

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

国立研究開発法人土木研究所 正会員 〇富澤 彰仁, 東 拓生
石原 雅規, 佐々木哲也

1. 目的

河川堤防の安全性照査では、降雨と河川水位を外力として与え、非定常浸透流解析によって堤体の浸潤挙動を評価している。降雨は出水前の事前降雨と出水時の本降雨に大別され、事前降雨では、出水前の堤防内の上に凸の浸潤面を表現するために、1mm/hの降雨を一定時間与えるものとされている¹⁾。秋場ら²⁾による、大型模型を用いた降雨・水位上昇実験結果に対する解析的検証では、水位変動のみを対象とした浸潤面の再現は概ね可能である一方、降雨のみによる浸潤面は、実験結果が解析結果より大幅に低い結果となっていることから、設計においては過度に安全側となる可能性が考えられる。そこで、本研究では既往の降雨実験を対象に、土の不飽和特性や透水係数の異方性に着目して、降雨による堤体の浸潤挙動の検証および再現を試みた。

2. 実験模型及び実験方法

大型模型は図1に示すように、厚さ0.3mの基盤層の上に、縦断方向6.5m、幅7m（天端幅1m、のり面水平幅6m）、高さ3mで作製し、堤体背後にはフィルタ材を介した排水槽を設けた。堤体は細粒分含有率 $F_c=22\%$ 、砂分含有率 $S_c=76\%$ の砂質土を用いており、含水比約17%、締固め度約86%とした。堤体土の透水性を把握する目的で、室内および原位置で行った透水試験結果から、（室内） $k_{15}=2.9\times10^{-5}(\text{m/s})$ 、（原位置） $k_s=1.6\times10^{-4}(\text{m/s})$ を得ている。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を設置し、模型に1mm/hの降雨を400時間与え、各計測器で計測した。

3. 実験結果

各時間における堤体内浸潤面の発達過程を図3に、法肩部における水位の時系列を図4に示す。浸潤面上昇量は、天端に向かうほど顕著であるものの、実験終了時($t=400\text{h}$)における水位は、堤体下面から約0.33mである。一方、法肩部の水位の時系列では、実験開始から100時間程度までは、顕著な上昇は見られず、100時間以降に上昇傾向となるが、その勾配は300時間以降で緩やかとなり、実験終了時においても、水位の上昇は続いており、定常状態に至っていない。なお、本実験において表面流出は確認されていないことから、降雨は全て堤体内に浸透しているものと考えられる。

4. 実験結果の再現解析

4.1 飽和透水係数の推定

定常状態における堤体内水位を把握することができれば、浸透流解析を用いて飽和透水係数を逆算することが可能である。室内および原位置での透水係数は1オーダー程度異なることから、水位の発達形状に着目し、定常状態における水位および飽和透水係数の推定を試みた。実験時における天端法肩部の水位時系列はS字を描くことから、図3に示す成長曲線($y=Kb^{e^{-x}}$)を用いてフィッティングし、定常時の天端法肩部の水位は堤体下面から+0.36mであると推定した。この定常水位を再現可能な飽和透水係数として、表1に示す堤体部の透水係数を変化させた浸透流解析結果より、 $5.0\times10^{-5}(\text{m/s})$ とした場合に最も実験時水位と整合する結果となり、事前に実施した2通りの透水試験結果の平均値程度の透水性となった。

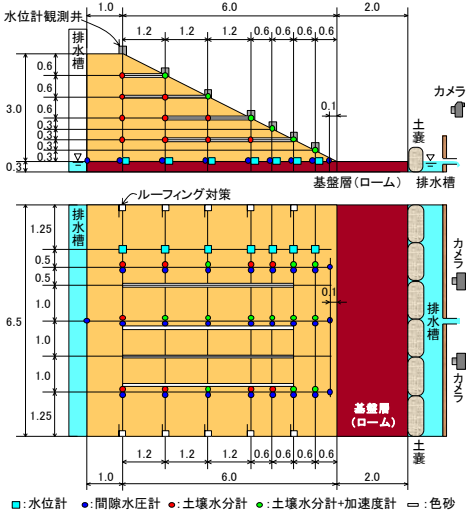


図1 大型模型概要図

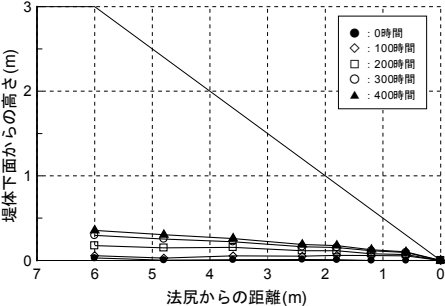


図2 実験結果(堤体内水位)

