地盤防災に対する数値地盤力学

地盤材料・間隙流体相互作用のモデリング

小高猛司*

Numerical Geomechanics for the Prevention of Geo-disasters Modeling the Interaction of Geomaterials with Pore Fluids

Takeshi KODAKA*

Abstract

Modeling the interaction of geomaterials with pore fluids is one of the key issues in numerical geomechanics. In 2004, many disasters caused by heavy rainfall and flooding occurred in various areas throughout Japan. These rain-related disasters were probably accompanied by geodisasters, *e.g.*, flows of debris and slope failures in mountain areas and river dike breaks in plain areas. Although the disasters are of course very unfortunate, it is anticipated that data from them will contribute to geomechnics in terms of future geo-disaster prevention. Because most of these geo-disasters are related to the behavior of pore fluids in geomaterials, it is important to construct and use an appropriate model of the interaction of geomaterials with pore fluids.

In the present paper, a newly developed evaluation method for the safety of river dike embankments during flooding is introduced first. This method consists of a deformation analysis that can simultaneously consider stability and unsaturated seepage flow. It is quite different, therefore, from the conventional evaluation method in which stability and seepage flow are considered separately. A soil skeleton-pore water coupled elasto-plastic finite element analysis is applied to the problem by incorporating the unsaturated seepage characteristics, and by assuming the pore air pressure in the unsaturated soil region to be atmospheric pressure. The deformation and the stability of a river dike embankment during a flood are investigated for various cases of initial saturation and permeability. The results of the analysis show that the existing evaluation criterion for the seepage failure of river dike embankments is not always on the safe side.

Secondly, the problems to be solved are discussed. A multi-phase coupled analysis, which considers the interaction of geomaterials not only with pore water, but also with pore air, is shown. The present analysis has been applied to simulate the experimental results of triaxial tests on unsaturated silt under unexhausted and undrained conditions. This method is expected to be a useful numerical tool for predicting deformation and stability of unsaturated river dike embankments during floods in practical fields. However, more complex problems exist which are difficult to solve with the present numerical analysis method, which is based on continuum mechanics. Some examples of these unsolved problems are also introduced, namely, river dike breaks due to flooding and the progressive seepage failure of sandy deposits that include discrete air bubbles.

^{*} 名城大学理工学部建設システム工学科

^{*} Department of Civil Engineering, Meijo University

Key words : geo-disaster, geomaterial, numerical geomechanics, flood, river dike embankment, multi-phase coupled analysis

キーワード:地盤災害,地盤材料,数値地盤力学,洪水,河川堤防,多相連成解析

I.はじめに

平成16年は日本各地で豪雨災害が頻発し、山 間部では数多くの土石流や斜面崩壊に見舞われ、 都市部においても多くの河川堤防が破堤し、甚大 な被害をもたらした(地盤工学会,2005a,b)。豪 雨時の地盤災害は、土粒子間の間隙流体の振る舞 いに密接に関わっており、数値地盤力学が今後ど れだけ防災、減災研究に貢献できるかは、地盤材 料と間隙流体との相互作用のモデリングの成否に かかっている。通常、地盤内の間隙流体は間隙水 と間隙空気である。地下水位以下の地盤では間隙 空気の存在はさほど考える必要はないが、豪雨時 に地盤災害を引き起こす範囲は、地下水位より上 側の不飽和領域であることがほとんどであり、土 粒子,間隙水,間隙空気との3相系をなしてい る。土粒子と間隙水のみの2相系飽和地盤であ れば、比較的高精度に地盤挙動を予測することが 可能となってきているが、間隙空気が加わると話 は途端に複雑になり、現状では解くことができる 問題も限られている。

本論文では、はじめに豪雨時の堤防の不飽和浸 透破壊の問題を取り上げ、その解析法を示す。そ こでは、2相系の枠組みで不飽和浸透と連成した 変形解析を中心に説明する。次に、堤防の安定性 評価を考える上での課題を挙げつつ、不飽和地盤 を対象とした3相系解析の現状と今後の展望に ついて述べる。

II.河川堤防の不飽和浸透 変形連成解析

1)本解析法の提案の背景

平成16年の数々の豪雨では、数多くの河川堤 防が破堤した。主因は越水、浸透およびそれらの 複合作用であるが、同じ河川堤防の破堤であって も、越水開始から破堤までの時間や、崩れ初めて から完全に破堤するまでの時間は、それぞれの事 例で異なっていた(地盤工学会,2005a,b)。平 成16年豪雨の特徴は、局所的かつ短時間に大量 の降雨に見舞われたことであり、日本全国のどの 河川であっても、同じ条件の降雨に襲われれば、 計画高水位を上回る危険性は高い。人命や財産を 守る堤防に望まれる条件は、越水しても破堤しな い、あるいは、破堤するにしても安全に避難でき るだけの時間を要するものであることである。し かし、堤防のほとんどは現地調達の地盤材料で構 成されており、堤防の特性は千差万別であるのに 加え、総延長が莫大であることから、堤防の安全 性評価はほぼ手つかずのままになっているのが現 状である。また、従来の安全性評価手法は、堤体 の変形を考慮しない浸透解析と、滑り破壊のみを 考慮する慣用円弧すべり解析を別個に行うもので あり、洪水時に起こりうる堤防の破壊形態を必ず しも正確に模擬したものとはなっていない。

