

鳥取大学工学部 学生会員 ○山本 健司
鳥取大学工学部 正会員 榎 明潔

1. 概要

本研究では、不圧地下水の定常浸透流模型実験を行い地下水面の形状と浸出点発生状況を調べ、浸出点発生メカニズムを取り入れた浸透流解析と実験結果の比較を行った。

2. 浸出点の発生について

図1に示すようなスポンジを等方性浸透層として用いた実験装置において上流側水位と下流側水位を与え、写真1のように上流水面付近から墨汁を流し可視できるようにした後、水面形を写真から計測し、下流側で流量の計測を行った。上流側水位と下流側水位の差が浸透層長さに比べて大きい場合に写真1のように下流端において浸出点が発生する。水面形状と浸出点発生状況を調べた。

3. 近似式の問題点

図2に浸透流の2次元モデルを示す。ACを自由水面とする場合、浸出点が発生していない状態でDupuitの準一様流の仮定を導入すると、自由水面形の近似式として式(1)が与えられる。

$$h = \sqrt{h_1^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right) + h_2^2 \left(\frac{x}{l}\right)} \quad \cdot \cdot (1)$$

浸出点が発生しないのであれば、上流側水位と下流側水位がわかれば水面形を近似計算することは出来る。水面形は透水係数に影響されずに決まる。しかし、写真1に示しているような浸出点が発生する場合は近似計算できない。

4. 有限要素法による浸透流解析

被圧地下水の定常浸透流は熱伝導と同じラプラスの方程式を解くことで計算できるが、不圧地下水の場合には、解析領域の全域を水が流れないという問題と、浸出点が発生するという問題がある。

