

**空気～水～土骨格連成有限変形解析を用いた
不飽和浸透模型実験の数値シミュレーション**
(Numerical simulation of unsaturated seepage model tests by soil-water-air coupled
finite deformation analysis)

吉川高広¹，野田利弘²，小高猛司³，崔瑛³

1 名古屋大学大学院・工学研究科社会基盤工学専攻・yoshikawa.takahiro@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学・減災連携研究センター

3 名古屋大学・名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科

概 要

洪水による堤体の浸透すべり破壊を検討するにあたっては、未だに浸透解析と円弧すべり解析を組み合わせた古典的な手法が標準となっている。しかし、浸透も変形も同時に扱える手法でなければ、正確なメカニズムに基づいた河川堤防の浸透破壊を議論することはできない。そこで、飽和・不飽和状態にある土の浸透も変形も扱える空気～水～土骨格連成有限変形解析コードを用いて不飽和浸透模型実験のシミュレーションを行い、本解析コードが浸透破壊に適用可能かどうかを検証した。その結果、浸潤面が推移していく過程をよく再現でき、また実験と解析の両方で法尻付近の水圧が上昇し、有効応力の減少とせん断ひずみの増加が見られ、本解析コードの浸透破壊シミュレーションへの適用可能性が高いことを示した。

キーワード：浸透破壊，不飽和土，連成解析

1. はじめに

洪水による河川堤防の崩壊は、平成 12 年 9 月の東海豪雨時の新川決壊や平成 24 年 7 月の矢部川決壊など、日本全国で後を絶たない。洪水による堤体の浸透すべり破壊を検討するにあたっては、未だに浸透解析と円弧すべり解析を組み合わせた古典的な手法が標準となっている。しかし、浸透も変形も同時に扱える手法でなければ、正確なメカニズムに基づいた河川堤防の浸透破壊を議論することはできない。そこで、飽和・不飽和状態にある土の浸透も変形も扱える空気～水～土骨格連成有限変形解析コード¹⁾を用いて不飽和浸透模型実験のシミュレーションを行い、本解析コードが浸透破壊に適用可能かどうかを検証した。

2. 実験の概要と解析条件

実施した不飽和浸透模型実験に関して、図 1 と図 2 はそれぞれ基礎地盤のみの場合 (Case_1) と基礎地盤と堤体を構築した場合 (Case_2) の実験の初期状態の写真を示す。図 3 と図 4 はそれぞれ Case_1 と Case_2 に対応する解析断面であり、基礎地盤と堤体の寸法は図 3 と図 4 の中に示した。実験土槽の奥行き寸法は 12 cm である。土材料は三河珪砂 6 号を用いた。模型地盤の作成方法は、図 5 に

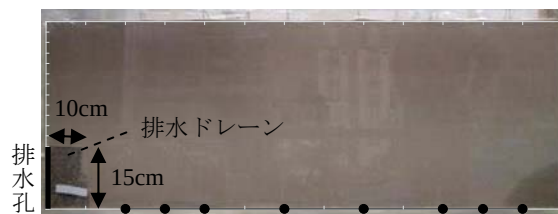


図 1 基礎地盤のみの実験の初期状態 (Case_1)



図 2 基礎地盤と堤体の実験の初期状態 (Case_2)

示すように仕切り板で区間を分けて、各区間に含水比 3.0 %，締固め後間隙比 1.0 (飽和度は 8.0 %) になるようにあらかじめ計算した量の土試料を投入して、静的に締固める。この工程を繰り返すことで所定の高さまで模型地盤を作成する。Case_2 の堤体部分は、矩形地盤の左上端を切土して作製した。基礎地盤および堤体作製終了後、土槽右端に設置した水槽に注水を行い、水頭 46cm でオーバーフ

ローしたら、仕切り板の孔を塞いでいた止水テープを剥がし、浸透を開始する。排水は、土槽の左下端に設けた排水孔により行うが、図 1 と図 2 の左下に示した位置に三河珪砂 3 号を用いた排水ドレーンも設け、よりスムーズな排水を図った。実験中は浸透過程での浸潤面の推移を画像撮影するほか、図 1 と図 2 の下端で示した点の位置で水圧の計測も行なった。