そのため、従来の慣用解析に代わり、多相系材 料の変形解析法を用いて堤防の安全性を検討する 手法を開発した(小高ほか、2005)。具体的には、 不飽和浸透時に起こりうる土骨格の変形解析を行 うのだが、不飽和といえども間隙は常に排気状態 であると仮定し、間隙空気の運動まではここでは 考慮していない。本章では小高ほか(2005)の 不飽和浸透 変形連成解析の概略について述べ る。

2) 支配方程式

はじめに飽和土の場合を考え、2 相混合体理論 (Biot, 1956)に基づき導かれる固相(土骨格) の変位と液相の圧力(間隙水圧)を未知数とする u-p formulation による支配方程式を示す(Zienkiewicz and Bettess, 1982; Zienkiewicz *et al.*, 1999; Oka *et al.*, 1994)。力のつり合い式は次式 となる。

$$\bar{\rho}\ddot{u}_{i}^{S} = \frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_{i}} + \bar{\rho}b_{i} \tag{1}$$

ここに、 \vec{u}^{i} は固相の加速度ベクトル、 b_{i} は物体 カベクトル、 σ_{ij} は全応力テンソルである。また、 ρ は混合体の密度であり、次式で表される。

$$\bar{\rho} = (1 - n)\rho^{S} + n\rho^{F} \tag{2}$$

n は混合体の間隙率、 ρ^s および ρ^r はそれぞれ固相および液相の密度である。式(1)を適切な境界条件の下で解けばよいのであるが、地盤の挙動をより正確に予測するために、地盤材料の構成式は有効応力で記述されるのが主流になりつつある。すなわち、有効応力 σ_{ij} は次式のように全応力 σ_{ij} と間隙水圧Pとの差で表される。

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - P\delta_{ij} \tag{3}$$

ここに、*δ_{ij}*はクロネッカーのデルタである。こ の有効応力をつり合い式に適用する際に問題とな るのは、間隙水圧*P*が未知数として新たに加わ ることであり、そのために新たな場の方程式が必 要となる。ここでは、固相と液相の質量保存則を 用いて得られる「連続式」を用いる。2 相混合体 理論における連続式とは、「ある境界内の固相の 体積圧縮量 = その境界からの液相の流出量」とい う関係を示したものであり、固相が非圧縮物質で あれば、流体の連続式と等価である。最終的には 領域*V*において以下の式となる。

$$\int_{V} \left[-\frac{k}{\gamma_{w}} \rho^{F} \ddot{\varepsilon}_{ii}^{S} - k \frac{\partial^{2} h}{\partial x_{i}^{2}} + \dot{\varepsilon}_{ii}^{S} + \frac{n}{K^{F}} \dot{P} \right] dV = 0$$
(4)

ここに、k は透水係数、 γ_w は液相の単位体積重量、 ε_i^{s} は固相の体積ひずみ、k は全水頭であり、 K^{F} は液相の体積弾性係数である。

以上のように求められた、つり合い式と連続式 を連成することにより、固相の変位(加速度)と 間隙水圧が求められる。ここで用いた解析手法 (Oka *et al.*, 1994)では、構成式には動的問題へ の適用も視野に入れて繰り返し弾塑性構成式 (Oka *et al.*, 1999)を用いるとともに、式(1) のつり合い式の空間離散化には有限要素法を適用 し、時間離散化には Newmark のβ法を適用し ている。また、式(4)で得られる連続式は、赤 井・田村(1978)の方法をベースとした空間離 散化を施して計算を行う。

次に、Zienkiewicz *et al.* (1999)の手法に従い、 上記の支配方程式を不飽和浸透 - 変形連成問題へ 拡張した。間隙空気圧の発生はないものとし、地 盤内には間隙空気を含む圧縮性に富んだ間隙流体 があるものと考え、飽和問題の延長線上で定式化 を行う。具体的には、式(2)ならびに式(4) において間隙水の密度 ρ^{F} を次式で定義する不飽 和土中の見かけの液相の密度 ρ^{F} で置き換える。

$$\bar{\rho}^F = S_r \cdot \rho^F \quad (0 \le S_r \le 1) \tag{5}$$

ここで、*S*, は飽和度であり、全間隙中の間隙水 が占める体積の割合である。また、式(4)の連 続式においては、液相の体積弾性係数*K^F*の代わ りに、次式で定義する見かけの液相の体積弾性係 数*K^F*を用いる。

$$\frac{1}{\bar{K}^F} = \frac{S_r}{K^F} + \frac{C}{n\gamma_w} \tag{6}$$

ここに, *C*は比水分容量である。

3) 不飽和浸透特性

不飽和浸透特性を表現するのにあたり,汎用性 の高い van Genuchten (1980) モデルを用いた。 すなわち,次式で定義する有効飽和度 *S*_eの概念 を導入する。

$$S_{e} = \frac{\theta - \theta_{r}}{\theta_{s} - \theta_{r}} = \frac{nS_{r} - \theta_{r}}{\theta_{s} - \theta_{r}}$$
(7)

