小高猛司・角南進・小泉智之:有限変形理論に課岸構造物の3次元液状化解析,第35回地盤工学研究発表会概要集,投稿中,2000.
- 3) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic strain dependency of the shear modulus, Geotechnique 49(5), pp.661-680,1999.