

1. はじめに

アースダムや河川堤防などの水利盛土構造物は、さまざまな貯水位あるいは河川水位条件下で安定性が確保できるように設計されなければならない。外水位によって盛土構造物の浸透流が影響を受けると、浸透力などの物体力の変化により堤体内の応力分布が変わり、それによってもって力学的安定性が変化する。したがって、水利盛土構造物の安定性の評価では、盛立て施工や自重などによって生じる外部荷重と浸透力などの物体力の両者を考慮する必要がある。外部力と物体力の効果は、簡単化のため、これまでしばしば分けて取り扱われ、それぞれの結果を重ね合わせる方法がとられてきた。たとえば、Nobari and Duncan¹⁾やAdikari and Parkin²⁾、Li and Desai³⁾は、この種の方法を用いて、湛水時、定常浸透時あるいは貯水位低下時におけるフィルダムの変形挙動や安全性を検討している。このうちLi and Desai³⁾は、浸透流解析法として不変メッシュ法に分類されるResidual Flow法を用い、これを応力・変形解析法と組み合わせ、フィルダムの解析を行った。貯水池の水位低下を対象に、ダム斜面の安全率を計算している点が特徴的であるが、浸透流と応力、安定性の間の相互関係までには言及していない。

著者らは、これまで、湛水時および貯水位低下時のアースダムに生じる上記の相互作用を調べるため、飽和・不飽和浸透流解析法、逐次盛立て解析を含む応力・変形解析法および斜面安定解析法を組み合わせた有限要素解析法を開発してきた^{4), 5)}。ここで、飽和・不飽和浸透流解析法は、Li and Desai³⁾が定義した不変メッシュ法に分類される。本研究では、アースダムあるいは河川堤防を対象に、非定常浸透にともなう応力変化とそれに起因した堤体の不安定化あるいは安定化にいたる一連の力学的プロセスを調べる。水利盛土構造物は、貯水池や河川からの浸透を前提に設計されており、外水位の変動のみによって構造物の安定性がシリアスになることは少ない。問題となるのは、現行の設計法では考慮されていない豪雨の影響である。ここでは、より現実に近い形で、豪雨とそのあとに続く外水位の変動時における堤体の安定性を調べる⁶⁾。締固め盛土には、固有の性質として、透水係数に異方性がみられる。浸透過程における水理学的および力学的安定性にもたらす透水異方性の効果⁷⁾も、あわせて検討する。議論の簡単化のため、水分量の変化にともなう不飽和土のせん断強さの低下⁸⁾は考えない。

2. 数値解析法

2.1 数学的側面

Neuman⁹⁾が先駆的に開発した飽和・不飽和浸透流解析法では、有限要素網が、非定常な浸透流動や繰り返し計算の間に変化することがない。したがって、これと同じ有限要素網を応力・変形解析に用いれば、構造物内の応力に及ぼす浸透力などの物体力の影響を直接に評価することができる。

これまでに開発した数値解析法^{4), 5)}の概要を図1に示す。これには3つのステップが含まれる。つまり、

(1) 飽和・不飽和浸透流解析により、堤体内の圧力水頭を求める。そしてこの圧力水頭から、浸透力、浮力および飽和度の変化にともなうサーチャージ荷重からなる物体力を計算する。

(2) 応力・変形解析により、築堤完了時の初期応力を求め、続いて(1)で計算した物体力と等価な外部節点荷重条件下で応力を計算する。ここで、物体力として浸透力と浮力を考えているため、堤体内の応力

Seepage-induced instability of embankment structures.