ここに、θ は体積含水率、θ。は飽和状態での体積 含水率であり間隙率 n に等しい。また、θ, は高 サクション条件下での体積含水率であり、粒子間 に付着して高サクション条件でも残留し続ける水 分量を表す。

水分特性を決定するため、有効飽和度 *S_e*を負の圧力水頭 ψ と次式で関係付ける。

$$S_e = \left[1 + \left|\alpha\psi\right|^{n'}\right]^{-m} \tag{8}$$

ここに、 α は ψ の逆数の次元を持つスケーリン グパラメータであり、n', mは水分特性曲線の形 を決める形状パラメータであり、 $n' \ge m$ を次式 で関係付けることにより、S字型の水分特性曲線 を表現することが可能となる。

$$m = 1 - \frac{1}{n'} \tag{9}$$

なお、今回示す解析例では河川堤防の設計で推奨 されている値である a = 2, n = 4を用いている。

また,式(6)で用いる比水分容量*C*は,次式 のように求められる。

$$C\left(\equiv \frac{d\theta}{d\psi}\right) = \alpha \left(n'-1\right) \left(\theta_s - \theta_r\right) S_e^{1/m} \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m$$
(10)

また,透水係数に対する不飽和透水係数の比であ る比透水係数 k, は次式で定義される。

$$k_{r} = S_{e}^{1/2} \left\{ 1 - \left(1 - S_{e}^{1/m} \right)^{m} \right\}^{2}$$
(11)

以上の関係を用いて、不飽和浸透特性を表す。

実際の解析では以下の方法で不飽和領域を扱う。はじめに,各要素の圧力水頭を次式で算定する。

$$\psi = \frac{P}{\gamma_w} \tag{12}$$

地下水位以浅の不飽和領域では、地下水位からの 高さ Δy の位置水頭分の負圧 - γ_w ・ Δy が初期圧 力水頭であるとするが、その値は規定の初期飽和 度から式(7),(8)を用いて逆算される負の圧 力水頭以下にはならないと仮定する。また、圧力 水頭が負の場合には、サクションとして初期平均 有効応力に付加し、サクションとして初期平均 有効応力に付加し、サクションによる地盤剛性の 増加を考慮する。次に、式(12)で算定された 圧力水頭を用いて式(7)、式(8)より有効飽和 度および飽和度を算定する。これにより得られた 有効飽和度を用いて、式(10)より比水分容量 Cを、 式(11)より比透水係数 k_r を算定する。これら の算定値から、不飽和部の間隙水の見かけの体積



Fig. 1 Dimensions of the dike embankment used for the present analysis.

弾性係数および透水係数を逐次更新する。なお, 初期飽和度より低い飽和度の領域においては,間 隙を自由に流動できる自由水は存在しないものと 仮定し,間隙水の流動は考慮しない。

4) 堤防モデル地盤の解析条件

図1に堤防モデルを示す。実存する堤防断面 を模擬して、天端5m、盛土高さ6m、斜面長 12mの川表側・川裏側勾配がともに1:2の堤 体とした。堤体はすべて弾塑性材料としている。 地下水面の設定として初期水位は1mと仮定し、 堤体右側(川表側)の水位を上昇させた。川裏側 の法面には、浸出水が自然に流下するような流水 境界を設けている。変位境界条件としては、堤体 モデルの下面を固定境界とし、水頭の境界条件と しては、川表側では水位上昇に伴いその水位に相 当する水頭を、川裏側では初期水位部分に1m 分の水頭を与えた。

解析ケースは表1に示す6種類を設定した。 これらは図1の堤防モデルを用いて、飽和度と 透水係数などの地盤条件により、堤防の安定性が どのように異なるかについて検討したものであ る。基準となるCaseIは、初期水面以下の地盤 (以下この部分を基礎地盤部と呼ぶ)の飽和度を 1.0とし、初期水位より上の盛土部の初期の飽和 度を0.6と設定した。透水係数は基礎地盤部、盛 土部ともに1.0×10⁻⁵m/s、川表の河川水位上 昇速度は1/3m/hrとし、15時間かけて初期水位 1mから6mまで水位が上昇したと仮定した。 他の5つの解析ケースは、このCaseIから、種々 の地盤条件を変えたものである。Case IIは、盛 土部の初期飽和度による影響を観察するために、 盛土部の初期飽和度を0.8に変更したものであ

	初期飽和度		透水係数*		水位上昇速度	破壊までの時間
	基礎	盛土	基礎	盛土	* *	(hour)
Ι	1.0	0.6	1	1	1	118
II	1.0	0.8	1	1	1	47
III	1.0	0.6	5	1	1	90
IV	1.0	0.6	1/5	1	1	120
v	1.0	0.6	1	5	1	31
VI	1.0	0.6	1	1/5	1	破壊せず

表1 解析条件と解析結果.

*透水係数は,基本ケースIの飽和透水係数1.0 × 10⁻⁵ m/s からの倍率を表す. **水位上昇速度は,基本ケースIにおける1/3 m/hr からの倍率を表す.

