

### 03. 大気-表流水-地下水連成数値解析の事例

○日比義彦（名城大学） 富樫聡（八千代エンジニアリング）  
柏原あゆみ（名城大学・院）

#### 1. はじめに

地表水と地下水の連成数値解析は、降雨を考慮した地下水解析または地下水流出を考慮した河川のハイドログラフの解析に用いられている。これまでの既存の地表水と地下水の連成数値解析には、浅水流方程式または開水路の運動方程式に拡散波近似<sup>1)</sup>が用いられてきた。一方、河川または海岸堤防などの越流問題では、VOF などを用いた気液 2 相流解析が、堤体などを越流する表流水の流れに適用されてきた。また、最近では、Darcy-Brinkman モデルによって地下水の流れをモデル化し、VOF などを用いた気液 2 相流解析に地下水の流れを統合する大気-表流水-地下水連成解析手法も提案<sup>2)</sup>されている。しかし、Darcy-Brinkman モデルでは不飽和特性を考慮することができない。そこで、本論文の大気-表流水-地下水連成解析手法では、不飽和特性を考慮することができ、かつ、気液 2 相流解析に統合が可能な地下水の流れの支配方程式として、未知変数が飽和度となる飽和度型支配方程式を採用した。今回、提案する大気-表流水-地下水連成解析手法(ASG 法)の解析精度と解析事例を以下に示す。

#### 2. 大気-表流水-地下水連成解析手法の検証

ASG 法を検証するために、図-1 に示すような簡単なカラム実験を行った。今回の実験では、内径 50mm、外径 70mm、長さ 945mm のアクリル製のカラムにカラム下端より 40mm から 440mm まで豊浦砂(土粒子の密度 2.65 g/cm<sup>3</sup>、粒径 0.08~2.0 mm)を詰め、初期水位はカラム下端より 69.0cm とし、豊浦砂内を水で飽和した。実験開始と同時に排出口よりカラム内の水を排出し、カラム内の水位低下をデジタルカメラ(Cannon IXY 600F)で測定した。地盤表面に水位が到達した後は、カラム下端より 240mm と 390mm に設置した土壌水分計（アネックス株式会社 EC5 測定範囲 0~100% 精度 0.1% アネックス株式会社 データログ Em5b）により豊浦砂中の体積含水率を測定した。なお、今回の実験で詰めた豊浦砂の間隙率は 0.402、固有透過度は  $1.737 \times 10^{-11} \text{m}^2$  となった。また、van Genuchten パラメータは、 $\alpha=0.231 \text{kPa}^{-1}$  と  $\beta=9.154$ 、残留飽和度は 0.187 となった。

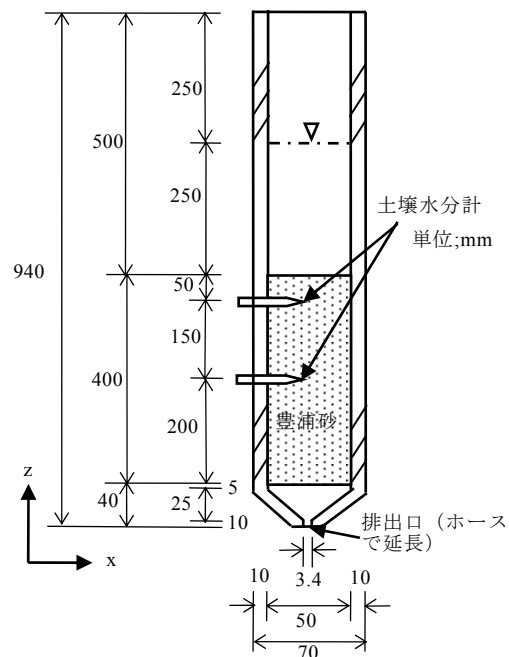


図-1 実験装置の概略図

上記のカラム実験について、図-2 に示すように軸対称座標で解析を行った。また、今回の解析で用いた境界条件と初期条件も図-2 に示すが、領域の上端のグローバル圧力を  $p=0(\text{kPa})$  とし、下端で  $p=-1.617(\text{kPa})$  とした。上端と下端ともに  $x$  方向の流速のみ 0 とした。また、解析領域の左側と右側の  $z=4.0\text{cm}$  以上の境界の  $x$  方向の流速を 0 と設定した。さらに、右側の  $z=4.0\text{cm}$  以下の境界の  $x$  方向と  $z$  方向の流速ともに 0 とした。 $P$  の初期値は自由水面が  $z=69.0\text{cm}$  となるように静圧または静水圧とした。水の飽和度および密度関数は、初期自由水面  $z=69.0\text{cm}$  より上側を 0、下側を 1 とした。また、 $x$  方向および  $z$  方向