Toshihiro MORII, Faculty of Agriculture, Tottori University

は有効応力で評価されることになる。

(3) 有限要素内で生じた応力を用いて、すべり面に沿った斜面の安全率を計算する。すべりは円弧面に沿って起きると仮定する。図1に示すように、すべり面に横切られる有限要素 e の中で生じる局所的な安全率を $F_{s,e}$ とすると、斜面全体の安定性に関する安全率 F_s は、

$$F_s = \frac{\sum (l_e \cdot F_{s,e})}{L} \quad (1)$$

で定義できる。ここで、 L はすべり面の全長、 l_e は要素 e 内のすべり円弧の長さである。式中の \sum は、すべり面に横切られる要素すべてについての総和を意味する。土のせん断強さはモール・クーロンの破壊規準で記述できると仮定する。 $F_{s,e}$ は、ある時間段階で生じている偏差応力に対する破壊時の偏差応力の比として定義される 応力レベル安全率¹⁰⁾で計算する。

以上のステップ(1)から(3)の計算を非定常な浸透流動のあいだ繰り返す。堤体内の応力は非定常浸透とともに変化するため、(3)で求めた安全率もまた時間とともに変わる。なお、不飽和領域では浸透力も浮力も生じないため、土の強度に対する間隙水圧の寄与はないと仮定する。

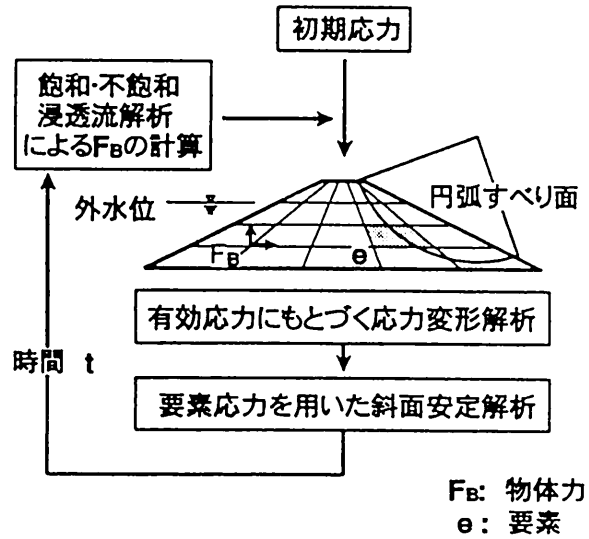


図1 飽和・不飽和浸透流解析、応力変形解析および斜面安定解析を組み合わせた数値解析法の概要

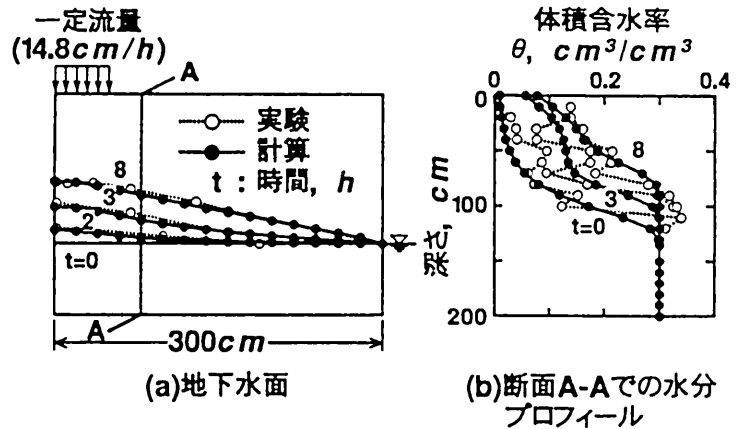


図2 地下水涵養実験¹²⁾と数値解析結果との比較

2.2 降雨浸透のモデル化

飽和・不飽和浸透流解析において、降雨境界条件をモデル化する場合にある種の難しさ¹¹⁾が生じる。開発した数値解析法では、既知水頭境界面と漫出面を除くすべての地表面を既知流量境界面として扱い、そこでは水が土中に浸透するとした。そして、非定常な浸透過程の間や繰り返し計算中に、地表面上の節点の圧力水頭がゼロになり降雨強度が土の浸透能を上回るようになれば、この節点を既知圧力水頭節点として指定し直すようにした。アルゴリズムの適用性を調べるため、図2のように、Vauclin, Khanji and Vachaud¹²⁾による室内での地下水涵養実験との比較を行った。土槽地盤は長さ300cm、高さ200cmで、不透水性基盤上65cmの高さの外水位条件で水理学的平衡状態が確保されたのち、毎時14.8cmに相当する一定流量が地表面50cm幅にわたって8時間与え続けられた。図2(a)は、地下水水面の変化を比較したものであるが、実験と計算結果の間で良好な一致がえられた。図2(b)では、異なる時間で計算した水分プロフィールを実験結果と比較

