

洪水時の遊水地の貯水に関する2次元土層槽実験を用いた

大気-表面水-地下水連成数値解析手法の検証

Verification of a Numerical Simulation Model coupled with Atmosphere, Surface water and Ground water by using two-dimensional tank experiment

石川雄大¹, 平嶋智希², 日比義彦³, 守村融⁴

1 名城大学大学院理工学研究科 193434001@ccmailg.meijo-u.ac.jp

2 名城大学大学院理工学研究科

3 名城大学理工学部

4 八千代エンジニアリング株式会社

概要

多くの河川では、洪水時に遊水地または調整池により河川の流量調整を行い、洪水時の河川堤体の破堤を防いでいる。そこで、以前著者である日比と守村らは、遊水地または調整池に隣接する河川堤防を想定し、河川水位が越水する前までにどの程度遊水地または調整池に水がたまるか検討した。しかし、その結果の精度と妥当性について検討は十分に行われていなかった。そこで、本研究では2次元水槽内に6号砂で堤体を作成し、堤体の一方に水を貯め、反対側にどの程度水が貯留されるか実験を行った。さらに、この結果を日比と守村らが用いた大気-表面水-地下水連成数値解析手法を用いて前記の実験を再現し、解析の精度と妥当性を検証した。その結果、地盤浸透後の表面水の貯留問題に大気-表面水-地下水連成数値解析手法のような数値解析を適用する際の問題点も明確になった。

キーワード：混相流 調整池 飽和度型支配方程式 地下水浸透 表面水

1. はじめに

現在の地球では地球温暖化の影響により、様々な気候の変化が見られる。その一つに豪雨の増加が挙げられる¹⁾。豪雨の増加に伴い、河川堤防の決壊による浸水被害が発生している。降雨により、河川堤防の浸潤面と飽和度は上昇し、堤体の崩壊や、堤体法面の滑り破壊が生じる。したがって堤体内の飽和度の変化を確認することは重要となる²⁾。また近年では「平成30年7月豪雨」が発生し、中国地方を中心に多くの河川堤防が決壊、広範囲に浸水被害をもたらした。このことから、河川堤防は洪水などの自然災害による被害を軽減する大きな役割を担っている。

これまでに著者の日比と守村ら³⁾は洪水時における越流前の遊水地内の水位上昇を飽和度の変化を把握できる大気-表面水-地下水連成数値解析手法(ASG法)⁴⁾⁵⁾を用いて再現してきた。その結果、ASG法を用いて洪水時における越流前の遊水地内の水位上昇を再現できることが分かった。しかし、このケースについてASG法の解析精度の検証が行われていない。そこで本研究では、2次元水槽内に6号砂を用いて堤防を構築し、堤体の一方に水を貯め、反対側にどの程度水が貯留されるか実験を行った。さらに、この結果をASG法を用いて再現し、実験結果と解析結果を比較することにより解析の精度と妥当性を検証した。またASG法における解析モデルのメッシュ細分化による解析結果への影響についても検証を行った。

2. 実験方法

本研究で用いた2次元水槽の概要を図1に示す。

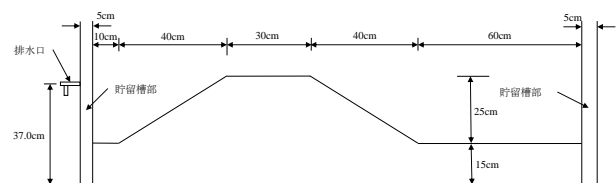


図1 実験装置

2次元水槽は高さ60.0cm、幅190.0cm、奥行13.5cmであり、水槽両端から5cmの箇所に土試料を投入するための土槽部と水を貯留するための貯留槽を区切るためのステンレス製の網を設けた。水槽の左側貯留槽の水槽底から37.0cmの高さの箇所に排水口を設けることにより、左側貯留槽の水位を37.0cmで一定となるようにした。堤防の構築では水槽底に15.0cmの厚さで6号砂(密度2.65g/cm³、粒径0.1mm-0.4mm)を敷いた上に、高さ25.0cm、天端幅30.0cm、基礎幅110.0cmの堤体を図1のように6号砂で構築した。この際に堤体の左側法尻は左側貯留槽のステンレス製の網から10.0cm離れた位置とした。6号砂を詰める際には、6号砂と、6号砂の乾燥質量の6%の水を均等に混合し、2.5kgランマーを用いて水を均等に混ぜた6号砂を間隙率がn=0.5となるように層厚5.0cm毎に8層に分けて

