

「河川堤防の安定性に関する特別講演会」報告

2024年11月14日、水戸市 茨城県産業会館において標記講演会が開催されました。本講演会は、(公社)土木学会関東支部茨城会、(公社)地盤工学会関東支部(茨城県グループ)、(一社)地域国土強靱化研究所の共同主催であり、オンサイトのみの開催で参加者は行政の方も含めた53名でした。

講演は、昨今の激甚降雨に対する河川堤防の安定を目指した以下の2題です。

① 浸透・越水に伴う河川堤防の決壊と対策～模型実験による検討～

名城大学理工学部 小高猛司教授

② 水産系副産物の貝殻で補強する河川堤防裏法面～環境・防災面に加えCO₂の地中貯蔵にも貢献～

茨城大学工学部 小林 薫教授

小高先生のご講演は、小型土層を用いた河川堤防の浸透破壊メカニズムに関する実証実験を主体とするものでした。実験ケースは相当数に及び、この結果と解析シミュレーションの対比、及びドレーン工をはじめとする対策工の検討も含めて多岐に亘り、非常に興味深いものでした。また、小型土層故の相似則を考慮した土層材料の選定等にも苦慮されたとのことでした。

小林先生のご講演は、“排出資源”の一つである廃棄されたホタテ貝殻を利用した堤防裏法面補強に関する実規模大の実証実験の紹介でした。実験では、堤防裏法面に破碎貝殻層を敷設した堤防模型に長時間雨を降らせ、越水時盛土内への浸透抑制・浸食抑制効果の検証が紹介されました。

2題の講演後は、(一社)地域国土強靱化研究所 顧問の末次忠司先生にもパネラーとしてご参加いただき、同研究所 安原一哉 代表理事がコーディネーターを務め、パネルディスカッションを実施しました。パネラー各位、及び会場参加者からもご意見・質疑等があり、盛況のうちに終了しました。

閉会の挨拶では、土木学会茨城会会長の小柳武和先生より、ご自身の豪雨災害時冠水のご経験談が紹介され、今後益々河川堤防安定性の技術発展を目指す締めとなりました。

最後に、講演会開催にご協力と御支援をいただきました関係者の皆様に重ねて御礼申し上げます。



写真-1 講演会風景



写真-2 パネルディスカッション風景

((一社) 地域国土強靱化研究所 伴夏男・安原一哉)

「河川堤防の安全性に関する特別講演会」アンケート結果

◎実施日時：令和6年11月14日（木）13：30～17：00

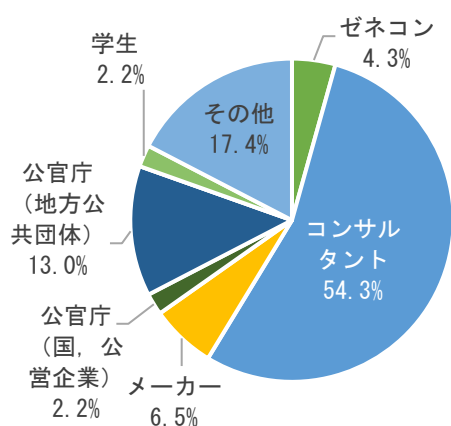
◎実施場所：茨城県産業会館 1F 大会議室

◎参加者数：(53名)

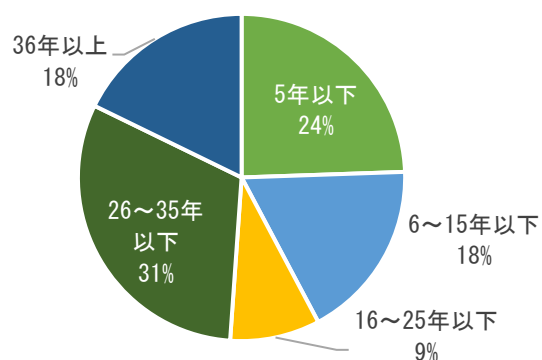
◆アンケート結果（回答者数：45名，回収率84.9%）

1. あなたの所属，実務経験年数，年齢

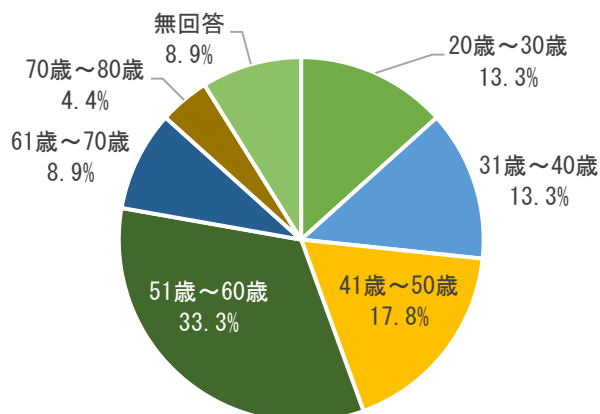
1) 所属



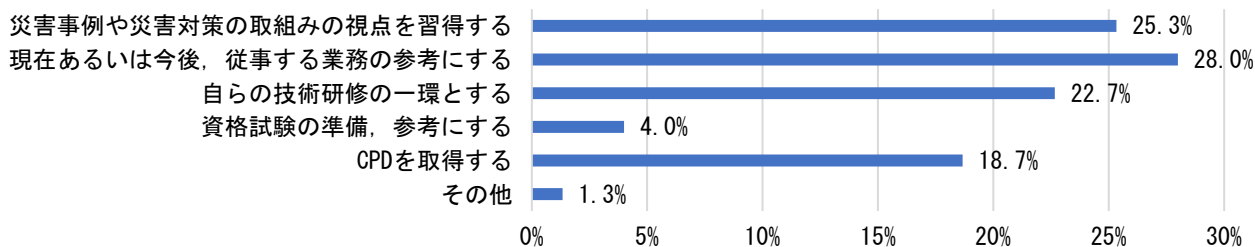
2) 実務経験年数



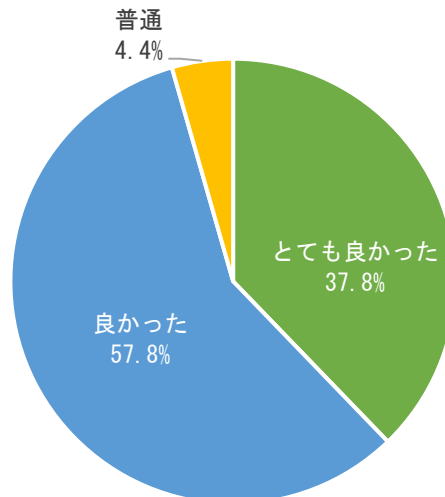
3) 年齢



2. 講演会ご参加の目的



3. 講演会に参加して、良かったと思いますか？



1) どのような点が良かったでしょうか？

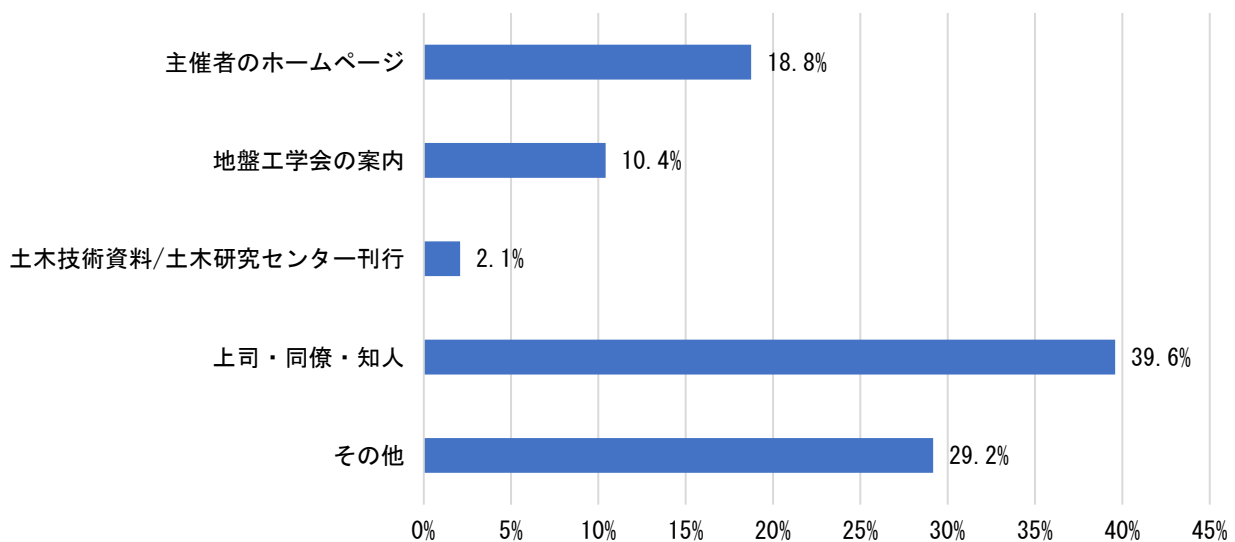
- ・ 2人先生の内容が良かった
- ・ 分かりやすかった、最近の河川堤防について理解が深まった
- ・ 浸透による破壊という新しい視点が開けて良かった、貝殻の利用
- ・ 堤防の防災のための研究について詳しい知見が得られたこと
- ・ 最新の河川堤防に関する動向、研究、実証が分かりやすく示されていた
- ・ 複数の観点でのお話を聞いたこと
- ・ パイピングについての知見（メカニズム、基板排水工等の対策）を得られた
- ・ 視覚的なものが多かった
- ・ 近年の豪雨発生を踏まえた対応策の可能性について学べた
- ・ 貝殻で強化出来ることは、副産物の再利用につながり、今後も進めてほしい
- ・ 災害に対してのメカニズム等が参考になりました
- ・ 有識者による専門的な講義が聞いた点
- ・ 浸透流解析で確認していた現象を実験的に確認できたことが大変よく理解できた
- ・ 具体的な内容であった
- ・ パイピングで堤防が破壊するメカニズムを理解できた、またその対策工法について学ぶことができた
- ・ 設計に反映できそうな実務的な内容であった
- ・ 普段は学べないような事が学べた
- ・ 越水についての研究が始まった流れを知れた
- ・ 河川堤防の最新情報が得られてよかった
- ・ 実験事例が多かった
- ・ まさに期待していた知見をいただき勉強になった点
- ・ 実証実験の話が多く、今後の業務に反映できる場所が多かった
- ・ 今回の2テーマが対策工の考え方、メカニズムの説明時に役立ち、この2テーマは独立するよりも技術的に結びつく。パネルディスカッションも説明が理解しやすく、事例紹介も上手に作り込まれておられました。
- ・ 河川構造に関する新しい学び

- ・河川堤防は裏法面を守る。粘り強い堤防から決壊しない堤防へ、裏法面法尻に排水工を設け、裏法面に浸潤させないなどの話が面白く勉強になった
- ・数多くの事例や現象発生の原因など分かりやすかった
- ・実験の様子を動画で見ることができたため、分かりやすかった
- ・模型実験をもっと見たかったです
- ・時機を得た話題であった
- ・オンラインでは希薄になりがちな人との話（熱意など）を直接感じ取れたのがよかった

2) どのような点を改善してほしいですか？

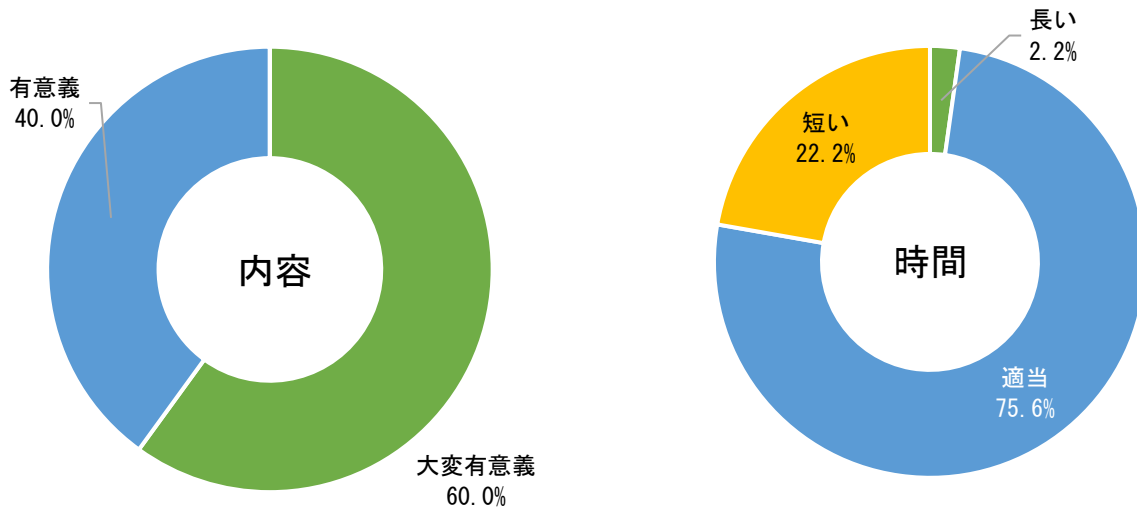
- ・実験の動画をもう少し大きな画面で見たかった、色とかが分かりづらかった
- ・時間配分
- ・手元に資料が欲しい（スクリーンだと小さい）
- ・会場の大きさがもう少しコンパクトであると良い
- ・講演時間が足りない
- ・パワーポイントの試料を配布してほしい
- ・少し基本的な考え方の説明があると分かりやすいと思った
- ・可能ならば発表資料を配布していただくと嬉しい
- ・講演時間が不足しており最後の説明が省略されてしまった
- ・講演の資料を後で確認したいです

