

河川堤防の進行性破壊における破壊形態へ 基礎地盤および堤体地盤材料の土質が与える 影響の分析

ANALYSIS WHICH IS MATERIAL OF FOUNDATION AND BODY
ABOUT PROGRESSIVE FAILURE OF RIVER LEVEE

吉田直人¹・秋場俊一¹・石原雅規¹・佐々木哲也¹
Naoto YOSHIDA, Shunichi AKIBA, Masanori ISHIHARA and Tetsuya SASAKI

¹正会員 工修 国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム
(〒305-0035 茨城県つくば市南原1-6)

Small collapse at landside toe of levee may begin due to a rise of river water or rain, and then small collapses may be occurred in a chain reaction and reach big collapse finally. Such a progressive failure may be called internal erosion. Evaluation method for the failure of levee has not been established.

In this research, we experimented on the model test by something with different material about progressive failure.

As a result, we made it clear about the influential part of the progressive failure. It is found out difference in soil material has influence progressive failure of occurrence condition and speed.

Key Words : Levee, Model test, Seepage, Progressive failure, Internal erosion, Slip

1. はじめに

河川堤防の浸透に対する安全性評価においては、河川水位や降雨の外力を与えた非定常浸透流解析を実施し、得られた浸潤線をもとに円弧すべり計算を行うほか、局所動水勾配等によってパイピングや盤ぶくれの評価を行うこととなっている¹⁾。一方、外水位の上昇時や降雨時にのり尻が小崩壊した後、徐々に崩壊がのり面の上方に拡大する進行性の破壊を呈することがある。このような進行性の破壊は、すべり破壊やパイピング現象と異なり、堤防の浸透に対する安全性照査において、照査項目となっていないが外力の継続時間やのり面の勾配、堤体の材料によっては継続的に進行してのり面上方に達し、堤防の決壊といった重大な被災を招く恐れを有していると考えられる。また、進行性破壊の生じる条件や進行の速度などについて必ずしも明らかとなっておらず、基礎地盤および堤体地盤材料の粒度組成、せん断強度、のり尻付近の水位や間隙水圧、動水勾配や流速など多種多様な要因が影響していることが考えられる複雑な問題である。そこで、筆者らは、進行性破壊に及ぼす多種多様な要

因の影響を解明するため、模型実験等を行ってきた^{2~5)}。

本研究では、さらに、基礎地盤および堤体を粒度組成の異なる材料を用いて模型実験を実施した結果について、基礎地盤および堤体材料の土質定数に着目して、進行性破壊の生じる条件や、進行性について分析を行った。なお、模型実験については、筆者らが既報で行った実験結果を含めて報告する。

2. 模型実験の概要

模型実験は、奥行き1.5×長さ3.0×高さ1.0mの鋼製土槽内に河川堤防ののり尻を切り出した模型を作製して行った。実験模型の形状は図-1に示すとおりで、厚さ0.2mの基礎地盤の上に、高さ0.75m、のり面勾配1:2の堤体を設置した。基礎地盤および堤体は、最適含水比に調整した材料を使用し、締固め度90%を目標として作製した。実験に使用した基礎地盤および堤体材料の特性を表-1に整理するとともに、粒径加積曲線を図-2に示した。実験は、模型を基礎地盤表面の高さまで2日間以上の時間をかけて、十分に飽和させた上で、給水槽の水位を30

分間で、模型堤体部の形状で平均動水勾配が0.35となる高さまで上昇させ、その後、給水槽の水位を一定に保つようにポンプで給水させることで、模型内に浸透させた。また、水位上昇から24時間経過後も破壊が生じない場合は、さらに給水槽の水位を平均動水勾配0.4, 0.45となる高さまで上昇させた。

計測は、給水タンク内に1個、堤体直下の基礎地盤に7個の合計8個のマノメータと、堤体内ののり尻先端部の間隙水圧計で行った。また、のり尻の直上及び模型正面から一定時間間隔で写真撮影を行い、変状の進行状況を観察した。実験終了後には、崩壊領域を把握するため、土層強度検査棒⁶⁾で貫入抵抗を計測した。なお、模型への浸透は、模型のり面が半分以上崩壊するか、崩壊形状が概ね安定するまで継続した。