水槽内に詰めた。今回の実験では6号砂の乾燥質量の6%の水を6号砂に混ぜたが、この水の質量は、目視で堤防内において浸潤面の動態が把握できることを確認したうえで決定した。最終的に6号砂で作成した堤防の全体の間隙率は0.498となった。

実験開始と同時に左側貯留槽上部からホースを貯留槽内に挿入して水を注入した。水の注入する際には、実験開始から2分後に左側貯留槽の水位が37.0cmで一定となるようにした。実験開始後、左右貯留槽の水位と堤防内の浸潤の様子をビデオカメラ(株式会社 JVC ケンウッド製 Everio ハイビジョンメモリームービー)で記録した。

3. 解析方法

本研究の解析は、ASG法を用いる。ASG法は流体を非圧縮性として扱い、土試料も圧縮及び変形しないものとして誘導された数値解析手法である。

ASG法では、Navier-Stokesの式と質量保存の法則にCIP法を用いたセミ・ラグランジュ法と後退差分法を適用した以下の式(1)と(2)を地表水及び大気の流れとして適用した。

$$(\Delta t / \rho) \nabla \cdot (\nabla p_{t+\Delta t} + \rho g) = \nabla \cdot V^* \quad (1)$$

$$V_{t+\Delta t} - (\mu / \rho) \Delta t \nabla^2 V_{t+\Delta t} = V^* - (\Delta t / \rho) (\nabla p_{t+\Delta t} + \rho g) \quad (2)$$

ここで t は時間、 Δt は時間増分、 ρ と μ は流体の密度の粘性係数、 \mathbf{V} と \mathbf{p} はそれぞれの流体の流速ベクトルと圧力、 \mathbf{g} は鉛直上向き正とした場合の重力加速度ベクトルである。 V^* は位置ベクトル $R_i - V_t \Delta t$ の位置の流速であり、 R_i は節点 i の位置ベクトルである。

土試料中の流れに関してグローバル圧力 P を以下の式(3)のようにガス圧 P_g と水圧 P_w を用いて定義する。

$$\nabla P = f_w \nabla p_w + f_g \nabla p_g \quad (3)$$

ここで、 K_{rw} と K_{rg} をそれぞれ固有透過度に対する水相の相対透過度とガス相の相対透過度、 μ_w と μ_g をそれぞれ水とガス粘性係数とし、 $\lambda_w = K_{rw} / \mu_w$ 、 $\lambda_g = K_{rg} / \mu_g$ 、 $\lambda = f_w + f_g$ とすると f_w と f_g は以下の式(4)のように定義される。

$$f_w = \lambda_w / \lambda \quad (4a)$$

$$f_g = \lambda_g / \lambda \quad (4b)$$

土試料中の水とガスの流れの支配方程式は、Darcyの法則と質量保存則を用いて以下の式(5)のように表す。

$$\partial \phi / \partial t = \nabla \cdot \lambda k_s [\nabla P + (f_w \rho_w + f_g \rho_g) g \nabla z] \quad (5)$$

ここで k_s は試料の固有透過度、 z は鉛直上向き正とした場合の座標、 ϕ は間隙率、 ρ_w と ρ_g は水とガスの密度である。

土試料中の水とガスを含む全流速 V_t はグローバル圧力を用いて以下の式(6)のように表す。

$$V_t = -\lambda k_s [\nabla P + (f_w \rho_w + f_g \rho_g) g \nabla z] \quad (6)$$