4. 本講座をどこでお知りになりましたか

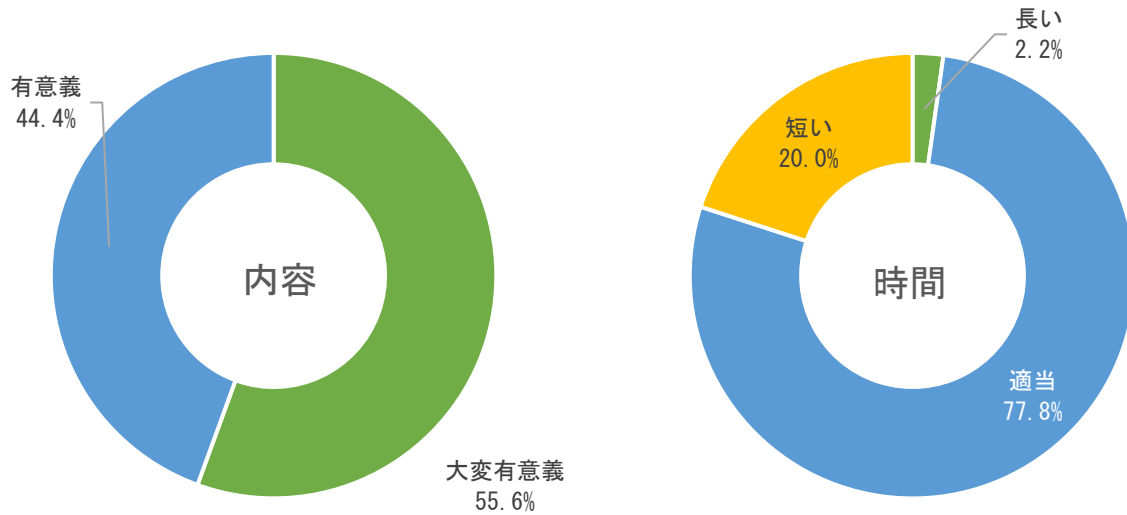


5. 講義内容・時間について

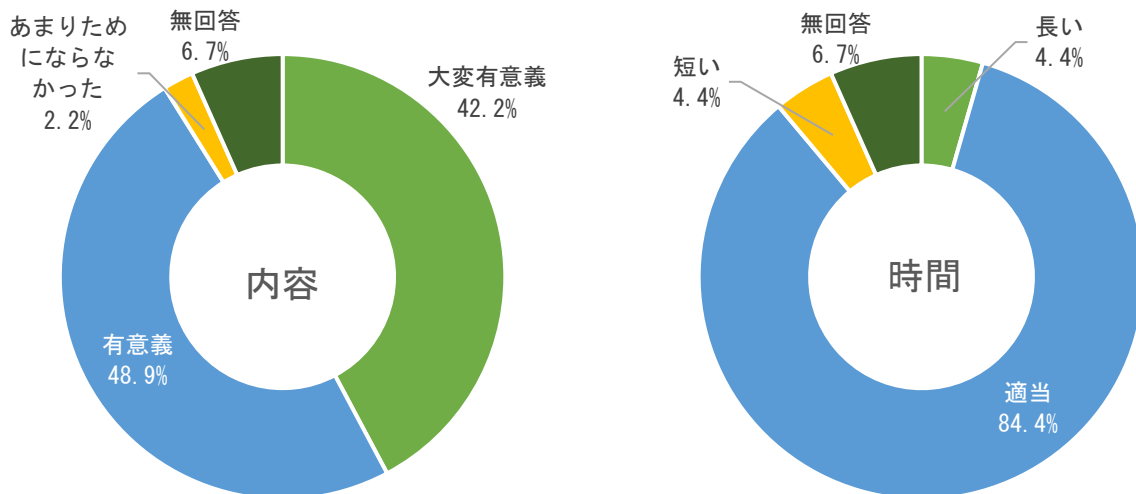
1) 浸透・越水に伴う河川堤防の決壊と対策 ～模型実験による検討～



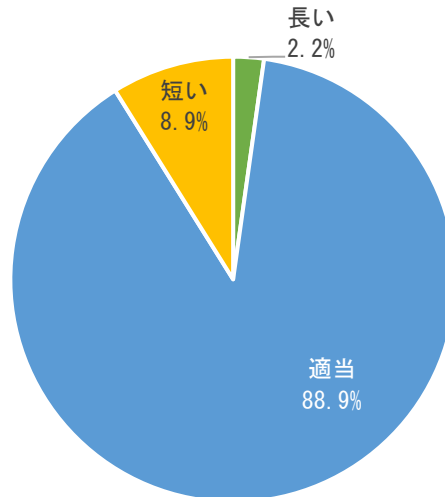
2) 水産系副産物の貝殻で補強する「粘り強い河川堤防」



3) パネルディスカッション



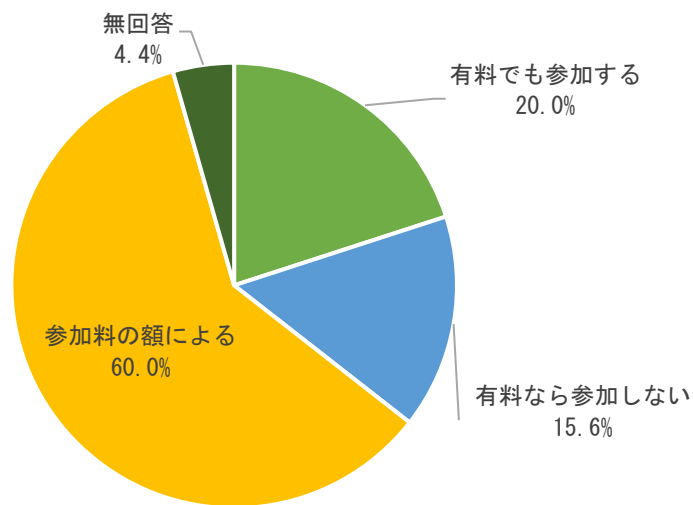
6. 講演全体の時間について



7. 今後、同様の講演会を企画する場合、どのような内容（タイトルやテーマ）の講演会をお望みですか？

- ・土木の広報，茨城の土木遺産
- ・防災関連
- ・河川管理手法の今後
- ・災害発生時の被災調査の早期対応に向けた作業の効率化・調査手法
- ・今回の内容に関しての別事例
- ・維持管理
- ・地盤解析や土質定数設定に関する事項
- ・河川堤防に関する最新情報
- ・河川堤防の設計に関する講演会
- ・盛土地形の防災能力（降雨，地震への対応）
- ・今回の堤防のみならず，災害対策工の失敗事例（設計編，施工編）～失敗から必要となる学ぶべき新たな対応策について
- ・盛土規制法に伴う対策例など
- ・地すべり対策，土砂崩れ対策
- ・今回と同様の内容
- ・流域治水
- ・盛土材料の最新研究情報，リサイクル資材の材料特性と有効活用

8. このような講演会の開催は、場合によっては、有料（CPD 申請に経費が掛かるため）になるかもしれませんが、以下ご意見をお聞かせください。



9. 本講演会に関してご意見、ご感想等がありましたら、ご自由にお書き下さい。

- ・対面式の講演会は参加した後に CPD 証明を渡しても良いと思う
- ・本講演で得た知識を踏まえ、今後の研究に活かしたいと思います。大変貴重な講演会を開催いただきありがとうございます。
- ・模型実験の有意さ（特に映像で見ると非常に分かりやすかったです）を改めて認識できました。今後の堤防維持管理、対策に基礎地盤面も意識していきたいと思います。
- ・全体的に時間が足りていないように感じた
- ・後日メール等で質問できると嬉しいです

「河川堤防の安定性に関する特別講演会」

令和6年11月14日(木)

講師プロフィール・講義概要&パネリストご紹介

【トピック(1)】: 「浸透・越水に伴う河川堤防の決壊と対策 ～模型実験による検討～」

【講師】: 名城大学 理工学部 教授 小高猛司

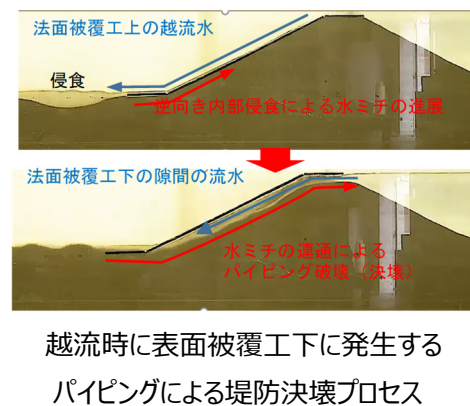
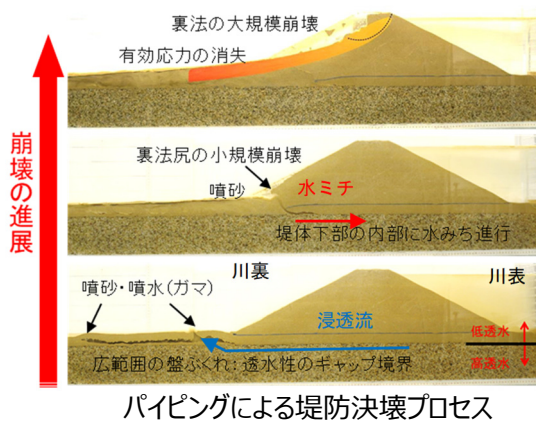


1993年名古屋大学で助手採用。以降、東京大学、京都大学を経て2006年から名城大学。2007年から現職、2012年から名城大学自然災害リスク軽減研究センター長(併任)。学内管理運営業務は2019年から学術研究支援センター長、2023年から総合研究所長を併任。学生時代から浸透破壊に関する研究にも従事していたが、2004年の日本各地の河川堤防の決壊とその調査活動を契機に、現場を重視した河川堤防の研究に力を入れてきた。2012年～2018年国土交通省河川砂防技術研究開発公募・河川技術分野に研究代表者として従事。2011年、2023年いずれも河川堤防に関する研究論文で地盤工学会論文賞を受賞。

【講義概要】:

数万キロにも及ぶ我が国の河川堤防は、原則として土堤で整備されています。土堤ゆえに、長時間の洪水にさらされると浸透破壊のリスクが高まります。また、越水時の高速で流下する越流水による裏法面侵食に対しては、土堤はほとんど無力であり、令和元年台風19号では全国で140カ所以上の河川堤防が決壊してしまいました。我が国では永年にわたり、越水を想定した対策を検討すること自体が不要(換言すればタブー)とされてきましたが、これら近年の越流決壊の頻発を契機として、越水したとしても決壊までの時間を少しでも引き延ばすことを目的とした「粘り強い」河川堤防の整備が国を挙げて急速に進められつつあります。越水対策が遅れていた一方で、越水していない堤防は絶対に決壊させまいという強い決意を持って河川堤防整備が進められてきたことは事実であり、特に2012年の矢部川決壊以降に浸透に関する議論は大きく進んできました。

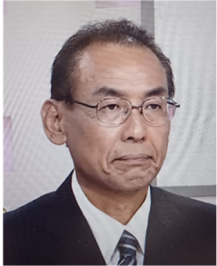
本講義では、越流していない河川堤防の浸透に関する危険性とその対策について、並びに、越流してしまった場合の危険性とその対策について、講師の研究グループで実施してきました模型実験の結果を通してお話したいと思います。具体的には、高透水性基礎地盤を有する河川堤防のパイピングに起因する浸透破壊のリスクならびにその対策として基盤排水工法が非常に効果的であること、並びに、「表面被覆型」の越流対策の課題やそれに対する対策などについて、の一見異なる2つのトピックの話題提供ですが、いずれも、土堤内の堤体浸透の制御が「粘り強い」から「決壊しない」河川堤防を整備するために最も基本かつ重要な事項であることをお話したいと思います。



【トピック (2)】：「水産系副産物の貝殻で強化する河川堤防裏法面

～ 環境・防災面に加え CO₂ の地中貯蔵にも貢献～

【講師】：茨城大学大学院 教授 小林 薫

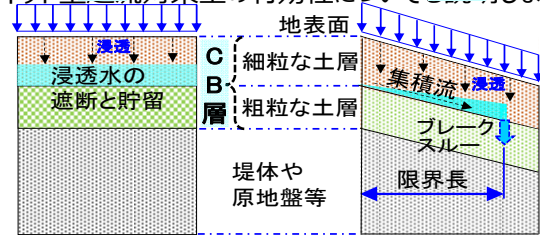
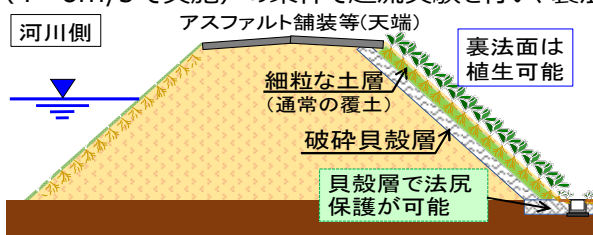


1985年飛鳥建設入社、技術本部土木設計部、技術研究所副所長。2013年神戸市立工業高等専門学校都市工学科教授、2015年茨城大学大学院教授（現職）。2022年茨城大学工学部附属都市・地域デザイン教育研究センター長、2015年の東北関東豪雨時の鬼怒川の堤防決壊の調査活動を契機に、河川堤防に関する調査研究に取り組む。また、貝殻を有効活用した環境に配慮した液状化対策工の開発と共に、CO₂固定化並びに大気中のCO₂除去に関する研究開発にも着手。日立市環境審議会会長など。博士（工学）、技術士（建設部門）、一級土木施工管理技士、測量士、コンクリート主任技士、土壌環境リスク管理者など。

【講義概要】：

茨城県内でも短時間大雨に伴う河川堤防（以下、堤防）の決壊が頻発化する中、粘り強い河川堤防が強く求められています。堤防裏法面の浅層部に破碎貝殻層を敷設し、キャピラリーバリア（以下、CB）土層を構築することで堤防裏法面から堤体内部への雨水浸透抑制と、越水時の侵食抑制が可能な貝殻型CB堤防を提案してきました。また、ホタテ貝殻は、貝殻質量の約43%が二酸化炭素（以下、CO₂）であり浅層地盤中に敷設すれば長期CO₂固定化が可能です。

本講演では、貝殻型CB堤防の社会実装を目指し、堤防裏法面のCB機能に関する検証と妥当性確認を目的として、屋外に貝殻型CB堤防を構築し、雨量計と土壌水分センサによる堤体内の雨水浸透挙動を約1年3ヶ月間に渡り継続的に計測しました。その結果、CB土層の雨水浸透抑制機能に加え、ブレイクスルーが生じても暫くするとCB機能が自然に回復することが繰り返し確認され、CB機能が長期供用中に機能していくことが検証されました。加えて、覆土修復に伴うCB機能の回復挙動も検証できました。また、堤防裏法面を想定した限定的な適用ですが、カーボンニュートラルの実現に向けたCO₂固定化量（CO₂放出削減量）の潜在的ポテンシャルの高さについて説明します。さらに、国土交通省では、粘り強い河川堤防の技術開発目標として、越流水深30cm、越流時間3時間等を提示しています。一方で、これまでの堤防の決壊事例から、越流流速3m/s未満の場合は決壊事例が少ないことが報告されています。このことから、越流流速3m/s超（4～6m/sで実施）の条件で越流実験を行い、裏法面シェルネット型降雨対策工の有効性について降雨用します。



破碎貝殻層（厚さ10cm）の施工状況と越流実験の状況例

シェルネット型越流対策工を用いた越流実験の状況

【パネリスト】：（一社）地域国土強靱化研究所（LRRI）顧問 末次忠司

（一社）地域国土強靱化研究所 顧問 末次忠司



・略歴：1982年建設省土木研究所・総合治水研究室、1990年企画課長、1996年都市河川研究室長、2000年河川研究室長、2006年（財）ダム水源地環境整備センター・研究第一部長、2009年土木研究所・水環境研究グループ長、2010年山梨大学大学院・教授、2023年（一社）地域国土強靱化研究所・顧問

