

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760380

研究課題名(和文) 粒子法による地震時および越流時の堤防の安定性評価解析手法の構築

研究課題名(英文) Development of analysis method for evaluating stability of river dikes during earthquake and overflow by a particle method

研究代表者

肥後 陽介 (Higo, Yosuke)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10444449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：堤防の被害は、地震時においては液状化を伴う流動、越流時においては浸透および浸食が見られ、これらを解析するには大変形解析法である粒子法が有効である。本研究では、粒子法の一つであるMPM (Material Point Method) に着目し、不飽和土の解析が可能な多相系

MPM-FDM連成解析法を地震時の大変形応答解析のための解析法へと拡張した。また、越流時の浸食解析のため、流体の流れの支配方程式であるナビエ・ストークス式をHSMAC (Highly Simplified MAC) 法で解くと共に掃流力を摩擦則によって表現し、これをMPMと連成した新たな解析手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Damage of river dikes caused by earthquakes is a large deformation problem involving liquefaction, while that caused by overflow is a seepage-erosion coupled problem. Particle methods which are equivalent to the mesh-free methods are effective for simulating these kinds of large deformation problems. In the present study, MPM (Material Point Method) that is one of the particle methods has been extended to a multi-phase coupled dynamic analysis method to analyse unsaturated river dikes during earthquake. In addition, in order to simulate erosion during overflow, the Navier-Stokes equation has been employed as the governing equation of the overflow along the surface of the river dikes, and then it has been solved by HSMAC (Highly Simplified MAC), in which a tractive force is calculated by a friction law. Coupling HSMAC as a CFD (computational fluid dynamics) and MPM as a CSD (computational fluid dynamics), a CFD-CSD coupled analysis method has been newly developed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：粒子法 地震 越流 不飽和土 堤防 連成解析

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震では、地震動と津波によって甚大な人的・物的被害が発生した。北上川などの河口部の堤防は、津波による浸食で大部分が流出した。また、江合川や鳴瀬川などでは、地震動によって堤防が崩壊する被害が発生した。さらに、近年の気候変動によって主に夏季に豪雨が発生する事が多くなり、河川堤防は河川水位上昇と雨水による浸透及び越流水による浸食が原因で破堤に至る事例が頻発している。このような背景から、地震や豪雨に耐えうる堅固な河川堤防の重要性は非常に高くなっている。

図1に2011年東北地方太平洋沖地震における堤防の崩壊事例、図2に越流模型実験における堤防の破壊挙動を示す。これらの現象に対する安定性評価には、以下の点を満たす解析手法が必要である。

- 1) すべり面や土塊の剥離を伴う大変形挙動の追跡
- 2) 土の浸食による土の流出と進行的な破壊挙動の追跡
- 3) 水-土の相互作用の適切なモデル化(液状化, 浸透など)
- 4) 不飽和土の力学挙動の正確な記述(サクシジョンの影響を考慮した弾塑性構成式)



図1 東北地方太平洋沖地震における堤防の崩壊事例(鳴瀬川)¹⁾

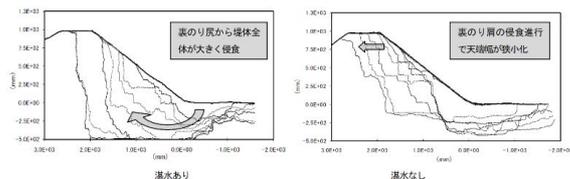


図2 越流模型実験における堤防の浸食挙動²⁾

2. 研究の目的

本研究では、地震動と越流時の堤防の安定性を評価可能な解析手法の構築を目的とする。そのために、申請者が開発してきたMPM-FDM(有限差分法)連成法³⁾を拡張して、

- 地震動を受ける堤防の大変形解析
- 津波や豪雨に起因した越流による浸食解析

が可能な新たな解析手法を提案し、その適用性の検証までを実施する。具体的な、拡張点は以下のとおりである。

地震に対する堤防の安定性評価解析手法の開発

MPMは本来、慣性項を持つ動的解析法であるが、これに減衰項を加え地震動の減衰挙動を表現する。また、粒子が格子の境界に近づいた時に数値拡散が起こる事が指摘されているため、空間補間法を一般化し大変形時の解析精度を向上させる。