土試料中の水の飽和度 S_w は、式(5)と式(6)から導かれた以下の式(7)より求める。

$$\partial S_w / \partial t + V_{soil} \cdot \nabla S_w = \nabla \cdot (D_{soil} \nabla S_w) \quad (7)$$

ここで V_{soil} と D_{soil} は以下のように定義される。

$$V_{soil} = -[V_t (df_g / dS_w) - k_s (\rho_g - \rho_w) g (d\lambda / dS_w)] / \Phi \quad (8a)$$

$$D_{soil} = [-\kappa k_s (dp_{cgw} / dS_w)] / \Phi \quad (8b)$$

$$\kappa = K_{rg} K_{rw} / (\mu_g K_{rw} + \mu_w K_{rg}) \quad (8c)$$

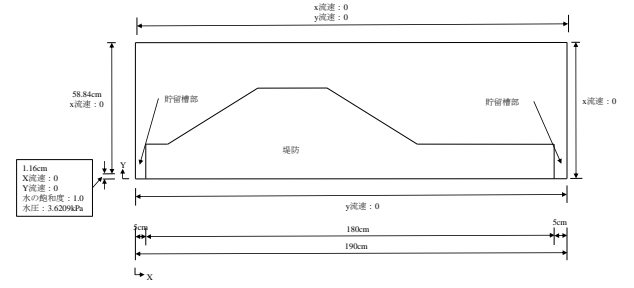


図2 解析モデルと境界条件

4. 解析条件

本解析では図1に示した実験装置を図2に示すようにモデル化した。

本研究で使用する解析モデルは、水槽実験と同じように左右の境界から幅5.0cmの部分貯留槽としたが、解析モデルにおいて水槽に設置したステンレス製の網は存在しない状態である。これはステンレス製の網をモデル化出来ないためである。境界条件について、水槽の下端は鉛直方向の流速を0とした。水槽の上端においては鉛直方向の流速、水平方向の流速共に0とした。水槽右側の境界では水平方向の流速を0とした。水槽左側の境界では水槽底から1.16cmまでは水の注入口とし、解析開始2分後に左側貯留槽の水深が37.0cmとなるように水圧を経時変化させた。実験では貯留槽上からホースを貯留槽内に挿入して、水を注入したが、解析モデルを簡単にするために解析では、実験で水を注入したホースの内径相当の水槽底からの高さの範囲から水を注入した。初期状態では水位以下では静水圧とし、水位以上では水槽の上端(高さ60.0cm)でガス圧が0となるように静圧のガス圧とした。また、水槽底から1.16cmの範囲では水の飽和度を1.0とし、水平方向と鉛直方向の流速を0とした。水槽左側境界の高さ1.16cmより高い位置の境界については水平方向の流速を0とした。

本研究では解析モデルのメッシュ分割の細分化による解析結果への影響を検証するために、図2で示したモデルを5種類に分割を行った。1種類目(以下、mesh1)では節点数14516、要素14330で分割した。mesh1を図3として示す。このメッシュは四角形と三角形の要素で構成されている。三角形は堤体斜面で用いられた。なお、ほかのメッシュ分割の法面についても同じように分割されている。

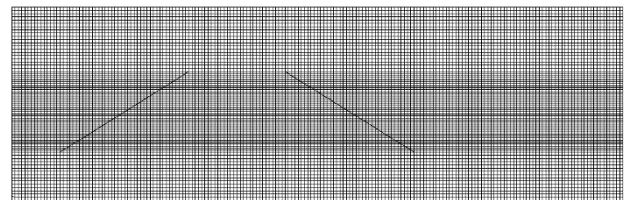


図3 要素分割(mesh1)

2種類目(以下、mesh2)では節点数54209、要素53900で分割した。mesh2はmesh1に比べ、解析モデル全体のメッシュ分割を細かくした。

3種類目(以下、mesh3)では節点数 93313、要素 92920 で分割し、mesh3 は mesh2 に比べ、堤防右側法面におけるメッシュ分割をより細かくした。

4種類目(以下、mesh4)の節点数と要素数は mesh3 と同じであるが、飽和度の解析において図 4 に示すように堤体法面上の三角形要素を 1 つに結合した。このことにより三角形では適用できなかった CIP を適用可能とした。さらに堤体法面上の地表水の厚さを薄くする効果も期待した。