・専門：河川防災・減災、リスク対策

・資格：博士（工学）、技術士（建設部門）

「河川堤防の安定性に関する特別講演会」
2024年11月14日 茨城県産業会館

浸透・越水に伴う河川堤防の決壊と対策 ～模型実験による検討～

名城大学 理工学部 社会基盤デザイン工学科
教授 小高 猛司

名城大学 自然災害リスク軽減研究センター (NDRR)

今回の講演の内容

- 浸透に伴う河川堤防の決壊と対策
～模型実験による検討～
- 越水に伴う河川堤防の決壊と対策
～模型実験による検討～

高透水性基礎地盤上の河川堤防の浸透破壊に対する効果的な基盤排水工の検討

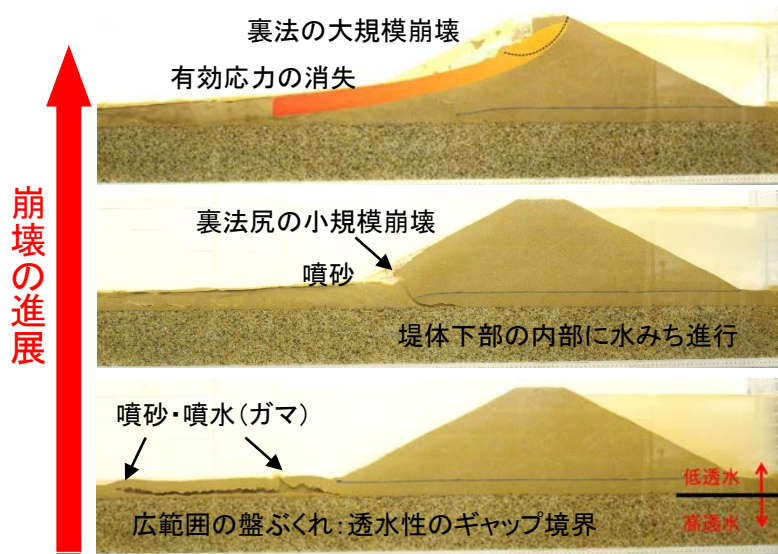
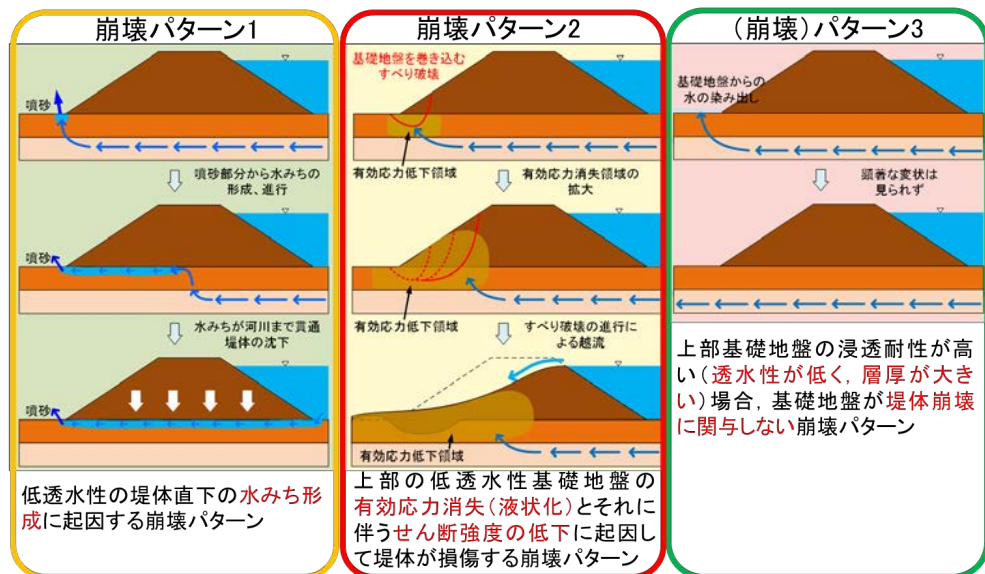
地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.3, 2022.

小高猛司(名城大学)・李 圭太(日本工営)*1・中村宏樹(建設技術研究所)*2・山下隼史(名城大学大学院)

*1名城大学特任教授

*2元名城大学大学院生

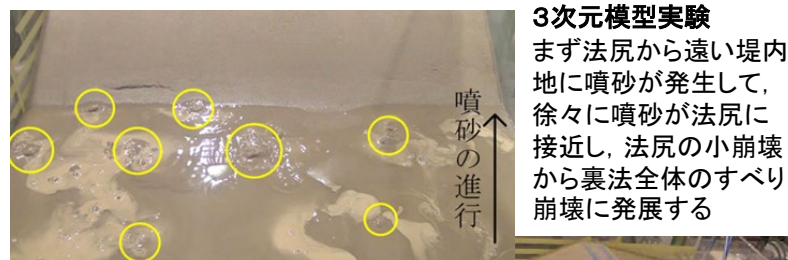
研究の背景と目的



本研究グループは、小型堤防模型実験を実施し、高透水性基礎地盤上の河川堤防の崩壊メカニズムを解明し、**3つ崩壊パターンに類型化**できることを示した。

特に、洪水継続時間が短い日本の河川においては、パイピングの初期現象として発生する噴砂等に起因する**堤体裏法尻の小規模法すべり**がトリガーとなり、**堤体全体の大規模法すべりに発展する崩壊パターン2**を警戒すべきである。

本論文では、河川堤防の崩壊パターン2も含むパイピングによる被災防止を目的として、**パイピング初期の噴砂や裏法尻小規模すべりの発生を抑制**するために基盤排水工を導入することを前提とした。模型実験と数値解析を通して、**基盤排水工の最も効果的な敷設位置を明示**した。



YouTube
実験動画

Click!

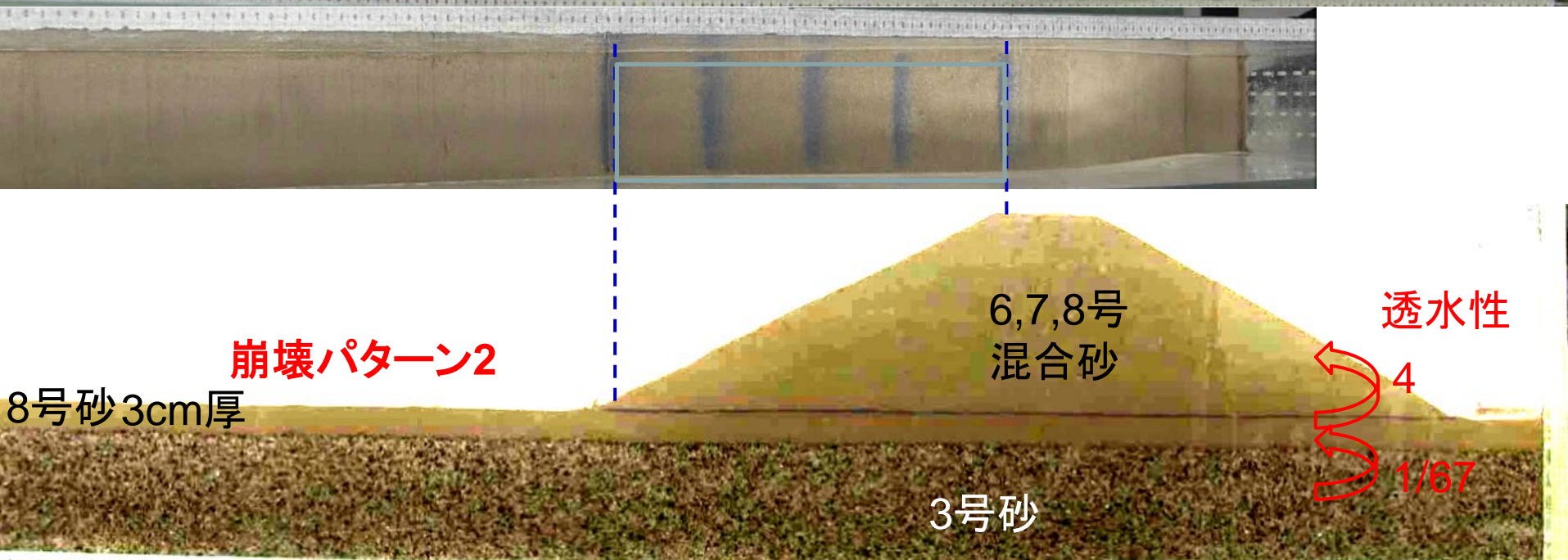
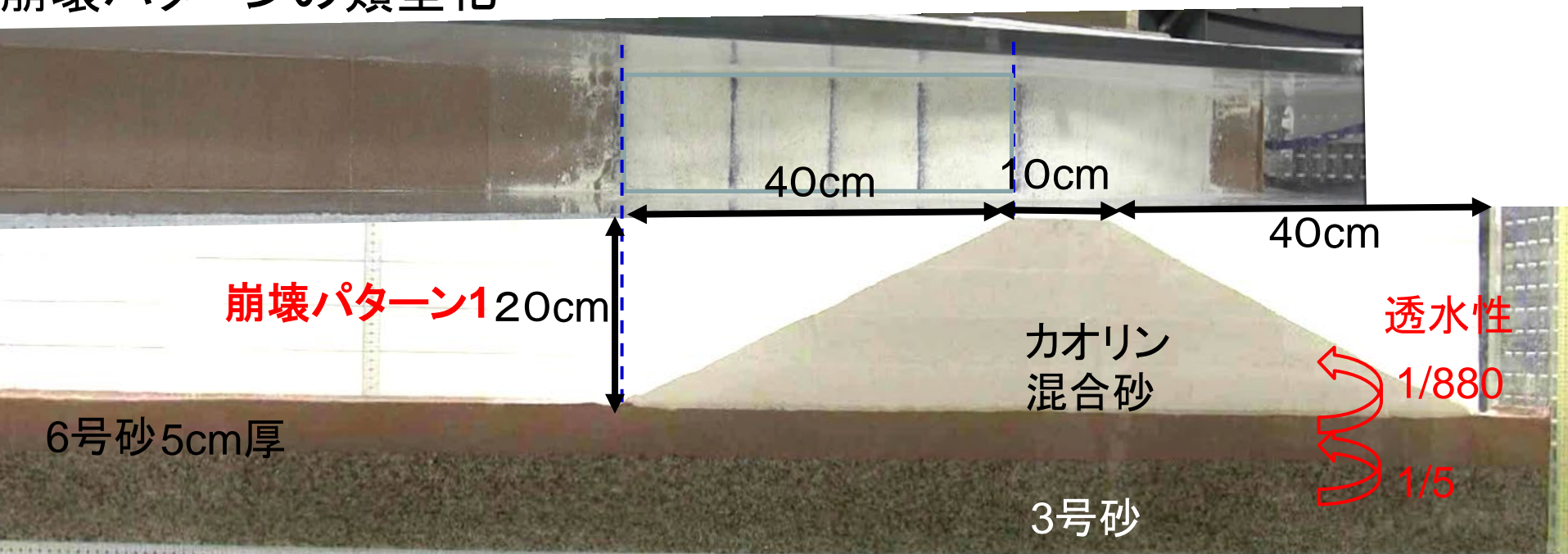
論文内の全ての
実験動画を同時
公開する試み

→参考文献に動画リスト

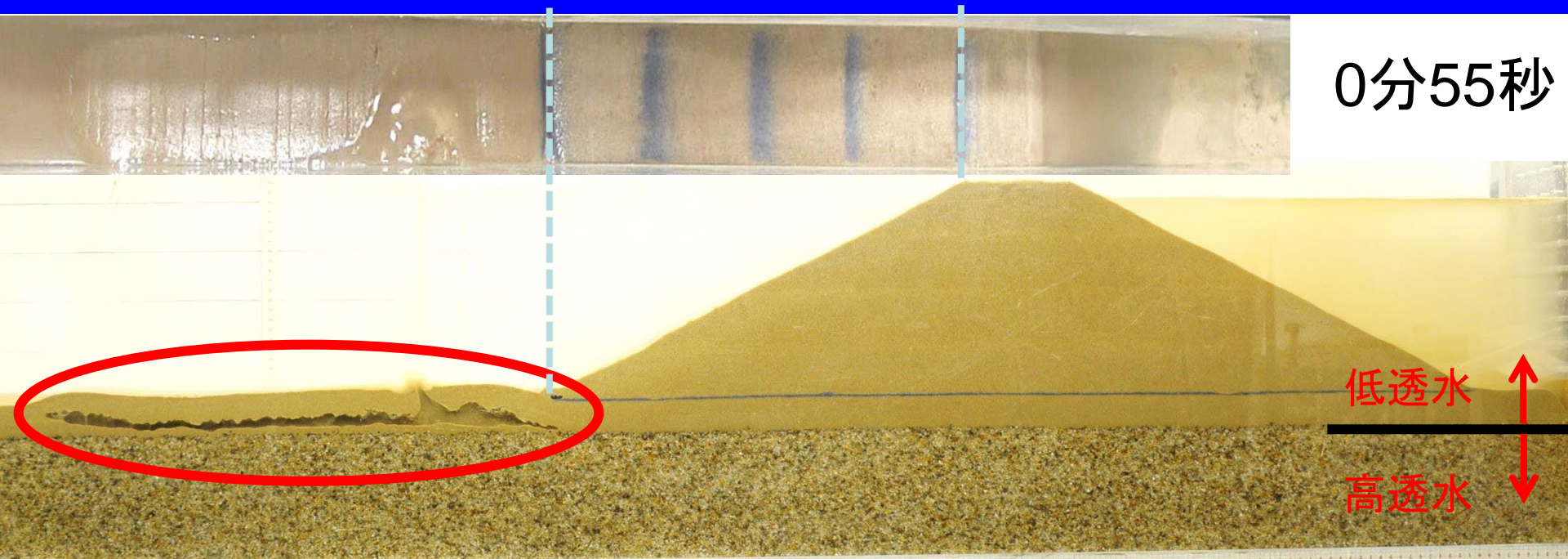
Click!



