

模型実験を用いた河川堤防の浸透破壊現象の考察と数値解析手法の検討

建設工学専攻修士 2年 中村孝博

1. はじめに

近年、集中豪雨や台風による豪雨の増加により河川堤防が破堤に至るといふ事例が全国各地で多数報告されている。河川堤防の主な破壊形態として浸透破壊と越流破壊があり、本研究ではその双方の破壊形態に着目し研究を進めてきた。本稿では、掲載ページに限りがあるため浸透破壊についてのみ掲載することとする。

本稿は、形状の異なる 2 つの実験ケースを例に取り、その再現解析を行うことで解析手法の妥当性の検討を行った。その手順は次のようである。まず解析に必要な諸情報を得るため、浸透崩壊模型実験を行い、実験時における堤体内部の浸透状況を、間隙水圧計を用いて計測した。次に、実験から得られた知見を元に浸透流解析を行ない、模型内部の浸透状況を実験値と解析値を比較し検証を行った。最後に、その結果を元に斜面安定解析を行い、崩壊時刻における安全率とすべり面の発生位置を確認し、解析手法の妥当性を検討した。

2. 浸透崩壊模型実験 (Case1)

2.1. 実験概要

図-1に実験概要図を示す。高さ65cm、幅300cm、奥行き38cmの土槽内に天端幅25cm、高さ25cm、奥行き幅15.3cm、両側の法勾配1:1の堤体を突固め法により作製した。堤体内部の間隙水圧を計測するため、間隙水圧計3個(PWP1, PWP2, PWP3)を用いて、浸透過程の間隙水圧の経時変化を測定した。なお、地盤材料として、珪砂6号と藤森粘土を質量比3:1で混合した人工中間土を用い、地盤の締固め度は70%とした。表-1に使用材料の物理特性を示す。

実験は表法面から一定速度で水を流入し、外水位高さを25cmまで一気に上昇させ、その後浸透崩壊が発生するまで外水位高さを維持した。ここで、浸透開始とは外水位の水が堤体の表法先端に触れた時刻を表している。

2.2. 実験結果

浸透開始より658sec後に裏法尻部の小崩壊をきっかけに、天端から滑り破壊を起こした。

図-2に実験より得られた間隙水圧計で計測した圧力水頭の経時変化を表したものを示す。崩壊が見られた外水位25cmを設定した間隙水圧の経時変化には、崩壊が始まった658sec直後にPWP2, PWP3のグラフに変化が見られた。PWP2は圧力水頭が1cm程度下がり、PWP3は、逆に2cm程度上昇した。これは、模型中央から

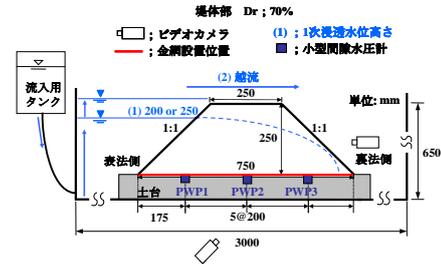


図-1 実験概要図

表-1 使用材料の物理特性

砂分含有率 [%]	77.2
シルト分含有率 [%]	13.7
粘土分含有率 [%]	9.1
細分含有率 [%]	22.8
土粒子密度 (ρ_s) [g/cm^3]	2.66
最大乾燥密度 (ρ_{dmax}) [g/cm^3]	1.971
透水係数 (k) [g/cm^2]	0.083

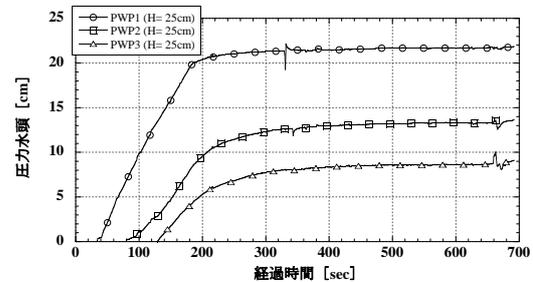


図-2 間隙水圧計の経時変化

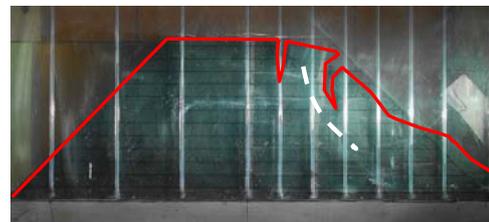


図-3 模型地盤の崩壊形態(外水位25 cm)