した。土が等方的で均質であると仮定しているため、計算によるプロフィールはなめらかになっているが、浸潤前線の形状と進み方は実験結果とほぼ良好な対応を示しているのがわかる。

3. 検討結果

3.1 豪雨問題における検討モデル

図3に示すように、高さ10mの堤体を想定する。同図には、有限要素網および飽和・不飽和浸透流解析における初期・境界条件も並記した。基礎地盤は剛体で不透水性と仮定する。初期の外水位は基盤上4.5mの位置に設定する。図3の初期自由水面は、定常浸透状態で計算したものである。降雨とその後の外水位の変動は、図4のように仮定する。単一の30mm/h強度の豪雨が1日間続き、それが止んだ後、1日間かけて外水位が初期の位置からしだいに基盤上9mの高水位(HWL)まで上昇し、定水位を保つとする。定水位で1日が経過した後、外水位はふたたび初期水位まで低下し始めるとした。

解析に用いた土のパラメータは表1のとおりである。土の飽和透水係数は降雨強度より大きいので、表面流出は起きない。飽和・不飽和浸透流解析では、土の体積含水率、サクシオンおよび相対透水係数の関数関係が必要となる。本研究では、Nueman⁹⁾が粘土材料に採用した関係をベースにして、図5のように仮定した。飽和・不飽和浸透流解析の繰返し計算は、圧力水頭の最大絶対変化量が0.01m以下になれば、

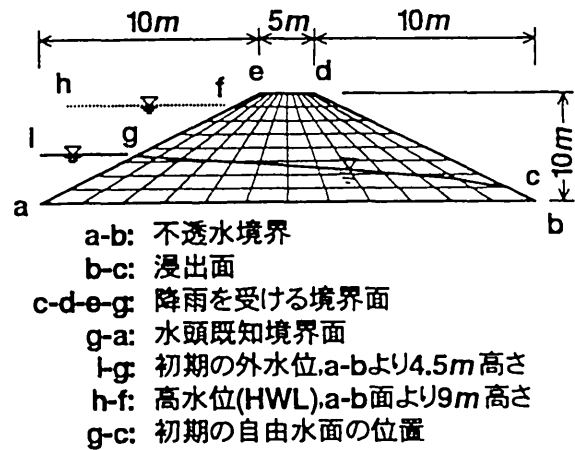


図3 モデル堤体の有限要素断面と初期・境界条件

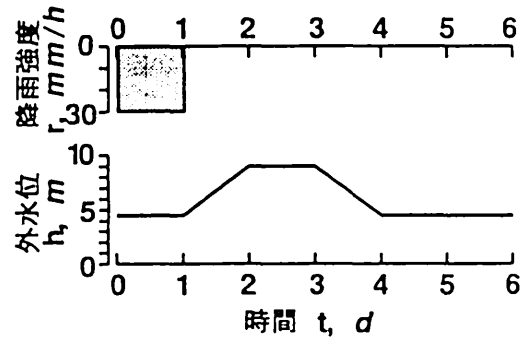


図4 降雨とそれにとまなう外水位の変化

表1 解析に用いた材料パラメータ

間隙比 e	0.5
初期飽和度 S_{r0} , %	80.0
浸潤単位体積重量 γ_t , kN/m ³	19.61
飽和単位体積重量 γ_{sat} , kN/m ³	20.27
飽和透水係数 K_s , cm/s	1×10^{-3}
比貯留係数 S_s	0.0
応力変形パラメータ ^{a)}	
K	150.0
n	1.0
Rr	0.9
G	0.49
F	0.0
d	0.0
粘着力 c , MPa	0.0317
内部摩擦角 ϕ , °	13.0