る。Case III および IV は,基礎地盤部の透水係 数による影響を評価するために,基礎地盤の透水 係数をそれぞれ,5.0 × 10^{-5} m/s および 2.0 × 10^{-6} m/s に変更したものである。さらに,Case V および VI は,盛土部の透水係数による影響を 評価するために,盛土部の透水係数をそれぞれ 5.0 × 10^{-5} m/s および 2.0 × 10^{-6} m/s に変更し たものである。

5)解析結果

Case Iの時間の経過に伴う飽和度の変化を図2 に示す。水浸した部分の飽和度は1.0となるた め、この図から、水位上昇によって水が川表側か ら川裏側へと浸透し、浸潤面が徐々に変化してい る不飽和浸透の様子がわかる。図3は偏差ひず みの分布図である。ここで、偏差ひずみと呼んで いる量は、各要素の偏差ひずみテンソルの第2不 変量である。図に示すように、川裏側法尻部に偏 差ひずみが5%を超えた部分が発生すると、それ 以降は偏差ひずみが急激に拡大するため、本解析 では偏差ひずみが5%以上に達した時点で堤防に 浸透破壊が生じたと判定することとした。この判 定条件においては、Case I における破壊は水位 上昇開始から118時間後となる。図2の浸潤面 を見ると、破壊時の118時間後には堤防内部が ほとんど飽和状態となっていることがわかる。図 4は偏差ひずみの各時間における増分値の分布で ある。破壊前では、図2に見られる浸潤面に沿っ て偏差ひずみが集中していることが確認できる。



Fig. 2 Distribution of the degree of saturation for Case I.

浸潤線がほぼ定常となると、川裏側法尻部分にお いて偏差ひずみが蓄積してゆき、最終的には図3 に示すように、偏差ひずみが大きく発生し破壊に 至っている。

他の解析ケースにおいても水位上昇開始時から





破壊まで、あるいは破壊に至らない場合には200 時間経過後までの計算を行った。表1には,各 解析ケースにおける破壊に至るまでの時間も示し ている。

図 5 は Case II の

飽和度分布の

経時変化 である。図より Case I の倍以上の速さで堤体内 へ水が浸透していることがわかり、その結果とし て Case I の半分以下の時間で破壊に至っている。 この結果から、降雨等により堤防の飽和度が上昇 している時は浸透に対する安全性が低下している と言える。次に、基礎地盤部の透水係数を5倍 とした Case III の飽和度の経時変化を図6 に示 す。50時間後において Case I の浸潤面と比較す ると、Case III の方が川裏側堤体内下部において 浸潤面が上に位置しており、このケースの方が早 く浸水している様子が分かる。逆に、基礎地盤部 分の透水係数が基本ケースIの1/5としたCase IVでは、破壊までの時間は Case I とほぼ変わら ず、明確な相違は認められない。このことから、 基礎地盤部分の透水係数が大きければ浸透が早く 進むことにより、破壊に至るまでの時間は短くな るが、基礎地盤の透水係数が小さくても堤防盛土 自体の透水係数に変化がなければ、堤防の安全性



Fig. 4 Distribution of the increment of deviator strain for Case I.

には関係しないことがわかる。基礎地盤の透水係 数が高いことが一因となり堤防に浸透破壊が生じ た例は、2004年新潟豪雨においても報告されて おり(大熊,2004)、基礎地盤の透水性の高さが 危険性を増すことが本研究の解析結果からも示さ れた。

次に、Case I と堤防の盛土部の透水係数が異 なるケースについて比較する。盛土部の透水係数 が Case I の 5 倍である Case V では、破壊まで の時間が表 1 に示すように 31 時間となっており、 透水係数が 5 倍になることにより破壊までの時 間が約 1/4 倍となった。逆に、盛土部の透水係数 が基本ケース I の 1/5 である Case VI では、200 時間経過するまでに浸潤面が川裏側に到達せず、 破壊しなかった。以上のように、盛土部の透水係 数は、浸透の進行と破壊までの時間に大きく影響





を与え,堤防の安全性を支配する重要なパラメー 夕であることがわかる。

6) 不飽和浸透 変形連成解析のまとめ

飽和 不飽和浸透特性を取り入れた変形解析法 を提案し、浸透破壊に対する堤防の安定性につい て検討を行った。現在、いくつかの実堤防サイト において地盤情報および土質パラメータを調査・ 収集し、実務への適用に向けて詳細な検討を行っ ている。

III.課題: 越流破堤の解析

豪雨による急激な浸透時の安定性評価に関して は、前章のような不飽和浸透 - 変形解析が有効で あるが、もちろん課題も数多く残されている。

その第一に考えられるのは、平成16年の豪雨 災害においては、越流が最終的に破堤にまで至ら しめた事例が多い点である。河川工学の分野では 越流=破堤と考えられているくらいに、越流時に は破堤の確率が高い。もちろん越流破堤する前に は、降雨や河川の水位上昇に伴う浸透により、堤 防の安定性が低下していると考えられるが、最終 的には越流が堤防破壊を急加速することになる。



Fig. 6 Distribution of the degree of saturation for Case III.

