

河川堤防の越流侵食のメカニズム
に関する研究

2014年

與田敏昭

河川堤防の越流侵食のメカニズムに関する研究

目 次

第 1 章 序論

1.1 はじめに	1
1.2 本研究の目的	8
1.3 本研究の構成	9

参考文献

第 2 章 河川堤防の越流侵食および越水堤防に関する既往研究

2.1 はじめに	11
2.2 堤防の越流実験に関する既往研究	11
2.3 堤防の越流侵食解析に関する既往研究	22
2.4 越水堤防の評価と導入に関する既往研究	27
2.5 まとめ	30

参考文献

第 3 章 越流侵食実験による堤防の越流侵食・浸透メカニズムの評価

3.1 はじめに	35
3.2 実験方法	37
3.2.1 実施方針	37
3.2.2 実験装置	38
3.2.3 実験方法	44
3.2.4 実験ケース	48
3.3 実験結果	50
3.3.1 越流侵食実験結果	51
3.3.2 固定床水理実験結果	56
3.3.3 同一条件時の結果のバラツキ	58
3.4 実験結果の評価、検証	61
3.4.1 外力条件（越流水深）の違いによる影響	61
3.4.2 堤体土質の締固め度の違いによる影響	70
3.4.3 堤体内湿潤面の違いによる影響	76

3.5	越流侵食・浸透のメカニズム	83
3.6	結語	87

参考文献

第4章 非粘着性土質堤防の越流侵食の解析方法の検討

4.1	はじめに	89
4.2	非粘着性土質堤防の越流侵食解析法	91
4.2.1	堤体内の浸透流解析	91
4.2.2	越流水の流れ解析	92
4.2.3	堤体の侵食および堆積の土砂輸送解析	93
4.2.4	堤体法面のすべり破壊解析	99
4.3	非粘着性土質堤防による越流侵食実験	102
4.3.1	実験方法	102
4.3.2	実験結果	104
4.4	数値シミュレーション	109
4.4.1	計算条件	109
4.4.2	計算結果	109
4.5	結語	115

参考文献

第5章 越流侵食実験による堤防強化対策の評価

5.1	はじめに	119
5.2	実験方法	122
5.2.1	実施方針	122
5.2.2	実験模型	123
5.2.3	実験方法	124
5.3	実験結果	127
5.3.1	表のり面遮水工の浸透・越流侵食実験	127
5.3.2	裏のり尻ドレーン工の浸透・越流侵食実験	132
5.4	対策工設置時の侵食・浸透のメカニズム	137
5.5	結語	140

参考文献

第 6 章 結論

6.1	まとめ	-----	142
6.2	今後の課題	-----	145

付録

学位論文に関連のある論文リスト

第 1 章 序論

1.1 はじめに

【河川堤防の特徴と被災】

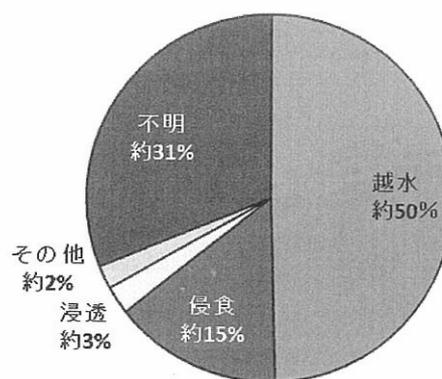
我が国は、古来より稲作を中心とした国土の利用を行うために、河川の氾濫原に集落や都市を形成してきた。このため、洪水を防御して氾濫原の土地利用を進めるために、自然状態の河川に沿って堤防がつくられ、その堤防が時代を経て改修されて現在の形になっている。このような開発を進めた結果、現在では河川の氾濫原に人口の約 1/2、資産の約 3/4 が集中する状況となっており¹⁾、人命や資産を守るための堤防の役割はますます重要となってきた。

河川堤防の大きな特徴としては、大部分の堤防が土を材料としていることである。その理由は、①材料が入手しやすく低価格であること、②応急的な処置を施しやすい、③地盤沈下に応じて変形するという点である。

しかしながら、大規模な洪水は、こうした土の堤防の弱点を突いて、堤防を侵食し、ひどいときには破堤に至らしめてきた。また、大地震時には大規模な変形が引き起こされた。このような例を含めて、河川堤防の破壊の原因としては、洪水による越水、浸透、侵

食や、地震があげられる。図-

1.1 は 1945 年以降の直轄及び県管理河川堤防の破堤事例（全 678 事例）について要因別にその割合を示したものであり、これより、越水による破堤が約半分を占められていることが分かる。



越水による堤防被害は、洪

図-1.1 破堤の要因別割合（1945 年以降）²⁾



図－1.2 平成16年7月福井豪雨時の足羽川の破堤状況³⁾

水が堤防高を上回ると越流水の掃流力により、堤体裏のり尻やその周辺地盤が侵食されることにより発生するものである。破堤の事例としては、小貝川（昭和61年）、円山川（平成16年）、足羽川（平成16年、図－1.2）などがある。

浸透による堤防被害は、洪水時の河川水あるいは降雨が堤体および基礎地盤に浸透することにより間隙水圧が上昇し、堤体の見かけの強度が低下する、もしくは土粒子が移動することにより発生するものである⁴⁾。浸透で破堤に至る進行過程としては、川裏のり部の小規模なり崩れなどの変状が徐々に堤防中心や堤防天端に進行する場合と、のり面が大規模にすべり破壊を起こす場合、河川水が透水性の高い基礎地盤を通り裏のり尻付近から噴出することにより生じるパイピングの3通りが考えられる。図－1.1では浸透による破堤の事例は多くないが、河川整備が十分に実施されていない時期は流下能力が不足して越水が多発していたが、近年は河川整備水準が向上しているため、浸透による破堤の危険性は相対的に大きくなっていると見ることができる。破堤の事例としては、長良川（昭和51年）、庄内川水系新川（平成12年）、矢部川（平成24年）などがある。

侵食による堤防被害は、洪水時の流水による掃流力により堤体表面が直接削られることにより発生するものである。また、護岸が設置されている箇所については、法覆工の流出や河床洗掘による護岸の被災を起因とした侵食も含まれる。破堤の事例としては、多摩川（昭和49年）や天竜川（平成18年）などがあるが、近年は護岸の設計法⁵⁾が確立され、力学設計法に基づく護岸整備が進

められている。

地震による堤防被害は、基礎地盤に液状化が生ずることにより堤防が大きく沈下、変形することにより発生するものである。破壊の事例としては、釧路川（平成5年、釧路沖地震）、淀川（平成7年、兵庫県南部地震）、阿武隈川ほか（平成23年、東北地方太平洋沖地震）などがある。ただし、地震による被害は洪水と異なり、堤防が破壊されることで直接に人命や資産に影響することは少ない。

また、河川堤防のもう一つの大きな特徴は、その多くが長い治水の歴史を経て形成されてきたことである。堤体は、洪水による災害を受ける度に、従来の堤防の嵩上げ・拡幅等を行い、現在の形に至っているため、堤防内部の土質構成や土質分布は明確でないことが多い。図-1.3に利根川の堤防断面形状の変遷の一例を示す。

このように、河川堤防は治水上、非常に重要な河川構造物であるが、材料が土で出来ていることや、歴史的な嵩上げ等で内部構造が複雑であることより、洪水時に越水や浸透で破堤するリスクを抱えているといえる。

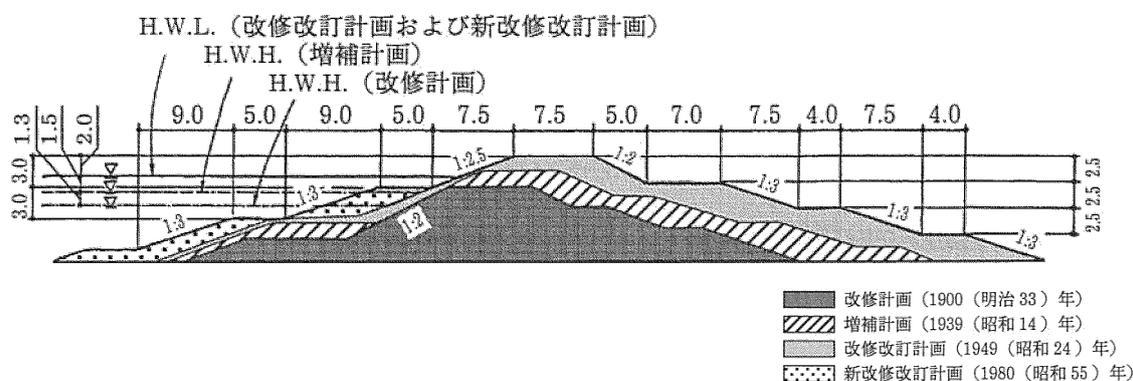


図-1.3 堤防の断面形状の変遷（利根川の例）⁶⁾

【堤防の質的整備】

河川堤防の設計は、従来は河川の規模に応じて高さや形状を決めるとともに、堤体材料や締固め方法を適切に管理することにより安全性を確保するという設計方法（形状規定方式）であった。しかし、形状規定方式は主に実際に発生し

た被災などの経験に基づいて設定されてきたものであるため、将来発生する洪水に対する堤防の安全性を評価することは難しい。また、既往の被災事例をみても、計画高水位以下の洪水による漏水なども多く発生しており、形状規定を満足する堤防が必ずしも十分な安全性を有しているとはいえない状況であった。このため、平成9年に「河川砂防技術基準」⁷⁾が改訂され、これまでの形状規定方式ではなく、外力を想定して、それに対して必要な耐力を確保するという性能規定方式の設計思想に変更となった。この思想に基づき、「河川堤防設計指針」(国土交通省河川局治水課、平成14年7月、最終改正平成19年3月)や、「河川堤防の構造検討の手引き」(財団法人国土技術研究センター、平成14年7月、平成23年2月改訂)が作成されている。これらにより、浸透、侵食、地震に対する安全性照査の考え方が示され、耐浸透機能、耐侵食機能、耐震機能を有する堤防構造の設計方法が採用されている。

一方、越水については過去の破堤原因の約50%を占めているものの²⁾、これらの性能規定設計の対象外である。これは、現在の治水が、自然的・社会的条件を勘案して計画洪水を定め、それを対象として治水施設や河道計画を決定するという方式で進められていることより、計画高水流量以上の超過洪水は計画の対象外とされるため、治水計画上は河川堤防の越水は考慮されないという理由のためである。

なお、耐越水機能を考慮した堤防としては高規格堤防がある。これは、越流水による洗掘破堤が発生しないように、堤防の堤内地側を盛土して堤防の幅を高さの30~40倍程度としたものであり⁸⁾、首都圏および近畿圏の人口・資産が高密度に集積した低平地を抱える5水系6河川を対象に整備が進められている⁹⁾。しかし、高規格堤防は、既設の堤防のり尻からかなりの幅(30H:堤防高の30倍の範囲)を高規格堤防特別区域に設定して整備を行う必要があるために一連区間の完成に多くの時間を要しているという実情を考慮すると、通常の堤防において採用していくのは困難な方法である。

このように、堤防の越水に関しては、現在のところ連続的な堤防で耐越水機能を確保する技術的知見が明らかになっておらず、効果的な越水対策を具体的に検討することが難しい状況にある。

【堤防の越水の課題】

前述のように、堤防の浸透や洗掘については、現時点で効果的であるとされる技術的設計方法が示されているものの、越水に対しては安全性点検や堤防強化の対象外となっている。しかしながら、我が国では、中小河川を含めると毎年越水による破堤被害が発生している。また、最近では異常気象に伴う集中豪雨より、計画高水位を超える洪水が多発しており、今後も引き続き超過洪水と対峙せざるを得ないと思われる。

既往研究¹⁰⁾で、昭和42年～51年に生じた越水事例をもとに、最大越流水深と越流時間が整理されている(図-1.4)。これより、破堤しなかった事例としては越流水深60cm以下が圧倒的に多く、越水時間は5時間以内に集中していることが分かる。図中の線は越流水深60cm、越水時間3時間の点をとおり総越流量が一定となるように引いたものである。これより大半の点がこの線内に収まっていることより、越流水深60cmで3時間持ちこたえることが越流に対する一つの目安と考えられている。

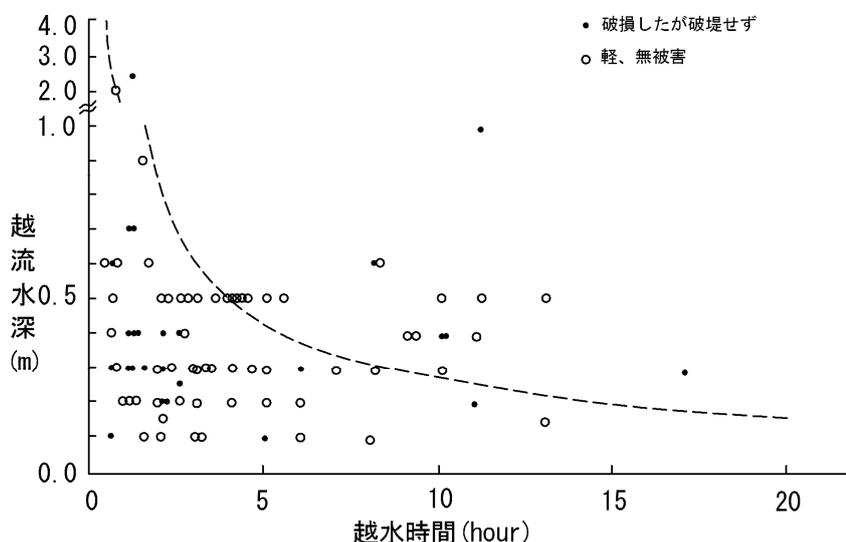
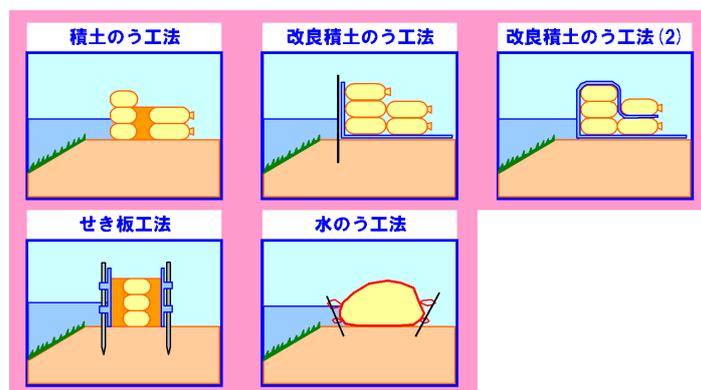


図-1.4 最大越流水深と越水時間の関係¹⁰⁾を一部加筆

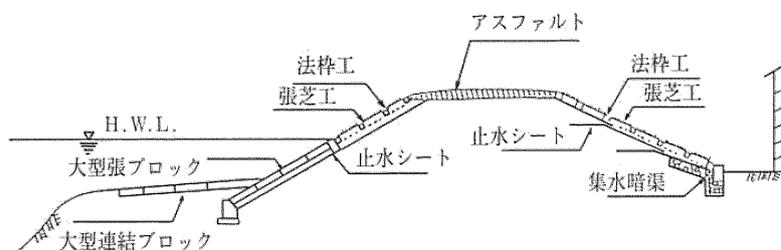
また、河川整備が十分に行われていなかった時代には、洪水と隣り合わせの土地を守るための様々な技術が生み出されていた。これらの伝統的な技術は、



図－1.5 越水対策の水防工法の例¹¹⁾

現在でも水防工法として地域の水防活動に引き継がれている。越水に対する水防工法を見ると、図－1.5に示す「積土のう工法」「せき板工法」「水のう工法」がある¹¹⁾。これらはいずれも、堤防天端を嵩上げて越水を発生させないようにする方法であることより、伝統的技術でも越水すると破堤を防げないということであったことの継承であると思われる。

耐越水機能を有する堤防（越水堤防）については、海外ではオランダの海岸堤防等、日本ではアーマーレビーという耐越水堤防が、加古川（兵庫県、図－1.6）、江の川（島根県）などに設置された事例がある⁶⁾。アーマーレビーの“アーマー(armour)”は英語で鎧兜や防護具・外装の意であり、堤防の川表側の法面はもちろん、天端・川裏側の法面にも補強対策を施し堤防の機能強化を図るものである。天端はアスファルト舗装により、雨水の浸透防止と越水による堤体の侵食を防止し、川裏側法面には可撓性に富む連節ブロックを、法尻部にはふ



図－1.6 加古川のアーマーレビーの構造⁶⁾

とんかご・吸出防止剤をそれぞれ施工して越水流による洗掘防止を図っている。ただし、これらの工法の効果についての検証やモニタリング調査は実施されていないとともに、その後は越水堤防の整備事例はほとんどない。

さらに、越水堤防の技術的な実現性については、社団法人土木学会で以下のような見解が示されており、今後の研究の必要性が謳われている¹²⁾。

『断面構造、一連区間の安全性確保の観点からすると、堤防で越水が生じた場合に、計画高水位以下で求められる安全性と同等の安全性を有する構造物すなわち耐越水堤防とすることは、現状では技術的に見て困難である。長大な堤防においては、工学的な意味の安全性の確保が経験的になされており、そこで確保されている安全性と同等の安全性を工学的に導くことのできる越水対策の設計技術は現状では確立されていない。』

このように、堤防の越水については、その重要性に反して研究や設置事例が少なく、現時点では技術的な課題が山積している状況である。

1.2 本研究の目的

河川堤防は治水上、非常に重要な河川構造物であり、人命や資産を守るため、洪水時に破堤は絶対に避けなければならない。洪水時の破堤の原因は、越水、浸透および侵食である。このうち、浸透と侵食については、現時点で効果的であるとされる技術的設計方法が示されており、全国で堤防の質的強化事業が展開されている。しかし、越水については、過去の破堤要因の多くを占めているものの、現在のところ連続的な堤防で耐越水機能を確保する技術的知見が明らかになっておらず、効果的な越水対策を具体的に検討することが難しい状況である。その一方で、近年では異常気象に伴う集中豪雨が頻発しており、特に中小河川では、今後も超過洪水による堤防越水が多発すると想定されることから、越水に対する堤防強化は無視できない課題である。

現在、河川堤防は大部分が土で作られている。第2章で紹介する越水実験結果でも明らかとなっているように、土でできた堤防は、越流侵食が継続すればいつかは破堤に至ることは避けられないと考えられている。このため、堤防越水に対しては、越流に対して堤防の機能が維持される時間はどの程度であるかという点を把握するとともに、どのような対策を講じればその機能を長時間維持できるかということが、治水施設としての堤防に耐越水機能を考慮する上での重要な視点となる。

本研究は、このような背景を踏まえ、耐越水堤防の開発に向けて、これまでに行われてきた堤防強化についての研究成果を踏まえ、堤防の越水に対してより効果を有する強化方策について、新たな知見の収集・蓄積を図ることを目的として、実験および解析的検討を実施するものである。

1.3 本研究の構成

まず、第1章では、本研究の背景と目的、そして本論文の構成を示している。

第2章では、河川堤防の越流侵食に関する従来の研究について、実験的研究、解析的研究、越水堤防の導入に関する研究の3つに区分してその概要を整理することにより、本研究の位置づけを明確にした。

第3章では、越流侵食・浸透のメカニズムを検討するためには、堤体の土質条件や外力条件などについてさまざまな条件での模型実験を実施する必要があると考え、小型模型堤防を用いて、堤防の越流に関する基礎的な実験を行い、越流侵食・浸透メカニズムの評価を行った。

第4章では、不飽和堤体の越流侵食に着眼点を置き、非粘着性土質堤防の越水模型実験を実施して計算モデル構築のための検証データを実験により蓄積し、浸透および越流水の影響を考慮した非粘着性砂質堤防の越流侵食モデルの構築を行った。

第5章では、小型模型堤防に対策工すなわち人工構造物を設置した場合の越流侵食現象と浸透現象を実験的に検討することにより、堤防強化工法を設置した場合の越流侵食メカニズムの把握を行った。

最後に第6章では、第5章までに得られた成果をまとめるとともに、今後取り組むべき課題について論じた。

<参考文献>

- 1) 井上和也：都市の水害と地下浸水，予防時報，202号，2000.
- 2) 国土交通省河川局治水課：戦後の破堤実態について，2002.
- 3) 福井新聞社：福井豪雨報道記録集，2004.
- 4) 財団法人国土開発技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き，2012.
- 5) 財団法人国土開発技術研究センター：護岸の力学設計法，山海堂，1999.
- 6) 中島秀雄：図説河川堤防，技報堂出版，2003.
- 7) 建設省河川局監修，日本河川協会編：改定新版 建設省河川砂防技術基準（案），同解説 設計編，山海堂，1997.
- 8) 財団法人リバーフロント整備センター：高規格堤防（スーパー堤防）整備事業の手引，ぎょうせい，pp.7-8，1998.
- 9) 高規格堤防の見直しに関する検討会：高規格堤防整備の抜本的見直しについて，2011.
- 10) 建設省土木研究所河川研究室；越水堤防調査最終報告書－解説編－，土研資料第2074号，1984.
- 11) 国土交通省中国地方整備局：時代に即した水防工法 工法選定と作製の手引き，2006.
- 12) 社団法人土木学会：「耐越水堤防整備の技術的な実現性の見解」について，耐越水堤防整備の技術的な実現性検討委員会報告書，2008.

第2章 河川堤防の越流侵食および越水堤防に関する既往研究

2.1 はじめに

河川堤防の破堤の原因の大半は河川水位が堤防高を上回り生ずる越水に起因するものである。しかし、治水計画上は河川堤防の越水は考慮されないものであることもあり、河川堤防の越流侵食に関する研究数は必ずしも多くない。その中でも、建設省土木研究所で昭和 51 年度から始められた越水堤防に関する調査は、越水堤防を実現化するための端緒となる研究である^{1)~4)}。また、最近の豪雨災害の多発を受けて越流破堤に関する調査・研究も積み重ねられつつある。

本章では、河川堤防の越流侵食に関する従来の研究について、実験的研究、解析的研究、越水堤防の導入に関する研究の3つに区分してその概要を整理することにより、本研究の位置付けを明確にする。

2.2 堤防の越流実験に関する既往研究

河川堤防の越流侵食現象は、堤体土の強さや被覆植生の物理的機構など未解明な要素が多いことより、模型実験や現地実験を中心に研究が進められてきた。堤防の越流実験に関する既往研究を一覧整理すると表-2.1のようになる。

ここでは、これまでの河川堤防の越流侵食に関する実験的研究の主な成果をレビューする。

表-2.1 堤防の越流実験に関する既往研究

No	研究内容	概要	キーワード	参考文献 No
1	堤体に作用するせん断力の評価の模型実験	小型の固定床堤体模型による越流実験により、浸食前段階の裏のり部に作用するせん断力の特徴を把握。	固定床模型 せん断力	1
2	大型模型堤防による越流実験	大型模型堤防を用いた越流実験により、土堤の破壊機構について検討。	大型模型堤防 土堤 芝張堤	1, 2, 3, 4
3	大型模型堤防による越流対策工実験	大型模型堤防を用いた越流実験により、天端や裏のり尻に保護工を用いた堤防補強効果について検討。	大型模型堤防 保護工	1, 2, 3, 4, 5, 6
4	大型模型堤防による越流対策工実験	大型模型堤防を用いた越流実験により、裏のり面を被覆材で保護した場合の堤防補強効果について検討。	大型模型堤防 裏法面保護工	7, 8, 9, 10
5	現地堤防による越流実験	現地堤防の越流に対する耐侵食性についての検討。	現地堤防	11, 12, 13, 14, 15
6		現地堤防（芝堤）の越流に対する耐侵食性についての検討。	現地堤防 芝堤	16, 17
7		現地水路に設けた模型堤防を用いて、破堤の横断方向への拡幅過程や落堀現象の検討。	現地模型堤防	18, 19
8	小型堤防模型による越流実験	異なる粒径の非粘着性土を用いた小型堤防模型による検討。	小型模型堤防 非粘着性土	20
9	小型堤防模型による越流実験	遠心模型実験による堤体の浸透・越流侵食の検討。	小型模型堤防 遠心模型実験	21

(1) 堤体のり面に作用するせん断力の把握

越流による堤体の破壊は、一般に裏のり部の侵食から始まることより、裏のり部に作用する越流水の力の特徴を把握することは、堤体の強度や初期の破壊機構を検討する上でも重要である。建設省土木研究所では、合板で作成した小型の固定床堤体模型（図-2.1）を用いた実験により、越流時に堤防に作用する水理量の把握を行っている¹⁾。実験条件は表-2.2の通りであり、裏のり勾配は2割である。

のり勾配2割の堤防模型の底面に作用する圧力の縦断分布を図-2.2に示す。

のり肩部では圧力低下による負圧の発生が、のり尻では大きな圧力上昇が見られる。いずれも越流水の流線の急激な曲がりによるものである。これより、特にのり尻部では堤体が非常に強い圧力を受けていることがわかる。また、のり肩直下の負圧域が終わるところでも流れが堤体面にぶつかることによる圧力上昇が見られる。

底面流速の測定結果より求めたせん断力の縦断分布を図-2.3に示す。堤防天端ではのり肩のごく近傍を除いてせん断力は小さい。裏のり部については、のり肩直下のせん断力がほとんど0に近く、流下するにしたがってせん断力は大きくなる。のり尻ではせん断力が急激に小さくなり、のり尻の少し下流で再びせん断力が上昇し最大値を示す。これらについて、のり肩直下とのり尻においてせん断力が小さいのは、剥離が生じているためである。また、のり尻の少し下流で最大値が現れているのは、剥離した流れが再付着する際、底面に強く当たるためであると見られる。以上の特性より、堤防天端とのり肩直下は侵食に対して比較的安全であり、一方、のり肩直下を除く裏のり部とのり尻直下は非常に侵食しやすいことが予想される。

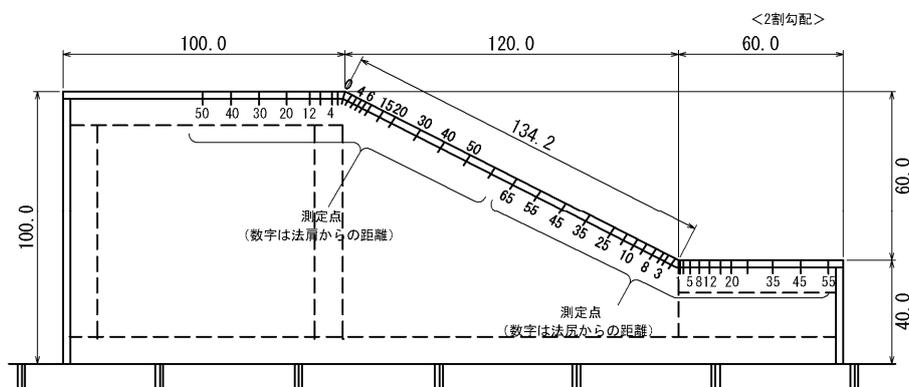


図-2.1 固定床堤体模型（単位：cm）¹⁾を一部加筆

表-2.2 固定床堤体実験条件

No.	裏のり勾配	越流水深	単位幅越流量 (ℓ/s/m)
Case2-10	2割	10cm	45
Case2-20	2割	20cm	130

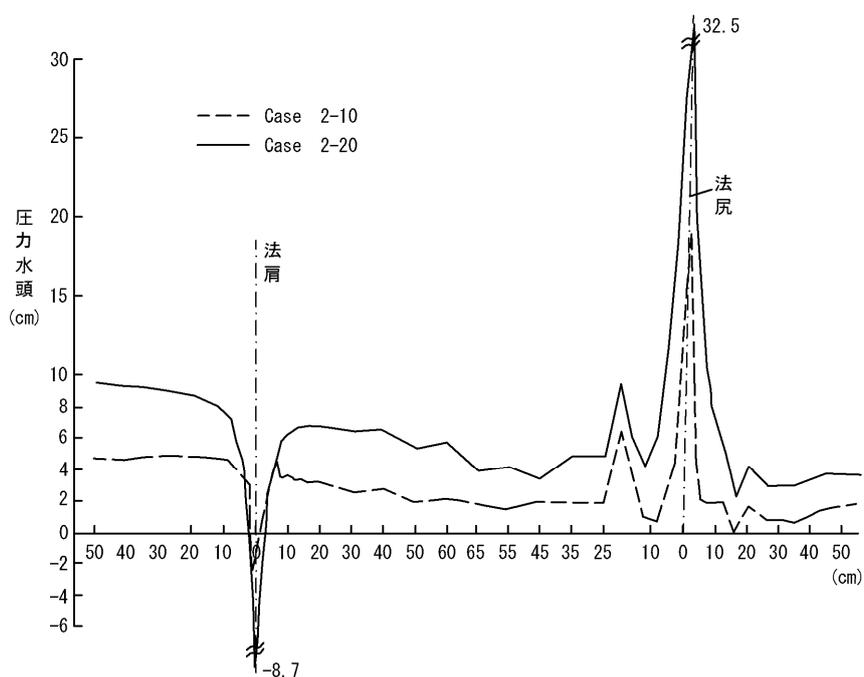


図-2.2 堤体底面水圧縦断面図 1)を一部加筆

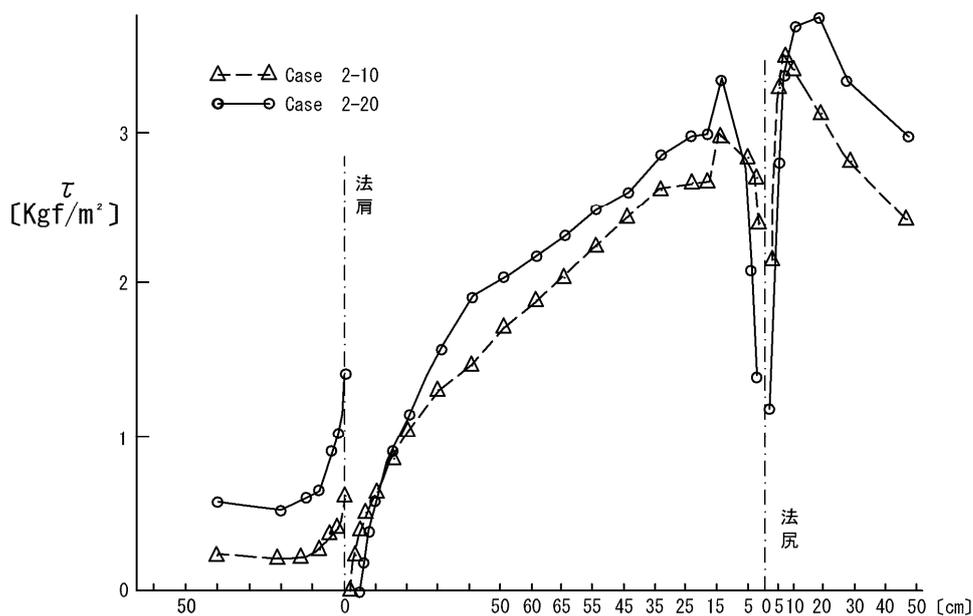


図-2.3 堤体底面せん断力分布図 1)を一部加筆

(2) 越流による土堤の破壊機構

侵食が始まる前の裏のり尻に作用するせん断力・圧力等は、越流水の流速・水深等の水理特性と表面の粗度だけから決まるので、小型の堤体模型を用いた越流実験による検討が可能であった。しかし、堤防の裏のり部の侵食に対する強度や侵食が進行し破堤に至る過程などは、土の性質や植生という複雑な因子が新たに加わるため、小型の堤体模型を用いた越流実験では実堤防における現象についての定量的な検討が困難である。これは、土の侵食に対する強度や植生の効果に関する物理的機構が十分に解明されておらず、小型模型実験の結果を実際の堤防に適用する明確な手段がないためである。このため、建設省土木研究所では、ほぼ原寸大に近い土堤を用いた越流実験により、越流による土堤の破堤機構の実験的研究を行っている^{1)~4)}。

実験堤防は、土木研究所の屋外に設置した堤高 2.5m、天端幅 2.3m、表および裏のり勾配 2 割の模型を用いた（図-2.4）。また、実験に用いた土は、江戸崎山砂、小貝川土砂①、小貝川土砂②の 3 種類である（図-2.5）。

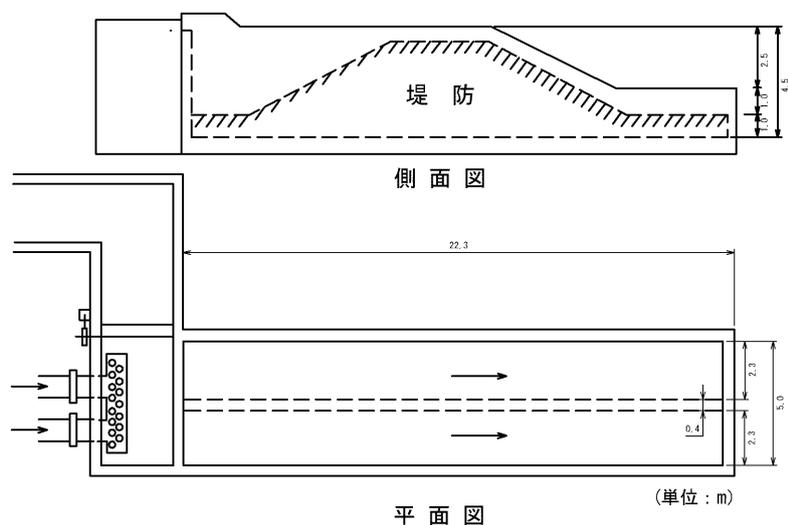
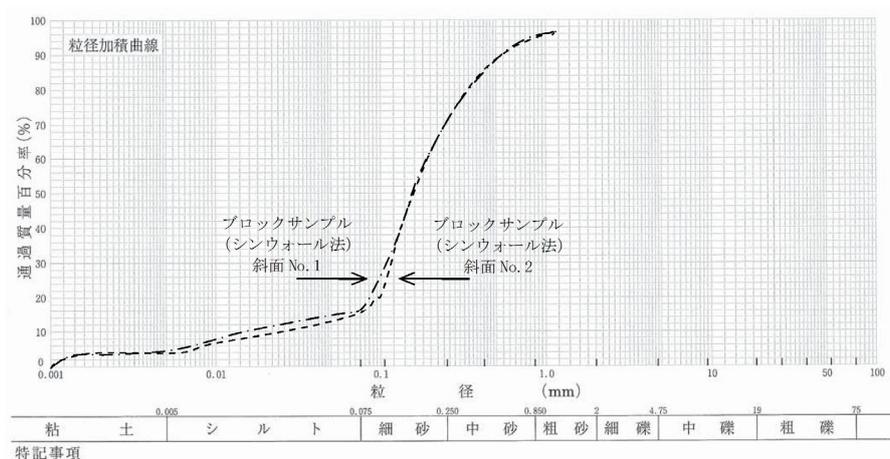
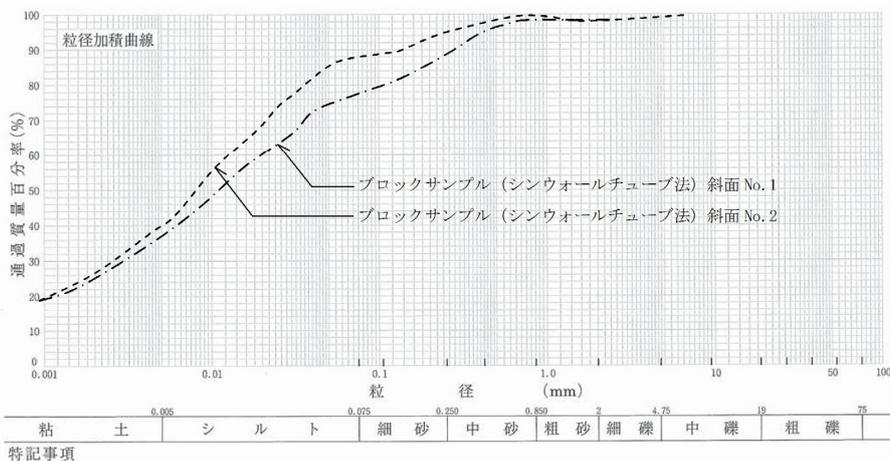


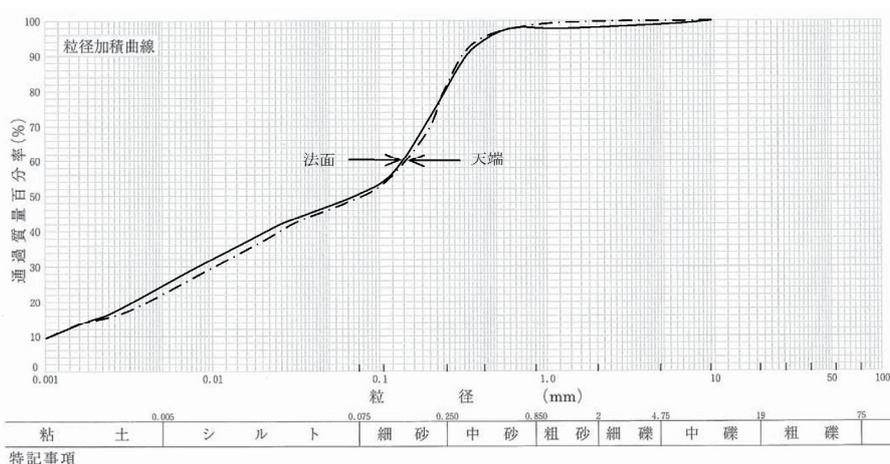
図-2.4 土木研究所大型模型堤防 実験施設²⁾を一部加筆



(a) 江戸川山砂



(b) 小貝川土砂①



(c) 小貝川土砂②

図-2.5 越流実験に用いた土の粒度分布¹⁾を一部加筆

実験的検討の結果、土堤の破壊過程は、**図-2.6**に示すように、まず裏のりだけが侵食される「裏のり侵食過程」が起こり、裏のり全体がほぼ侵食された後に、天端が崩壊する「天端崩壊過程」の順に進行することが明らかとなった。

「裏のり侵食過程」では、主に越流水による直接の力（せん断力、圧力）により侵食が進行した。裏のり部に働くせん断力は下部に行くほど大きいため、越流開始直後は、せん断力が土を侵食しうる大きさになった部分より下流で侵食が生じた。以後の裏のりの侵食形態については、土の特性や施工時の締固め状態などにより決まる侵食に対する強度との関係が見られた。すなわち、侵食に対する強度が比較的大きい場合は、侵食の進行が遅くないため越流水があまり乱されずそのままのり尻まで達することより、裏のり部は一様に削られるとともに、のり尻の侵食が大きくなる。一方、侵食に対する強度が小さいと、裏のりの侵食速度が大きく裏のり部が早期に大きく変形するため、裏のり下部やのり尻は越流水がある程度減勢され侵食が小さくなるとともに、裏のり部でしばしば階段状の侵食形態が見られた。

「天端崩壊過程」では、流水の力だけでなく切り立った裏のりを持つ堤体自身の不安定性が崩壊の要因となる。このため、天端の表面が侵食されるのではなく、大きな土塊が崩れ落ちるといった破壊形態を示した。

また、実験結果を定量評価するために、累積越流量（単位幅あたり越流量×越水時間）と侵食量の関係を**図-2.7**のように整理した。これより、土堤（裸堤）の侵食速度は、ほぼ一定で破堤に至ることが明らかである。また、実験に使用した3種の土の違いを比較すると、小貝川土砂①が他に比べ強度が大きいが、特に特徴のある土ではなかったことより、堤体土の強度には土質以外の因子（例えば、締固め度など）も大きな影響を持つものと想定される。

これらの結果をまとめると以下のようなものである。

- (i) 通常の土堤は、多くても $500\text{m}^3/\text{m}$ に達すると破堤していることより、越水に対する非常に小さいことが確かめられた。
- (ii) 土堤の破堤は、裏のり侵食過程－天端崩壊過程の順に進む。裏のり侵食の原因は流水による圧力やせん断力といった直接の力であるのに対して、天端崩壊の主因は裏のりが侵食された後の堤体自身の不安定性にある。
- (iii) 侵食が始まる場所は、堤体表面が侵食に対して強いほど、裏のり面の下部に移る。

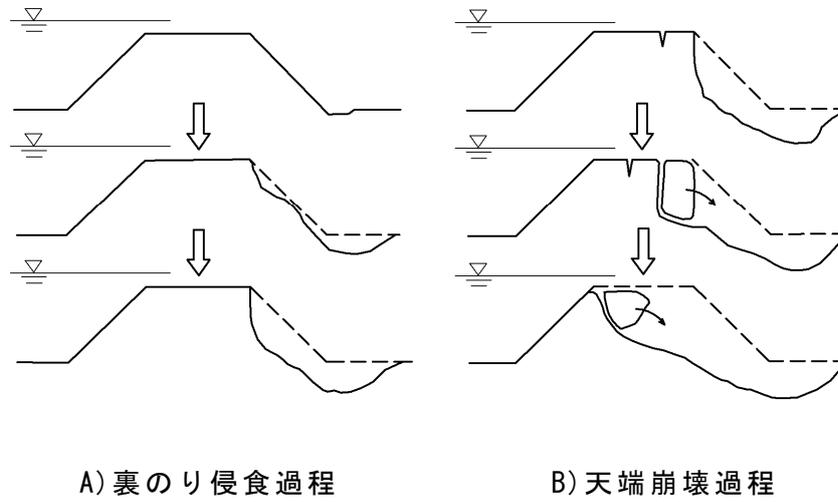


図-2.6 土堤の破壊過程 ¹⁾を一部加筆

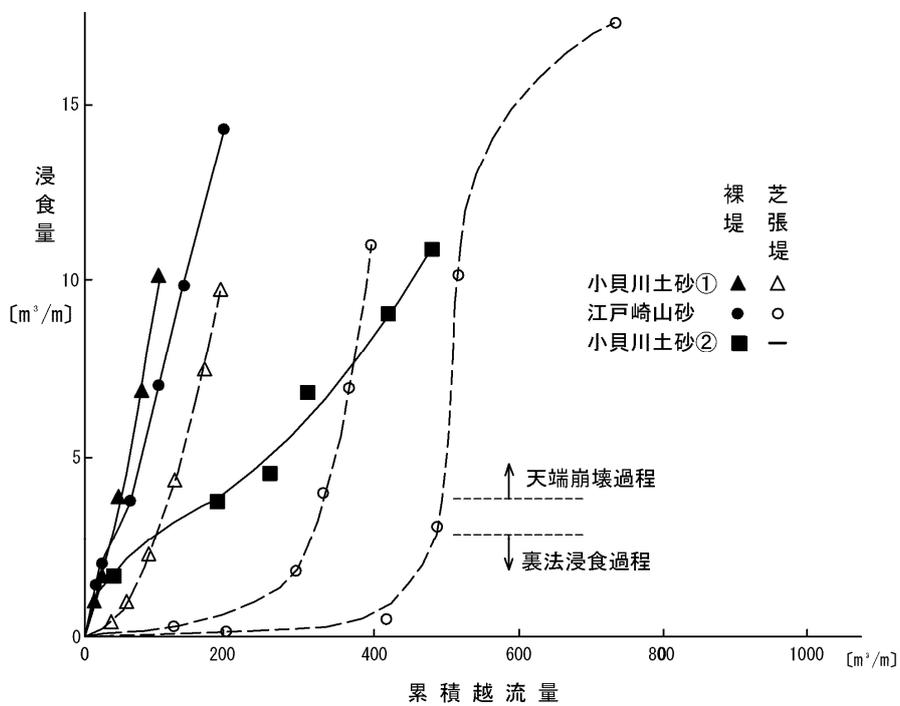


図-2.7 累積越流量と侵食量の関係 ¹⁾を一部加筆

(3) 越流による芝張堤の破壊過程

実際の堤防では、のり面を芝張りとしていることが多いことより、芝張堤の破壊機構についても実験的研究が行われている¹⁾⁻³⁾。芝張堤の破壊過程は、基本的に土堤（裸堤）と同じで図-2.6の過程を経るが、①侵食が始まるまでの時間が裸堤に比較して長い。しかし一度侵食が始まると急に侵食が進行する。②侵食はのり尻付近から始まり上部に進行する。③天端崩壊に対する芝の効果はほとんど見られない、という特徴が見られている。

これらの結果より芝張堤の破壊機構を考えると、堤体表面に芝（一般的には植生）があると、芝の葉が表面を被うため土自体に作用するせん断力が減少するためと、土塊が堤体から離脱するのを芝の根が防ぐため、侵食に対する抵抗力が増加する。このような芝の耐侵食効果のため、侵食が始まるまでの時間が裸堤に比べ長くなり、また侵食が始まる位置はせん断力が大きくなるのり尻付近に限られる。また、芝は根によって土同士を強く結合させているので、侵食される場合には根の張っている土層が一度に離脱する。さらに、侵食された部分の直上流の芝の層には表面と平行の引張り力が作用するので、新たにこの部分が侵食され、一箇所侵食を受けるとかなり早く他の部分に侵食が波及する。したがって、芝張堤はどこかに侵食を受けるまではかなりの耐侵食性を持つが、一度侵食を受けるとほとんどその効果を失うと考えられる。

芝張堤について累積越流量と侵食量の関係を見る（図-2.7）と、曲線の傾きがほとんど0の部分で侵食の初期に見られる。これは、前述の表面侵食防止効果を表している。また、侵食量が一定に達すると急に曲線が立ち上がり裸堤とほぼ同じ傾きとなっており、これも一度侵食を受けると芝の効果がほとんどなくなるという特徴を裏付けるものである。しかし、芝が侵食に耐える累積越流量は、実験ケースにより大きく異なっている。実験条件として、芝の根の生育状況がかなり違っていたためであり、芝による侵食防止効果は、芝の状態により大きく変わるものと考えられる。