地震動に対する安定性評価解析法の適用性の検証のため、動的遠心模型実験とそのシミュレーションを実施する。動的遠心模型実験では、直下型地震および海洋型地震、レベル からレベル を超える巨大地震時を模擬する。さらに、堤防内へ水を浸透させた後に地震動を入力する実験を行い、豪雨と地震の複合的外的作用に対する、堤防の安定性を検討する。

越流に対する堤防の安定性評価解析手法の開発

浸食が進むと堤防の形状が変化し、越流水の流れも同時に変化する。この進行的な挙動を解析するには、土の力学挙動だけでなく、越流水の流れを解析する必要がある。そこで、オリジナルのMPMの運動方程式に粘性項を付加し、圧縮性粘性流体の解析法へと拡張する。

浸食問題は、海岸工学や河川工学などの水理学の分野でモデル化が行われてきているが、水の流速が限界流速に達すると土粒子がpick upされるなど、簡易なものが多い。地盤工学の分野でも限界せん断力を設定し浸食をモデル化する試みがなされているが、粒径の大きさで浸食が支配されると仮定している。これらのモデルでは、土の強度特性、すなわち構成則を考慮していない。しかし、実際の浸食現象は、水流によって土に作用するせん断力に対する、土の骨格に働く応力や土粒子間サクシジョンに起因する土のせん断抵抗に支配されていると考えるのが合理的である。そこで本研究では、不飽和および飽和状態の土の構成モデルを正確に記述するとともに、越流水によって土に作用するせん断力を摩擦から計算し、骨格応力が0になる事を条件に浸食をモデル化する。

地震時の地盤被害の減災には、安定性の評価と対策法や強化法が必要となるが、被災の力学的メカニズムを知る事が適切な対策の鍵となる。本申請課題の目的とする解析法は、不飽和および飽和土の構成関係、浸食メカニズムを力学的背景に基づいて詳細に記述すると共に、地震時の動的・大変形解析、越流水の流体解析が可能な、越流-浸食-浸透-変形を連成したマルチフィジックス解析法であり、被災のメカニズムの解明、対策法・強化法の効果の検証に有効な解析手法となり得る。

3. 研究の方法

現在、実務における堤防の地震時の安定性評価は、地震外力を静的な力に置き換える震度法などの簡易法が主流である。限られた重要な構造物については、液状化を考慮できる有効応力解析法に基づく有限要素法による解析が実施されてきている。しかし、有限要素法は大変形時に要素が過度にひずんで解析精度が低下する問題がある。さらに、ブロック状に土塊が分断する現象や土が剥離する浸食問題の解析は、要素間の接続が保たれ

る有限要素法では困難である。

現在まで地盤の大変形問題の新たな解析手法として、粒子法の一つである Material Point Method (MPM) を用いた不飽和土の多相連成解析法の開発に取り組んできた。MPM は、流体力学分野で発達した Particle-in-cell (PIC) 法を Sulsky 他 (1994)⁴⁾ が固体力学分野に適用した大変形解析法であり、Lagrangian 質点と Euler 格子を併用するため前述の要素の過度なひずみの問題がなく大変形を容易に取り扱える。さらに、他の粒子法に比べて、履歴依存型の構成式を取り入れやすく、FEM と類似性があり境界条件の設定などに特別な処置を要しないという有利な特徴を持つ。また、MPM は爆発や剥離といった問題にも適用されており、大変形問題だけでなく浸食による土の流出問題にも適用が容易である。

4. 研究成果

4.1 地震に対する堤防の安定性評価解析手法の開発

1) MPM FDM 連成法の定式化

簡易三相系解析法に基づき、多相系に拡張された MPM FDM 連成法の定式化を行う。構成則には Oka et al. (1999)⁵⁾ による砂の繰返し弾塑性構成式を用いている。

