

遠心模型実験による河川堤防の高水時パイピング破壊のシミュレーション

愛媛大学院 学生会員 ○田村 元希
愛媛大学院 正会員 岡村 未対

1. はじめに

高水による河川堤防の被災形態の一つにパイピングがある。しかし、パイピング現象は、そのメカニズムが未だ解明されておらず、縮尺模型実験における相似則も明らかになっていない。本研究では、国総研において行われた大型模型実験（笹岡ら，2017）を対象として、そこで発生したパイピング破壊や水圧分布を遠心模型実験によって再現することを試みた。

2. 実験概要

図1に大型模型実験の模型図面を示す。基礎地盤は6号硅砂の表層と、その下の透水性の高い3号硅砂の砂層からなる。このような基礎地盤の構成は、外水位が上昇すると透水性の高い3号硅砂層に速く浸透し、より大きな水圧が作用することで3号硅砂層から6号硅砂層への上向き浸透力が発生し、土被り圧の小さい堤内側の法尻でパイピングや内部侵食が起きやすいと考えられる。その基礎地盤の上に関東ロームを締固めて高さ2.6m法面勾配1:2の堤体が作製された。

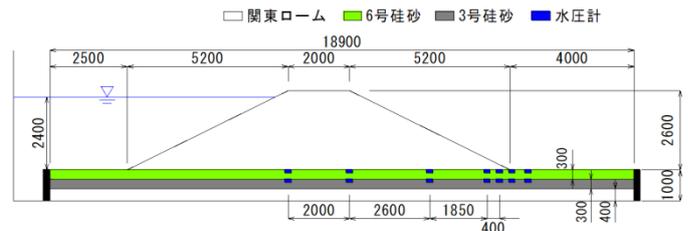
本研究では、大型模型実験と同一の材料を用いて1/40の縮尺模型を作製し、40gの遠心加速度場にて実験を行った。図2は遠心模型を原型スケールで表したものである。遠心模型では、使用した土槽の大きさの制約から、水平地盤部の長さを短くした。堤内側では遠心模型の行き止まり部が法尻に近いため、遠心模型ではより法尻部分の水圧が大きくなり、パイピングが生じやすい。なお、大型模型実験における各土層の密度が不明であるため、遠心模型実験では表1に示した中密程度の密度とした。

土中の流れを考えると、Darcy則の成立する浸透現象や土中を流れる流体が土粒子から受ける抗力の非線形性を考慮した非線形Darcy流れでは、土材料が同じであれば相似則が成り立つ。粘性項や非定常項を考慮した場合でも同様のことが言える（泉，2016）。一方、パイピングを含む浸透破壊の相似則については不明なことが多い。

流体には水と水の40倍の粘性を持つ粘性流体を用いて実験を行った。何れの場合も動水勾配は原型と一致するが、流速は水を用いると原型の40倍となる。実験条件をまとめて表1に示す。外水位は全て大型模型実験と同じ2.4mとした。

3. 実験結果

各ケースと大型模型実験の外水位の時刻歴を図3に示す。なお、この図の横軸の時間は原型スケールに換算した時間 $tp (=tm \times n^2/\nu)$ である。ここで、 tm は実験での時間、 n は遠心加速度比、 ν は流体の粘性係数である。何れの場合でも大型模型実験と同様に短時間で水位を上昇させ、以後ほぼ一定の高水位に保った。また、原型スケールにおける浸水時間は大型模型実験の浸水時間の約2倍に値する。図4、5に、Case1およびCase2の水圧を、盛土底面を基準として全水頭に整理し、大型模型実験のものと比較した分布図を示す。図中の時刻は浸水開始からの原型スケールの時刻であり、大型模型において750分は法尻から1m地点で崩壊が起きる寸前の時刻である。Case1, 2の水頭分布は6号硅砂・3号硅砂ともに大型模型と概ね一致した。ただし、法尻において遠心模型実験の全水頭がより大きくなった。これは、遠心模型において



単位：mm 図1 大型模型

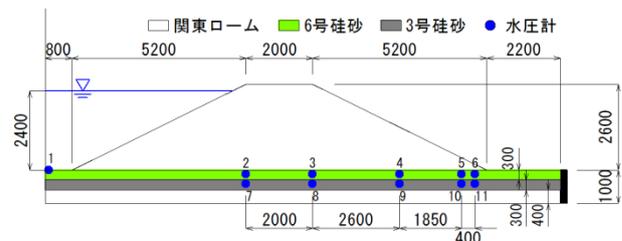


図2 遠心模型（原型スケール）

表1 実験条件

	流体	外水位(m) [原型スケール]	関東ローム			6号&3号 相対密度 Dr (%)
			盛土 締固め度 Dc (%)	基礎地盤 締固め度 Dc (%)	含水比 w (%)	
Case1	40cStの 粘性流体	2.4	85	85	15	55
Case2	水					