(4) 越水破堤に対する対策工

前述した大型越流実験の結果より、越流時の初期の侵食箇所は裏のり面の上部から裏のり尻にかけての部分に限定されることが明らかとなった。これより、

越水に強い堤防とするためには、越流初期に侵食が始まるこの部分を保護すれば良いと考えられる。一方、部分的な被覆を行った場合、その保護工の上部および下部が局所的に侵食され、崩壊を早める可能性も考えられる。

建設省土木研究所^{1),2),3),5)}、藤田ら⁶⁾、独立行政法人土木研究所⁷⁾⁻¹⁰⁾では、大型模型堤防を用いて、越水堤防として機能を発揮させるための保護工の効果について研究を行っている（表-2.3）。

表-2.3 越流対策工実験 検討工法一覧

No.	対策工	実験結果概要
1	天端アスファルト	一定の効果は見られるが、アスファルトの欠落とアスファルト下の砕石層が水みち対策が必要である。
2	連節ブロック	流れによるせん断力と吸出しによる変形が発生するため、突起の小さい平型を適用して吸出防止材を設置すると効果あり。
3	かみ合わせブロック	ブロック毎が連結されていないため、沈下に対し個々のブロックに流体力が大きく作用することになり、早々に崩壊する。
4	防水シート	流体力により堤体から剥がれて、早々に流出してしまう。
5	改良土被覆	改良土の表面に亀裂が発生し、そこから崩壊する。

一連の実験結果をもとに、各保護工について総越流量と崩壊範囲との関係を整理した結果を図-2.8に示す。かみ合わせブロックや改良土については、他の保護工に比べて小さい規模の出水で崩壊するため、全壊しなくても頻繁に補修する必要があると指摘している。崩壊までの総越流量が大きいということは、越水開始から破堤までの時間が長いわけであるから、それまでに十分な避難体制をとることができる。背後地に住宅や学校等があり、破堤による経済的、社会的損害が大きく、かつ破堤の危険度も大きいところでは連節ブロックを採用し、破堤の危険度がそれほど大きくない地域であれば、補修が容易な天端アスファルトの導入がよいと指摘している。

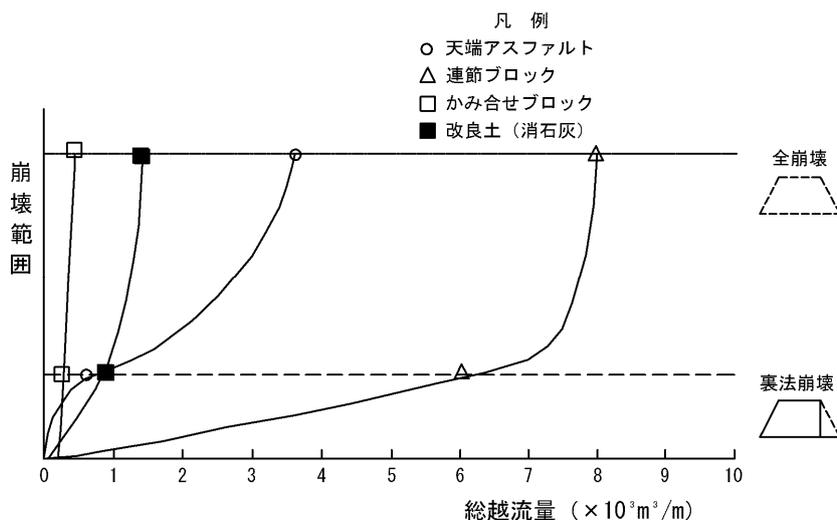


図-2.8 越流対策工の実験結果 ¹⁾を一部加筆

(5) 現地堤防による実験的検討

越流侵食については、現地実験による研究も実施されている。東北地方整備局（旧 東北地方建設局）では、磐井川の新旧堤防を用いた現地水理実験を行い、のり面の耐侵食強度および堤防破壊過程について検討を行った¹¹⁾⁻¹⁵⁾。福岡ら^{16),17)}は、のり面の芝の耐侵食性に着目して、開発した現場侵食試験器を用いて芝堤の侵食特性を検討した。これらの現地実験より、越流侵食に対して堤防のり面の張芝が一定の効果を有することと、張芝の植生状態が耐侵食機能に大きく影響すること、また張芝の特性を活用した堤防強化方法について提案を行った。

独立行政法人土木技術研究所寒地土木研究所では、十勝川千代田実験水路に設けた堤防模型を用いて破堤実験を行い、破堤の横断方向への拡幅過程や落堀現象について検証した（図-2.9）^{18),19)}。

しかし、いずれの実験も、現地ゆえに堤体の土質が複雑であり精度良い堤体土質特性の把握が難しいことや、初期条件の統一性等、実験条件のコントロールなどの課題があり、破堤のメカニズム解明などの評価までには至っていない。



図－2.9 千代田実験水路での実験状況

2.3 堤防の越流侵食解析に関する既往研究

河川堤防の越流侵食現象は、流水だけでなく侵食に伴う土砂移動や堤体の変形を取り扱う必要があるため、これまで解析的研究は多く実施されていなかったが、近年はこれらを、数値解析で解こうとする研究もおこなわれている。既往研究を一覧整理すると下表のようになる。

表－2.4 堤防の越流侵食解析に関する既往研究

No	研究内容	概要	キーワード	参考文献 No
10	MPS 法による解析	固定壁侵食モデルを組み込んだ拡張 MPS 法により河川堤防の越流過程のグリッドレス解析を実施。	MPS 法 越流侵食現象	22
11	MPM-FDM 法による解析	MPM-FDM 法に越流侵食に伴う破断条件を導入して、越流時の河川堤防の浸透－変形連成解析に適用。	MPM 法 連成解析	23
12	土の侵食速度式を用いた解析	越流水の挙動に浅水流方程式を用い、堤体形状の変化については土の侵食速度を適用。	侵食速度 浅水流方程式	24
13	非平衡流砂モデルによる解析	不飽和土の越流侵食についてせん断抵抗の増加を考慮した侵食速度を考慮した解析。	不飽和土 せん断抵抗 非粘着性土	20

(1) MPS 法による侵食過程の検証

後藤ら²²⁾は、河川堤防の越流水の流況を推定し、侵食過程を時間発展的に追跡するためのシミュレーション手法として、固定壁侵食モデルを組み込んだ拡張 MPS(Moving Particle Semi-implicit)法により、河川堤防の越流過程のグリッドレス解析を実施した。

計算領域は河川堤防の横断面を対象とした図-2.10に示す鉛直2次元場で、全長は約0.7m、堤防部の高さは0.05mとした。粒子総数は約10,500個である。粒子径は均一で $d=0.0025\text{m}$ と設定した。侵食によって発生した土砂粒子の比重は2.65とし、一旦侵食されて移動を開始した粒子が底面に落下した場合でも再び壁には復帰しないものとした。水理条件については、堤防頂部では平均流速 30.0cm/s 、水深 2.0cm でフルード数0.68である。

図-2.11は、越流・侵食過程における各瞬間の粒子配置を、図-2.12は図-2.11に示された各瞬間における流速ベクトルを示している。越流開始時($t=0.3\text{s}$)には、比較的薄い水脈によって表層がせん断されて侵食され、表層に凹凸が表れると顕在化した凸部(例えば、時刻 $t=0.9\sim 1.2\text{s}$ の $x=0.04\sim 0.06$ 付近の肩)が生じ、それが水衝となって凸部が急激に侵食される。凸部近傍の流速ベクトルに注目すると、水脈の凸部への衝突を意味する急激な流向の変化が見られる。凸部侵食による堤体斜面の急勾配化の進行と同時に、堤体の法尻付近も落下流の水衝の影響で侵食される。その後も堤体斜面上では凸部形成、凸部侵食の繰り返しによる急勾配化が継続し、越流水脈が斜面上端部の表層から剥離するまでに至る。この計算結果は、既存の研究により示されている表層急勾配化により次第に後退していく裏法侵食のプロセスと定性的に一致する結果が得られている。

本手法を実堤防の越流侵食現象に適用するためには、実堤防の土質材料に対する侵食速度条件(近傍流速がある条件を満たすと固定壁粒子と周囲の壁粒子との連結が断たれて土砂粒子と変質する条件)等を設定する必要があるが、堤体のり面の侵食速度は、土質、締固め度、飽和度等の複数の要因により決定されるものであるため、現時点では侵食速度に関する水理実験等を行い、侵食速度式を設定する必要がある。

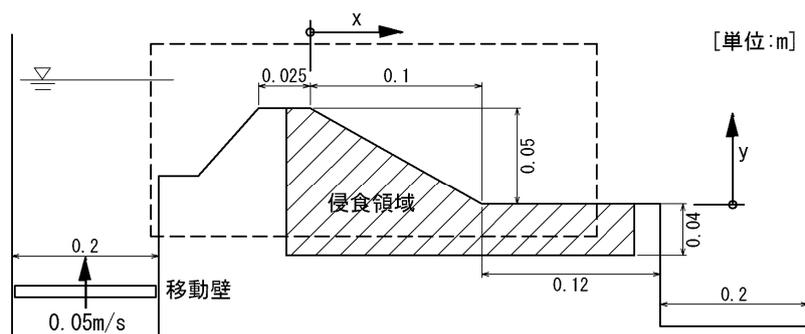


図-2.10 MPS法の計算領域²²⁾を一部修正

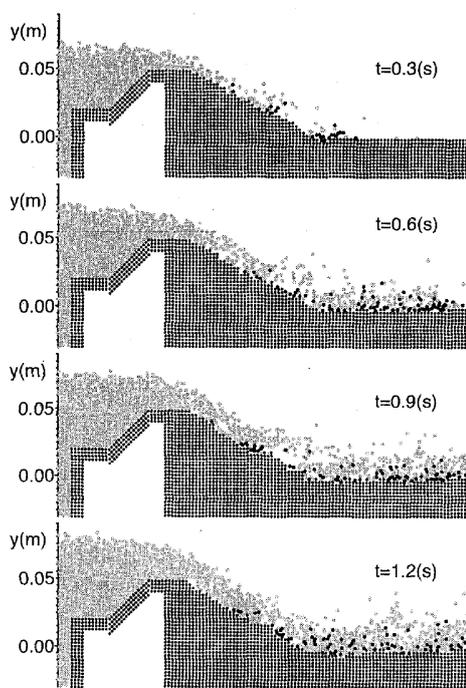


図-2.11 越流過程の計算結果
(粒子位置)²²⁾

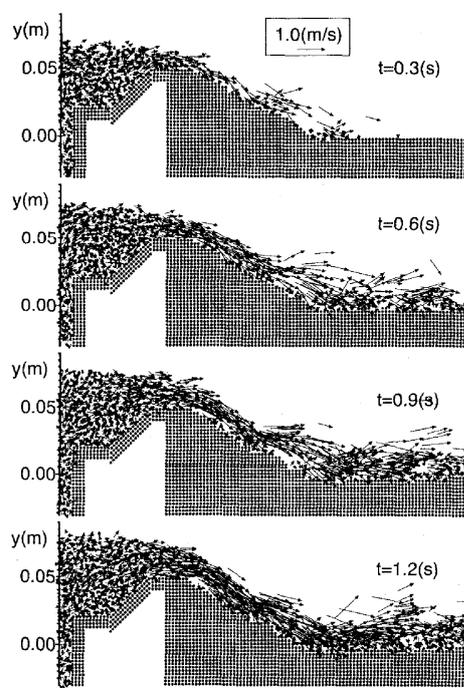


図-2.12 越流過程の計算結果
(流速ベクトル)²²⁾

(2) 土の侵食速度を用いた越流侵食の検証

藤沢ら²⁴⁾は、越流水の挙動に浅水流方程式を用い、堤体形状の変化については土の侵食速度を適用して、堤体の越流侵食過程をシミュレートできる数値解析手法を開発した。

堤体の土の侵食速度については、一度侵食によって水流に取り込まれた堤体の土粒子は再堆積することはないと仮定して以下の式で表せる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{E}{1-\lambda} \quad (2.1)$$

ここで、 z は地表面の高さ、 λ は地表面の間隙率である。 E は侵食速度であり、底面せん断応力 τ の関数として与えられる。

$$E = \begin{cases} \alpha(\tau - \tau_c)^\gamma & \tau > \tau_c \\ 0 & \tau \leq \tau_c \end{cases} \quad (2.2)$$

ここに、 τ_c は限界せん断応力、 α と γ は材料定数である。式(2.2)は粘着性の材料だけでなく、非粘着性の材料についても適用することができるとしている。

堤体上を流れる越流水の挙動は以下の浅水流方程式に従うものとしている。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + gh^2/2 \\ uvh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + gh^2/2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_f = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh\partial z/\partial x \\ -gh\partial z/\partial y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

ここに、 \mathbf{U} ：状態変数ベクトル、 \mathbf{F} 、 \mathbf{G} ： x 方向、 y 方向のフラックス、 \mathbf{S} ：ソース項ベクトル、 u, v ： x 方向、 y 方向の流速、 h ：水深、 g ：重力加速度の大き

さ、 Sf_x , Sf_y : x 方向, y 方向の摩擦勾配である。ここで、支配方程式である式(2.1)と式(2.3)を連立して解くことにより、越水による堤体侵食をシミュレートしている。なお、この手法においては、数値計算を行う上で必要な侵食速度に関する材料パラメータを、侵食試験等を実施して決定しておく必要がある。

2次元模型実験と数値解析結果を図-2.13に示す。この結果からは、越流侵食に伴う堤高の変化はうまく再現されているものの、侵食を受けた堤体下流側斜面の形状の再現性は低い。堤体下流側の形状が再現されない理由としては、本数値解析で適用した侵食速度は別途実施した侵食試験より把握したものであるが、その時の実験条件が最大 10Pa 程度の底面せん断応力下での測定であったのに対し、数値解析では堤体下流側のり尻で 20Pa を超える底面せん断応力が発生しており、侵食速度が正確に表現できていないことが考えられる。

このように、本手法については、破堤に至る時間や越流量の変化の予測への適用可能性が示されたものの、侵食に伴い変化する堤体形状や、土の飽和度の変化などを考慮した侵食速度を評価する必要性が明らかになった。

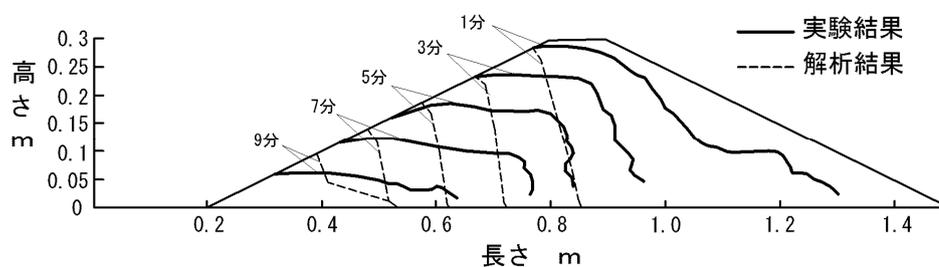


図-2.13 模型実験と数値解析結果との比較²⁴⁾を一部加筆

2.4 越水堤防の評価と導入に関する既往研究

越水堤防を、治水施設として導入するためのいくつかの研究が行われている。既往研究を一覧整理すると表-2.5のようになる。

表-2.5 越水堤防導入に関する既往研究

No	研究内容	概要	キーワード	参考文献 No
14	越流水の水理特性	越流水の水理特性や氾濫特性の把握といった物理現象把握及び越水堤防導入に伴う諸問題を治水計画上の観点から検討。	越水堤防 数値実験 氾濫水解析	25
15	洪水による破堤機構の把握	堤防の破壊機構と防止工を、浸透・漏水、越流、洗掘の三つの要因に大別して水理学的・土質力学的観点から考察。	破堤メカニズム 対策工 安全性評価	26
16	破堤氾濫被害の概要	足羽川、円山川で発生した洪水氾濫災害を中心に、災害の概要を示すとともに、災害の分析を通して分かったことや得られた教訓を整理。	洪水氾濫災害	27
17	破壊メカニズムの推定	平成17年7月の新潟豪雨洪水災害の五十嵐川および刈谷田川における洪水の検証及び破堤メカニズムを推定。	洪水の検証 破堤メカニズム	28
18	越水堤防と対策工の事例	越水堤防と対策工に関する既往研究事例の整理。	越流侵食 対策工	29
19	越流水の水理特性	越流水の水理特性の検討および越流を受ける堤体の挙動に関する調査。	越流侵食 対策工	30

建設省土木研究所²⁵⁾は、越流水の水理特性や氾濫特性の把握といった物理現象の把握および越水堤防導入に伴う諸問題を、治水計画上の観点から検討した。村本ら²⁶⁾は、堤防の破壊機構と防止工を、浸透・漏水、越流、洗掘の三つの要因に大別して、水理学的および土質学的観点から考察を行った。中川²⁷⁾は、平成17年の足羽川、円山川で発生した洪水氾濫災害を中心に、災害の概要を示すとともに、災害の分析を通して分かったことや得られた教訓を示した。7.13新潟豪雨洪水災害調査委員会²⁸⁾は、平成17年7月の新潟豪雨洪水災害の五十

嵐川および刈谷田川における洪水の検証および破堤メカニズムの推定を行った。Powledge, G.R.ら^{29),30)}は、越水堤防の事例整理や、越流水の水理特性の検討を行った。

(1) 治水対策としての越水堤防の導入に関する研究²⁵⁾

河川災害のなかでも、破堤災害は最も被災規模が大きく、かつ、その原因の多くが、洪水の堤防越流、特に湾曲部や合流点付近といった特定の河道形状区間における越流に起因している。越水対策としての越水堤防に対しては、技術的には、越水に対する堤体の強化（天端の被覆・堤体土質の改良）や、堤体浸透の抑制などが超過外力時の被害減少に効果を奏することが期待されるが、政策的には、治水対策としての位置づけが不明確で、かつ、流域住民に不平等感を抱かせるなど、現実的にはこれを導入するにあたっては、未だに様々な問題を残している。これらの隘路を解消していくためには、越水堤防の意義や問題点を網羅し、その背景を含めて越水堤防の全体像を浮き彫りにしていかなければならない。

過去に越水堤防が導入された地点の調査結果より、越水堤防による堤体の強化が計られる背景は、①河川改修に伴う堤内（外）地の土地減少の防止、②浸水被害の軽減・防止、であった。

越水堤防の導入に伴う問題点を整理すると以下のようである。

- ・越水堤防の導入にあたっては、河川管理者は越水堤防により発生する不公平感を持つ住民のコンセンサスを得る為の方策を考えるとともに、今後越水堤防を洪水防御計画の中で位置付けていかなければならない。この場合、氾濫原管理と洪水被害調整の問題が生じることとなる。
- ・越水堤防は、氾濫形態が貯留型の流域に設置するものとし、越流水は流域内の二線堤（周囲堤、自然堤防、鉄道、道路など）で制御するような地形特性を考慮する必要がある。
- ・改修計画の途中段階であったり、堤防及び河道の拡幅の為の用地取得が困難な場合に施工される暫定堤防区間は、越水堤防とする必要性が高くなると想定される。ただし、越水堤防とするには高コストとなるため、暫定施設に対する投資という点が課題となる。

(2) 越流破堤に対する堤防安全性確保に関する研究²⁶⁾

河川堤防の約80%は土砂あるいは砂利で造られており、その構造は一般に土質力学的安定条件を満たしているが、越流を対象とした設計はなされていない。このため、堤防が決壊する原因としては越流による法面侵食に起因するものが圧倒的に多く、全体の約80%を占めていると報告されている。従来、堤防は外水を越流させないことを基本的に考えられており、一度越流すればどうなるかという水理学的および土質力学的議論はほとんどなされていない。洪水時に越流が発生しても破堤に至らなければ洪水の被害は比較的小さくてすむし、たとえ破堤したとしても、破堤に至るまでの時間がかせげれば避難や水防という観点からは非常に有利となる。一般に、越流によって堤防法面が侵食され破堤に至る現象は、越流水の掃流力と堤体土の抵抗力の関係で決まるものであり、越流破堤を防止するためには、堤体全体を侵食抵抗力の大きい材料で造るか、あるいは堤防表面に何らかの侵食防止工を施す方法などが考えられる。

検討の結果、堤体の形状あるいは越流水の規模が破堤に与える影響はさほど見られず、堤体材料の影響が最も支配的であることが認められた。また、堤体土を構成している粘土と砂の混合材料の侵食速度を調べ、その材料の粘土含有率が多いほど、あるいは粘土含有率が同程度でも砂の粒径が大きいほど流水に対する耐侵食性が大きくなることが明らかとなった。

2.5 まとめ

本章では、河川堤防の越流侵食に関する従来の研究を、実験的研究、解析的研究、越水堤防の導入に関する研究に区分して整理した。これより、河川堤防の越流侵食研究の現状と課題を抽出すると以下のようである。

- ・ 河川堤防の決壊の原因の大半は越水に起因していることより、越流侵食に対して耐力を有する越水堤防は治水上有効である。しかしながら、越水堤防の導入にあたっては、技術的・社会的課題が多い。
- ・ 技術的課題としては、堤防が土構造物で、越水時に変形や浸透を伴うことより、現在の技術では定量的な取扱いが難しい点が挙げられる。このため、堤防の越流侵食に関しては、建設省土木研究所を中心として大型模型堤防を用いた実験的検討が行われてきた。しかしながら、この実験は大型模型であるがゆえに実験条件の制約や土質条件の均一性に関して課題がある。
- ・ 堤防模型の越流実験結果より、土でできた堤防は、越流侵食が継続すればいつかは破堤に至ることは避けられないと思われる。このため、堤防越水に対しては、越流に対して堤防の機能が維持される時間はどの程度であるか、どのような対策を講じればその機能を長時間維持できるかということが重要な視点となる。
- ・ 堤防の越流侵食現象の解析的検討も実施されているが、現時点では実用的なモデル化には至っていない。また、解析を検証するデータについても不足しているのが現状である。
- ・ 堤防の越水対策工については、技術的知見が不足しており、現時点では実用的な工法が明らかとなっていない。

このような研究の現状や課題より、越水堤防の開発は喫緊の課題ではあるものの、越流破堤のメカニズムが十分に究明されていないため、現時点では耐越水機能を有する堤防を検討することが難しい状況であると思われる。また、実際の堤防は地点ごとに土質の構成や特性が異なるものであるため、越水堤防を検討するためには、越流破堤現象を定量的に取り扱うことが必要であると思わ

れる。

このような考えを踏まえ、本研究では、越水堤防の開発に向けて、越水のメカニズム解明のための新たな知見の収集・蓄積を図るために、堤防模型による越流実験と、数値解析モデルによる越流破堤現象の定量化に関する研究を実施するものとする。

越流実験は、越流破堤のメカニズム評価のためには、土質条件や施工条件を管理しながら多くの実験回数を実施する必要があると考え、小型堤防模型による実験を実施するものとした。また、堤防の越流侵食実験については、出来るだけ実堤防に近い模型堤防で実施する方がよいとされている¹⁾。これは、実験水路等で実施される小規模の堤防模型（堤高数十 cm 程度）と大型堤防模型では、同じ土でも、堤防の作製方法が異なる（大型模型堤防の方が締固め方法などで実堤防に近い）ことや、大型の方が堤体材料の不均質性が大きくなることが要因である。このため、本研究で用いる堤防模型はこれらを勘案したサイズとする必要がある。

また、数値解析モデルについては、越流実験を行う実際の堤防の土（粘着性土）の侵食速度について現時点で不明な点が多いことより、本研究では非粘着性土質を対象とした検討を行うものとする。

<参考文献>

- 1) 建設省土木研究所河川研究室；越水堤防調査最終報告書－解説編－，土研資料第 2074 号，1984.
- 2) 建設省土木研究所河川研究室；越水堤防調査中間報告書－資料編－，土研資料第 1761 号，1982.
- 3) 建設省土木研究所河川研究室；越水堤防調査報告書－資料編（Ⅱ）－，土研資料第 2050 号，1984.
- 4) 建設省土木研究所土質研究室；堤防補強に関する大型模型実験(1)，土建資料第 1772 号，1982.
- 5) 建設省土木研究所河川研究室；加古川堤防質的強化対策調査報告書，土研資料第 2621 号，1988.
- 6) 藤田光一，末次忠司，諏訪義雄，東高德，白土正美，郡司篤，最上谷吉則；透水性（透気性）材料を用いた堤防裏法越水強化工法の水理的評価と技術的位置づけについて，河川技術論文集第 7 卷，pp.109-114，2001.
- 7) 独立行政法人土木技術研究所；河川堤防の耐侵食機能向上技術の開発（1）平成 19 年度成果報告書，2008.
- 8) 独立行政法人土木技術研究所；河川堤防の耐侵食機能向上技術の開発（1）平成 20 年度成果報告書，2009.
- 9) 独立行政法人土木技術研究所；河川堤防の耐侵食機能向上技術の開発（2）平成 19 年度成果報告書，2008.
- 10) 独立行政法人土木技術研究所；河川堤防の耐侵食機能向上技術の開発（2）平成 20 年度成果報告書，2009.
- 11) 建設省東北地方建設局岩手工事事務所；一関遊水地堤防の耐力に係わる水理実験報告書，1994.
- 12) 建設省東北地方建設局岩手工事事務所；堤防の耐力に係わる水理実験実施解析検討業務報告書，1995.
- 13) 建設省東北地方建設局岩手工事事務所；堤防の耐力試験に関する調査業務報告書，1996.
- 14) 国土交通省東北地方整備局岩手河川国道事務所；平成 19 年 9 月洪水による堤防越流実験結果について，国土交通省東北地方整備局管内技術研究発表，2008.
- 15) 国土交通省東北地方整備局岩手河川国道事務所；堤防浸透越流実験について－今後の堤防設計・管理に向けて－，国土交通省東北地方整備局管内技術研究発表，2008.

- 16) 福岡捷二, 藤田光一; 堤防法面張芝の侵食限界, 水工学論文集, 第34巻, pp.319-324, 1990.
- 17) 福岡捷二, 渡辺和足, 柿沼孝治; 堤防芝の流水に対する侵食抵抗, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.31-40, 1994.
- 18) 独立行政法人土木技術研究所寒地土木研究所; 十勝川千代田実験水路における横断堤を用いた正面越流破堤実験, 寒地土木研究所月報, No.670, pp.8-19, 2009.
- 19) 島田友典, 渡邊康玄, 横山洋, 辻珠希; 千代田実験水路における横断堤越水破堤実験, 水工学論文集, 第53巻, pp.871-876, 2009.
- 20) H. Nakagawa, T. Utsumi, K. Kawaike, Y. Baba, H. Zhang: EROSION OF UNSATURATED RIVER EMBANKMENT DUE TO OVERTOPPING WATER, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B1(Hydraulic Engineering), Vol.67, No.4, II_1-II_4, 2011.
- 21) 木村勝行, 重野輝貴, 成田国朝; 越流に伴う堤体の破壊現象に関する研究, ダム工学, Vol.9, No.3, pp.215-223, 1999.
- 22) 後藤仁志, 林稔, 織田晃治, 酒井哲郎; 越流水による河川堤防侵食過程のグリッドレス解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.439-444, 2002.
- 23) 後藤優典, 肥後陽介, 岡二三生, 木元小百合, 西村太佑; 破断を考慮したMPM-FDM法による越流時の河川堤防の浸透-変形連成解析, 土木学会第65回年次学術講演会論文集, pp.241-242, 2010.
- 24) 藤澤和謙, 村上章, 西村伸一, 玖珠隆行; 土の侵食速度を用いた堤体の越流破堤解析, 土木学会論文集 A2, Vol.68, No.2, pp. I_103- I_114, 2012.
- 25) 建設省土木研究所総合治水研究室; 越水堤防調査最終報告書-越流水の水理特性と越水堤防の導入に伴う問題点の検討-, 土木研究所資料第2081号, 1984.
- 26) 自然災害科学総合研究班(村本嘉雄研究代表); 洪水時における河川堤防の安全性と水防技術の評価に関する研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, No.A-61-5, 1986.
- 27) 中川一; 洪水氾濫災害の防止・軽減に向けて-2004年の水害からの教訓-, 第4回都市水害に関するシンポジウム講演論文集, pp.1-9, 2005.
- 28) 7.13新潟豪雨洪水災害調査委員会; 7.13新潟豪雨洪水災害調査委員会報告書, 2005.
- 29) Powledge, G.R. et al; Mechanics of overflow erosion on embankment. I, Journal of Hydauric Engineering, ASCE, Vol.115, No.8, pp.1040-1055, 1989.

- 30) Powledge, G.R. et al ; Mechanics of overflow erosion on embankment. II ,
Journal of Hydauric Engineering, ASCE, Vol.115, No.8, pp.1056-1075,
1989.

第3章 越流侵食実験による堤防の越流侵食・浸透メカニズムの評価

3.1 はじめに

近年の異常気象に伴う豪雨災害が多発していることを受け、計画規模を超える洪水に対する治水政策を展開していく上で、河川堤防の破堤の原因の大半を占める越流侵食についての技術的検討を進めていくことが重要であると思われる。洪水で堤防が越水した時は、高水位による堤体への浸透を伴いながら、越流侵食による変形が進行し、破堤に至るものとなる。既往研究でも明らかとなっているように、土でできた堤防は、越流侵食が継続すればいつかは破堤に至ることは避けられない。このため、施策上は、越流に対して堤防の機能が維持される時間はどの程度であるかということ、どのような対策を講じればその機能を長時間維持できるかということ把握することが視点となる。ここで、堤防の越流侵食には、外力となる河川水の水位・越流量等の条件だけでなく、堤防形状、堤防の土質、堤防の締固め度などの施工状況および浸透や降雨による堤体湿潤状況など、複雑な要因が絡み合っていると想定される。しかしながら、現時点では、このような越流破堤のメカニズムが十分に究明されておらず、越流侵食現象を解析的アプローチにより定量的に取り扱うことが難しい。

このため、本研究では、越水堤防の開発に向けて、越流侵食のメカニズム解明のための新たな知見の収集・蓄積を図るために、第3章では堤防模型による越流実験、第4章では数値解析モデルによる越流侵食現象の定量化に関する研究を実施した。

堤防模型の越流実験については、第2章で整理したように、独立行政法人士

木研究所（旧建設省土木研究所）において、昭和 51 年から昭和 58 年にかけて堤体高 3 m 程度の大型模型堤防を用いた実験が行われている^{1)・3)}。この研究は、越水堤防を実現化するための端緒となる研究であり、越流侵食に関するいくつかの知見が示されているとともに、実験室内で実施される小規模の実験（堤高数十 cm 程度で砂質土を用いた実験など）とは、明らかに異なる越流侵食結果が得られていることより、実河川での越流侵食のメカニズムを知るためには、土の粒径が不均質で粘着性を有する実際の堤防材料を用いる必要があることや、実堤防と同じような施工方法で築造された堤防で実験をする重要性についても示された成果であった。

一方、この土木研究所の実験は、堤高 3 m の大型模型堤防であるが故に、実験条件や回数の制約が多く、例えば土質条件を同一として外力条件の違いによる結果を比較するなどの評価が難しいなどの課題がある。

本章で実施する堤防模型の越流実験については、このような既往研究の成果や課題を踏まえて、越流侵食・浸透のメカニズムを検討するためには出来るだけ実験条件を均一化したうえで、堤体の土質条件や外力条件などについてさまざまな条件での模型実験を実施する必要があると考えた。また、実堤防と同じような施工方法や土質材料を用いた実験とすることも必要であった。このため、本章では、実際の堤防材料を用いつつ実験条件を管理できることと、模型製作が比較的容易で実験回数を多く実施可能であることより、堤高 1 m 程度の小型模型堤防を用いた実験を行うものとした。

3.2 実験方法⁴⁾

3.2.1 実施方針

越流侵食現象のメカニズムを模型実験により検討するためには、外力条件等をパラメータとした実験を実施して比較評価を行うとともに、土質条件や施工条件を管理した精度の高い実験を行う必要がある。これより、本研究では、大型模型堤防ではなく、模型製作が比較的容易で実験回数が多く実施できる小型模型堤防による実験を行うものとした。一方、堤防サイズを小さくしすぎると、実堤防の施工方法（まきだしと締固めを繰り返して層状に作成する方法）と模型堤防での作成方法が異なってくる。模型堤防の施工方法は、越流侵食実験結果に影響することが明らかとなっている。また、本実験では越流で破堤させるという目的より、越流水深は相似則などで設定するのではなく、越流侵食しうる条件を設定するものとするため、堤防高に比して越流水深が大きくなりすぎることが考えられる。このため上記を考慮した上で、越流侵食実験および浸透実験を行う模型堤防のサイズは堤体高 1.0m とした。

また、越流侵食実験および浸透実験については土で作成した堤防で実施するが、土堤防では越流時の流速などの水理量の計測が困難であるため、同一形状の固定堤防を用いた固定床水理実験も実施した。

3.2.2 実験装置

(1) 実験模型

小型堤水理実験装置は、気象・外気環境等の影響を避けるため京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー実験棟内に作成した。小型堤水理実験装置を図-3.1、実験装置写真を図-3.2に示す。実験装置は、循環ポンプ、流入水路、試験水路、沈砂池、循環水路で構成されている。試験水路は鉄筋コンクリート造で、全長 47.0m、幅 2.0m、高さ 2.5m であり、盛土による堤体部の前に整流区間および助走区間を確保した。また、堤体側面の一部は観測のためにガラス張りとした。

堤体高以外の堤防形状は、河川堤防の実例⁵⁾(淀川下流部：堤防高 10m、天端幅 7m 程度)の形状と河川堤防の標準断面形状⁶⁾を参照して、堤体高 1.0m、天端幅 0.7m、表・裏のり面勾配 1 : 2 とした。また、基礎部は循環水路等の施設設置高の制約もあり、高さ 0.5m、延長 17.0m とした。堤体および基礎部の材料は、越流侵食実験および浸透実験では実堤防の土、固定床水理実験では合板とした。

なお、実験流量は最大 0.800m³/s であり、本実験装置では越流水深 30cm までの実験が可能である。

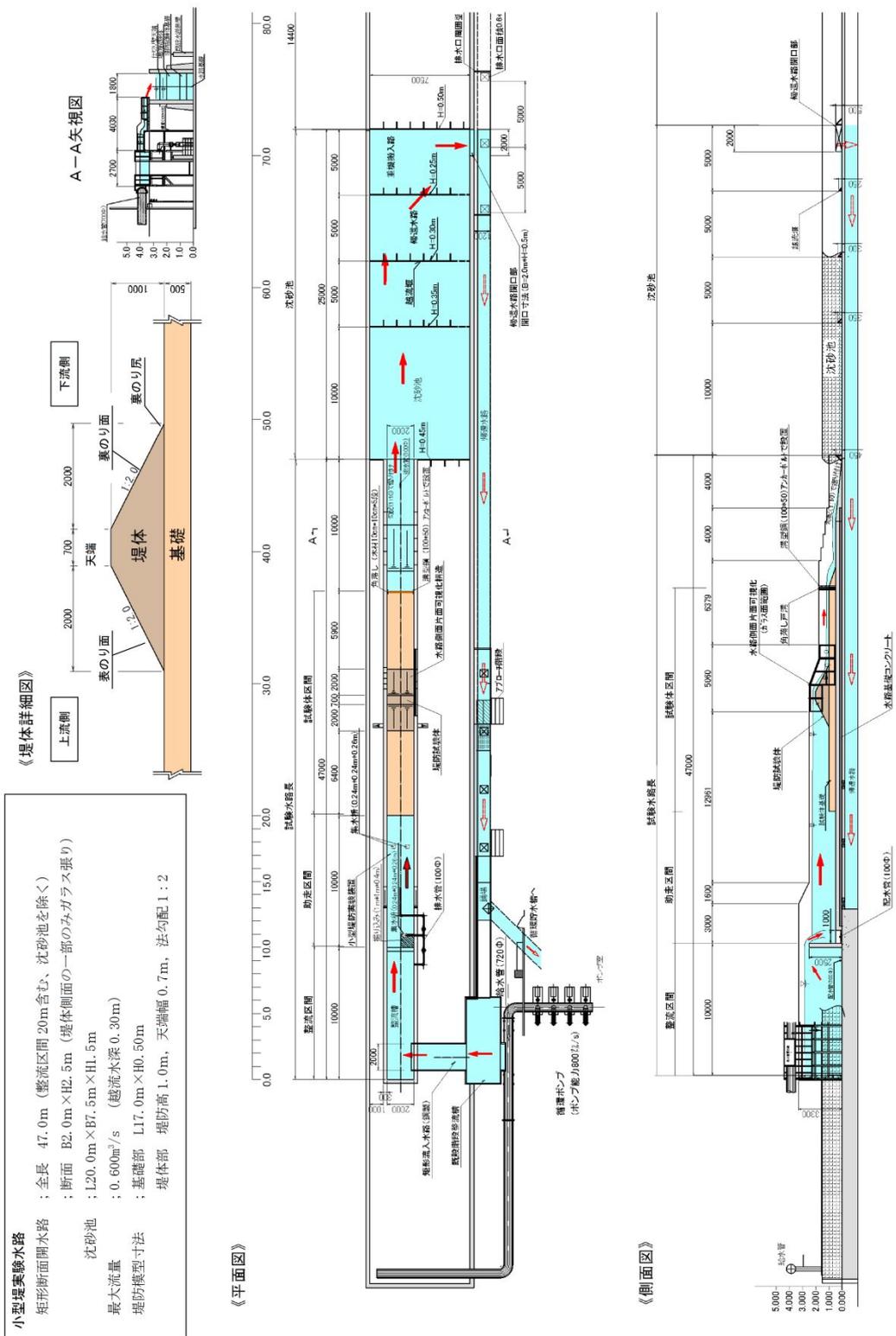


図-3.1 小型堤水理実験装置



水路部全景



堤体部側面より

図-3.2 越流侵食実験装置写真

(2) 越流侵食実験に用いた堤体材料

堤体および基礎部の材料は、近畿地方整備局淀川河川事務所の管理区間の堤防強化工事等で使用している混合改良土を用いた。堤体材料の土は、保管場所

表-3.1 実験に使用した土の土質試験結果

試験項目		H18①	H18②	H19①	H19②	H19③	H20①	H20②
一般	土粒子の密度 ρ_s	2.690	2.671	2.646	2.650	2.651	2.649	2.639
	自然含水比 ω_n	7.0	11.7	14.3	11.8	10.5	12.1	7.3
粒度	石分 (75mm以上) %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	礫分 ¹⁾ (2~75mm) %	33.4	37.5	29.0	29.0	33.0	31.7	35.6
	砂分 ¹⁾ (0.075~2mm) %	41.1	40.7	48.1	48.4	43.5	47.6	42.8
	シルト分 ¹⁾ (0.005~0.075mm) %	15.0	13.2	9.1	10.2	9.5	9.1	9.9
	粘土分 ¹⁾ (0.005mm未満) %	10.5	6.3	13.9	12.4	14.0	11.6	11.7
	最大粒径 mm	42.7	37.5	39.0	42.7	42.7	42.7	60.3
	D_{60} mm	1.3	-	1.1	1.0	-	1.1	1.4
	D_{30} mm	0.6	-	0.6	0.6	-	0.6	0.8
	均等係数 U_c	484.5	272.4	-	507.5	-	407	723
	曲率係数 U_c'	7.6	5.3	-	-	-	-	-
コンシステンシー 特性	液性限界 ω_L	23.6	23.5	34.5	34.9	36.1	34.4	32.2
	塑性限界 ω_p	14.1	15.0	19.5	19.8	22.6	19.2	19.3
分類	塑性指数 I_p	9.5	8.5	15.1	15.1	13.5	15.3	12.9
	土盤材料の 分類名	細粒分質 礫質砂~砂質礫	細粒分質 礫質砂	粘性土質 礫質砂	粘性土質 礫質砂	粘性土質 礫質砂	粘性土質 礫質砂	粘性土質 礫質砂
	分類記号	(SFG-GFS) B-c	(SFG) B-c	(SSG) A-a	(SSG) A-a	(SSG) A-a	(SSG) A-a	(SSG) A-b
	試験方法							
締固め	最大乾燥密度 ρ_{dmax}	1.870	1.901	1.900	1.909	1.923	1.861	1.915
	最適含水比 ω_{opt}	11.3	12.4	11.3	11.2	11.6	13.2	12.0
透水試験	透水係数 k	1.83E-04	6.30E-05	2.16E-04	4.39E-04	4.50E-04	4.79E-04	2.81E-04
	粘着力 C	1.4	5.7	6.3	5.7	6.3	13.7	13.0
三軸CU	内部摩擦角 ϕ	16.2	18.5	17.3	20.6	18.7	19.1	19.2
	全応力	ϕ	-	0.7	7.0	6.0	-	-
三軸CUB	有効応力	ϕ'	-	17.5	18.4	18.1	-	-
		ϕ'	28.2	25.4	26.1	26.9	-	-

1) 石分を除いた75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。

の制約のため実験の進捗にあわせて数回に分けて搬入したが、搬入毎に土質試験を実施して材料に大きな違いがないかを確認した。土質試験は表-3.1に示す土の物理試験（土粒子の密度試験，含水比試験，粒度試験，液性限界・塑性限界試験，土の保水性試験）および力学試験（土の三軸圧縮試験，土の締固め試験，土の透水試験，土の圧密試験）を実施した。なお，表上段の「H18①」等は実験実施の年度と搬入回を表す。

土質試験結果より，実験に用いた堤体材料は砂分が主体の礫質砂であり，土の透水係数（90%締固め調整時）は $2 \times 10^{-4} \text{cm/s} \sim 4 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ でやや難透水の材料であった。また，粘着力(c)は $1.4 \sim 13.7 \text{kN/m}^2$ ，内部摩擦角(ϕ)は $16.2 \sim 20.6^\circ$ であった（CU試験）。また，実験材料の粒度分布を図-3.3に示す。図中の黒色の太点線は，河川土工で一般的に用いられる堤体材料の適用範囲である⁷⁾。これより，実験に使用した堤体材料は，一般の築堤材料に用いるものと同等であるととも、搬入毎の材料の違いはほとんどないものであった。

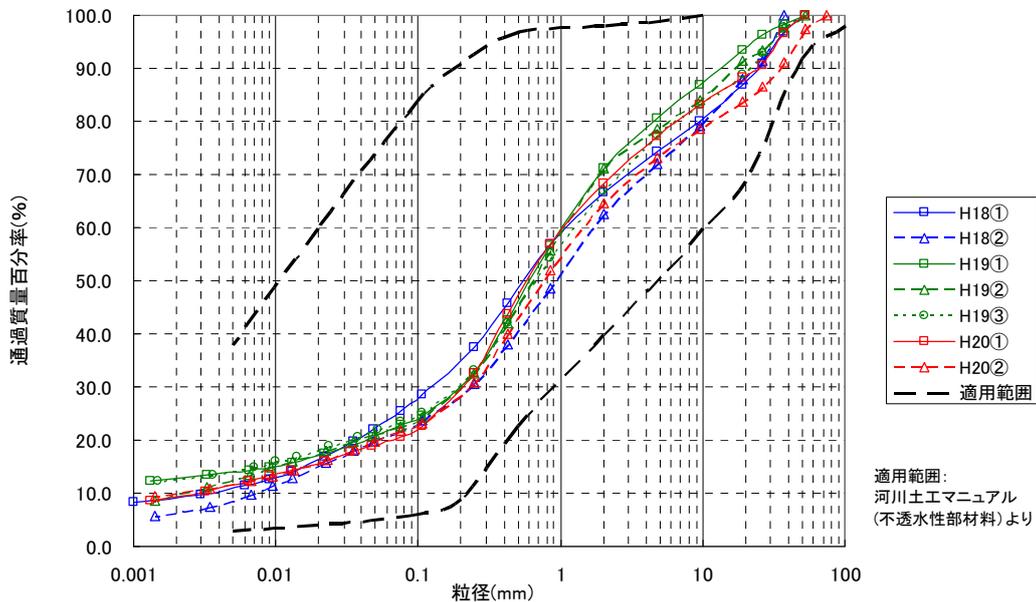
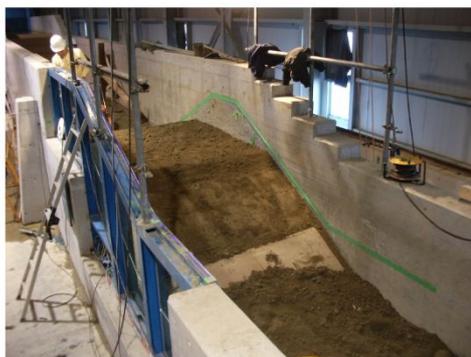


図-3.3 実験に使用した土の粒度分布

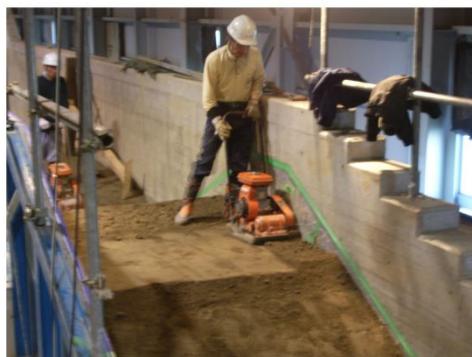
(3) 堤体作成方法

模型堤防の堤体の作成は、実堤防の施工手順を参考とした。また、堤体作成時のバラツキを出来るだけ抑制するために、堤体の作成方法および手順を常に同一とした。このため、堤体および基礎部の作成は、土の含水比を散水等により最適含水比に調整しながら、層厚 10cm 程度ごとに締固めを行った。堤体の締固め度（本実験では 90%と 85%を作成）は、プレートコンパクターの転圧回数で調整した。また、基礎部は堤体より締固め度を大きくして 90%以上とした。なお、堤体・基礎部の締固め度の管理は、各転圧段階で RI 試験（放射性同位体（Radio Isotope）を利用した計測方法）を行い、所定の締固め度となるように確認しながら作成した。RI 試験方法は、「RI 機器を用いた盛土の締固め管理要領（案）」⁸⁾に準拠した。