の流速の初期値はともに 0 とした。解析に用いた水の密度と粘性係数は、それぞれ  $0.998\text{g/cm}^3$  と  $9.324 \times 10^{-4}\text{Pa} \cdot \text{s}$  を、ガスの密度と粘性係数は、それぞれ  $0.0012\text{g/cm}^3$  と  $1.80 \times 10^{-5}\text{Pa} \cdot \text{s}$  を用いた。

カラム下端より 44.0cm 以上の地表水部分の自由水面の低下の経時変化を図-3 に示す。図-3 から分かるように、ASG 法による解析結果の水位低下は、実験結果の水位低下とほぼ一致した。また、実験後半では表流水が消失し、地盤中のみ水分がある状態となった。この時間の地盤中の水の飽和度の実験結果と解析結果を図-4 に示す。また、図-4 には、修正 Picard 法による圧力型支配方程式(MP 法)を用いた解析結果も示す。図-4 によると、カラム下端から 39.0cm の位置では、ASG 法の解析結果と MP 法の解析結果の水の飽和度は、実験結果の水の飽和度と一致していることが分かる。一方、カラム下端より 24.0cm の位置では、定常状態における ASG 法の解析結果または MP 法の解析結果の水の飽和度と実験結果の水の飽和度の差は 0.03 のみである。このことから、カラム下端より 24.0cm の位置の ASG 法と MP 法の解析結果の定常状態の水の飽和度と実験結果の定常状態の水の飽和度はほぼ一致したといえる。しかし、カラム下端より 24.0cm の位置では、解析結果の水の飽和度の低下開始時間は実験結果の低下開始時間でより 9 分程度早くなった。ただし、ASG 法と MP 法の解析結果の水の飽和度はほぼ一致している。このことより、カラム下端より 24.0cm の位置における解析結果と実験結果の水の飽和度のずれは、ASG 法または MP 法による解析手法の違いが原因ではなく、水分特性曲線のモデル化による原因であると推定した。

以上のことより ASG 法は表流水と多孔質体内の流体の流れを解析することができることが分かった。

### 3. 堤体の越流問題への ASG 法の適用事例

続いて本研究では、ASG 法を用いて、図-5 に示す解析モデルで堤体の越流解析を行った。矩形の堤体と基盤からなる多孔質体が解析領域の下側に位置し、その上位に大気が存在している解析モデルの構造とした。初期状態では、堤体の両側に深さ 3m(自由水面の位置  $z=13.0\text{m}$ )の表流水が存在しているものとした。そのため、 $z=13.0\text{m}$  以下では密度関数と水の飽和度が 1.0 であり、それ以上では 0.0 となる。ただし、多孔質体内の  $z=13.0\text{m}$  以上