堤内側の水平地盤の長さを短くし、より近くに行き止まりを設けたことで法尻の水圧が大きくなったためであると考えられる。

大型模型実験では、60分に堤体法尻部から水が噴出すると共に法尻が約50cmの高さまで崩壊し、1600分に一旦外水位を低下させ崩壊土砂を除去した後に再度外水位を上昇させたところ、堤体が大きく崩壊した(図6, 笹岡ら, 2017)。これに対し遠心模型実験では、法尻の水圧が大きく、また外水位の継続時間も長かったにもかかわらず、Case1, 2ではいずれもパイピング破壊が起きず、Case2で法尻の一部が小さく崩壊しただけに留まり、堤体や基礎地盤の変形・破壊状況は大型模型実験と大きな違いが出た。

Case2の後、堤外側水平地盤部の表層を3号硅砂に変更し、再度浸水実験を行った。基礎地盤内の水圧はCase1およびCase2とほぼ同じであり、堤外側地盤表面の土質の影響はないことがわかった。さらにその後、外水位を越流寸前の高さ2.6mまで上昇させたが、堤内地盤表面にボイリングは発生せず、法尻から集中して流出する水も観察できなかった。さらに、実験中に高解像度カメラで撮影した法尻部の画像解析から、基礎地盤の土粒子の移動も認められなかった。遠心模型実験においてパイピングが発生しなかった原因の一つとして、模型作製時に上層の6号硅砂の粒子が下の3号硅砂層に入ってしまったことが考えられる。

4. まとめ

- (1)水圧分布は概ね一致しており、浸透現象については再現できることがわかった。
- (2)遠心模型では、大型模型よりも継続時間を長くし、行き止まり部を堤体に近く設定し、外水位を越流寸前まで上昇させるなど、大型模型実験よりかなり厳しい条件だったが、パイピング現象は起きなかった。
- (3)実験の精度を向上すると共に、パイピング現象に関する相似則をさらに検討する必要がある。

参考文献

笹岡ら(2017), 大型模型実験に基づく河川堤防におけるパイピング発達過程の考察, 河川技術シンポジウム(投稿中)

国総研河川研究室:

<http://www.nilim.go.jp/lab/fbg/download/movie/movie.html>

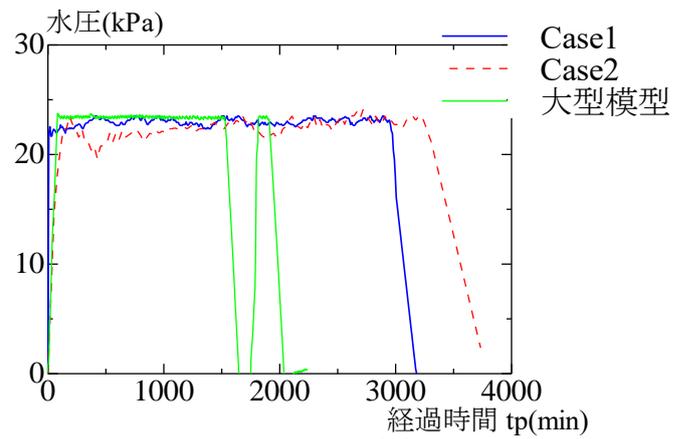


図3 外水位の時刻歴

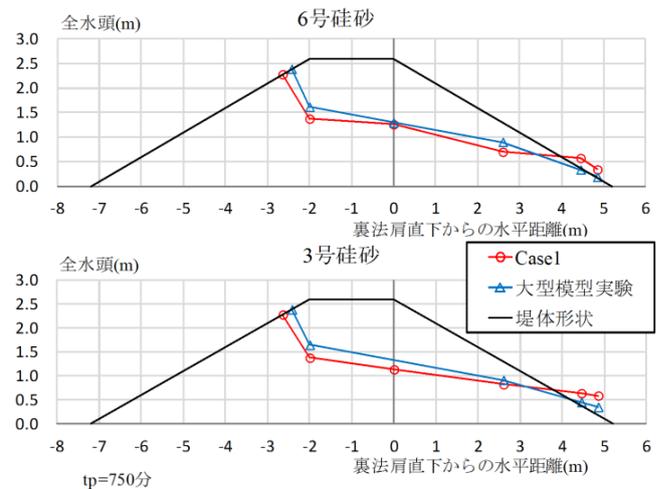


図4 基礎地盤内の水頭分布 (Case1)

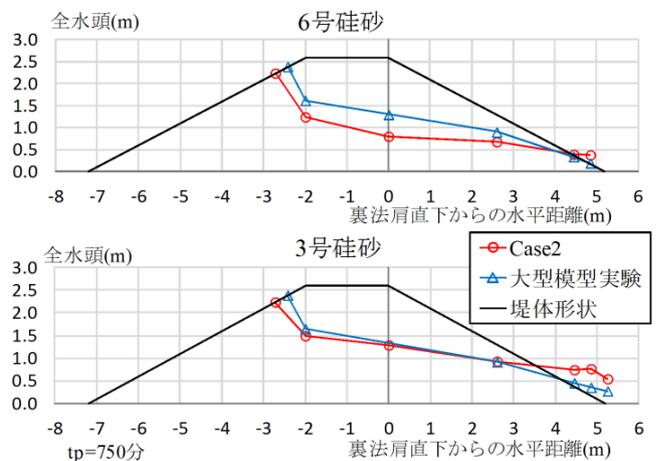


図5 同上 (Case2)



図6 大型模型実験の法面崩壊 (国総研河川研究室 HP, 20時間後)