

飽和・不飽和浸透流解析の実務への 適用性に関する一考察

応用地質株式会社 宮田 善郁

要 旨

河川堤防に関する業務では、浸透に対する安全性の照査や対策工法の検討などにおいて飽和・不飽和浸透流解析の実施が必須となっている。しかしながら、浸透流解析では、解析メッシュの区切り方や材料特性、外力波形、境界条件、初期状態などの設定により解析結果が大きく変化する。ここでは、これら解析条件の中の解析メッシュと材料特性に着目してメッシュの分割方法や透水係数、不飽和特性の設定が解析結果に与える影響について調べた。この結果、①いびつな形状の解析メッシュを用いると解析精度が悪い、②短時間に堤体内の自由水面が上昇または低下する場合には不飽和特性の設定が解析結果に与える影響が大きい、などの知見が得られた。今後は現場の実態を踏まえて多くの浸透流解析を行い、本報告で示した知見の有用性、妥当性について検討して行きたい。

1. まえがき

河川堤防に関する業務では、浸透に対する安全性の照査や対策工法の検討などにおいて飽和・不飽和浸透流解析^{1), 2), 3)}の実施が必須となっている。今日における浸透流解析は平成14年に示された「河川堤防の構造検討の手引き⁴⁾」(以下、「手引き」と呼ぶ)に依るところが大きく、浸透流解析のための土質調査や解析条件の設定、解析結果の評価などは手引きに基づいて実施されることが一般的である。

浸透流解析の実施にあたっては、解析モデルの形状、材料特性、解析メッシュ、初期状態(水位)、境界条件、外力波形などの設定が必要である。手引きの中ではこれら解析条件の設定方法についても説明がなされているが、実際問題では土質や地形、地下水状況などが場所により様々なため、解析条件の設定方法も現場状況に合わせて見直す必要がある。これより、本研究は、どの条件を設定すると解析結果にどのように反映されるのかを明らかにして、実際問題において解析条件を設定する際のバックデータを得ることを目的に実施した。今回の報告ではこれら

解析条件の中の解析メッシュ、材料特性に着目したときの結果について紹介する。

ここで、以下の説明で必要となる、手引きの中の特に参考にした2点を次に示す。

(1) 不飽和特性について

手引きの中では、堤体および基礎地盤の土質を礫・砂質土[G・S]、砂質土[SF]、粘性土[MC]の3パターンに分類して、それぞれの不飽和特性を紹介している。本解析においても堤防材料の不飽和特性には手引きの中で紹介されている3パターンを用いた。

(2) 局所動水勾配について

川裏のり尻部における水平・鉛直局所動水勾配 i_h 、 i_v はパイピングの発生に対する抵抗力を定量的に評価するために用いられる。局所動水勾配の算出方法は手引きに準拠した。

2. メッシュ分割と計算感度

2.1 解析メッシュの細かさと自由水面

メッシュの細かさが解析結果に与える影響を調べるために、図-1のような堤防モデルの非定常浸透流解析を行った。堤防ののり面勾配(以

性によって異なることが分かった。短時間に堤体内の自由水面が上昇または低下する場合の解析には、不飽和特性の与える影響が非常に大きいと言える。

4. まとめと今後の課題

本報告で得られた知見と今後の課題を以下にまとめる。

①メッシュ分割について

メッシュの分割方法が解析結果に与える影響を調べるために数種類の解析メッシュを作成して計算感度を比べた。この結果として、要素分割数が多くても要素形状がいびつな場合には計算感度が低いという事例を示した。

精度の良い解析結果を得るには正方形・正三角形の要素からなる要素分割数の多い解析メッシュを用いることが肝要であるが、河川堤防のように解析対象領域が大きい問題ではその全領域を細かくメッシュ分割することはプログラムの性質上困難である。河川堤防の解析においては、流量や流速、局所動水勾配などを求めたい箇所の周辺には細かいメッシュを、左右端や下端など解析結果に与える影響が小さい領域には粗いメッシュを用いる必要がある。ただし、本報告では、メッシュ分割を具体的にどの程度の間隔にすれば良いのかを明らかにするまでには至らなかった。メッシュの分割間隔と透水係数の関係、解析対象領域が大きい場合の合理的なメッシュ分割方法などについては今後明らかにしたい。