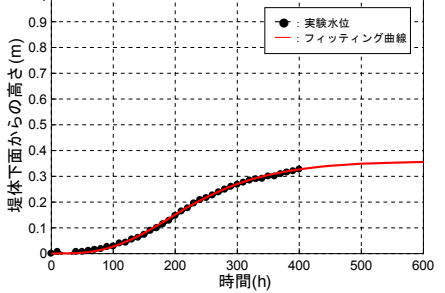


図3 実験結果(法肩部水位)

表1 透水係数による法肩水位

透水係数(m/s)	法肩部における解析水位(m)
1.00E-05	+0.99
5.00E-05	+0.37
1.00E-04	+0.23

※実験時の水位は+0.36m

キーワード 河川堤防, 浸透, 不飽和特性, 模型実験, 異方性

連絡先 〒350-8516 茨城県つくば市南原1-6 (国研) 土木研究所土質・振動チーム TEL 029-879-6771

4.2 不飽和特性が浸潤挙動に与える影響

河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)(以下、「手引き」と呼ぶ)では、礫質土、砂質土、粘性土について、図4に示す不飽和特性を与えており、飽和時の見かけの体積含水率は、礫質土および砂質土で0.20、粘性土で0.1である。一方、堤体材料に使用されている土を対象として実施されている保水性試験結果(排水過程)から、飽和時の体積含水率は0.47であり、「手引き」と比較して大きい。そこで、浸透流解析における不飽和特性の影響を把握するため、表2のCASE1~3に示すように不飽和特性を変化させ、模型実験の再現解析を行った。ここで、実施されている保水性試験は、排水過程を対象としている。一般的に、水分保持曲線はヒステリシスループを描き、同一サクションにおける水分保持量は、給水過程で小さいことが知られていることから、降雨実験のように給水過程を対象とした実験において、排水過程の不飽和特性を用いると実験結果を再現できない可能性が高い。そこで、既往文献で透水性のよい土の給水過程に対して設定されているVGモデル³⁾(図4)をCASE3として追加した。なお、堤体土の透水係数は 5.0×10^{-5} (m/s)とし、CASE2における θ - K_r 関係は、手引きの砂質土を参考に、飽和時の体積含水率を0.47に引き伸ばした。検討結果を図5に示す。CASE1およびCASE2において、法肩部の水位は上に凸の曲線を示し、実験水位と挙動が大きく異なる一方、CASE3では、実験と比較して、やや大きな水位を示すものの、S字の発達形状は同様である。これは、VGモデルの不飽和特性が、降雨開始後初期段階の体積含水率の低い状態において透水性が低いことによるものと考えられる。

4.3 透水係数の異方性が浸潤挙動に与える影響

築堤では、撒出し・転圧を繰返すことから、一般的には、水平方向の透水性が鉛直方向よりも大きくなると考えられる。模型も同様の作製方法であることから、「手引き」、「保水性試験結果」、「VGモデル」の3つの不飽和特性について、水平方向の透水係数を5倍、10倍とし、異方性を考慮した検討を実施した。ここで、地盤全体の透水性が過度に大きくならないよう、鉛直方向の透水性は1/5、1/10とした。各ケースの条件を表2に示す。図6に示す検討結果より、「手引き」および「保水性試験結果」の不飽和特性では、発達形状が再現できないが、「VGモデル」では、CASE3b'において実験水位と整合する結果となる。ただし、透水係数の異方性が水位の発達形状に与える影響は、不飽和特性と比較して小さいものと考えられる。