崩壊パターンの類型化



崩壊パターン2(盤ぶくれ)



浸透破壊の流れ

盤ぶくれが広範囲に発生



堤体内への噴砂, 水みち進行



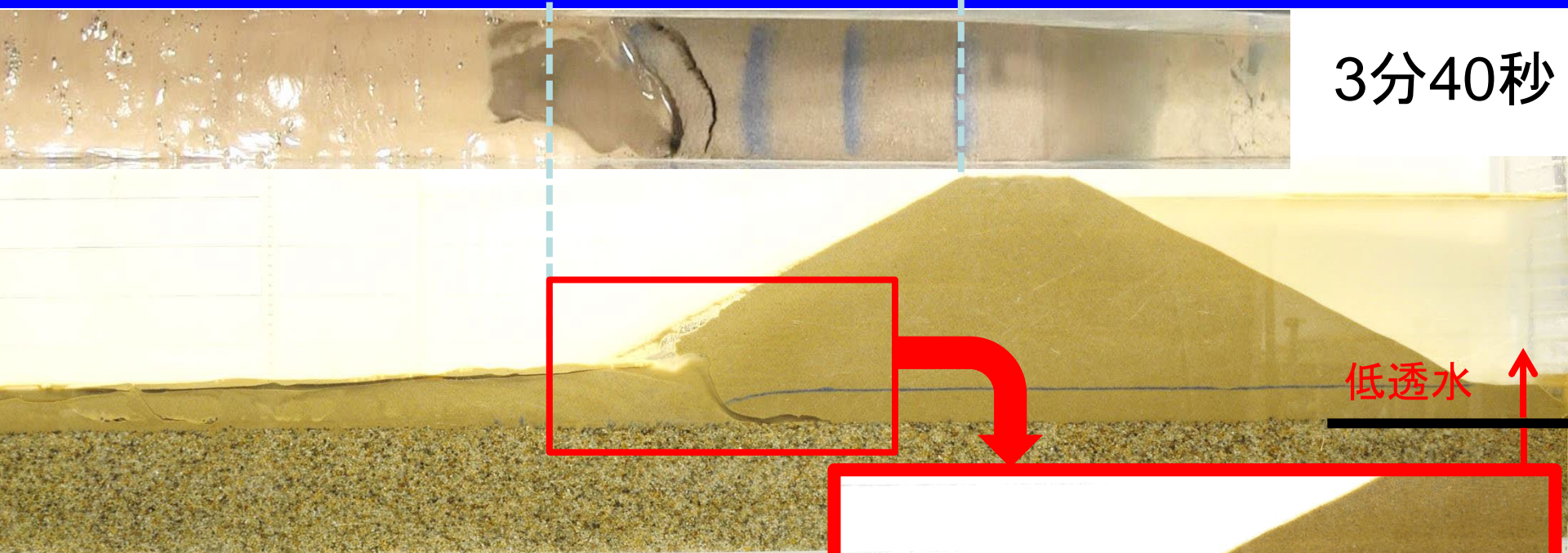
有効応力の低下, 堤防形状の不安定化による崩壊

堤体損傷範囲: 無

特殊な条件なしでも噴砂等の発生に十分な水圧上昇

崩壊パターン2 (水みちの進行)

3分40秒



浸透破壊の流れ

盤ぶくれが広範囲に発生



堤体内への噴砂, 水みち進行



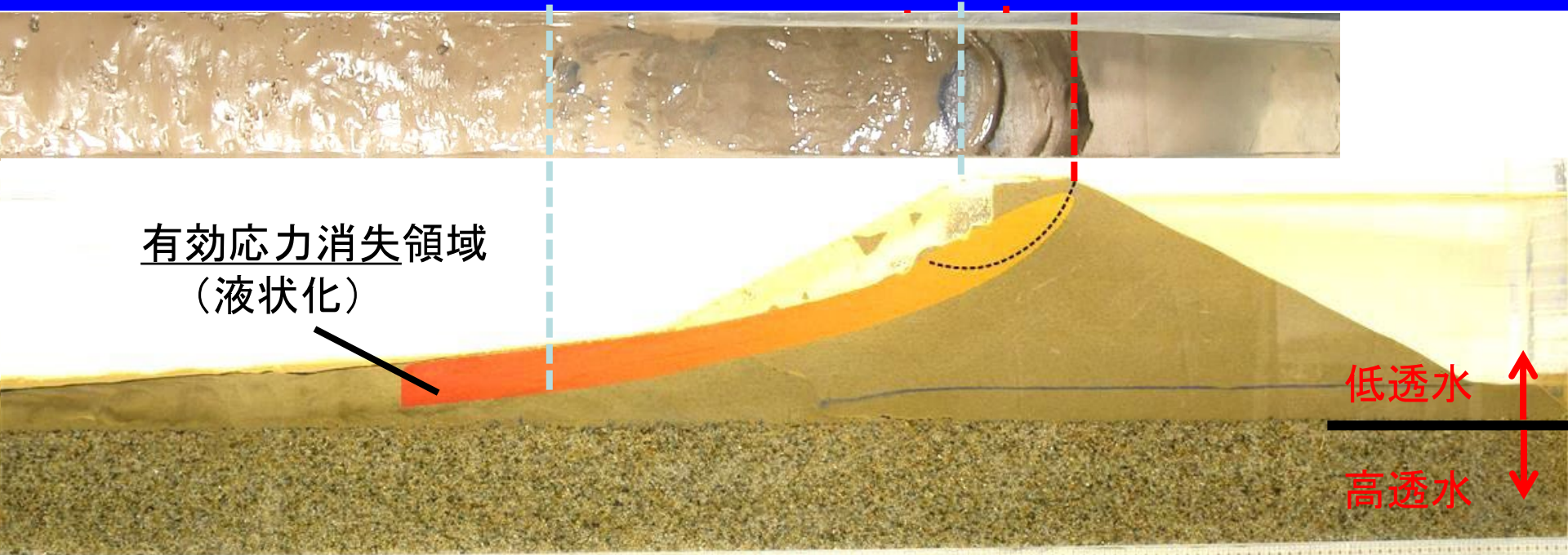
有効応力の低下, 堤防形状の不安定化による崩壊



低透水

上層基礎地盤, 高透水性基礎地盤の境から水みちの形成, 進行

崩壊パターン2 (法すべり)



浸透破壊の流れ

盤ぶくれが広範囲に発生



堤体内への噴砂, 水みち進行



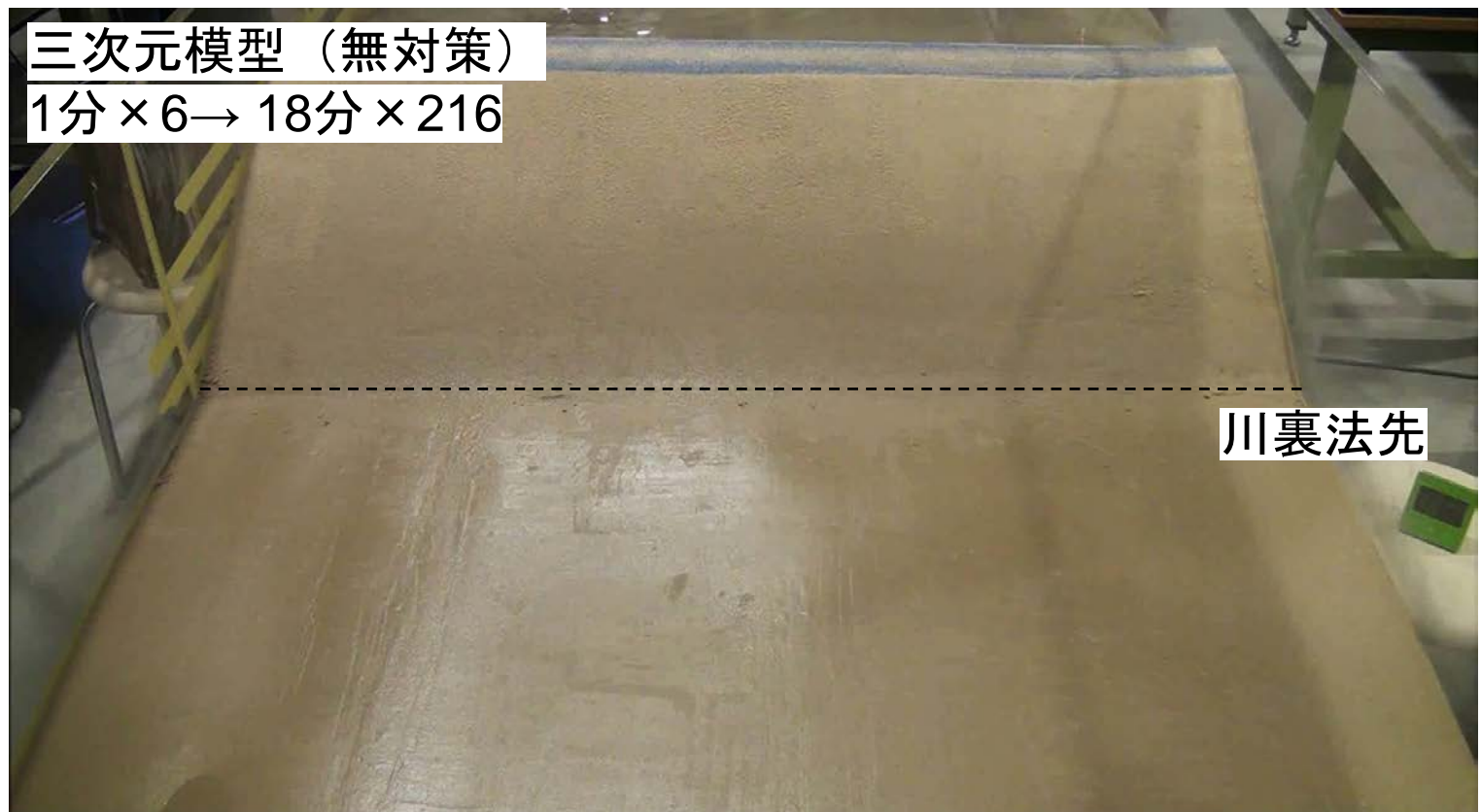
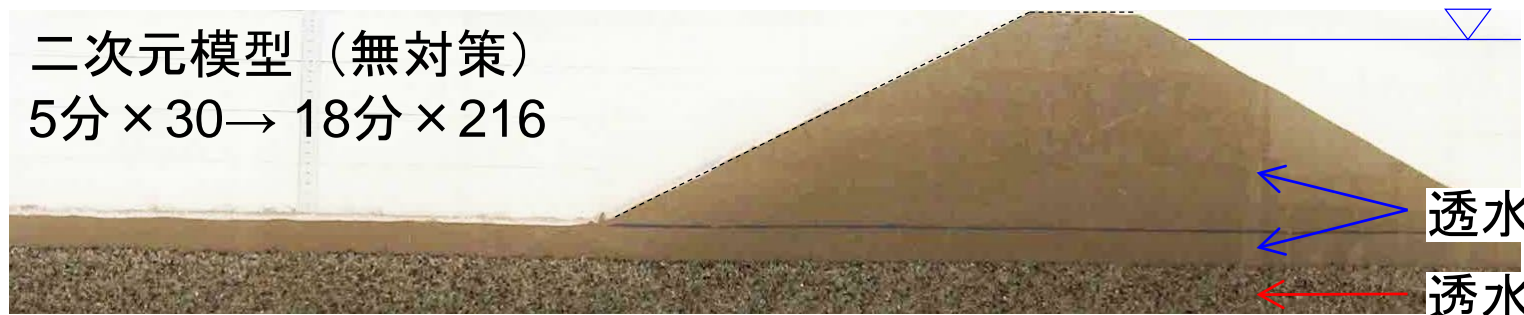
有効応力の低下, 堤防形状の不安定化による崩壊

堤体損傷範囲: 大

崩壊部分含め, 川裏側にて
広い範囲で有効応力の低下

背景

- ・ 複層構造の高透水性基礎地盤を模擬した堤防模型実験

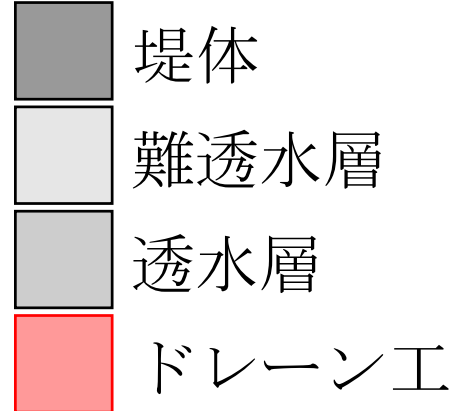
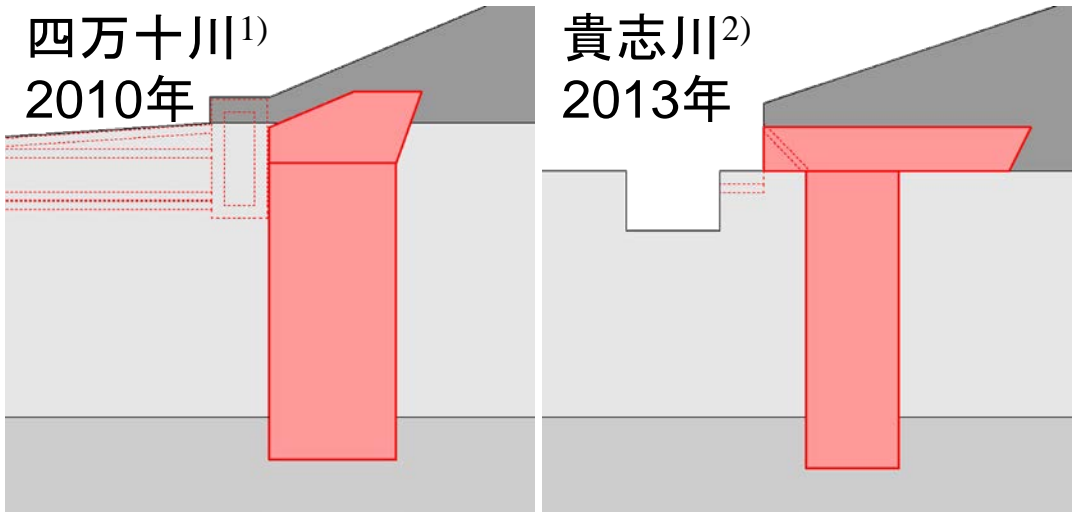


背景

・ ウェルドレーン工法の施工事例

四万十川¹⁾
2010年

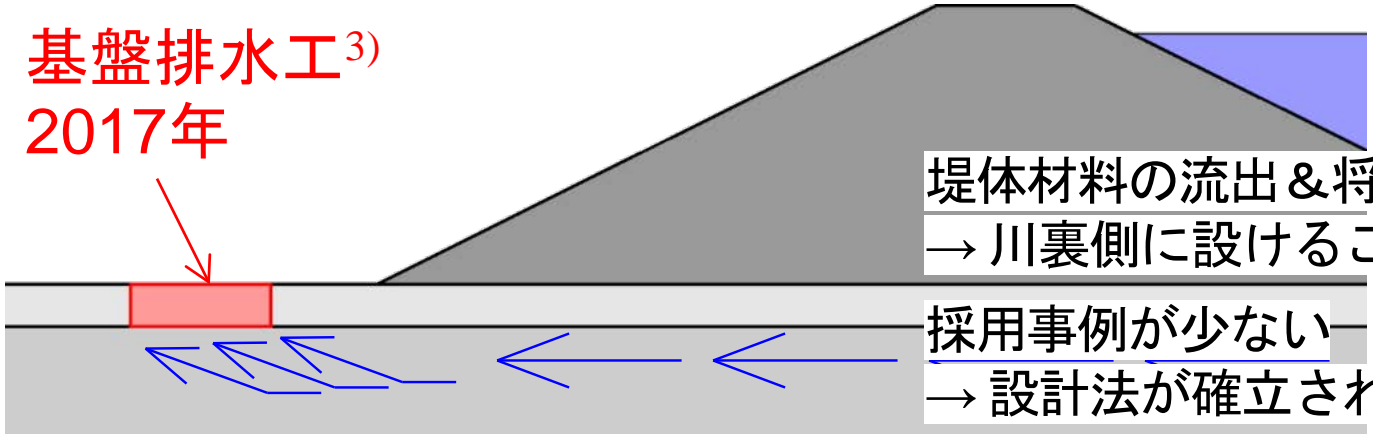
貴志川²⁾
2013年



- 1) 北川誠純：四万十川支川後川安並地区における漏水対策工事の報告，2010.
- 2) 中野彩，山崎裕治：地下水利用を考慮した貴志川漏水対策について，2013.