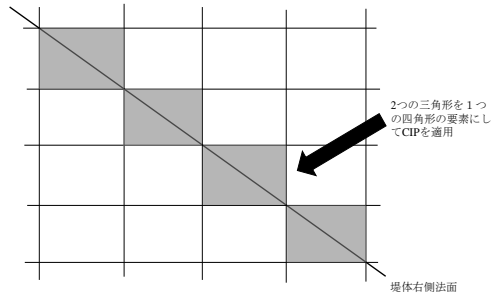


図4 mesh4における三角形要素の結合

5種類目(以下、mesh5)の節点数 158159、要素 158159 とし、mesh4 に比べ、右側法面におけるメッシュ分割をより細かくした。また、mesh4 と同様に飽和度の解析を行う際に、右側法面の三角形の要素を結合して四角形の要素とすることにより CIP を適用可能とした。

解析ではカラム試験を用いた透水試験により求められた 6号砂の固有透過度 $2.407 \times 10^{-11} \text{m}^2$ を使用した。また、間隙率は前記した 0.498 を解析に使用した。水の密度は 0.9986g/cm^3 、粘性係数は $1.056 \times 10^{-6} \text{kPa} \cdot \text{s}$ 、ガスの密度は $1.20 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ 、粘性係数は $1.80 \times 10^{-8} \text{kPa} \cdot \text{s}$ とした。水とガスの密度と粘性係数は、実験中に注入する水温と室内の気温を測定し、平均水温と気温を算出し、その気温と水温の密度と粘性係数とした。図 5 に示す別の研究でカラム試験により得られた 6号砂の水分特性曲線を本研究では用いた。

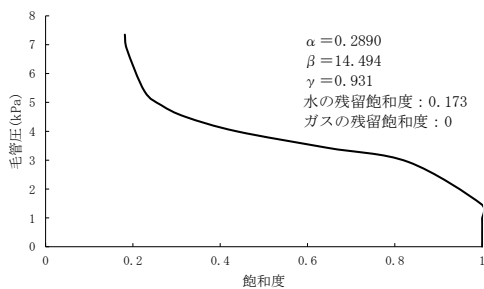


図5 6号砂の水分特性曲線

図 8 の水分特性曲線は以下の式(1)の van Genuchten の式⁶⁾ に実験結果を最適化して van Genuchten パラメータの α 、 β を求めた。なお、 γ は $\gamma=1-1/\beta$ より求められる。

$$S_e = \frac{S_w - S_{rw}}{1 - S_{rw} - S_{rg}} = (1 + |\alpha P_c|^\beta)^{-\gamma} \quad (9)$$

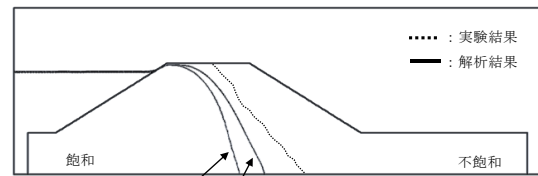
ここで、 P_c は水とガスの毛管圧、 S_e は有効飽和度、 S_w は水の飽和度、 S_{rw} は水の残留飽和度、 S_{rg} はガスの残留飽和度となる。

5. 結果

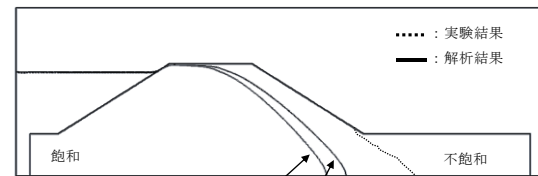
本研究では前記した 5 種類のメッシュのうち、mesh1、2 については解析の時間間隔を 0.01 秒、0.0005 秒、0.0025 秒の 3 種類に設定し、また mesh3、4 と 5 では時間間隔 0.0025 秒で解析を行った。