5. まとめ

大型模型を用いた降雨実験について、不飽和特性および透水係数の異方性に着目し、解析的に検証した結果、不飽和特性をVGモデルとし、水平方向の透水係数を鉛直方向の10倍としたケースで実験水位を精度良く再現可能となった。水位の発達形状への影響は、異方性よりも不飽和特性が支配的である。今回の検討は事前降雨のみだが、事前降雨以上に本降雨時に不飽和特性の影響等が現れる可能性もある。今後、設計における不飽和特性の与え方に関して慎重に検討を進めていきたい。

(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) 秋場ら: 大型模型実験の降雨・河川水上昇による堤体内浸透挙動に関する研究, 第72回年次学術講演会, 2017.9
- 3) 李: 河川堤防における安全性評価に関する研究, 京都大学, 2008, 博士論文

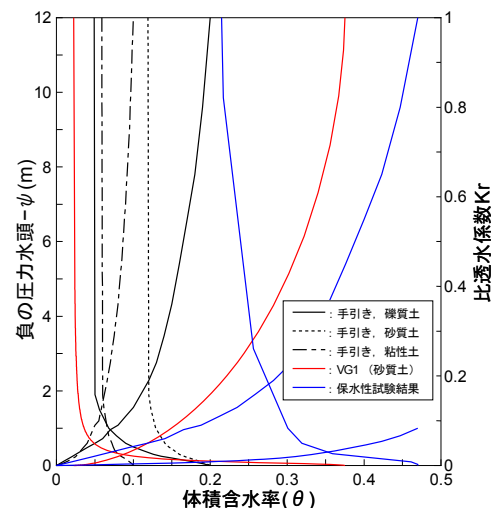


図4 検討に用いた不飽和特性

表2 検討ケース

検討ケース	不飽和特性	堤体透水係数	
		kh(m/s)	kv(m/s)
CASE1	手引き, 砂質土	5.00E-05	5.00E-05
CASE2	保水性試験結果	5.00E-05	5.00E-05
CASE3	VGモデル, 砂質土	5.00E-05	5.00E-05
CASE a'	CASE1,2,3に対応する不飽和特性	5.00E-05	1.00E-05
CASE b'		1.00E-04	1.00E-05
CASE a''		2.50E-05	5.00E-06
CASE b''		5.00E-05	5.00E-06

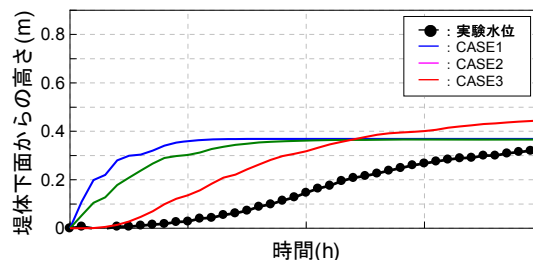


図5 不飽和特性による水位の比較

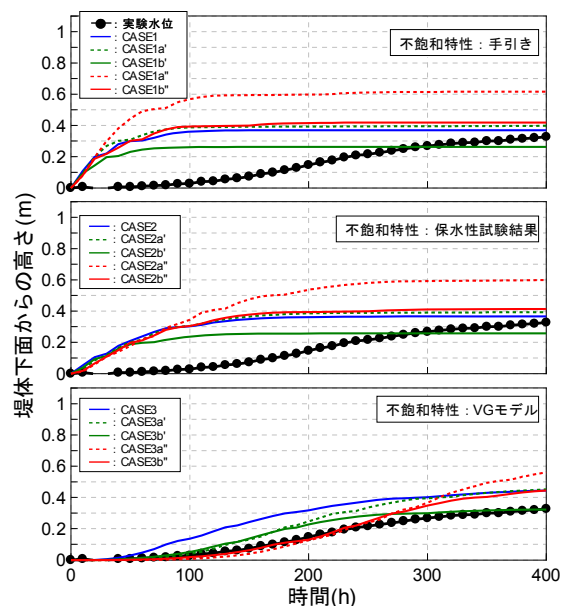


図6 透水係数の異方性による水位の比較