各相の応力テンソルの和によって定義される。\$P^F\$ は平均間隙圧である。

$$\sigma_{ij}^S = \sigma'_{ij} - n^S P^F \delta_{ij}, \quad \sigma_{ij}^W = -n^W P^W \delta_{ij}, \quad \sigma_{ij}^G = -n^G P^G \delta_{ij} \quad (1)$$

$$P^F = s^W P^W + s^G P^G$$

添え字 \$S, W, G\$ はそれぞれ固相・液相・気相を表し、\$P^W, P^G\$ はそれぞれの相の圧力を、\$n^S, n^W, n^G\$ は各相の体積含有率を表す。\$s^W, s^G\$ はそれぞれ間隙水、間隙空気の飽和度を表す。本研究では、(1)式より求められる、骨格応力テンソルを応力変数として用いる。ここで応力は圧縮を正とし、\$\sigma_{ij}\$ は全応力である。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - P^F \delta_{ij} \quad (2)$$

次に運動方程式及び、液相・気相の連続式を示す。

運動方程式

$$\rho \ddot{u}_i = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad (3)$$

液相の連続式

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{k^f}{\gamma_w} \left(\rho^f \dot{u}_i^s + \frac{\partial p^f}{\partial x_i} - \rho^f b_i \right) \right\} + S_r \dot{\epsilon}_{ii}^s + \frac{n}{K^f} \dot{p}^f = 0 \quad (4)$$

気相の連続式

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{k^a}{\rho^a g} \left(\rho^a \dot{u}_i^s + \frac{\partial p^a}{\partial x_i} - \rho^a b_i \right) \right\} + (1 - S_r) \dot{\epsilon}_{ii}^s - n \dot{S}_r + n(1 - S_r) \frac{\dot{p}^a}{K^a} = 0 \quad (5)$$

飽和度とサクシヨンの関係である水分特性曲線は、van Genuchten 式を用いる。また、透水係数も飽和度に依存するものとする。これらを弱形式化し、MPM で離散化する。液相

の連続式については液状化解析法 LIQCA2D09⁶⁾ に準じて FDM (有限体積法) を用いて定式化した。ここで、他相に比べて気体の圧縮性が非常に高いとすると \$K^a \cong 0\$ となり、気体の構成則 \$p^a = -K^a \epsilon_{ii}^a\$ より \$\dot{p}^a \cong 0\$ とできる。ここで、\$K^a\$ は気体の体積弾性係数を示す。すなわち簡易三相系解析法⁵⁾ では気相の連続式は常に満足しており、空気圧は大気圧と等しいと仮定している。

2) 一般化補間法の適用

MPM は形状関数を用いて、格子粒子間の内挿を行う。そのため粒子が格子境界に位置する場合には、その値はゼロに近づく。しかし、形状関数の勾配はゼロにはならない。これに起因する、計算格子をまたぐ際の応力の振動など問題点が指摘されている。そこで、本研究では Bardenhagen & Kober (2004)⁷⁾ によって提案された Contiguous Particles GIMP (Generalized Interpolation Material Point) 法を導入した。GIMP では補間関数を一般化し、有限の連続体を粒子によって分割する際の、粒子の位置を決定する粒子特性関数のスムーズさを向上させ、上記のような、形状関数だけゼロに近づくことを避ける。一般化した粒子特性関数は以下の式で表わされる。

$$\sum_p \chi_p^i(x) = 1 \quad \forall x \quad (6)$$

ここで上付きの \$i\$ は初期値を表わす。次に、計算格子へと離散化する際には次のような格子形状関数と試験関数を用いる。

$$\sum_I S_I(x) = 1 \quad \forall x \quad (7)$$

$$w(x) = \sum_{I=1}^{N_n} w_I S_I(x) \quad (8)$$

ここで、下付きの \$I\$ は格子点を表わし、\$N_n\$ は格子節点の個数を示す。運動量保存側は、

$$\rho \frac{dv}{dt} = \nabla \cdot \sigma + \rho b \quad (9)$$

で表わされるが、この式を式(8)と Gauss の発散定理を用いて変形し、\$w_I\$ の任意性を考慮し、粒子特性関数 \$\chi_p\$ を用いると、以下の式が得られる。

$$\sum_{p=1}^{N_p} \frac{\dot{p}_p}{V_p} \int_{\Omega_p \cap \Omega} \chi_p(x) \cdot S_I(x) dx = \int_{\partial \Omega} \tau \cdot S_I(x) dS - \sum_{p=1}^{N_p} \sigma_p \int_{\Omega_p \cap \Omega} \chi_p(x) \cdot \nabla S_I(x) dx + \sum_{p=1}^{N_p} m_p b \frac{1}{V_p} \int_{\Omega_p \cap \Omega} \chi_p(x) \cdot S_I(x) dx \quad (10)$$