a) Kulhawyらの双曲線型モデルによる。

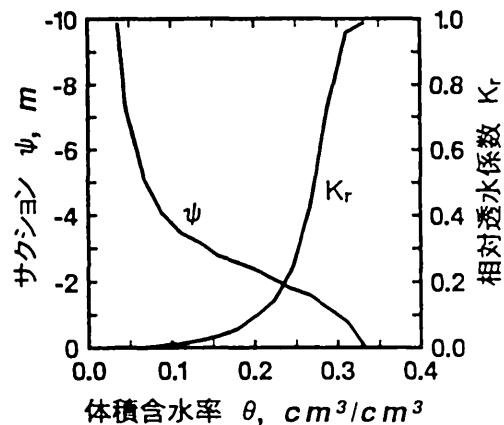


図5 堤体材料の不飽和水分特性

ば収束するようにした。逐次盛立て応力・変形解析では、図3の有限要素網に対応する等厚の8層を用いた。築堤中の堤体材料の変形特性は、Kulhawy and Duncan¹³⁾がOrovilleダムを解析する際に用いた双曲線モデルで記述した。土の応力・ひずみ関係の非線形性に起因した繰返し計算では、その許容誤差を、堤体内で発生する最大変位および応力の1%とした。

3.2 降雨および外水位変動時の浸透挙動

図6は、降雨、外水位上昇、一定外水位および外水位下降のそれぞれの終了時点における自由水面の位置と、飽和度50, 80および90%のコンターをまとめたものである。破線は降雨開始時点での自由水面である。

図6(a)から、降雨にともなう浸透により、堤体の上流側および下流側斜面近傍の領域内で飽和度が上昇し、その結果、これらの領域周辺に自由水面の盛り上がり部ができていくのがわかる。下流側斜面近くの盛り上がり部は、図6(b)に示すように、外水位が高水位に達した後でも残っている。さらに図6(d)からは、上流側斜面内において、自由水面が外水位より遅れて低下しているのがわかる。その結果、浸出面が外水位より上部の斜面上にあらわれ、水が堤体の斜面から貯水池あるいは河川に向かって流れ出し、水理学的に不安定な状況が作りだされることになる。

3.3 降雨および外水位変動にともなう堤体の不安定化

図7は、上流側および下流側斜面における安全率 F_s の時間変化をまとめたものである。ここで F_{s0} は、築堤終了段階で決定した臨界円弧すべり面に沿って計算している。図7の縦軸の F_s/F_{s0} は、外水位が基盤上4.5m

