大型盛土模型実験における降雨浸透シミュレーション

山口大学大学院　学生会員　○鈴木　健太
近畿大学　正会員　河井　克之
近畿大学　正会員　中島　晃司

１．目的

現在、浸透に対する堤防の安全性照査は河川堤防の構造検討の手引き（改訂版）[1] に基づいた飽和不飽和浸透解析によって検討されている．堤体構成土の透水係数，保水特性を用意された三種類の材料に当てはめ，降雨強度 1mm/h の降雨を 48 時間，堤体表面に与えた後，河川水位を高水位まで上昇させるというものである．長大な河川延長を考慮すると，この様な包括的な手法で安全性のランク付けを行わざるを得ないものの，個別の河川堤防において，得られる解の妥当性について，詳細な検討は行われていない．そこで，本研究では富澤ら [2] が行った大型模型を用いた降雨実験を数値解析によって再現することで，浸透に対する堤防の安全性照査における飽和不飽和浸透解析の条件について検討を行った．

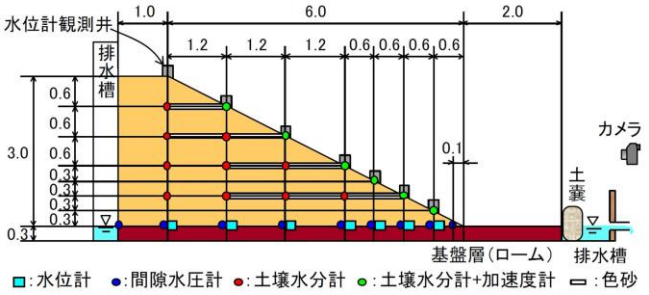


図-1　大型模型概要図 [2]

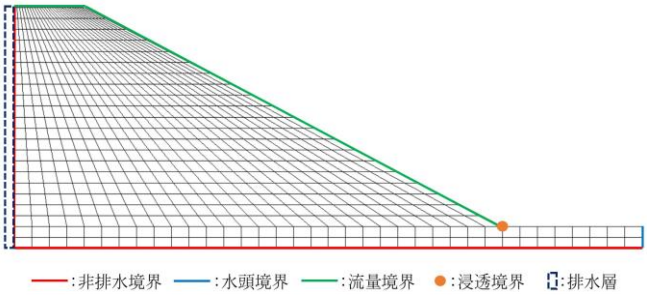


図-2　解析メッシュおよび境界条件

表-1　堤体材料と基礎地盤の材料定数

堤体材料						
λ	κ	M	γ`	kx	ky	m
0.087	0.009	1.375	0.33	5.02	2.51	0.6
a	n	ei	Sr_0	n_E	kax	kay
10	1	0.841	0.55	1	502	251
基礎地盤						
λ	κ	M	γ`	kx	ky	m
0.087	0.009	1.375	0.33	0.24	0.12	0.6
a	n	ei	Sr_0	n_E	kax	kay
10	1	0.841	0.55	1	24	12

透水係数・透気係数の単位(m/day)

２．解析方法

富澤らは図-1 に示すように，厚さ 0.3m の基盤層の上に，幅 7m（天端幅 1m），高さ 3m，奥行き 6.5m の大型模型を作製した．堤体は細粒分含有率 Fc=22%，砂分含有率 Sc=76%の砂質土を使用しており，含水比約 17%で，平均 86%の締固め度で盛り立てられた．堤体底部に間隙水圧計，堤体内部に土壌水分計と水位計，堤体表面には加速度計が設置されている．この大型模型に 1mm/h の降雨を 400 時間与えて，その際の内部含水率変化や水位変化が計測された．材料に関しては，原位置試験，室内試験から，透水係数，水分特性曲線が別途求められている．本研究では，土/水/空気連成有限要素解析コード（DACSAR-MP）を用いて，降雨浸透シミュレーションを実施した．図-2 で，解析に用いたメッシュおよび境界条件を示す．解析領域下端，左端は非排水境界，基盤層の右端に水頭境界を与えた．天端，法面には降雨強度相当の流量を与えるとともに，堤体内の浸潤線が上昇し，法面からの浸潤を表現するために法尻付近の法面には，圧力水頭が負の値からゼロに達すると，自動的にゼロ圧力水頭境界に転じる浸透境界を設定した．堤体材料，基礎地盤の材料定数を表-1 に示す．ここで，透水係数に関しては，原位置試験の結果と室内透水試験結果が異なるが，予備解析結果で得られる深度方向の含水率分布の変化と模型土槽に設置された土壌水分計の計測結果が一致するように室内透水試験の結果を採用した．堤体の降雨前の保水状態を表現するために，堤体部には等しいサクション値を初期条件として設定し，4 日間放置した後，降雨を与えた．

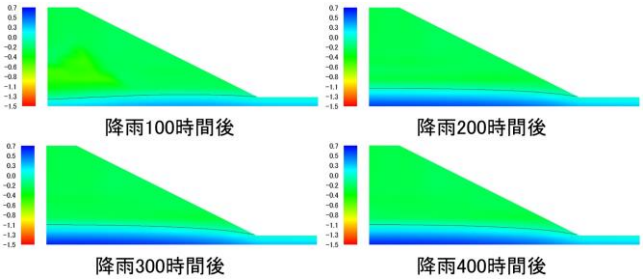
キーワード　河川堤防，浸透，飽和不飽和浸透解析，土/水/空気連成有限要素解析
連絡先　〒755-8611　山口県宇部市常盤台 2-16-1　山口大学大学院創成科学研究科　進士研究室　TEL0836-85-9332