以上より,豪雨時の堤防の安定性を考える上に は,越流の評価は避けて通れない。最近,越流破 堤の解析にDEM,MPS,SPH等の離散体の数 値解析を取り入れる試みが徐々になされてきてい るが,離散体力学の枠組みだけでは定量的な評価 まで行うには自ずと限界がある。現在,MPS(後 藤,2004)と前章で示したFEMによる解析とを 連携した破堤解析の検討が始められたところであ る(高田ほか,2006a)。また,流体力学的に地盤 を取り扱う連続体解析の手法についても今後検討 してゆく予定である。

IV.課題:3相系解析の不飽和地盤への適用

第 章で示した不飽和浸透 変形連成解析では, 扱う地盤は不飽和であるものの,間隙空気圧が常 にゼロであると仮定して間隙水圧のみを扱った解 析とした。しかしながら,降雨,浸透により飽和 度が上昇した実際の地盤内においては,土粒子に 付着した状態の間隙空気がそれを取り巻く間隙水 によって閉じこめられることもあり,そのような 場合には間隙空気が被圧状態になっている可能性 も考えられる。実際に、堤防の破堤時には大量の 空気の泡が目撃されている場合もある。本章で は、Oka *et al.*(2006)よる間隙空気も考慮した 3相系解析について簡単に述べる。

多孔質媒体理論(Theory of Porous Media) (de Boer, 1998)に基づき,新たに気相の連続式を加 えて定式化した3相混合体における支配方程式 を示す。

まず,各相にはたらく応力を分応力と定義し, 全応力は分応力の和で表されるものとする。各相 の分応力は以下の式で表されるものとする。

固相:
$$\sigma_{ij}^{S} = \sigma_{ij}^{"} + n^{S} P^{F} \delta_{ij}$$
 (13)

液相: $\sigma_{ij}^{W} = n^{W} P^{W} \delta_{ij}$ (14)

気相:
$$\sigma_{ii}^{G} = n^{G} P^{G} \delta_{ij}$$
 (15)

ここで、 n^{s} 、 n^{w} 、 n^{c} はそれぞれ固相、液相、 気相における間隙率を表し、 P^{w} 、 P^{c} はそれぞれ 液相、気相の間隙圧であり、 P^{F} は次式に示す平 均間隙圧である。

$$P^{F} = (1 - S_{r}) P^{G} + S_{r} P^{W}$$
(16)

また,式(13)に用いているσ["]_iは平均骨格応力 (Bolzon *et al.*, 1996; Ehlers, 2003)と呼ばれる ものであり,2相系地盤での有効応力の代わりに, 不飽和地盤材料の構成式の記述には,このσ["]_iを 用いることとしている。式(13)~式(16)と,

$$S_r = \frac{n^W}{n^W + n^G} = \frac{n^W}{1 - n^S}, \ n^S + n^W + n^G = 1$$
(17)

という飽和度と各相の間隙率の関係を用いれば、 平均骨格応力 σ は次式となることがわかる。

$$\sigma_{ij}^{"} = \sigma_{ij} - P^F \,\delta_{ij} \tag{18}$$

本解析では、3相混合体として定式化を行うた め、気相についても連続式を考える。ここで、間 隙水は非圧縮性、間隙空気は圧縮性であるものと する。境界からの流出入がないとすると、液相お よび気相における質量保存則は次のように書け る。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho^{W} n^{W}) = - (\rho^{W} V_{i}^{W})_{i}$$
(19)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho^{G} n^{G} \right) = - \left(\rho^{G} V_{i}^{G} \right)_{,i}$$
(20)

ここに、 $\rho^{W} \ge \rho^{G}$ はそれぞれ液相と気相の密度で あり、 $V_{i}^{W} = n^{W}(v_{i}^{W} - v_{i}^{S}) \ge V_{i}^{G} = n^{C}(v_{i}^{G} - v_{i}^{S})$ は各 相の固相との相対速度であり、次式に示すような ダルシー則に従うものと仮定する。

$$V_{i}^{W} = \frac{k^{W}}{\rho^{W} g} \left\{ \left(P^{W} \delta_{ji} \right)_{,j} + \rho^{W} \bar{F}_{i} \right\},$$
$$V_{i}^{G} = \frac{k^{G}}{\rho^{G} g} \left(P^{G} \delta_{ji} \right)_{,j}$$
(21)

ここで、 k^W および k^G はそれぞれ、透水係数および透気係数である。また、g は重力加速度であり、 \hat{F}_i は物体力ベクトルである。

最終的に式(19)(20)は,間隙率*n* = *n^W* + *n^G*を用いた液相,気相の連続式として以下のように表すことができる。

$$S_r \dot{n} + \dot{S}_r n = -V_{i,i}^W$$
 (22)

$$(1 - S_r)\dot{n} - \dot{S}_r n + (1 - S_r) n \frac{\dot{\rho}^G}{\rho^G} = -\frac{\left(\rho^G V_i^G\right)_{,i}}{\rho^G}$$
(23)