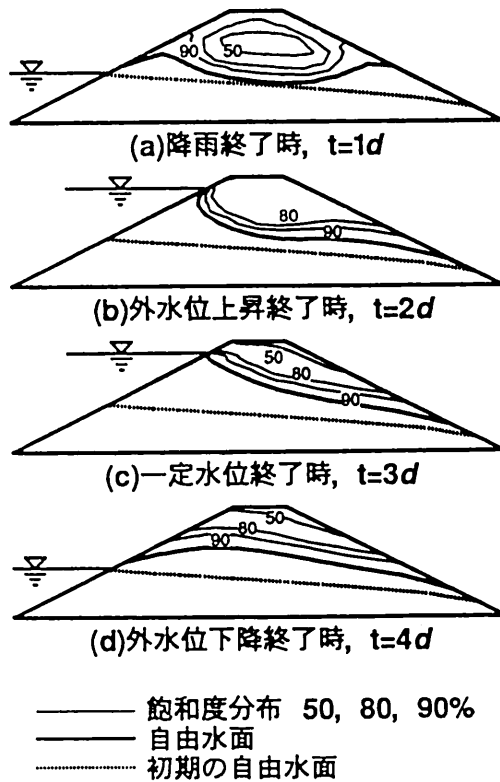


図6 代表的な経過時間における自由水面の位置と飽和度分布

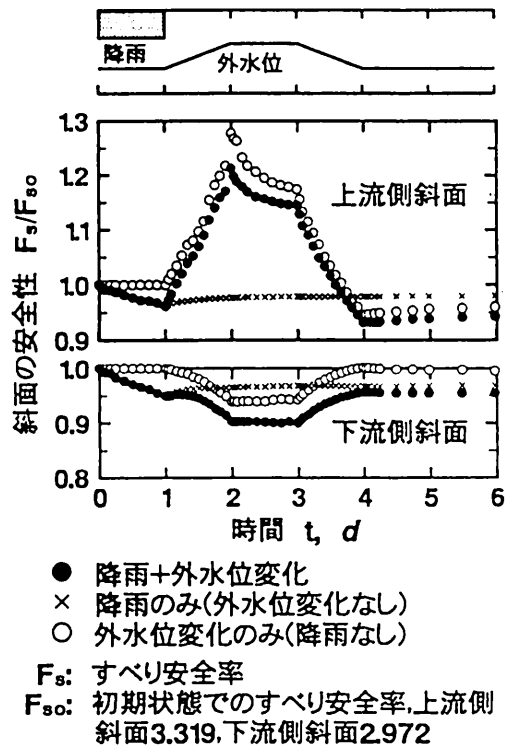


図7 降雨および外水位変化時における斜面の安全性の変化

にある初期状態での安全率 F_s で割っている。同図には、比較のため、30mm/hの降雨で外水位の変化がないケースと、降雨がなく外水位のみが変化する場合の結果も示している。

図7で、上流側、下流側斜面のいずれも降雨時に不安定になるのがわかる。これは、図6に示した自由水面の盛り上がり起因したものと考えられる。もし降雨のあとで外水位に変化がなければ、上流側および下流側のいずれの斜面も徐々に安定性を回復していく。降雨後に始まる外水位の上昇は、一種の押さえの効果により、上流側斜面の安定性の向上を促進する。これに対し、下流側斜面では、外水位が上昇につれて次第に多くの水量が斜面の外に流れ出すようになるため、さらに不安定な状態になっていく。外水位上昇時にあらわれるこの不安定化は、豪雨問題に特有のカウンターブローと考えることができる。さらにもう1つのカウンターブローを、外水位低下時の上流側斜面での急激な F_s の低下にみることができる。

図7に示した F_s の時間変化は、以下に示すように、堤体内の応力の変化にもとづいてうまく説明することができる。

図8は、堤体の上下流領域に対称的に位置する有限要素内の最大および最小有効主応力 σ_1' および σ_3' の変化を示したものである。図8の縦軸では、 σ_1' と σ_3' の変化を、それぞれ、初期状態以降に生じた増分 $\Delta\sigma_1'$ と $\Delta\sigma_3'$ で表している。降雨が継続する間、堤体の上流側では $0 \leq \Delta\sigma_1' < \Delta\sigma_3'$ 、下流側では $0 < \Delta\sigma_1' < \Delta\sigma_3'$ となっているのがわかる。いずれの主応力変化も、モールの応力円が半径を少しずつ広げながら、直応力～せん断強さ図の原点に向かって移動していき、その結果、 F_s が低下することになる。一方、外水位上昇期間の前半では、下流側領域で σ_1' と σ_3' はほぼ同じ量だけ増加しているが、後半になって浸透流が下流側斜面に到達するようになると、 σ_1' と σ_3' のいずれもが急激に低下し、安全率を下げることになる。これが先に述べた第1番目のカウンターブローをもたらす力学的なプロセスと考えられる。外水位の低下時に上流側斜面をおそう第2番目のカウンターブローもまた、 σ_1' の増加と σ_3' の