5.1 時間間隔 0.01 秒

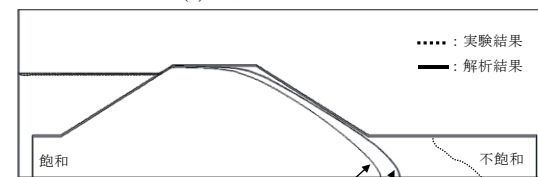
解析の時間間隔を 0.01 秒の場合の経過時間 500 秒毎の解析結果と実験結果の比較図を図 6 に示す。図中の破線は実験より得られた浸潤面または表面水の位置であり、堤体内の実線は解析により得られた飽和度 0.5 の等値線を示し、堤体外は表面水の水位を表す。



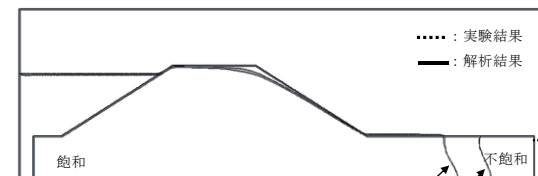
(a) 経過時間500秒



(b) 経過時間1000秒



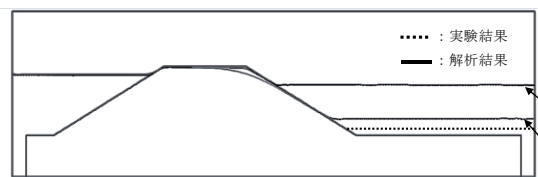
(c) 経過時間1500秒



(d) 経過時間2000秒



(e) 経過時間2500秒



(f) 経過時間3000秒

図6 時間間隔0.01秒における実験結果と解析結果の比較

図6より解析結果と実験結果を比較すると、実験結果より得られた堤体内の浸潤面は解析結果の飽和度0.5の等値線より右側貯留槽への進行が早いことが確認できる。中でも、mesh1とmesh2の飽和度0.5の等値線の右側貯留槽への進行の様子を比較すると、mesh2の飽和度0.5の等値線はmesh1より実験結果の浸潤面に近いことからmesh2はmesh1より再現性が若干良いといえる。実験で右側貯留槽への水の湧出が始まった時間は実験開始から約2100秒となった。これに対して、解析における水の湧出はmesh1では2900秒、mesh2では2600秒となった。その後の右側貯留槽の水位上昇を見ると、経過時間3000秒では両解析結果ともに実験結果より早く水位上昇が生じた。解析のこの現象の原因は、メッシュ分割が不十分であるために、経過時間2000以降で堤体右側法面上に厚く地表水が形成されたためである。この地表水により、堤防右側の水位上昇が早く生じた。実験では実験開始1740秒に生じた堤体の崩壊の影響でこのような現象が生じていなかった。