②材料特性について

透水係数や不飽和特性の違いが解析結果に与える影響を調べた。結果の要点を以下にまとめる。

(1)降雨波形に対しては、透水係数が小さいほど定常状態到達時の自由水面が高くなる。

(2)不飽和特性のみを変化させたときの解析結果より、定常状態に達したときの自由水面高さや局所動水勾配は不飽和特性に依らず一定であるが、定常状態に至るまでの時間は粘性土で短く、礫・砂質土で長くなる。

ただし、これらは透水係数が堤防全域で一様な場合の解析結果である。

透水係数は、現場透水試験結果や粒度試験結果（Creager法やHazen法）に基づいて設定されることが多い。透水係数の大きさによって自由水面の高さや定常状態に至るまでの時間が大きく異なるが、透水係数は技術者の判断によっては1オーダー程度の差異が生じる場合も考えられる。透水係数の設定には細心の注意を払う必要がある。一方、不飽和特性は室内土質試験結果に基づいて設定されるべきであるが、実務においてはボーリング結果より手引きの中の礫・砂質土、砂質土、粘性土のどれかを設定する場面が多い。不飽和特性の違いによる影響は定常状態に至るまでの過程において大きい。わが国の河川では最高水位継続時間があまり長くないため、定常状態に達する前に河川水位が低下することも多い。このため、どの不飽和特性を設定したかによって自由水面や局所動水勾配が大きく異なると思われる。

参考文献

- 1) 赤井浩一，大西有三，西垣誠(1997)：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文集，第264号，pp87-96。
- 2) 向上拡美，北村孝海(1986)：浸透流における不飽和特性と解析精度に関する考察，間組研究年報，pp163-174。
- 3) 西垣誠(2000)：浸透流の解析技術と地盤のモデル化，地質と調査，No.83，pp19-25。
- 4) 国土技術研究センター(2002)：河川堤防の構造検討の手引き。

下、勾配)は1:2($\alpha=2$)として、境界条件および初期水位は表-1のように与え、外力には図-2のような降雨波形を与えた。透水係数には $k=1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ を、不飽和特性には砂質土[SF]を用いた。

図-3(a), (b)にメッシュの区切り方のみが異なる2つの解析結果を示す。図はどちらも経過時間が6時間のときの自由水面を示している。図より、(a)ではメッシュの不均一性により自由水面が左右非対称となっているのに対して、メッシュが細かい(b)では自由水面が左右対称となっている。解析条件よりメッシュの細かい(b)の方がより実際現象に近い解(自由水面)を得て

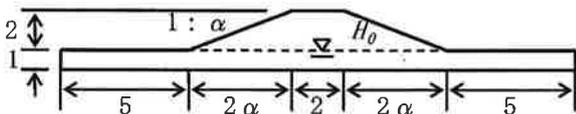


図-1 堤防モデル (単位:m)

表-1 境界条件と初期状態

水位一定境界:	左右端 全水頭 $H=1.0\text{m}$
浸出面境界:	なし
変動降雨境界:	上面全域 $r=10\text{mm/h}$ (図-2の降雨波形)
変動水位境界:	なし
初期水位:	$H_0=1.0\text{m}$

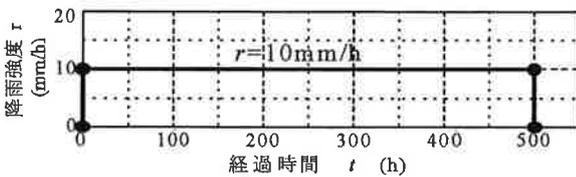


図-2 降雨波形

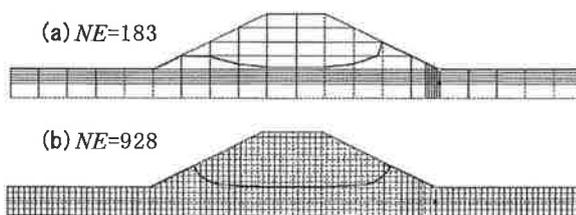


図-3 メッシュ区切りと自由水面
($t=6\text{h}$, $k=1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$)

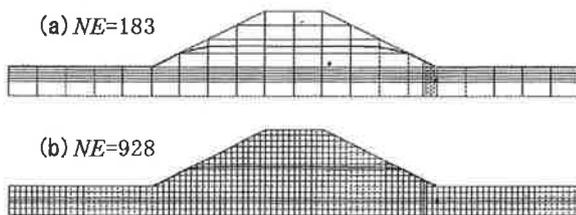


図-4 メッシュ区切りと自由水面
($t=6\text{h}$, $k=1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$)