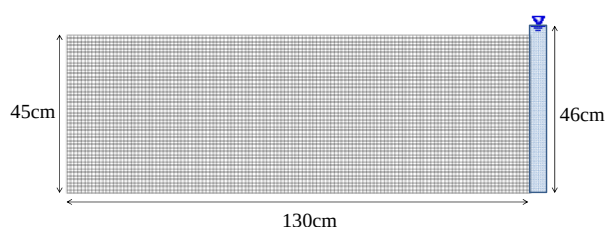


図 3 Case_1の解析断面

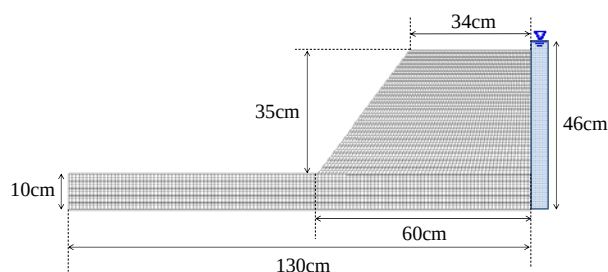


図 4 Case_2の解析断面

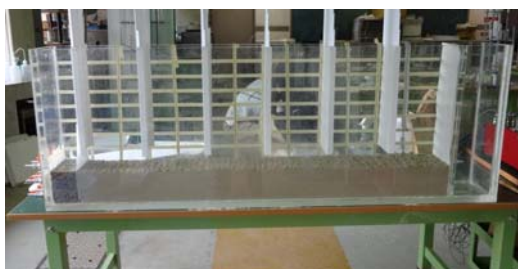


図 5 模型地盤の作成方法

次に、解析における境界条件について記述する。解析断面は先の図 3 と図 4 に示した通りである。下端の水平方向・鉛直方向および側面の水平方向に速度ゼロの幾何学的境界条件を設定し、その他は応力ゼロの力学的境界条件を設定した。水理境界条件は、右端は全水頭 46cm で一定の水頭境界とし、地表面・盛土表面および排水孔部分は浸出面境界（水圧＝大気圧＝0 と仮定した場合に、境界の外へ排水する場合は水圧＝0、それ以外の場合は非排水条件）とし、その他は全て非排水とした。空気の境界条件は、地表面は空気圧＝大気圧＝0 の排気境界とし、その他は全て非排気とした。

表 1 はシミュレーションに用いた土骨格の構成式 SYS Cam-clay model²⁾に関する材料定数と初期値を示す。材料定数は、Noda et al³⁾の三河珪砂 6 号の値を用い、初期値は、

表 1 土骨格の構成式に関する材料定数と初期値

			珪砂 6 号
弾塑性パラメータ	NCL の切片	N	1.98
	限界状態定数	M	1.0
	圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.05
	膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.012
	ポアソン比	ν	0.3
発展則パラメータ	正規圧密土化指数	m	0.06
	構造劣化指数	a	2.2
	構造劣化指数	c_s	1.0
	回転硬化指数	b_r	3.5
	回転硬化限界定数	m_b	0.7
初期値	構造の程度	$1/R_0^*$	4.0
	応力比	η_0	1.0
	間隙比	e_0	1.0
	異方性の程度	ζ_0	0.545
土粒子密度		ρ^s	2.65

表 2 水分特性および透水・透気に関する材料定数と初期値

		珪砂 6 号
最大飽和度 [%]	$s_{\max}^w$	100.0
最小飽和度 [%]	$s_{\min}^w$	0.0
van Genuchten 式のパラメータ [kPa ⁻¹]	α	0.28
van Genuchten 式のパラメータ	m'	0.92247
van Genuchten 式のパラメータ	n'	12.898
飽和透水係数 [m/sec]	k_s^w	1.61×10^{-4}
乾燥透気係数 [m/sec]	k_d^a	8.87×10^{-3}
初期飽和度 [%]	s_0^w	8.0

構造の程度・応力比・間隙比・異方性の程度を一定として、初期の過圧密比を未知数として計算した。初期の間隙比は実験に揃えて 1.0 とした。ただし簡単のため、珪砂 3 号による排水ドレーンの模擬は行なわなかった。