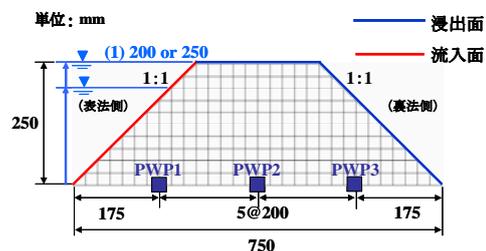


図-4 解析メッシュ

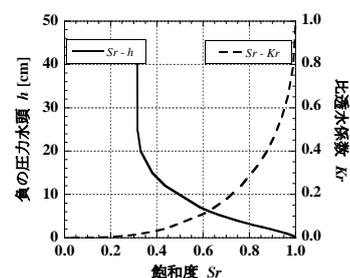


図-5 不飽和浸透特性

裏法尻部にかけて内部破壊が発生したためと考えられる。このことから、本実験での滑り面は、模型中央から裏法側天端短部の間に発生したものと考えられる。

図-3に崩壊開始から5 sec後の模型断面図を示す。図より、天端中央部と裏法側天端短部の間にクラックが生じていることが分かる。すべり面については、模型側面に作成したメッシュの変形により特定した。

3. 模型実験の解析シミュレーション

本解析では、先に行なった模型実験を、浸透流解析により、堤体内部の浸透水における間隙水圧、飽和度の経時変化を数値的に再現し、これらによる堤体内のせん断強度変化を考慮した斜面安定性解析を行なうことで模型実験の崩壊現象シミュレートを試みた。

3.1. 浸透流解析

a) 解析モデル

浸透流解析には、浸透流解析ソフト「Soil Plus2008/伊藤忠テクノソリューションズ」を用いた。FEM解析メッシュと境界条件を図-4に示す。本解析で用いた寸法は、実験に使用した模型と同寸法であるが、奥行き幅は変形を2次元として考えるため、単位長さとした。

b) 境界条件（水位、浸透、浸出条件）

境界条件では、模型実験と同様の条件となる様に外水位、浸透、浸出条件を設定した。

c) 解析に用いたパラメータ

解析に用いたパラメータを表-2に示し、図-5に不飽和浸透特性を示す。初期の圧力水頭分布については、モデル内全節点で-25 cmで一定と設定した。透水係数は、透水試験より求め、有効間隙率は、模型作製直後の飽和度（31.4%）を残留体積含水率として設定した。比貯留係数は、ゆるい砂を想定した一般的な値を使用した。不飽和浸透特性は、実験結果からVanGenu Chtenの式を用いて飽和度（ S_r ）と比透水係数（ K_r ）の関係を逆算した。

d) 解析結果

解析結果と実験結果の比較した図を図-6に示す。PWP1とPWP3は実験値と解析値がほぼ一致したが、PWP2は解析値が実験値より圧力水頭が数cm大きい値となった。この原因として、模型内部の不均一性が原因と推測されるが、これ以上の詳細な検討は行っていない。図-7に浸透開始から660 sec後の飽和度分布図を示す。この図より、実際模型内部のほとんどが飽和状態となっていることが分かる。

