

有限変形動的 F E M による 2 次元浸透破壊解析

京都大学大学院 学生会員 森本 良
 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
 中央開発(株) 正会員 小泉 智之

1. はじめに 浸透破壊は有効応力の減少に伴って破壊に至ることから、広義に液状化問題として考えることができる。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も少なくない。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、浸透破壊模型実験と比較することにより、その妥当性を検証した。

2. 支配方程式の定式化 本解析で用い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、updated-Lagrange法を用いて有限変形計算を行う。定式化された支配方程式を図1に示す。ここで、 ρ 及び 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

1. 運動方程式： $\rho a = S_{ij,j} + \rho b_i$
2. 連続式： $\rho^F \dot{D}_{ii} - p_{,ii} - \frac{\gamma_w}{k} D_{ii} = 0$
3. 構成式： $\hat{T}'_{ij} = C_{ijkl} D_{kl}$
4. 有効応力の定義： $T_{ij} = T'_{ij} + p \delta_{ij}$

図1：支配方程式

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。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 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り返し弾塑性構成式を用いた。浸透破壊問題における地盤表面での水面の上昇は、静的な表面力を載荷すると同時に、水位に相当する間隙水圧をReal timeに入力して模擬した。

3. 浸透破壊模型実験 図2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別途求められている豊浦砂を用い、間隙比が $e=0.772(D_r=60\%)$ になるように模型地盤を作製した。この模型地盤の矢板を挟んだ片側の水位を上昇速度2cm/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た。具体的には、水位が上昇し水頭差17.2cmに達すると下流側で隆起し始め、その後上流側で沈下、下流側で隆起が生じた。それらの量は徐々に大きくなり、水頭差18.5cmでポイレングに至った。図3に水頭差18cmにおける地盤の変形の写真を示す。

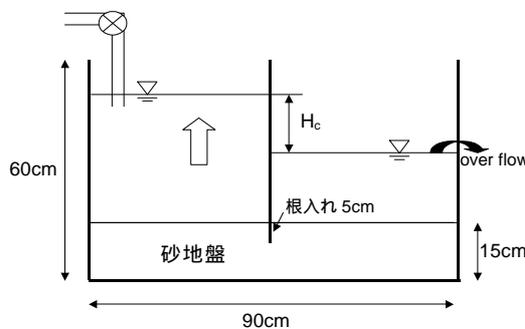


図2：浸透破壊模型実験装置



図3：実験地盤の変形

4. 2次元浸透破壊解析 図4に示す有限要素メッシュで上記の実験のシミュレーションを行った。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

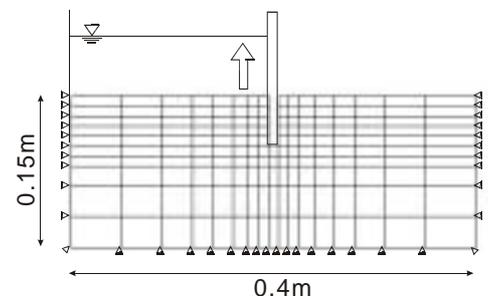


図4：有限要素メッシュ

Keywords: 浸透破壊, 有限要素法, 有限変形理論, 液状化, 模型実験
 連絡先 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町・TEL:075-753-5085・FAX:075-753-5086)

求められたものを用いている。矢板の拘束条件は、矢板底面部の節点を除いて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1.0cm/secで上昇させ、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(kPa)となるように設定した。検討したケースについて

表 1：解析に用いたパラメータ

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	ダイレイタンシー係数べき指数 n	1.5
圧縮指数 γ	0.02	規準両振幅塑性せん断ひずみ γ_{DAr}^P	0.004
膨潤指数 κ	0.0052	規準両振幅塑性せん断ひずみ γ_{DAr}^E	0.001

では砂地盤の透水係数 k を変化させたものと考え、 $k=1.0 \times 10^{-3}$ (cm/sec) を CASE-k3、 $k=1.0 \times 10^{-4}$ (cm/sec) を CASE-k4、 $k=1.0 \times 10^{-7}$ (cm/sec) を CASE-k7 とする。図5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ケースとは異なり矢板下流側で大きく負圧が発生している。その部分ではダイレイタンシーの拘束によりせん断応力が増加し、CASE-k7では浸透破壊が起こりにくくなっている。解析における水位上昇速度は実験よりもかなり速いが、CASE-k3およびk4ではほぼ定常浸透場であったことを考えると、水位上昇速度の相違が解析結果に与える影響は少ないと考えられる。図6は水頭差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および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面が1に近い値を示している。図7および8は実験地盤の透水係数に近い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それぞれ示す。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面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。

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。

【参考文献】 1)岡・小高・大島: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・小高・角南・小泉:有限変形理論に護岸構造物の3次元液状化解析,第35回地盤工学研究発表会概要集, 2000. 3)Oka et al.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic strain dependency of the shear modulus, Geotechnique 49(5), pp.661-680, 1999.