・ 基盤排水工法（ウェルドレーン工法を含む）

基盤排水工³⁾
2017年



堤体材料の流出 & 将来の維持管理
→ 川裏側に設けることを推奨.

採用事例が少ない
→ 設計法が確立されていない.

3) 土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム：堤内基盤排水対策マニュアル（試行版），2017.

目的

基盤排水工の設置位置と規模の違いによる
変状抑制効果の検証を行う。

本発表の構成

目的：基盤排水工の設置位置の効果検証

1. 連続配置の基盤排水工の効果検証

1-1. 二次元模型実験

1-2. 二次元浸透流解析

1-3. 安定解析

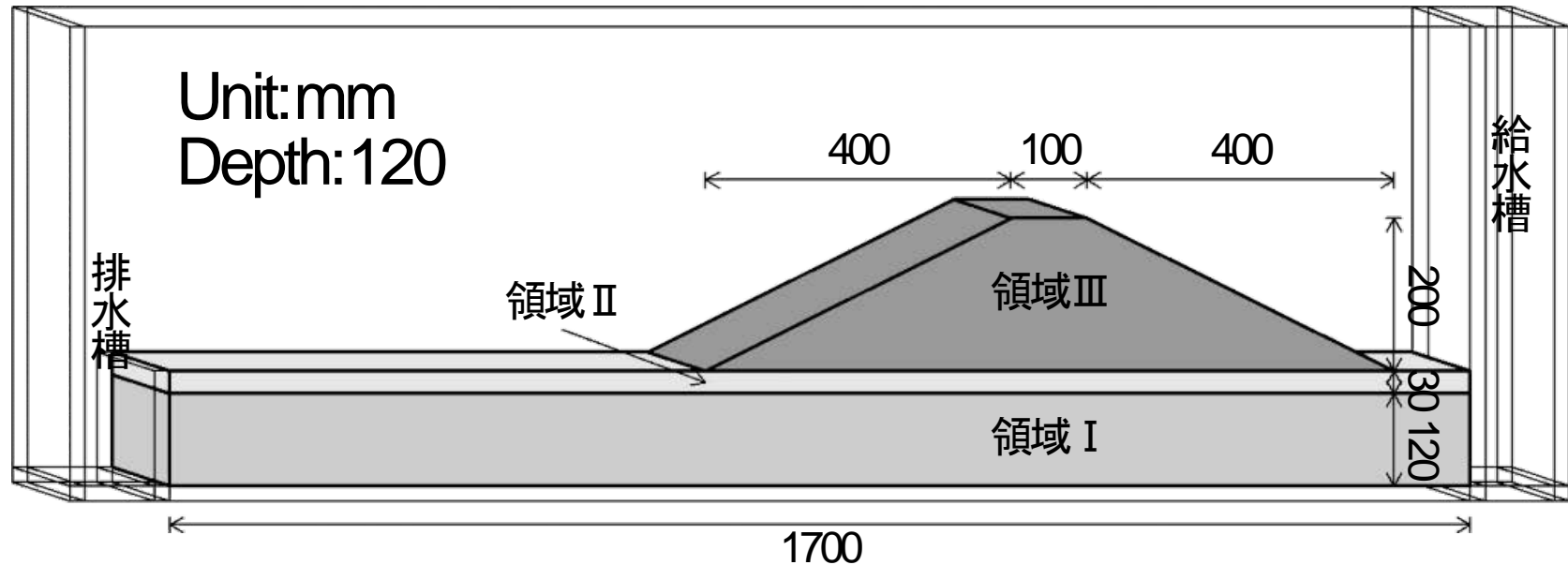
2. 離散配置の基盤排水工の効果検証

2-1. 三次元模型実験

2-2. 三次元浸透流解析

二次元模型実験の概要

・ 模型地盤の寸法



・ 各領域の地盤材料

領域I (透水層)	領域II (被覆土層)	領域III (堤体)	基盤排水工
3号砂 [$e=0.95$, $k=2.67 \times 10^{-3} \text{ m/s}$]	8号砂 [$e=1.06$, $k=3.98 \times 10^{-5} \text{ m/s}$]	678号混合砂 [$e=1.06$, $k=9.96 \times 10^{-5} \text{ m/s}$]	3号砂 [領域Iと同一]

↑ 67倍

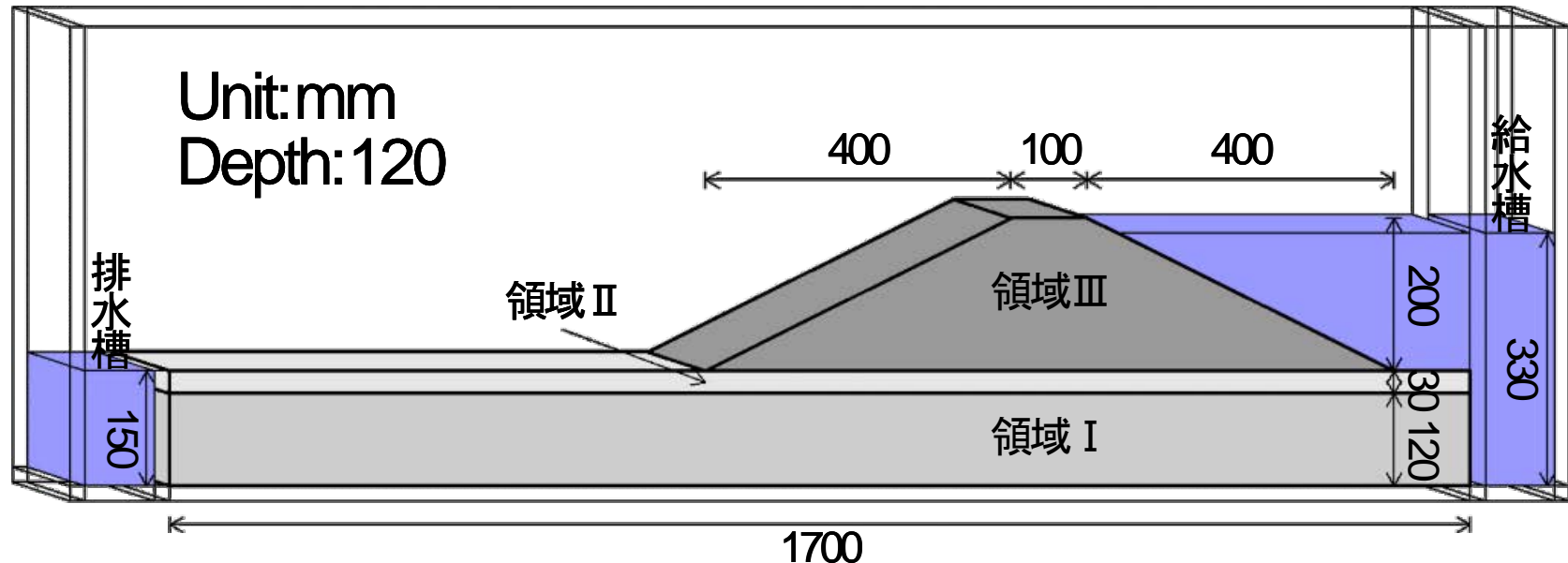
↑ 27倍

↑ 同一材料.

※ 678号混合砂：6号砂，7号砂，8号砂を5:2:5の質量比で配合した地盤材料。

二次元模型実験の概要

・ 模型地盤の寸法



・ 模型実験の手順

実験準備

- ①すべての地盤材料の含水比を4%に調整し，模型地盤を作製する。
- ②給水槽の水位を100mmに90分間保ち，基礎地盤を飽和させる。

実験開始

- ③給水槽の水位を一気に上昇，330mm（堤体高の9割）でオーバーフローさせ水位を保ちながら，浸透に伴う堤体の挙動を観察する。

二次元模型実験の概要

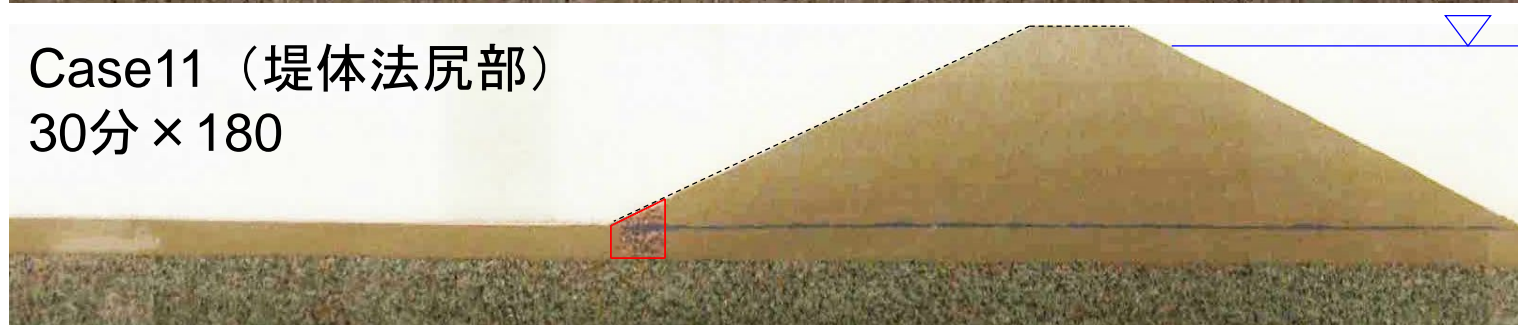
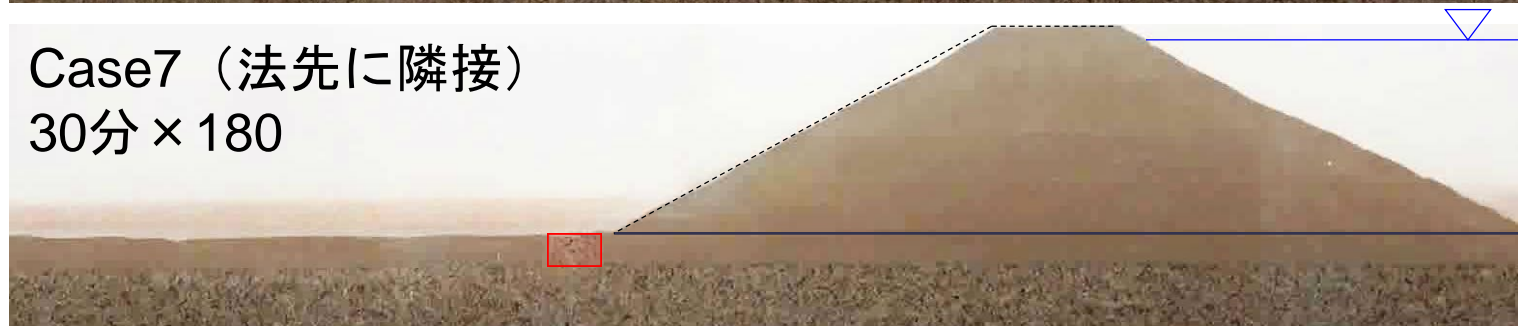
1. 連続配置の基盤排水工の効果検証

1-1. 二次元模型実験

Case	基盤排水工		終了時崩壊度
	位置	規模	
1			越流
2	川裏法先から50mm	30mm	8割
<u>3</u>		<u>50mm</u>	<u>8割</u>
4		100mm	3割
5		200mm	2割
6		川裏法先に隣接	30mm
<u>7</u>		<u>50mm</u>	<u>9割</u>
8		100mm	2割
9		200mm	2割
10	堤体法尻部	30mm	9割
<u>11</u>		<u>50mm</u>	<u>0割</u>
12		100mm	0割
13		200mm	0割