3.2. 斜面安定解析

a) 解析対象とする浸透時刻

実験結果より、浸透開始から658 sec後に浸透崩

表-2 浸透流解析に用いたパラメータ

透水係数 (k) [cm/sec]	0.083
有効間隙率 (n_e)	0.327
比貯留係数 (S_s) [1/cm]	0.0083

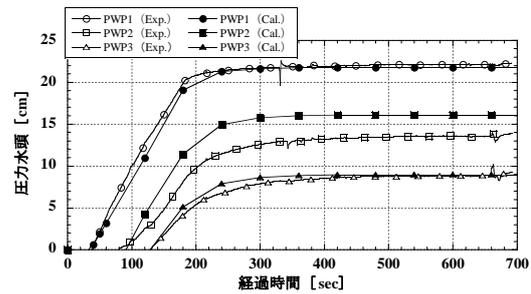


図-6 圧力水頭の経時変化

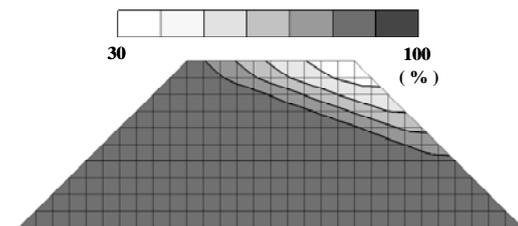


図-7 飽和度分布図（浸透開始から660 sec後）

表-3 安定解析に用いたパラメータ

単位体積重量 γ_s (kN/m ³)	15.0 (Dc=70%)
c' (kPa)	0.1
ϕ' (°)	33.0 (Dc=70%)

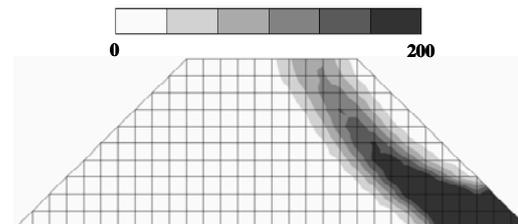


図-8 相対塑性ひずみ速度分布図
(浸透開始から660 sec後)

壊が確認された。そこで、浸透時刻から660 sec後の浸透流解析結果を用いた斜面安定解析を行ない、安全率とすべり面の発生位置を求めた。

b) 境界条件（荷重、拘束）

荷重の境界条件では、表法面に作用する水圧を想定した荷重を作用させた。拘束条件は、模型底面で完全拘束とし、全節点で奥行き方向の変位を拘束した。

c) 安定解析に用いたパラメータ

模型地盤の単位体積重量は15 kN/m³であり、斜面安定解析に必要な土の強度定数は、要素試験より求めた。解析に用いたパラメータの値を表-3に示す。

d) 解析結果

図-8に浸透開始から660 sec後の相対塑性ひずみ速度分布図を示す。この図より、裏法側の天端短部から天端中央方向へ約5.0 cmの位置から裏法尻部に向かって滑り面が発生していることが

わかる。これは、模型実験での滑り面発生位置に近似している。(図-3参照) また、安全率は、 $F_s = 1.07$ とほぼ1.0に近い値を示した。これらのことより、崩壊時刻における浸透崩壊模型実験結果を浸透流解析と斜面安定解析を連成させることにより、精度よく表現可能であることを確認できた。

4. 浸透崩壊模型実験 (Case2)

4.1 実験概要

図-9 に実験概要図を示す。図に示すように、基礎地盤上に両側の法勾配 1:1 の堤体を突固め法により作製した。地盤材料は、東北硅砂 6 号と藤森粘土を質量比 3:1 で混合した人工中間土を用いて、基礎地盤部を $D_c = 80\%$ 、堤体部 $D_c = 70\%$ で作製した。表-4 に使用材料の物理特性(透水係数のみ)と強度特性を示す。尚、実験時は、堤体内部の間隙水圧の経時変化を測定するため、間隙水圧計 7 個を図-9 のように設置した。

実験方法は、一定流量で表法側と裏法側の外水位を上昇させ、図-9 に示す基準高さより 15 cm 上部まで水位を上昇させ、まず、基礎地盤部分を飽和させた。堤体内部の間隙水圧計を用いて、堤体に内部が定常状態になったことを確認してから、次に、再度表法側の外水位のみ流量 5 l/min で上昇させ、浸透破壊が生じるまで待った。このとき、裏法側の外水位高さは 15cm で維持した。尚、実験結果を表すとき、便宜上「浸透開始」は外水位の水が堤体の表法先端に触れた時刻を表すものとする。