表 2 は、水分特性および透水・透気に関する材料定数と初期値を示す。最大飽和度と最小飽和度はそれぞれ、簡単のため 100% と 0% に設定した。van Genuchten 式⁴⁾のパラメータと飽和透水係数の値は、杉井ら⁵⁾の三河珪砂 6 号の値を用いた。ただし、 $m' = 1 - 1/n'$ の関係を用いた。乾燥透気係数は空気と水の粘性係数比を用いて飽和透水係数から算出した⁶⁾。不飽和透水係数と不飽和透気係数のモデルは Mualem モデル⁷⁾を用い、パラメータは、透水係数式・透気係数式共に 0.5 とした。水分特性に関する初期値は、解析断面全域において飽和度を 8% に設定し、初期間隙空気圧を 0kPa で与え、初期間隙水圧は初期飽和度 8% に相当するサクションから算出して与えた。

また、Case_2 の堤体部分に関しても上記のように初期値を計算するが、基礎地盤作成後に有限要素を結合して堤体

荷重を載荷する手法⁸⁾で、図 4 の断面を作成した。

3. 実験結果と解析結果

基礎地盤のみの Case_1 と基礎地盤と堤体を有する Case_2 に分けて実験結果と解析結果を示す。基礎地盤のみの Case_1 に関しては浸透過程のみに注目し、堤体を有する Case_2 に関しては変形に注目した比較・考察を行なう。実験結果の図中には、模型底部で計測された水圧を水頭換算した値をプロットし、その点をつないだ直線を併記していた。