ここで、GIMP における補間関数を以下のよう定義する。

$$S_{Ip} = \frac{1}{V_p} \int_{\Omega_p \cap \Omega} \chi_p(x) \cdot S_I(x) dx \quad (11)$$

本研究で用いた Contiguous Particles GIMP 法では、実際には、格子の座標 \$x_I\$ と粒子の座標 \$x_p\$、格子幅 \$L\$、粒子の領域半径 \$l_p\$ に

よって場合分けされる以下のような補間関数を用いる。

$$S_{Ip} = \begin{cases} 0 & x_p - x_I \leq -L - l_p \\ \frac{(L+l_p+(x_p-x_I))^2}{4Ll_p} & -L - l_p < x_p - x_I \leq -L + l_p \\ 1 + \frac{x_p - x_I}{L} & -L + l_p < x_p - x_I \leq -l_p \\ 1 - \frac{(x_p - x_I)^2 + l_p^2}{2Ll_p} & -l_p < x_p - x_I \leq l_p \\ 1 - \frac{x_p - x_I}{L} & l_p < x_p - x_I \leq +L - l_p \\ \frac{(L+l_p-(x_p-x_I))^2}{4Ll_p} & L - l_p < x_p - x_I \leq L + l_p \\ 0 & L + l_p \leq x_p - x_I \end{cases} \quad (12)$$

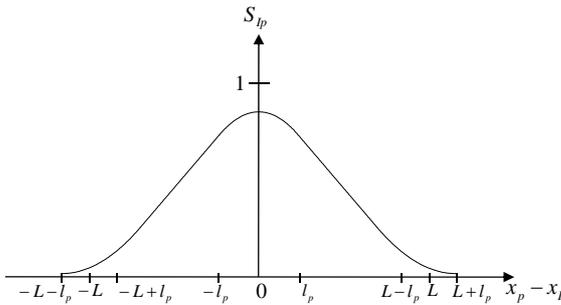


図3 S_{Ip}分布図

図3の分布図を見ても分かるように、通常MPMでは粒子が属する格子の節点にのみマッピングされるが、粒子の座標と格子節点の座標の差が格子幅Lと等しくなってもその値はゼロではない。すなわち、隣の格子に移動したとしても元の格子節点に対してマッピングすることができ、格子間を移動する際に補間関数が極小となることを避けることができる。

3) GIMPを用いた不飽和堤防の動的解析

解析モデルは図4に示すよう河川堤防の全断面を想定し、水位は基礎地盤上部、側面・底面を非排水境界とし、底面は固定境界とし、側方は同一深度等変位境界とした。用いたパラメータは能登半島盛土材料を想定している。入力波は兵庫県南部地震の観測波で遠矢浜のNS成分を用い、最大約200gal程度の地震外力として30秒間加える(図5)。また、Rayleigh減衰に関しては初期剛性比例型、 $\alpha_1=0.003$ を用いた。なお、MPMでの動的解析の適用性を確かめるため、同条件にてFEM(液状化解析法 LIQCA2D09⁶⁾による解析を行った。

図6に骨格応力減少比分布図を示す。解析結果は上からGIMP, FEMとしているが、どちらも基礎地盤上部の中央部に液状化している箇所が広がり、基礎地盤部へと骨格応力の減少が広がっていることが確認できる。両者を比較すると、GIMPでも定性的に解析結果が得られていることが分かる。次に図7に右天端部の加速度応答及び鉛直変位時刻歴図を示す。こちらは、どちらも入力波に対し、最大値は増幅された値を示し、MPMでは最大600gal程度、FEMでは550gal程度の最大値が確認できる。また鉛直変位時刻歴を見ると、2手法がほぼ同じ挙動を示すことが確認