5.2 時間間隔 0.005 秒

解析の時間間隔を0.005秒とした場合の経過時間500秒毎の解析結果と実験結果の比較を図7と図8に示す。

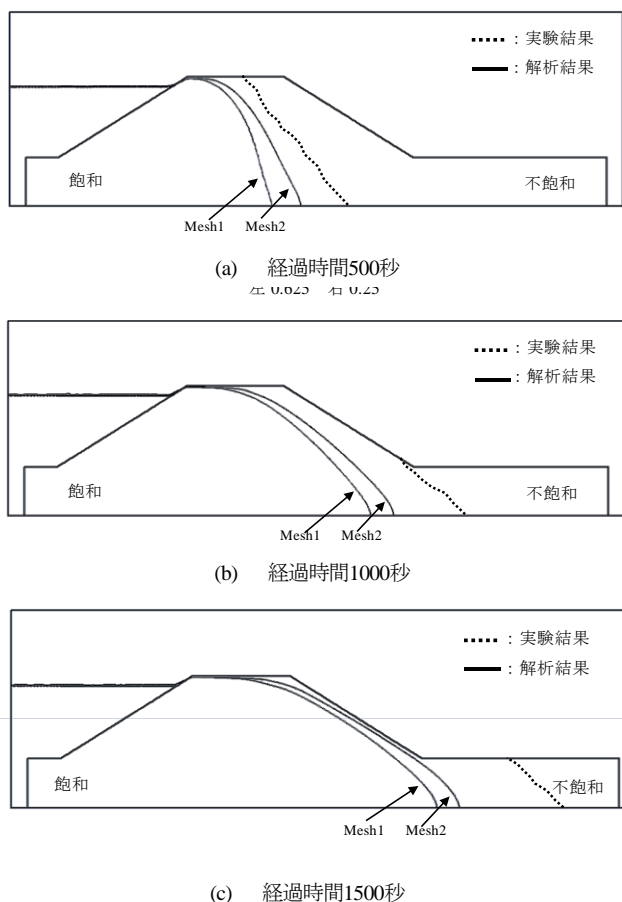


図7 時間間隔0.005秒における実験結果と解析結果の比較(その1)

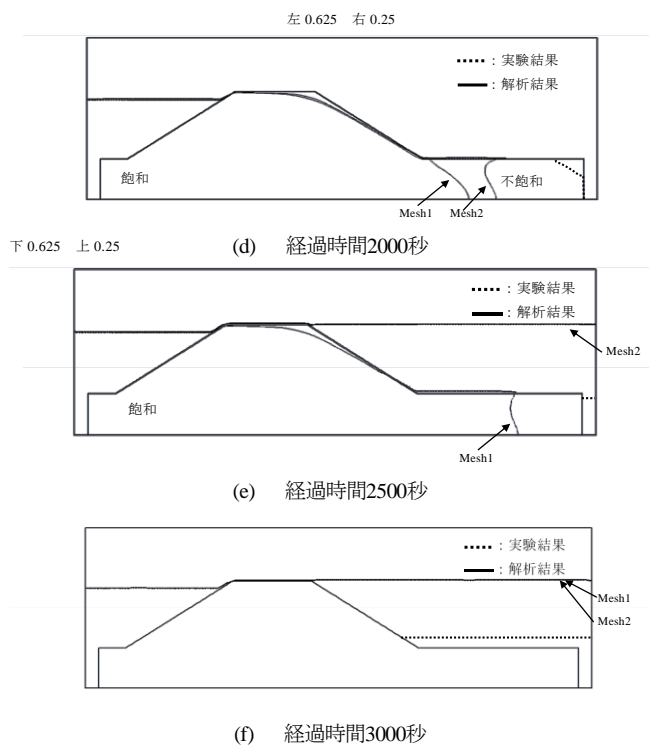


図8 時間間隔0.005秒における実験結果と解析結果の比較(その2)

図7と8より解析結果と実験結果を比較すると、時間間隔0.01秒と同様に、堤体内の実験結果の浸潤面は解析結果の飽和度0.5の等値線より右側貯留槽への進行が早い傾向にあることがわかる。またmesh1とmesh2の飽和度0.5の等値線の右側貯留槽への進行の様子を比較すると、mesh2の飽和度0.5の等値線はmesh1より実験結果の浸潤面に近いことからmesh2の方がmesh1より再現性が若干良いことがわかる。実験で右側貯留槽への水の湧出が始まった時間は実験開始から約2200秒に対し、mesh1では2900秒、mesh2では2600秒となった。右側貯留槽の水位上昇についても時間間隔0.01秒と同様に、解析において堤体右側法面上の地表水が生じたために実験結果を再現出来なかった。

5.3 時間間隔 0.0025 秒

解析の時間間隔を0.0025秒の場合の経過時間500秒毎の解析結果と実験結果の比較を図9と図10に示す。

図9と図10によると、mesh1とmesh2では経過時間1000秒の段階で堤体天端上に地表水が形成され、その地表水が堤体右側法面へと浸透することが確認できた。その他のメッシュについてはそのような現象は確認できなかった。mesh1とmesh2の場合の右側貯留槽の水位上昇は、経過時間2000秒で、右側貯留槽の水位は天端付近まで上昇した。mesh1とmesh2の右側貯留槽への水の湧出開始は経過時間1200秒であった。mesh3、mesh4とmesh5では堤防内の水の浸透は経過時間500、1000秒まではほぼ同様であった。経過時間1500秒のmesh5で