3.1 Case_1 の実験結果と解析結果

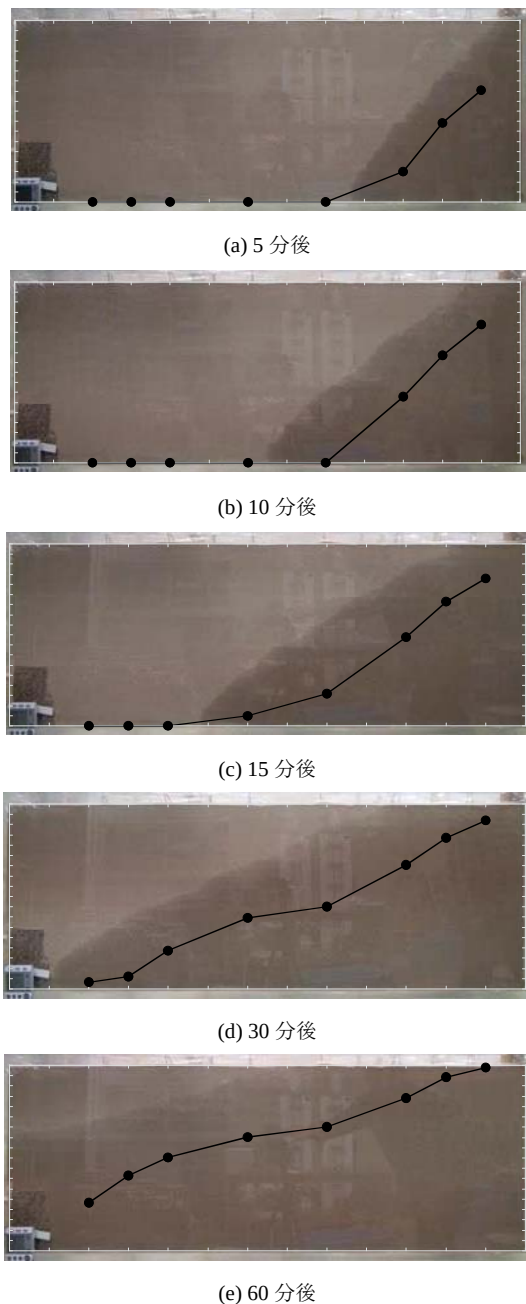


図 6 Case_1の実験結果

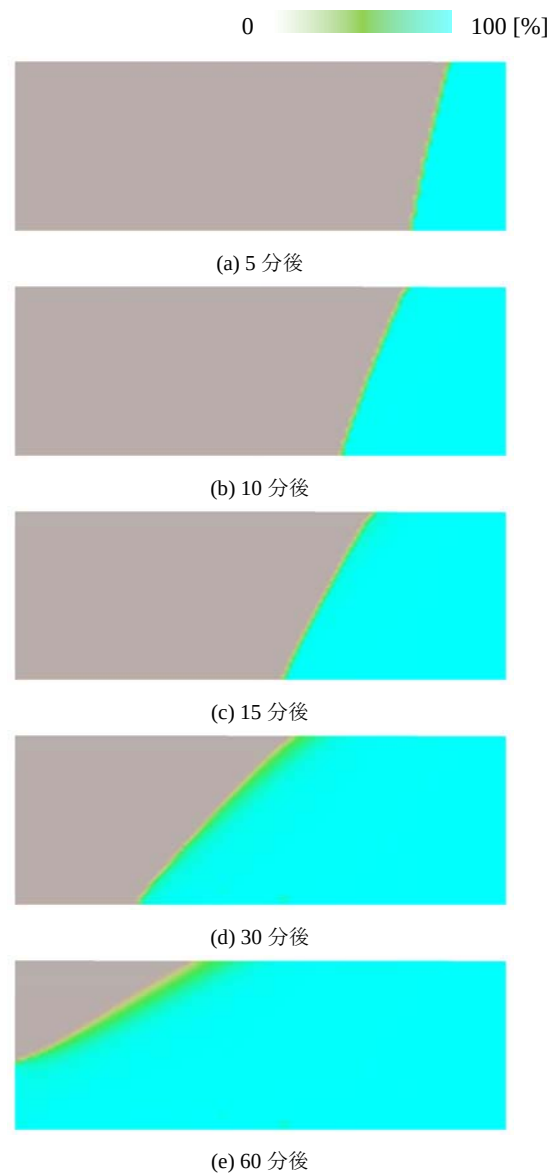
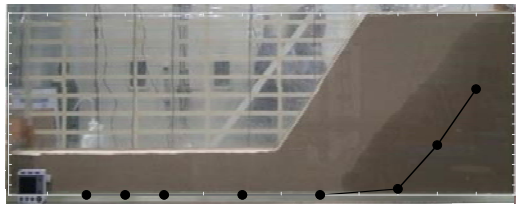


図 7 Case_1の解析結果（飽和度分布）

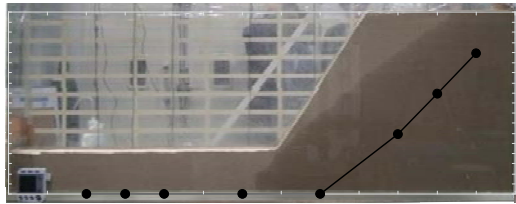
図 6 と図 7 はそれぞれ実験結果と解析結果の飽和度分布を示す。解析は、実験における地盤底部から順に浸透が進んでいく様子や同時刻における浸潤面の位置をよく再現できている。解析結果においても下から順に浸透が進んでいく理由は、初期状態が解析断面全域において飽和度一定（8%）、すなわち水圧が一定であり、右端の全水頭一定（46cm）境界との間の動水勾配が、底部に行くほど大きくなるためである。

3.2 Case_2 の実験結果と解析結果

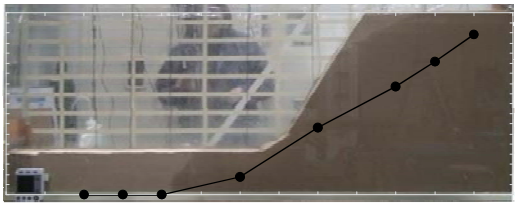
図 8 は実験結果を示し、図 9 から図 12 はそれぞれ、飽和度分布、せん断ひずみ分布、間隙水圧分布および平均有効応力分布の解析結果を示す。