できる。最終的な沈下量を見ると、GIMPで0.22m, FEMで0.32mと若干FEMの沈下量が大きく出ている。以上よりGIMPによる結果はFEMによる結果と定性的に同様であったことから、GIMPによる動的解析の適用性が確認できた。

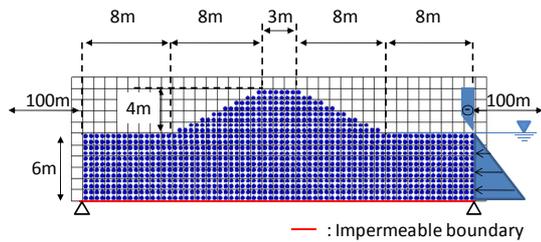


図4 解析モデル

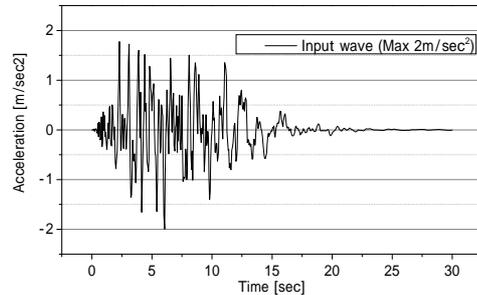


図5 入力波

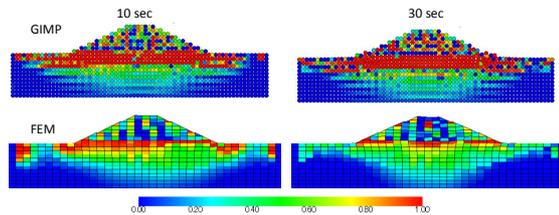


図6 骨格応力減少比分布図

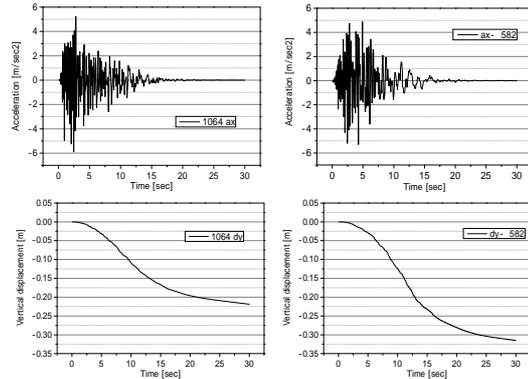


図7 天端部加速度応答及び鉛直変位図

4) まとめ

本研究では、代表的な数値解析法である有限要素法では計算が困難な大変形問題の解析手法確立を目指し、MPMにおける補間関数を一般化する、一般化補間法を適用したMPM-FDM連成解析法を用いて、不飽和河川堤防の動的解析を行い、FEMによる解析結果との比較により、その適用性が明らかになった。

今後の課題としては、さらに大変形問題へ

の適用，粒子分割数や計算格子サイズなどの変更による精度の検証や，動的解析の結果に対し，updated Lagrangian 法に基づく FEM 解析結果や実験結果との比較などを通じて精度の確認などが挙げられる．

4.2 越流に対する堤防の安定性評価解析手法の開発

1) HSMAC 法による流体相の支配方程式

HSMAC(Highly Simplified MAC)法は，流体の数値解析を行うためのアルゴリズムである(例えば⁸⁾)．基礎方程式は連続式と x, y 方向の N-S 式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

であり，圧力に関するポアソン方程式を，ニュートン法を用いて反復計算を行うことで解く．上式において， x, y は空間座標， u は x 軸方向の流速， v は y 軸方向の流速， ρ は流体の密度， P は圧力， ν は動粘性係数である．本研究では，変数の配置にスタッガード格子を用いた．この格子では圧力を格子中心，速度を半格子点上に定義することで，振動解など非現実的な解の発生を抑えられるが，速度と圧力を同一位置で定義できないため，物理境界の外側にさらに仮想セルを設けて境界条件を与える必要がある．

本研究では，固体相に GIMP 法，流体相に HSMAC をそれぞれ適用し，同時に数値解析を行う流体 - 固体連成手法の開発を行った．具体的には，HSMAC 法における仮想セルに固体相の圧力を，GIMP 法において FDM で連続式を解く際の仮想セルに流体相の圧力を採用することで連成を行った．(図 8)