は mesh3 と mesh4 と比べやや浸透が速かった。経過時間 2000 秒では mesh3 と mesh4 における水の浸透の様子に差異が生じた。mesh3 の浸透が mesh4 と比べ速くなったことから、堤防右側法面の表面では堤体法面付近の三角形の要素を統合した結果、地表水の厚さが薄くなり堤防右側法面より湧出する水が減少することが分かった。mesh4 と mesh5 では同じように三角形の要素を統合しているが、堤防右側法面において分割数が異なっている。この 2 種のメッシュの飽和度 0.5 の等値線と実験の浸潤面を比較すると、分割数の細かい mesh5 は mesh3 と比べ実験結果に近く再現性が良いことが確認できる。右側貯留槽への水の湧出は mesh3 では経過時間 2200 秒、mesh4 では経過時間 2400 秒、mesh5 では経過時間 2000 秒であった。

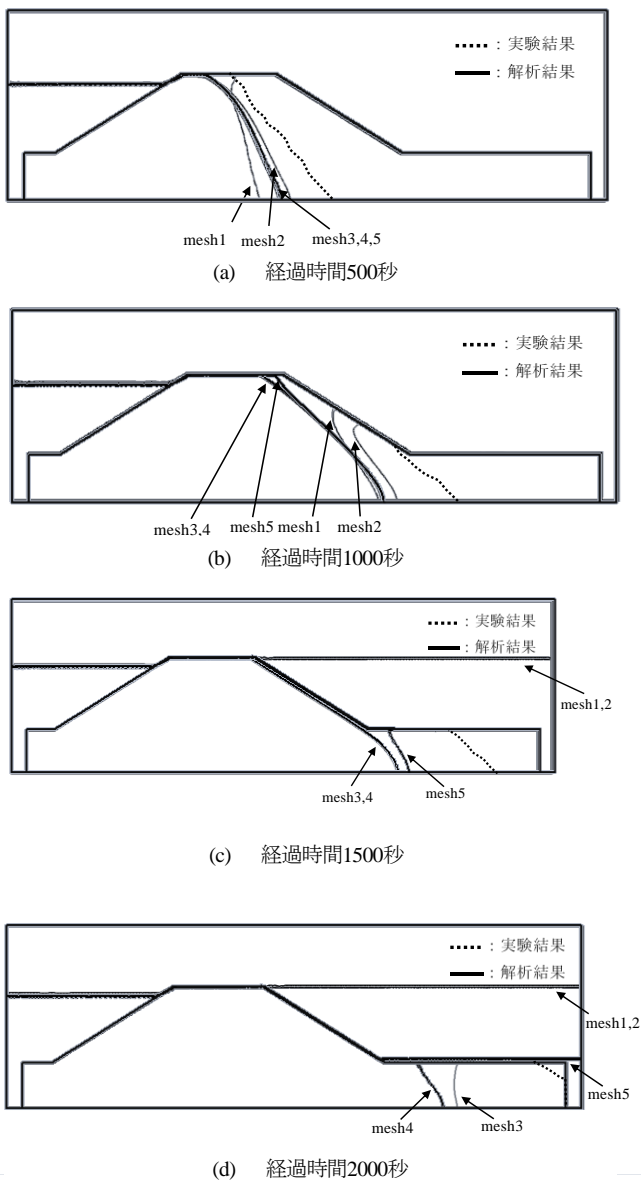


図9 時間間隔0.0025秒における実験結果と解析結果の比較(その1)