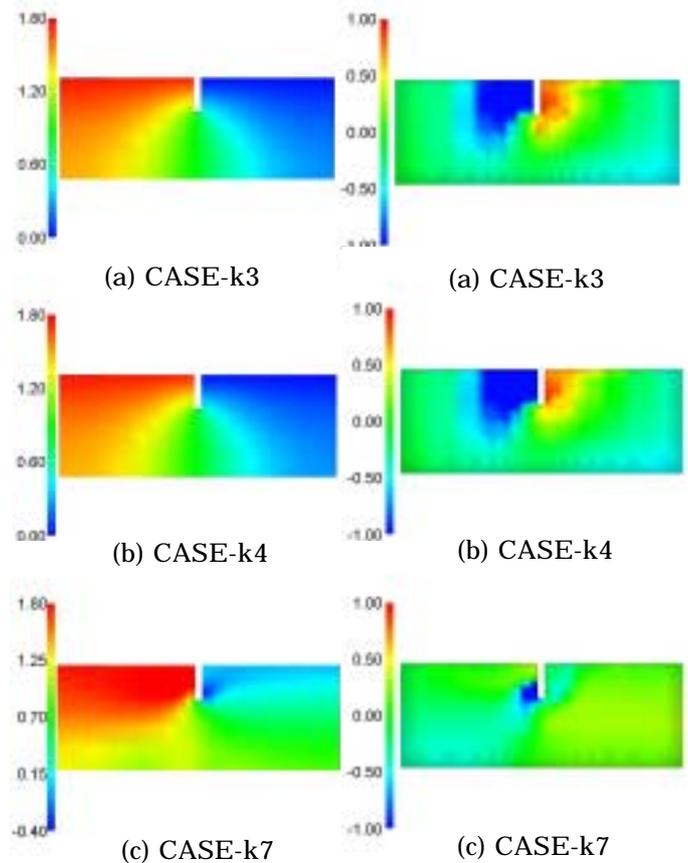


図 5：過剰間隙水圧(kPa)

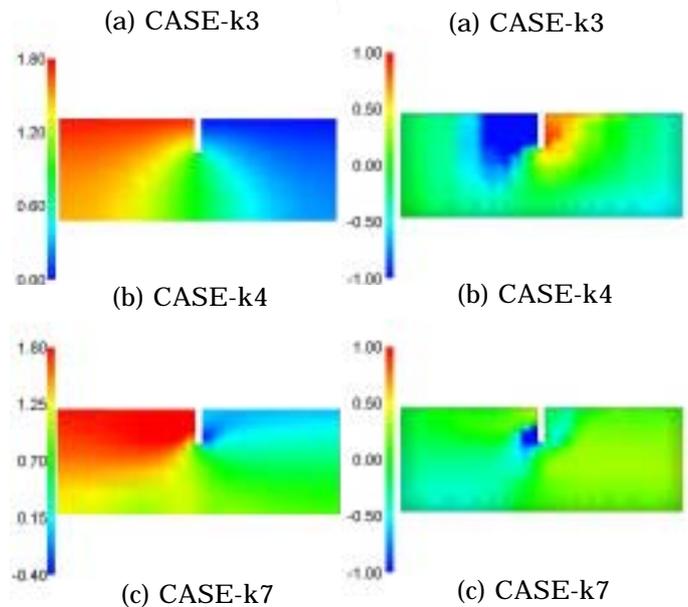


図 6：相対有効応力比



図 7：変位ベクトル分布
(30倍拡大表示)

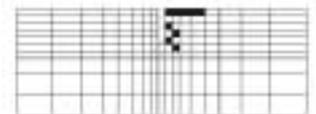


図 8：液状化要素の分布