2) 流体 - 固体連成解析手法を用いた数値解析

初めに，HSMAC 法を用いた二次元キャピティ流れの数値解析を行った．計算領域は $1(\text{m}) \times 1(\text{m})$ の正方形領域とし，上面にのみ流速 $0.25(\text{m/s})$ を与え，その他の境界にはフリースリップ条件を課した．時間刻み $\Delta t = 1.0 \times 10^{-2}(\text{s})$ の条件のもと，初期状態において全体の圧力は一様に $0(\text{kPa})$ とし，定常状態になるまで計算を行った．計算結果として流速ベクトルと圧力のコンターを図 9 に示す．これを見ると，大きな循環渦が形成され，中心部の圧力が最も低くなっていることがわかる．これはキャピティ流れの代表的な特徴であり，流れの様子を再現できたと考えられる．

次に，計算領域の壁面を粗面と仮定し，その影響を考慮した解析を行った．底面せん断応力の評価には，粗面の対数則を用い，外力

項として N-S 式に組み込んだ．図 10，図 11 に壁面せん断力を考慮した場合の二次元キャピティ流れの解析結果を示す．粗面の影響を考慮しない場合の結果と比較すると，渦中心の圧力が少し高い値を示している．これは，粗面によるせん断摩擦力の影響を受けて全体の速度が低下し，その結果として渦の中心と外部の圧力差が小さくなったためと考えられる．

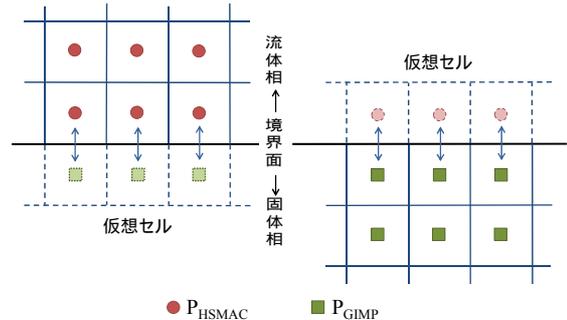


図 8 連成手法

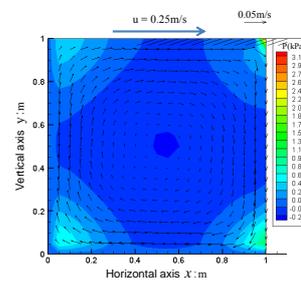


図 9 流速・圧力分布

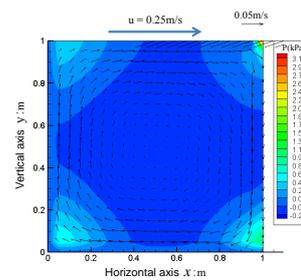


図 10 圧力・流速分布

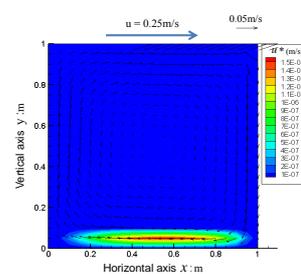


図 11 摩擦速度・速度分布

最後に，GIMP 法と HSMAC 法を用いた流体 - 固体連成解析を行った．固体相のパラメータは前節と同じものを用いた．解析条件を図 12 に示す．固体相への浸透現象が 100 秒以内に概ね終了していたため，100 秒後の結果について考察を行った．流体相に着目した結果を図 13 に，固体相に着目した結果を図 14 に示す．100 秒間では流体相の流れは定常化していないが，図 14 を見てみると，固体