4.2 実験結果

実験時における堤体内部と表法側外水位に設置した間隙水圧計の経時変化を図-10 に示す。基礎地盤を飽和させた後、表法側外水位を 5 l/min でゆっくり上昇させたところ、表法側外水位高さ H (以後、 H と表現する) が約 34 cm (浸透開始より 585 sec 経過後) に到達したときに堤体裏法側端部において亀裂が発生し、 $H=37$ cm (浸透開始より 779 sec 経過後) になったとき堤体裏法部において滑り崩壊が生じ、その後破堤に至った。図-11 に、滑り崩壊が生じたときの様子を示す。同図より、基礎地盤との境界面を境に、天端中央部付近から裏法尻にかけて堤体部のみ滑り崩壊が生じていることがわかる。以上のことから、堤体裏法尻部に亀裂が入ったときは、堤体内部の間隙水圧は変化しなかったものの、滑り崩壊が生じることにより裏法側の間隙水圧が急上昇し、さらに、表法側の間隙水圧も、滑り崩壊が生じることによって裏法側の浸出条件が変化し、間隙水圧が上昇したと考えられる。

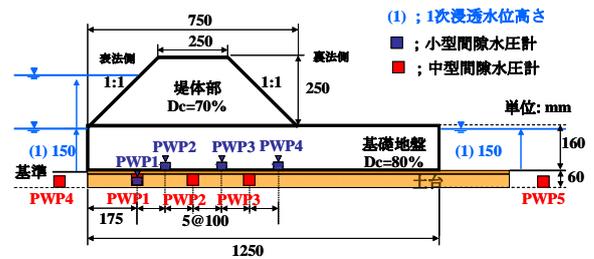


図-9 実験概要図

表-4 使用材料の強度特性

透水係数 (cm/s)	8.3×10^{-2} ($D_c=70\%$)
	2.1×10^{-2} ($D_c=80\%$)
単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	15.0 ($D_c=70\%$)
	17.2 ($D_c=80\%$)
c' (kPa)	0.1
ϕ' (°)	33.0 ($D_c=70\%$)
	34.0 ($D_c=80\%$)

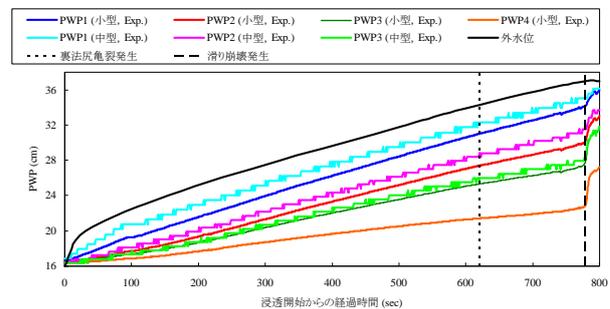


図-10 間隙水圧計の経時変化

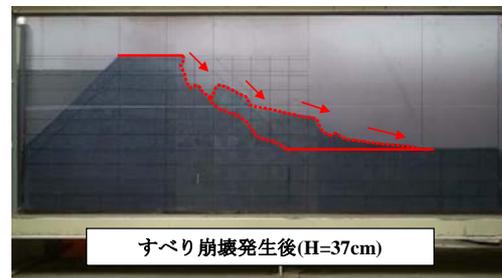


図-11 模型地盤の崩壊形態 (外水位 $H = 25$ cm)