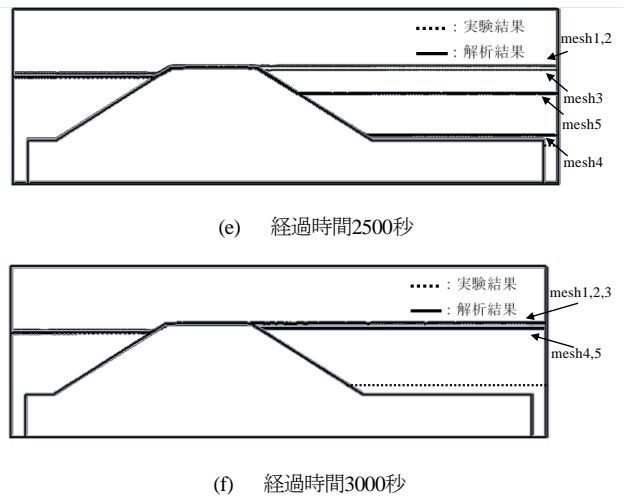


図10 時間間隔0.0025秒における実験結果と解析結果の比較(その2)

6. 考察

本研究では、堤防内における解析結果より得られた飽和度 0.5 の等値線と実験結果より得られた浸潤面では差異が生じた。これについては、解析データに使用した 6 号砂の水分特性曲線はカラム試験より得られたものであり、本研究における実験で土試料の乾燥質量の 6% の水の混合時の飽和度からスタートすることが考慮されていない。また、カラム実験における土試料の間隙率は 0.38 であるが、今回の実験では 0.498 であり、カラム実験の透過度より、今回の実験の透過度が大きいと推察される。このようなことから解析結果と実験結果の両者に前記のような差異が生じたと推察される。これを受けて、より正確な解析結果を得るためには、本研究に用いた 2 次元水槽を用いて透水試験と吸排水試験を行い、透過度と水分特性曲線を求め、これらを用いて解析を行う必要がある。解析では、水の浸透が堤防右側法面に到達した際に、堤防右側法面上に地表水が形成された。その際にメッシュ分割が不十分であると法面上の地表水が厚く形成され、この地表水が右側法面上を降下した。その結果、解析右側貯留槽への貯留が早く始まったと推察される。堤体右側法面における地表水は mesh4 と mesh5 のようにメッシュ分割を細かくすることと、mesh4 と 5 のように三角形の要素を統合することが有効であることが分かった。メッシュ分割を限りなく細かくすれば、この堤体右側法面上の地表水をさらに薄くでき、実験結果に近づけることが出来るが、それには限界がある。今後、この堤防右側法面上の地表水を取り扱いが出来るモデル開発をする必要がある。

7. まとめ

本研究では大気-表面水-地下水連成数値解析手法 (ASG 法) を用いた解析と 2 次元水槽を用いた実験結果を比較することにより、ASG 法の再現の精度の検証を行った。その結果、堤防内の浸透の様子については、メッシュを細かくするにつれて浸透の様子の再現性は良

くなることが確認された。しかし、より正確な再現を行うには 2 次元水槽に 6 号砂を詰めた状態での透水試験と吸排水試験を行い、透過度と水分特性曲線を求める必要がある。今回の解析では堤体右側の法面上に地表水が形成され、メッシュを細かくすることにより、この地表水は薄くなった。堤防右側の水位上昇はこの地表水の影響を受け、実験結果より早く水位上昇した。今後は解析で堤体右側法面上に生じた地表水をどのようにモデル化するかの検討が必要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 末次忠司：水害から治水を考える、技法堂出版、2016、pp137-151
- 2) 藤野陽三、曾我健一：地盤工学におけるリスク共生、鹿島出版会、2016、pp13-17
- 3) 日比義彦、守村融、保坂幸一、富樫聡：ASG 法を用いた遊水地内の水位上昇のシミュレーション、日本地下水学会 2018 年春季講演会講演予稿、pp2-5
- 4) 日比義彦、富樫聡：多孔質体内の流れの飽和度型支配方程式を用いた堤体の越流数値解析、Japanese J. Multiphase Flow Vol. 29 No.4、pp326-334、2015
- 5) 日比義彦、富樫聡：複雑な形状の堤体の越流問題への大気-表面水-多孔質体連成数値解析手法の適用性の検討、混相流 31 巻 1 号、pp29-36、2017
- 6) van Genuchten, M.T., A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil science Society of American Journal, Vol. 44, 892-898