本研究では、4節点長方形要素の有限要素法を用い、不圧地下水浸透流に適用するために以下のように

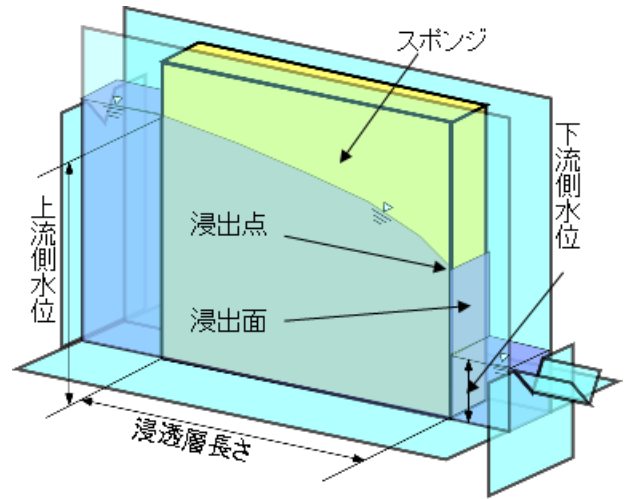


図1 実験装置概略

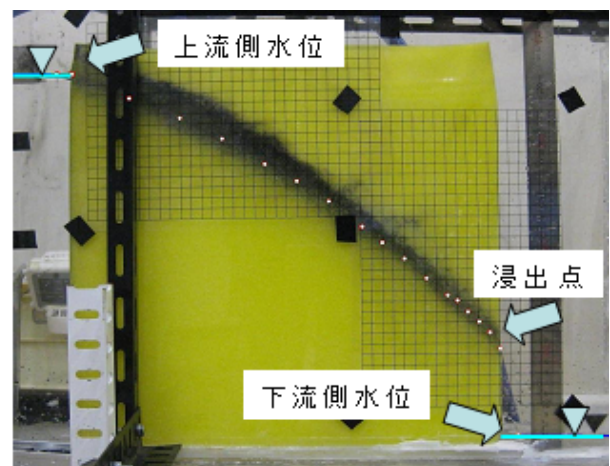


写真1 実験装置

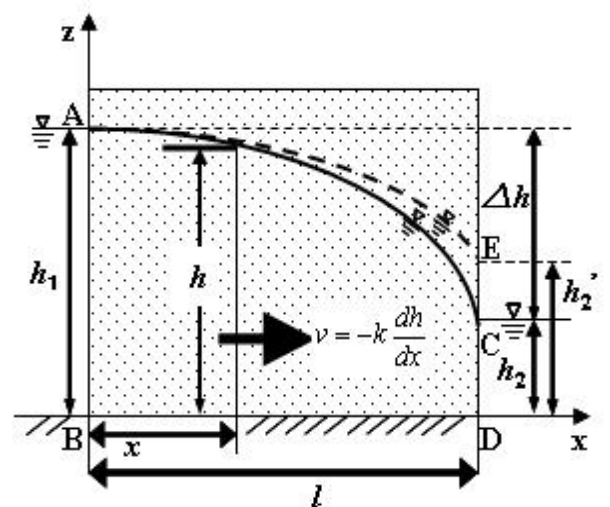


図2 不圧地下水の浸透層モデル

な工夫をした。

1) 解析領域の縮小について

初期の節点に位置において全水頭分布を求めた後に位置水頭を引く事で圧力水頭分布が求められ圧力水頭が0となる位置を仮自由水面とする。その位置を目標に節点の座標に縮尺率を掛け長方形要素から台形要素に変更し解析領域を変形させる。解析領域上端位置と仮自由水面の差が小さくなるまで繰り返し計算を行い自由水面形とした。図3に解析領域の変更前と変更後を示す。

2) 下流側境界条件について

図4の(a)~(c)のように下流の境界条件を変化させていき、下流側で透水境界を与える上端位置 h_s と下流端地下水面高さ h_2' が等しくなる位置が浸出点発生位置となる。

図5に示す様な実験装置を使い、解析方法と同じように不透水境界を与えるために下流側に遮水壁を設置し徐々に遮水壁を上げ透水境界を大きくしていく水面形と流量の計測を行った。その結果、図6のような遮水壁開き高さ(=透水境界を与える上端位置)と水面形の関係が得られ、上記の解析方法と同じような現象が見られる。

図6に示している実験結果の流量と遮水壁開き高さのから、遮水壁開き高さを大きくしていくにつれて流量は増加し、流量が最大になる点で遮水壁開き高さの下流端地下水面高さが等しくなり、その後は流量が変化しないという傾向がみられ、その点が浸出点発生位置である。

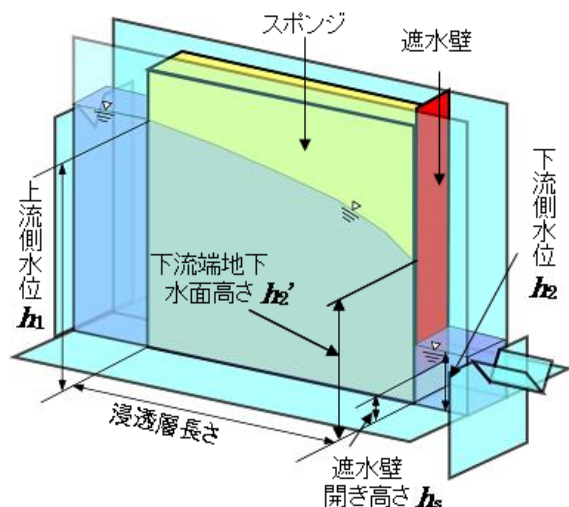


図5 実験装置概略(遮水壁有り)