いるものと推察できる。図より、メッシュ分割の方法(不均一性)が解析結果に大きな影響を与えていると分かる。

一方、図-4は図-3と等しい解析条件のまま透水係数だけを $k=1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ にしたときの解析結果である。図より、(a)と(b)の自由水面には大きな差異が見られない。これより、透水係数がある程度より大きくなるとメッシュ分割の影響が小さくなるのが分かる。

メッシュ分割の粗度が解析結果に与える影響の程度は透水係数 k の大小に依存する。透水係数が小さい土質の場合には解析メッシュもそれに応じて小さく区切る必要があると言える。

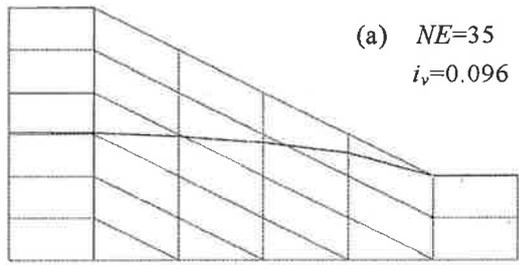
2.2 要素数, 要素形状と計算感度

等しい解析条件のもとで要素形状のみを変化させる解析を行った。解析条件には先ほどと同様に、堤防モデルには図-1を、外力には図-2の降雨波形を、解析条件には表-1を用いた。のり面勾配は1:2($\alpha=2$)として、透水係数には $k=5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ を、不飽和特性には砂質土[SF]を用いた。

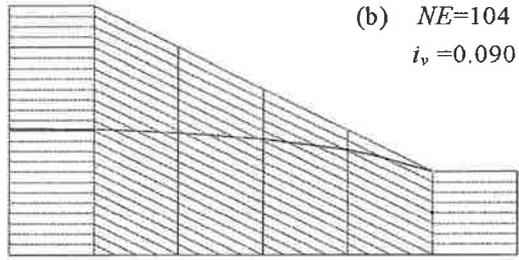
図-5(a)~(f)に要素形状と定常状態到達時の自由水面を示す。ただし、図は要素形状を分かりやすくするために、堤防モデルの一部を拡大表示したものである。図には表示した範囲の要素数NEとのり尻での鉛直局所動水勾配 i_v も示した。鉛直局所動水勾配 i_v は鉛直区間 $d_v=0.5\text{m}$ で求めた。

図-5より解析ケースごとに自由水面の形状や局所動水勾配 i_v が異なっていることが分かる。有限要素法では一般に、要素数NEが多いほど、また、要素形状が正方形、正三角形に近いほど解析精度が高い。本解析結果においては、要素数が多く、要素形状が正方形である(f)が最も正解に近い自由水面、局所動水勾配を示していると考えられる。

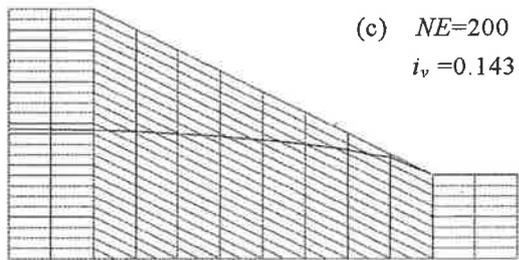
(f)の解析結果が正解値であると考え、要素数が少ないもの、形状がいびつなものほど i_v が小さいことが分かる。ただし、(c)と(e)では(c)