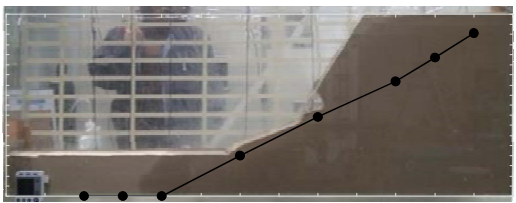
(a) 5 分後



(b) 10 分後

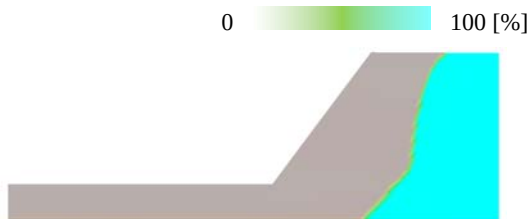


(c) 15 分後



(d) 17 分後

図 8 Case_2の実験結果



(a) 5 分後



(b) 10 分後



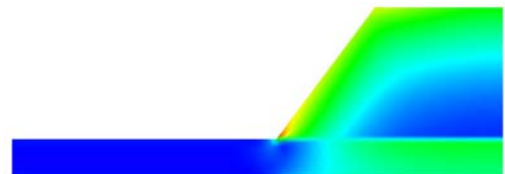
(c) 15 分後



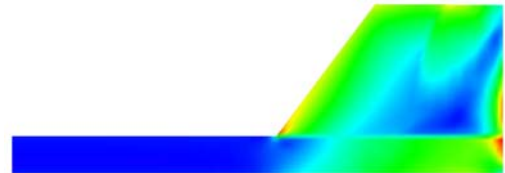
(d) 17 分後

図 9 Case_2の解析結果 (飽和度分布)

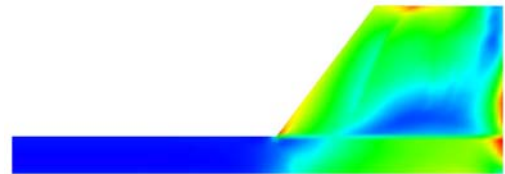
0 1 以上 [%]



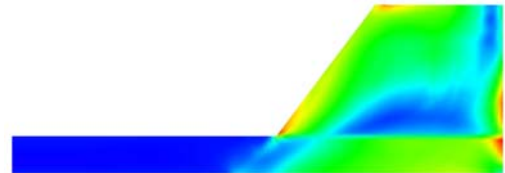
(浸透前)



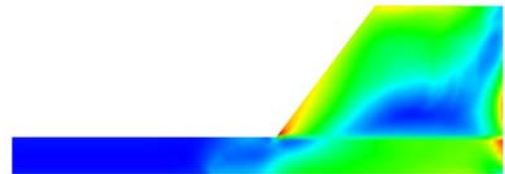
(a) 5 分後



(b) 10 分後



(c) 15 分後



(d) 17 分後

図 10 Case_2の解析結果 (せん断ひずみ分布)

-1 以下 1 以上 [kPa]