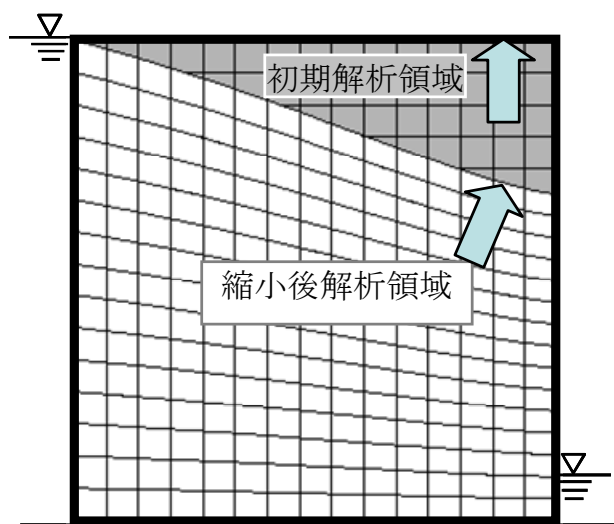


図3 FEM 解析領域の縮小

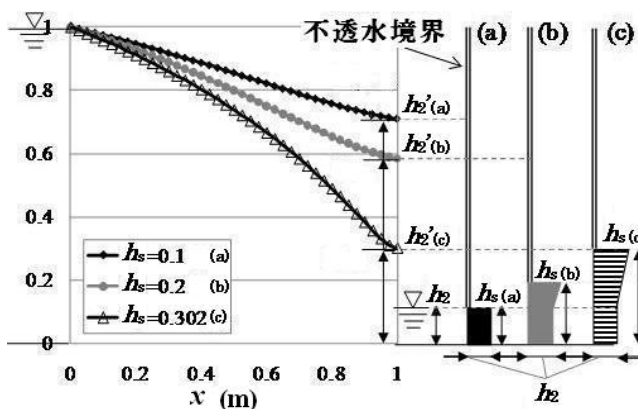


図4 下流境界条件の与え方

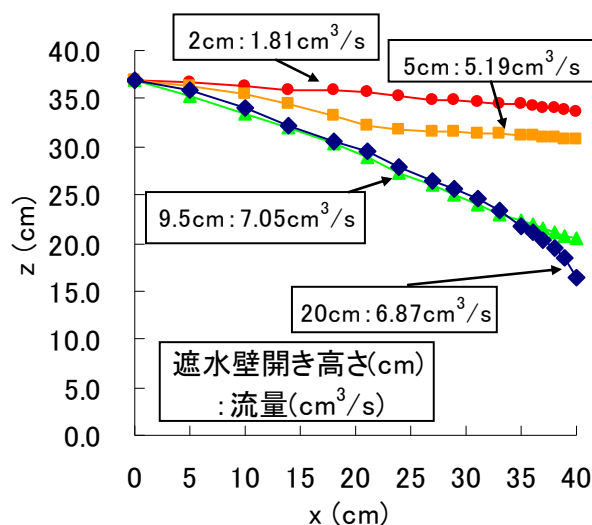


図6 不透境界を設ける実験の水面形

5. 浸出点発生条件の解析結果と模型実験

上記の解析方法で上流側水位，下流側水位，浸透層長さの条件の比を変更して解析を行った。

解析結果を図7に示す。図2より浸透層長さを l ，上流側水位を h_1 ，下流側水位を h_2 ，下流端地下水面高さを h_2' として，縦軸に $p=h_2'/h_1$ ，横軸に $n=h_2/h_1$ をとっている。凡例に $m=h_1/l$ の値を示している。図中の傾き45度の破線よりも右側は下流側水位が上流側水位よりも大きくなる条件なので破線の右側は存在しない。破線上では下流端地下水面高さと同下流側水位が等しいということなので，浸出点が発生しない。破線より左側では浸出点が発生し，同じ n の値上での実線と破線との差が浸出面の大きさとなる。解析条件のパラメータは以下に示す実験条件を考慮して決めている。

図1の実験装置を使い，スポンジ及び豊浦砂を浸透層として実験を行った。

スポンジを使った実験では，上流側水位浸透層長さ，を2通りずつ決め，下流側水位を6～7通りに変化させ浸出点の発生の有無を調べた。実験条件のうち，上流側水位 37cm，浸透層長さ 40cm を与え ($m=0.93$)，下流側水位を変化させた結果を図8に赤色の丸印で示している。実験値と解析値($m=0.93$)を比較すると，値に差はあるが大まかな傾向は同じである。差が生じていることに関しては，実験装置の不具合やスポンジでも等方性浸透層が再現できなかったということが考えられる。

砂を使った実験では，図8に実験結果を青色の三角印で示す。実験条件は上流側水位 40cm，下流側水位 10cm，浸透層長さ 41cm ($m=0.98$) とした。堆積方向により透水係数が異方性であるためにこのような結果になったと考えられる。

6. 水面形の比較

図1の実験装置を使い上流側水位 37cm，浸透層長さ 40cm において，浸出点が発生する条件（下流側水位 2cm）と浸出点が発生しない条件（下流側水位 23cm）での水面形に関して，実験結果と式(1)と有限要素方による解析結果の比較を行う。