二次元模型実験の結果

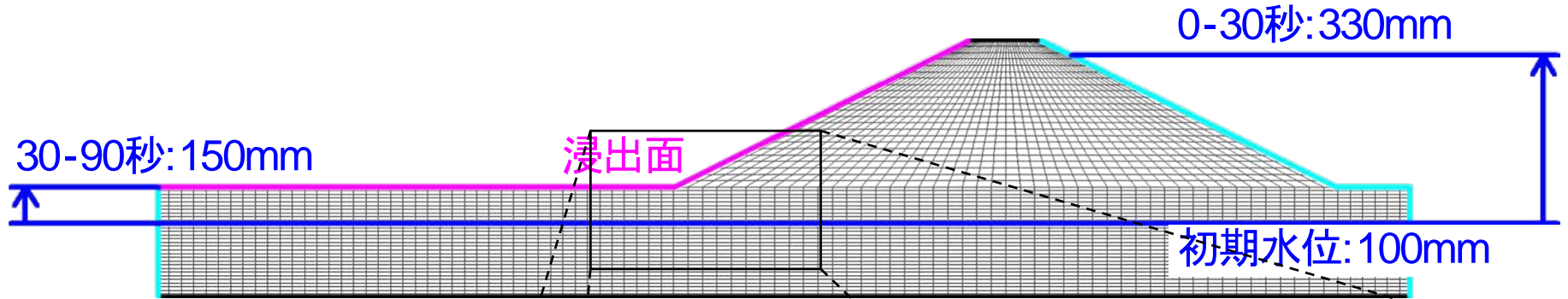
- ・ 基盤排水工の設置位置の違いによる変状抑制効果の比較



- ・ 基盤排水工の規模が同一の場合、堤体法尻部に設けることが最も変状抑制効果が高い。

二次元浸透流解析の概要

- 解析モデルの境界条件



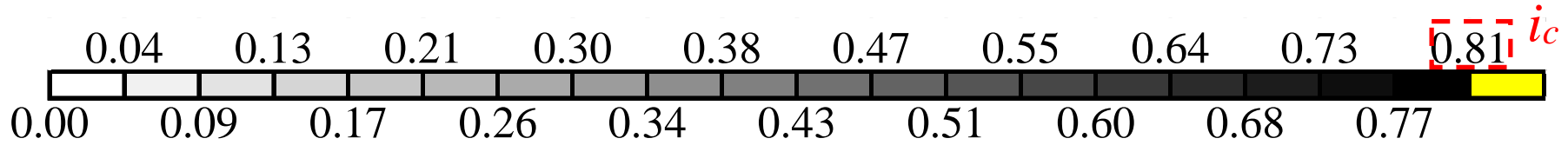
- 出力位置

- 評価指標

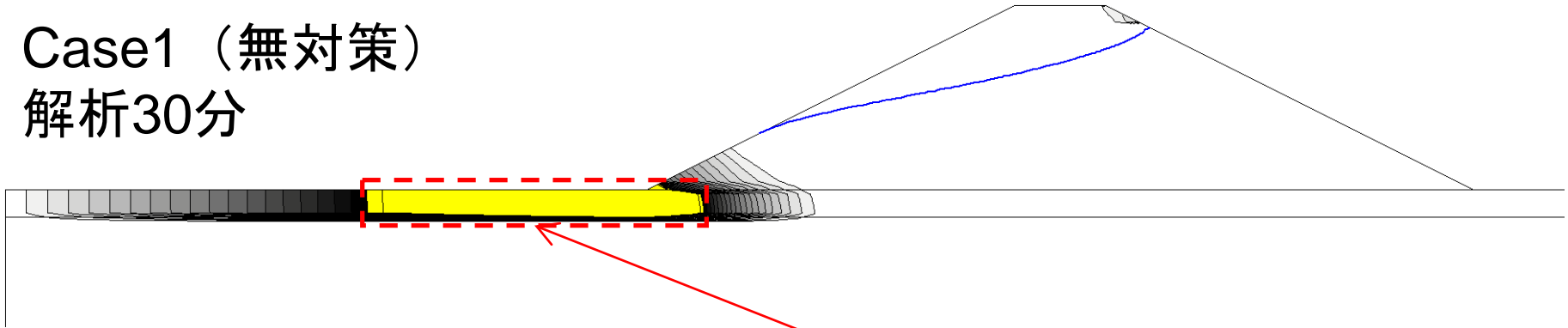
動水勾配の鉛直成分 i_v .

二次元浸透流解析の結果

- ・ 基盤排水工を施さない無対策の動水勾配 i_v の分布の検証



Case1 (無対策)
解析30分

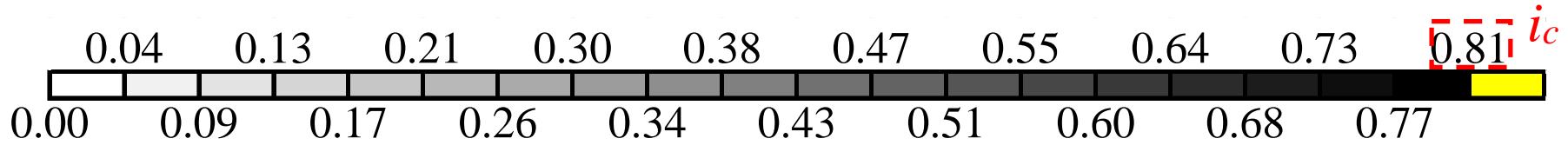


ボーリング（噴砂）発生の閾値を表す
限界動水勾配 ($i_c=0.81$) を広範囲に超過.

- ・ 模型実験結果と同様に、基盤排水工を施さない場合、盤ぶくれと噴砂の危険性が高い.

二次元浸透流解析の結果

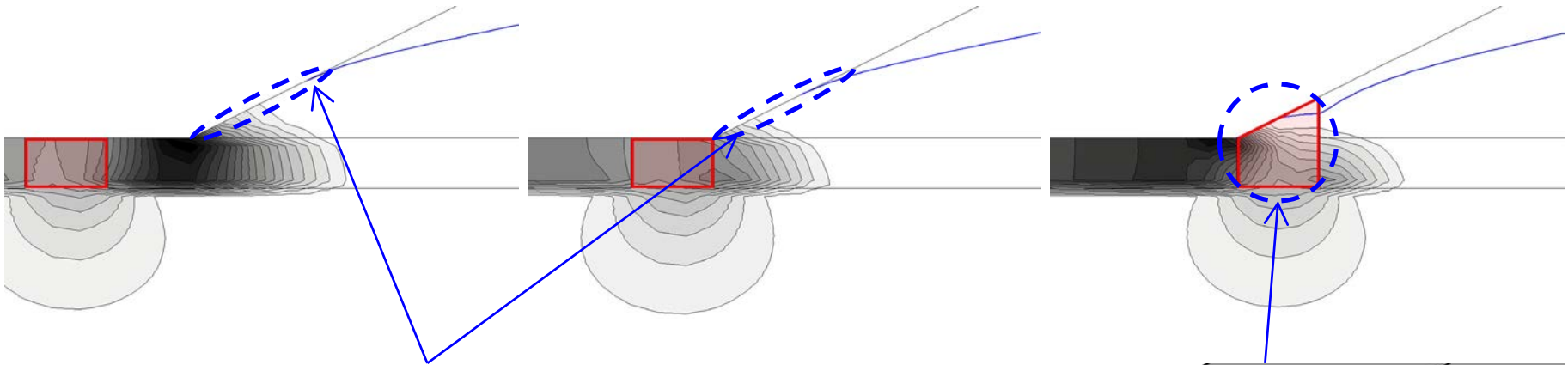
- ・ 基盤排水工の設置位置の違いによる動水勾配 i_v の分布の比較



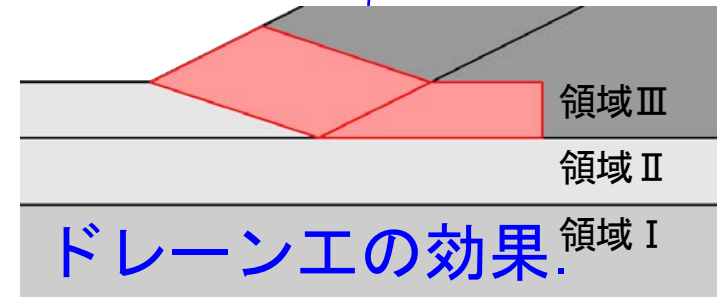
Case3 (50mm離す)

Case7 (法先に隣接)

Case11 (堤体法尻部)



浸潤面が裏法面に浸出。
法先での小規模すべりが発生。



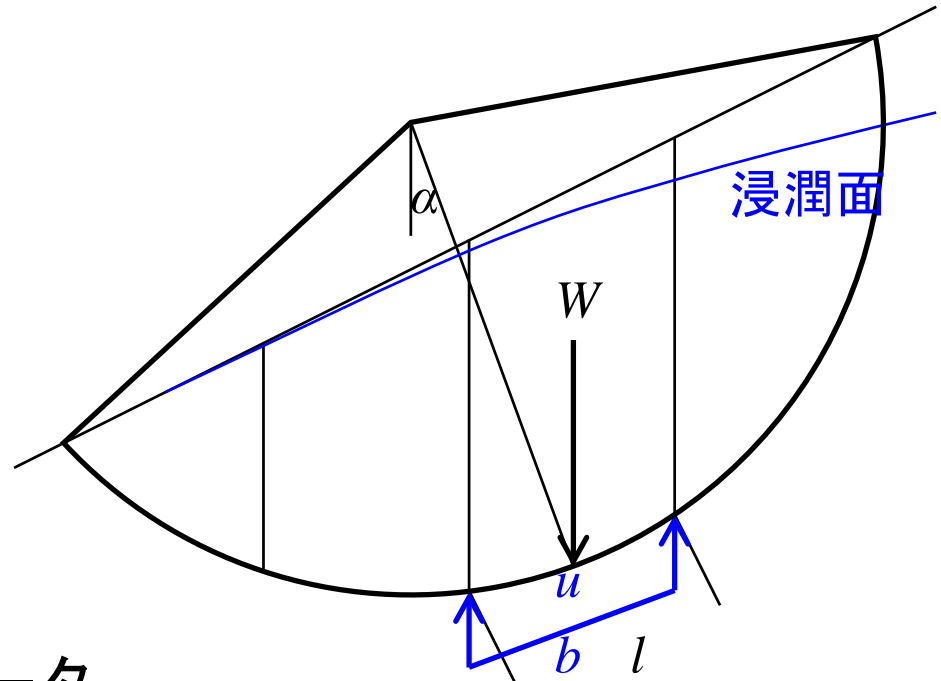
- ・ 基盤排水工を堤体法尻部に設けた場合、堤体内浸透を低減し、法先での小規模すべりを抑制した。

安定解析の概要

・ 円弧すべり解析（修正フェレニウス法）

$$F_s = \frac{\sum [c' \cdot l + (W \cos \alpha - \underbrace{U}_{\text{水圧}}) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha}$$

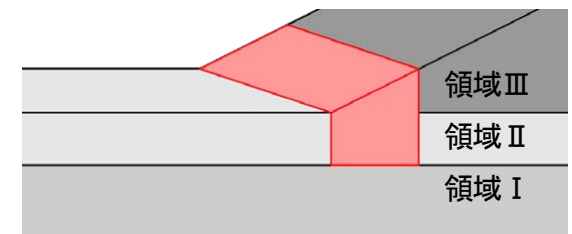
浸透流解析結果から
得られる圧力水頭.



・ 各領域の地盤材料のパラメータ

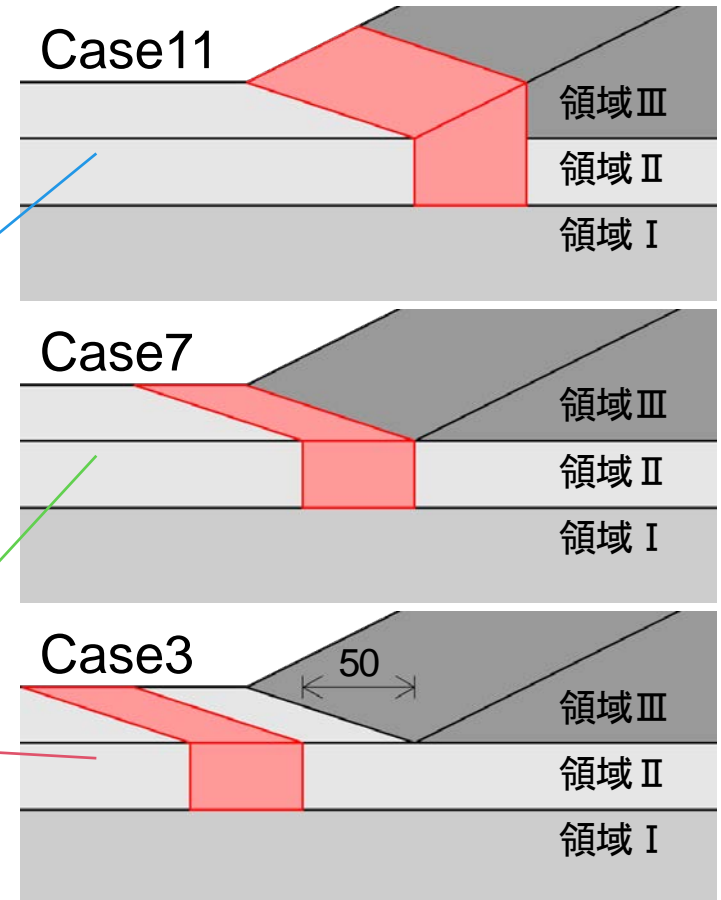
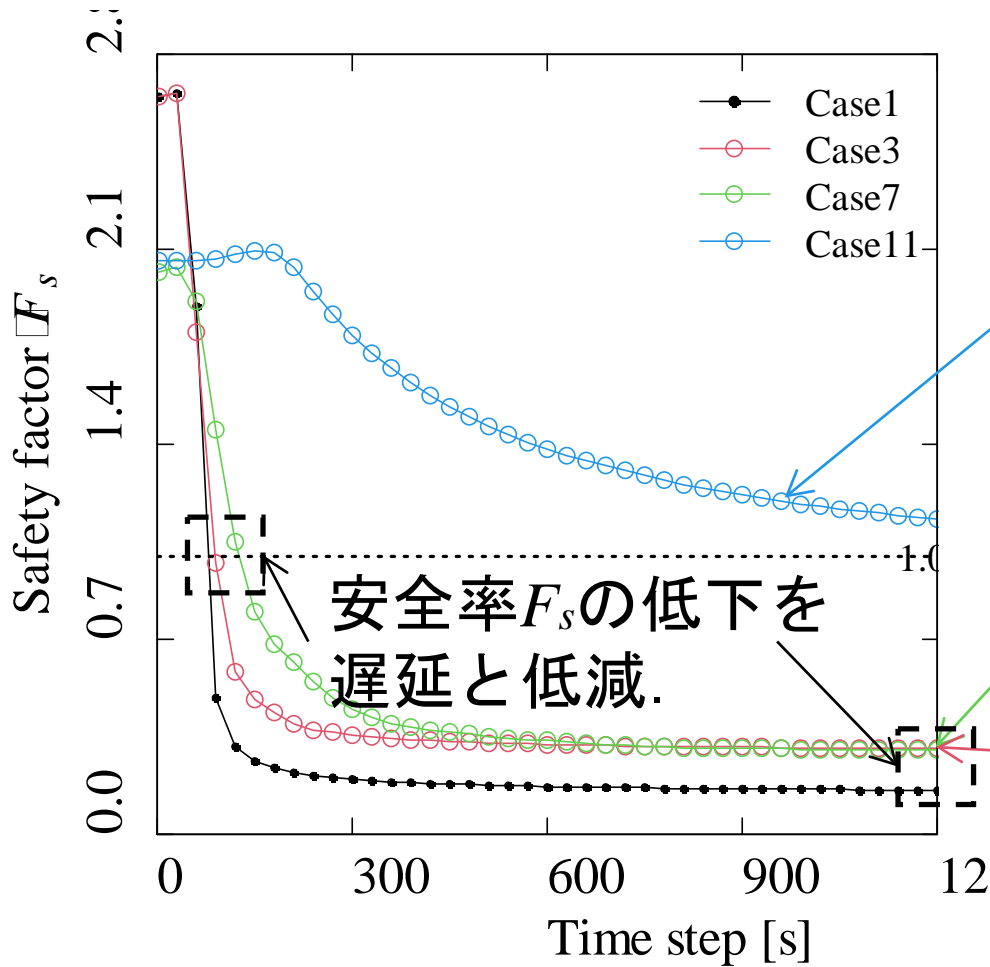
領域	単位体積重量[kN/m ³]		せん断強度[kN/m ²]	せん断抵抗角[deg]
	Sr=0%	Sr=100%		
I	12.70	17.74	1.00	45
II			0.01	35
III			0.01	35

Case11（堤体法尻部）が $F_s > 1.00$ に設定.