なお、越水実験後に、沈砂池に堆積した土および流出せずに堤体部に残った土は、一度水分を含んでおり、堤体作成時の材料の含水比および締固め度管理が難しいために使用せず、実験ごとに新規の土で堤体を作成した。



土の敷き均し（仕上げ面より 10cm 下まで）



プレートによる締固め



ランマーによる端部締固め



上流法面仕上げ面締固め

図－3.4 堤体作成方法

3.2.3 実験方法

(1) 固定床水理実験

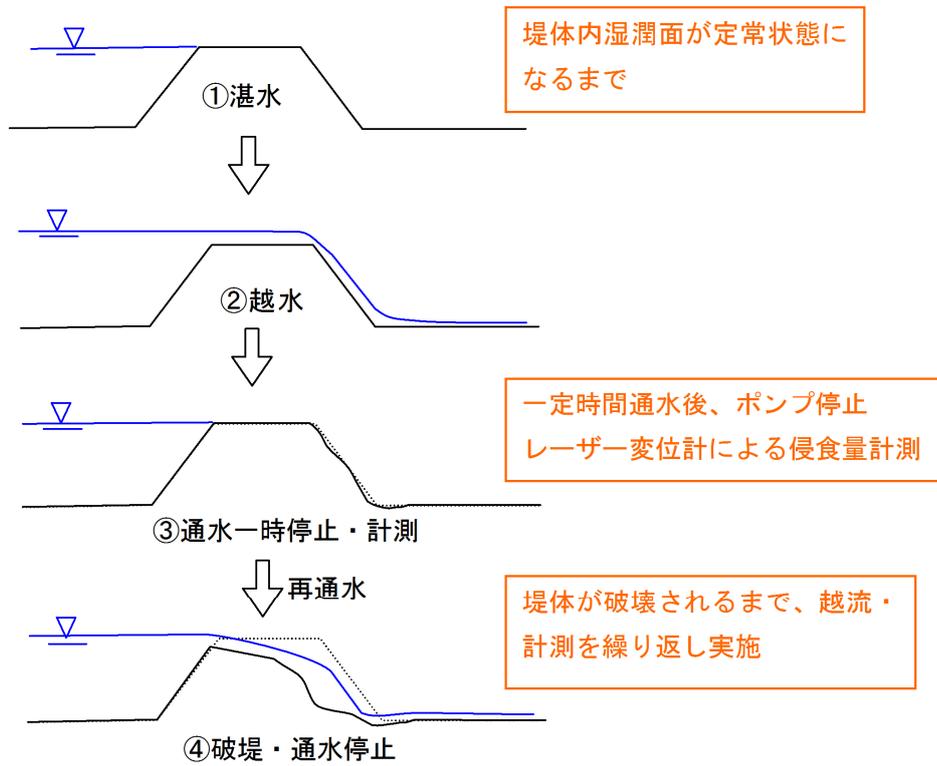
本実験の堤体形状での越流時の水理量を計測するため、表面粗度をつけた合板で作成した固定床堤体を用いた越流実験を実施した。測定項目は、水面計（水位）、圧力分布および流速分布である。水面計はポイントゲージおよびレベル、圧力分布はマンメータ、流速分布はピトー管および高速カメラ分析により測定した。実験時の越流水深は、予備実験でポンプ流量と越流水深の関係を求め、ポンプ操作により越流水深を 10cm, 20cm, 30cm の 3 通りに変化させた。

(2) 越流侵食実験

越流侵食実験では、同一の材料、手順により作成した土堤防を用いて、越流時の侵食状況を計測した。越流侵食実験では、堤体内を湿潤状態として実験開始することを基本条件とした。このため、堤体上流側の水位を、堤防天端高で固定して 24 時間以上の湛水を行い、堤体内湿潤面が定常状態となった後に、所定の越流水深となるようにポンプ流量を設定して越流させた。越流侵食実験の手順を図-3.5 に示す。実験は、堤体天端が破壊されて所定の越流水深が維持されなくなる時点（＝「破堤」と定義）まで、越水と通水停止（侵食変形計測）を繰り返し実施した。

越流侵食実験での計測項目は、越流時の流況撮影、越流侵食量計測、堤体内湿潤状態の計測および浸透に伴う裏のり面の変形量計測とした（表-3.2）。

越流侵食量計測は、通水開始後 2 分、10 分等の間隔で通水を一時停止し、図-3.6 のように堤体および基礎部の堤防形状を 2D レーザー変位計（計測誤差 ±15mm）で計測し、それを堤体横断方向に移動させたデータを重ねることにより堤防全体の形状を求め、その通水前後の変化量を侵食量として算出した。この方法では、連続して通水する場合と侵食形状が一致しなくなることも想定されたが、通水時の堤体形状を直接計測することが困難であったため、このような段階的計測方法によるものとし、各実験での通水時間やポンプ操作を統一することで実験間の差異を確認することに着目するものとした。



図－3.5 越流侵食実験の手順

表－3.2 越流侵食実験 計測項目

計測項目	計測方法	計測時期
堤体内湿潤状況	間隙水圧計（5箇所）	湛水時～通水時
裏のり面変形量	裏のり面に設置した直接変位計	湛水時
流況	ビデオカメラ撮影（3方向）	通水時
侵食変形	レーザー変位計	通水一時停止時

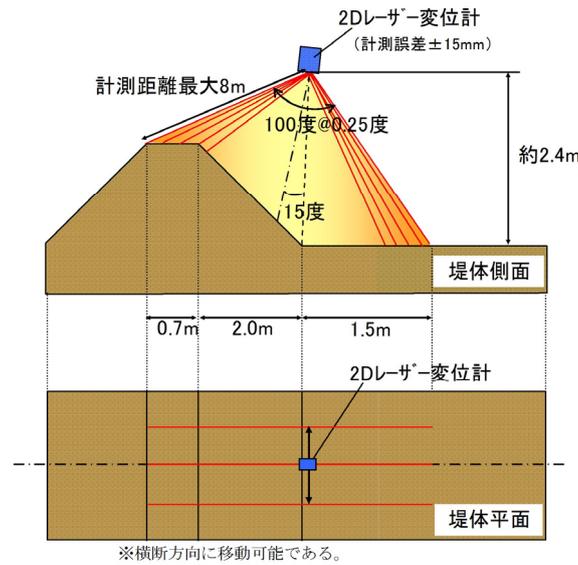


図-3.6 レーザー変位計概要図

堤体内湿潤状態の計測は、図-3.7の間隙水圧計を、堤体内の#1～#5の5箇所(図-3.8)に埋設して、湛水時から越流侵食実験が完了するまで堤体内間隙水圧の連続計測を行った。間隙水圧計の計測精度は±4.2cmで、大気圧補正水圧計(#0)を別途設置した。越流実験時には、越流水による荷重増加から堤体内の空気圧は増加するとみられるが、空気抜きを設置しているため空気圧は排除され、水圧のみの計測となる。また、越流侵食実験前の堤体内湿潤面が定常状態かどうかの判定は、裏のり面に近い間隙水圧計#3を観測して確認した。

浸透に伴う裏のり面の変形量計測は、裏のり面に図-3.9のような直接変位計(ダイヤルゲージ式;最少読み値0.01mm)を設置して、湛水に伴う裏のり面の変形(はらみだし)量を計測した。計測は、湛水前から通水開始前までの経時変化を自動計測し、通水前に撤去した。

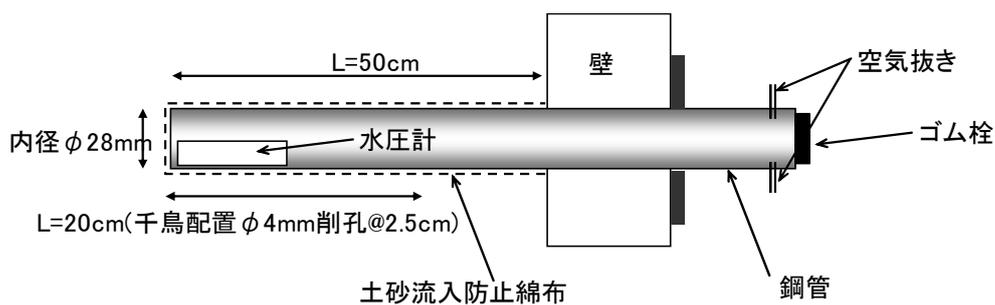
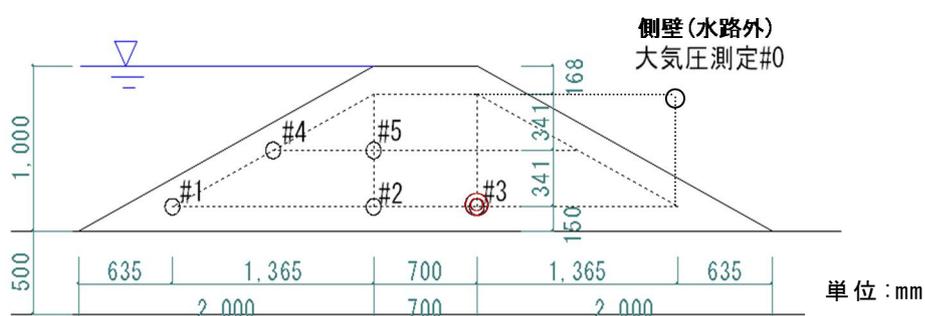


図-3.7 間隙水圧計詳細図



※◎#3 は湛水中に間隙水圧を常時観測し、定常となったかを確認する。

図-3.8 堤体内間隙水圧計設置位置

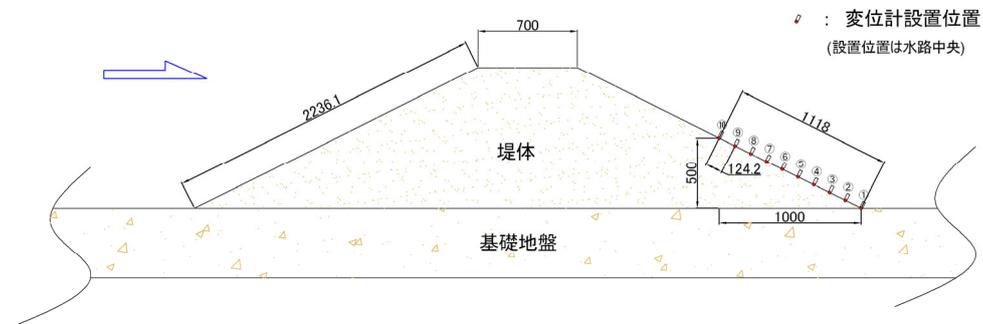


図-3.9 裏のり面の直接変位計 設置状況

3.2.4 実験ケース

本研究では、堤防越水時の侵食メカニズムを評価するため、以下の方針で越流侵食実験を行うものとした。

- ① 管理して製作した堤防模型を用いることにより、堤体の形状、土質条件等が要因となる実験結果の相違を出来るだけ排除する。
- ② 越流侵食の基礎的現象を把握するため、外力条件、堤体締固め度、堤体内湿潤状態など条件が異なる場合の越流侵食の違いを確認する。
- ③ 土質条件や施工条件を管理した小型堤防を用いた実験であっても結果にバラツキが生じるかを確認する。

小型堤防による実験ケースを表-3.3に示す。各ケースは、特異な実験結果を判別するため、同一条件で3回以上実施するものとした。越流水深については、10cm、20cm、30cmと変化させたケースを実施した。堤体の締固め度は、河川堤防の締固め度管理基準である締固め度90%と、実堤防の締固め状態を想定した締固め度85%について実施した。また、破堤現象への堤体内湿潤状態の違いによる影響を検証するため、越流侵食実験前に一定時間の湛水を行い堤体内に定常湿潤面（飽和域）を設けた後に越水を開始するケース（「越流前湛水あり」とよぶ）と、越流侵食実験前に湛水を行わず堤体内に湿潤面を設けない条件で越水を開始するケース（「越流前湛水なし」とよぶ）について実施した。

ケースⅡ-1「越流水深30cm、堤体締固め度90%、越流前湛水あり」の条件は、比較評価の基本ケースとするとともに、実験結果のバラツキ評価を行うため、同一条件で11ケース実施した（実験は全13ケース実施したが、特異な結果が得られた2ケースを除いた）。なお、「湛水なし」の実験では、基礎部底面から堤体天端高まで水位上昇させた後、一気に水位上昇・越流させた。また、堤体土質は同一条件とみなした。

表-3.3 越流侵食実験ケース

実験の種類	No.	越流水深	堤体目標 締固度	湛水有無	実験回数
固定床	I	10, 20, 30cm	—	—	各1
越流侵食	II-1	30cm	90%	あり	11※ ²
	II-2	20cm	90%	あり	3
	II-3	10cm	90%	あり	3
	II-4	30cm	85%	あり	8
	II-5	30cm	90%	なし	3

※1：網掛けは基本ケース（II-1）に対して変更した条件

※2：全13ケース実施したが、特異な結果が得られた2ケースを除いた

3.3 実験結果

本節では、模型堤防による越流実験の状況を把握するとともに、本実験で得られる結果の検証を行うことにより、本節以後の実験結果の評価にどの程度結果を反映できるかについて検討を行う。

3.3.1 越流侵食実験結果

基本ケースであるケースⅡ-1（越流水深 30cm，堤体締固め度 90%，越流前湛水あり）の越流侵食実験結果より、堤防模型での越流侵食の特徴を説明する。

まず、ケースⅡ-1-⑨*の侵食状況写真を図-3.10(1)，変位計で計測した侵食形状を図-3.11(1)に示す。（※ケースⅡ-1の全11ケースのうち9回目に実施した実験No.をこのように表す。以下同じ。）

この実験ケースでは、越流開始後81分（累積）で破堤に至った。まず通水2分後に、のり面中央付近からのり尻が侵食された。のり面の侵食箇所は、越流前湛水による湿潤面と概ね一致している。また、のり尻より下流の侵食範囲は大きく広がっていない。通水12分後（累積）では、のり面の侵食が進行して、水路右側（コンクリート壁側，侵食形状図では50cm断面）のみが、やや切り立った侵食面となる。通水22分（累積）では、全面で堤防天端まで侵食が進行し、垂直に切り立った侵食面となる。以後は、通水により堤防天端の侵食が上流側に進行し、侵食面直下およびその下流は深く侵食される。なお、鉛直下方向の侵食については、模型堤防の基礎部底面の制約を受けている。最終的に、通水81分（累積）で破堤、すなわち所定の越流水深が維持できなくなり、実験を完了した。なお、写真ではのり面に局所的な侵食が見られるが、侵食形状図からは、堤防横断方向にはほぼ一様に侵食されていると評価することができる。

次に同じ条件で実施した、ケースⅡ-1-⑩の侵食状況写真を図-3.10(2)，侵食形状を図-3.11(2)に示す。この実験ケースでは、越流開始後169分（累積）で破堤に至った。まず通水2分後に、のり尻が局所的に深く（初期地盤高から30cm程度）まで侵食されるとともに、のり面中央付近より下が侵食された。通水12分後（累積）では、のり面の侵食が進行して、のり肩の少し下から崖状の

侵食面となる。この時、堤体と基礎部の境界で階段状となるが、これは基礎部の方が締固め度を大きく作成しているためであると考えられる。最初に局所的に侵食したのり尻部は、侵食土の再堆積で侵食深さは浅くなるが、のり尻より下流の侵食範囲が拡大している。通水 22 分（累積）では、堤防天端付近までのり面の侵食が進行し、階段状になっていた基礎部も侵食され始めている。のり尻部およびのり尻下流は侵食土の再堆積により実験開始時の地盤高付近まで上昇している。以後は、通水により堤防天端の侵食は上流側に進行し、のり尻部およびのり尻下流は深く侵食され、最終的に、通水 169 分（累積）で破堤し、実験を完了した。また、このケースでも、写真および侵食形状図からは、堤防横断方向にほぼ一様に侵食されていると評価することができる。

このように、同じ実験条件での越流侵食現象を比較すると、侵食進行の形状はほぼ同じであり、堤防天端まで侵食が進行する時間もほぼ同じであることが分かる。ただし、侵食面が堤防天端に達した後、侵食面が上流側のり肩に至るまでの侵食時間は、ケースⅡ-1-⑨で 59 分（81 分－22 分）、ケースⅡ-1-⑩で 147 分（169 分－22 分）と大きな差がでており、堤防天端が侵食される速度の差が破堤に至る時間が異なる要因となっている。

次に、越流実験時の堤体内の浸透状況を説明する。越流前湛水ありの実験ケースでは、越流開始前に約 24 時間の湛水を行っている。実験時の間隙水圧計測結果を図-3.12 に、間隙水圧データより描いた堤体内湿潤面を図-3.13 に示す。湛水直後から下部上流側の #1 が上昇を開始する。その後、下部中央の #2、上部上流側の #4、下部下流側の #3 が反応し、約 4 時間後に上部上流側の #5 で反応した。各計測値は湛水後 10 時間くらいまで上昇を続け、その後、ほぼ一定の値となる。堤体内湿潤面を見ると、湿潤面は堤体下部から基礎地盤に平行に上昇しており、のり面から浸透して堤体内が湿潤していくような状況は見られなかった。また、堤体内湿潤面が定常状態になっても、上流側計測位置（#1, 4, 5 など）の値は湛水位まで上昇しておらず、（一般に描かれるような）上流のり肩から下流のり尻へ向かうような湿潤面となっていない。この理由としては、本模型堤防では、所定の締固め度となるように、堤体のり面をプレートコンパクターで仕上げているため、堤体表層から浸透しにくく、基礎を通過して堤体下部からの浸透の方が卓越しているためである。

ケースⅡ-1-⑨ (越流水深 30cm、締固め度 90%、越流前湛水あり)

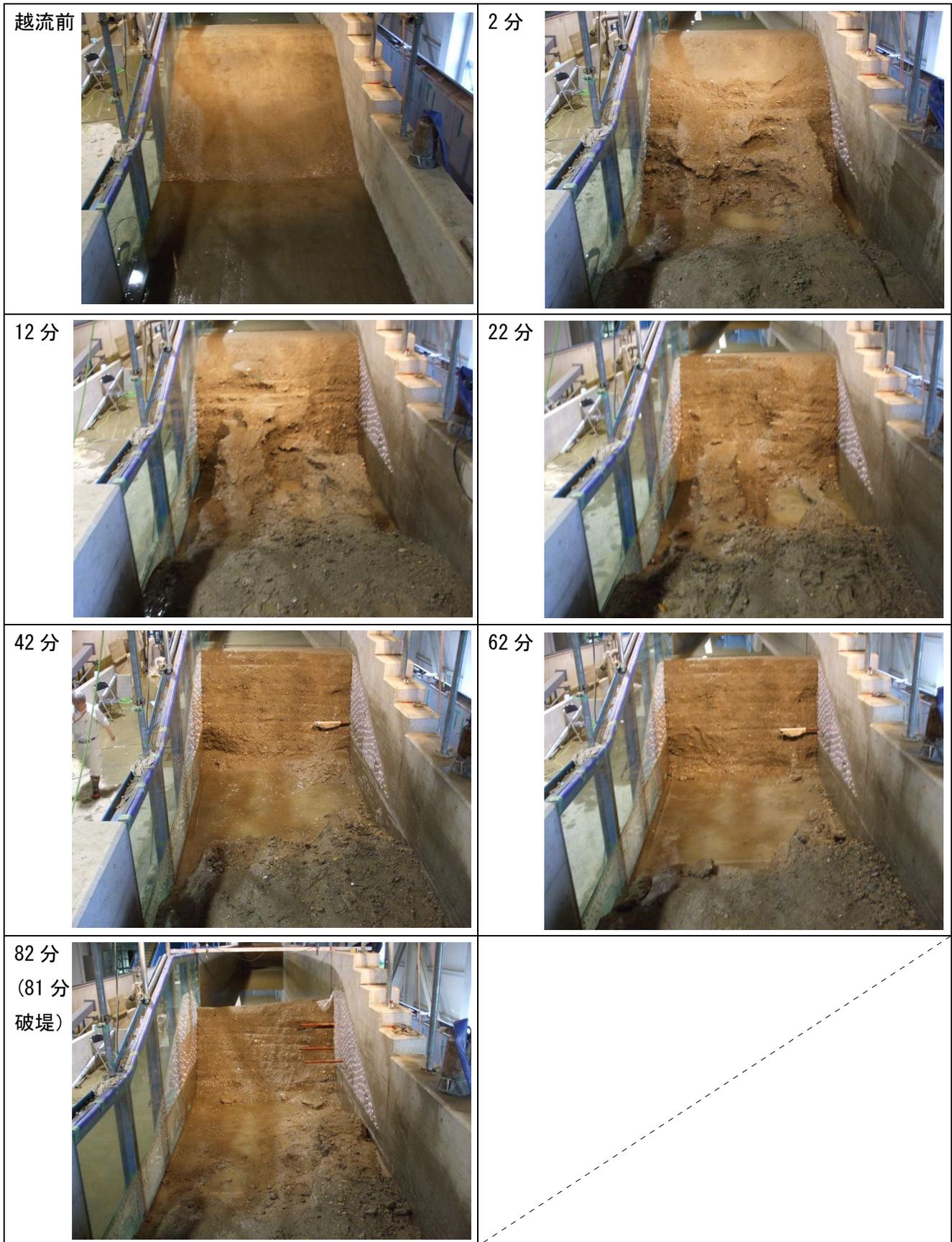


図-3.10 (1) 越流侵食実験状況写真 (ケースⅡ-1-⑨)

ケースⅡ-1-⑩ (越流水深 30cm、締固め度 90%、越流前湛水あり)

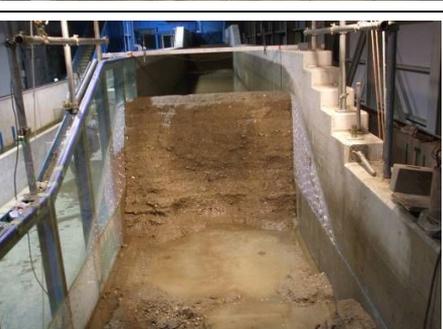
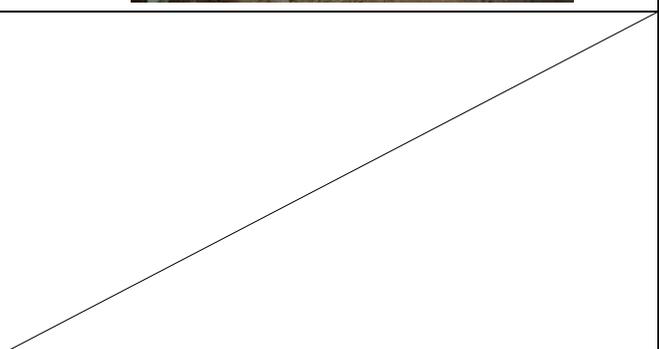
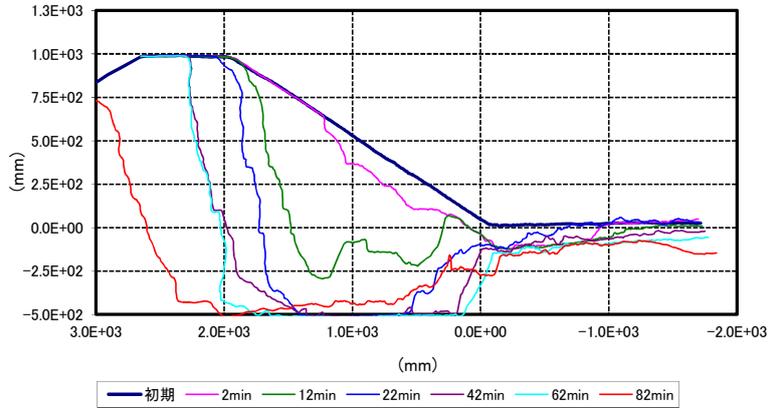
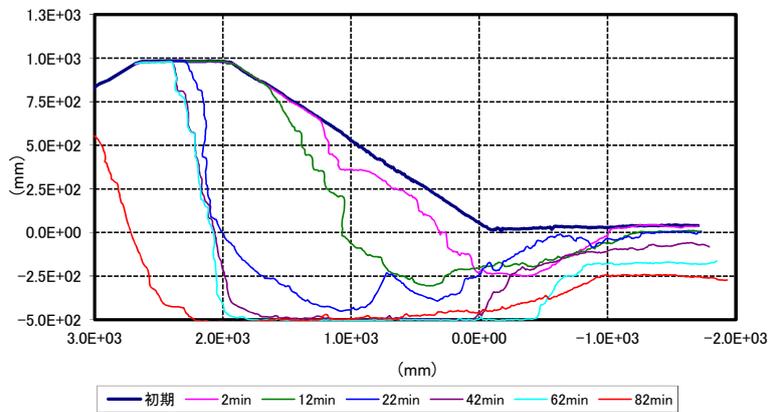
<p>越流前</p> 	<p>2 分</p> 
<p>12 分</p> 	<p>22 分</p> 
<p>42 分</p> 	<p>62 分</p> 
<p>82 分</p> 	<p>122 分</p> 
<p>182 分 (169 分 破堤)</p> 	

図-3.10 (2) 越流侵食実験状況写真 (ケースⅡ-1-⑩)

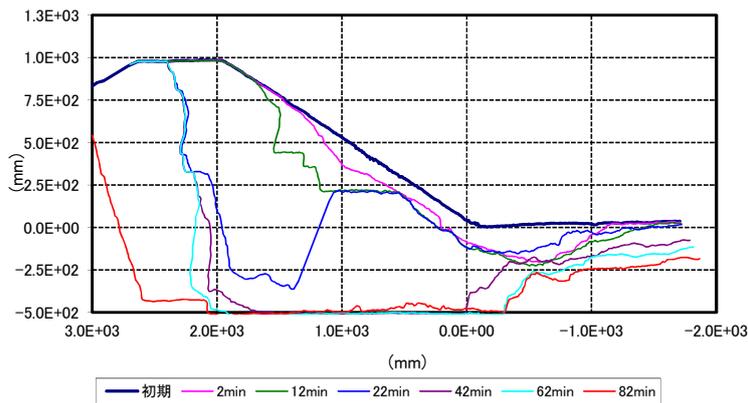
【50cm 断面】



【100cm 断面】



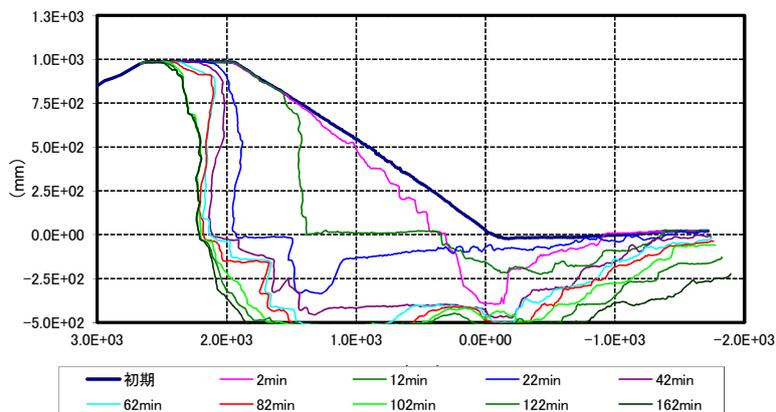
【150cm 断面】



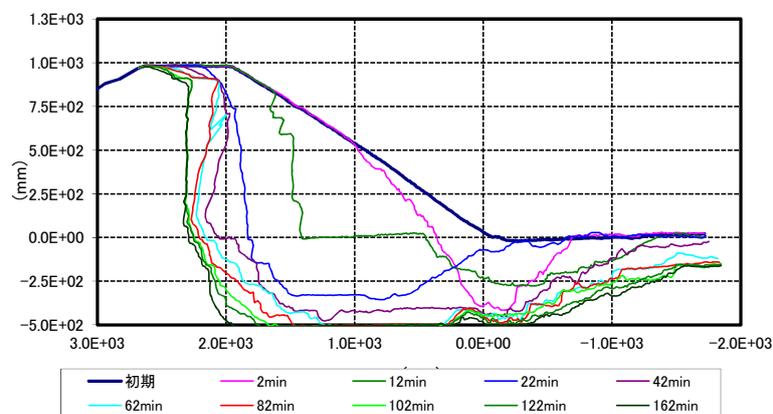
50cm 断面：水路コンクリート壁側から 50cm 位置
 100cm 断面：水路中央
 150cm 断面：水路ガラス面側から 50cm（コンクリート壁から 150cm）位置

図-3.11(1) 侵食形状図（ケースⅡ-1-⑨）

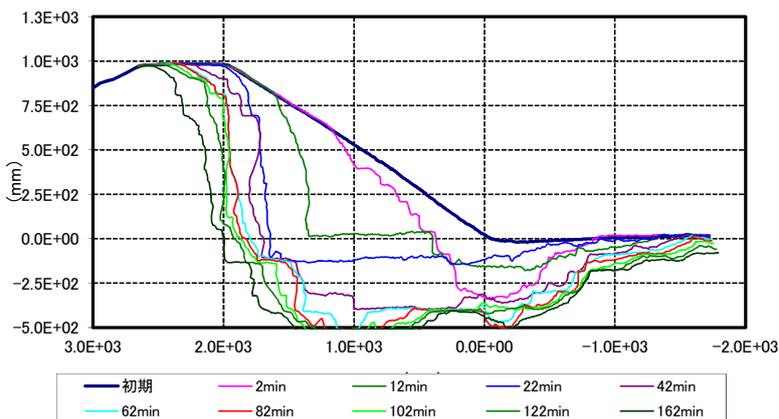
【50cm 断面】



【100cm 断面】



【150cm 断面】



50cm 断面：水路コンクリート壁側から 50cm 位置
 100cm 断面：水路中央
 150cm 断面：水路ガラス面側から 50cm（コンクリート壁から 150cm）位置

図-3.11(2) 侵食形状図（ケースⅡ-1-⑩）

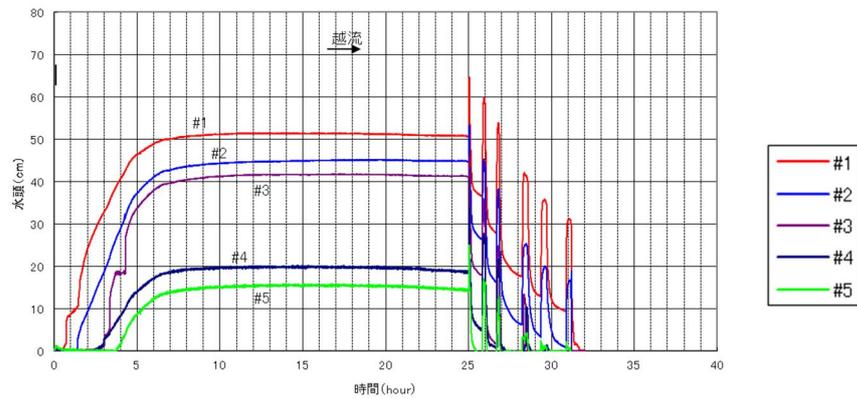


図-3.12 堤体内水頭変化 (ケースⅡ-1)

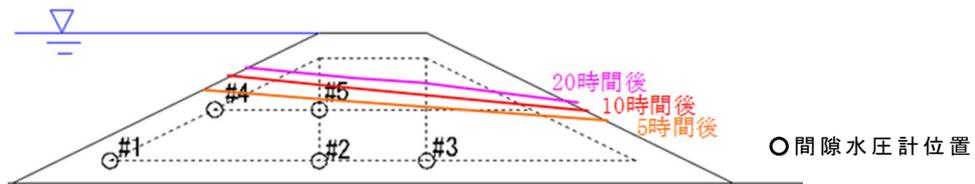


図-3.13 堤体内湿润面図 (ケースⅡ-1)

3.3.2 固定床水理実験結果

土堤防を用いた越流実験では、堤防が侵食により変形して水理量の直接計測が困難であるため、合板で作成した固定床堤体による越流実験により、縦断水位、圧力、流速を測定した。実験条件は、越流水深 10cm, 20cm, 30cm である。固定床実験結果 (ケースⅠ) を図-3.14 に示す。

いずれの越流水深でも、のり肩直下付近で剥離流によるものと思われる圧力水頭の低下が見られる。特に、越流水深 30cm では負圧が発生している。また、のり尻付近は水撃による急激な圧力水頭の上昇があるが、越流水深 10cm のケースでは、のり尻付近の圧力上昇が見られなかった。この理由としては、模型ののり尻が角張っておらず若干なめらかなアールを描いていることより、流量が少ない場合に流水の衝突が生じなかったことが考えられる。

流速については、越流水深 20cm, 30cm については、のり面を流下するに従い流速が増加し、のり尻で若干低下した後、のり尻直下で再び増加している。しかし、越流水深 10cm では、固定床の合板の粗度の影響で、逆にのり面を流下するに従い流速が小さくなっている。

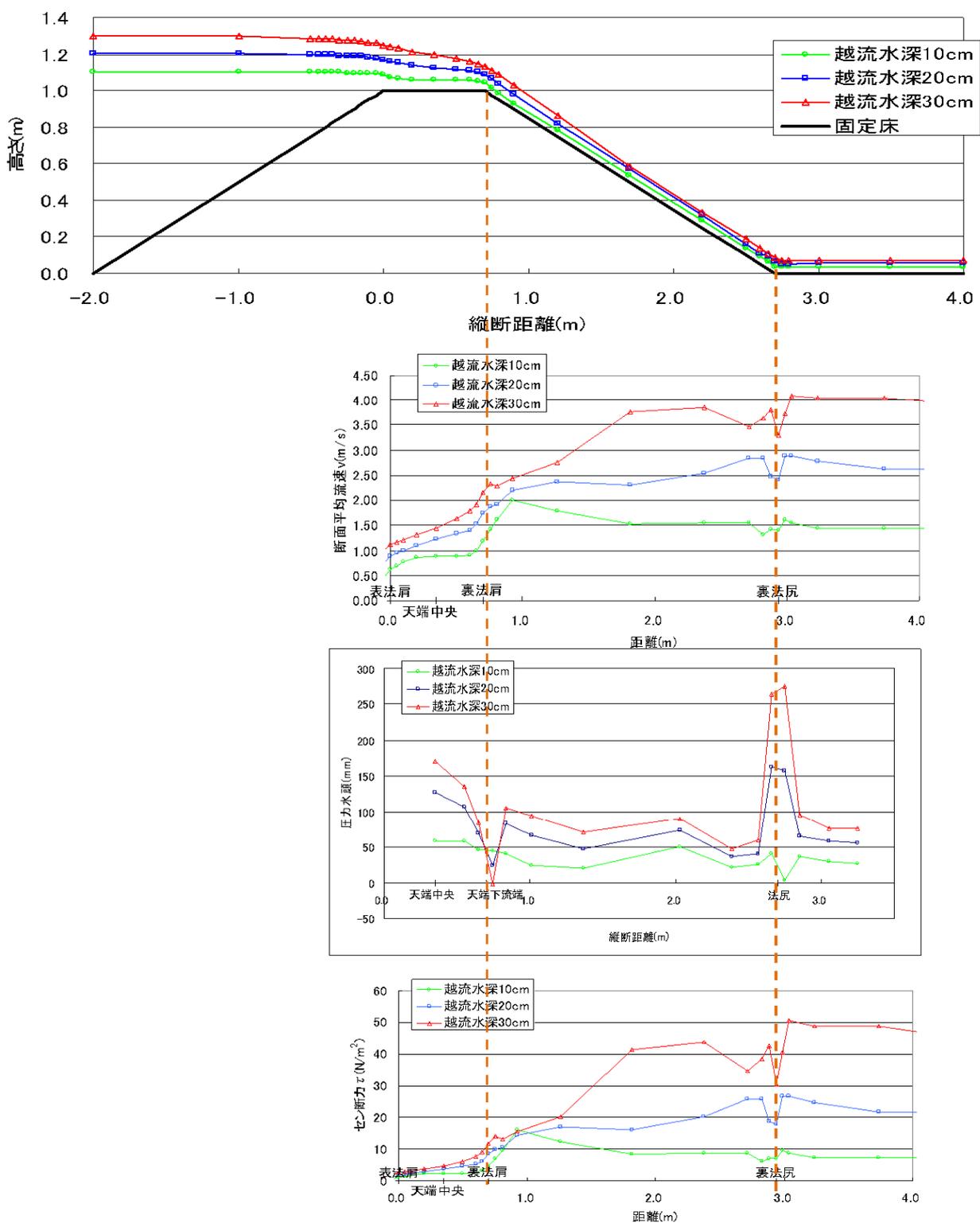


図-3.14 固定床実験結果 (ケース I)

3.3.3 同一条件時の結果のバラツキ

実験ケースⅡ-1（越流水深 30cm，締固め度 90%，越流前湛水あり）については，実験結果のバラツキを評価するため，同一条件で 11 回の越流実験を行った．なお，実験条件で述べたように，堤体材料の土はほぼ同一であることを土質試験により確認しているとともに，堤体作成方法も同一としている．

越流時の侵食開始場所について，通水 2 分後の水路中央断面（側壁から 100cm）における侵食形状を重ね合わせて図-3.15 に示す．のり面の侵食形状について特異なケースはあるものの，いずれのケースでも侵食開始場所はのり尻付近となっており，侵食開始場所に関しては実験結果のバラツキはほとんど見られないと言える．

次に，侵食進行の速さのバラツキについて評価する．図-3.16 は，変位計による断面データより堤体全体（幅 2.0m）の侵食量を算出して，侵食量と通水時間の関係を示したものである．また，通水初期段階（累積 22 分後まで）の侵食量を図-3.17 に整理した．これより，侵食初期段階では侵食量の差はあまり大きくないものの，通水時間が長くなるほど侵食量のバラツキが見られ，途中から侵食量が増加するケースや，逆に減少するケースがあるなど，侵食進行の進み方も一定でない．これらのバラツキについては，局所的な土質や施工方法の違いが影響していると想定される．

これより，同一条件の実験結果は，わずかな土質の違いや施工時の締固めの不均一性が影響したバラツキが見られるものの，堤防の越流侵食状況は概ね同じ傾向の結果となることが確認されたため，次節以降で実験条件別に結果を評価，検証するものとした．

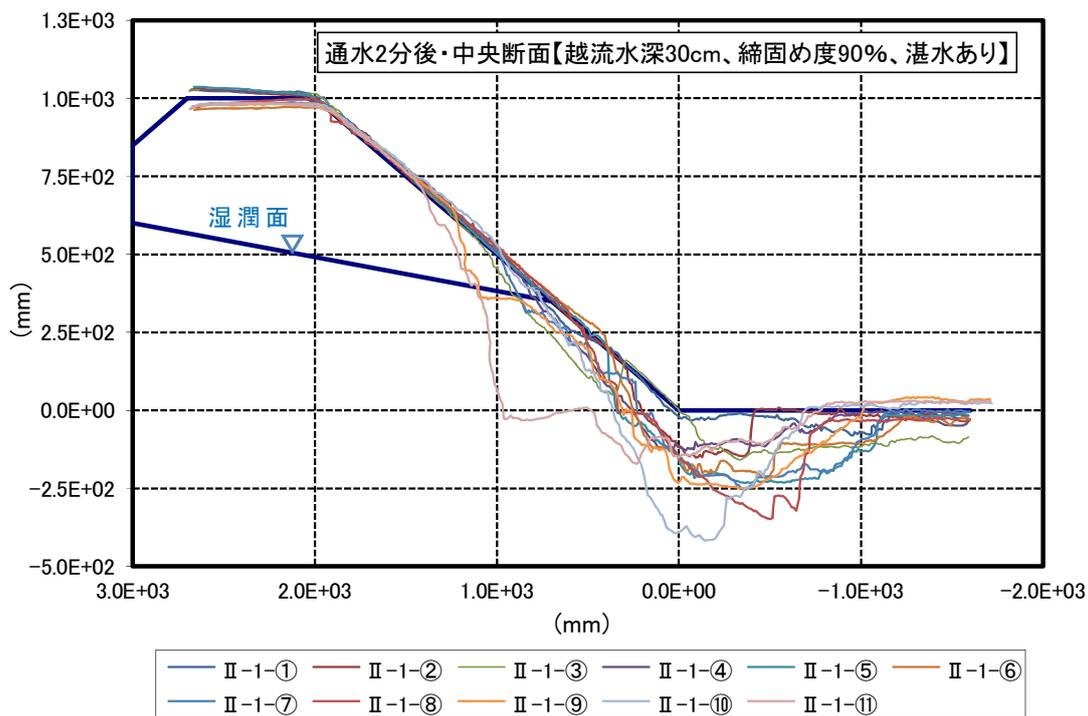


図-3.15 通水2分後の侵食状況（ケースII-1）

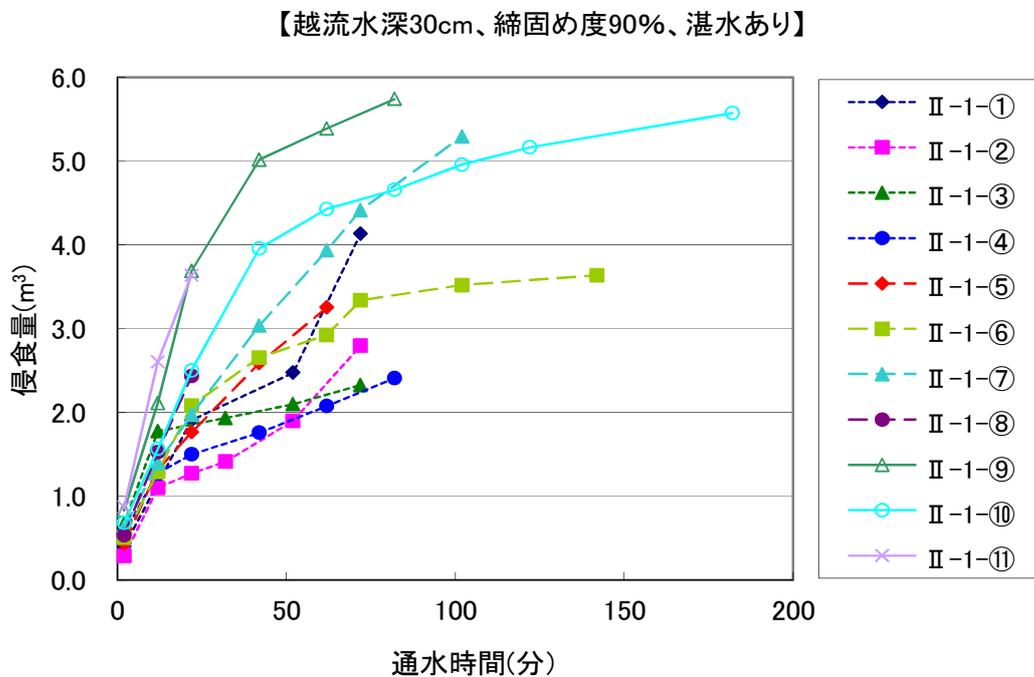


図-3.16 通水時間と侵食量の関係（ケースII-1）

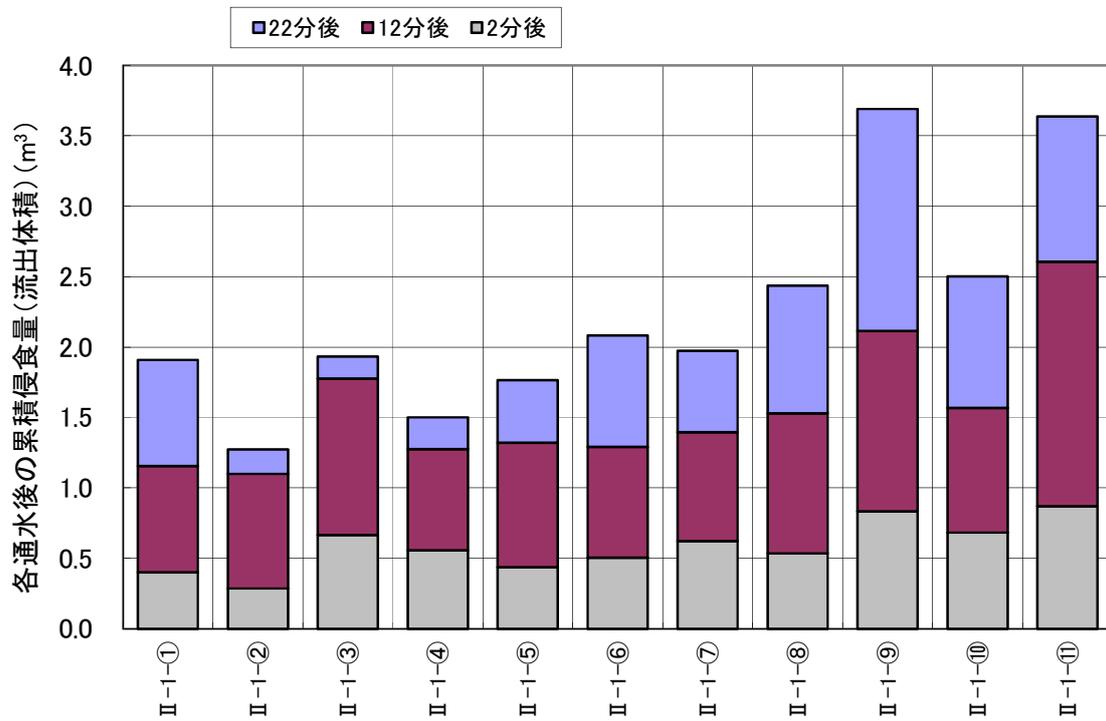


図-3.17 通水初期段階の侵食量のバラツキ (ケース II-1)