© Japan Society of Civil Engineers

３．解析結果

図−3に解析によって得られた降雨下の水圧分布を示す．図中には，水圧がゼロの値を示す等値線を示している．これを浸潤線とみなすと，降雨継続時間とともに浸潤線が上昇しているのが確認できる．図-4 では，法肩直下の基盤上で計測した水位計の計測値と，同じ位置の要素で得られた圧力水頭を比較している．いずれも水位は単調増加を示すものの一定の値に漸近する傾向を示しており，最終的な水位高は良い一致を見せている．しかしながら，解析結果の方では，初期に負の圧力水頭となっているだけでなく，水位増加が激しく，早期に定常状態に落ち着いている．これはコストを抑えるために，保水試験から得られるパラメータから決めることが多い不飽和透水係数を支配するパラメータ m に問題があるものと考える．図-5 は有効飽和度～比透水係数・比透気係数関係に与えるパラメータ m の効果を示したものである．そこで，表-1 の入力定数で m=0.4 に変更して再度，解析を行った結果，図-6 のような水位変化が得られた．参考のため，m 変更前の結果も併記する．最終的な水位高に変化はないものの，水位高 0.2m 以上の水位変化傾向は一致している．ただし，まだ，実験から得られた水位と解析結果には大きな隔たりがある．

実際の模型土槽では盛土背面に盛土内水位を計測するための排水層が設けられており，盛土背面側に細孔を有していることから，盛土内の水が排水層側に排水されることを許容している．そこで，この排水層を表現するために，図-2 に示した解析領域左端にさらに 10cm 幅の要素を追加した．解析の煩雑さを避けるため，要素は不飽和土の構成則に従うものとし，透水係数，透気係数を 100 倍した．図-7 は降雨中の水圧分布を表しており，図-3 とは異なって，降雨初期の浸潤線が水平になっている．図-8 に法肩直下の水位計観測結果と解析から得られる圧力水頭を比較する．最終的な水位はそれまでの結果と比べるとやや高くなったものの，途中の水位変化傾向はかなり改善される結果となった．



水頭の単位(m)

図-3　降雨中の圧力水頭分布

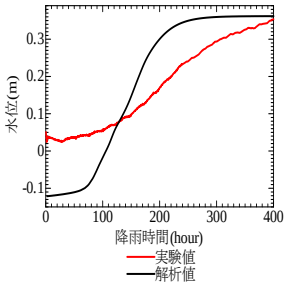


図-4　実験値と解析値の比較（水位挙動）

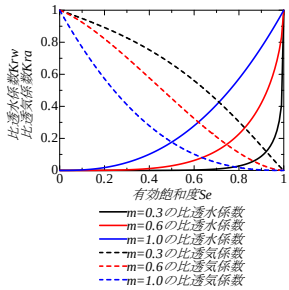


図-5　比透水係数・比透気係数の m への依存

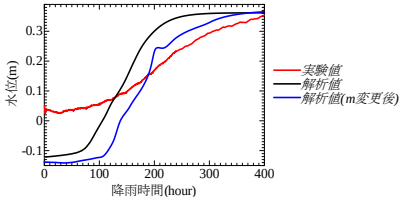
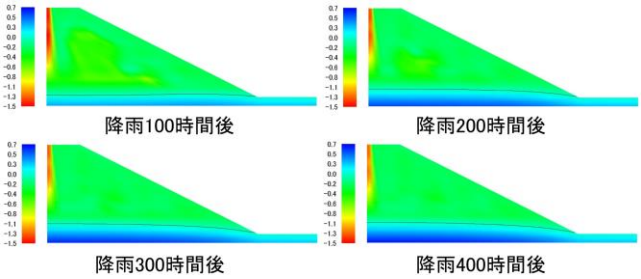


図-6　不飽和透水係数パラメータ変更後の水位挙動



水頭の単位(m)

図-7　降雨中の圧力水頭分布（排水層考慮）

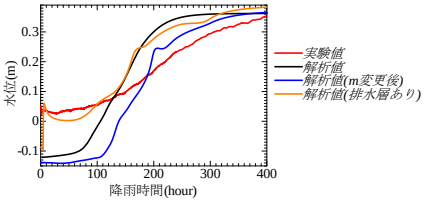


図-8　排水層を考慮した場合の水位挙動

４．まとめ

大型模型を用いた降雨実験を不飽和浸透特性による差異を考慮しつつ，土/水/空気連成有限要素解析（DACSAR-MP）で検討した結果，河川堤防の構造検討の手引きに指示されていない堤体材料のパラメータをより実測値に近いものにすることで飽和不飽和浸透解析の精度が大きく向上することが分かった．

参考文献

1)　河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），国土技術研究センター，2012.2

2)　富澤彰仁，東拓生，石原雅規，佐々木哲也：大型模型を用いた降雨実験による堤体内浸透挙動の検証，土木学会第 73 回学術講演会，pp.469-470, 2018

© Japan Society of Civil Engineers