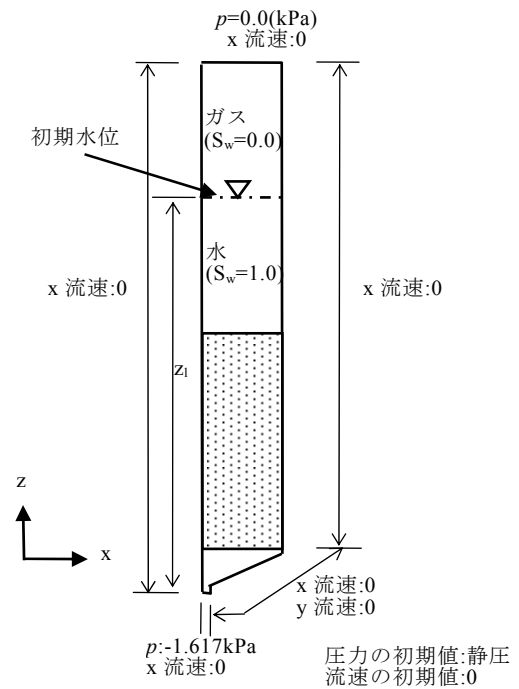


図-2 解析の境界条件と初期条件

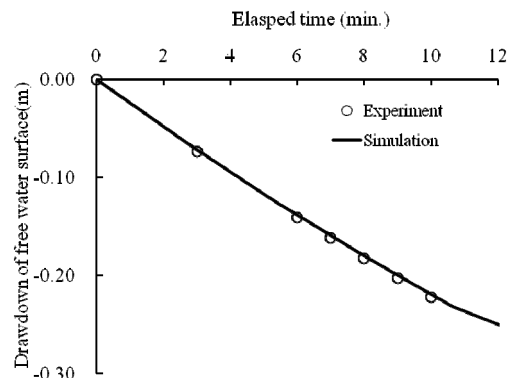


図-3 地表水の自由水面の低下の経時変化

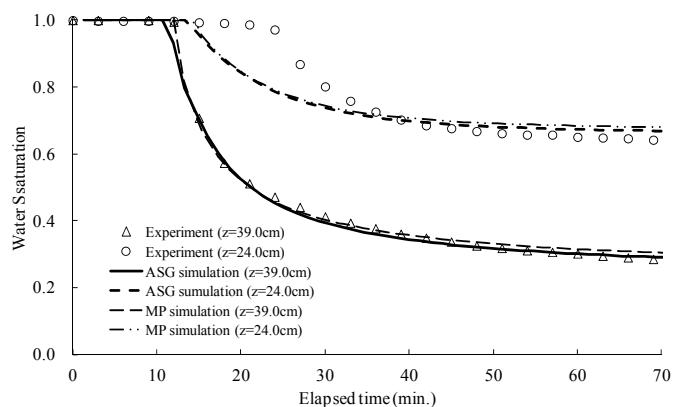


図-4 豊浦砂中の水の飽和度の変化

については、ガス圧と水圧が静圧または静水圧状態として水とガスの毛管圧を求め、van Genuchten モデルを用いて毛管圧より水の有効飽和度を求めた。初期状態のガス圧、水圧および多孔質体中のグローバル圧力は、