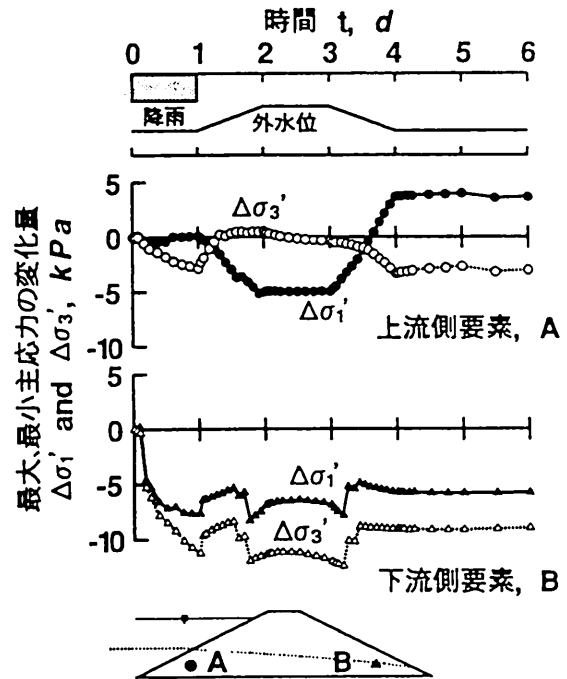


図8 降雨および外水位変化時における主応力の変化

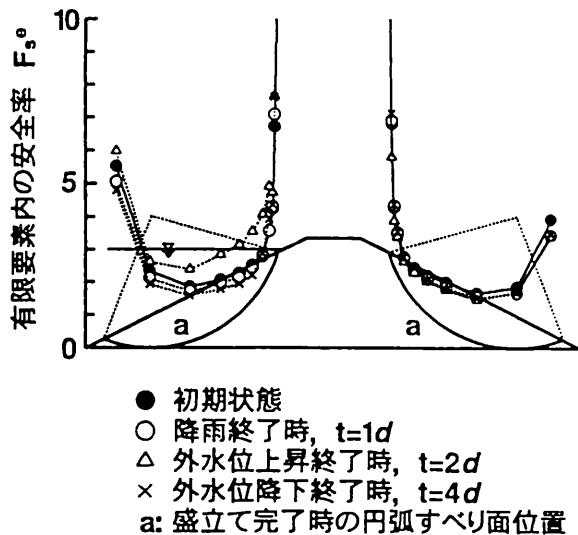


図9 代表的な経過時間における有限要素内の安全率の分布

減少により説明できる。これらの応力変化は主として、それぞれ、外水位位置より上部の斜面内における鉛直下向きの流れと下部での水平外向き流れによってもたらされたものである。

図9は、代表的な経過時間において、すべり円に横切られる有限要素内の局所安全率の分布を比較したものである。局所安全率の比較的大きな変化が、下流側斜面と同じく上流側斜面ののり先周辺にみることができ。外水位が上昇するときには、上流側斜面のほぼ全体にわたって安定性が向上するのがわかる。

3.4 透水異方性の影響

図3の堤体断面において、築堤後の湛水により、外水位が基盤位置からHWLまで0.5m/dの速度で上昇するケースを考える。材料特性は表1のとおりとする。異方性の程度は、水平方向の鉛直方向に対する透水係数の比 ρ で定義する。フィルダムの透水異方性の一般的な値として、 $\rho = 5 \sim 25$ が想定されている¹⁴⁾ため、表2のように $\rho = 1, 5$ および 10 の3ケースを設定する。ここで $\rho = 1$ は等方性を意味する。