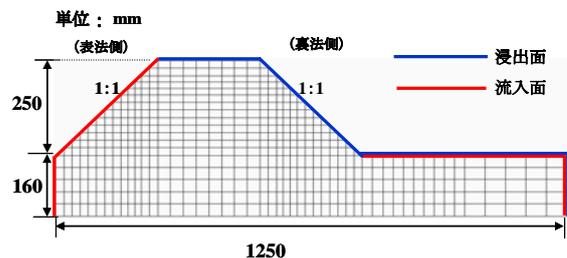


図-12 解析メッシュ

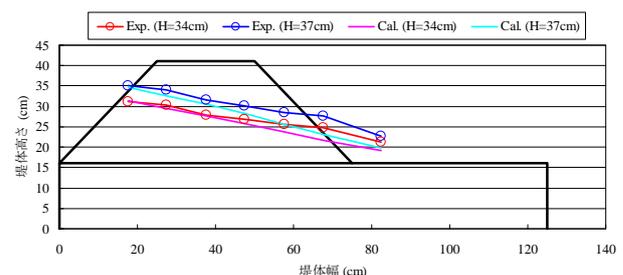


図-13 実験値と解析値の比較

5. 模型実験の解析シミュレーション

本解析では、先に行なった模型実験を、浸透流解析により、堤体内部の浸透水における間隙水圧、飽和度の経時変化を数値的に再現し、これらによる堤体内のせん断強度変化を考慮した斜面安定性解析を行なうことで模型実験の再現解析を試みた。詳細は先述したため省略する。

5.1 浸透流解析結果

図-12に解析メッシュを示し、 $H = 34 \text{ cm}$ と $H = 37 \text{ cm}$ のときの解析結果と実験結果の比較した図を図-13に示す。堤体裏法尻部において実験値の方が大きい値を示したものの、おおよそ一致しているといえる。図-14に $H = 37 \text{ cm}$ のときの堤体内部の飽和度分布図を示す。この図より、実際模型内部のほとんどが飽和状態となっていることが分かる。

5.2. 斜面安定解析

a) 解析対象とする浸透時刻

実験結果より、浸透開始から $H = 37 \text{ cm}$ のとき浸透崩壊が確認されたことから、 $H = 37 \text{ cm}$ のときの浸透流解析結果を用いた斜面安定解析を行ない、安全率とすべり面の発生位置を求めた。

b) 境界条件（荷重、拘束）

荷重の境界条件では、表法面に作用する水圧を想定した荷重を作用させた。拘束条件は、基礎地盤底部と側面を拘束し、全節点で奥行き方向の変位を拘束した。

c) 解析結果

図-15に $H = 37 \text{ cm}$ のとき（浸透開始から585 sec後）の相対塑性ひずみ速度分布のコンター図を示す。この図より、天端中央部付近から裏法尻へ滑り面が発生していることがわかる。これは、模型実験での滑り面発生位置に近似している（図-11参照）。また、このときの安全率は $F_s = 0.96$ と $F_s < 1$ となったことから、崩壊時刻における浸透崩壊模型実験結果を浸透流解析と斜面安定解析を連成させることにより、精度よく表現可能であることを確認できた。

6. まとめ

飽和不飽和浸透流解析と剛塑性有限要素法を連成させた解析手法の妥当性を、中間土を用いた浸透模型実験を行い、その再現解析を行うことにより検証した。その結果、堤体の形状に関わらず、浸透流解析によって堤体内部の間隙水圧分布や飽和度分布などの定量的な評価が可能であれば、崩壊形態を表現できることを確認した。

7. 今後の課題

今後は、降雨による天端からの浸透を考慮した浸透破壊現象についても実験を行い、再現解析を試みるものとする。

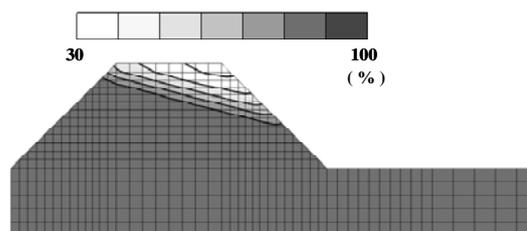


図-14 浸透流解析結果（ $H=37\text{cm}$ 、飽和度分布）

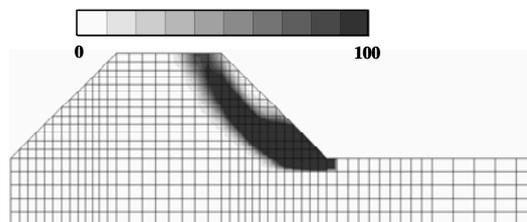


図-15 安定解析結果（相対塑性ひずみ速度分布）

8. 参考文献

- 1) 堀越俊寛：長岡技術科学大学修士論文，2007.
- 2) 坂本ら：河川高水位時の堤体安定性評価に関する事例解析，第43回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1123～1124，2008.