図9に実験結果と式(1)による水面形を示す。浸出点が発生しない条件では，式(1)で水面形を近似できているといえる。浸出点が発生している条件では，

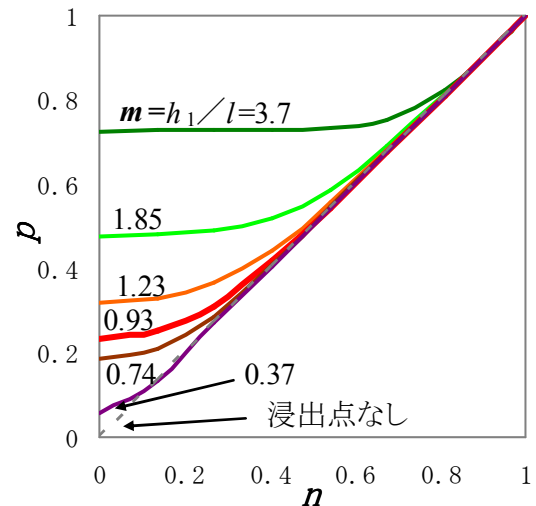


図7 FEM 解析結果

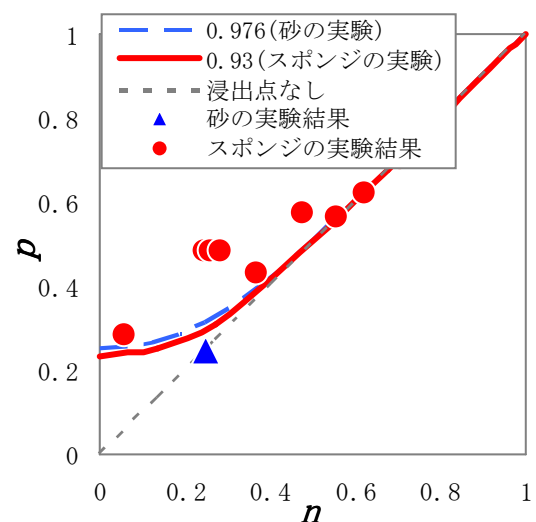
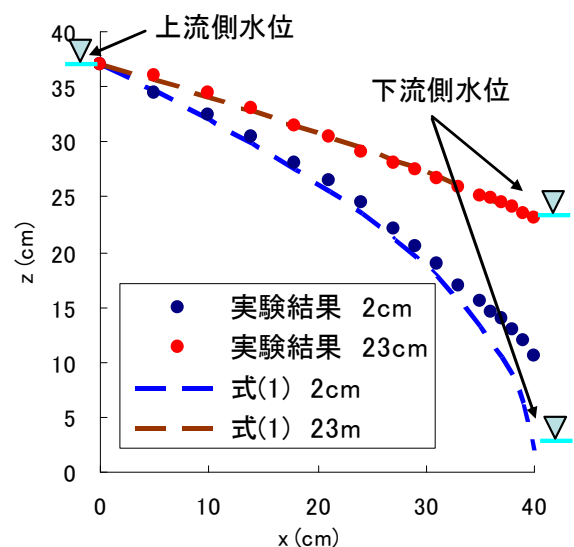


図8 FEM 解析と実験の比較



式(1)では浸出点を考慮していないので下流側ほど実験結果との差が大きくなっている。

図 10 に実験結果と FEM 解析結果の水面形を示す。FEM 解析結果浸出点の発生の有無に関係なく、ほぼ水面形を与えることができる。

図 11 に FEM 解析結果と式(1)の水面形を示す。浸出点が発生しない条件では、式(1)と解析結果はほぼ等しい結果になっている。浸出点が発生する場合でも図に丸で示している下流端付近以外はほぼ等しくなっている。

浸出点が発生する場合でも式(1)で近似計算する工夫について述べる。図 7 の FEM 解析結果から浸出点発生位置を読み取り、式(1)の下流側水深に代入した水面形を図 12 に示す。整合性を確かめるために実験結果と FEM 解析結果も図 12 に示す。図 7 の解析結果を使えば式(1)でも浸出点が発生する場合の水面形を近似できている。

7. 結論

- 1)流量が最大になるように浸透層内を水が流れるために浸出点が発生するとわかった。
- 2)浸出点がない場合では、実験結果、近似式、有限要素法による解析での水面形状はほぼ等しくなり、浸出点が発生する場合でも、浸出点の発生位置を考慮すれば式(1)で水面形状を近似できるとわかった。