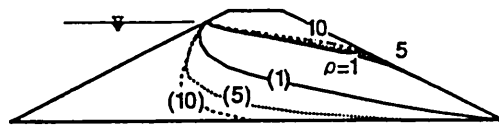
図10(a)に、非定常過程にあるHWL時および定常時における自由水面の位置を比較する。非定常過程の浸透流動は ρ に大きな影響を受ける。たとえば、鉛直方向の透水係数が相対的に小さくなる $\rho = 10$ のケースでは、鉛直方向の浸透流の補給が少なくなるため、自由水面の進行は遅くなる。これに対し、定常時の自由水面にはめだった違いがみられず、 ρ とともにわずかに位置が高くなる程度である。図10(b)は、定常浸透状態において、最大動水勾配0.4以上の分布領域をまとめたものである。 ρ とともに相対的に動水勾配の大きな領域が広がる傾向にあるのがわかる。つまり、水理学的安全性という点からみると、透水係数の異方性はややマイナス側の影響をもつことになる。

図11には、 ρ にともなう斜面の安全率の

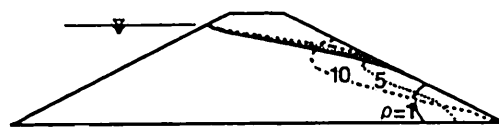
表2 堤体材料の透水異方性の程度

水平方向の透水係数 K_H	K_s	K_s	K_s
鉛直方向の透水係数 K_V	K_s	$0.2K_s$	$0.1K_s$
異方性の程度 $\rho=K_H/K_V$	1	5	10

[注] $K_s=1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$



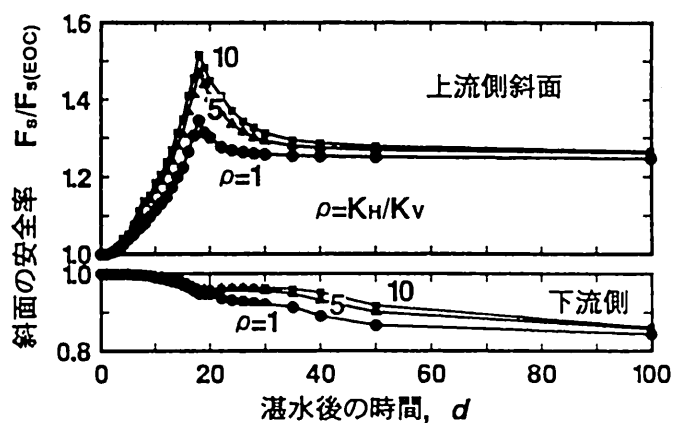
(a)HWLおよび定常時の自由水面



(b)定常時の動水勾配分布(0.4)

$\rho=K_H/K_V$, ただし()はHWL時の自由水面

図10 透水異方性にともなう自由水面と動水勾配分布の違い



F_s : 安全率

$F_s(\text{EOC})$: 盛立て完了時(EOC)の安全率, 3.12

図11 透水異方性にともなうすべり安全率の違い

違いを比較した。図7で示したように、上流側斜面では、外水位による一種の押さえの効果でHWL時まで安全率が急増し、そのあと、非定常浸透流動とそれともなう応力の再分布により、平衡状態まで漸減していく。この効果は、先の図10(a)からもわかるように、 ρ とともに大きくなる。一方、下流側斜面では、堤体の上流側領域の応力変化に応じて徐々に安全率が低下していったのち、自由水面が下流側斜面に到達し始めるあたりより、さらに不安定化の傾向を強めるようになる。この時、透水異方性は、力学的安定性に対しプラス側の効果をもつことがわかる。

4. まとめ

アースダムや河川堤防などの水利盛土構造物を対象に、浸透にともなう応力変化とそれに起因した堤体の安定化あるいは不安定化のプロセスを調べた。浸透条件として、単一の豪雨とそれに続く外水位の変動を考えた。盛土に固有の透水係数の異方性の影響も考慮にいった。検討手法として、飽和・不飽和浸透流解析法、応力・変形解析法および斜面安定解析法を組み合わせた有限要素解析法を用いた。その特徴は、飽和・不飽和浸透流解析法が不変メッシュ法であることから、応力・変形解析法と共通の有限要素網を用いることができ、応力分布に及ぼす浸透力などの物体力の効果を直接に評価できる点にある。