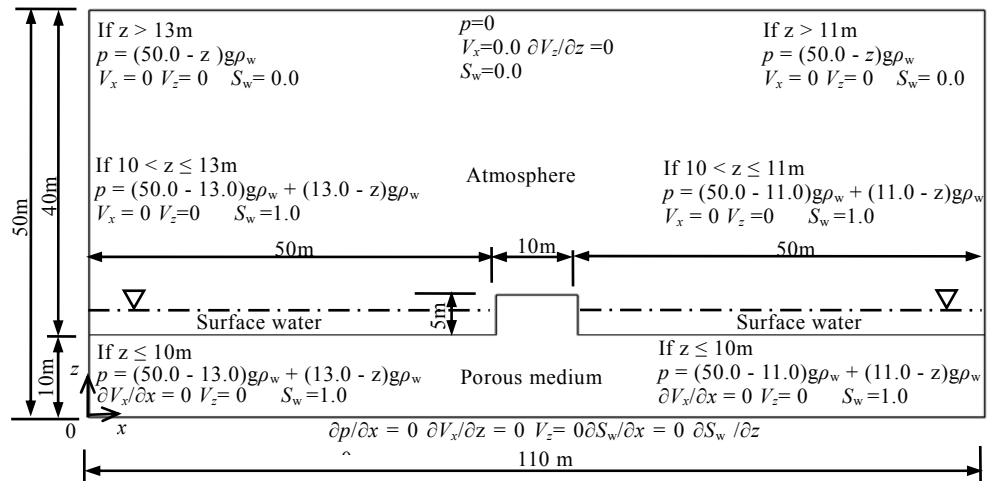


図-5 堤体の越流解析のための解析モデルおよび境界条件と初期条件

自由水面が  $z=13.0\text{m}$  とした静圧または静水圧とした。さらに、初期状態の流速は 0 とした。

解析モデル下端の境界では不透水境界とし、解析モデルの上端は密度関数 0.0、ガス圧を 0.0 とした。

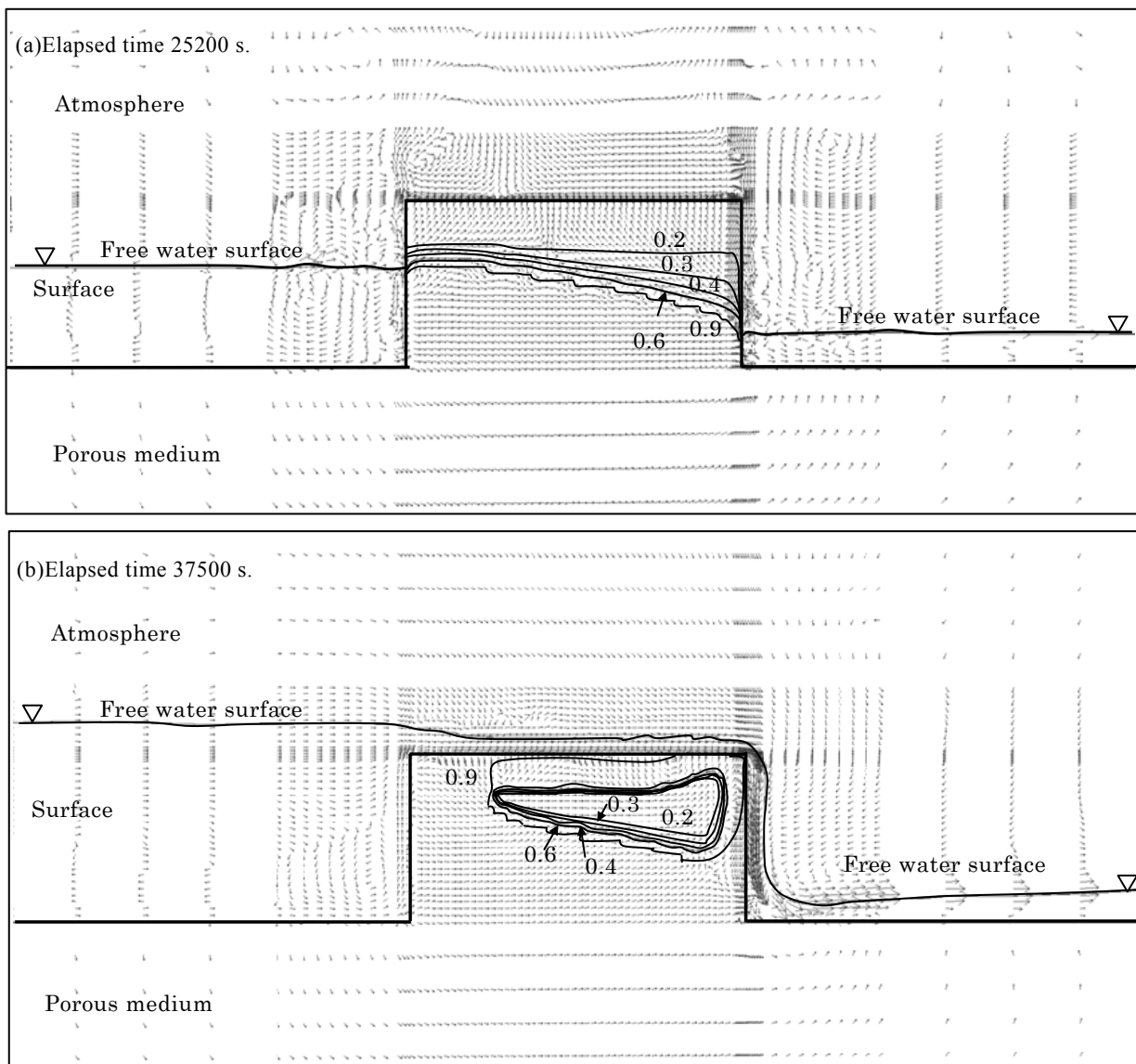


図-6 ASG 法の解析で得られた堤体の越流時の飽和度の分布と自由水面

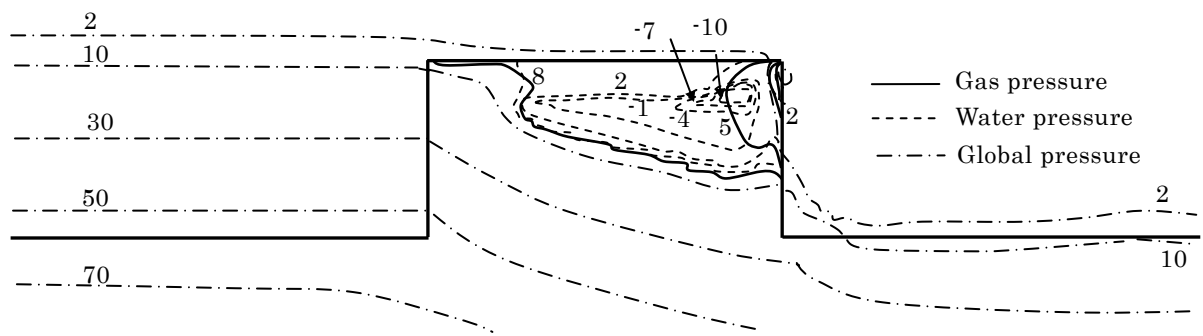


図-7 経過時間 37500 秒(越流開始後 12300 秒)におけるガス圧、水圧とグローバル圧力の分布

解析モデル左側の境界の圧力は、経過時間 25200 秒までは初期状態の圧力と同じとし、密度関数と飽和度も同様に初期状態と同じとした。また、解析モデル左側の境界の流速は 0 とした。解析モデル右側の境界の圧力は自由水面が  $z=11.0\text{m}$  として静圧または静水圧とし、密度関数と飽和度は  $z=11.0\text{m}$  以下を 1.0、それより上方を 0.0 とした。なお、解析モデル左側の境界の流速は一定としなかった。さらに、堤体を越流させるために、経過時間 25200 秒以降の解析モデルの左側の圧力は、自由水面が  $z=16.0\text{m}$  として静圧と静水圧で再設定した。また、その際の密度関数も  $z=16.0\text{m}$  以下を 1.0、それより上方を 0.0 とした。解析に用いた多孔質体と流体の物性値は、水分特性曲線を表す  $\beta$  を除いてカラム実験の解析で用いた値と同じである。ただし、van Genuchten モデルの  $\beta$  は 4.50 とした。