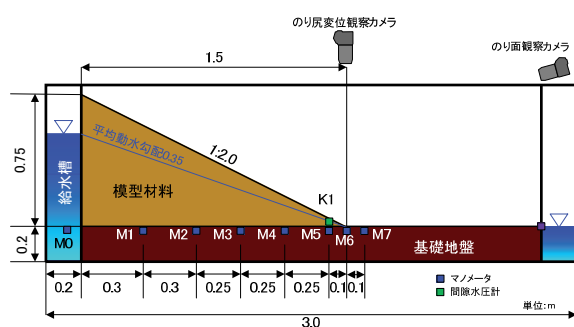


図-1 実験模型の断面図

表-1 実験ケース

	材料	礫分 Cc	細粒分 Fc (%)	有効応力		透水係数 k (m/s)	締固め特性		基礎 地盤
				c' (kN/m ²)	φ' (kN/m ²)		ρ _{dmax} (g/cm ³)	W _{opt} (%)	
CASE1	材料①	1.8	16.9	9.5	20.7	3.77×10^{-6}	1.746	16.7	砂質礫
CASE2	材料②	35.9	11.8	9.7	39.3	2.03×10^{-5}	1.889	11.2	
CASE3	材料③	0.6	10.6	27.5	34.7	7.06×10^{-6}	1.987	10.1	
CASE4	材料④	0.0	15.9	18.7	37.2	1.49×10^{-5}	1.741	14.4	
CASE5	材料⑤	15.2	15.3	11.2	38.0	1.60×10^{-6}	1.863	14.3	
CASE6	材料⑥	0.3	54.3	7.2	42.3	2.49×10^{-7}	1.531	25.1	
CASE7	材料①	1.8	16.9	9.5	20.7	3.77×10^{-6}	1.746	16.7	粘性土
CASE8	材料⑦	1.7	34.0	1.5	37.8	1.72×10^{-5}	1.661	19.1	