相の間隙水圧が徐々に増加している様子が確認できる。このことから流体が固体相へと浸透していく様子を再現できたと考えられる。

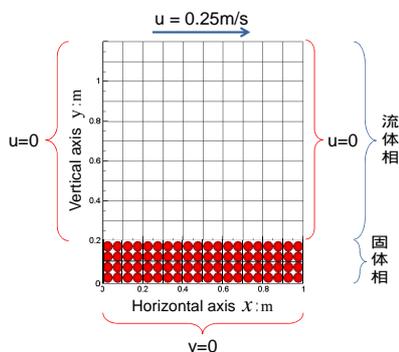


図 12 連成解析条件

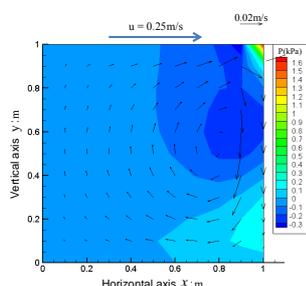


図 13 流体相の流速・圧力分布

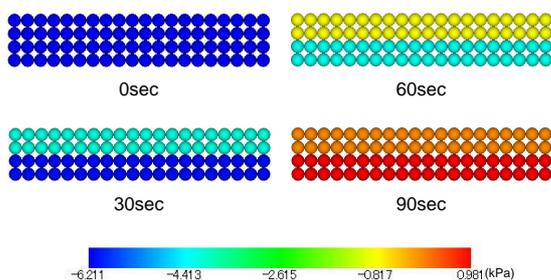


図 14 固体相の間隙水圧分布

3) まとめ

流体解析法の HSMAC 法と不飽和土の粒子法である GIMP 法の連成解析手法を提案し、二次元キャピティ流れに適用することでモデルの妥当性を検証した。また、粗面によるせん断摩擦力の影響も考慮することができた。今後、HSMAC 法に重力を考慮するための外力項を組み込み、また流体の流れによって発生するせん断力の固体相への影響を考慮することで、浸透 - 浸食の同時解析が可能となり精度の高い解析モデルの構築を目指す。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 5 件)

衣川哲平, 肥後陽介, 岡二三生, 木村亮, 木元小百合, 継続時間の長い地震動を受ける盛土の浸透を考慮した遠心模型実験, 土木学会平成 25 年度全国大会, 第 68 回年次学術講演会, 千葉, 2013.

Higo, Y., Oka, F. and Nishimura, D., A coupled GIMP-FDM scheme for analyzing dynamic response of multiphase unsaturated soils, Proceedings of the 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, 13-16 April 2014, Sendai, Japan, pp.154-155, 2014.

Higo, Y., Nishimura, D. and Oka, F., Dynamic analysis of unsaturated embankment considering the seepage flow by a GIMP-FDM coupled method, the 14th International Conference of IACMAG, September 22-25 2014, Kyoto, 6 pages, accepted.

松尾大介, 肥後陽介, 音田慎一郎, 三村衛, 水の流れと土の浸透の連成解析手法に関する基礎的研究, 地盤工学会第 49 回地盤工学研究発表会, 北九州, 2014.

松尾大介, 肥後陽介, 音田慎一郎, 三村衛, HSMAC 法および GIMP 法を用いた流体 - 固体連成解析手法に関する基礎的研究, 土木学会平成 26 年度全国大会, 第 69 回年次学術講演会, 大阪, 2014.

〔その他〕

ホームページ等: 研究業績, 肥後陽介, <http://geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp/staff/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

肥後 陽介 (HIGO Yosuke)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 10444449

参考文献

- 1) 国土交通省東北地方整備局, 第 2 回北上川等堤防復旧技術検討会, 資料 2-1, 2011.
- 2) 與田敏昭 他, 河川技術論文集, 第 16 巻, 2010.
- 3) Higo, Y., Oka, F., Kimoto, S., Morinaka, Y., Goto, Y. and Chen, Z., A coupled MPM-FDM analysis method for multi-phase elasto-plastic soils, Soils & Foundations, 50(4), pp.515-532, 2010.
- 4) Sulsky, D., Zhou, S.J., Howard L. and Schreyer: Application of a particle-in-cell method to solid mechanics, Computer Physics Communications, 87, pp.236-252, 1995.
- 5) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y., and Yamashita, S., A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol.49, No.5, pp.661-680, 1999.
- 6) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ, LIQCA2D09(2009 年公開版)資料, 2009.
- 7) S.G. Bardenhagen and E.M. Kober, The Generalized Interpolation Material Point Method, CMES, Vol. 5, No. 6, pp.477-495, 2004.
- 8) 平野博之, 流れの数値解析と可視化 第 3 版, 丸善出版株式会社, 2011.