### 公益財団法人大林財団

# 研究助成実施報告書

2022 年度
豪雨に起因した河川堤防崩壊機構に関する研究
金澤 伸一
新潟大学 工学部工学科社会基盤工学プログラム 准教授
研究助成
都市環境工学
150 万円

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

()は、報告書提出時所属先。

## 大林財団2022年度研究助成実施報告書

研究課題	豪雨に起因した河川堤防崩壊機構に関する研究
(概要)	
本研究では	は,近年頻発している突発的な集中豪雨による河川堤防の破堤事例を背景に,堤防が

破壊に至るメカニズムに焦点を当てた.特に,河川堤防の破堤の約7割が越水によるものとされている中,降雨による外水位の上昇速度が堤防の内部構造にどのような影響を及ぼしているか解析を実施する.

特に,不飽和土/水/空気の三相連成問題として堤防の力学挙動を解明し,施工後の降雨や豪 雨による外水位変動が堤体内の応力挙動に及ぼす影響をシミュレーションによって明らかにす る.さらに,堤防が破壊に至る降雨量と外水位変動速度の関係を定量的に明らかにすることで, 河川堤防の長期的な安定性向上に貢献することを目指す.

1. 研究の目的

近年,突発的な集中豪雨が各地で頻発し,それに伴い河川堤防の破堤事例が相次いで報告され ている.昨年10月に発生した台風19号の豪雨においても河川堤防の決壊が報告されており,こ れにより広域的な冠水や浸水の被害を受けた.本来,河川堤防は沿川住民の生活を洪水から守る 極めて重要な防災施設であり,安全を確保しなければならないものである.通常,河川堤防の破 堤原因の約7割が越水とされているが,降雨に起因する外水位上昇速度によっては,河川堤防が 越水破堤する前に,すでに堤体内部において構造崩壊(コラプス)が発生している可能性がある. さらに,洪水あるいは地震による堤防の不安定化や変形のメカニズムは完全には解明されておら ず,現在の技術的知見の整備は十分であると言えないのが現状である.今後も増加傾向をたどる とされる突発的集中豪雨に伴い,河川堤防の破堤も危惧されるなかで,破堤の対策を講じるため にその崩壊メカニズムとその要因分析を精査し解明することは最重要課題であると考える. 本研究では,河川堤防の施工における締固めによる不飽和土の力学挙動を不飽和土/水/空気の 三相連成問題として解くことで,施工(築堤)から供用後の降雨・豪雨に伴う外水位変動解析に よる堤体内の応力挙動の変化と,その後の河川堤防崩壊機構を実験と解析で表現することで,河 川堤防の長期供用における力学挙動の変化を定量的に把握する.特に河川堤防が破壊に至るまで の降雨量による外水位変動速度との関係を明らかにすることを目的とした.

所属機関名 新潟大学工学部工学科社会基盤工学プログラム 申請者氏名 金澤伸一

2. 研究の経過

本研究では、いくつかのカテゴリーに分けて研究を進めた.

まず,研究課題として,近年の気候変動の影響で増加する集中豪雨とその結果としての河川堤防の破壊事例に注目し,既存の堤防の設計や管理が現在の気候パターンに適応していない可能性があることから本研究に着想を得た.

河川堤防が最終的な崩壊に至るまでの外水位上昇速度,降雨履歴などの複合的な外的要因によって堤体内部の構造的弱体化も引き起こされている.特に,降雨量と外水位の変動速度が破壊に 至る重要な因子であると考えられる.

そこで、実験室内で得た結果とシミュレーションを組み合わせてアプローチした. 解析は特定 の降雨イベントを模倣して行い、地盤内の水分移動、応力変化および外水位と降雨量が河川堤防 の力学挙動にどのような影響を与えるかを把握した.

この結果から,堤防の破壊メカニズムと降雨量による外水位変動速度との関係についての洞察 を得た.不飽和土の初期条件と外水位の急激な変化が堤防の破壊にどのように影響を及ぼすかに ついて有意な結果が得られたため,さらに詳細な堤防設計の改善が提案される可能性が示される 結果となった.この段階的なプロセスは,最終的には河川堤防の設計と管理に対する具体的な提 案に繋がると期待される.

#### 3. 研究の成果

(1) 解析手法

本研究では、不飽和土/水/空気連成要素有限法解析プログラムを用いた築堤解析を行う. 締 固めを考慮した築堤解析を行った後、水位上解析を行い、堤体内に及ぼす影響を解析的に表現した、表1に材料定数を、図1に解析モデルの有限要素メッシュ図を、図2に水分特性曲線を示す.

築堤解析では一層 30cm ずつ盛り立て,300kPa で締固めを行い,堤体高さが 5m になるまで繰り 返した.基礎地盤は縦 3m,横 45m とし,堤体は縦 5m,上端 5m,下端 25m,勾配は1:2とした. 堤体の左下縦 0.6m,横 6m の排水層を設けた.図4は同材料による事前解析によって得られた締 固め曲線である.

なお,材料定数はそれぞれ,λ:膨潤指数,κ:圧縮指数,M:限界応力比,m:不飽和透水係数 の形状パラメータ,n:不飽和状態の圧密降伏応力の倍率パラメータ,nE:ECモデルのフィッテ ィングパラメータ,e<sub>0</sub>:初期間隙比,v:ポアソン比,k<sub>x</sub>:水平方向透水係数,k<sub>y</sub>:鉛直方向透水係 数,S<sub>r0</sub>:限界飽和度,G<sub>s</sub>:土粒子比重である.