安定解析の結果

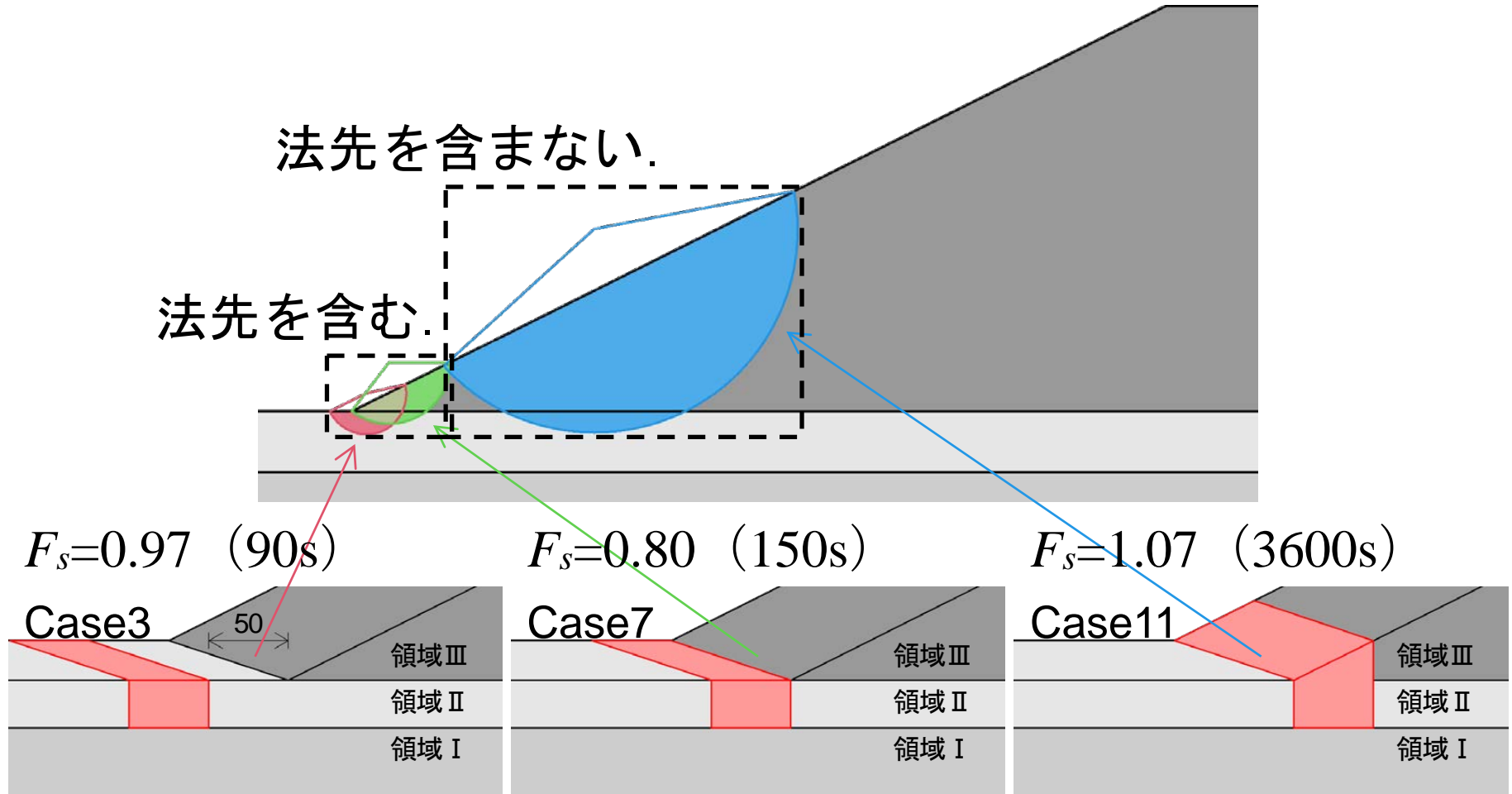
- 基盤排水工の設置位置の違いによる安全率 F_s の経時変化の比較



- 模型実験結果と同様に、基盤排水工を川裏側に設けた場合、すべり破壊を抑制できない。

安定解析の結果

- ・ 基盤排水工の設置位置の違いによる円弧すべりモードの比較



- ・ 法先での小規模すべりを抑制する観点から、基盤排水工を堤体法尻部に設けることが重要。

本発表の構成

目的：基盤排水工の設置位置の効果検証

1. 連続配置の基盤排水工の効果検証

1-1. 二次元模型実験

1-2. 二次元浸透流解析

1-3. 安定解析

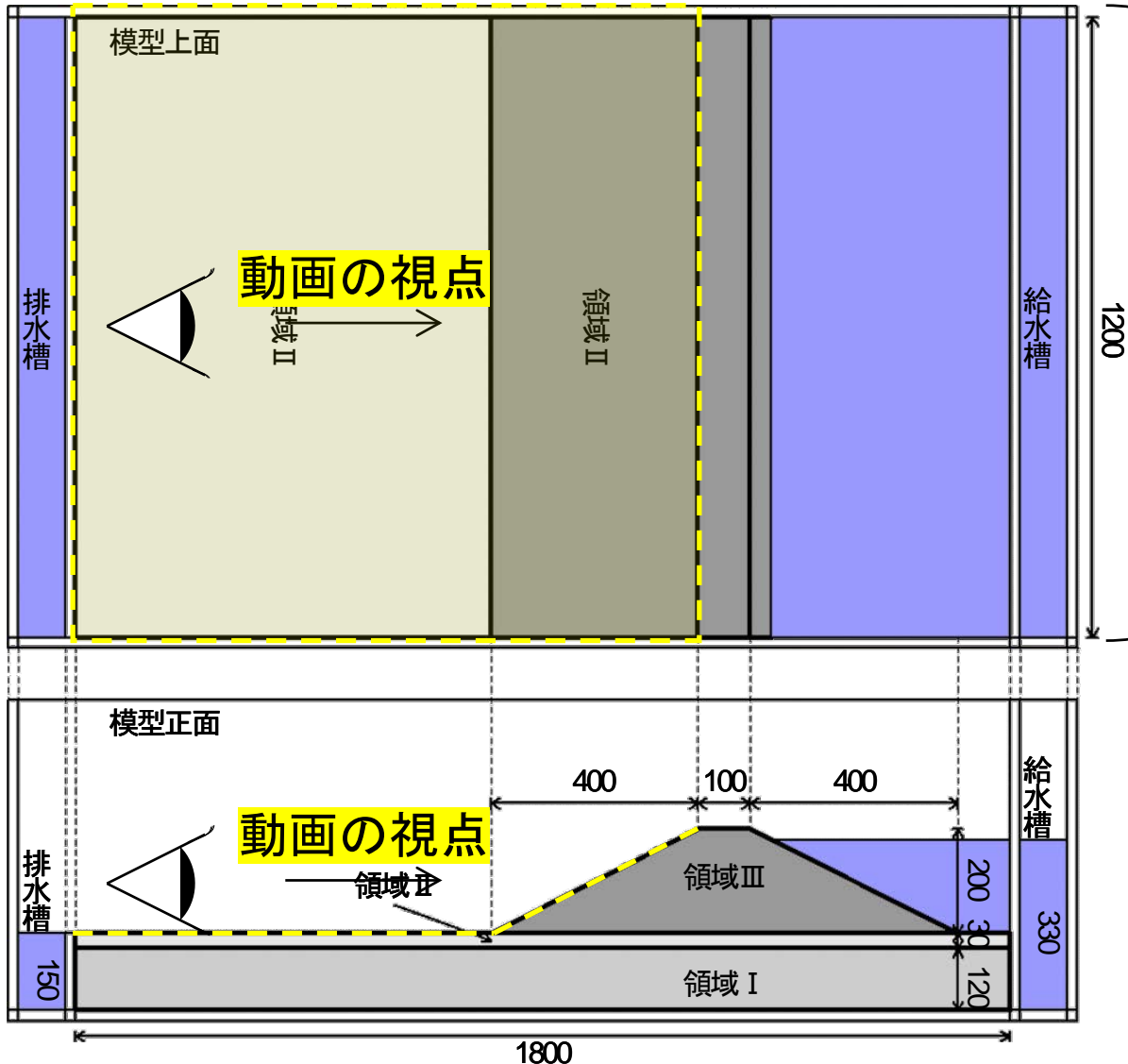
2. 離散配置の基盤排水工の効果検証

2-1. 三次元模型実験

2-2. 三次元浸透流解析

三次元模型実験の概要


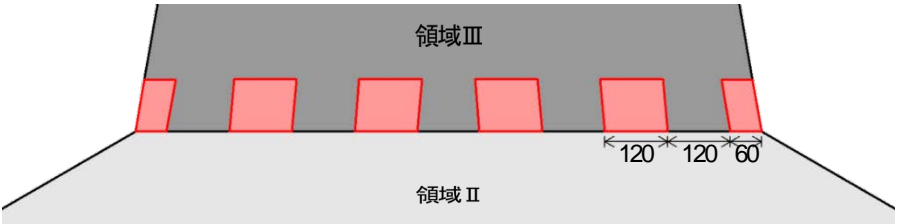
・ 模型地盤の寸法



二次元模型地盤の
奥行き10倍.

- ・ 各領域の地盤材料
二次元模型実験と同一.
- ・ 模型実験の手順
二次元模型実験と同一.

三次元模型実験の概要

3D-Case	基盤排水工		終了時崩壊度
	配置	規模	
1			越流
2	連続配置	50mm	9割
3	離散配置	50mm	9割
4	連続配置 	100mm	0割
5	離散配置 	100mm	4割

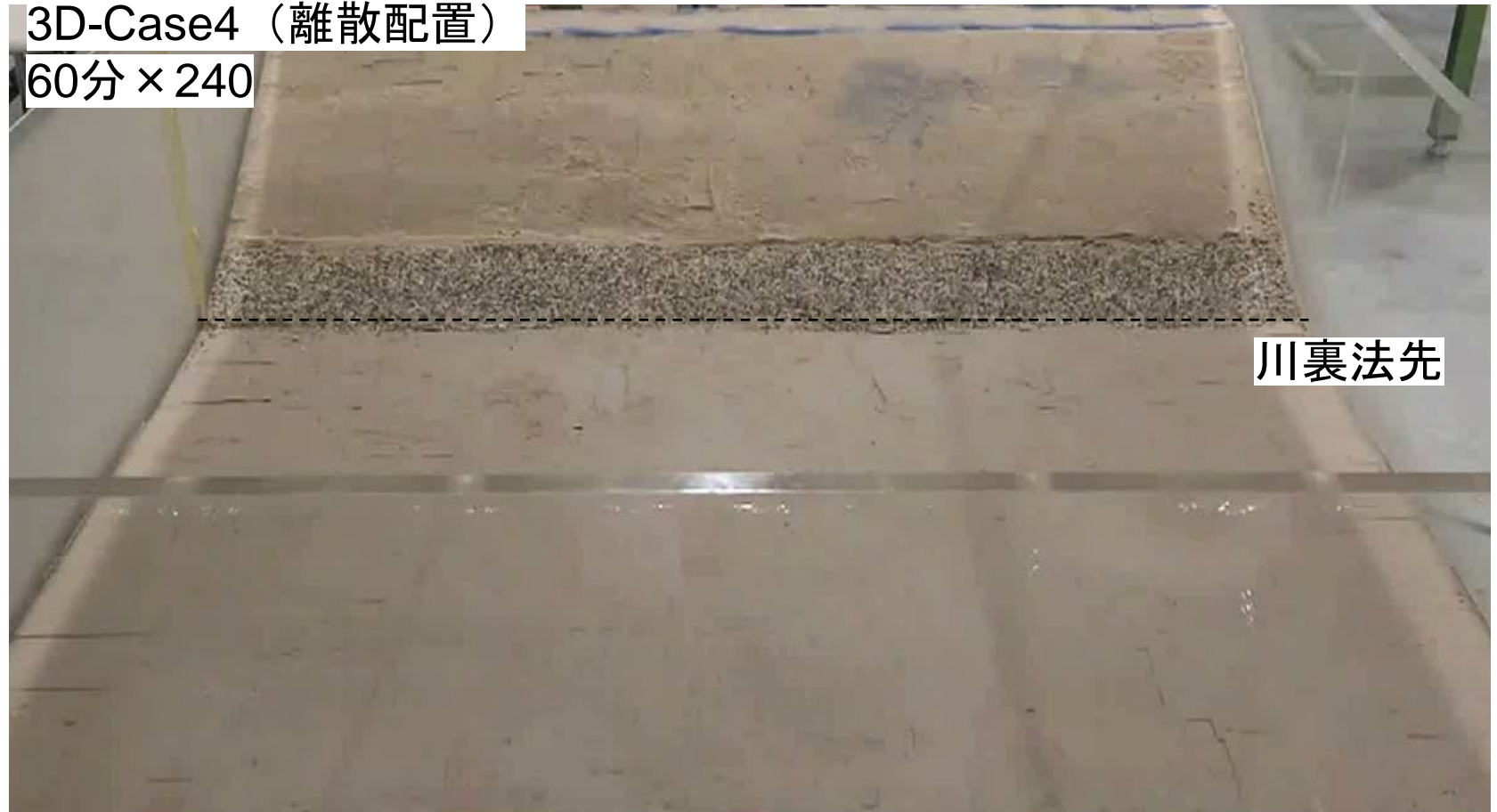
- 基盤排水工を連続配置で設けた場合、変状が起こらないことを踏まえて離散配置で設けた場合の変状抑制効果の検証。

三次元模型実験の結果

- ・ 連続配置で設けた基盤排水工の変状抑制効果の検証

3D-Case4 (離散配置)