3.4 実験結果の評価，検証⁴⁾

越流侵食実験結果を実験条件別に整理して越流侵食・浸透のメカニズムについて比較検討する。

3.4.1 外力条件（越流水深）の違いによる影響

実験ケースⅡ-1，Ⅱ-2，Ⅱ-3の実験結果を比較することにより，越流水深を10cm，20cm，30cmと変化させた場合の違いを評価する。なお，越流水深以外の条件は，堤体締固め度90%，越流前湛水あり，で統一されている。

代表的なケースでの実験結果（堤体形状）と実験状況写真を図-3.18および図-3.19に示す。越流水深30cm（ケースⅡ-1-⑩）では，まず通水2分後に，のり尻が局所的に深く（初期地盤高から30cm程度）侵食されるとともに，のり面中央付近より下が侵食されている。通水12分後（累積）では，のり面の侵食が進行して，のり肩の少し下から崖状の侵食面となる。最初に局所的に侵食したのり尻部は，侵食土の再堆積で侵食深さは浅くなるが，のり尻より下流の侵食範囲が拡大している。通水22分（累積）では，天端中央付近までのり面の侵食が進行し，階段状になっていた基礎部も侵食され始めている。のり尻部およびのり尻下流は一旦侵食が進むが，侵食土の再堆積により実験開始時の地盤高付近まで上昇している。以後は，通水により堤防天端の侵食は上流側に進行し，のり尻部およびのり尻下流は深く侵食される。最終的に，通水169分（累積）で破堤した。

越流水深20cm（ケースⅡ-2-②）では，まず通水2分後はのり尻とのり面中央付近より下が侵食される。その後，のり尻付近の侵食が進行するが，越流水深30cmに比べて大きく侵食されることはない。一方，のり面の侵食は進行し，のり肩付近まで侵食が進行した後は崖状に侵食が進行する。なお，越流水深20cmではいずれのケース（全3ケース）でも侵食の進行が途中で停滞したため破堤に至ることなく実験を中止している。

越流水深10cm（ケースⅡ-3-①）では，まず通水2分後はのり尻のみ侵食されるが，その後，侵食はあまり進行しない。また，通水22分後（累積）辺りか

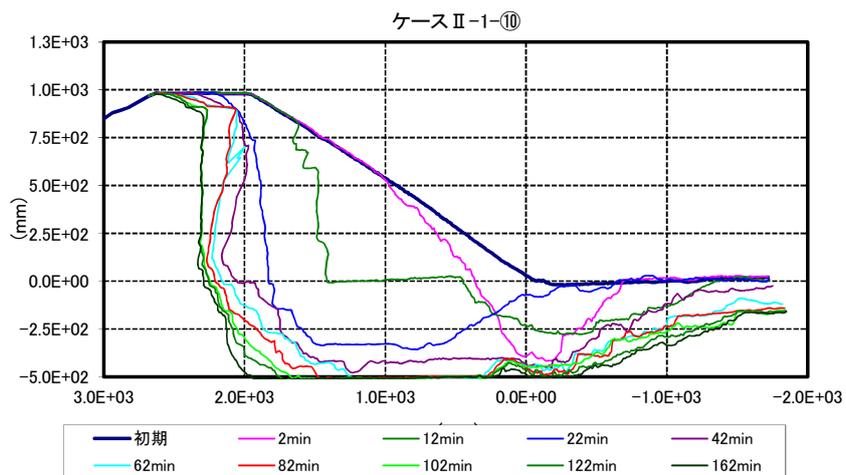
ら、のり肩直下付近で侵食が見られ、のり肩方向に向かって侵食が進行する。なお、越流水深 10cm においても、いずれのケース（全 3 ケース）でも破堤に至ることなく実験を中止している。

越流水深が異なる場合の侵食開始場所について評価する。越流時に侵食が開始する場所の評価は、越流開始後、短時間（2 分間）で通水を一時停止した時点で侵食されている場所を侵食開始場所とすることにより比較した。通水 2 分後の堤体中央付近の侵食形状を図-3.20 に示す。越流水深により侵食量の違いは見られるものの、いずれの越流水深でも越流侵食の開始場所は裏のり尻付近となっている。また、裏のり尻の直下で深掘れする現象もいずれの越流水深でも同様である。

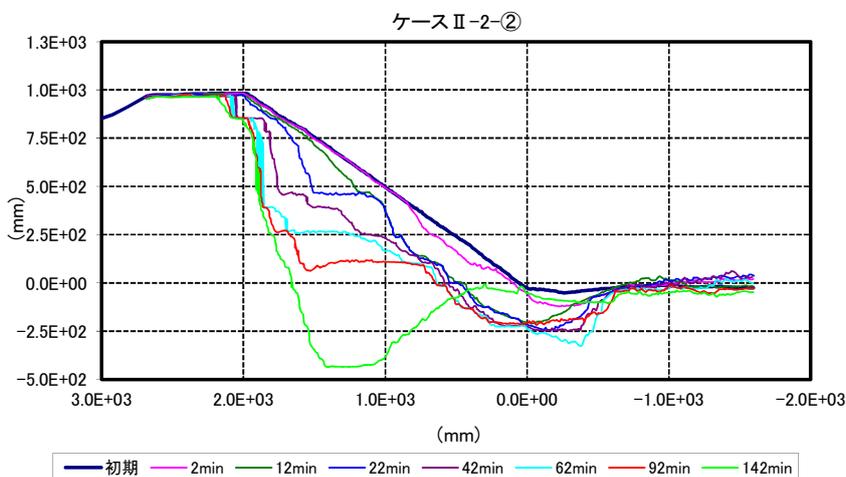
一方、前出の固定床実験結果（図-3.14）と比較すると、越流開始時に侵食が開始する場所は、裏のり尻付近の圧力水頭が大きく変化している箇所（のり尻および裏のり肩）と一致していることが分かる。

また、越流侵食の進行過程を比較するため、各越流水深の代表ケースについて、通水後の侵食形状の変化を、のり尻を基準点として、基礎部侵食深さ： D 、基礎部侵食長さ： L 、堤体侵食高さ： H 、堤体侵食奥行き長： W で整理して図-3.21 のように示した。これより、越流水深 30cm では、侵食開始場所はのり尻付近であり、時間の経過とともに堤体奥行き方向及び基礎部深さ方向への侵食進行がみられる。また、堤体高さ方向の侵食もみられる。越流水深 20cm では、侵食開始場所はのり尻付近であり、通水に伴い堤体奥行き方向及び基礎部深さ方向への侵食進行がみられる。また、堤体侵食高さ方向への侵食は通水 12 分以降みられない。越流水深 10cm では、侵食開始場所はのり尻付近であり、通水に伴い堤体奥行き方向及び基礎部深さ方向への侵食進行がみられるが、他のケースに比して小さい。

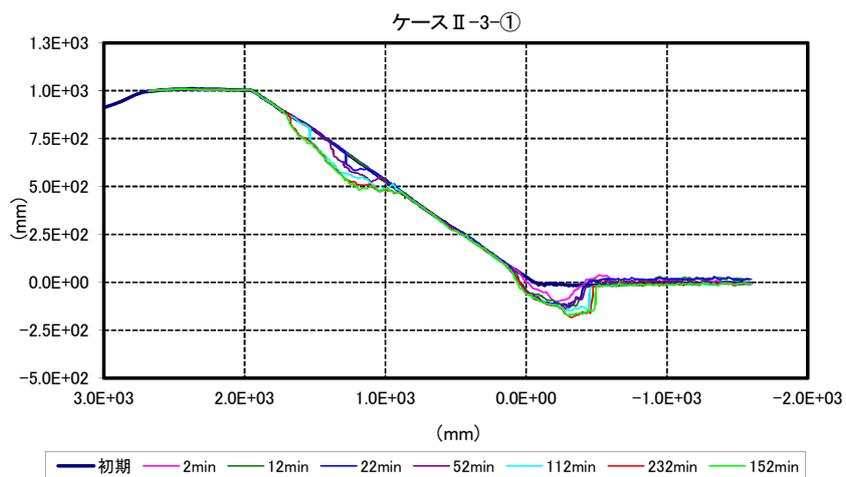
次に、越流水深の違いによる侵食進行の速さについて比較する。侵食進行の速さは、通水時間と侵食量（10cm 間隔の堤防形状計測より算出した堤体全体の侵食量）の関係より評価した。通水時間と侵食量の間関係を図-3.22、通水初期段階の侵食量比較を図-3.23 に示す。これより、ほとんどのケースで同じ通水時間では越流水深が大きいほど侵食量が多くなっており、越流水深が大きいほど侵食進行が速いといえる。



ケースⅡ-1 (越流水深 30cm)



ケースⅡ-2 (越流水深 20cm)



ケースⅡ-3 (越流水深 10cm)

図-3.18 侵食形状 (越流水深の違いによる比較)

ケースⅡ-1-⑩ (越流水深 30cm、締固め度 90%、越流前湛水あり)

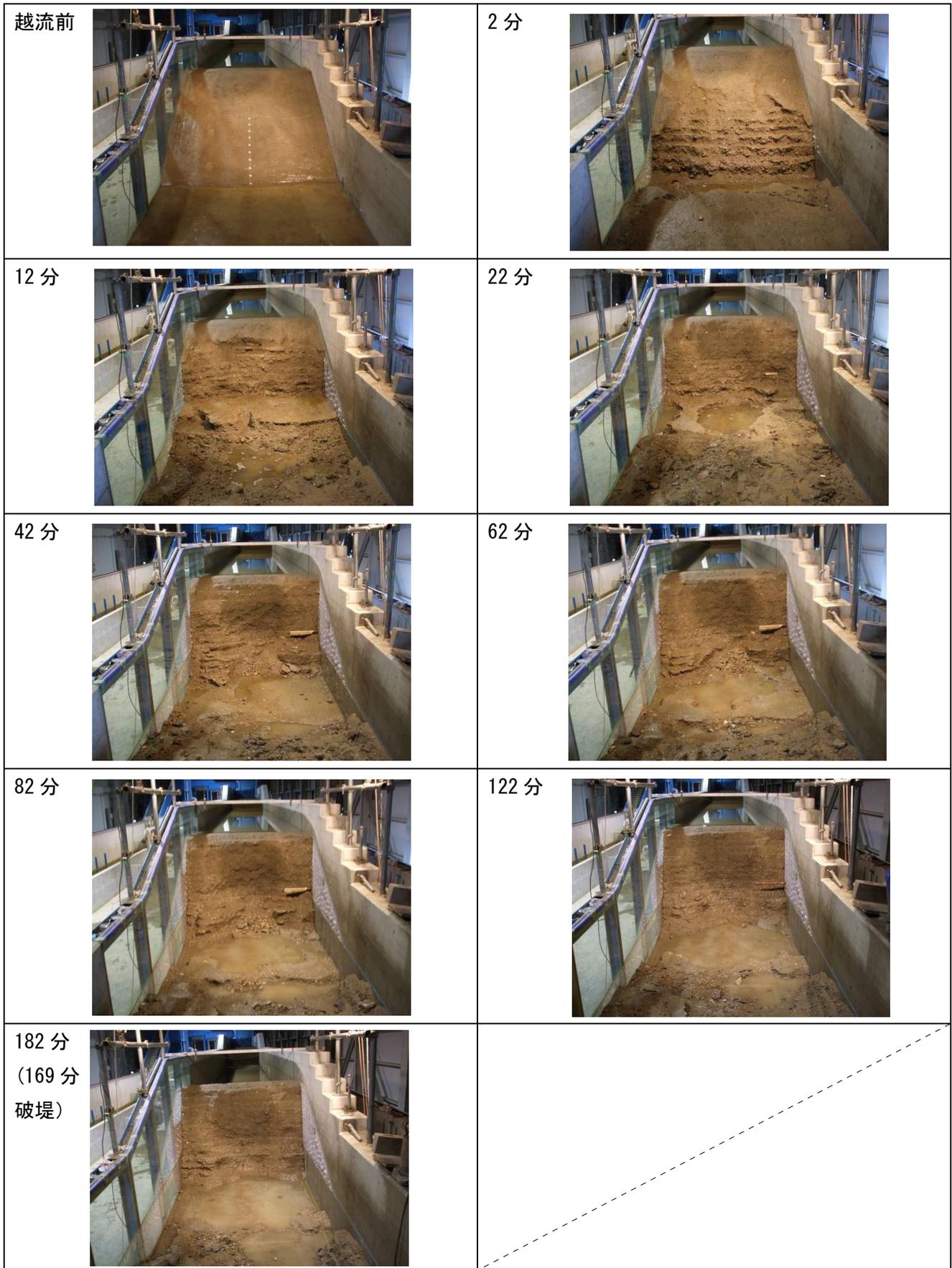
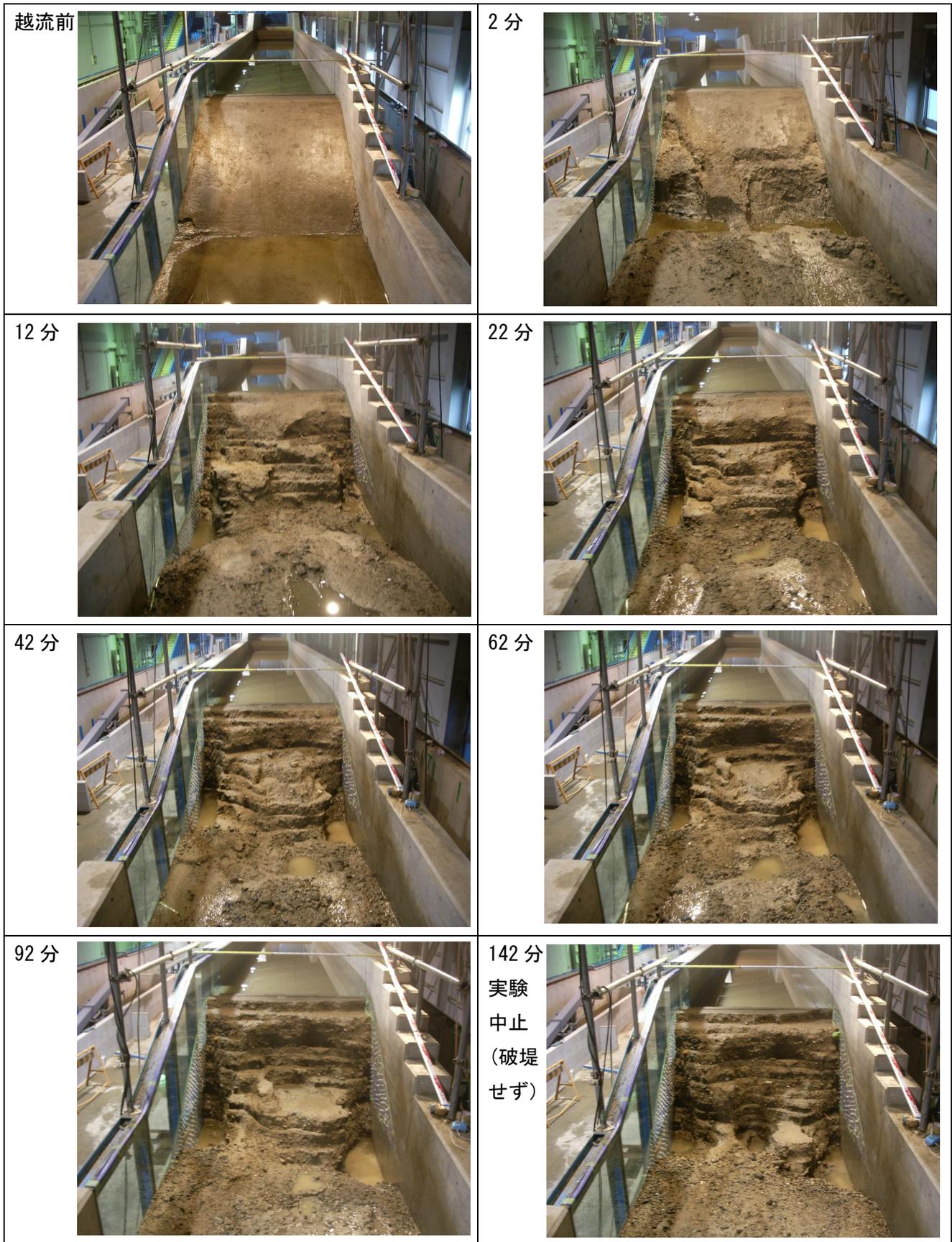


図-3.19 (1) 実験状況写真 (越流水深 30cm)

ケースⅡ-2-② (越流水深 20cm、締固め度 90%、越流前湛水あり)



実験
中止
(破堤
せず)

図-3.19 (2) 実験状況写真 (越流水深 20cm)

ケースⅡ-3-① (越流水深 10cm、締固め度 90%、越流前湛水あり)

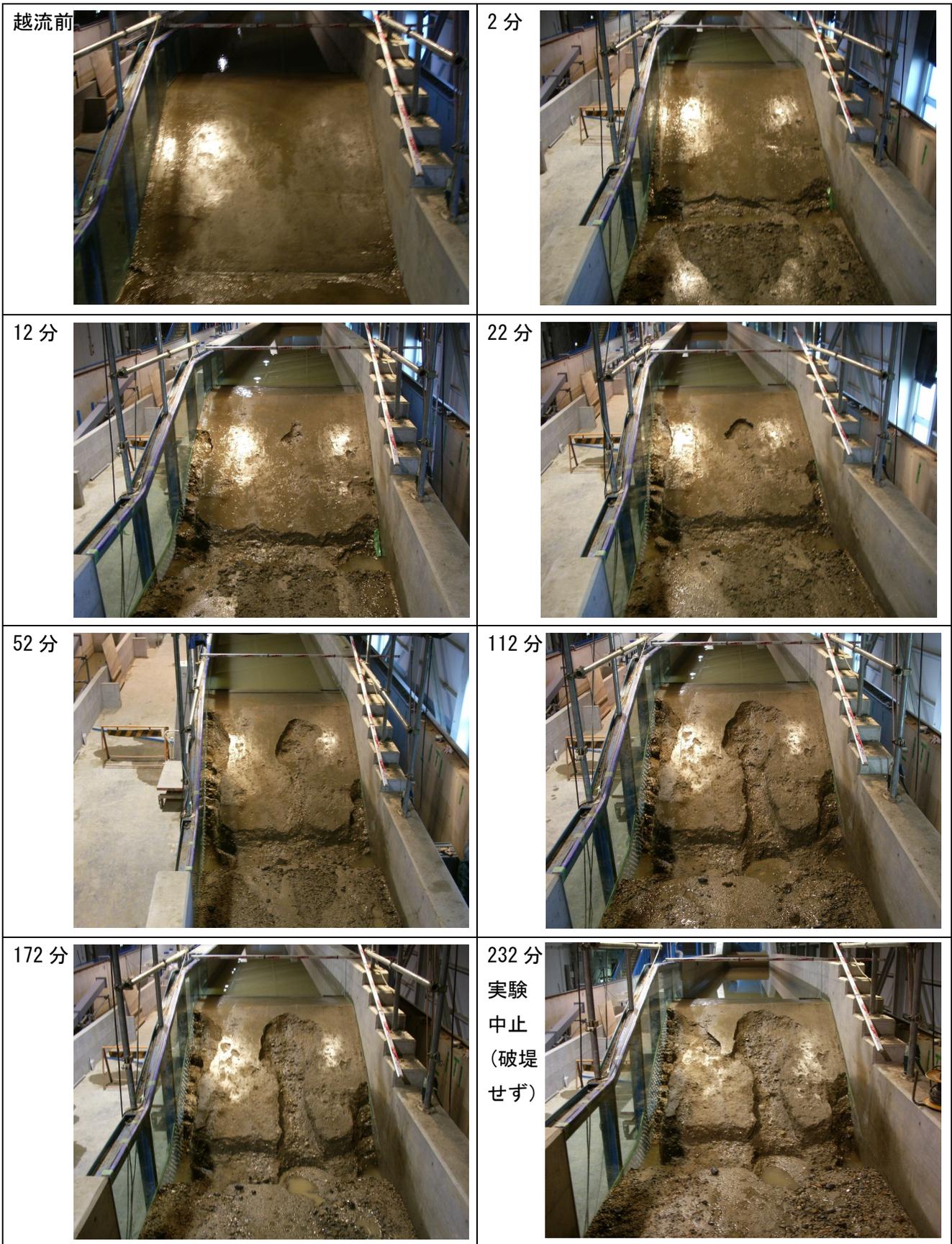


図-3.19 (3) 実験状況写真 (越流水深 10cm)

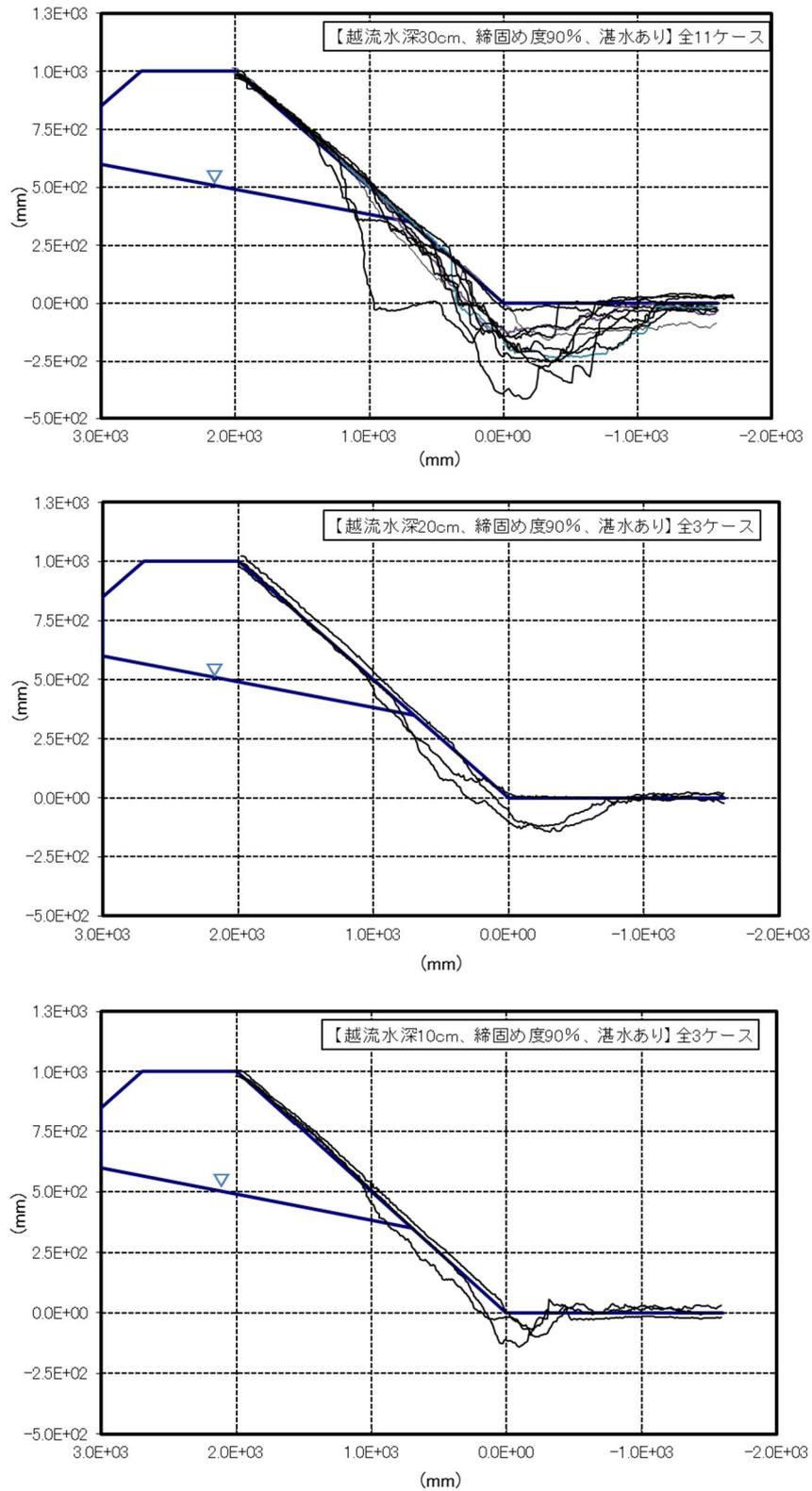


図-3.20 通水2分後の侵食形状（堤体中央）【越流水深別】

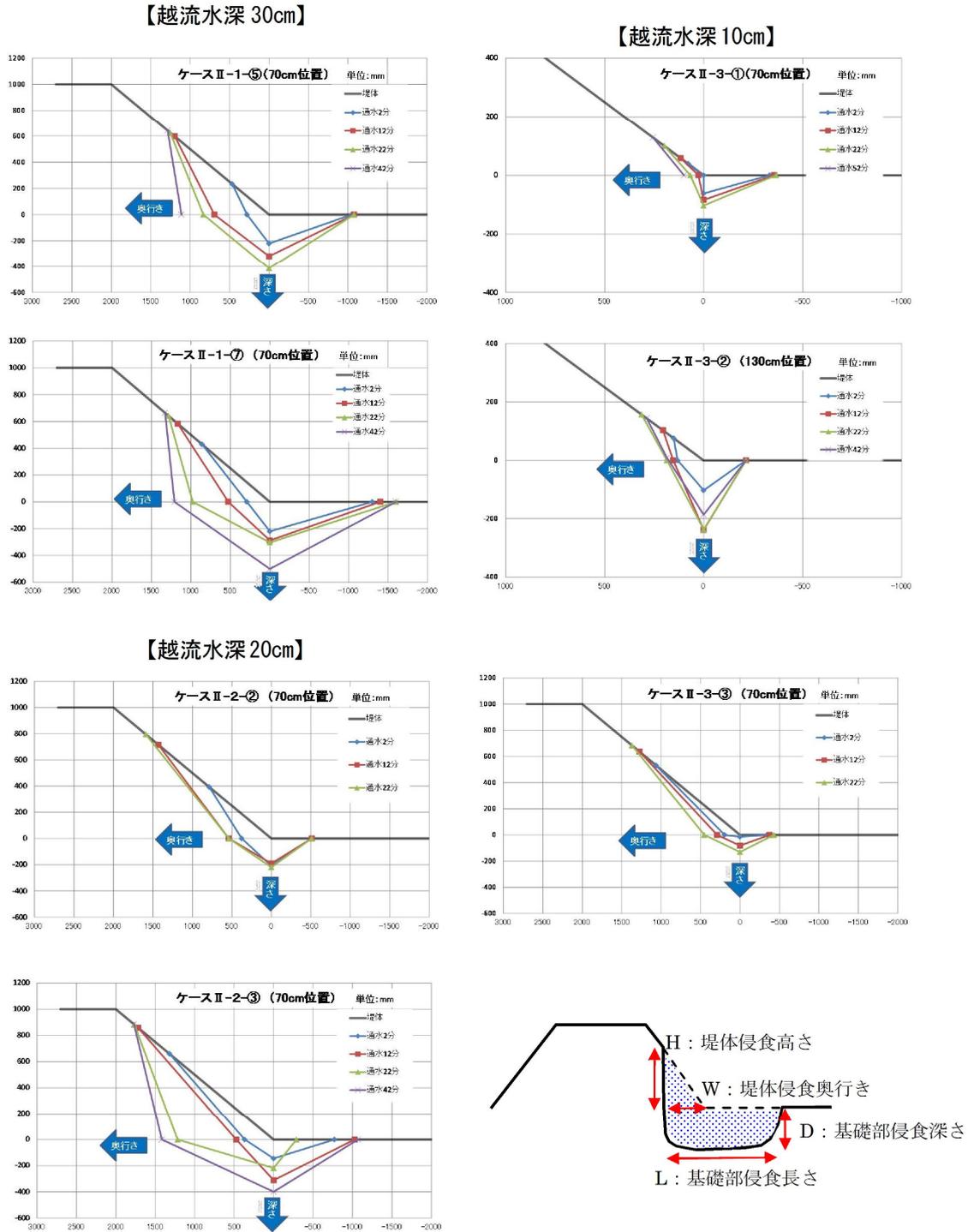


図-3.21 侵食形状の変化 (模式図)

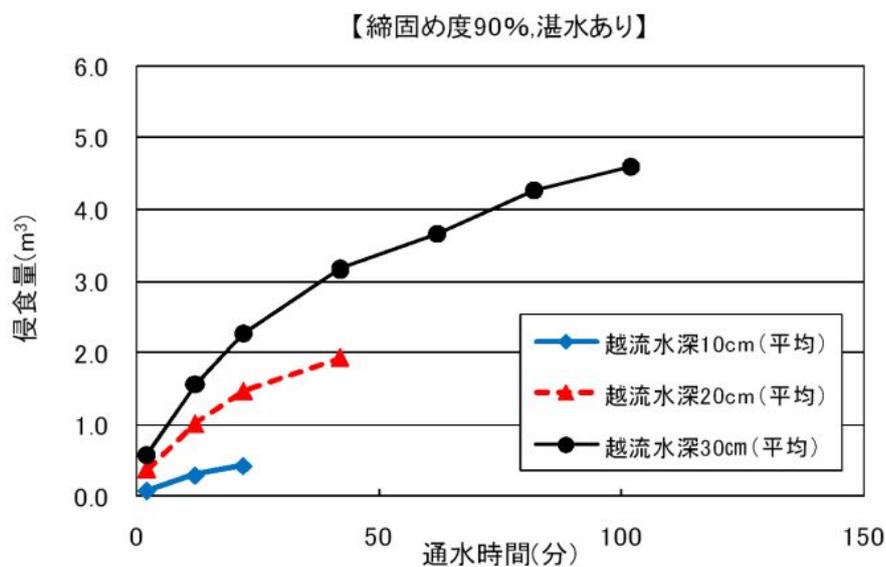


図-3.22 通水時間と侵食量の関係（越流水深の違いによる比較）

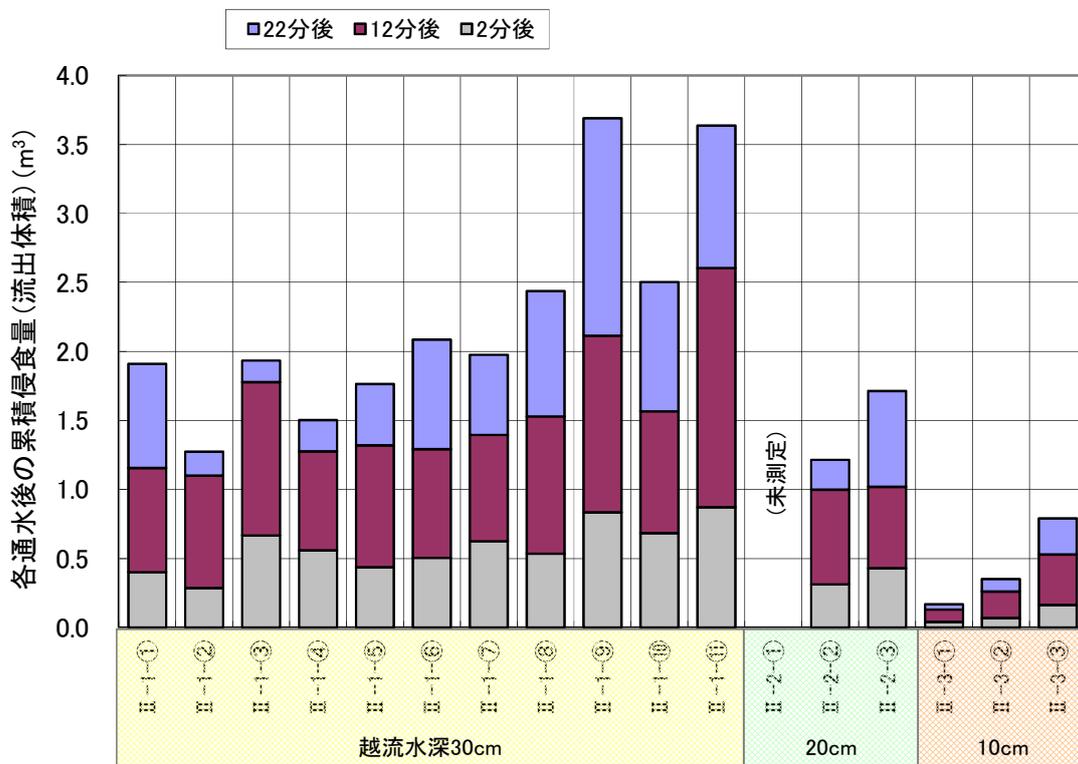


図-3.23 侵食初期段階での侵食量（越流水深の違いによる比較）

3.4.2 堤体土質の締固め度の違いによる影響

実験ケースⅡ-1, Ⅱ-4の実験結果を用いて、堤体土質の締固め度を90%および85%と変えた場合の実験結果を比較する。なお、堤体締固め度以外の条件は、越流水深30cm, 越流前湛水あり, で統一されている。

締固め度90%の越流侵食状況は、3.4.1で説明したとおりである。締固め度85%の堤体は、堤体および基礎地盤の締固め時の転圧回数調整により作成した。締固め度85%の代表的なケースの実験状況写真を図-3.24に、実験結果(堤体形状)を図-3.25に示す。全8ケース実施したが、いずれのケースでも、通水2分後の時点でのり尻からのり面にかけて大きく円弧状に侵食しており、その円弧が上流方向に広がるように侵食が拡大している。1ケースを除き破堤に至っており、破堤に至る時間は4分~42分であるが、12分~22分で破堤したケースが大半であった。

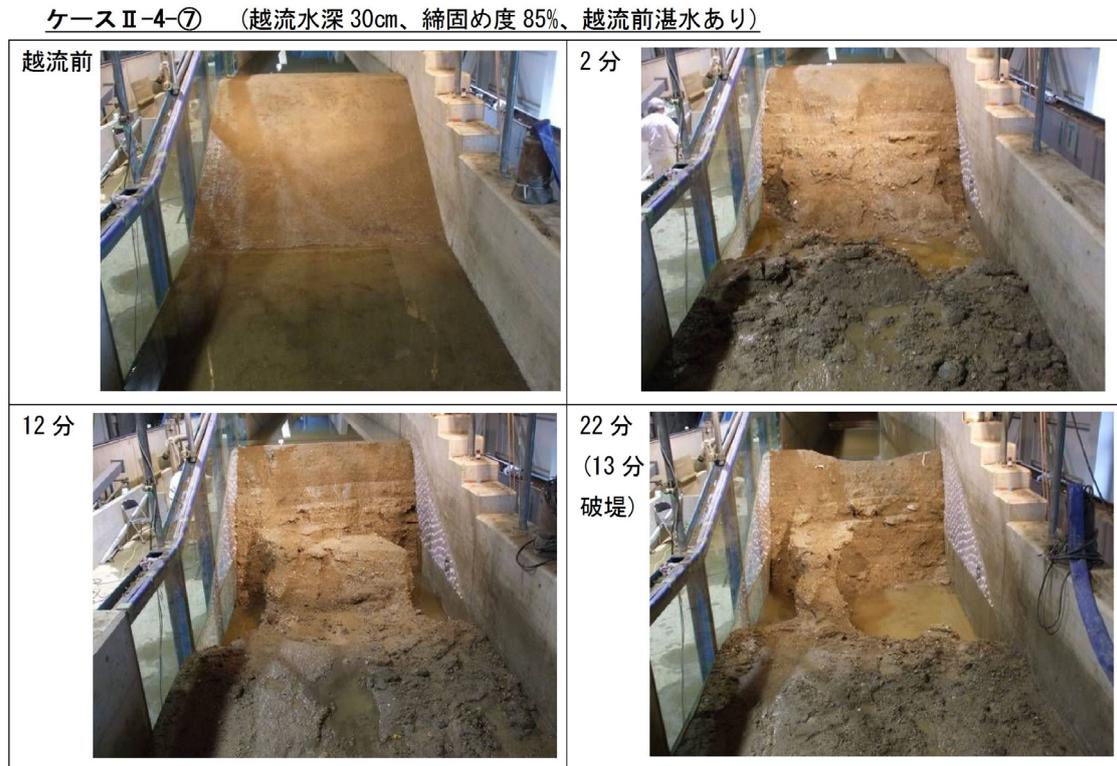


図-3.24 実験状況写真(締固め度85%)

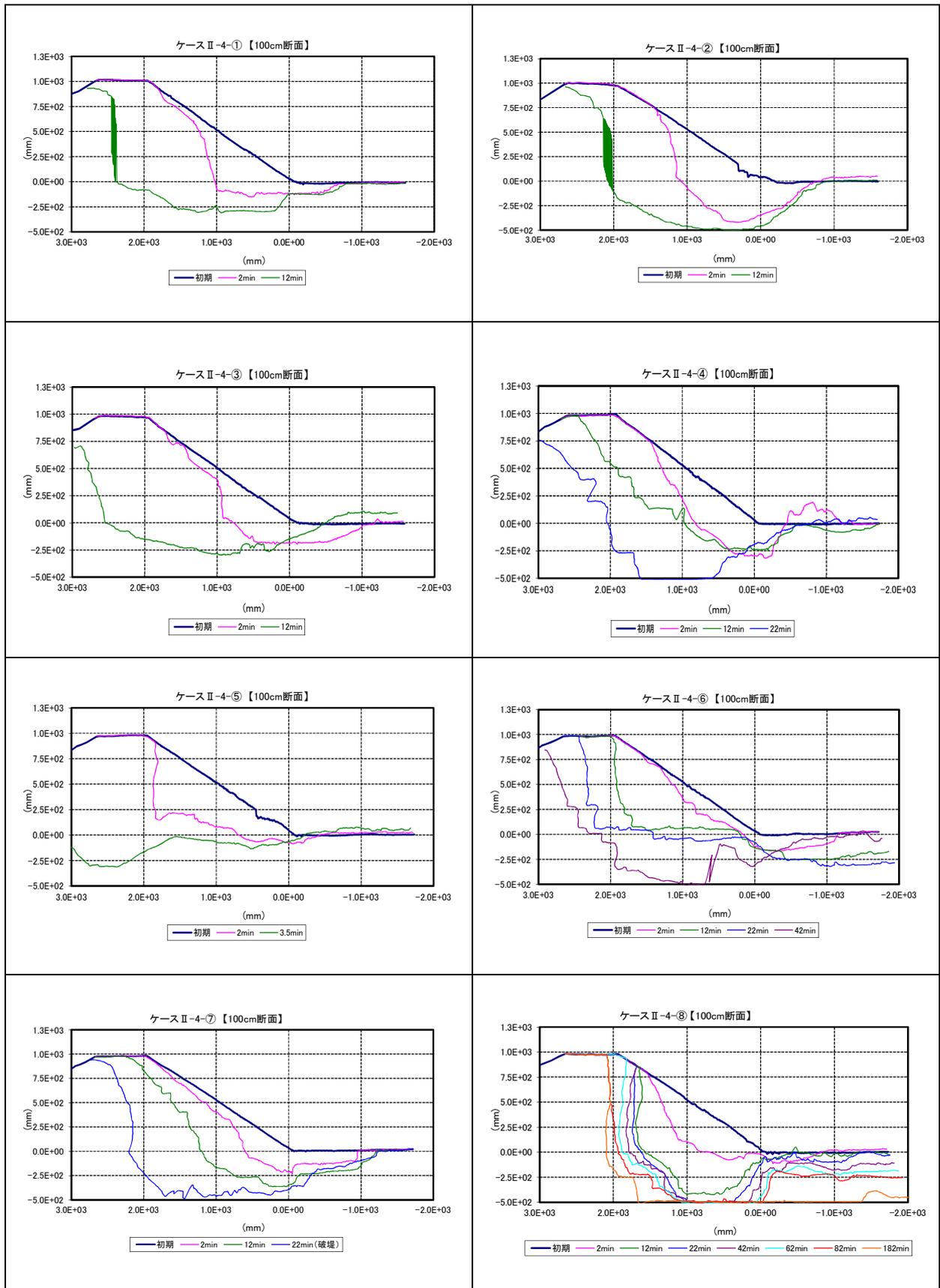
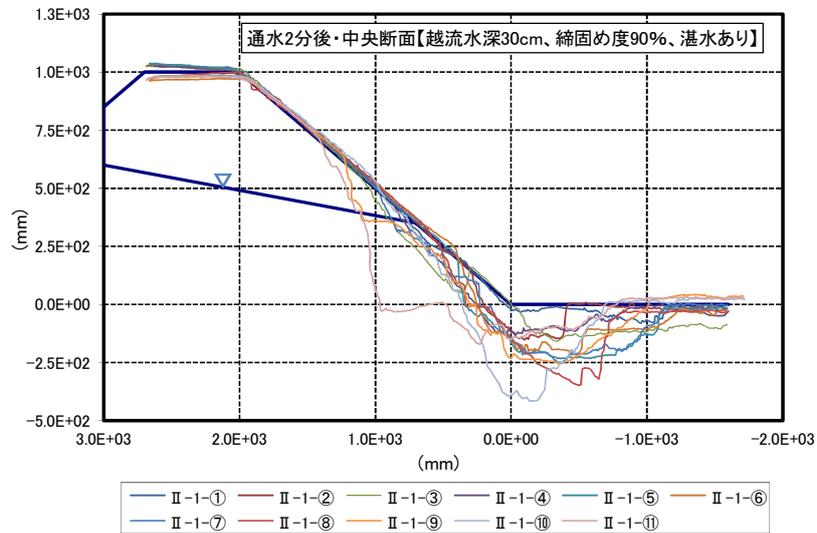


図-3.25 侵食形状 (締固め度 85%)

次に、締固め度が異なる場合の、侵食開始場所について評価する。越流時に侵食が開始する場所の評価は、外力条件の違いの評価と同様に、越流開始後、短時間（2分間）で通水を一時停止した時点で侵食されている場所を侵食開始場所とすることにより比較した。通水2分後の堤体中央付近の侵食形状を図-3.26に示す。これより、締固め度85%の方が侵食量が多く広範に侵食しているものの、侵食開始場所は締固め度90%、85%とも裏のり尻付近であり、堤体締固め度の違いによる違いは顕著でない。

締固め度 90%



締固め度 85%

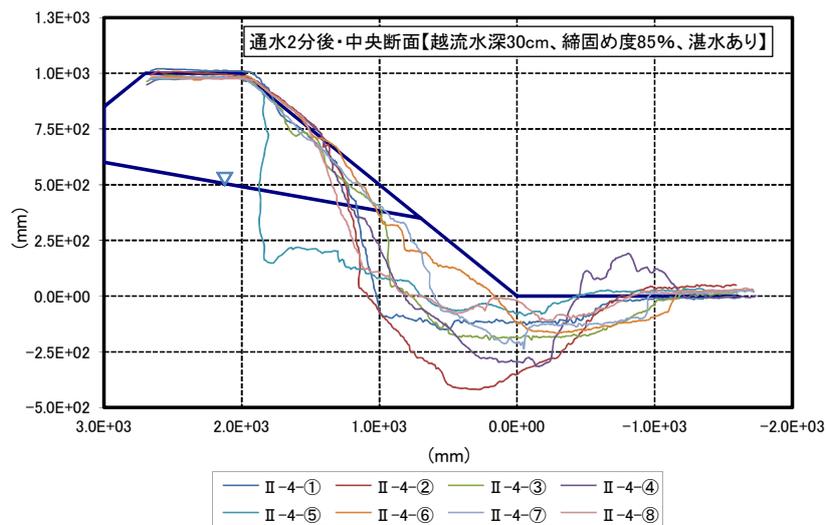


図-3.26 通水2分後の侵食形状（堤体中央）【締固め度別】

次に、締固め度の違いによる侵食進行の速さについて比較する。越流侵食計測より算出した通水時間と侵食量の関係を図-3.27、通水初期段階の侵食量比較を図-3.28に示す。締固め度85%では早く破堤に至るため通水12分後までしか比較できないが、同じ通水時間では締固め度90%より85%の方が侵食量が多くなっており、同じ土質であっても締固め度が緩いほど侵食進行が速いといえる。