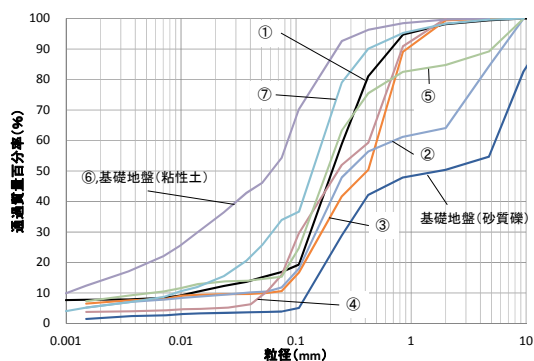


図-2 堤体および基礎地盤材料の粒度曲線

3. 進行性破壊の生じる条件の検討

(1) 変状の発生と地盤材料の関係

筆者らが行った既報の実験結果において把握した、のり尻からの進行性破壊の発生とその過程を図-3に示す。

進行性破壊は、以下の過程で発生と進行していると推定している。

STEP1：のり尻先端付近の浸潤

STEP2：圧力水頭の上昇に伴う水平変位の発生

STEP3：水平変位に伴う引張亀裂の発生

STEP4：STEP2, 3の繰り返しによる亀裂の拡大・進行

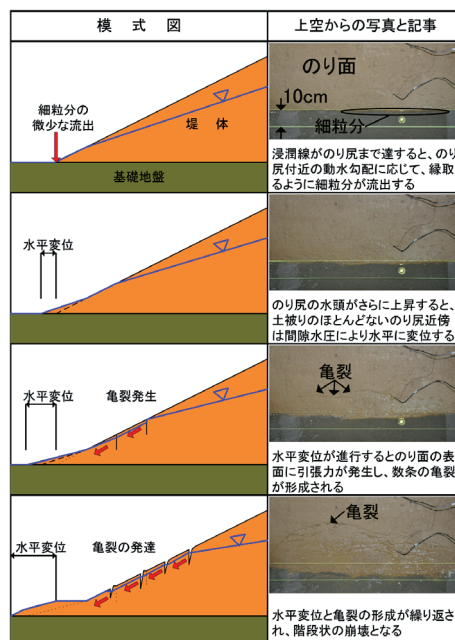


図-3 進行性破壊の発生と進行過程

この崩壊過程から、のり尻から発達する進行性破壊は、のり尻の水平変位を契機として、拡大する現象と推定しており、水平変位の増加について着目して整理していた。

そこで、本実験においても同様に、基礎地盤や堤体材料の異なるケースにおいて進行性破壊について分析するため、のり尻付近の動水勾配と水平変位の関係を整理した。動水勾配は、堤体直下の基礎地盤に設置したのり尻から堤体方向へ0.1mの地点のマノメータの値から求めた。また、水平変位はのり尻直上で撮影した写真の画像から、堤体がのり尻方向へ変位した変位量を読み取り求めた。その結果を図-4に示す。

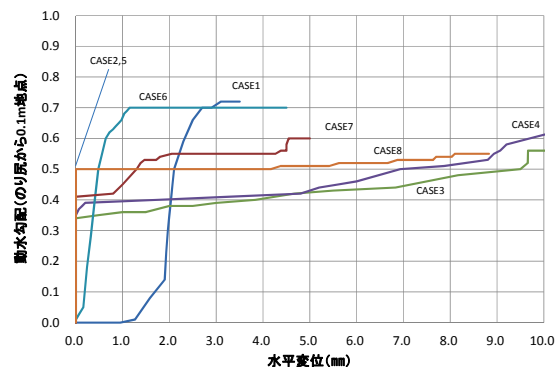


図-4 のり尻付近の水平変位と動水勾配

また、さらに水平変位が生じ始める時間とのり尻先端部の圧力水頭の関係について図-5に整理した。

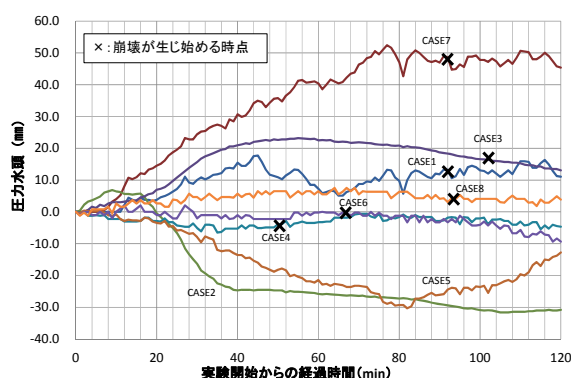


図-5 実験開始からの経過時間とのり尻先端部の圧力水頭

実験終了後の土層強度検査棒での貫入抵抗の調査結果より、基礎地盤へはわずかな貫入量しか示さず、堤体のみが崩壊していることが確認された。

本実験で進行性破壊が発生したケースでは、既報の実験結果と同様に、のり尻付近の動水勾配が0.3～0.7付近で水平変位量が急激に上昇し、崩壊が進んだ。なお、礫分を10%以上含むCASE2, 5については、水平変位がわずかに生じるが進行性破壊は発生しなかった。これは、既報の実験結果でも、ある程度の礫分を含んでいる場合で、進行性破壊が発生しないことが確認されている。なお、これらのケースは、さらに給水槽の水位を上げて浸透させたが、安定的な状態を保った。

また、CASE2, 4, 5, 6では、堤体ののり尻先端部に設置した間隙水圧計の値が、実験開始時の初期値から上昇する傾向を示さなかった。礫分を多く含む材料であるCASE2, 5については、実験開始時の初期から圧力水頭がわずかに上昇した後、減少する傾向が見られた。これらのケースは、のり尻付近で微少に水平変位を生じており、圧力水頭が初期値より減少していることが考えられるが、その後、水頭は上昇せず崩壊に至らなかった。

CASE4, 6については、堤体ののり尻先端部の圧力水頭が上昇しなかったものの、崩壊に至っている。これらのケースから、堤体内ののり尻付近の圧力水頭が上昇せずとも、堤体直下の基礎地盤の水圧の上昇のみで崩壊する場合もあることがわかった。CASE4の材料は礫分を含まず、粘土分含有率が非常に少ない材料であり、破壊の発生とともに、水平変位が急激に上昇する崩壊を示したが、崩壊の要因について特定に至っていない。