(a) 5 分後

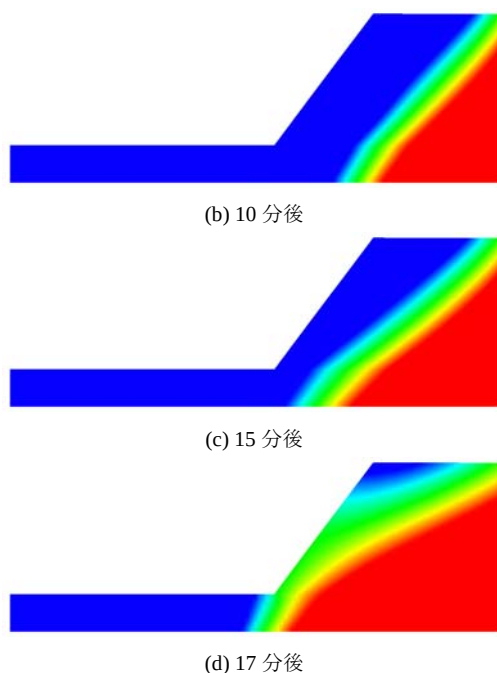


図 11 Case_2の解析結果（間隙水圧分布）

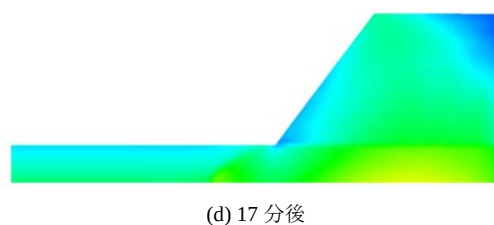
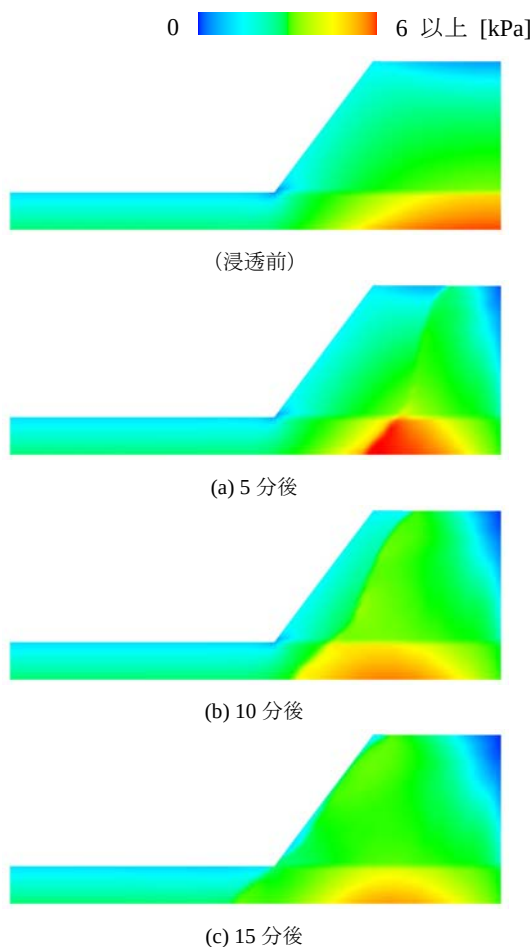


図 12 Case_2の解析結果（平均有効応力分布）

まず図 8 の実験結果を見ると、浸透開始 15 分後に法尻付近に変形が生じ始め、17 分後にはその変形がさらに大きくなる。このとき、水圧を水頭表示した直線がちょうど崩壊箇所と重なっていることから、飽和化した法面から順次崩壊が始まったと考えられる。

次に解析結果を見ると、図 9 の飽和度分布は、Case_1 と同様に実験の浸透過程をよく再現できている。図 10 のせん断ひずみ分布は、浸透開始前の堤体築堤段階で既に、法尻付近のせん断ひずみが卓越しているが、浸透開始 15 ～17 分後には、その箇所のせん断ひずみが若干増加し、またせん断ひずみが卓越している範囲も広がっている。このとき、図 11 の間隙水圧分布と図 12 の平均有効応力分布を見ると、法尻付近の水圧が上昇し、平均有効応力が低下している様子を確認できる。

実験では浸透開始 17 分経過時以降も、さらに大きな変形を生じて破壊に至ったが、本解析ではそのような様子までも対象とした表現は難しい。しかし、浸潤面が推移していく過程をよく再現でき、実験と解析の両方で、法尻付近の水圧が上昇し、有効応力の減少とせん断ひずみの増加が見られたことは、本解析コードが浸透破壊シミュレーションへの適用可能性が高いことを示している。

4. おわりに

空気～水～土骨格連成有限変形解析コードを用いて、不飽和浸透模型実験のシミュレーションを行なった結果、浸潤面が推移していく過程をよく再現でき、また実験と解析の両方で法尻付近の水圧が上昇し、有効応力の減少とせん断ひずみの増加が見られ、本解析コードの浸透破壊シミュレーションへの適用可能性が高いことを示した。今後は、土骨格の構成式にサクシンの効果を導入するなど、より詳細なモデルを搭載した解析コードを用いて浸透破壊に取り組んでいく。また、本手法は空気の流れも考慮できる三相系解析手法であるため、実構造物解析を行うに当たって、空気が地盤の外に排出できない場合の影響も考えていく。また運動方程式を解いているため、地震と降雨の複合外力に対する土構造物の安定性評価も行なっていく。

謝辞

JSPS 科研費 21226012, 25249064 と国土交通省 H25 年度河川砂防技術研究開発の助成を受けた。謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Noda, T. and Yoshikawa, T.: Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, to be submitted.
- 2) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57, 2002.
- 3) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 48(6), 771-790, 2008.
- 4) van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898, 1980.
- 5) 杉井俊夫・山田公夫・奥村恭：高飽和時における砂の不飽和透水係数に関する考察，平成13年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，267-268，2002.
- 6) Muskat, M: The flow of homogeneous fluid through porous media, Mcgraw-Hill, 69-74, 1937.
- 7) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12, 513-522, 1976.
- 8) Takaine, T., Tashiro, M., Shiina, T., Noda, T. and Asaoka, A.: Predictive simulation of deformation and failure of peat-calcareous soil layered ground due to multistage test embankment loading, *Soils and Foundations*, 50(2),245-260, 2010.