表1 材料パラメータ(基礎地盤)

表2 材料パラメータ(堤体部)

λ	k	М	m	n	nE	λ	k	М	m	n	nE
0.18	0.037	1.33	0.8	1	1.3	0.18	0.013	1.33	0.8	1	1.3
e <sub>0</sub>	v	kx(m/day)	ky(m/day)	Sr <sub>0</sub>	Gs	e <sub>0</sub>	v	kx(m/day)	ky(m/day)	Sr <sub>0</sub>	Gs
1.2	0.33	0.1	0.1	0.15	2.7	1	0.33	8.7	8.7	0.15	2.7



1) 築堤解析

築堤解析では,一層 30cm ずつ盛り立て,300kPa で締固めを行い,堤体高さが 5m になるまで繰り返した.解析上では,要素を発生させることで盛り立てとし,等分布荷重で載荷・除荷を繰り返すことで締固めを模擬した.

図 5~図 10 に築堤完了後の諸量を可視化したものを示す.まず,平均有効主応力 p'より築堤 時の締固めによる圧密の効果が発揮され,基礎地盤が堤体に比べ高い値を示している.間隙比 e より,堤体上部になるにつれ値が高くなっていることがわかる.せん断ひずみ ɛs より,基礎と堤 体の境界付近が堤体内に比べ高い値を示している.この結果,この付近で破壊に至るほどではな いが,築堤完了時に既に弱部になっている可能性が考えられる.





### 2) 築堤~降雨解析(降雨継続解析)

築堤解析を行った解析モデルを用いて外水位変動解析を行った.また堤体の右側を堤外地とする.なお,外水位の上昇速度は実験に合わせて約1.7cm/minとした.図11~16に3mまで水位を 上昇させたときの各諸量を可視化したものを示す(左:浸透境界なし,右:浸透境界あり).

まず平均有効主応力p'より、いずれも水位上昇に伴い浸潤面から堤体内の値が低くなっており 強度が低下していると考えられる.また間隙比eも、水位上昇に伴い浸潤面から堤体内の値が低 くなっており体積圧縮が起こっていると考えられる.次いで飽和度 $S_r$ より、水位上昇に伴い基礎 地盤と堤体下部の値が高くなっている.

浸透境界の有無に着目すると、浸透境界を考慮した場合は、基礎地盤下部で平均有効主応力 p' が高い値を示し、間隙比 e は排水層下で低い値を示した.また、飽和度においては、浸潤面形成 が異なった.一方、浸透境界を考慮しない場合では水位 3m 時にすでに堤体全域で飽和し越流破壊 が考えられる.浸透境界を考慮すると、まず基礎地盤から浸透し、その後浸透面と地盤から堤体 に向かって上向きに浸透したと考えられる.この時、堤体が堤外地から左向きの浸透と基盤から の上向きの浸透によって浮力が発生していると考えられ、基礎地盤の弱体化が懸念される.



3) 築堤~降雨解析(突発的豪雨)

突発的降雨を考慮するため. 降雨を約 6.8mm/h とした. 図 17~図 19 に降雨解析後の各諸量を可 視化したものを示す.

まず,平均有効主応力 p'から,降雨に伴い値が低くなっており,強度が低下していると考えられる.また間隙比 e は,右法尻の値が堤体内に比べ高い値を示している.この結果,特に右法尻が弱部になっている可能性が考えられる.また,浸潤面は立ち上がった状態で堤内地側へ進行する様子が確認でき,堤体全体に広がるような飽和の進行ではなく,堤外地側での局所的な飽和度の上昇が確認できる.



(3) 結論

・築堤解析により,平均有効主応力が基礎地盤において高くなっており,堤体では下部に向かって大きくなっていること,また,間隙比は堤体下部で最も小さく,堤体下部に向かって小さくなっていることや,天端及び法面で大きくなっていることが確認された.これらのことから,解析上で実際の築堤を再現できていると考えられる.

・外水位変動解析後の飽和度分布から,外水位変動速度 6.8cm/min では立ち上がった浸潤面が,外水位変動速度 1.7cm/min では緩やかな傾きをもった浸潤面が確認された.

・外水位変動時の堤体内部の力学挙動を把握した.平均有効主応力や間隙比は,外水位変動速度 が 6.8cm/min の場合はあまり変化が見られないが,外水位変動速度 1.7cm/min の場合には,堤体表 法面付近においてに変化が見られた.

・破壊形態としては,飽和度分布及び飽和度の経時変化から,外水位変動速度 6.8cm/min の場合に は、立ち上がった浸潤面形成であることや、堤内地側まで飽和が進行しないことから、越流によ る崩壊が考えられる一方で、外水位変動速度 1.7cm/min の場合には、緩やかな傾きをもった浸潤面 形成であり、水みちの形成も示唆されることや、堤内地側において飽和度上昇が確認されること から、浸透による崩壊が考えられる.

4. 今後の課題

今後は、様々な堤体を考慮した築堤から崩壊までの一連を再現し、その際の堤体内の力学挙動 を把握する.また、越水と浸透のそれぞれに対して対策工を施した際の対策効果を確認すること が求めれるため、対策効果を確認することが課題である.