次に、CASE6の堤体材料については、細粒分含有率が50%を超えており透水係数が小さく、透水係数が基礎地盤と100倍異なるため、基礎地盤からの揚圧力の作用により、破壊の発生の契機となった可能性が推定される。

本実験結果から、のり尻からの進行性破壊は、のり尻の水平変位が生じてその量がわずかな場合、進行性破

壊が発生しない場合があることを確認した。また、進行性破壊の発生には、のり尻付近の動水勾配の上昇だけではなく、礫分含有率や、堤体と基礎地盤の透水係数の関係などが影響することが示唆された。

(2) 崩壊形態と地盤材料に関する分析

進行性破壊が発生した実験ケースについて、模型の法面の中段まで破壊が進んだ時点の状況を図-6に示す。堤体材料が細粒分を30%以上含む材料のCASE6, 8では、のり面表面に生じるのり面方向の亀裂幅の間隔が他の細粒分含有率の小さい材料のケースと比較して大きい傾向が見られた。これは、既報に示される大型模型による浸透崩壊実験⁷⁾において、細粒分含有率が30%, 50%の堤体材料へ浸透させた結果、のり面に生じる亀裂の位置が細粒分含有率10%の結果と比較して、のり面の高い位置で生じていることが確認されており、本実験結果と合致する結果となっている。

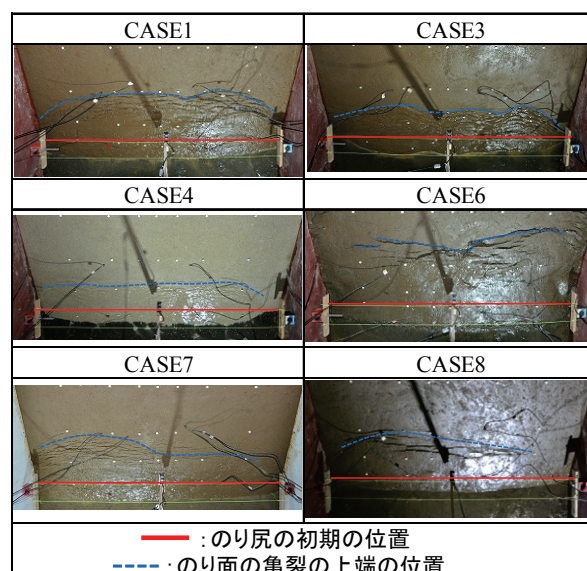


図-6 実験開始からの破壊初期の状況

また、他の細粒分含有率の小さい材料のケースにおいても、亀裂の幅がある一定の間隔の幅を有して、崩壊が進んだ。この亀裂幅を有して崩壊していく現象から、連続的なすべりが生じていることが推定される。ただし、亀裂の幅は表-1に示す室内土質試験結果の粘着力との関係は不明瞭であるが、粘土分含有率が関係している可能性が考えられる。なお、亀裂は1～2mm程度の非常に小さい幅のケースもあることから、のり面表面では、非常に小さい粘着力が働いている可能性が考えられる。

4. 進行性破壊の進行性の検討

(1) 透水係数と破壊の進行速度

図-7に崩壊開始時点から、のり尻から堤体方向に水平距離で0.3mの地点が崩壊するまでの時間と透水係数の関

係を示す。進行性が遅く0.3mの地点まで崩壊が到達する時間が非常に長い実験結果もあるため、ここでは透水係数に加え崩壊するまでの時間についても対数で整理した。また、ここでは既報に示す実験結果を合わせて整理した。概ね堤体の透水係数が大きいほど進行性が早い傾向が見られる。また、堤体が同じ材料のケースの比較から、基礎地盤の透水係数についても、大きいほど進行性は早い傾向が見られる。

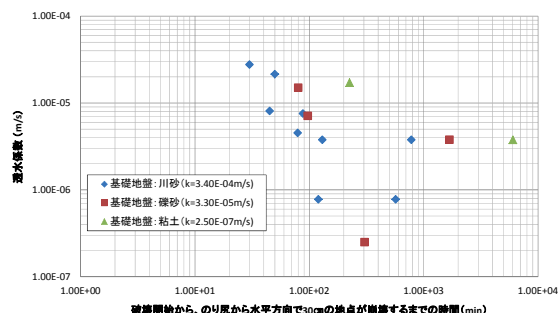


図-7 破壊開始から堤体方向に水平距離で0.3mの地点が崩壊するまでの時間と透水係数

(2) 破壊進行後の状態

実験終了時の崩壊後の堤体模型から、試料採取し、粒度分析により、破壊進行後の堤体模型の粒度分布状況を整理した。ここでは、実験CASE1の結果を示す。

粒度試験用の試料採取位置（断面図）は、以下の図-8に示す位置で、奥行き方向に、模型中央部、中央部から両側に0.1m、0.35mの5測線を取り、1測線33試料の合計165試料を採取し分析を行った。