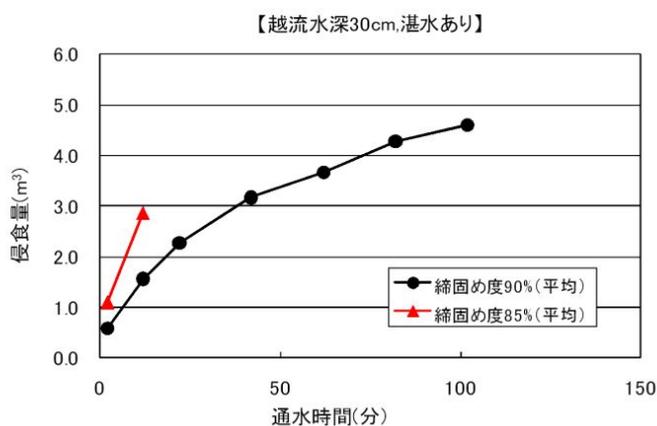


図-3.27 通水時間と侵食量の関係（締固め度の違いによる比較）

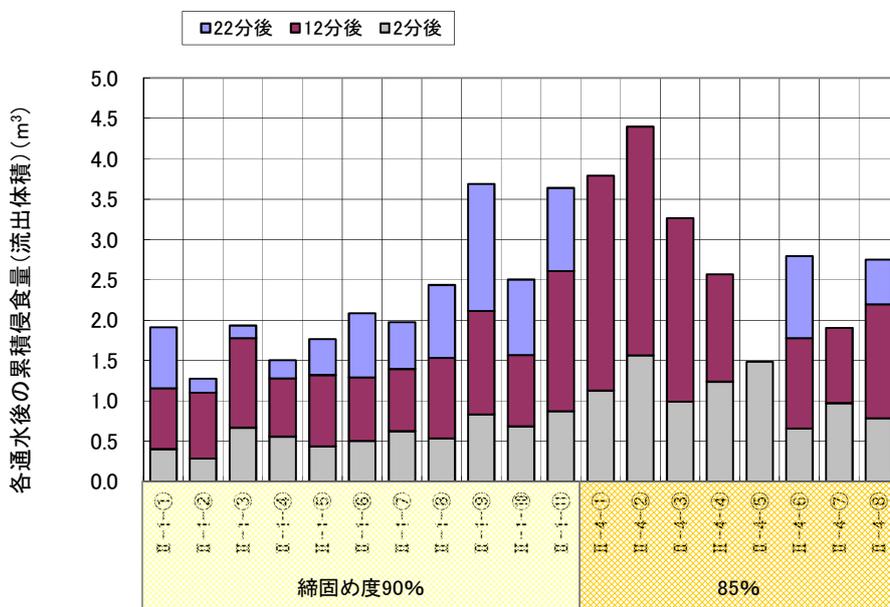


図-3.28 侵食初期段階での侵食量（締固め度の違いによる比較）

また、締固め度の違いは、堤体内の湿潤状況に差が見られた。越流前に一定時間湛水した時の堤体内間隙水圧データを図-3.29、これを用いて描いた堤体内湿潤状況を図-3.30に示す。これより、今回の実験では締固め度90%、85%とも、浸透時の湿潤面が基礎面から平行に上昇している。堤体内湿潤面がほぼ定常になる時間は、締固め度90%で20~30時間程度、85%で10時間程度であった。また、湿潤面高さは締固め度90%に比べて85%の方が高くなっている。さらに詳しく見るため、間隙水圧データを、堤体内湿潤面高さ(図-3.31)、堤体内湿潤面到達速度(図-3.32)、堤体内水頭上昇速度(図-3.33)で整理した。これより、実験ごとでバラツキはあるものの、締固め度85%の方が浸透時の堤体内湿潤面は高く、また定常に至る時間や水頭上昇などの浸透速度が速いことが分かる。

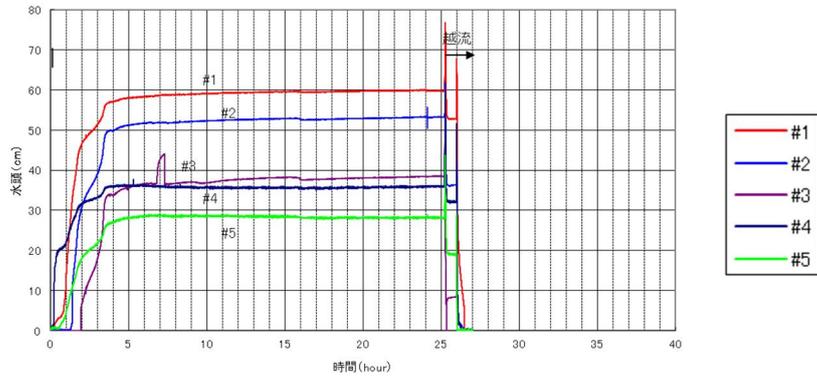


図-3.29 堤体内水頭変化 (締固め度 85%)

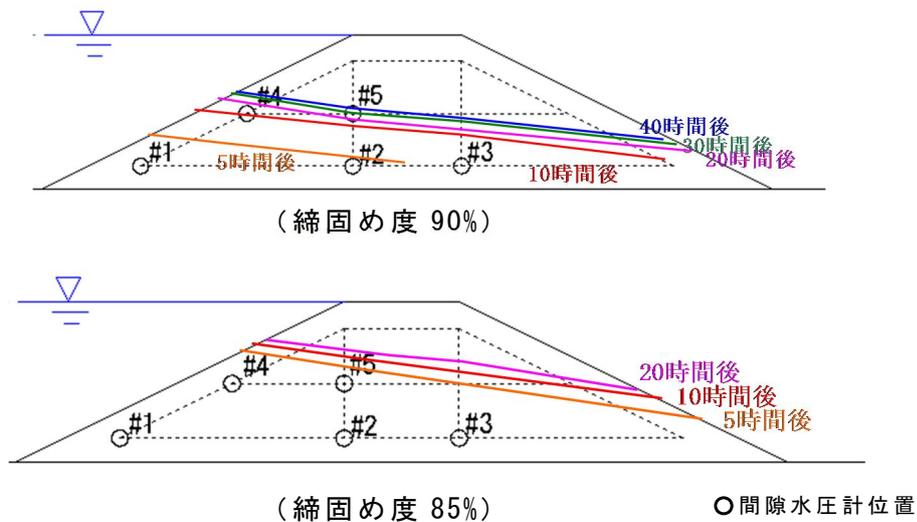


図-3.30 堤体内湿潤面の比較

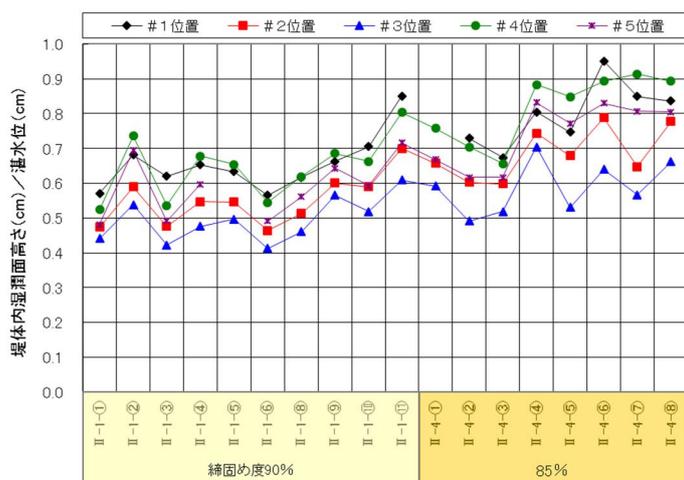


図-3.31 堤体内湿潤面高さ

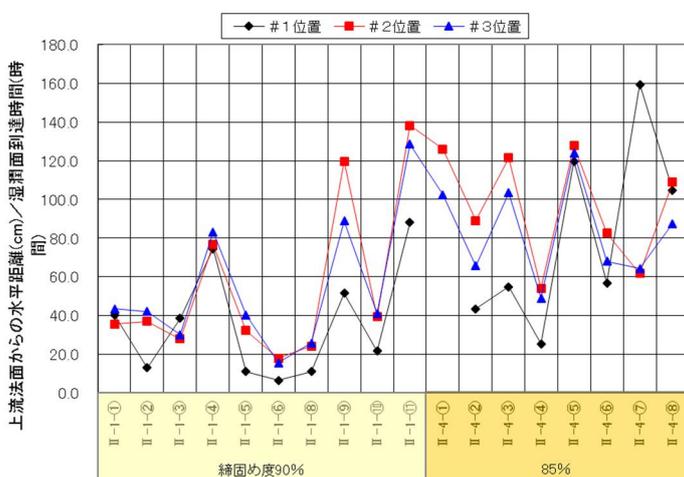
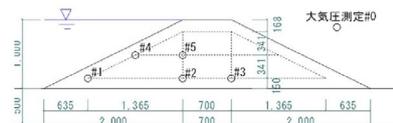


図-3.32 堤体内湿潤面到達速度



図-3.33 堤体内水頭上昇速度



堤体内間隙水圧計の計測位置

3.4.3 堤体内湿潤面の違いによる影響

実験ケースⅡ-1, Ⅱ-5の実験結果を比較することにより, 越流前に湛水を行ったケース(湛水あり)と湛水を行わなかったケース(湛水なし)での実験結果を比較する。なお, 湛水有無以外の条件は, 越流水深 30cm, 堤体締固め度 90%で統一されている。

越流前湛水ありの越流侵食形状は, 3.4.1で説明したとおりである。湛水なしの実験結果(侵食形状)を図-3.34に, 代表的なケースの実験状況写真を図-3.35に示す。湛水なし条件では, 全3ケース実施したが, いずれのケースも通水2分後は, のり面が少し侵食した程度でのり尻は変化が見られない。通水12分(累積)でも, のり面の侵食は進行するがのり尻の侵食は僅かであり, 通水22分(累積)になって, のり尻の大きな侵食が見られる。その後, のり面の侵食が進行して, 通水42~108分後に全ケース破堤に至っている。

堤体内湿潤状態が異なる場合の, 侵食開始場所について検討する。越流時に侵食が開始する場所については, 外力条件の違いの場合と同様に, 越流開始後短時間(2分間)で通水を一時停止した時点で侵食されている場所を侵食開始場所とすることにより比較した。通水2分後の侵食形状を図-3.36に示す。ここでは, 湛水ありの場合で堤体内湿潤面が極端に低かったケースを区分して整理した。これより, 湛水ありの場合の侵食開始場所は裏のり尻付近, 湛水なしの場合は裏のり面となっており, 堤体内湿潤状態による違いが見られた。また, 堤体内湿潤面が低い場合は, 裏のり面の侵食高さが低くなるのが分かる。これを, 固定床実験結果(図-3.14)と比較すると, 湛水ありの場合の侵食開始場所は圧力水頭が急激に大きくなっている箇所であり, 湛水なしの場合の侵食開始場所はせん断力が最大値となっている箇所と一致する。

また, 浸透に伴う裏のり変形計測結果と通水2分後の侵食形状を図-3.37に示す(湛水なしでの裏のり変形計測は未実施であったため5章で説明する遮水シート対策工により裏のり湿潤なしのケースを参考に掲載する; 図-3.37下図)。これより, 湛水ありの場合は, 浸透により裏のりが0.5~2.0mm程度変形(はらみ出し)しているのが分かる。また, 変形は, のり尻付近が最大であり, 侵食開始場所と一致しているのが分かる。

これより，堤体内湿潤状態は越流侵食開始場所に影響を与え，のり面に湿潤面がない（不飽和状態）の場合は裏のり面から侵食開始し，裏のり面が湿潤状態の場合には裏のり尻から侵食開始すると考えられる。

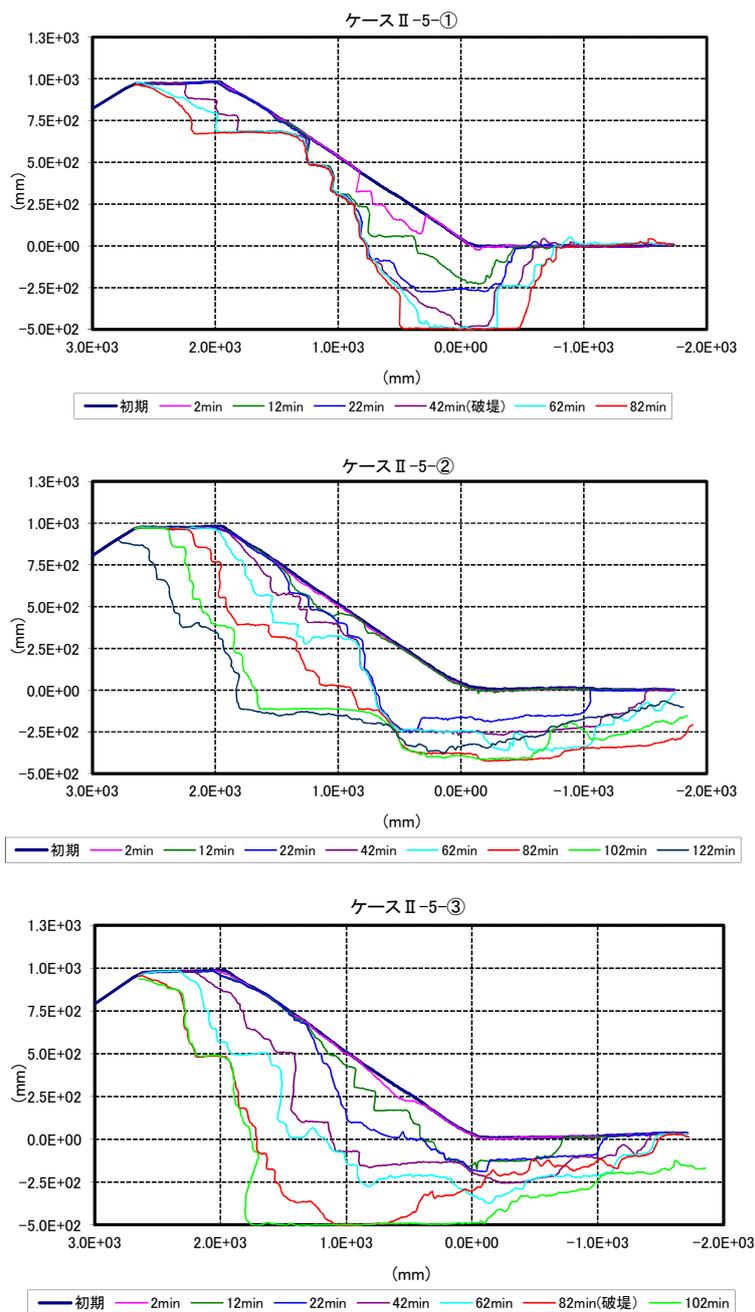


図-3.34 侵食形状（湛水なし）

ケースⅡ-5-③ (越流水深 30cm、締固め度 90%、越流前湛水なし)

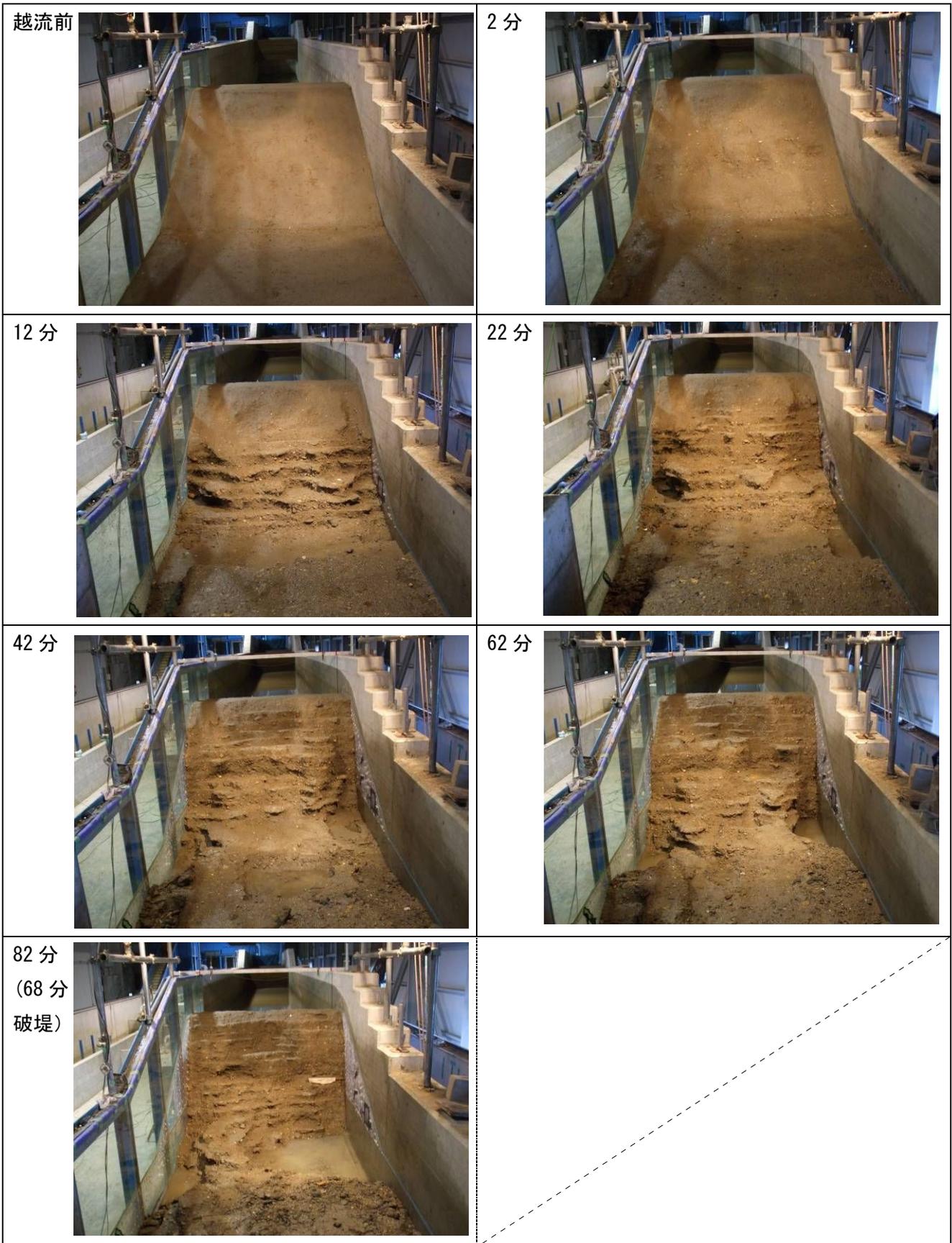


図-3.35 実験状況写真 (湛水なし)

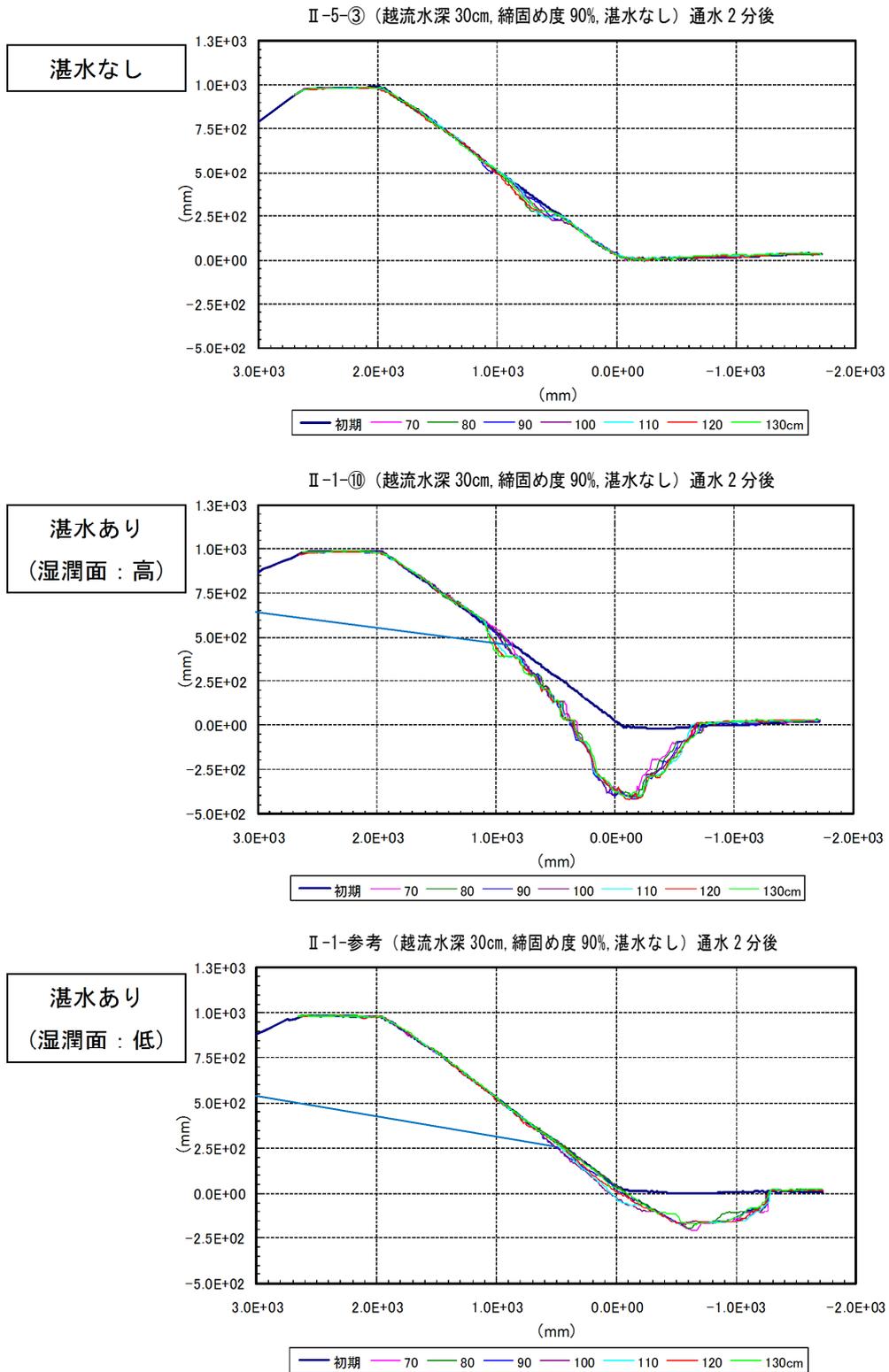


図-3.36 通水 2 分後の侵食形状 (堤体中央) 【湿潤面別】

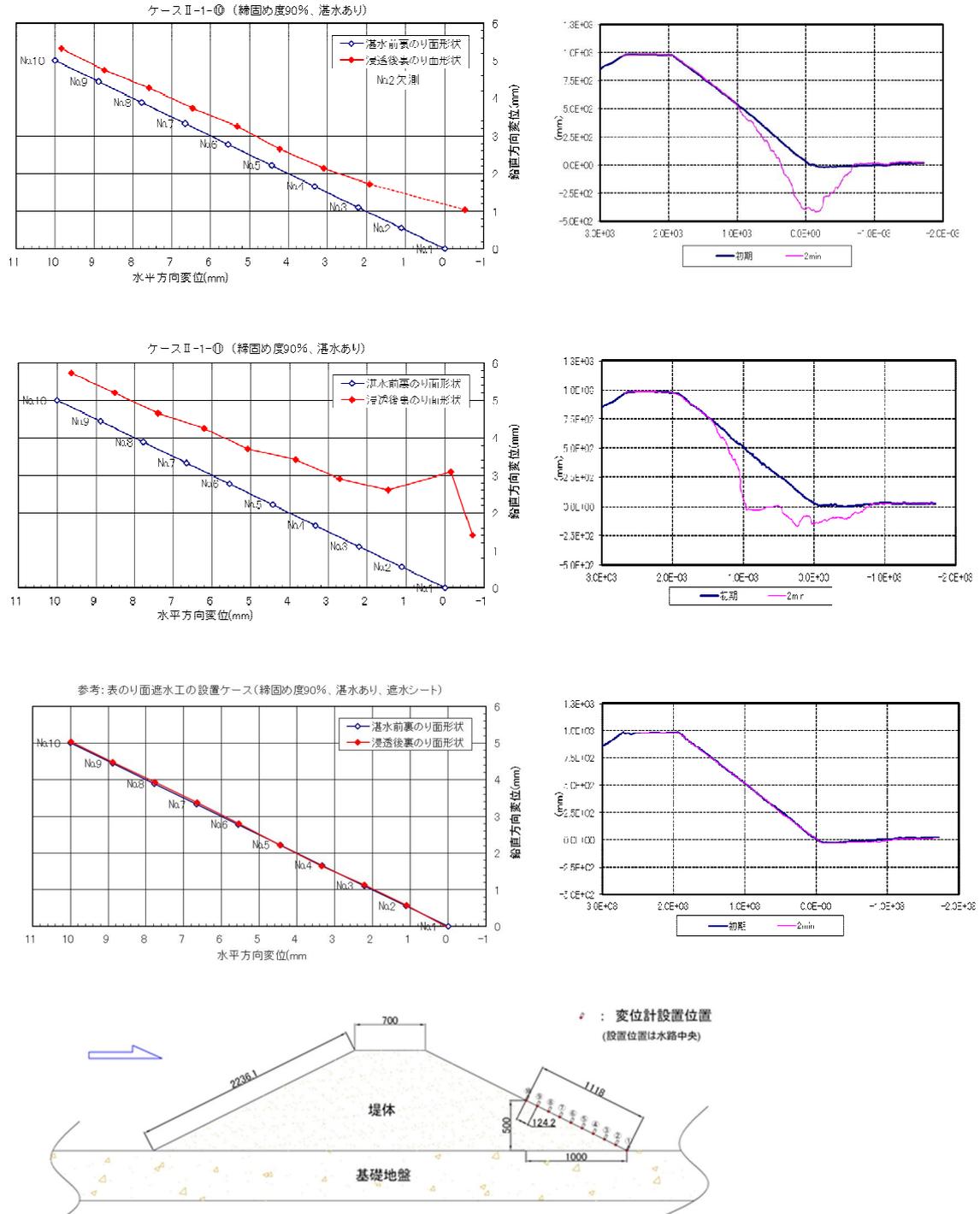


図-3.37 裏のり変位結果と通水2分後の侵食状況

越流前湛水ありと湛水なしの場合の、代表的な侵食進行過程を図-3.38に示す。これより、湛水ありの場合は、のり尻から侵食開始して、のり尻が大きく侵食したのちに堤体全体が大きく上流側に侵食される形状となる特徴が見られた。一方、湛水なしの場合は、のり面から侵食開始して、のり肩方向にのり面に沿って侵食が進行し、天端幅がのり肩の侵食により狭小化する形状となる特徴が見られた。このように、堤体内湿潤状態により侵食進行パターンが異なるものになるといえる。

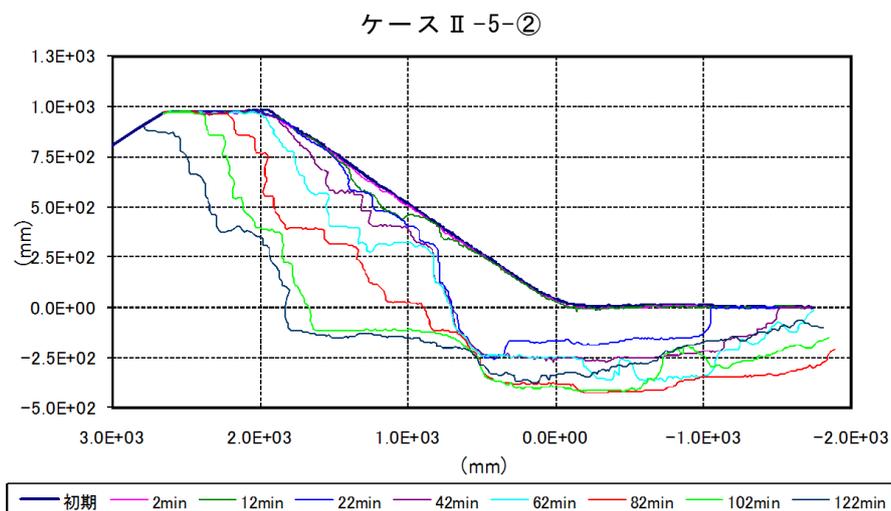
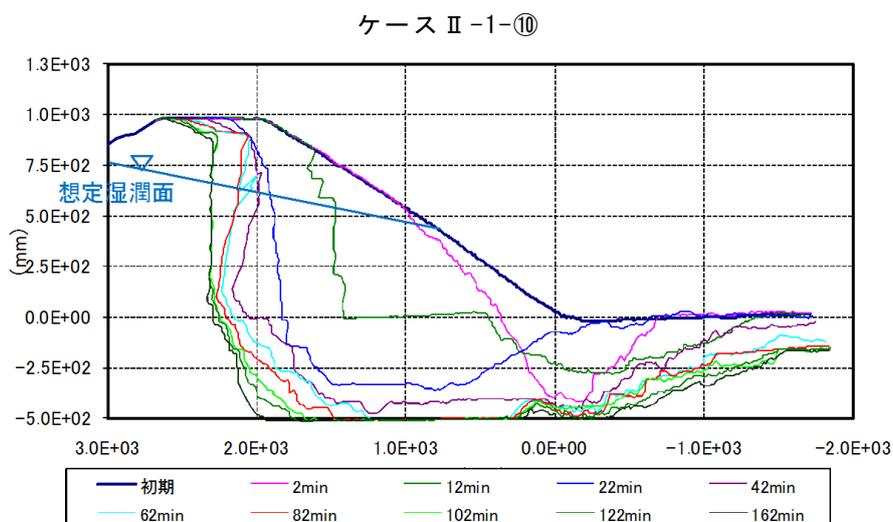


図-3.38 侵食形状 (堤体内湿潤面の違いによる比較)

次に、堤体内湿潤状態の違いによる侵食進行の速さについて比較する。越流侵食計測より算出した通水時間と侵食量の関係を図-3.39に示す。これより、同じ通水時間では湛水ありの場合が侵食量が多くなっており、同じ土質であっても堤体の湿潤状態により侵食進行が異なることが分かる。

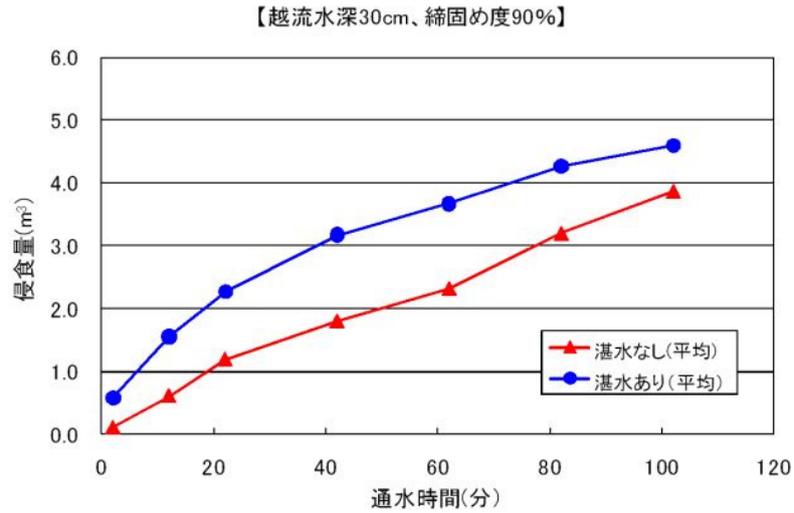


図-3.39 通水時間と侵食量の関係（堤体内湿潤面の違いによる比較）

3.5 越流侵食・浸透のメカニズム

(1) 堤体内湿潤状態が越流侵食時の侵食開始場所、侵食量および侵食進行過程に与える影響について

湛水による湿潤面の有無による、代表的な侵食進行過程（侵食パターン）のイメージを図-3.40に示す。湛水ありの場合は、「堤体が裏のり面から崖状に侵食され、堤体全体が大きく侵食していく」（これを、Aパターンとよぶ）というプロセスを経て侵食が進行する。一方、湛水なしの場合は「裏のり面がのり肩まで侵食され、のり肩の侵食進行で天端幅が狭小化する」（これを、Bパターンとよぶ）というプロセスを経て侵食が進行している。また、湛水ありの場合は、浸透により裏のりが0.5~2.0mm程度変形（はらみ出し）していることが明らかとなった。この裏法の変形は、裏のり尻付近が最大となっており、変形箇所は、越流時の侵食開始場所と一致する。なお、湛水なしの場合は、浸透に伴う変形は見られない。

これより、堤防越水時の裏のり面、のり尻の侵食場所や侵食量については、堤体内の湿潤状態が大きく影響すると推察される。小型堤実験では、堤体内が湿潤状態で越流した場合は裏のり尻付近から侵食が開始した。裏のり面やのり尻が不飽和状態で越流した場合はのり面から侵食が開始した。越流による堤防の侵食進行過程（侵食パターン）は、堤体内の湿潤面が高いほど裏のり面およびのり尻の侵食量が多くなり堤体全体が大きく侵食されるパターンとなった。

越流水深や堤体締固め度の違いに関わらず、越流実験の前に湛水を行い、堤体・裏のり・のり尻が湿潤状態で越流させた場合、侵食開始場所はのり尻付近となった。これより、裏のり尻付近は越流に対する弱部となることが予想される。なお、侵食開始場所は、固定床実験で圧力水頭が最大となっている地点と一致することより、流体の水撃作用による侵食が卓越していると考えられる。土木研究所での大型堤（堤高3m）での成果でも、堤体湿潤状態での越流実験で、「のり肩直下を除いてのり面は一様に侵食され、特に裏のり尻では深く侵食される」という成果が得られていることより、堤高の異なる実験模型であるが、侵食場所に関する実験結果は同様な傾向であると見ることができる。

越流実験前の湛水を行わず、堤体内が不飽和状態で越流させた場合、侵食開

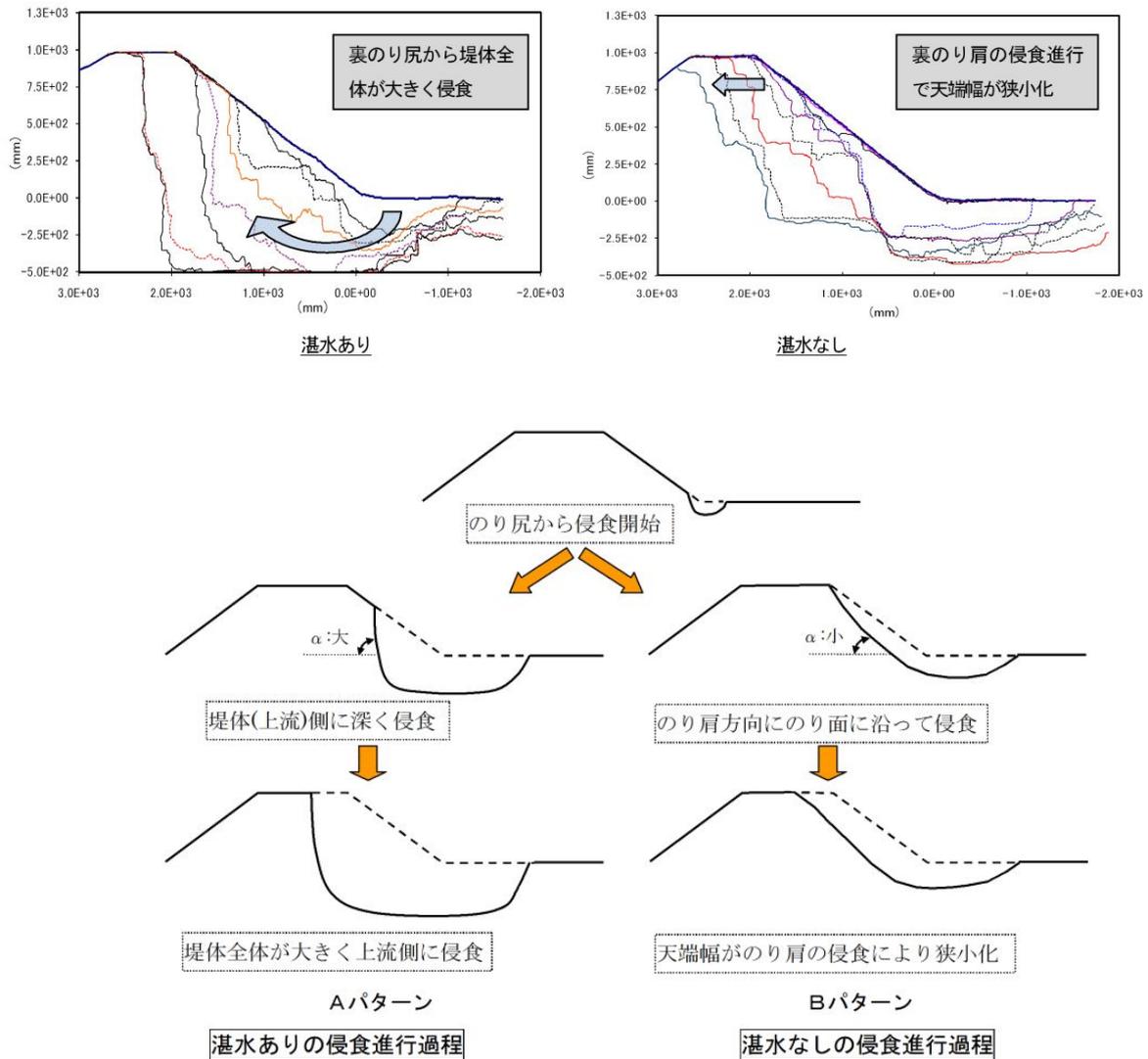


図-3.40 湛水有無の侵食進行過程のイメージ

始場所はのり面となった。侵食開始場所は、固定床実験でのり面の摩擦速度が最大となる付近となることより、流体の表層せん断力による侵食が卓越していると考えられる。

越流実験の前に湛水を行い、堤体内が湿潤状態で越流させた場合は、のり尻侵食から堤体全体が大きく侵食されて崖状となり、土塊となって崩壊が進み破堤に至るパターンとなる場合が多い。これは、土木研究所での大型堤(堤高 3m)の実験でも同様な成果が得られている⁷⁾⁻⁹⁾。

一方、湛水を行わずに堤体が不飽和状態で越流させた場合は、のり肩付近の侵食進行で天端幅が狭小化して破堤に至るパターンとなった。これより、小型堤実験結果からは堤体内湿潤状態により越流時の堤防の侵食進行過程は異なるものと予想される。

越流水深や堤体締固度などの実験条件が同一であれば、堤体内が湿潤状態である方が侵食進行が速くなる。これより、現場において洪水時に河川水位や降雨による水が浸透しやすく排水しにくい箇所では、越流時に侵食進行が速くなることが予想される。

また、不飽和土は湿潤（飽和）状態の土と比較して、サクシジョンの影響によりせん断強度が大きくなるとともに、飽和度とともにせん断強度が変化する。このため、実河川での堤防の越流侵食のメカニズム解明のためには、堤体土質の飽和・不飽和状態と侵食の関係が重要な課題であると考えられる。

(2) 堤体締固め度が越流侵食・浸透現象に与える影響について

堤体の締固め度は、堤防越水時の侵食進行の速さや、河川水などの堤体浸透に影響すると推察される。小型堤実験では、同じ土質でも堤体土質の締固めが緩い場合、越流時の侵食進行が速くなるとともに、浸透時の堤体内湿潤面が高くなり浸透速度は速くなった。

同一条件であれば、同じ堤体土質であっても、締固め度が緩い場合、侵食進行は速くなる。これより、現場において堤体土質の締固めが弱い箇所が存在すると、越流時に侵食進行が速くなり弱部となることが予想される。

同じ堤体土質でも、締固め度が緩い場合、湛水時に堤体内への浸透速度が速くなる。これより、現場において堤体土質の締固めが弱い箇所が存在すると、堤体への浸透量が多くなり、堤体内湿潤面が高くなることが予想される。さらに、小型堤実験結果より、堤体内湿潤面が高い場合、越流侵食量が多くなることより、締固めが弱い箇所では、越流侵食量が多くなると予想される。

(3) 実験結果のバラツキについて

気象等に影響を受けない実験室内で、堤体土質条件や施工条件を厳密に管理を行い作成した小型堤防を用いて実験した結果、侵食開始場所や初期侵食段階での侵食量は、複数の実験でほぼ同一の結果となった。しかし、侵食時間や侵

食進行過程の実験結果にはバラツキが見られた。

これは、施工上の微細なバラツキや局所的な土質の違いなどが影響していると想定される。また、小型堤実験において、越流侵食の途中で侵食進行が遅くなり、破堤に至らないケースが見られた。これは、同一条件で施工していたにもかかわらず、堤体内に局所的に固い場所があったことが要因であると想定される。堤体の大きな現地では、小型堤実験ほどわずかな締固めの違いが強調されないとは思われるが、堤防の施工にあたっては十分に留意する必要がある事項と考えられる。これは、施工管理や土質管理は浸透や越水に対する安全性確保に関連することを示唆する。

3.6 結語

本章で得られた成果や知見を整理すると以下のようである。

- ・ 管理された条件，実堤防と同じ堤体材料・施工方法で，堤高 1 m の小型模型堤防で越流侵食実験を実施した．実験条件をコントロールしつつ，越流水深，堤体締固め度，堤体湿潤条件を変化させた越流侵食実験を実施することにより，越流侵食現象のメカニズムの検討を行った．
- ・ 外力条件（越流水深）を 10cm，20cm，30cm と変化させた越流侵食実験の結果から，越流水深が大きいほど侵食進行が速いが，越流時に侵食が開始する場所や侵食の進行形態については，越流水深の関係なくほぼ同じであった．
- ・ 堤体土質の締固め度を 90%，85% と変えた越流侵食実験の結果から，侵食開始場所はほぼ同じであるが，締固め度が緩いほど侵食進行は速いことが明らかとなった．また，締固め度の違いは堤体内の湿潤状況にも差が見られ，同じ土質であっても，締固め度が緩いほど浸透時の堤体内湿潤面は高く，定常に至る時間や浸透速度が速いことが明らかとなった．
- ・ 越流実験前に一定時間湛水して堤体内を湿潤状態にして実験を行った場合と，湛水を行わずに実験を行ったケースを比較した結果から，堤体内湿潤条件は侵食開始場所，侵食進行パターンおよび侵食進行速さに大きく影響することが明らかとなった．これより，堤体土質の飽和・不飽和状態と侵食の関係が重要である．
- ・ 堤体土質条件や施工条件を厳密に管理して作成した小型堤防を用いて実験した結果，侵食開始場所や初期侵食段階での侵食量は，複数の実験でほぼ同一の結果となった．しかし，侵食時間や侵食進行過程の実験結果にはバラツキが見られた．

- ・ 実河川での破堤メカニズムを検討するため，小型模型堤防の材料には，実堤防で使われる粒径が不均質で粘着性を有する土を用いた．実験では，土質試験を行い土質条件も管理したが，浸透や侵食形状にバラツキが見られており，わずかな土質の違いや締固めの不均一性が影響したと想定される．しかし，粘着性土の侵食速度は，本研究および既往研究でもよく分かっておらず，越流侵食現象をモデル化するにあたって大きな課題である．

<参考文献>

- 1) 建設省土木研究所河川研究室：越水堤防調査最終報告書－解説編－，土研資料2074号，1984.
- 2) 建設省土木研究所河川研究室：越水堤防調査中間報告書－資料編－，土研資料1761号，1982.
- 3) 建設省土木研究所河川研究室：越水堤防調査報告書－資料編(Ⅱ)－，土研資料2050号，1984.
- 4) 與田敏昭，中川一，関口秀雄，岡二三生，後藤仁志，小俣篤：越流侵食・浸透のメカニズムを把握するための小型堤防による越流侵食実験，河川技術論文集，第16巻，pp.347-352，2010.
- 5) 淀川河川事務所資料
- 6) 建設省河川局監修：改訂新版建設省河川砂防技術基準（案）同解説 設計編 [I]，pp.8，山海堂.
- 7) 財団法人国土技術研究センター：河川土工マニュアル，平成5年.
- 8) 建設省：RI機器を用いた盛土の締固め管理要領（案）.