図-6(a)に、堤体を越流する直前の自由水面の位置、堤体内の水の飽和度の分布および流向を示した。図-6(a)によると自由水面は安定してフラットな状態である。一方、堤体内の水の飽和度は、若干の変化はあるが定常に近い状態といえる。この場合の流速の最大値は  $1.0\text{m/s}$  である。ASG 法による越流の解析結果を示す図-6(b)によると、経過時間 37500 秒(水位上昇後 12300 秒)後に自由水面は堤体を越え、堤体左側を滝のように流れ、解析モデル左側へ流動した。また堤体内では不飽和領域が残存して、ガスが封入された状態となった。堤体内に封入されたガス圧力の分布を図-7に示す。図-7には、同時に水圧とグローバル圧力の分布を示した。図-7によると、越流後における堤体の不飽和部分のガス圧は  $5\sim 8\text{kPa}$  (越流前の堤体内のガス圧は  $0.4\text{kPa}$ ) であった。これより、越流後の堤体内に封入されたガス圧の上昇量は  $4.5\sim 7.6\text{kPa}$  程度であることがわかる。水圧については、ガスの封入箇所の水の飽和度が低いことにより表流水の浸入が進行せず負圧となった。また、当然のことながらグローバル圧力は表流水内では水圧と一致し、大気中ではガス圧に一致した。しかし、堤体内の不飽和度帯のグローバル圧力は主にガス圧に近い値となった。

#### 4. まとめ

飽和度型支配方程式を用いた ASG 法は、表流水と多孔質体内の流体の流れを精度よく解析できることが一次元カラム実験より分かった。また、堤体の表流水の越流解析では、複雑な表流水の流れを再現でき、さらに、不飽和特性を考慮して多孔質体内の流れを再現できることを確認した。さらに、越流解析では、堤体内に封入されたガスの圧力上昇を再現できることを確認した。越流解析については、侵食解析または弾粘塑性応力変形解析と連成させることにより堤体の安定解析ができるようになる。

#### 参考文献

- 1) 登坂博行(2002): 地下水と地表水・海水との相互作用 9. 地表水流れと地下水流れの結合解析, 地下水学会誌, 第 1 号, 45-52.
- 2) 音田慎一郎, 細田尚, N. Jacimovic, 木村一郎 (2013): 正面越流による堤防侵食過程の数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), 69(4), I\_1207-I\_1212.