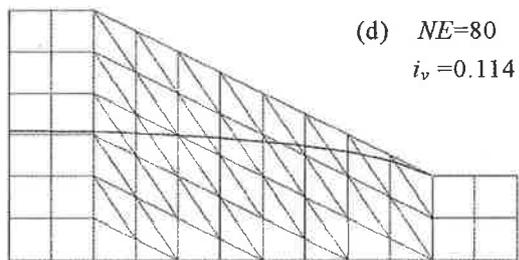
(a) $NE=35$
 $i_v=0.096$



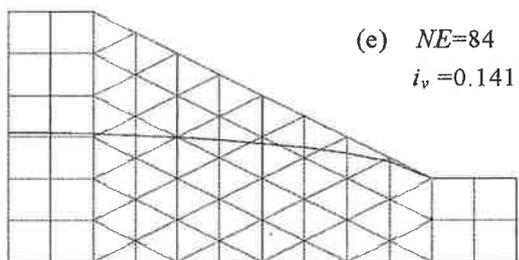
(b) $NE=104$
 $i_v=0.090$



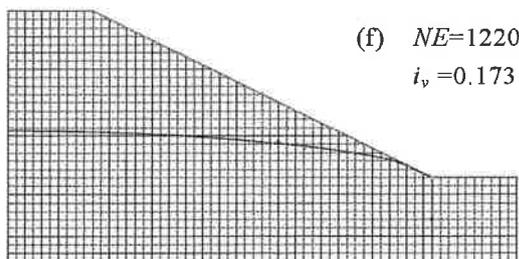
(c) $NE=200$
 $i_v=0.143$



(d) $NE=80$
 $i_v=0.114$



(e) $NE=84$
 $i_v=0.141$



(f) $NE=1220$
 $i_v=0.173$

図-5 要素形状と計算感度
(NE:要素数, i_v :鉛直局所動水勾配)

の方が2倍以上も要素数が多いにも関わらず両者の局所動水勾配 i_v はほぼ等しい。また, (d)と(e)では要素数はほぼ等しいにも関わらず(e)の局所動水勾配 i_v の方が(f)の値に近い。(e)は正方形, 正三角形の要素よりなるため要素数が少ないにも関わらず解析精度が高いのだと考えられる。

以上より, 要素数を増やしさえすれば解析精度が向上するわけではないことが分かる。

3. 材料特性と浸透特性

3.1 透水係数と浸透特性

等しい解析条件のもとで透水係数 k のみを変化させる解析を行った。堤防モデルには図-1を, 外力には図-2の降雨波形を, 解析条件には表-1を用いた。のり面勾配は1:2($\alpha=2$)として, 不飽和特性には砂質土[SF]を用いた。

図-6は, 透水係数が $k=1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$, $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ での定常状態に達したときの自由水面を示したものである。両者の自由水面 H_r (H_r :堤防中心での水位)を比較すると $k=1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ では $H_r=1.3 \text{m}$, $k=1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ では $H_r=2.7 \text{m}$ であった。透水係数が1オーダー(10倍)異なるだ

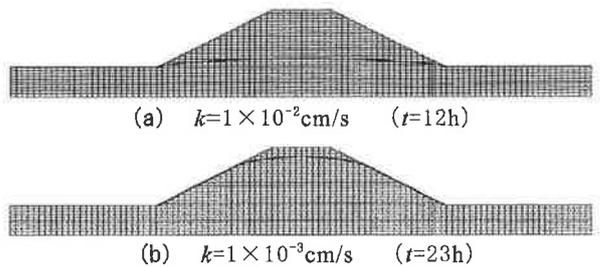


図-6 透水係数と自由水面 (降雨波形)

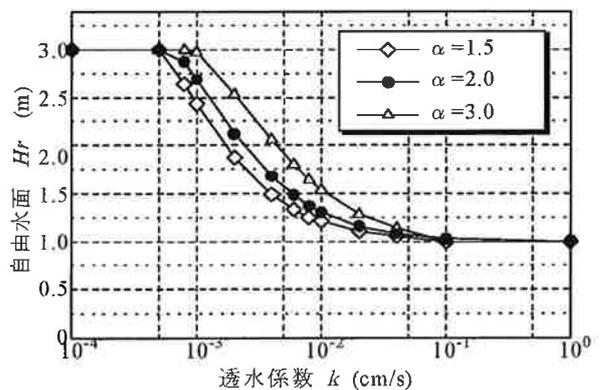


図-7 透水係数と自由水面 (降雨波形)

けて定常状態到達時の自由水面が大きく異なることがわかる。

図-7は、図-6と同様の解析条件において、透水係数の大きさを $k=1 \times 10^0 \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ の間で変化させたときの定常状態到達時における自由水面 H_r と透水係数 k の関係を示したものである。図より $k=1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ よりも大きい透水係数 k の場合には自由水面 H_r はあまり上昇しないが、 $k=1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ よりも小さな透水係数 k を設定するとわずかな透水係数 k の違いで自由水面 H_r が大きく異なることが分かる。図-7には堤防の勾配が1:1.5 ($\alpha=1.5$), 1:3.0 ($\alpha=3$)のときの結果も併記してあるが、この場合でも傾向は同様である。