第4章 非粘着性土質堤防の越流 侵食の解析方法の検討

4.1 はじめに

破堤要因の多数を占めると言われる越流侵食の対策を検討する上で、堤防侵食現象を再現し得る数値計算モデル構築の重要度は高く、越流侵食対策や下流側の洪水被害評価に繋がるような、越流水および堤体侵食現象を時間的に追跡できる計算モデルの構築が求められている。これまでの堤防越流侵食に関する数値解析の研究事例として、Tawatchai and Chinnarasri¹⁾は1次元不定流計算にMPM式を基に急勾配水路に対応した流砂量式を用いた侵食計算を行い、そして円弧すべりの斜面安定解析を加えたシミュレーションを行っている。後藤ら²⁾は粒子法を用いて越流水の解析および表層せん断および水撃作用を考慮した堤防裏のり面の侵食プロセスを表現する試みを実施している。また、Wang and Bowles³⁾は粘着性土の切り立った堤防の越流破壊プロセスについて、1次元の浅水流方程式と簡易Bishop法を用いた検証を行っている。このように、堤防越流侵食の数値解析に関する研究事例はいくつか存在するが、その数は未だそれ程多くなく、また多くは侵食速度の評価部分に課題が残されていると言える⁴⁾。

第一に、堤防の越流侵食モデルの開発が遅れている原因として、堤防の越流破壊現象が急勾配の移動床水理で、浸透、侵食、局部すべり破壊や崩落などが複雑に絡んだ現象であるため、モデル化を困難にしていることがあげられる。

第二に、堤防の越流侵食プロセスは通常は裏法面における不飽和土の侵食であり、河道内の飽和した河床面の侵食プロセスと異なる挙動を示すことがあげられる。不飽和土はサクシヨンの影響により河川内の飽和土と比較してせん断強度が大きく、またそのせん断強度は飽和度とともに変化する。そのため、不飽和土では浸透と侵食を一体としてとらえる必要があり、このこともモデル開

発を遅らせている原因の一つと考えられる。第3章の越流侵食のメカニズム解明のための堤防模型による越流実験では、堤体内湿潤状態は侵食開始場所、侵食進行パターンおよび侵食進行速さなどに大きく影響することが明らかとなっており、堤体土質の飽和・不飽和状態と侵食の関係が、メカニズム解明の重要課題となっている。

第三に、粘着性のある土の侵食速度の評価も大きな原因である。堤防に用いられる材料は粘土を含む砂質土も多く、粘土分が少量含まれるだけで、粘土粒子間に働く化学的な作用により砂のみの材料に比べ侵食速度が非常に小さくなることが知られている。また、土の粘着力は土の飽和度の増加に伴い減少することが報告されている⁵⁾。図-4.1に真砂土の間隙比 $e=0.75$ 時における飽和度 S_r と粘着力 c' の関係を示すが、飽和度上昇により土の粘着力が比例低下していることが明らかである。この他にも、粘着性土の限界掃流力に関しては、力学的及び物理化学的アプローチによる様々な研究がなされているが、土粒子を結合している粘着力の大きさを定める物理化学的および電気化学的機構が非常に複雑であるため、非粘着性土のような限界掃流力を表現しうるまで十分に理解が深まっていない。したがって、粘着性土の限界掃流力や侵食速度を一般的な土質試験による種々のパラメータから評価するのは困難である⁷⁾。このように粘着性のある材料の普遍的な侵食速度式が現在議論の段階にあることが堤防の越流侵食のモデル開発を大きく困難にしている。堤防模型による越流実験でも、わずかな土質の違いが要因と想定される実験結果のバラツキが見られており、粘着性土の侵食速度が現時点では大きな課題であることが示されている。

その一方で、全国には砂質堤防が多く実存する（例えば、淀川水系木津川の堤防などは大部分の区間の堤体土の細粒分含有率が20%以下の砂質堤防である）。このため、粘着性土の侵食速度の課題は重要であり解明が必要ではあるが、まずは問題を単純化して現象を明らかにした上で、モデル構築を図ることも重要である。そこで、本研究では、まずは越流侵食に大きな影響を与える不飽和堤体の越流侵食に着眼点を置き、不確定要因の多い粘着性土質ではなく、非粘着性土質を対象とした検討を行う。ここでは、非粘着性土質堤防の解析モデルを構築した上で、非粘着性土質を用いた越水模型実験を実施し、粒径や越流前の堤体飽和度の違いが越流侵食プロセスに与える影響を確認した。そして、計算モデル構築のための検証データを実験により蓄積し、そして浸透および越

流水の影響を考慮した非粘着性土質堤防越流侵食モデルの構築を図った。

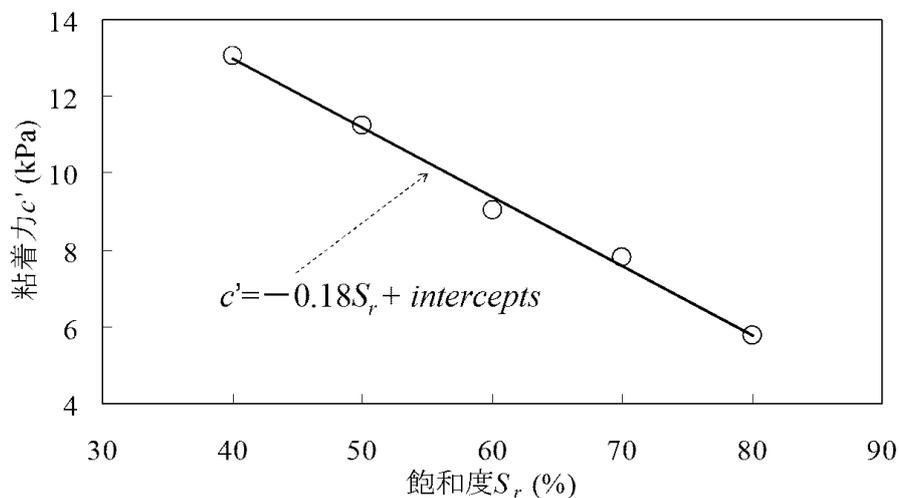


図-4.1 飽和度と粘着力の関係⁶⁾を一部加筆

4.2 非粘着性土質堤防の越流侵食解析法⁴⁾

粘着性のある土の侵食速度の評価については未解決の点が多いため、本研究の堤防越流侵食解析モデルは、①堤体内の浸透流解析、②越流水の流れ解析、③堤体の侵食および堆積の土砂輸送解析、④堤体法面のすべり破壊解析の4つの解析モデルから構成されている。以降、各解析過程について記述する。

4.2.1 堤体内の浸透流解析

非定常の飽和・不飽和浸透流解析は、次式のRichards式を支配方程式としており、代表断面の鉛直2次元の解析を行う。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \quad (4.1)$$

ここで、 $C(\psi)$ は比水分容量(= $\partial \theta_w / \partial \psi$)、 θ_w は体積含水率、 ψ は圧力水頭、 K_x, K_z は

それぞれ x, z 方向の透水係数である。そして、Richards式を解くのに必要な圧力水頭と含水率および圧力水頭と不飽和透水係数 K の関係式には、次式の van Genuchten⁸⁾ の式を用いた。

$$S_e = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} 1 / (1 + |\alpha\psi|^\eta)^m & (\psi < 0) \\ 1 & (\psi \geq 0) \end{cases} \quad (4.2)$$

$$K = \begin{cases} K_s S_e^{0.5} [1 + (1 - S_e^{1/m})^m]^2 & (\psi < 0) \\ K_s & (\psi \geq 0) \end{cases} \quad (4.3)$$

$$C = \begin{cases} m \{1 + (|\alpha\psi|^\eta)\}^{m-1} \eta (|\alpha\psi|^{\eta-1}) \alpha (\theta_s - \theta_r) & (\psi < 0) \\ 0 & (\psi \geq 0) \end{cases} \quad (4.4)$$

ここで、 S_e は有効飽和度、 θ_s, θ_r はそれぞれ飽和および残留体積含水率、 α, η は土質試験より与えられる保水性に関するパラメータ、 $m = 1 - \eta^{-1}$ 、 K_s は飽和時の透水係数である。

4.2.2 越流水の流れ解析

越流水の流れ計算には水深方向に積分した平面2次元浅水流方程式を用いる。方程式内では水位と水深平均流速が未知数となり、以下に示す x, y 方向の運動方程式および連続式から求められる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\tau_{xx}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{xy}}{\rho} \right) \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\tau_{xy}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_{yy}}{\rho} \right) \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = 0 \quad (4.7)$$

ここで、 u, v は x, y 方向の水深平均流速、 g は重力加速度、 H は水位、 h は水深、 ρ は水の密度である。また、 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ は乱れによるせん断力で次式より求められる。

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho} = 2\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \frac{\tau_{yy}}{\rho} = 2\varepsilon \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\tau_{xy}}{\rho} = \varepsilon \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4.8)$$

ε は渦動粘性係数で、 $\varepsilon = \kappa u_* h / 6$ で与え、ここに κ はカルマン定数(=0.4)で u_* は摩擦速度である。また、底面のせん断力は次式で評価した。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad (4.9)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad (4.10)$$

ここで、 n はマンニングの粗度係数である。

以上の式を離散化し、圧力-速度の連成解析法でSIMPLE法の収束性を改善したSIMPLER法⁹⁾を用いて解く。

4.2.3 堤体の侵食および堆積の土砂輸送解析

越流水によって法面が侵食し堤体形状が変化し、そして、侵食された土砂が法尻近傍もしくは法尻から幾分離れた場所で堆積する。本研究では侵食しながら変化する堤体法面の局所勾配が侵食および堆積へ与える影響を考慮するために、地形に沿った砂粒の運動方程式を解く非平衡流砂モデルのフレームワーク¹⁰⁾を用いて解析を行った。

堤防越流による侵食現象は、流速が大きく、水深が小さく、そして法面勾配が急であるため、河道の河床変動計算で用いられているような流砂量式やpick-up rateの式をそのまま用いた場合では侵食量が過大に算出される傾向がある¹¹⁾。また、堤体は河道内の河床砂に比べて小さな粒径の土で構成されており、サクションによるせん断抵抗の増加などの影響により、砂の粒径が小さいほどサクションが大きくなってせん断抵抗が大きくなり、一方、粒径が大きいほどサクションが小さくなるため侵食が大きくなる可能性があり、掃流砂量式をそのまま堤防越流侵食に適用するには問題がある¹²⁾。このため、本研究では、Nakagawa et al.の研究¹²⁾と同様にサクションによるせん断抵抗の増加を考慮することを考え、本研究ではpick-up rate式にその効果を導入して堤防越流侵食シミュレーションを試みた。

(1) pick-up量の計算

各計算メッシュからの単位時間あたり離脱土砂量はpick-up rate p_s を用いて次式のように表せる.

$$V_p = (A_3 d) / A_2 p_s S_p \quad (4.11)$$

ここで, d は河床材料粒径, A_2, A_3 は砂粒の2次元, 3次元の形状係数 ($=\pi/4, \pi/6$), S_p は離脱地点メッシュの鉛直方向射影面積である.

pick-up rateは局所勾配の影響を考慮した式¹⁰⁾にサクシオンによるせん断力増加を考慮した次式より計算を行った.

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho-1)g}} = F_0 G_* \tau_* \left(1 - \frac{k_p \phi \tau_{*c} + \tau_{*suc}}{\tau_*} \right)^{m_p} \quad (4.12)$$

$$G_* = \frac{\cos\psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \quad (4.13)$$

$$\phi = \frac{\mu_s \cos\theta_b - \sin\theta_b \cos\alpha}{\cos\psi + k_L \mu_s} \frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \quad (4.14)$$

ここで, τ_*, τ_{*c} はそれぞれ無次元掃流力と無次元限界掃流力, G_* は流れと砂粒の移動方向の影響を考慮する補正係数, ϕ は局所勾配が移動限界に与える補正係数, σ は河床材料の密度 ($\sigma/\rho=2.65$), θ_b は河床最大傾斜方向の勾配角, k_L は抗力と揚力の比 ($=0.85$), μ_s は砂の静止摩擦係数 ($=0.7$), ψ は河床付近の流速と砂粒移動方向のなす角度, α は砂粒の移動方向と河床の最大傾斜方向のなす角度である. 定数については, 中川ら¹³⁾が飽和土の実験で提案している $F_0=0.03$, $k_p=0.7$, $m_p=3$ をそのまま用いた.

ここで, 本研究ではNakagawa et al.の研究¹²⁾に倣ってサクシオンによるせん断抵抗の増加効果をこのpick-up rateの式の限界掃流力にサクシオンによるせん断抵抗増の導入を考える. サクシオンによるせん断抵抗増分 τ_{suc} は, Vanapalli et al.¹⁴⁾の研究を参考に, 浸透流計算で得られた各点の負の圧力水頭 ψ から次のように求められる.

$$\tau_{suc} = |u_a - u_w| \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan\phi = \rho g |\psi| \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan\phi \quad (4.15)$$

ここで、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧で、 $|u_a - u_w|$ はサクシオンである。本研究では、Egiazaroffの限界掃流力の式¹⁵⁾にサクシオンによるせん断抵抗増の導入を考える。抗力と摩擦力が釣り合う砂粒の移動限界を考えると、抗力 R_T 、摩擦力 F は次のように表現できる。

$$R_T = \frac{\rho}{2} C_D u_b^2 A_2 d \quad (4.16)$$

$$F = \frac{\pi}{6} d^3 (\sigma - \rho) g f + \tau_{suc} A_2 d^2 \quad (4.17)$$

ここで、 ρ, σ はそれぞれ水および砂粒の密度、 C_D は抗力係数、 u_b は砂粒に作用する代表流速、 d は砂の粒径、 A_2, A_3 は砂粒の形状係数、 f は摩擦係数 ($= \tan \varphi$) を表す。 $R_T = F$ の限界掃流力の条件より、

$$\frac{u_b^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} = \frac{4}{3C_D} \tan \varphi + \frac{2\tau_{suc}}{C_D \rho (\sigma/\rho - 1)gd} \quad (4.18)$$

が得られる。粒径 d の砂粒に作用する抵抗力の代表流速 u_b は、底面より ad の位置の流速であると仮定し、また混合砂礫床の相当粗度 k_s は、ほぼ平均粒径に等しいため、

$$\frac{u_b^2}{u_*^2} = 5.75 \log_{10} \left(\frac{30.2ad}{d_m} \right) \quad (4.19)$$

となり、 $a = 0.63, \tan \varphi = 1.0, C_D = 0.4, u_* = u_*'$ とすると、Egiazaroffの式にサクシオンによる限界掃流力の増加の項が追加された次式が得られる。

$$\frac{u_*'^2}{(\sigma/\rho - 1)gd} = \frac{4}{3C_D} \frac{1}{[5.75 \log_{10} 19(d/d_m)]^2} + \frac{2\tau_{suc}}{C_D \rho (\sigma/\rho - 1)gd [5.75 \log_{10} 19(d/d_m)]^2} \quad (4.20)$$

右辺第2項がサクシオンによるせん断抵抗増分である。本研究では一様砂の実験への適用を行っているため、 $d_m = d$ とし、次式によってサクシオンによるせん断力増加の効果を表し、無次元限界掃流力 τ_{suc}^* に加えて移動限界とした。

$$\tau_{suc}^* = \frac{2\tau_{suc}}{C_D \rho (\sigma/\rho - 1)gd [5.75 \log_{10} 19]^2} \quad (4.21)$$

堤体裏法面の越流侵食過程において、越流水により浸透と侵食がほぼ同時に進行していると考えられる。図-4.2は越流侵食実験の堤体を水路横から撮影したものである。越流水により裏法面が侵食されていると同時に越流水が浸透し湿潤面が堤体内部へと進行している様子が確認できる。堤体土の粒径によって浸透速度が異なり、粒径が小さなケースは裏法面において湿潤面と侵食面の間が薄く、浸透の進行によって堤体表層が飽和し、サクシヨンによるせん断抵抗が弱まった後に侵食が進行している様子が確認できる。このような越流侵食現象において、越流水の浸透、堤体土の飽和度を考慮したせん断抵抗の変化、そして飽和層および不飽和土の侵食速度の評価が現象を再現する上で重要であることが分かる。

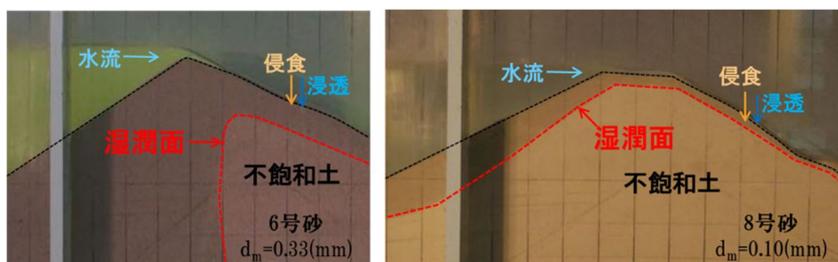


図-4.2 粒径の異なる堤防での越流侵食実験時の湿潤状況

本研究ではその浸透と侵食の現象を図-4.3に示すような越流水による浸透と、飽和層と不飽和土の侵食プロセスの繰り返しとしてモデル化を行った。表層の飽和層とその下に不飽和土が存在し、まず飽和層が侵食され、その次に不飽和層が侵食され、浸透が進む。計算においてこのプロセスの繰り返しをモデル化した。このプロセスを飽和土と不飽和土の二つのpick-up rate式を用いて評価することとした。式(4.12)より不飽和土の侵食量を求め、飽和土は同式でサクシヨンによるせん断抵抗増を考慮せずに侵食量を評価する。

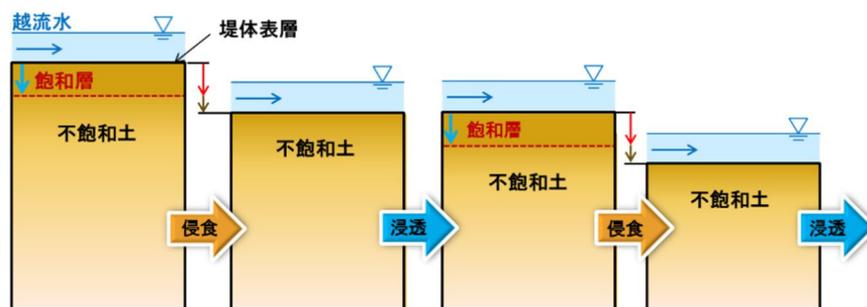


図-4.3 侵食過程の概略図

この侵食面のモデル化で問題となるのは、表層の飽和層厚の定義である。本研究では、飽和層の厚さは浸透流解析の結果より評価し、もし表層の解析メッシュが飽和していない場合は、堤防表層において浸透は常に進行して表層にわずかな飽和層が存在していると考え、その飽和層厚 D_s を透水係数と圧力水頭差 $\Delta\psi$ と計算ステップを乗じて求めた。

$$D_s = U_s \Delta t = -K_z \Delta \psi \Delta t \quad (4.22)$$

ここで、 U_s は飽和層の進行速度、 K_z は鉛直方向の透水係数、 Δt は侵食計算の計算ステップである。侵食計算の1ステップにおいて、飽和層の侵食を飽和土の pick-up rate の式で評価し、次式のように飽和層が全て侵食するために必要な時間を算定し、侵食計算1ステップの残りの時間を不飽和層の侵食とする。

$$\Delta t_s = D_s / E_{rs} \quad (4.23)$$

$$\Delta t_u = \Delta t - \Delta t_s \quad (\Delta t_u \geq 0) \quad (4.24)$$

$$E_r \Delta t = E_{rs} \Delta t_s + E_{ru} \Delta t_u \quad (4.25)$$

ここで、 E_{rs} 、 E_{ru} は pick-up 量から求められる飽和層の侵食速度、不飽和土の侵食速度である。そして、 Δt_s は1ステップ内において飽和層を侵食するために必要な時間、 Δt_u は1ステップ内の不飽和土の侵食に費やされる時間である。計算された侵食速度によって1ステップの侵食高が飽和層内で収まる場合や、飽和層のみ侵食され不飽和土は侵食されない場合、そして、飽和層と不飽和土の両方が侵食される現象がモデル化されることになる。そして、浸透流解析によって堤体表層が飽和状態であれば $E_{ru} = E_{rs}$ とし、飽和土の侵食速度式のみで侵食を評価する。

上記した浸透流解析結果を用いた侵食過程のモデル化により、浸透速度の大きな堤体土の計算では飽和土の侵食に近いものとなり、浸透速度の小さな堤体土の計算では、不飽和土の浸透速度影響を強く受けた侵食プロセスを表現することが可能となる。

(2) 堆積量の計算

後述する運動方程式より計算される砂粒の移動地点における土砂堆積量を step length の確率密度関数を用いて求める。計算メッシュ i から出発した砂粒の

移動経路において、離脱から n ステップ後の位置における単位時間あたりの堆積量 $V_{d(n)}$ は次式で計算される。

$$V_{d(n)} = V_p f_s(s_{(n)}) \Delta s \quad (4.26)$$

ここで、 V_p は離脱地点の pick-up 量、 f_s は step length の確率密度関数を表し、 $s_{(n)}$ は離脱した砂粒の移動距離、 Δs は1ステップの砂粒移動距離である。本研究では、堤防法面ではほとんど堆積が生じないことから $s_{(n)}$ は移動限界以下となった地点からの移動距離とした。step length の確率密度関数は、次式のような指数関数を用いる。

$$f_s(s_{(n)}) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{s_{(n)}}{\lambda}\right) \quad (4.27)$$

ここで、 λ は砂粒の平均 step length である。平均 step length については局所的な掃流力の影響を考慮した次の近似式¹⁶⁾を用いた。

$$\lambda = \alpha_2 \left(\frac{u_*}{w_0}\right)^{3/2} \cdot \left[1 - \frac{(u_{*c}/w_0)}{u_*/w_0}\right] \quad (4.28)$$

ここで、 $\alpha_2 = 3.0 \times 10^3$ 、 w_0 は砂粒の沈降速度を示す。

(3) 砂粒の運動方程式を用いた移動経路計算

代表離脱砂粒の移動経路を、砂粒の滑動形式の運動方程式を用いて計算する。河床平面を表すために $x-z$ 平面、 $y-z$ 平面内の河床平面と平行な単位ベクトルを、それぞれ $\mathbf{p}_{b1}, \mathbf{p}_{b2}$ とする。砂粒に作用する力として、抗力、摩擦力、重力、浮力、揚力を考えると、 \mathbf{p}_{bj} ($j=1,2$) 方向についての砂粒の運動方程式は以下のようになる。

$$m_{sed} \frac{du_{sedj}}{dt} = D_j + W_j - F_j \quad (j=1,2) \quad (4.29)$$

ここで、 m_{sed} は砂粒の仮想質量であり、付加質量係数 $C_m (=0.5)$ を用いて、次式で表せる。

$$m_{sed(k)} = \rho(\sigma/\rho + C_m) A_3 d^3 \quad (4.30)$$

D_j, F_j, W_j は、砂粒に作用する抗力、摩擦力の \mathbf{p}_{bj} 方向成分、水中重力であり、粒径 d の砂粒に作用するそれぞれの大きさを D, F, W とすれば、次のように表せる。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho (u_{bi} - u_{sed})^2 c_e A_2 d^2 \quad (4.31)$$

$$F = \mu_k \left(W \frac{\cos \theta_{bx} \cos \theta_{by}}{\sin \theta_p} - k_L D \right) \quad (4.32)$$

$$W = (\sigma - \rho) g A_3 d^3 \quad (4.33)$$

ここで、 u_{sed} は砂粒移動速度の \mathbf{p}_{bj} 方向成分、 u_{bi} は底面近傍の流速 \mathbf{p}_{bj} 方向成分、 C_D は抗力係数 (=0.4)、 c_e は砂粒に作用する抗力の有効断面積に関する係数、 μ_k は砂粒の動摩擦係数 (=0.35)、 θ_{bx}, θ_{by} はそれぞれ x, y 方向の河床勾配角、 θ_p は \mathbf{p}_{b1} と \mathbf{p}_{b2} のなす角度である。 c_e は遮蔽係数に相当するもので、ここでは簡単のため、静止砂粒に対しては 0.4、移動中の砂粒に対しては 1.0 を用いた。

(4) 堤体形状の計算

上述した方法によって算出した pick-up 量、堆積量を用いて、堤体形状変動量の計算を行う。移動砂粒の位置についてはメッシュ点に関係ないため、移動経路より堆積量を各ステップ近傍メッシュに配分して堆積させている。各計算メッシュにおいて、移動している砂粒全ての土砂堆積配分量を合計し、以下の式で堤体形状の変動量を求める。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{A_1 A_2}{A_3} \frac{\sum V_d - V_p}{S_d} \quad (4.34)$$

4.2.4 堤体法面のすべり破壊解析

堤防の越流侵食において、シルトや粘土で粘着性を含む場合や砂でも粒径が小さい堤土は、侵食面が切り立ちオーバーハングやそれに近い形状となり、すべり破壊を生じて破堤に至る。そのため、堤体の越流侵食解析において、なんらかのすべり破壊を再現できる計算過程を導入する必要がある。

本研究では、越流侵食モデルに斜面安定解析を導入する^{3),11)}。斜面の安定解析には、これまで様々な手法が提案されているが、今回対象とする堤防侵食現象においてすべり面は必ずしも円弧状とは限らないため、任意形状のすべり面

が見いだせるスライス分割法の一つである簡易Janbu法が適していると判断し適用した。任意形状のすべり面の各スライスに作用する水平および鉛直力を求め、すべり土塊全体の水平方向の力のつり合いから安全率を求めている。スライス間に働く不静定せん断力の影響を無視した簡易Janbu法の安全率 F_s の算定式を次式に示す。

$$F_s = \sum_i R_i / \sum_i T_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (4.35)$$

$$R_i = \frac{c'l_i \cos \alpha_i + (W_i - u_{wi} l_i \cos \alpha_i) \tan \phi}{\cos^2 \alpha_i (1 + \tan \alpha_i \tan \phi / F_s)} \quad (4.36)$$

$$T_i = W_i \tan \alpha_i \quad (4.37)$$

ここで、 n は分割スライス数、添字 i はスライス番号、 W_i 、 l_i 、 u_{wi} 、 α_i はそれぞれ各スライスの重量、スライス底面の長さ、スライス底面に働く平均間隙水圧、水平面に対する傾きを表す。そして、 c' は土の粘着力、 ϕ は土の内部摩擦角である。上述した簡易Janbu法の式は、不飽和土のサクシヨンによるせん断抵抗増の効果は考慮されていない。本研究では、その負の間隙水圧によるせん断抵抗増を斜面安定解析にも考慮する。不飽和堤体内すべり土塊底面のせん断抵抗にサクシヨンによるせん断抵抗増分を加え次式で表す。

$$R_f = c' + (\sigma_n - u_w) \tan \phi + \tau_{suc} \quad (4.38)$$

そして、式(4.35)と同様の導出過程により、以下のサクシヨンによるせん断抵抗増を考慮した次式が得られる。

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \{ (c'l_i + (N_i - u_{wi} l_i) \tan \phi + \tau_{suc i} l_i) \}}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (4.39)$$

$$N_i = \frac{W_i - \frac{1}{F_s} (c' + u_{wi} \tan \phi + \tau_{suc i}) l_i \sin \alpha_i}{\cos \alpha_i \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi}{F_s} \right)} \quad (4.40)$$

浸透流解析の含水率の計算結果は各スライス重量の計算に反映され、圧力水頭がスライス底面に働く平均間隙水圧の計算に用いられる。上式で求められる

安全率が最小となるすべり面の形状を，数理計画法の一つである動的計画法 (Dynamic programming) の最適化手法^{17), 18)}を用いて見出す。

また，すべり土塊については，すべり破壊と同時に越流水によって下流へ全て流されると考え，解析範囲から土塊を取り除く方法もこれまでの研究^{8), 14)}で見られるが，すべり土塊が大きい場合はその土塊が下流側の流れや侵食に与える影響は少なくないと考えられる．本研究では簡易的ではあるが，下流側へすべり土塊を移動させ，流送過程も他の砂と同様の越流水によって輸送されることとした．図-4.4には本研究で用いたすべり土塊の簡易的な移動および堆積方法の模式図を示す。

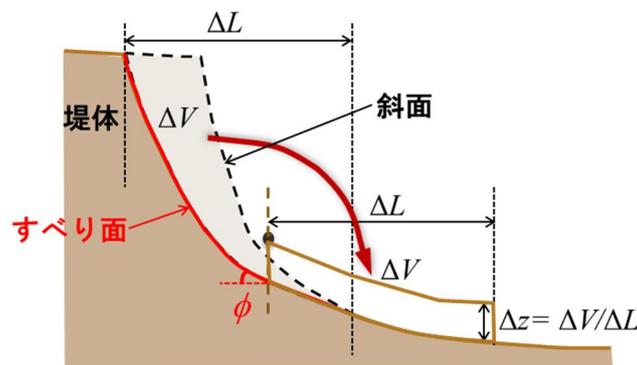


図-4.4 すべり土塊の模式図

本モデルでは，簡易的に斜面安定解析から計算されたすべり土塊は，下流側の安息角以下となる地点まで移動させて堆積させる．その際，堆積範囲の縦断距離はすべり土塊の縦断距離と一致させ，堆積高はすべり土塊体積と縦断距離より求められる平均的な高さとして計算を行った．

4.3 非粘着性土質堤防による越流侵食実験^{4),19)}

非粘着性土質堤防の越流破壊モデルの構築に向けて、実堤防もしくは模型堤防の越流侵食実験結果を用いて検証を行うことが有効である。第3章で実施した越流実験は、実河川での越流侵食メカニズムを解明するために粘着性土による堤防模型を用いている。このため、本研究では、解析モデルの検証データを取得することを目的として、非粘着性土の堤防模型による越流侵食実験を行うことにした。この実験では、非粘着性土の粒径や越流前の堤体飽和度の違いが越流侵食プロセスに与える影響に着目した。

4.3.1 実験方法

実験には京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの長さ500cm、幅30cm、深さ50cmの直線水路を用いた。水路勾配を水平に設定し、水路下流部に模型堤体を作成した。実験水路を図-4.5に、模型堤体の諸元を図-4.6に示す。実験は2タイプの堤体模型を用いた。Type-Aは、堤高40cm、堤幅195cmであり、基礎部は固定床である。Type-Bは、堤高15cm、堤幅70cmであり、堤体下部に堤体と同じ土で作成した基礎部（高さ15cm）を設けた。また、両タイプとも堤体の法勾配は表法、裏法とも1.0：2.0とした。

堤体土については、珪砂の6号、7号、8号を使用した。粒度分布を図-4.7に、中央粒径および平均粒径を表-4.1に示した。堤体は、同じ条件となるように、間隙量と初期含水量を同一とした土を5cm層ごとに締固めて作成した。

水路の壁面は透明アクリル製であるため、側面から浸透の様子や侵食プロセスが観察でき、本研究では、実験中に横からデジタルビデオカメラにより堤体侵食の様子を撮影し、その撮影画像から堤体形状の変化を読み取った。

実験ケースを、表-4.2に示す。堤体Type-Bでは、粒径の異なる3つの堤体土について、越流前に高水位を維持し、堤体土が浸透水により飽和に近い状態にしてから越流開始を実施するケースと、設定した流量条件で水路内に水がない状態から一気に越流するまで水位上昇させたケースと2つのパターンについて実験を実施している。これにより、堤体裏法面が飽和状態と初期状態（不飽

和状態)での比較を行う。また、粒径の違いと飽和度の違いの影響のみを見るために、流量条件は同一とした。なお、実験は全て正面越流の条件で行った。

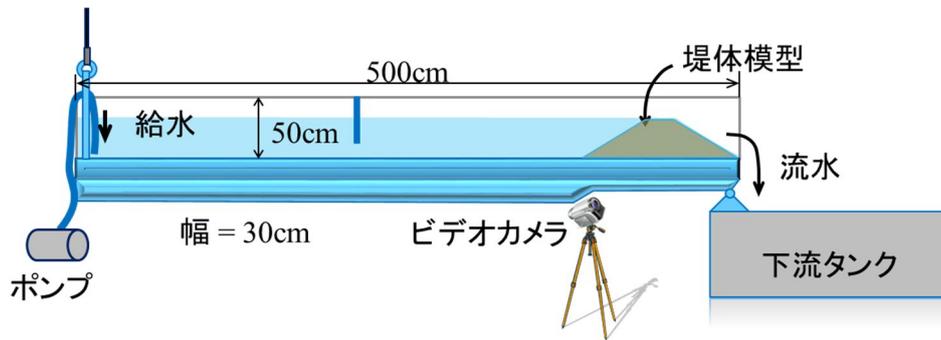


図-4.5 実験水路模型

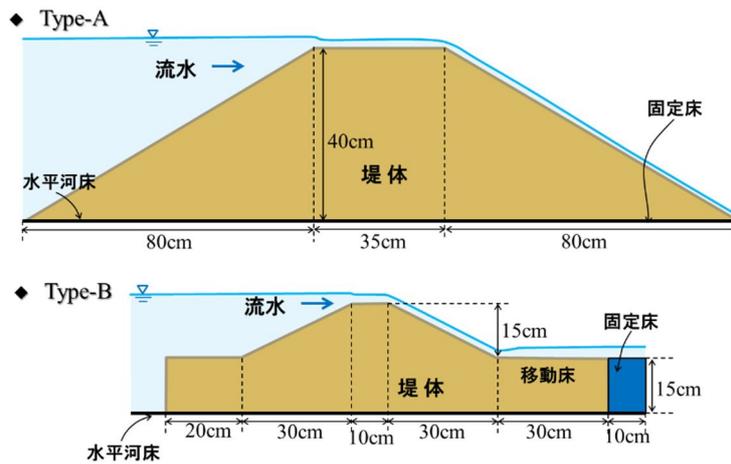


図-4.6 模型堤体

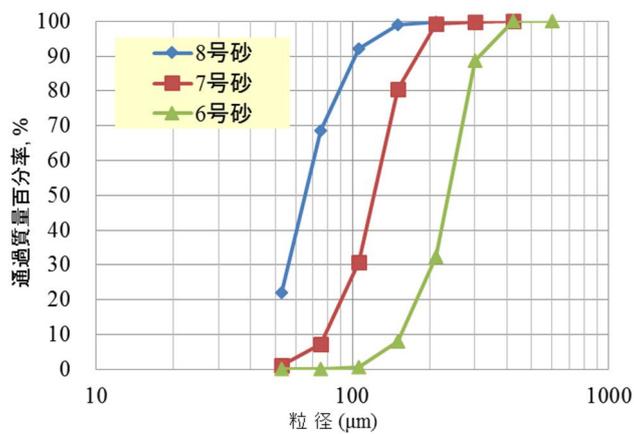


図-4.7 実験土の粒度分布

表-4.1 実験土の粒径

	6号砂	7号砂	8号砂
$d_{50}(\text{mm})$	0.239	0.123	0.064
$d_m(\text{mm})$	0.334	0.174	0.100

表-4.2 実験ケース

Case No.	堤体タイプ	給水量 (cm^3/s)	土砂	平均粒径 d_m (mm)	越流前浸透の有無	初期土壌水分量 (%)	堤体の空隙率
1	A	7840.0	6号砂	0.334	無	13.0	0.51
2	A		7号砂	0.174	無	11.5	0.51
3	A		8号砂	0.100	無	12.0	0.55
4	B	1172.0	6号砂	0.334	無	3.89	0.53
5	B				有	(5.86)	
6	B		7号砂	0.174	無	6.79	0.55
7	B				有	(9.53)	
8	B		8号砂	0.100	無	4.59	0.58
9	B				有	(5.71)	

4.3.2 実験結果

(1) 粒径の違いによる堤体侵食形状への影響

堤体Type-Bについて、粒径の異なる堤体の越流侵食形状を図-4.8に示す。各ケースの実験条件は、越流前浸透無しであり、図中のプロットは10秒毎の堤体形状を表している。実験は、各ケース同じ土質条件で3回実施し、各実験結果の平均を示した。

これより、粒径の侵食速度に与える影響は大きく、本研究で用いた堤体土の粒径範囲では、粒径が小さいほど、侵食速度が軽減される結果となった。堤体裏法面の侵食面の勾配は、粒径が大きいケースほど緩勾配で裏法尻下流部の堆積が多い結果となった。粒径の小さな8号砂ケースは、侵食初期過程において堤防天端は侵食せず、裏法尻近くから侵食し、上流へ侵食が拡大し裏法面が急勾配となっている様子が確認できる。

これらの実験で用いた土のパラメータについては、Nakagawa et al.¹²⁾により

調査された表-4.3の値を適用した。ここで、Van Genuchten式⁸⁾のパラメータは、pFメータ計測により得られた土壌水分量の非線形回帰式を用いて評価した。土の水分特性曲線を図-4.9に、せん断力の増加とサクシジョンの関係を図-4.10に示す。これより、サクシジョンとせん断力の関係は、土の粒径に関連し、粒径が小さいほどサクシジョンによるせん断抵抗の増分が大きく、土が飽和状態に近づきサクシジョンの値が小さくなるほど、せん断抵抗の増分の効果が小さくなることが示されている。さらに、粒径が小さいほど透水性が小さく、浸透速度が小さくなる。これは、粒径が小さく飽和状態になる時間が長くなる8号砂のケースが、サクシジョンによるせん断力の増加が最も大きくなることを意味する。

一方、河川のシミュレーションで用いられている粒径や勾配のみで決まる移動限界評価による流砂量式では、粒径が大きいほど流砂量が小さく評価されるものとなる。これは、これらの実験結果と相反する現象を表現することになるため、堤体の越流侵食過程を既往の流砂量式をそのまま用いて再現することが難しいことが分かる。

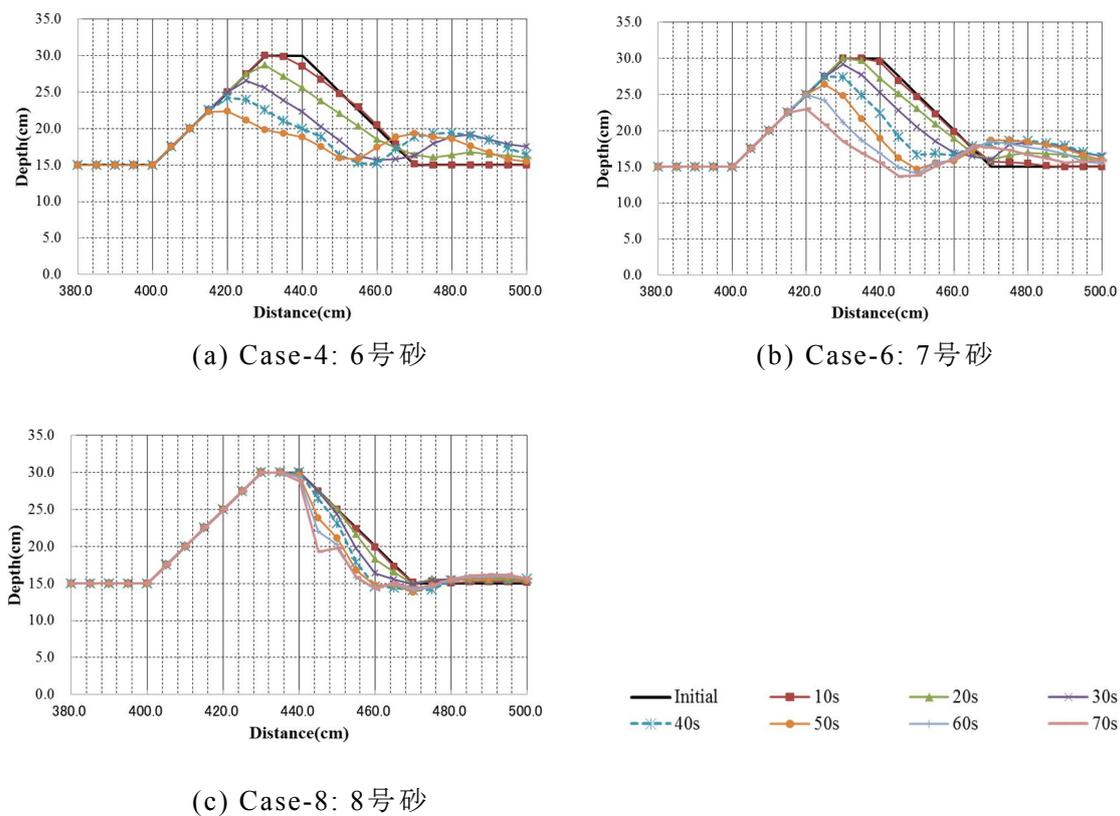


図-4.8 堤体侵食形状の実験結果 (堤体Type-B)

表-4.3 粒径別の土壌パラメータ

パラメータ	6号砂	7号砂	8号砂
θ_s	0.319	0.351	0.40
θ_r	0.061	0.095	0.025
α	3.837	2.552	1.043
η	3.852	4.148	1.701
K_s (m/sec.)	2.15×10^{-4}	8.75×10^{-5}	1.56×10^{-5}
d_m (mm)	0.334	0.174	0.100

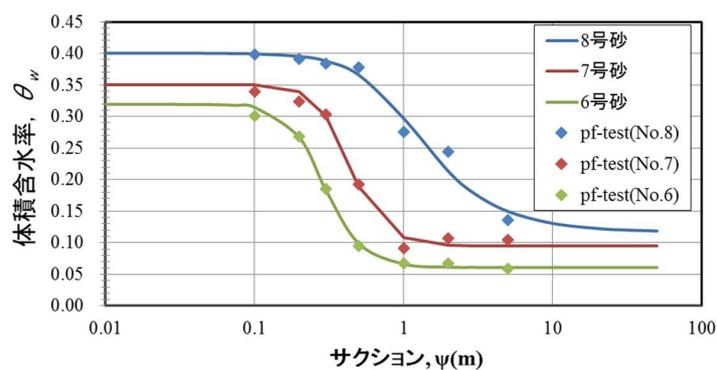


図-4.9 土の水分特性曲線

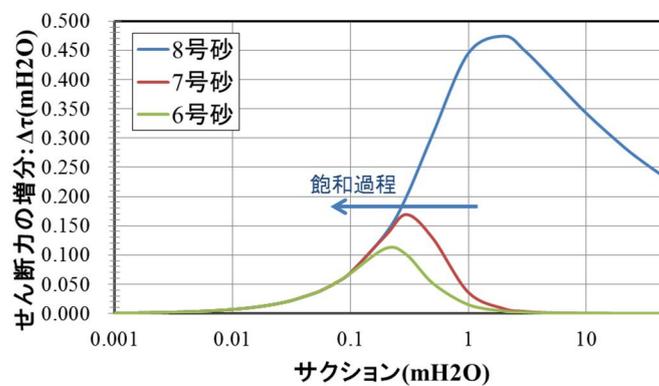
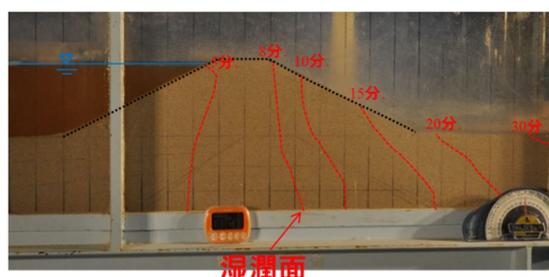


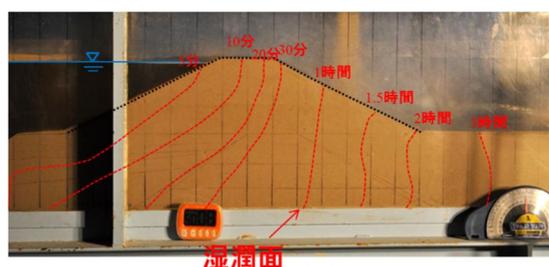
図-4.10 せん断力の増加とサクションの関係

(2) 堤体飽和度の堤体越流侵食への影響

越流前の堤体の飽和度が越流時の侵食速度に与える影響を確認するために、各堤体土ケースについて越流前浸透の有無の比較を行った。まず、図-4.11に異なる粒径（6号砂と8号砂）で堤防天端まで湛水させた時の湿潤面の経時変化を示した。これより、6号砂と8号砂で大きく浸透水の進行速度が異なり、堤体全体に浸透水が行き渡る時間に大きな差があることが確認できる。



(a) 6号砂



(b) 8号砂

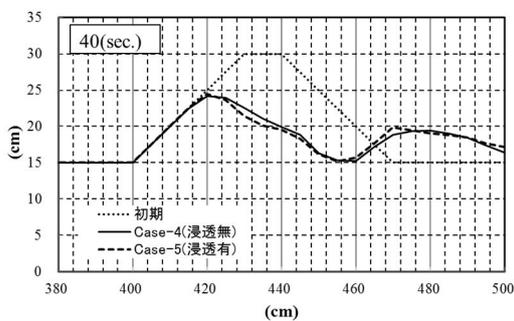
図-4.11 湿潤面の進行過程

次に、同じ土質で、越流前の堤体内湿潤状態を変えた場合の実験結果を比較する。堤体内を湿潤させるケース（Case-5, Case-7, Case-9）は、越流前に堤防天端まで湛水させ一定時間放置し、浸透水で堤体内を飽和状態とした後に越流させた。一方、堤体内を湿潤させないケース（Case-4, Case-6, Case-8）は、上流側湛水なしの状態から実験開始（通水）して、堤防天端まで水位上昇させた後、一気に越流させた。

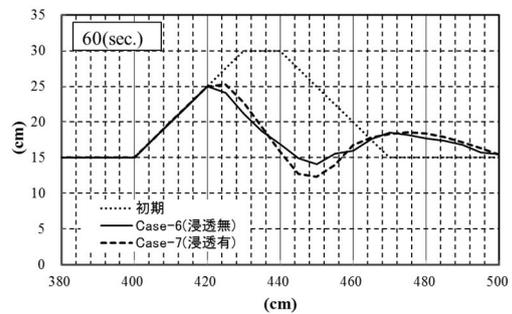
図-4.12に越流前浸透有無のケースの比較図を示す。前出のように、サクシヨンの効果による粒子間力は粒径が小さいほど大きく、そのため粒径が小さい

ほどせん断抵抗が増加していることが、各堤体土ケースの侵食速度の差に表れていることが考えられる。また、越流前浸透の有無は、裏法面の飽和度に違いを生じ、これによるせん断抵抗力の変化が侵食速度に影響するものとなっている。粒径が大きく浸透速度が大きな6号砂によるCase-4とCase-5については、越流前浸透の有無の影響は小さいことが確認できる。7号砂および8号砂のケースは、特に侵食面の法尻において侵食の差が生じており、粒径が最も小さく浸透速度の遅い8号砂のケースで最も大きな違いが見られた。透水性の最も小さな8号砂の結果を見ると、堤体法面からの浸透により表層を飽和するのに時間がかかるため、越流前浸透の有無で侵食速度に差が表れている。一方、粒径の最も大きい6号砂については、浸透速度が大きいため、越流前浸透が無しのケースにおいても、越流水により裏法面表層の飽和の程度が越流前浸透有りケースと同等になっていると考えられる。

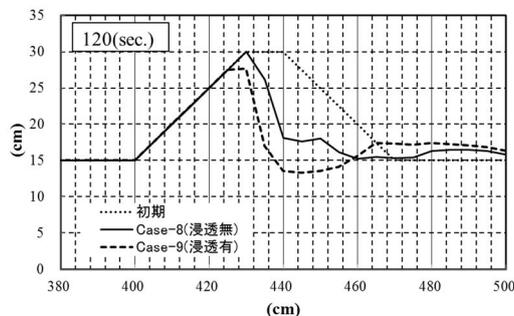
これらの実験の結果は、サクションによるせん断抵抗と、堤防表層において不飽和条件から飽和条件への変化のメカニズム（すなわち堤防表層からの浸透速度）が、堤防の侵食をモデル化する際の重要な要素であることを示している。



(a) Case-4とCase-5の比較（6号砂）



(b) Case-6とCase-7の比較（7号砂）



(c) Case-8とCase-9の比較（8号砂）

図－4.12 堤体飽和度が異なる条件での実験結果の比較

4.4 数値シミュレーション¹⁹⁾⁻²¹⁾

越流侵食実験により得られた実験データを用いて、越流侵食解析モデルの妥当性を検証する。

4.4.1 計算条件

計算格子の解像度については、水平面の堤体越流方向は $\Delta x=1.0\sim 2.0\text{cm}$ 、堤防法線方向(実験水路の横断方向)に $\Delta y=1.0\text{cm}$ と設定し、鉛直断面については、 $\Delta x=1.0\text{cm}$ 、 $\Delta z=0.5\text{cm}$ と設定し計算を実施した。