ここで提示した数値解析法が、非定常浸透条件下にあるアースダムや河川堤防などの水理学的、力学的挙動を理解するうえで、有用なツールを提供しうることを明らかにできたと考えられる。本研究では、仮想的な堤体断面と単純な hidrograph を対象としたが、解析法を、2つあるいはそれ以上の豪雨やゾーン状の堤体断面を含むより複雑な問題に適用していくことが可能である。

本研究でえられた知見を要約すれば、次のようになる。つまり、

(1) アースダムや河川堤防などの水利盛土構造物の非定常浸透にともなう不安定化あるいは安定化は、浸透によって生じる応力変化を通して説明できる。

(2) 豪雨を受ける盛土構造物の安定性を評価する場合、斜面の不安定化をもたらす2つのカウンターローを認識しておく必要がある。そのうちの1つは、降雨後に外水位が上昇する際に盛土構造物の下流側斜面を、もう1つは外水位の低下時に上流側斜面をおそう。

(3) 盛土に固有な透水係数の異方性は、堤体の力学的安全性に対してプラス側の効果をもつ。

5. 参考文献

- 1) Nobari, E. S. and Duncan, J. M. : Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams, Report No. TE-72-1, University of California-Berkeley, 1972.
- 2) Adikari, G. S. N. and Parkin, A. K. : Deformation behaviour of Talbingo Dam, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 6, pp.353-382, 1982.
- 3) Li, G. C. and Desai, C. S. : Stress and seepage analysis of earth dams, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109(7), pp.946-960, 1983.
- 4) 森井俊広・長谷川高士 : 湛水時および貯水位低下時のアースダムの力学的安定性, 農業土木学会論文集, No. 173, pp.75-81, 1993.
- 5) Morii, T., Hattori, K., Hasegawa, T. and Shimada, K. : Seepage, stress and stability of earth dams, Proceedings of the MWA International Conference on Dam Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, pp.341-348, 1995.
- 6) 森井俊広・服部九二雄・Hassan, A. K. : 豪雨時の盛土構造物の浸透, 応力および安定性, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, 第3部(A), pp.198-199, 1995.
- 7) 森井俊広・服部九二雄・安東登志広 : アースダムの水理学的・力学的安全性に及ぼす透水異方性の影響,

- 第50回農業土木学会中国四国支部講演会講演要旨, pp.39-41, 1995.
- 8) Shimada, K., Fujii, H., Nishimura, S. and Morii, T.: Stability analysis of unsaturated slopes considering changes of matric suction, Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils, Paris, France, Vol. 1, pp.293-299, 1995.
 - 9) Neuman, S. P. : Saturated-unsaturated seepage by finite elements, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99(HY12), pp.2233-2250 (1973)
 - 10) Kulhawy, F. H., Duncan, J. M. and Seed, H. B. : Finite element analyses of stresses and movements in embankments during construction, Report No. TE-69-4, University of California-Berkeley (1969)
 - 11) Neuman, S. P. : Galerkin approach to saturated-unsaturated flow in porous media, Chapter 10 in "Finite Element in Fluids-Volume 1 Viscous Flow and Hydrodynamics" ed. by Gallagher, R.H., Oden, J.T., Taylor, C. and Zienkiewicz O.C., John Wiley & Sons, pp.201-217, 1975.
 - 12) Vauclin, M., Khanji, D. and Vachaud, G. : Experimental and numerical study of a transient, two-dimensional unsaturated-saturated water table recharge problem, Water Resources Research, Vol.15(5), pp.1089-1101 (1979)
 - 13) Kulhawy, F. H. and Duncan, J.M. : Stresses and movements in Oroville Dam, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98(SM7), pp.653-665 (1972)
 - 14) 農林水産省構造改善局 : 土地改良事業計画設計基準 設計・ダム, pp.193-208, 1981.