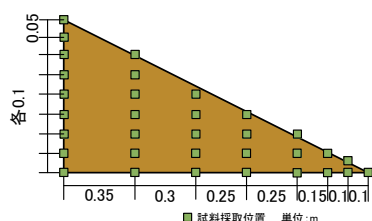


図-8 粒度分析試料の採取位置（断面図）

そこで、実験前後の粒度変化を把握するため、実験前後に粒度構成の変化が無いと考えられる浸潤線より上部の粒度分析の結果を基準として、基準からの増減を確認した。ここでは、大きな変化を示した細粒分含有率の増減の分布図を図-9に示す。粒度分析の結果は、奥行き方向に、概ね同様の値を示していたため、5測線を平均した値で示した。のり尻付近で崩壊した崩土が堆積している領域には、75 μ m以下の細粒分の減少が確認された。

図-6の崩壊時ののり尻の状態からも細粒分のにじみ出していることが確認され、のり尻からの進行性破壊は、細粒分の減少に伴い、崩壊が進行していくことが推察される。

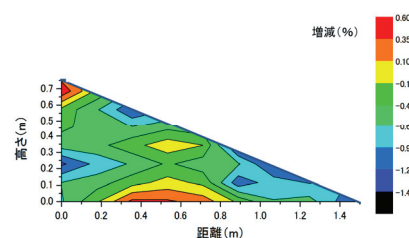


図-9 実験後の堤体材料における75 μ m以下粒径の含有率の増減 (CASE1)

5. まとめ

模型実験の結果より、のり尻からの進行性破壊について、得られた結果を以下に示す。

- ・進行性破壊の発生は、のり尻付近の動水勾配の上昇のみならず、礫分含有率や透水係数などが影響する。
- ・進行性破壊の崩壊形態は、亀裂の幅を有することから、すべりで評価できる可能性がある。
- ・破壊の進行速度は、基礎地盤および堤体の透水係数に概ね依存する。
- ・破壊進行は、細粒分の流出を伴い、進行していく可能性がある。

今後、のり尻の破壊発生時や、崩土の状態などの分析を進め、進行性破壊の発生及び進行性の評価方法について検討予定である。

参考文献

- 1) 財団法人国土技術研究センター:河川堤防の構造検討の手引き（改訂版），平成24年2月。
- 2) 川井正彦，石原雅規，吉田直人:内部侵食とのり尻付近の動水勾配の関係，第1回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，pp45-48，2013年11月。
- 3) 川井正彦，吉田直人，平林学，石原雅規，佐々木哲也:河川堤防の内部侵食発生の初期変状と進行性に関する小型模型実験，第49回地盤工学研究発表会講演概要集，pp985-986，平成26年7月。
- 4) 吉田直人，秋場俊一，川井正彦，石原雅規，佐々木哲也:河川堤防のり面の進行性破壊に関する模型実験における崩壊形状の分析，第11回地盤工学会関東支部発表会 GEOKANTO2014，pp7-10，平成26年9月。
- 5) 秋場俊一，吉田直人，石原雅規，佐々木哲也：河川堤防の進行性破壊とのり尻付近の局所動水勾配の関係に関する解析的検討，第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム委員会報告・講演概要集，pp41-44，平成26年12月。
- 6) 佐々木靖人:土層強度検査棒による斜面土層調査マニュアル（案），土木研究所資料第4176号，平成22年7月。
- 7) 齋藤由紀子，森啓年，佐々木哲也:砂質土堤防の浸透による破壊形態と土質定数に関する大型模型実験，河川技術論文集第17巻，pp.281-286，2011年7月。

(2015. 4. 3受付)