式(4.2)の水分特性曲線のパラメータや透水係数等の土壌パラメータは、表4.3のNakagawa et al¹²⁾により室内実験で得られた値を用いた。

4.4.2 計算結果

構築した非粘着性土質堤防の越流侵食解析モデルを用いて、越流侵食実験の再現を試みる。

図4.13に、堤体Type-A (Case-1,2,3)における堤体形状の解析結果と実験結果の比較を示す。実験での越流侵食の時間的進行状況は、解析モデルで良好な再現性を示した。Case-3 (8号砂)のケースでは、計算の侵食量が実験値より、やや大きくなっているものの、特に、Case-2 (7号砂)の解析結果の再現性は良好である。また、図4.14にCase-1,2,3の $t=20$ 秒、30秒における堤体への浸透(飽和度)の解析結果と実験時の写真を示す。実験写真は、堤体内の湿潤面が可視化できるようハイコントラスト修正をしている。これより、解析での飽和度の高い領域が実験での湿潤面と一致していることが分かる。堤体への浸透は、土の透水係数の影響を受けるため、6号砂と8号砂では飽和域や湿潤面が異なる結果となっている。

これらの結果で、計算での侵食量は、6号砂・7号砂に比べて8号砂で小さくなっている。これは、サクションによるせん断力の増加の影響であり、図4.10に示すように8号砂のサクションの最大値が他の粒径に比べて大きいことが影

響している。サクシオンによるせん断力は、越流水による堤体表層からの浸透で飽和状態に近づくと従って減少する。粒径の大きな6号砂では、他の砂に比べて透水係数が大きいために浸透速度が速く、せん断力の増加は小さい。このメカニズムにより、粒径が大きい土の堤体の方が、速く破壊に至っている要因にもなっている。このように、構築した解析モデルは、実験で見られたように粒径が小さくなるほど侵食速度が小さくなることを表現できている。

ここで、堤体の透水係数の影響を評価するための感度解析を実施した。Case-3で堤体の透水係数を $K1 : K_s = 7.8 \times 10^{-6} \text{m/s}$ (K2の1/2)、 $K2 : K_s = 1.56 \times 10^{-5} \text{m/s}$ (実験計測値)、 $K3 : K_s = 3.12 \times 10^{-5} \text{m/s}$ (K2の2倍) とした時の解析結果を図-4.15に示す。これより、透水係数の違いは侵食速度や侵食形状にかなり影響することが明らかである。これより、堤体の土の透水性の違いは、越流水による堤体表層付近が(せん断抵抗力が保持される)不飽和状態から飽和状態に変化する時間に関連し、堤体侵食・破堤に至る時間に影響するものとなる。

さらに、サクシオンの有無について感度解析を実施した。図-4.16にCase-2(7号砂)とCase-3(8号砂)について、サクシオンを考慮した場合および考慮しない場合の解析結果の比較を示す。土の透水性の高い7号砂(Case-2)では差は大きくないが、透水性の小さい8号砂(Case-3)では大きな差異がみられる。これに対して、サクシオンを考慮した場合(図-4.13)では8号砂でも比較的良好な再現性が見られることより、解析モデルにおいてサクシオンの影響を考慮することが妥当かつ重要であることが示された。

しかし、8号砂の堤体侵食において、実験では堤防天端は裏法面の侵食が進行してくるまで残っているが、解析では初期段階から侵食を開始しており完全に一致できていない点もある。これに対して、図-4.17において、8号砂($dm = 0.100 \text{mm}$)のように粒径の小さい砂粒の限界掃流力 τ_{*c} の従来の実験結果が十分でないことを踏まえ、式(4.20)の限界掃流力を変更した試算を実施した。これより、 $\tau_{*c} \times 1.7$ とすると図-4.18に示すように実験結果を再現できることより、粒径の小さな砂粒に対する限界掃流力の評価が今後の課題であることが分かる。

基礎地盤を含めた堤体(Type-B)での実験に対しても、解析モデルの妥当性を検証した。図-4.19にCase-6(7号砂, 越流前浸透なし)の解析結果と実験結果の比較を示す。これより、堤体だけでなく基礎地盤の侵食についても、本研

究で構築した解析モデルにより良好に再現可能であることが確認できた。

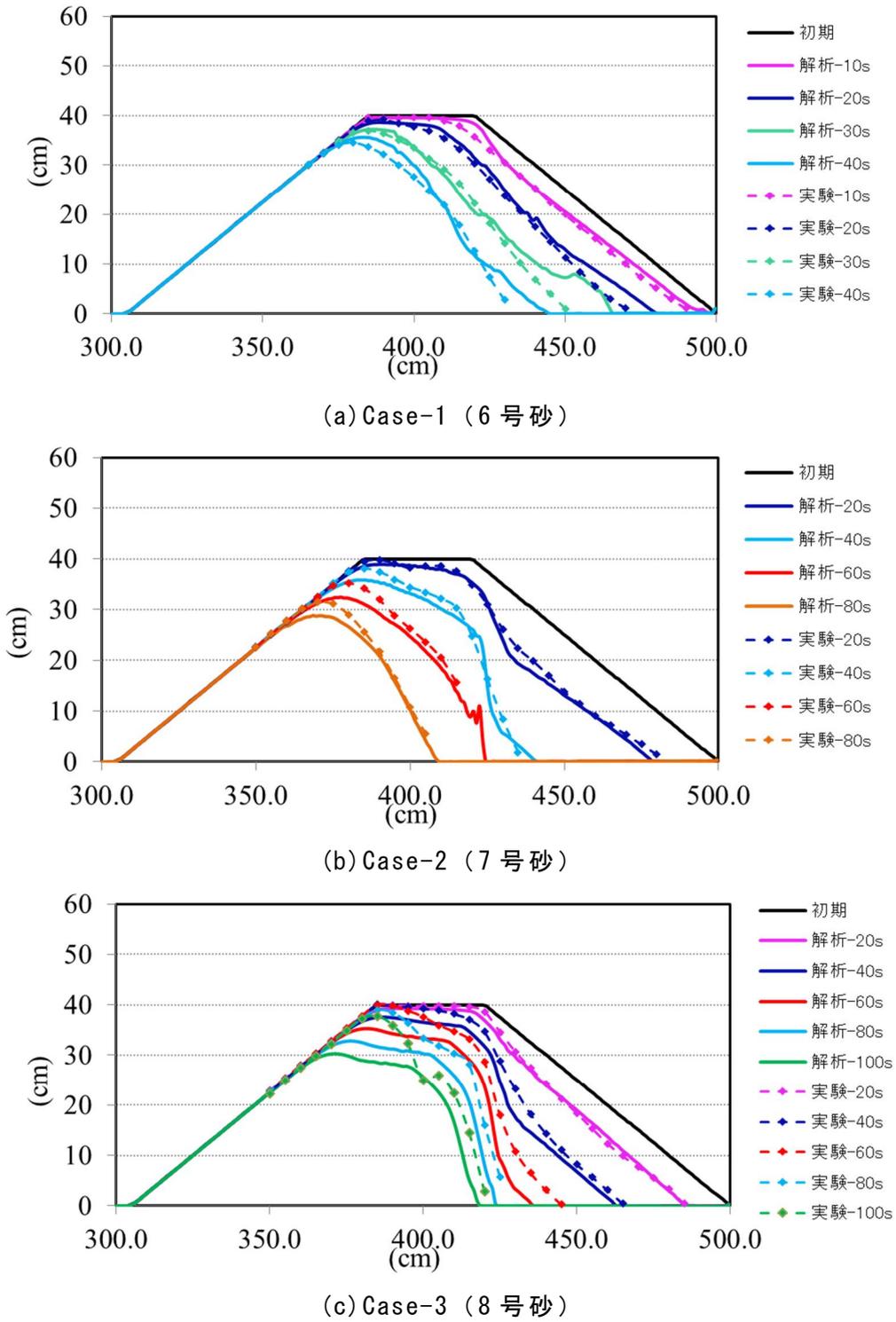
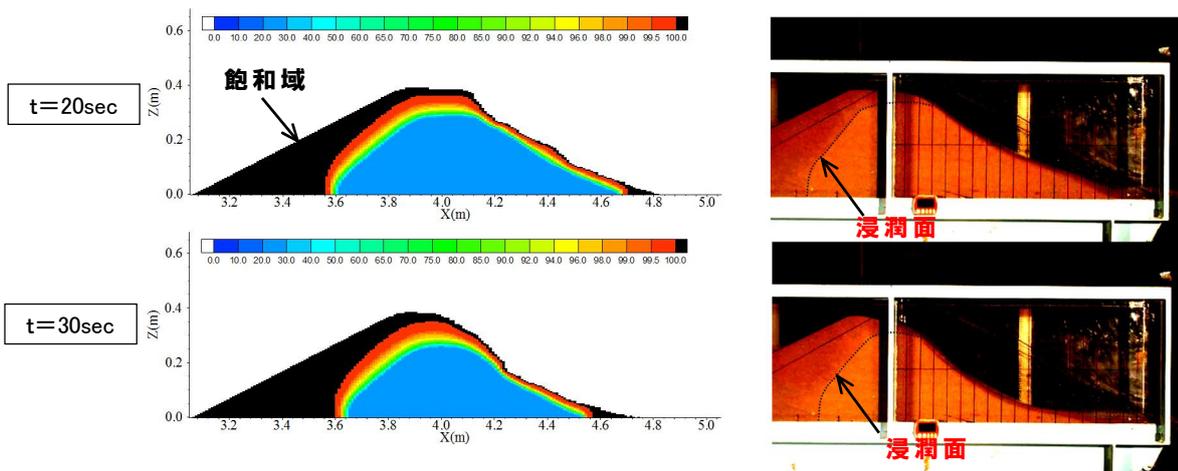
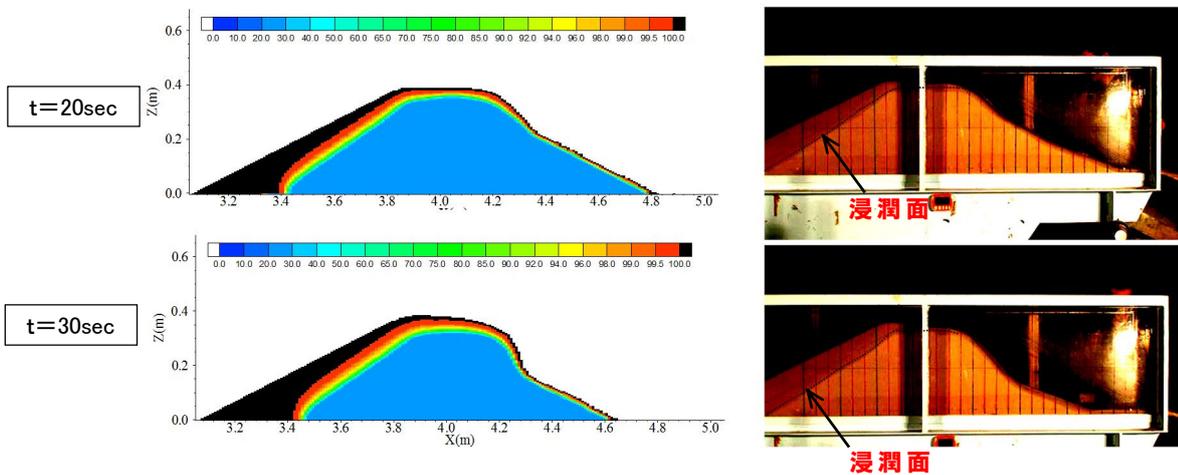


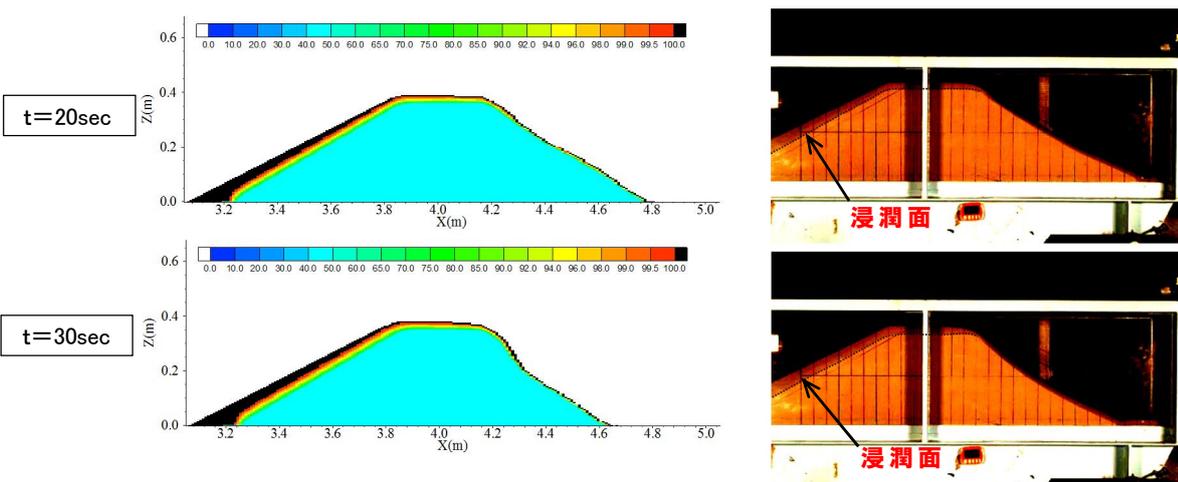
図-4.13 堤体形状の実験結果と解析結果の比較



(a) Case-1 (6号砂)



(b) Case-2 (7号砂)



(c) Case-3 (8号砂)

図-4.14 堤体浸透の解析結果と実験結果の比較

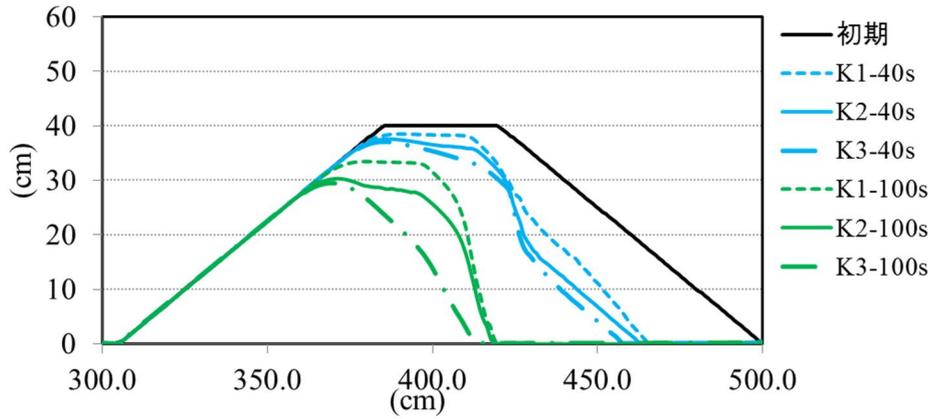
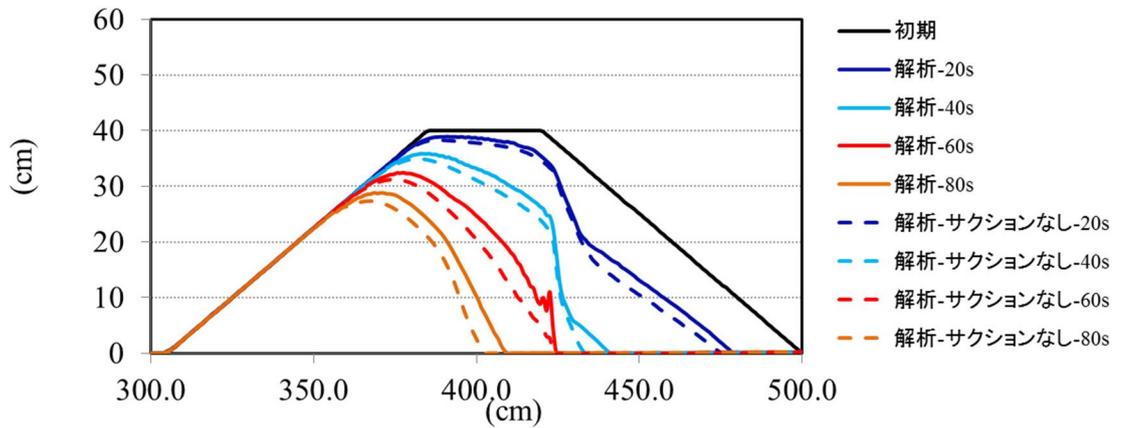
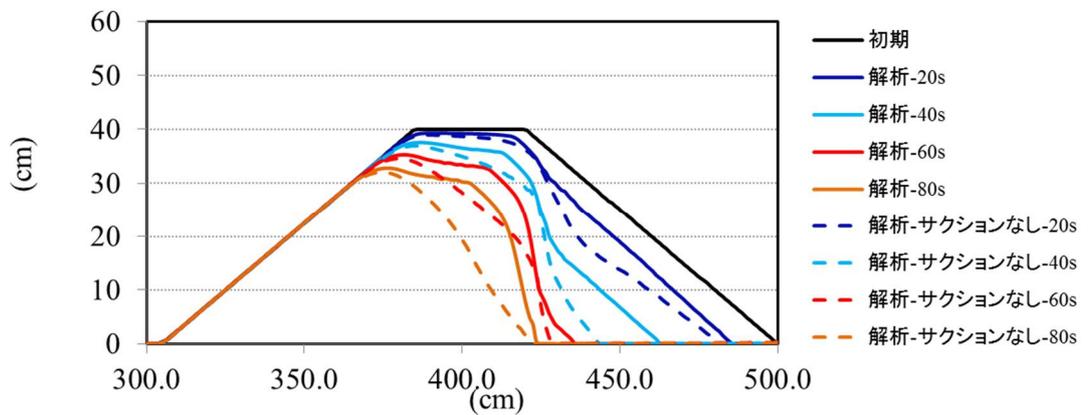


図-4.15 透水係数の感度解析結果 (Case-3 : 8号砂ベース)



(a) Case-2 (7号砂)



(b) Case-3 (8号砂)

図-4.16 サクション考慮／考慮なしの比較

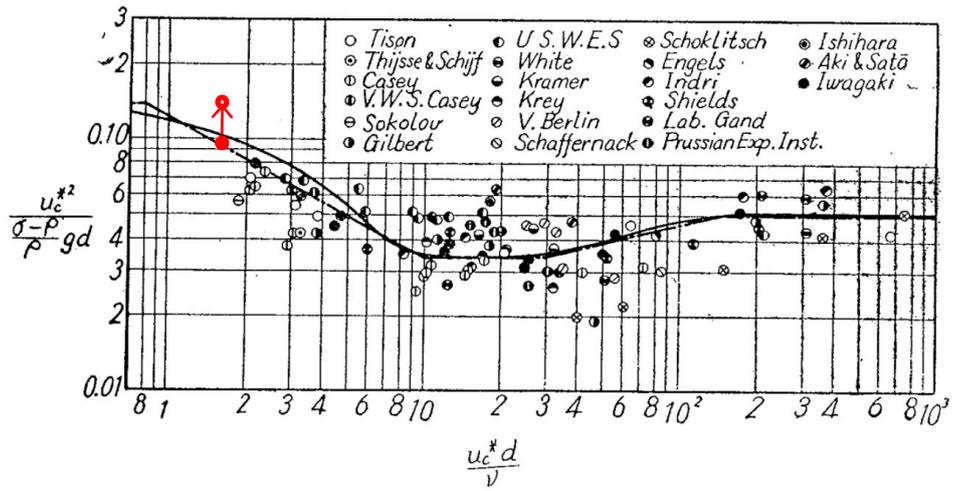


図-4.17 限界掃流力の実験結果と理論曲線²²⁾に加筆

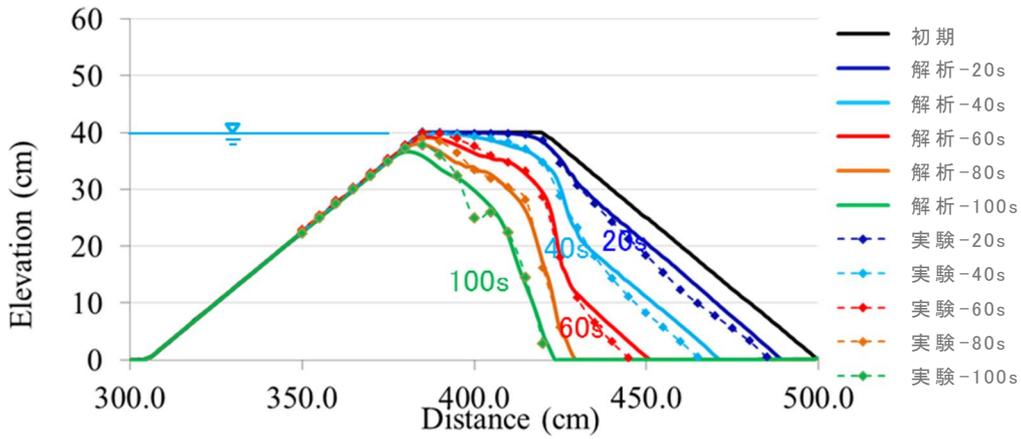


図-4.18 限界掃流力を変更した場合の試算結果 ($\tau_{*c} \times 1.7$)

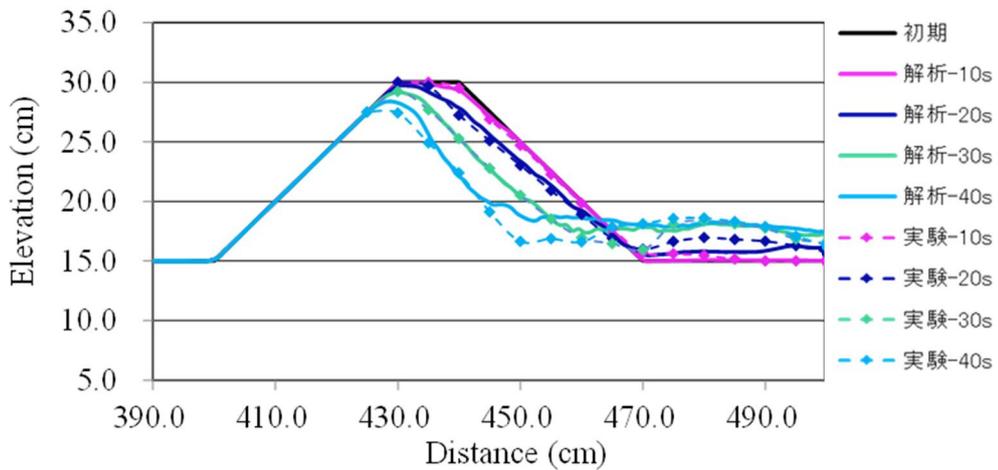


図-4.19 解析結果と実験結果の比較 (Type-B:Case-6)

4.5 結語

本章で得られた成果や知見を整理すると以下のようである。

- 越流侵食に大きな影響を与える不飽和堤体の越流侵食に着眼点をおき、侵食速度の設定に課題の多い粘着性土質ではなく、非粘着性土質を対象とした解析モデルの構築を行った。
- 構築した非粘着性土質堤防の解析モデルの検証のため、非粘着性土質を用いた越水模型実験を実施して、検証データの蓄積を図るとともに、粒径や堤体の飽和度の違いが越流侵食のプロセスに与える影響を確認した。
- 越水模型実験より、不飽和堤土の越流侵食において、粒径が小さいほどサクシヨンの効果が大きく侵食が大きく軽減されることが示された。また、越流前浸透の有無の実験結果の比較により、粒径の大きなケースについては、裏法面において越流水の堤体法面からの浸透速度が大きく、表層が短時間で飽和するため、堤体形状の実験結果に大きな差異は見られなかったが、浸透速度の小さな堤体土については、越流水の浸透に時間を要するため、越流前浸透の有無が侵食の進行に大きく影響することが示された。
- 堤体内の浸透流解析、越流水の流れ解析、その流れによる堤体の侵食および堆積の土砂輸送解析、堤体法面のすべり破壊解析の4つの解析モデルを結合した堤防越流侵食解析モデルを構築した。このモデルでは、不飽和土のサクシヨンによるせん断抵抗の増加を考慮した侵食速度が組み入れられており、また飽和土および不飽和土の両式を用いて不飽和堤土の侵食と浸透がほぼ同時に進行する越流侵食プロセスのモデル化を行っている。このモデルによる計算結果は、非粘着性土の越流侵食実験結果と概ね良好な一致が見られた。
- 本モデルでは、非粘着性土質堤防を対象とした。今後、本モデルを実河川の堤防越流侵食に適用するためには、非粘着性土の侵食速度について、実用的な検討を進めることが課題である。さらに、より実際の堤防に近い粘

着性土からなる堤防の侵食過程を説明し得る解析モデルの構築を図り，第3章で得た実験結果を用いてモデルの妥当性の検証を行うことが重要である。

<参考文献>

- 1) Tingsanchali, T. and Chinnarasri C. : Numerical modeling of dam failure due to overtopping, Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, Vol.46, No.1, pp.113-130, 2001.
- 2) 後藤仁志, 五十里洋行, 谷岡弘邦, 山本和久 : 粒子法による河川堤防裏法侵食の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第52巻, pp.979-984, 2008.
- 3) Wang, Z. and Bowles, D., S. : A numerical method for simulating one-dimensional headcut migration and overtopping breaching in cohesive and zoned embankments, Water Resources Research, Vol.43, W05411, pp.1-17, 2007.
- 4) 水谷英朗, 中川一, 與田敏昭, 川池健司, 張浩 : 砂質堤防越水時の浸透とすべり破壊を考慮した越流破壊解析法の検討, 京都大学防災研究所年報, 第55号B, pp.459-469, 2012.
- 5) Athapaththu,A.M.R.G., Tsuchida,T., Suga,K., Kano,S. : A lightweight dynamic cone penetrometer for evaluation of shear strength of natural masado slopes, Doboku Gakkai Ronbunshuu C, Vol.63, No.2, pp.403-416, 2007.
- 6) 秦吉弥, 一井康二, 土田孝, 加納誠二 : 降雨による盛土の耐震性低下に関する一考察, 土木学会論文集C, Vol.65, No.2, pp.401-411, 2009.
- 7) 服部敦 : 河川堤防 5.侵食破壊による評価・対策, 地盤工学会誌, Vol.62, No.1, Ser.No.672, pp45-52, 2014.
- 8) Van Genuchten, M.T. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of American Journal, Vol. 44, pp. 892-898, 1980.
- 9) S. V. Patankar: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington DC, 197, 1980.
- 10) 長田信寿, 細田尚, 村本嘉雄, 中藤達昭 : 3次元移動座標系・非平衡流砂

- モデルによる水制周辺の河床変動解析, 土木学会論文集, No.684, II -56, pp.21-34, 2001.
- 11) Tingsanchali, T. and Chinnarasri C. : Numerical modeling of dam failure due to overtopping, *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 46 (1), pp.113-130, 2001.
 - 12) H. Nakagawa, T. Utsumi, K. Kawaike, Y. Baba and H. Zhang : Erosion of unsaturated river embankment due to overtopping water, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol. 55, S K-1-K4, 2011.
 - 13) 中川博次, 辻本哲郎, 村上正吾 : 側岸における非平衡流砂過程, 第29回水理講演会論文集, pp.561-566, 1985.
 - 14) Vanapalli, S.K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. : Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No.3, pp.379-392, 1996.
 - 15) Egiazaroff, I. V. : Calculation of Nonuniform Sediment Concentrations, *Proceedings of ASCE*, Vol. 91, No. HY4, pp. 225-247, 1965.
 - 16) M. Sekine and H. Kikkawa : Mechanics of saltating grains. II , *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol.118, No.4, pp.536-558, 1992.
 - 17) T. Yamagami and Y. Ueta : Noncircular slip surface analysis of the stability of slopes: An application of dynamic programming to the Janbu method, *Journal of Japan Landslide Society*, Vol. 22, No.4, pp. 8-16, 1986.
 - 18) Baker, R. : Determination of the critical slip surface in slope stability computations, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 4, pp. 333-359, 1980.
 - 19) H. Nakagawa, H. Mizutani, T. Yoden, K. Kawaike and H. Zhang : Integrated Model for River Embankment Failure due to Overtopping, *IAHR 35th World Congress*, 2013.
 - 20) H. Mizutani, H. Nakagawa, T. Yoden, K. Kawaike and H. Zhang : Numerical modeling of river embankment failure due to overtopping flow considering infiltration effect, *Journal of Hydraulic Research*, 2013.
 - 21) H. Nakagawa, H. Mizutani, K. Kawaike, H. Zhang, T. Yoden and B.B.Shrestha : Numerical modeling of erosion of unsaturated river
-

embankment due to overtopping flow, Proc. Of the 12th Inter. Symp. On River Sedimentation, Kyoto, Sept., 2013, pp.1117-1125.

- 22) 岩垣雄一:限界掃流力の流体力学的研究,土木学会論文集,第41号,pp.1-21, 1956.

第5章 越流侵食実験による堤防強化対策の評価

5.1 はじめに

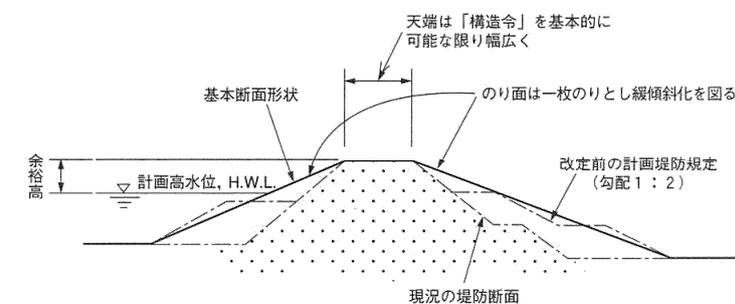
全国の河川堤防では、洪水時の浸透や侵食に対して堤防を強化するために、さまざまな対策が講じられている。過去には、被災履歴がある箇所など堤防弱部への腹付工や保護工の設置が経験的に行われていた（表－5.1）。また、河川理施設等構造令では、これまでの経験に基づき堤防の断面形状の最低基準を河川の規模（流量）等に応じて規定されている。このような形状規定方式による堤防の設計は、簡便で極めて効率的であり、長年の経験を踏まえたものであるが、一方で堤防の洪水に対する安全性を評価することが難しいこと、堤防の土質条件や洪水特性等を考慮した効果的な対策工法を検討できないという課題を有していた。このため、平成9年に改訂した河川砂防技術基準（案）では、堤防の断面形状については従来の考え方を踏襲しつつ、堤防の耐浸透・耐侵食機能に関しては機能毎に水理学的あるいは土質工学的な知見に基づく安全性の照査法を用いた堤防設計法を導入することとし、平成19年の「河川堤防設計指針」¹⁾で浸透および侵食に対する堤防強化対策の設計方法を規定している。

一方、越水については過去の破堤原因の多くを占めているといわれているものの、現在のところ連続的な大堤防で越水に対して効果的な対策を施すための技術的な知見が不足していることと、治水計画上では堤防からの越水を施設計画で考慮しないため、効果的な越水対策を具体的に検討することが難しい状況である。

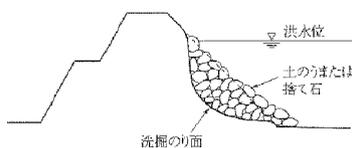
また、洪水時の堤防の浸透破壊や侵食破壊に関しては、これまでの調査や研究により、その破壊メカニズムが概ね分かっているのに対し、第3章で示した通り、現時点では越流侵食のメカニズムが十分に究明されていないことも、越

表-5.1 従来の堤防強化対策の例^{2), 3)}

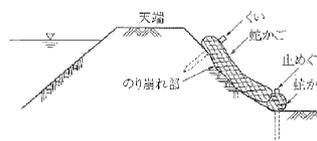
強化対象	対策の考え方	方法
浸透・侵食	堤防の幅を確保して侵食や浸透による破堤に備える	堤防天端幅をできるだけ広くする 表・裏のり面は一枚のりとし緩傾斜化を図る
侵食	土のうや捨石で表のり面を侵食から保護する	【捨土のう工法】 深掘れされた部分に土のう等を投入し斜面を保護
浸透	浸透水による裏のり面崩れを保護する	【立てかご工法】 裏のり下部に蛇かごを立て込んで斜面を保護



堤防断面幅の確保



捨土のう工法



立てかご工法

水対策工の検討が進んでいない一因であると思われる。しかしながら、土でできた堤防は、越流侵食が継続すればいつかは破堤に至ることは避けられないと考えられている。このため、堤防越水に対しては、堤防の機能が維持される時間はどの程度であるかという点を把握するとともに、どのような対策を講じればその機能を長時間維持できるかということが、治水施設としての堤防に耐越水機能を考慮する上での重要な視点となる。

このため、本研究では、第3章で実堤防と同じ施工方法や土質材料を用いた小型堤防模型による越流実験を行い、堤防の越水侵食現象のメカニズムの検討

を行った。さらに、第4章では、非粘着性土質堤防を対象とした越流侵食解析モデルの構築を行った。これらの成果より、越水侵食に大きく影響する要因の把握や、非粘着性土質堤防の解析モデルの適用性を示すことができたが、一方で、実堤防に多く存在する粘着性土質材料の侵食速度に対する課題が残っており、解析モデルの実用化に対しては、この課題解明が重要であることも示されている。

一方、毎年のように各地で発生する豪雨災害により堤防越水による災害も多発しており、解析的アプローチによる定量的な対策の検討と並行して、現時点で効果的な越水対策を検討していくことも必要である。

本研究では、越水に対する堤防強化対策について、実験的アプローチによる基礎的研究を行うことを目的として、小型堤防模型に堤防強化工法を設置した場合の越流侵食現象と浸透現象を実験的に研究した。なお、小型堤防模型は、第3章で用いた模型（堤高1 m）とし、実堤防と同じ土質材料（すなわち第3章で用いた粘着性土質材料）を用いた。

5.2 実験方法⁴⁾

5.2.1 実施方針

本実験では、第3章の実験で用いた土質条件や作成方法を管理した小型堤防模型に、堤防強化工法を設置して、越流侵食・浸透現象を評価した。第3章で示されたように、堤防の越流侵食については、裏法面のせん断力や、裏法尻付近の水撃による圧力、および堤体内湿潤状態が重要な要因となっている。このため、これらの要因に抵抗する工法を選定して検討を行う。

一般的な河川堤防で耐浸透や耐侵食機能を確保するために採用されている堤防強化工法は図-5.1のようである。本実験では、これらの堤防強化工法のうち、実験水路や堤体の制約および施工性を考慮して、以下の対策工を模擬して浸透・越流侵食実験を行った。

- 表のり面遮水工
- 裏のり尻ドレーン工

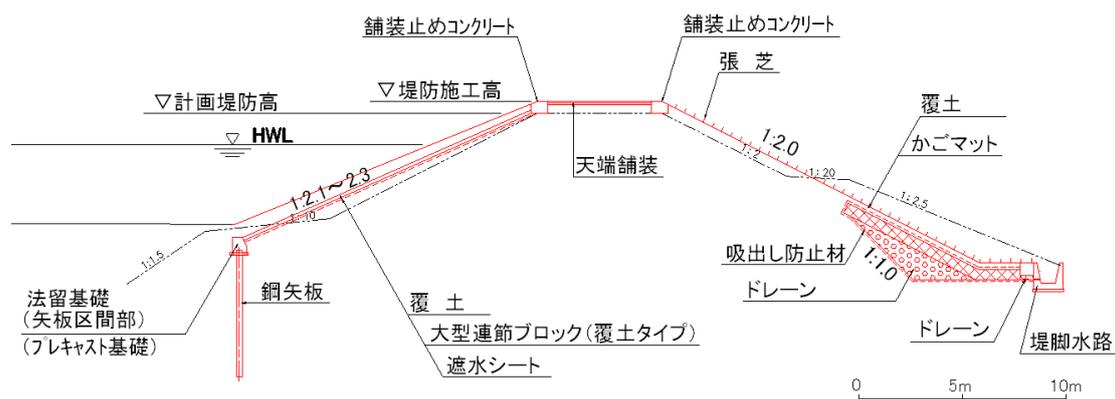


図-5.1 標準的な堤防強化工法

5.2.2 実験模型

小型堤水理実験装置および実験に用いた堤体材料は、第3章の実験模型と同じである。本実験では、堤体の一部に対策工の形状および機能を模擬する模型を設置した。

(1) 表のり面遮水工

表のり面遮水工の実験模型を図-5.2(a)に示す。表のり面遮水工は、堤体および基礎部を作成した後に、ポリエチレン製シートをのり面に敷設して製作した。シートの下端部は、浮き上がりを防止するために基礎部に根入れした。シートの側方部は、水路側壁に粘着テープで接着して、壁面からの漏水を防止した。また、表のり面遮水工に加えて堤防天端を舗装したケースも実施した。天端舗装は、モルタル（厚さ20mm）を打設して模擬し、天端上流端からの浮き上がりを防止するため、シートをモルタル内部に挟み込み接続固定した。

(2) 裏のり尻ドレーン工

裏のり尻ドレーン工の実験模型を図-5.2(b)に示す。裏のり尻ドレーン工は、「標準型」ドレーン形状と、カゴマットをのり面に沿って敷設する「裏のり面保護型」ドレーン形状の2タイプを製作した。裏のり面保護型ドレーン工のカゴマットの敷設範囲は、標準型ドレーン工と同じ奥行きとなるようにした。堤体および基礎部を作成後に、裏のり尻付近を掘削し、カゴマットおよび碎石を埋設した。カゴマットは袋状の透水性ネットに6号碎石（粒径5mm～13mm）を詰めて、複数のカゴマットを保護鉄筋で一体化して作成した。また、堤防材料の流出を防ぐため、ドレーン工との境界面には吸い出し防止膜を敷設した。

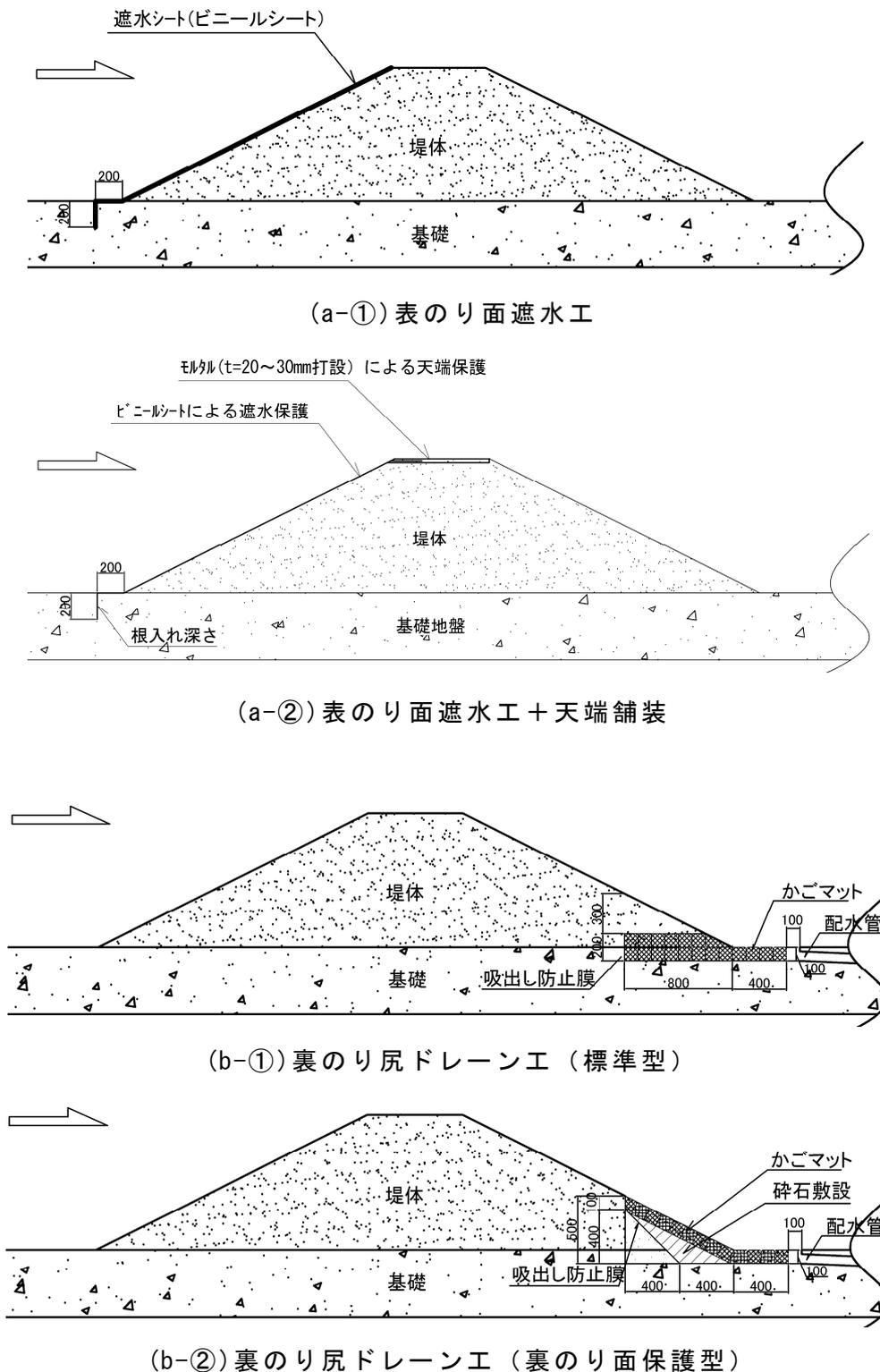
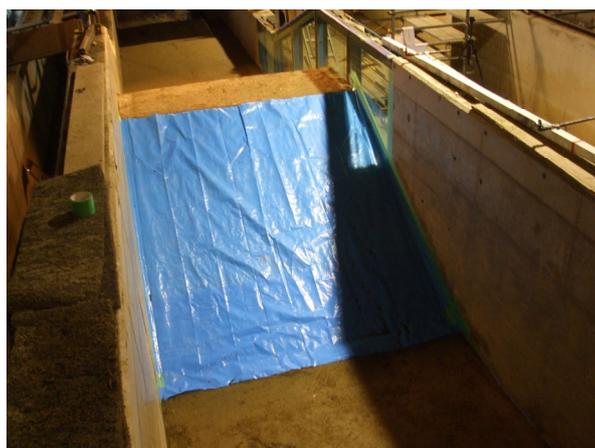


図-5.2 対策工の実験模型



表のり面遮水工



ドレーンエ（裏のり面保護型）

ドレーンエ（標準型）

図－5.3 対策工模型の設置状況

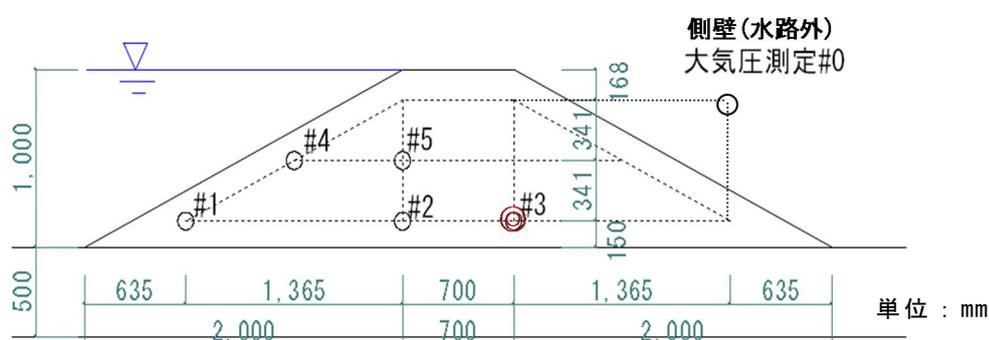
5.2.3 実験方法

越流侵食実験の手順は第3章の実験と同じとした。堤防強化対策実験での計測項目は、越流時の流況撮影、越流侵食量計測、堤体内湿潤状態の計測である。各計測方法も、第3章と同じである。

小型堤防による実験ケースを表－5.3に示す。第3章の越流侵食メカニズムを評価するための実験では、越流水深、堤体締固め度、堤体内湿潤状態などの条件を変更した実験を実施したが、本実験では対策工による影響を評価するため、越流水深30cm、堤体締固め度90%に統一した。

表-5.2 堤防強化対策実験 計測項目

計測項目	計測方法	計測時期
堤体内湿潤状況	間隙水圧計 (5箇所)	湛水時
流況	ビデオカメラ撮影 (3方向)	通水時
侵食変形	レーザー変位計	通水一時停止時



※◎#3は湛水中に間隙水圧を常時観測し、定常となったかを確認する。

図-5.4 間隙水圧計設置位置

表-5.3 堤防強化対策実験ケース

対策工	越流水深	堤体締固め度	湛水有無
なし	30cm	90%	あり
表のり面遮水工	30cm	90%	あり
表のり面遮水工+天端舗装	30cm	90%	あり
裏のり尻ドレーン工 (標準型)	30cm	90%	あり
裏のり尻ドレーン工 (裏のり面保護型)	30cm	90%	あり

5.3 実験結果⁴⁾

堤防強化対策工の設置を模擬して実施した，越流侵食実験結果について，対策工別に結果を評価する．

5.3.1 表のり面遮水工の浸透・越流侵食実験

表のり面遮水工を設置したケースと対策工なしの実験結果を比較する．

表のり面遮水工の設置により，越水前の湛水時の堤体内湿潤状況が第3章で行った実験結果と異なることが想定される．間隙水圧計測結果を図-5.5に，これより描いた湿潤面コンター図を図-5.6に示す．同じ湛水時間では，表のり面遮水工設置時の堤体内湿潤面が低くなっており，裏のり面に湿潤面が表れていない．また，対策工なしでは，下段の間隙水圧計#1，#2，#3が短時間で水頭の上昇を開始しているが，表のり面遮水工設置時には#1の上昇開始後にかなり遅れて#2の上昇が開始している．これより，表のり面遮水工は堤体内浸透の速度を遅くし，湿潤面を低くする効果はあるとみられる．ただし，シートおよび側面からの漏水はない条件としたが，堤体内の湿潤面がゼロとなるケースは見られなかった．これは，基礎地盤からの浸透により堤体内湿潤面が上昇しているためであると考えられる．