固相のつり合い式と上記の2つの連続式を連成 することにより,間隙空気圧を考慮した3相系 の解析を行うことができる。なお,不飽和浸透特 性は第 章の解析と同様に,van Genuchten モ デルを用いて,サクションP^G - P^Wと飽和度を関 連付けるものとする。また,透水係数もvan Genuchten モデルを適用して飽和度に応じて増大さ せるが,透気係数は逆に飽和度に応じて減少させ るように与える。さらに,サクションの効果を考 慮した不飽和土の構成式(Kim *et al.*, 2005)を 適用する。

以上の解析を不飽和土の三軸圧縮試験のシミュ レーションに適用した結果(Oka *et al.*, 2006) を示す。試験試料は不飽和シルトであり,図7に



図 7 不飽和土の非排気非排水試験. Fig. 7 Unexhausted and undrained test of unsaturated soil.

三軸試験中の供試体の様子を示す。供試体上部の キャップ部に直接間隙空気圧センサーを設置して いるが、外部とキャップを結ぶ空気経路は三軸圧 力室の外から制御できる特殊空圧弁により完全に 遮断することができ、遮断後は軸圧縮中に発生す る間隙空気圧の上昇分を正確に計測することを可 能としている。一方、間隙水圧は供試体下部よ り、空気を遮断することができるセラミックディ スクを介して計測している。また、体積変化は供 試体の両側に設けた非接触変位計(図7の供試 体の正面に見える上下2つあるセンサー)によ り計測している。

図8に解析条件を示す。試験は三軸条件で行っ ているが解析は平面ひずみ条件で実施している。 供試体の全ての境界を非排気・非排水条件とし て、上端のキャップを一定のひずみ速度で押し込 むことにより軸圧縮する。図9はシミュレーショ ン結果である。実験結果は最新の実験データ(小 高ほか、2006) に変更してある。三軸条件と平面 ひずみ条件の違いがあり,かつ間隙水圧の上昇過 程が若干異なるものの、軸圧縮中の体積圧縮なら びに間隙圧の上昇の過程が比較的うまく説明でき ていることがわかる。図10は軸ひずみ20%時の 間隙流体の流れを示したものである。供試体端部 の変形が拘束されている不均一な変形モードに起 因して、間隙水と間隙空気は不均一に発生するこ とになり、今回の解析結果では供試体中央部に向 けての間隙流体の流れが発生している様子がわか





る。

以上のように、3相系の連成解析を行うことに より、間隙空気圧も考慮した不飽和解析を実施す ることが可能となった。現在、この手法を用いた 堤防モデルの解析も実施されはじめている(高田 ほか、2006b)。

一方,この3相系解析は不飽和土ばかりでは なく、メタンハイドレート含有地盤の変形解析へ の応用も試されている。固相から気相への相変化 を取り入れることにより、減圧あるいは加熱する ことによってメタンハイドレートが分解する時に 起こる地盤変形について詳細な検討が行われてお







Fig. 10 Pore fluid flows at 20% of the axial strain.

り (Oka *et al.*, 2005a, b)、新たな地圏開発の分 野への挑戦が行われている。

V.課題:地盤内の気液混相流の挙動

3相系解析により間隙空気を含んだ不飽和浸透 時の堤防の挙動がある程度シミュレートできる段 階となった。しかし、実際の地盤内に内包する空 気の挙動、さらに言えば浸透を問題とするならば 空気を含んだ混相流としての間隙流体の挙動を予 測することが今後さらに必要となる。先に示した 多孔質媒体理論に基づく3相系解析の枠組みで は、地盤内に気泡として離散的に存在する空気の 挙動を捉えることは困難である。ではなぜ、気泡 としての間隙空気の挙動を捉えることが、堤防の 破堤を考える上で重要となるのかを小高・浅岡 (1994)の実験を例にして示す。

堤防の破堤時に大量の気泡が吹き出すのが目撃 されたりしていることは前に述べたが、その気泡 はどこから来て、どのように発達し、さらには堤 防の安定性にどのように関わっているのかは明確 にわかっていない。小高・浅岡(1994)の実験 結果はそれを考える上での一助となる。

図11は実験に用いた2次元浸透破壊実験土槽 である。層厚15 cm の砂層が水中に作製してあ り、中央に固定矢板を設置し、その根入れ長を 5 cm としている。初期状態では矢板を挟んだ両 側ともに、砂層から上の水位は15 cm である。 その初期状態より、矢板の左側(上流側)の水位 を徐々に上昇させると、浸透水は矢板の下側をま わり、矢板の右側(下流側)に浸出する。実験で は下流側の水位はオーバーフローさせて一定に保 つようにしており、それにより矢板を挟んで上下 流の水位差が徐々に発生することになる。図12 に水位上昇に伴う砂地盤の変化を示す。水位差が 約17 cm ついたところで、浸透力により矢板付 近の上流側の砂地盤は若干沈下し、下流側では隆 起してくる。それ以降、急激にその度合いが進行 して,水位差18.5 cm の時にはボイリングして破 壊する。これは、浸透力により下流側の砂地盤の 有効応力がゼロになるからであるが、水位差がこ れよりも小さい場合には通常はこのような破壊に



Fig. 11 Two-dimensional seepage failure experimental apparatus.