3.2 不飽和特性と浸透特性

不飽和特性が浸透特性に与える影響を調べるために、等しい解析条件のもとで不飽和特性のみを変化させる解析を行った。堤防モデルは先

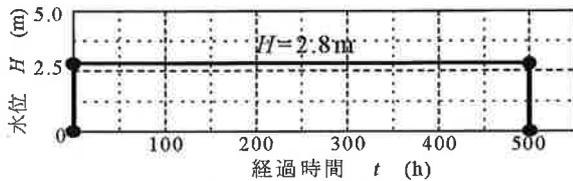


図-8 水位波形

表-2 境界条件と初期状態

水位一定境界	: 左右端 全水頭 $H=1.0\text{m}$
浸出面境界	: なし
変動降雨境界	: 上面全域に $r=0\text{mm/h}$
変動水位境界	: 川表側 $H=2.8\text{m}$ (図-8の水位波形)
初期水位	: $H_0=1.0\text{m}$

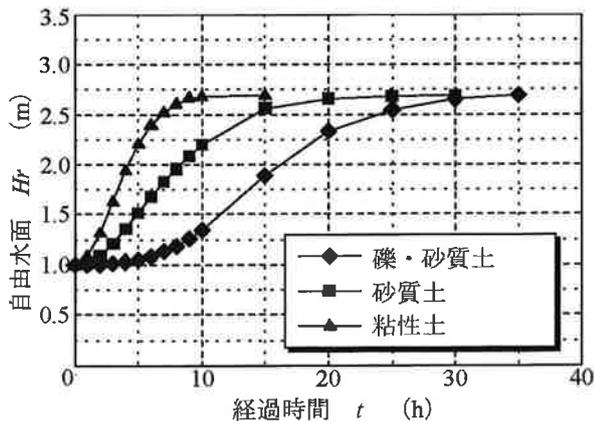


図-9 不飽和特性と自由水面 (降雨波形)

ほどと同様に図-1を用いた。のり面勾配は1:2 ($\alpha=2$)として、外力条件は図-2, 表-1の降雨波形を与えた場合と、図-8, 表-2の水位波形を与えた場合の2ケースとした。透水係数には $k=1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ を用いて、不飽和特性には手引きの中で用いられている礫・砂質土[G・S], 砂質土[SF], 粘性土[MC]の3パターンを用いた。

図-9は降雨波形を与えたときの、各不飽和特性での経過時間と自由水面 H_r の関係を示したものである。透水係数が等しくても不飽和特性が異なると降雨初期における水位上昇の特性が異なることが分かる。十分に時間をおくとどれも等しい自由水面 H_r に落ち着くが、この状態に至るまでの時間は粘性土で短く、礫・砂質土で長いことが分かる。

図-10は水位波形を与えたときの経過時間 t と鉛直局所動水勾配 i_v の関係を示したものである。鉛直局所動水勾配 i_v は川裏のり尻において鉛直区間 $d_v=0.5\text{m}$ で求めた。図より、定常状態に達したときの局所動水勾配は不飽和特性に依らず一定であるが、定常状態に至るまでの局所動水勾配の上昇特性は不飽和特性ごとに異なっていることが分かる。図-9の場合と同様に定常状態に至る時間は粘性土で短く、礫・砂質土で長くなっている。

図-9, 図-10より、定常状態到達時における自由水面や局所動水勾配は不飽和特性に依らないが、定常状態に至るまでの過程が不飽和特

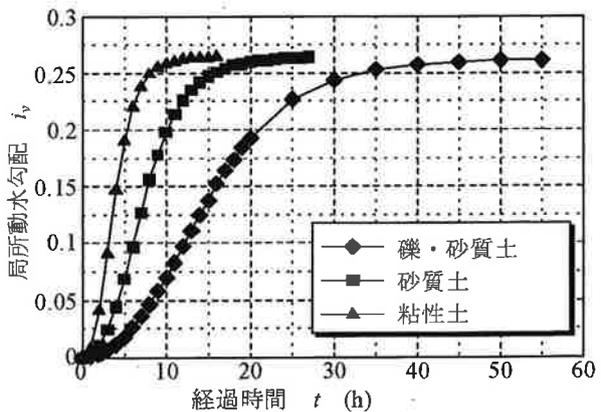


図-10 不飽和特性と局所動水勾配 (水位波形)