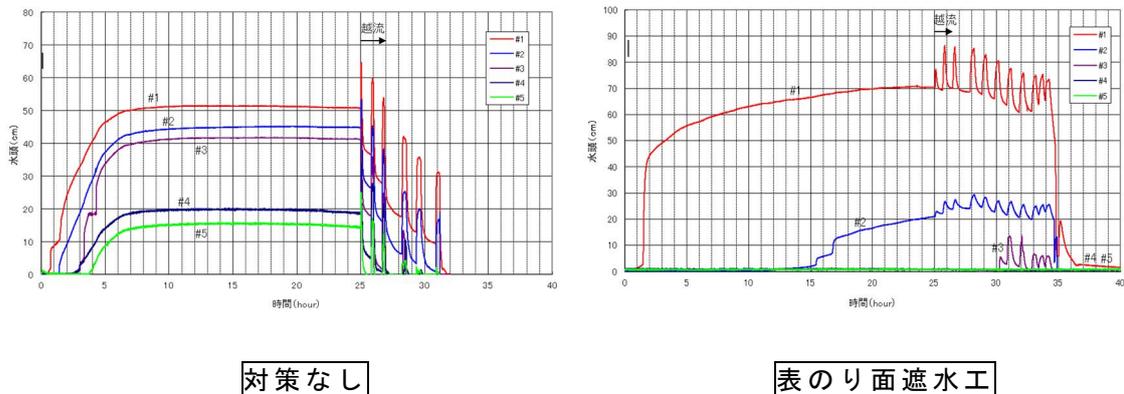


図-5.5 表のり面遮水工 間隙水圧計測結果

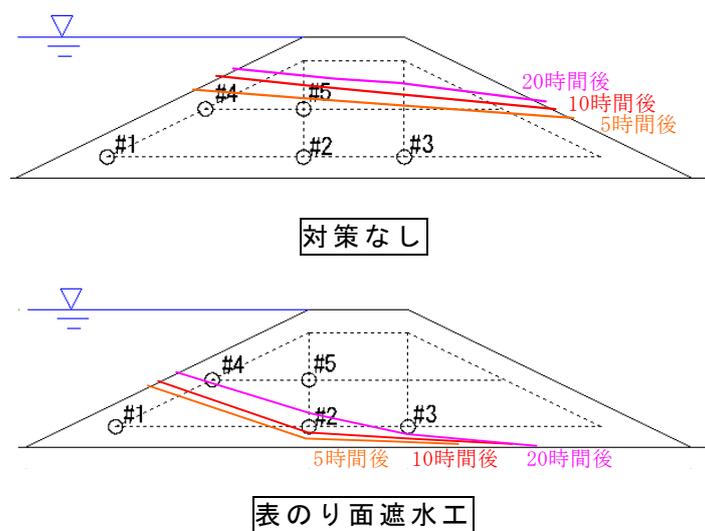
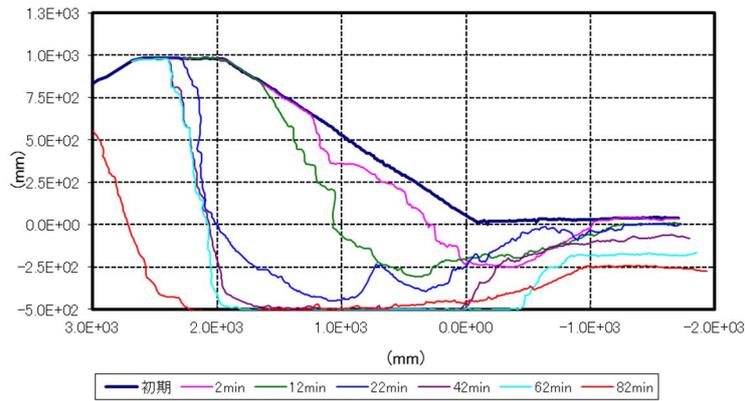
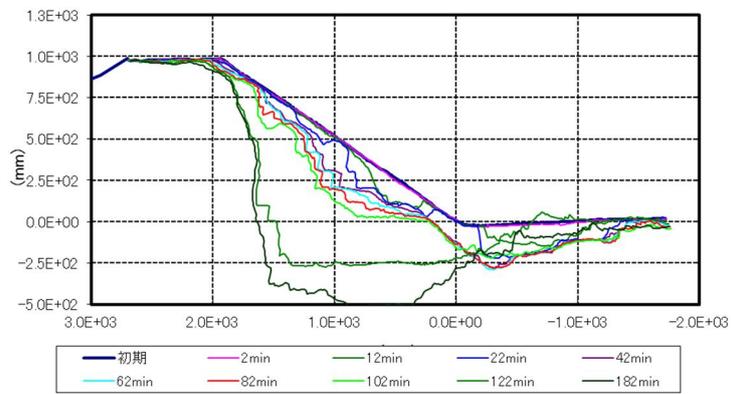


図-5.6 表のり面遮水工 堤体内湿潤面コンター図

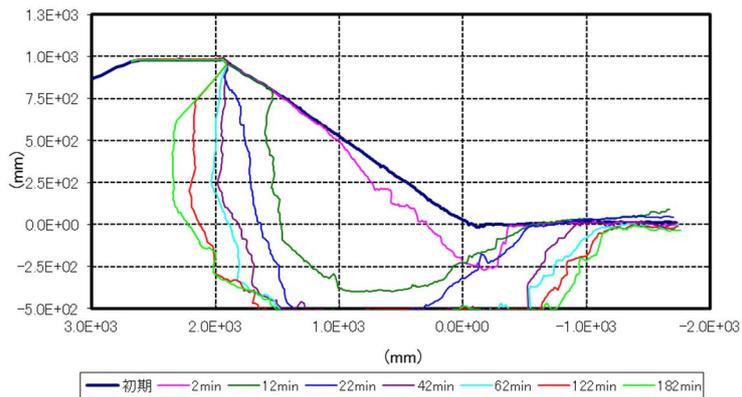
代表的なケースでの実験結果（堤体形状）と実験状況写真を図-5.7 および図-5.8 に示す。対策工を設置した実験は複数ケース実施したが、侵食量の結果にバラツキが見られたため、侵食開始場所と侵食進行過程に着目する。表のり面遮水工を設置したケースでは、のり面中央部から侵食が始まり、のり面の侵食範囲が拡大していく。裏のり尻付近の侵食量は「対策なし」のケースに比べて小さく、のり面の侵食が進行した後に裏のり尻付近の侵食が開始する。また、表のり面遮水工+堤防舗装としたケースでは、裏のり面から天端のり肩まで侵食が到達した後、天端が侵食されることなく、天端からの落下流で深掘れが進行してオーバーハング状となったが破堤には至らなかった。



対策なし



表のり面遮水工



表のり面遮水工+天端舗装

図-5.7 侵食形状（表のり面遮水工の有無の違いによる比較）

表のり面遮水工 (越流水深 30cm、締固め度 90%、越流前湛水あり)

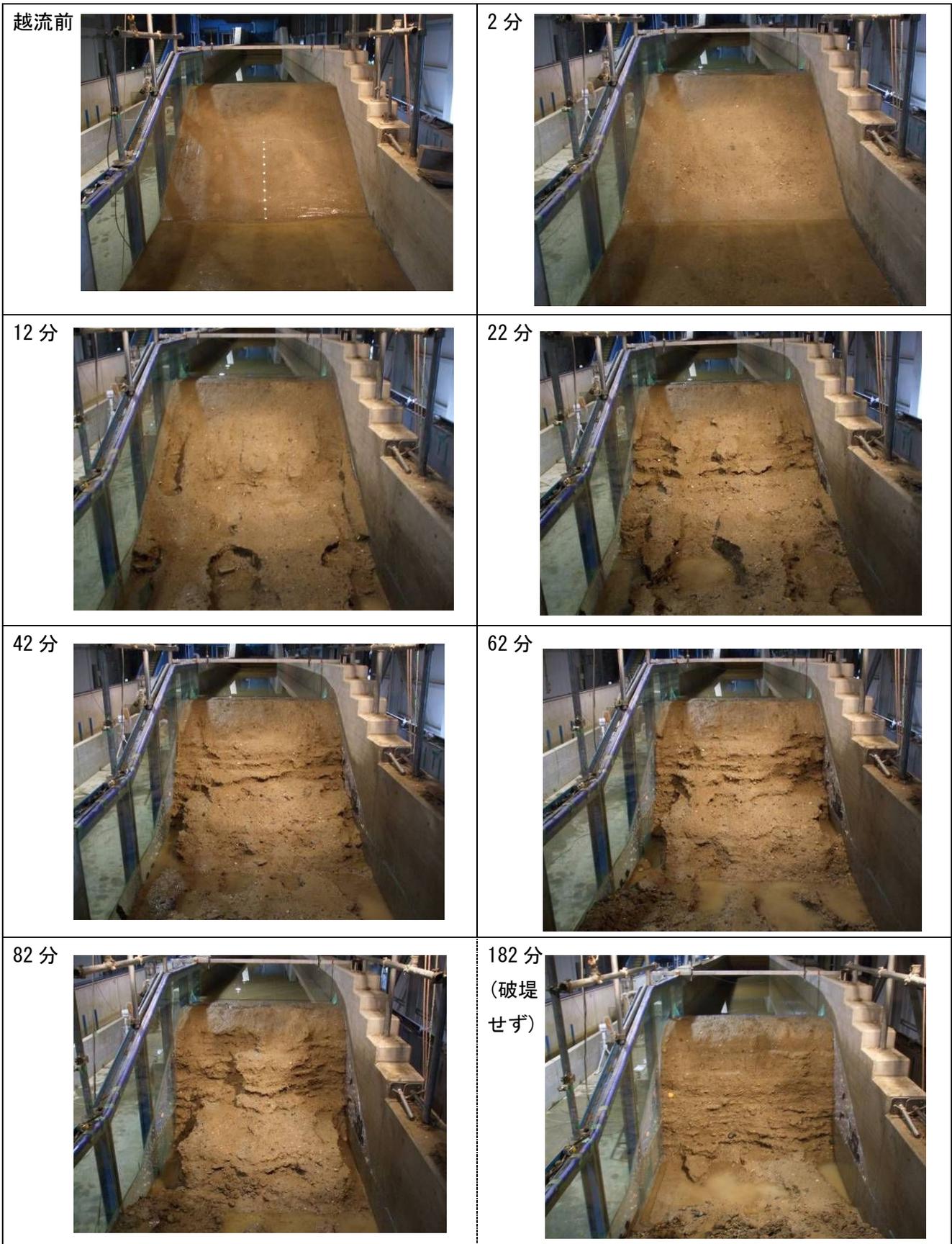


図-5.8(1) 実験状況写真 (表のり面遮水工)

表のり面遮水工+天端舗装 (越流水深 30cm、締固め度 90%、越流前湛水あり)

<p>越流前</p> 	<p>2分</p> 
<p>12分</p> 	<p>22分</p> 
<p>42分</p> 	<p>62分</p> 
<p>82分</p> 	<p>182分 (破堤 せず)</p> 

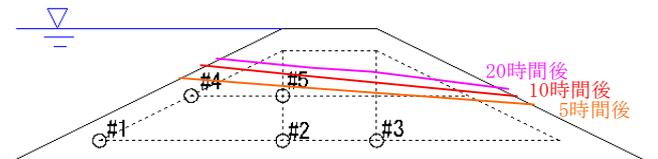
図-5.8(2) 実験状況写真 (表のり面遮水工+天端舗装)

5.3.2 裏のり尻ドレーン工の浸透・越流侵食実験

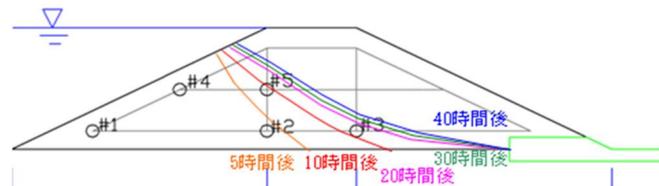
裏のり尻ドレーン工を設置したケースと対策工なしの実験結果を比較する。ドレーン工の形式については、標準型と裏のり面保護型の違いについても比較する。

間隙水圧の計測結果より描いた湿潤面コンター図を図-5.9に示す。これより、ドレーン工近傍で湿潤面が低下し、裏のり面には湿潤面が到達していない。また、堤体内湿潤面を低下させる効果について、ドレーン形状による差はないと見られる。

対策なし



裏のり尻ドレーン工（標準型）



裏のり尻ドレーン工（裏のり面保護型）

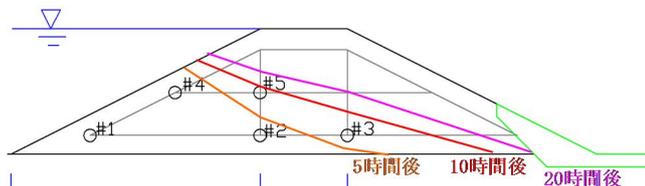
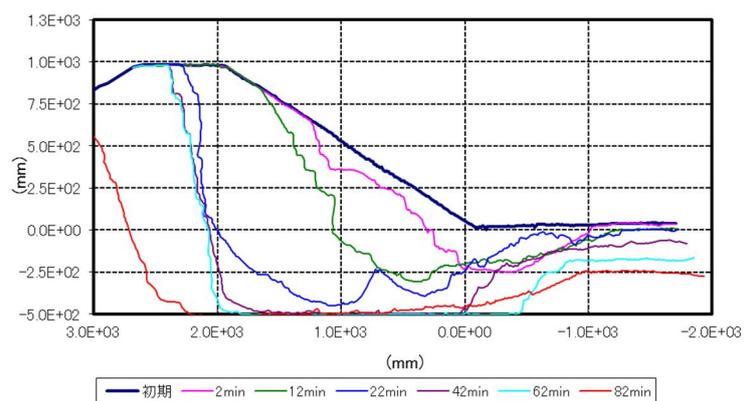


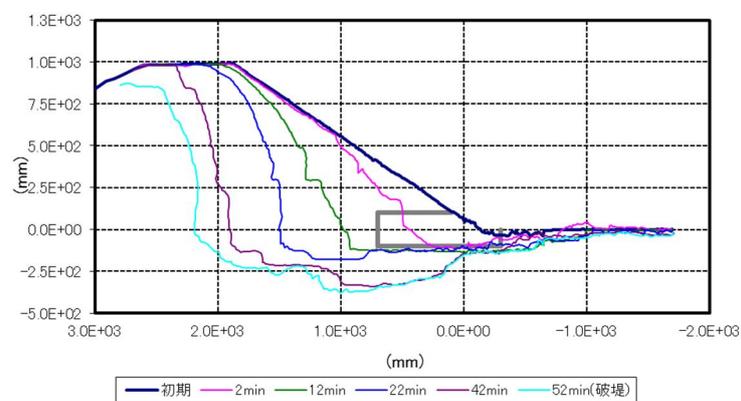
図-5.9 裏のり尻ドレーン工 堤体内湿潤面コンター図

代表的なケースでの実験結果（堤体形状）と実験状況写真を図-5.10および図-5.11に示す。ドレーン工を設置した実験では、いずれのケースでも越流実験の途中で設置したドレーン工が流体力により変形し、変形後はドレーン工を撤去して越流実験を行った。このため、侵食開始場所の違いに着目する。ドレーン工の設置により、裏のり尻付近の深掘れ侵食は抑制される。しかし、標準型ではドレーン上部ののり面から侵食が始まり、裏のり面保護型ではドレーン工と土の境界部付近から侵食が始まっている。これらより、本実験では、越流侵食に対してはドレーンと土の境界付近が弱部となっていると考えられる。

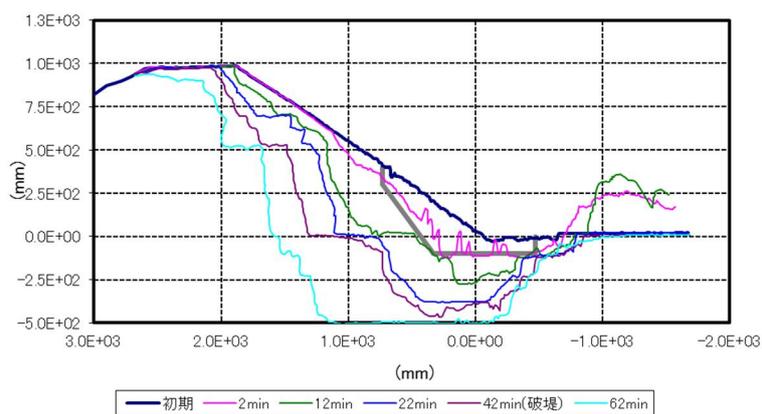
侵食進行過程は、裏のり面保護型では、ドレーン上端部から裏のり肩までが侵食され、「のり肩の侵食進行で天端幅が狭小化する」（Bパターン）という傾向が見られた。一方、ドレーン工が堤体の中に深く入っている標準型では、ドレーン上部の土が流出後は「堤体全体が大きく侵食される」（Aパターン）という傾向が見られた。



対策なし



裏のり尻ドレーン工（標準型）



裏のり尻ドレーン工（裏のり面保護型）

図-5.10 侵食形状（裏のり尻ドレーン工の有無の違いによる比較）

裏のり尻ドレーンエ 標準型 (越流水深 30cm、締固め度 90%、越流前湛水あり)

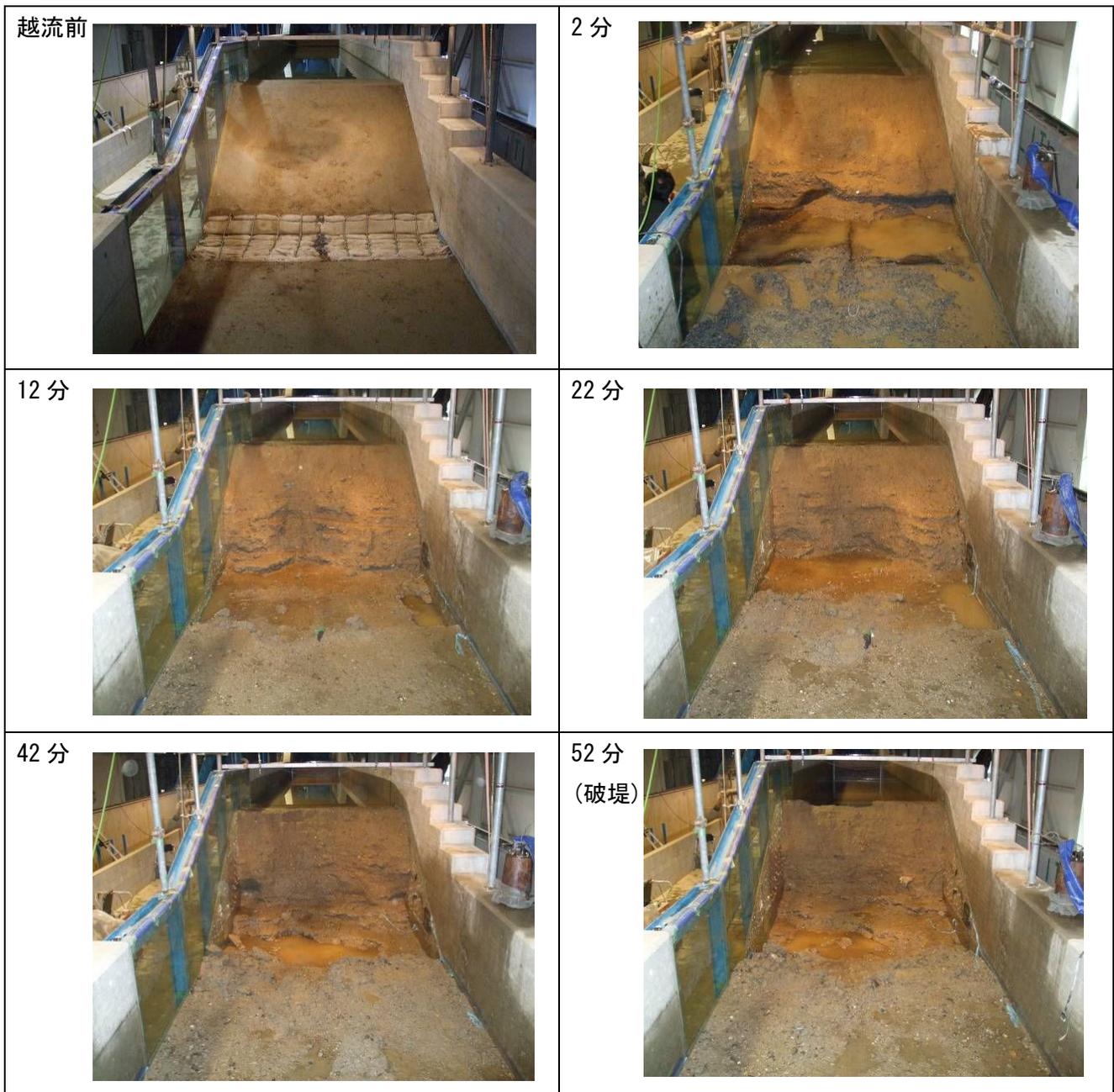


図-5.11(1) 実験状況写真 (裏のり尻ドレーンエ 標準型)

裏のり尻ドレーンエ 裏のり面保護型 (越流水深 30cm、締固め度 90%、越流前湛水あり)

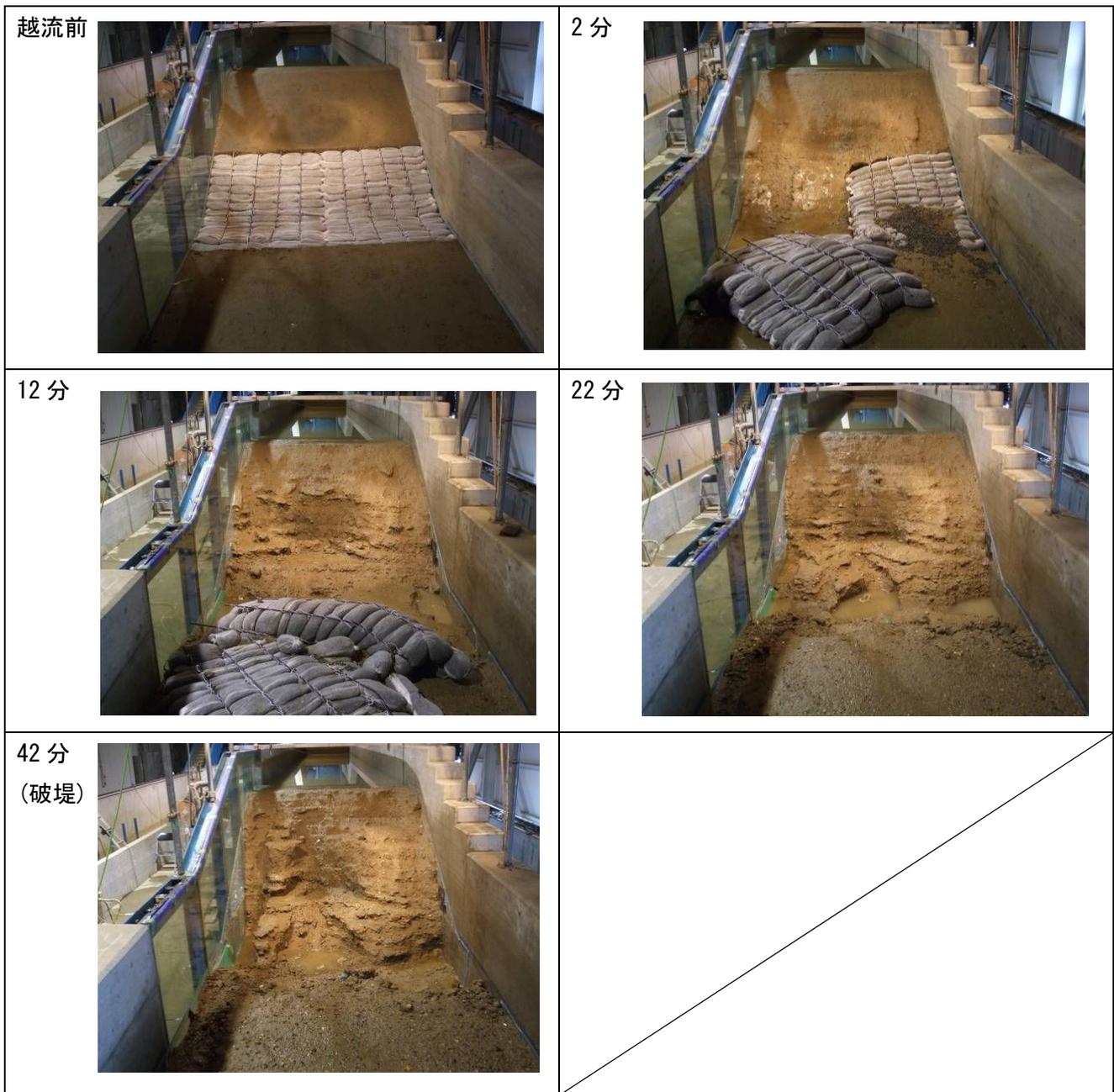


図-5.11(2) 実験状況写真(裏のり尻ドレーンエ 裏のり面保護型)

5.4 対策工設置時の浸透・侵食のメカニズム

(1) 表のり面遮水工設置時の浸透現象

実験では、シートと側壁との隙間からの浸透は阻止しているため、基礎部からの浸透により堤体部の湿潤面が上昇していると想定される。実験では基礎部の間隙水圧計測を行っていないため、堤体および基礎部を対象に浸透流解析を行って、基礎部から堤体部への浸透現象の検証を行った。解析モデルの土の透水係数は、岡ら⁵⁾が実施した浸透実験（対策工なし）の再現計算条件を参考に、対策工実験での湿潤面と一致するように設定した。表のり面遮水工は不透水材料とした。

解析の結果、図-5.12に示すように、基礎部下流側の湿潤面の上昇が遅くなり、このために表のり尻側（湛水側）に比べて、堤体中央付の湿潤面がかなり遅れて上昇することが示された。

また、同じモデルを用いて、表のり面遮水工の根入れがない場合の湿潤面を

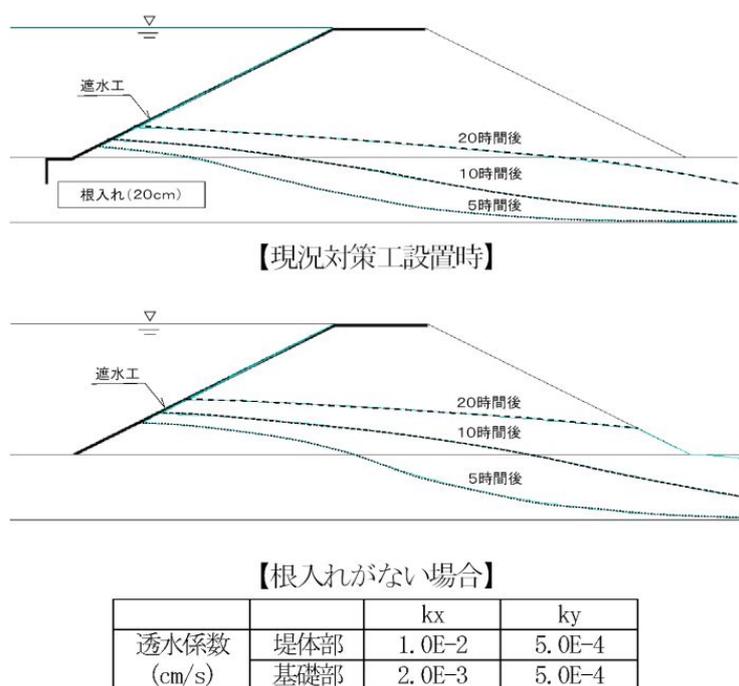


図-5.12 表のり遮水工設置時の浸透流解析結果

算定した。その結果、基礎部下流側の湿潤面が高くなり、堤体内湿潤面はかなり上昇した。

これらの検証解析結果より、表のり面遮水工は、堤体および基礎部の土質条件を考慮して設置された場合には遮水効果を十分に発揮して、堤体内の湿潤面を低くすることが示された。

(2) 表のり面遮水工設置時の越流侵食

対策工としての遮水シートについては、表のりからの浸透の抑制により堤体内湿潤面が低くなり、小型堤実験では越流侵食に対しての効果も見られた。ただし、表のり面遮水工を設置しても、基礎地盤からの浸透により堤体内水位が上昇する場合がある。また、堤防天端を強固にすることは、越水時の侵食進行の抑制に対して一定の効果が見られた。遮水シートの設置により裏のり面の湿潤面が低くなったケースでは、湛水なしの侵食パターンに類似した越流侵食状況となった。第3章で示した実験結果より、堤体内が湿潤状態である方が、同じ通水時間では侵食量が多くなることより、表のり面遮水工の設置により堤体内の不飽和域が増加することが、越流侵食に対して一定の効果をもつものと考えられる。

また、対策工として、堤防天端を強固にした実験ケースでは、裏のり面から天端のり肩まで侵食が到達した後、天端が侵食されることがなく、崖状になって侵食進行が停止した。これより、対策工実験からは、堤防天端を強固にした場合は、越流に対して侵食が進行することを抑制する効果があると考えられる。

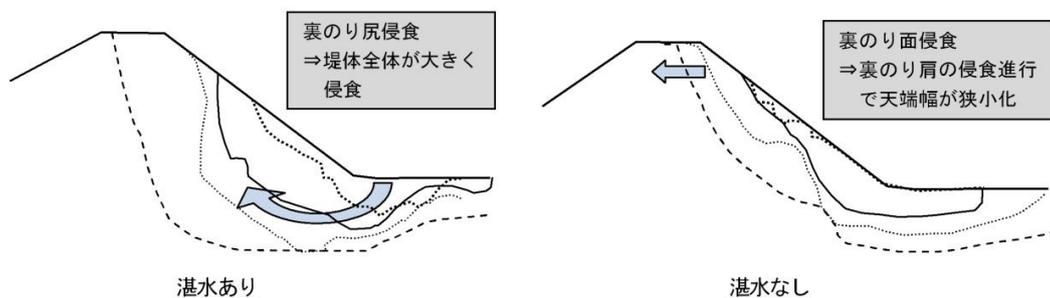


図-5.13 湛水有無の侵食進行過程（侵食イメージ）

(3) 裏のり尻ドレーン工設置時の越流侵食

対策工として裏のり尻にドレーン工を設置した場合、堤体内湿潤面は低くなり、越流時の侵食開始場所と侵食進行過程は、ドレーン工により裏のり尻付近の侵食は多少抑制されるが、ドレーン工と土の境界付近が弱部となり、侵食が進行することが示された。小型堤防にドレーン工の形状を模擬した対策模型を設置した結果、裏のり面保護型ではドレーン工とのり面の境界から侵食が始まり、標準型ではドレーン上部の盛土が先ず流出した。対策工実験での現象は、実現象とは異なる点が多いと考えられるが、境界面やドレーン上部の盛土は、侵食開始場所として弱部になることが想定される。

一方、今回の実験では流水によりドレーン工が変形した。このように小型堤防による対策工実験で見られた現象の中には、スケール効果により実現象とは異なる点も多いと考えられる。

5.5 結語

本章で得られた成果および知見を整理すると以下のようである。

(1) 表のり面遮水工の越流対策工としての効果

- ・表のり面遮水工を設置した場合，表のりからの浸透の抑制により堤体内湿潤面が低くなり，湛水なしの侵食パターンに類似した越流侵食状況となっており，越流侵食に対して一定の効果が見られた。
- ・表のり面遮水工による対策では，表のり面からの浸透は抑制されるものの，基礎地盤からの浸透による堤体内水位の上昇が見られた。なお，対策工として遮水シートを設置した実験ケースでは，堤体内湿潤面の高さについてバラツキが見られた。これより，設置箇所の基礎地盤の土質特性等により遮水効果にバラツキが見られることが予想される。
- ・対策工として，堤防天端を強固にした実験ケースでは，裏のり面から天端のり肩まで侵食が到達した後，天端が侵食されることがなく，崖状になって侵食進行が停止した。これより，対策工実験からは，堤防天端を強固にした場合は，越流に対して侵食が進行することを抑制する効果があると考えられる。

(2) 裏のり尻ドレーン工の越流対策工としての効果

- ・裏のり尻ドレーン工を設置した場合，堤体内湿潤面は低くなることで，越流侵食に対する一定の効果は見られた。
- ・小型堤防にドレーン工の形状を模擬した対策模型を設置した結果，裏のり面保護型ドレーンではドレーン工とのり面の境界から侵食が始まり，標準型ではドレーン上部の盛土が先ず流出した。対策工実験での現象は，実現象とは異なる点が多いと考えられるが，境界面やドレーン上部の盛土は，侵食開始場所として弱部になることが想定される。

<参考文献>

- 1) 国土交通省河川局治水課：河川堤防設計指針，平成19年3月
- 2) 吉川勝秀：河川堤防学，技法堂出版，2007.
- 3) 一般社団法人リバーテクノ研究会：河川堤防新技術活用ガイドブック，2011.
- 4) 與田敏昭，中川一，関口秀雄，岡二三生，後藤仁志，文字聖：越水に対する堤防強化のための小型堤防による越流侵食実験，河川技術論文集，第17巻，pp.269-274，2011.
- 5) F. Oka, S. Kimoto, N. Takada & Y. Higo: A multiphase elasto-viscoplastic analysis of an unsaturated river embankment associated with seepage flow, Proc. Int. Symp. on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, Oka, Murakami & Kimoto (eds), Taylor & Francis group, London, pp.128-132,2009.

第6章 結論

6.1 まとめ

本論文は、耐越水堤防の開発に向けて、これまでに行われてきた堤防強化についての研究成果を踏まえ、小型堤防モデルによる堤防越水実験を実施し、非粘着性土質堤防を対象とした越流侵食モデルの構築を行うことにより、堤防の越水に対して、より効果を有する強化方策に向けての新たな知見の収集・蓄積を図ったものである。

以下に、各章での検討内容より得られた知見を要約し、本研究の結論とする。

第1章では、本研究の背景と研究目的を述べ、本論文の内容と構成について記述した。

第2章では、河川堤防の越流侵食に関する従来の研究について、実験的研究、解析的研究、越水堤防の導入に関する研究の3つに区分してその概要を整理した。これにより、越水堤防の開発は喫緊の課題ではあるものの、越流侵食のメカニズムが十分に究明されていないため、現時点では耐越水機能を有する堤防を検討することが難しい状況であると思われる。また、実際の堤防は地点ごとに土質の構成や特性が異なるものであるため、越水堤防を検討するためには、越流侵食現象を定量的に取り扱うことが必要であることが明らかとなった。

第3章では、越流侵食・浸透のメカニズムを検討するためには、堤体の土質条件や外力条件などについてさまざまな条件での模型実験を実施する必要があると考え、小型模型堤防を用いて堤防の越流に関する基礎的な実験を行い、越流侵食・浸透メカニズムの評価を行った。越流実験は、越流侵食のメカニズム評価のためには、土質や施工方法などの実験条件を出来るだけ均一化したうえで、

さまざまな条件で模型実験を実施する必要があること、また、実堤防と同じような施工方法や土質材料を用いた実験とする必要があることより、小型堤防模型（堤防高 1.0m）による実験を実施した。本章で得られた知見を要約すると以下のようである。

- ・ 外力条件である越流水深を 10cm, 20cm, 30cm と変化させた越流侵食実験の結果から、越流水深が大きいほど侵食進行が速いが、越流時に侵食が開始する場所や侵食の進行形態については、越流水深と関係なくほぼ同じであった。
- ・ 堤体土質の締固め度を 90%, 85% と変えた越流侵食実験の結果から、侵食開始場所はほぼ同じであるが、締固め度が緩いほど侵食進行は速いことが分かった。また、締固め度の違いは堤体内の湿潤状況にも差が見られ、同じ土質であっても、締固め度が緩いほど浸透時の堤体内湿潤面は高く、定常に至る時間や浸透速度が速いことが明らかとなった。
- ・ 越流実験前に一定時間湛水し、堤体内を湿潤状態にして実験を行った場合と、湛水を行わずに実験を行ったケースとを比較した結果、堤体内湿潤条件は侵食開始場所、侵食進行パターンおよび侵食進行速さに大きく影響することが明らかとなった。これより、堤体土質の飽和・不飽和状態と侵食の関係が重要であることが確認された。
- ・ 堤体土質条件や施工条件を厳密に管理して作成した小型堤防を用いて実験した結果、初期侵食段階での侵食量は、複数の実験でほぼ同一の結果となった。しかし、侵食時間や侵食進行過程の実験結果にはバラツキが見られた。

第4章では、不飽和堤体の越流侵食に着眼点を置き、非粘着性土質堤防の越水模型実験を実施して計算モデル構築のための検証データを実験により蓄積し、浸透および越流水の影響を考慮した非粘着性砂質堤防の越流侵食モデルを構築して、その数値解析結果と実験結果を比較検討してモデルの妥当性を検証した。本章で得られた知見は以下のようであった。

- ・ 越水模型実験より、不飽和堤土の越流侵食において、粒径が小さいほどサクシヨンの効果が大きく侵食が大きく軽減されることが示された。また、越流前浸透の有無の実験結果比較により、粒径の大きなケースについては、裏法面において越流水の堤体法面からの浸透速度が大きく、表層が短時間で飽和

化するため、堤体形状の実験結果に大きな差異は見られなかったが、浸透速度の小さな堤体土については、越流水の浸透に時間を要するため、越流前浸透の有無が侵食の進行に大きく影響することが示された。

- ・ 堤体内の浸透流解析，越流水の流れ解析，堤体の侵食および堆積の土砂輸送解析，堤体法面のすべり破壊解析の4つの解析モデルを結合し，堤防越流侵食解析モデルの構築を行った．このモデルでは，不飽和土のサクシオンによるせん断抵抗の増加を考慮した侵食速度が組み入れられており，また飽和土および不飽和土の両式を用いて不飽和堤土の侵食と浸透がほぼ同時に進行する越流侵食プロセスのモデル化を行っている．このモデルによる計算結果は，非粘着性土の越流実験結果と概ね良好な一致が見られた．

第5章では，越水に対する堤防強化対策について，実験的アプローチによる基礎的研究を行うことを目的として，小型模型堤防に堤防強化対策工を設置した場合の越流侵食現象と浸透現象を実験的に研究した．本章で得られた知見は以下のものであった．

- ・ 対策工としての遮水シートについては，表のりからの浸透の抑制により堤体内湿潤面が低くなり，小型堤実験では越流侵食に対しての効果も見られた．また，堤防天端を強固にすることは，越水時の侵食進行の抑制に対して一定の効果が見られた．また，遮水シートの設置により裏のり面の湿潤面が低くなったケースでは，湛水なしの侵食パターンに類似した越流侵食状況となった．
- ・ 対策工として裏のり尻にドレーン工を設置した場合，堤体内湿潤面は低くなる．侵食面については，裏のり面保護型ドレーン工ではドレーン工とのり面の境界から侵食が始まり，標準型ドレーン工ではドレーン上部の盛土が先ず流出した．対策工実験での現象は，実現象とは異なる点が多いと考えられるが，境界面やドレーン上部の盛土は，侵食開始場所として弱部になることが想定される．

6.2 今後の課題

本研究では、耐越水堤防の開発に向けた実験的研究や数値解析モデル構築を実施してきたが、今後解決すべき課題についてまとめる。

【実験に関する課題】

実河川での破堤メカニズムを検討するため、小型模型堤防は、実堤防で使われる粒径が不均質で粘着性を有する土を用いた。実験では、土質試験を行い土質条件も管理したが、浸透や侵食形状にバラツキが見られ、わずかな土質の違いや締固めの不均一性がバラツキを生じる原因ではないかと想定される。しかし、粘着性土の侵食速度は、本研究および既往研究でもよく分かっておらず、越流侵食現象をモデル化するにあたって大きな課題であり、今後の研究が進むことが望まれる。

また、小型堤防による実験結果で見られた実験のバラツキや局所性について、実サイズ堤防とのスケール効果について不明な点があるため、実験結果の実堤防への適用範囲について今後さらに検討を行う必要がある。

【解析モデル構築に関する課題】

解析モデルを実用化レベルにするためには、全国の河川堤防材料の大半を占める粘着性土質の越流破壊解析モデルを構築することが必要である。ただし、粘着性土質の侵食速度については研究事例も少なく、現時点では不明な点が多いことより基礎的な実験等により粒度分布、粘着力等と侵食速度の関係を把握することが今後の重要な課題である。

本研究で構築した解析モデルについては、実験結果を概ね再現できるものとなっているが、8号砂のような粒径の小さい砂粒の限界掃流力の設定の妥当性が不明であることが明らかとなっており、今後の課題である。

また、本研究では、小型堤防模型による実験結果を検証データとしてモデルの検証を行ったが、実サイズの堤防を計算可能な大規模計算手法の開発も必要

である。あわせて、構築した解析モデルを用いて、実堤防サイズの越流、浸透現象の予測・評価結果より、小型堤防実験結果のスケール効果を検討する必要がある。

【堤防強化対策の評価に関する課題】

小型堤実験結果より、堤体内湿潤面を低くすることが越水時の侵食を少なくする可能性があることが示唆された。このため、堤体内に水を入れない、また堤体内の水を速やかに排水する浸透対策工も、越流侵食に対して一定の効果を有すると想定される。一方、ドレーン工などの存在が、越流侵食の弱部となることも予測されている。これらの現象や効果について、実サイズ堤防と模型実験のスケールによる相違を把握するとともに、現場に適用できる解析モデルによる検証方法の確立が課題である。

学位論文に関連のある論文リスト

- 1) 奥田敏昭, 中川一, 関口秀雄, 岡二三生, 後藤仁志, 小俣篤: 越流侵食・浸透のメカニズムを把握するための小型堤防による越流侵食実験, 河川技術論文集, 第16巻, pp.347-352, 2010.
- 2) 奥田敏昭, 中川一, 関口秀雄, 岡二三生, 後藤仁志, 文字聖: 越水に対する堤防強化のための小型堤防による越流侵食実験, 河川技術論文集, 第17巻, pp.269-274, 2011.
- 3) 奥田敏昭, 中川一, 水谷英朗, 川池健司, 張浩: 堤体飽和度に着目した堤防の越流侵食のメカニズムに関する研究, 自然災害科学, Vol.33, No.1, pp.29-41, 2014.
- 4) 水谷英朗, 中川一, 奥田敏昭, 川池健司, 張浩: 砂質堤防越水時の浸透とすべり破壊を考慮した越流破壊解析法の検討: 京都大学防災研究所年報, 第55号B, pp.459-469, 2012.
- 5) Hideaki Mizutani, Hajime Nakagawa, Toshiaki Yoden, Kenji Kawaike, Hao Zhang: Numerical modeling of river embankment failure due to overtopping flow considering infiltration effect, Journal of Hydraulic Research, Vol.51, No.6, pp.681-695, 2013.
- 6) Hajime Nakagawa, Hideaki Mizutani, Kenji Kawaike, Hao Zhang, Toshiaki Yoden, B.B.Shrestha: Numerical modeling of erosion of unsaturated river embankment due to overtopping flow, Proc. of the 12th Inter. Symp. on River Sedimentation, Kyoto, pp.1117-1125, 2013.
- 7) Hajime Nakagawa, Hideaki Mizutani, Toshiaki Yoden, Kenji Kawaike, Hao Zhang: Integrated Model for River Embankment Failure due to Overtopping, IAHR 35th World Congress, 2013.

謝 辞

本論文は、筆者が実施した堤防強化に関する水理実験および数値解析の研究成果をとりまとめたものです。本研究を遂行し、論文としてとりまとめるにあたり、多くの方々から御指導ならびに御助言を頂きました。

京都大学防災研究所教授 中川一先生には、本研究成果を学位論文としてとりまとめることをご助言頂くとともに、本研究の遂行と論文のとりまとめにあたり終始熱心に御指導を頂きました。さらに、研究遂行の環境整備や事務手続き等まで多方面で御協力して頂き、本論文の完成に至ることが出来ました。ここに深く感謝いたします。

京都大学大学院工学研究科教授 後藤仁志先生には、水理実験において有益な御指導を賜るとともに、本論文の調査委員をお引き受け頂き、貴重な御意見を頂きました。京都大学防災研究所教授 藤田正治先生には、本論文の調査委員をお引き受け頂き、貴重な御意見を頂きました。京都大学大学院工学研究科教授 細田尚先生、同教授 戸田圭一先生には、お忙しい中、学力試問委員をお引き受け頂きました。ここに深く感謝いたします。

京都大学防災研究所助教 水谷英朗先生には、数値解析において非常に手厚いサポートをして頂きました。ここに御礼申し上げます。

水理実験において、京都大学名誉教授 関口秀雄先生、京都大学名誉教授 岡二三生先生、京都大学名誉教授 芦田和男先生、京都大学名誉教授 村本嘉雄先生、京都大学名誉教授 今本博健先生、国土交通省近畿地方整備局 文字聖氏より有益な御指導を賜るとともに、堤防強化に関して非常に有意義な議論をさせて頂きました。この時の議論が、さらなる堤防研究への動機となり本論文のとりまとめに繋がっています。心より御礼申し上げます。

また、岐阜大学名誉教授 宇野尚雄先生には、長年に渡り、堤防全般に関する貴重な御指導を頂きました。独立行政法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) 江頭進治氏には、水理学だけでなく研究に対する心構えについて御指導を頂きました。ここに御礼申し上げます。

また、株式会社ニュージェックの平山鉄浩氏、増田覚氏、芦田康則氏、出口恭氏、杉浦英二氏、藪田好美氏には、水理実験や解析の実施、データのとりまとめなどに多大な協力をして頂きました。深く感謝いたします。

最後に、常に応援してくれた両親、そして本研究への取り組みに対して理解してくれた妻と子供に感謝いたします。

與田 敏昭