は至らない。

しかしながら、ある条件を満たし地盤内に気泡 が発生した場合には、通常ボイリングが発生する 水位よりもはるかに小さな水位でも破壊に至るこ とがある。図 13 は水位差が 15 cm になった時点 でその水位差を維持して砂地盤を観察した実験で ある。図12の実験との違いは、先の実験での水 位上昇速度が2 cm/min であったのに対し、この 実験では2 cm/hour の非常に緩速度の水位上昇 としている。図 13a は水位差ゼロの初期状態で あり、図 13b, c, d はそれぞれ水位を 15 cm で 一定に止めてからの所定時間経過時の様子であ る。写真からわかるように、すでに水位を一定に した時点で初期状態では見られなかった気泡が地 盤内の広範囲に発生しており、時間の経過ととも に上流側から徐々に発達してゆくことがわかる。 詳細な観察によれば、上流側の気泡が浸透水とも に矢板の下を回りこむと下流側の砂層表面から浮 力により噴出してくる。特に矢板下端付近の地盤 内では気泡同士が結合して大きく成長しているこ ともあり、大きな気泡が噴出する度に、砂地盤の 変形が進行してゆき、図13dの直後に大きな気 泡の噴出をきっかけとして砂地盤はボイリングし て破壊した。その際、大量の気泡が一気に水中に 放出されたのが観察されている。一方、図14に 示すように、100時間経過しても地盤内には何の 変化の兆候もなく、全く破壊に至らない場合もあ



初期状態 水位差0 cm

水位差 17.2 cm

水位差 17.5 cm



図 12 2次元浸透場でのボイリング現象. Fig. 12 Boiling in a two-dimensional seepage field.

水位差 18.0 cm

水位差 18.3 cm

水位差 18.5 cm



(c) 水位差 15 cm 一定保持 10 時間経過 (d) 水位差 15 cm 一定保持 19 時間経過 図 13 気泡の発生・発達に伴う進行性破壊.

Fig. 13 Progressive failure caused by the generation and the development of air bubbles.

る。この違いは、実験に使用した水である。すな わち、図13の実験では通常の水道水を使用して いるのに対し、図14の実験では脱気水を使用し

ている。水道水には比較的多くの空気が溶存して いるが、砂層中を流れる間に、砂層中に取り残さ れている小さな空気の核に、その溶存空気を受け



図 14 水位一定保持 100 時間経過(脱気水使用).

Fig. 14 Sand deposits holding the difference between two water levels after the elapse of 100 hours in the case using de-aired water.

渡してゆく。上下流の浸透水の溶存酸素量(DO 値)を詳細に計測したところ、気泡の発生現象が 見られるのは、上流側の水の DO が飽和溶存酸 素量を上回る過飽和な水の場合のみであり、さら にこの場合には、下流から排水される水は飽和溶 存酸素量を下回るまで DO が低下していた。こ のことから、水中に溶存する過飽和分の空気を砂 層がフィルターとなって取り出し、地盤中に気泡 が大量に発生、発達することになる。溶存空気の 量は水温や圧力などの環境で簡単に変わりうるも のであり、自然界の河川でも過飽和となっている 場合は多く、同じメカニズムで堤体内に気泡が蓄 積される場合もあると考えている。

以上の実験より,地盤内の気泡の移動に伴い地 盤が不安定化する現象が確認できたが、この現象 を忠実にシミュレートすることは簡単なことでは ない。気泡の発生がない場合には剛塑性解析 (Asaoka and Kodaka, 1992)や弾塑性有限変形 解析(Kodaka *et al.*, 2001)によってボイリング が発生する限界水位は高精度に予測できることが すでに示されているが、気泡の作用により発生す る進行性破壊は極めて複雑な現象である。しか し、最近になって SPH を用いてこの現象を解析 する試みもなされており(前田・坂井, 2004) 今後の発展が期待される。著者も近い将来、是非 この現象の解析にも挑戦したいと考えている。

VI.おわりに

豪雨時の地盤災害の中でも河川堤防の被災に

ターゲットを絞り,浸透破壊に対する堤体の安定 性評価手法を中心として述べた。特に,不飽和浸 透-変形連成解析について詳細に説明し,いくつ かの解析例を示した。現状では,堤防の浸透破壊 を議論する上で最も合理的かつ簡易に解が得られ る解析手法と考えている。しかしながら,文中で も述べたように実際の堤防の破堤を議論する上で は,越流や間隙空気の作用など,考慮すべき課題 が数多く残されていることがわかった。本論文で 示した3相系解析や,さらに気泡の作用まで含 む次世代の3相系解析など,今後も間隙流体相 互作用のモデリングは地盤力学の進展の鍵となる 重要な要素であることは間違いない。

謝辞

本論文は著者が平成18年3月まで在職していた京都 大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻地盤力学研究 室での研究成果を中心としてまとめたものである。地 盤力学研究室を主宰する京都大学・岡二三生教授に謝 意を表します。