参考文献

- 1)榎 明潔：摩擦体としての土における安定と変形の解析法，電気書院，6 章 pp162~169，2007.
- 2)田賀 敏子：不圧地下水の定常浸透流解析に関する研究，鳥取大学工学研究科社会基盤専攻土木工学コース修士論文，2010.
- 3)尾島勝 常松芳昭 柿沼忠男 名合宏之 斉藤隆 余越正一 鈴木幸一：水理学 I，岩佐義朗 金丸昭治 編，朝倉書店，5 章，pp142~158，2003.
- 4)疋田賢太郎 廣田成克：堤体内浸透流の実験解析，愛知工業大学土木工学専攻 卒業論文，2006.
- 5)吉田昭治 竹中伸一 稲葉一成 中野俊郎：自由水面をもつ定常浸透流の有限要素法による新簡易解析法，土と基礎，Vol. 41，No. 11，pp35~40，1993.

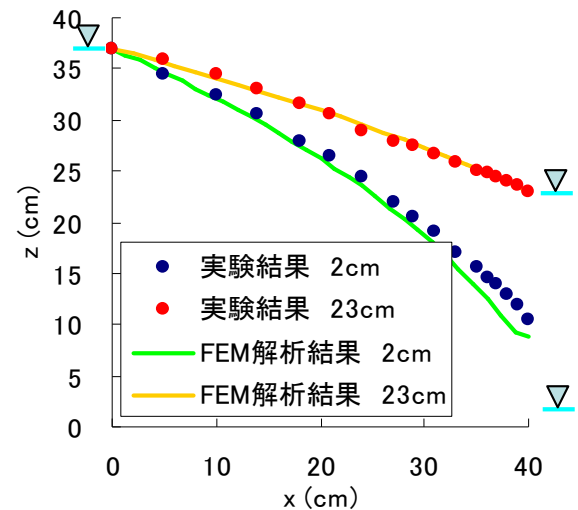


図 10 実験結果と FEM 解析結果の水面形

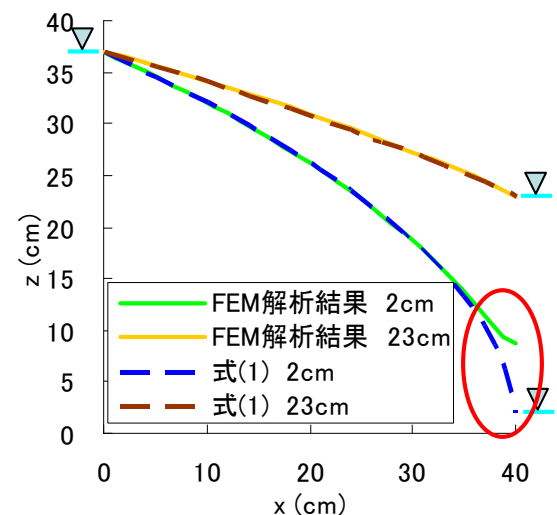


図 11 式(1)と FEM 解析結果の水面形状比較

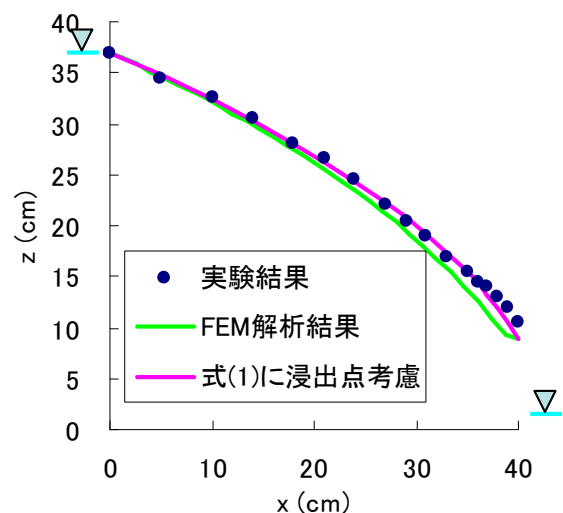


図 12 浸出点を考慮した式(1)との比較