演 対

- 赤井浩一・田村 武(1978)弾塑性構成式による多次 元圧密の数値解析.土木学会論文集,269,98104.
- Asaoka, A. and Kodaka, T. (1992) Seepage failure experiments and their analyses of loose and medium dense sands. *Soils Found.*, **32** 3 , 117 129.
- Biot, M.A. (1956). Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, Low- frequency range. J. Acoust. Soc. Am., 28, 168–178.
- Bolzon, G., Schrefler, B.A. and Zienkiewicz, O.C. (1996) Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states. *Géotechnique*, 46, 279–289.
- de Boer, R. (1998). Theory of porous media-past and present. Z. Angew. Math. Mech. (ZAMM), 78, 441 466.
- Ehlers, W. (2003) Continuum and numerical simulation of porous materials in science and technology. in *Modeling and mechanics of granular and porous materials*, Chapter 9, edited by Capriz, G., Ghionna, V.N. and Giovine, P., Birkhauser, 245 291.
- 後藤仁志(2004)数値流砂水理学.粒子法による混相 流と粒状体の計算力学、森北出版、223p.
- 地盤工学会(2005a) 平成16年7月福井豪雨による地 盤災害調査報告書.地盤工学会平成16年7月福井豪 雨による地盤災害の緊急調査団.
- 地盤工学会(2005b): 平成 16 年台風 23 号による関西 圏地盤災害調査報告書.地盤工学会平成 16 年台風 23 号関西圏地盤災害緊急調査団.

- Kim, Y.-S., Kimoto, S., Oka, F. and Kodaka, T(2005) Numerical simulation of the triaxial compression behaviour of unsaturated silt using an elasto-viscoplastic model. *Proc. 11th IACMAG*, 1, 361 367.
- 小高猛司・浅岡 顕(1994)砂質地盤の浸透過程での 気泡の発生・発達現象.土木学会論文集,487,-26, 129 138.
- Kodaka, T., Oka, F. and Morimoto, R. (2001) Seepage failure analyses of sandy ground using a liquefaction analysis method based on finite deformation theory. Proc. of 1st Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics, APCOM 01, 1, 387 392.
- 小高猛司・岡 二三生・木元小百合・角南 進・加藤 亮輔(2005)、不飽和浸透 変形連成解析による河川堤 防の安全性評価.第50回地盤工学シンポジウム平成 17年度論文集,247254.
- 小高猛司・岡 二三生・鈴木宏尚(2006): 非排気条件 および空気圧制御下における不飽和シルトの力学特 性.第41回地盤工学研究発表会講演概要集,843 844.
- 前田健一・坂井 守(2004) Smoothed Particle Hydrodynamics 法による粒状地盤の浸透破壊解析手法 の開発.応用力学論文集,7,775786.
- Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R. (1994) FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model. *Appl. Sci. Res.*, **52**, 209 245.
- Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.(1999) A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic strain dependency of the shear modulus. *Géotechnique*, 49, 661–680.
- Oka, F., Kimoto, S., Kodaka, T., Takada, N., Fujita, Y. and Higo, Y. (2005a) A finite element analysis of the deformation behavior of a multiphase seabed ground due to the dissociation of natural gas hydrates. *Proc. 11th IACMAG*, **1**, 127–134.

- Oka, F., Kodaka, T. and Kimoto, S. (2005b) Numerical Simulation for Methane Hydrate Dissociation by Chemo-Thermo-Mechanical Coupled FEM. Proc. 2nd Int. Workshop on Gas Hydrate Studies and Other Related Topics, 49 50.
- Oka, F., Kodaka, T., Kimoto, S., Kim, Y.-S. and Yamasaki, N. (2006) An elasto-viscoplastic model and multi-phase coupled FE analysis for unsaturated soil. 4th Int. Conf. on Unsaturated Soils, Geotechnical Special Publication, No. 147, ASCE, 2, 2039 2050.
- 大熊 孝 (2004) 2004 (平成 16) 年 7 月 13 日新潟水 害の速報. 土木学会誌, **89**(9) 45 48.
- 高田直明・木元小百合・岡 二三生・後藤仁志・小高 猛司(2006a)越流を考慮した堤防盛土の多相浸透 変形連成解析.土木学会第61回年次学術講演会,第 部門 CD-ROM.
- 高田直明・岡 二三生・小高猛司・木元小百合・後藤 仁志(2006b)堤防盛土の空気 水 土 多相浸透 変 形連成解析.第41回地盤工学研究発表会講演概要 集,12451246.
- van Genuchten, M. T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 892–898.
- Zienkiewicz, O.C. and Bettess, P. (1982) Soils and other saturated porous media under transient, dynamic conditions. General formulation and the validity of various simplifying assumptions. in *Soil mechanics - Transient and Cyclic Loads*, Chapter 1, edited by Pande, G.N. and Zienkiewicz, O.C., John Wiley & Sons, New York, 1 16.
- Zienkiewicz, O.C., Chan, A.H.C., Pastor, M., Schrefler, B.A. and Shiomi, T. (1999) Computational Geomechanics with Special Reference to Earthquake Engineering, John Wiley & Sons, New York, 31–36.

(2005年10月30日受付,2006年4月17日受理)