60分 × 240



- ・ 基盤排水工を連続配置で設けた場合，十分に規模が大きければ変状を抑制する。

三次元模型実験の結果

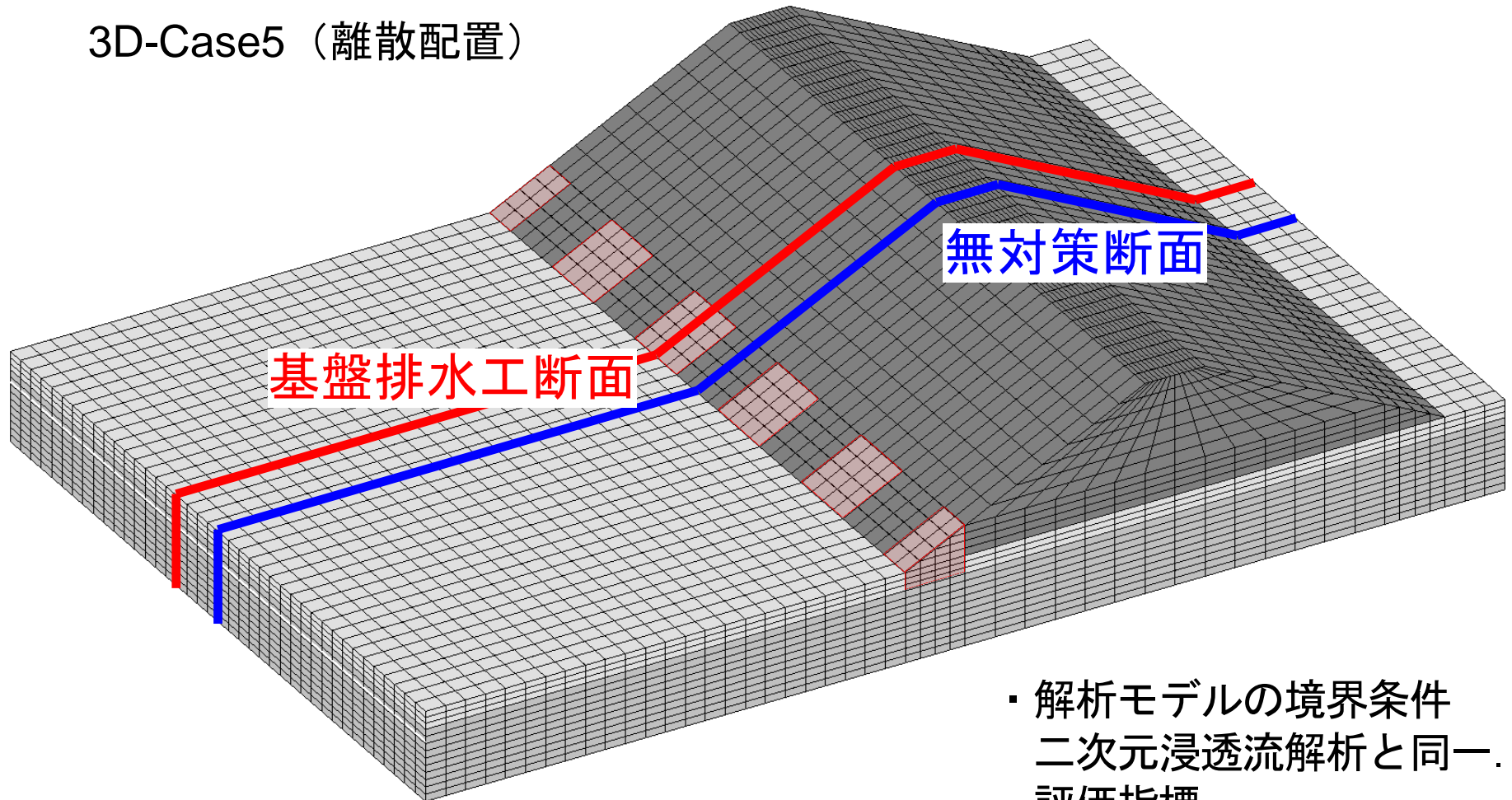
- ・ 離散配置で設けた基盤排水工の変状抑制効果の検証



- ・ 基盤排水工を離散配置で設けた場合、基盤排水工と堤体の境界部が、基盤排水工からの排水によって流出する。

三次元浸透流解析の概要

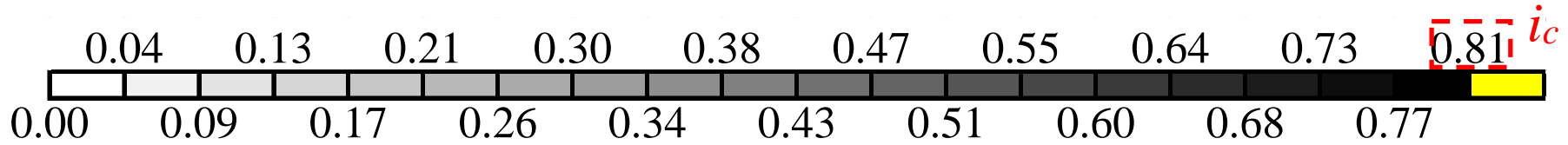
- 解析モデルの切断面
3D-Case5（離散配置）



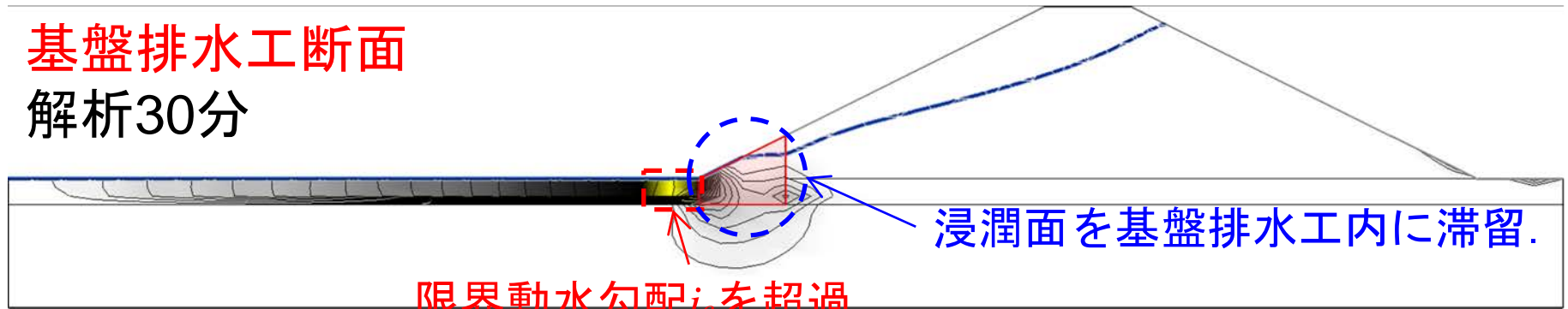
- 解析モデルの境界条件
二次元浸透流解析と同一.
- 評価指標
二次元浸透流解析と同一.

三次元浸透流解析の結果

- 離散配置で設けた基盤排水工の動水勾配 i_v の分布の検証

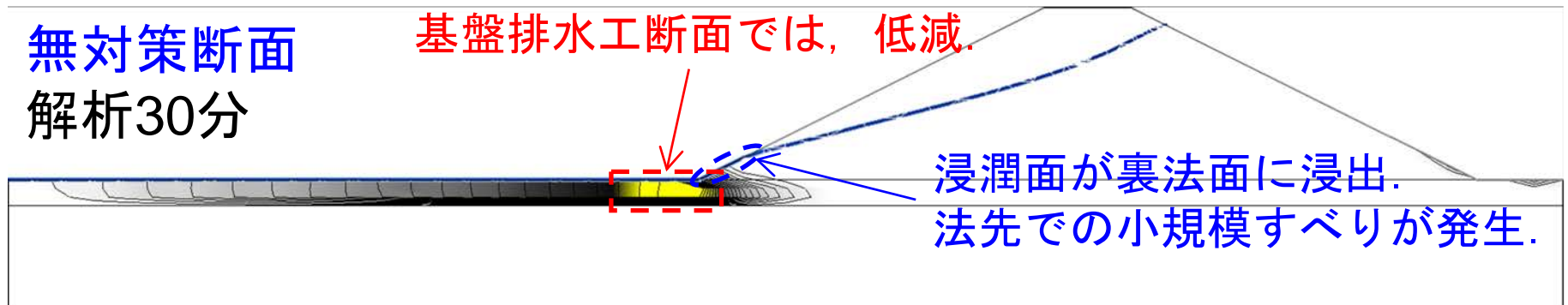


基盤排水工断面 解析30分



限界動水勾配 i_c を超過.
基盤排水工断面では, 低減.

無対策断面 解析30分

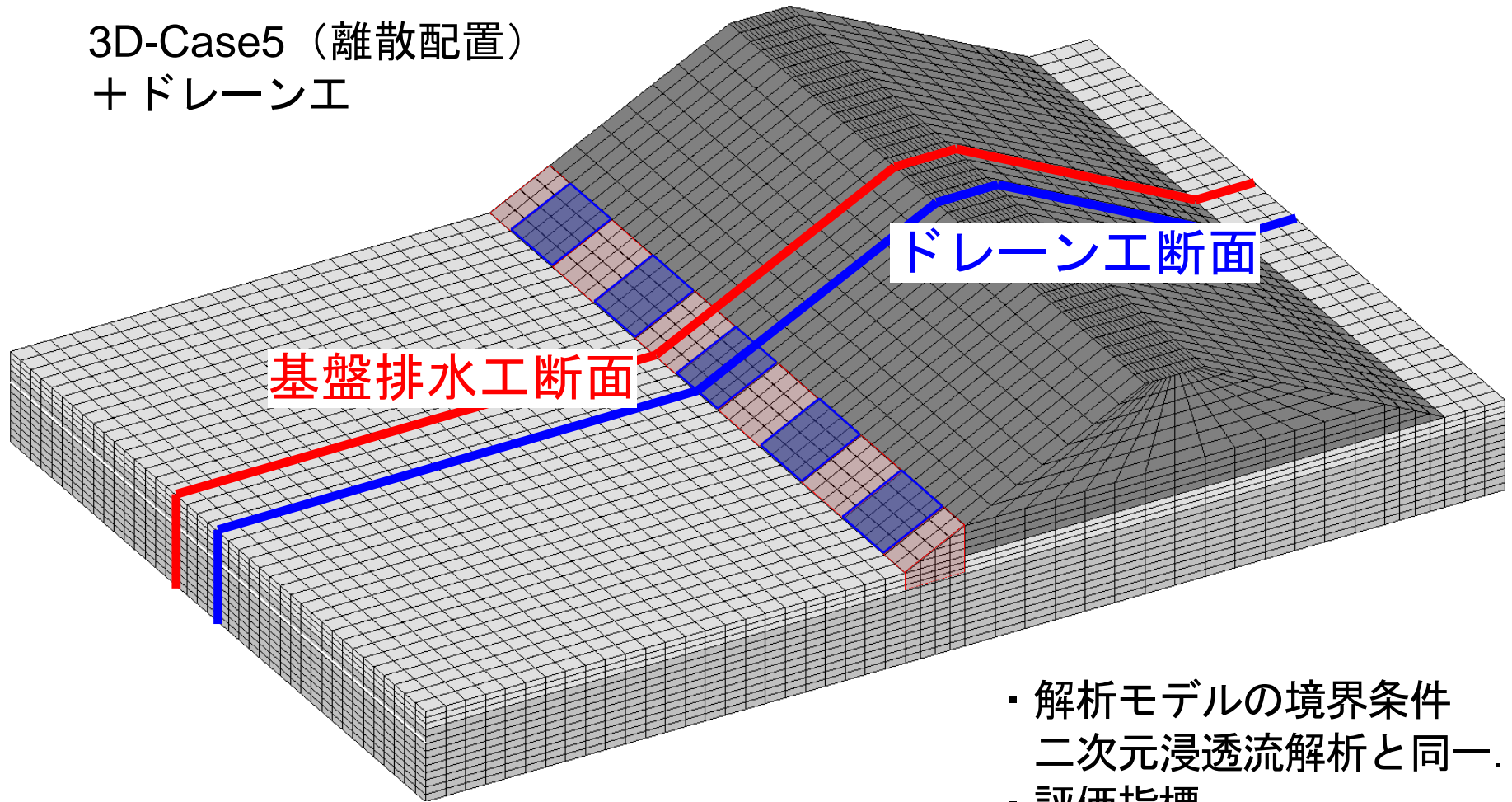


- 模型実験結果と同様に, **無対策断面**では, 法先での小規模すべりの危険性が高い.

三次元浸透流解析の概要

- 解析モデルの切断面

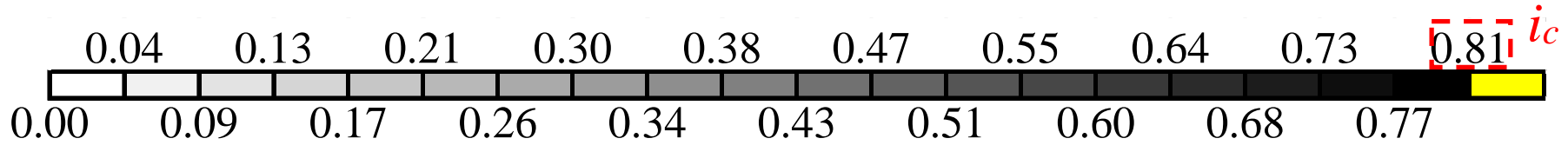
3D-Case5 (離散配置)
+ ドレーン工



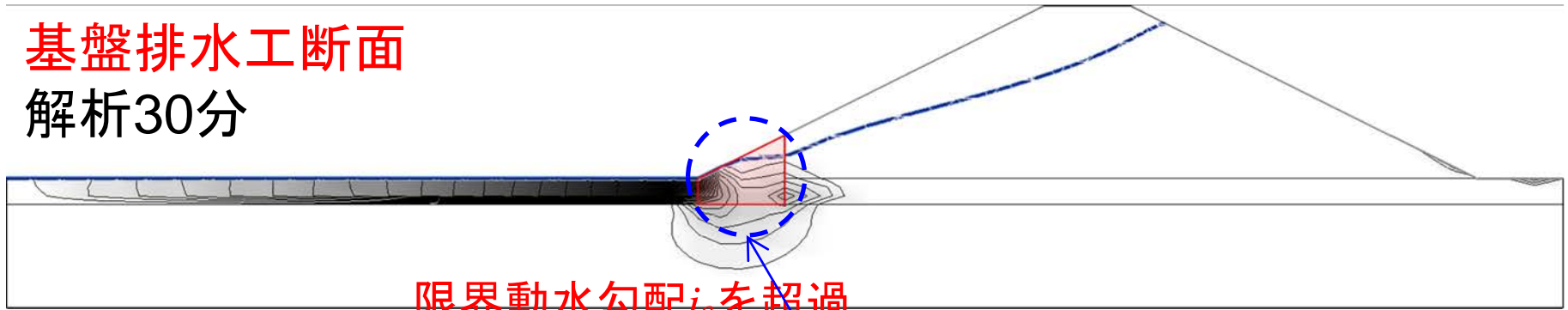
- 解析モデルの境界条件
二次元浸透流解析と同一.
- 評価指標
二次元浸透流解析と同一.

三次元浸透流解析の結果

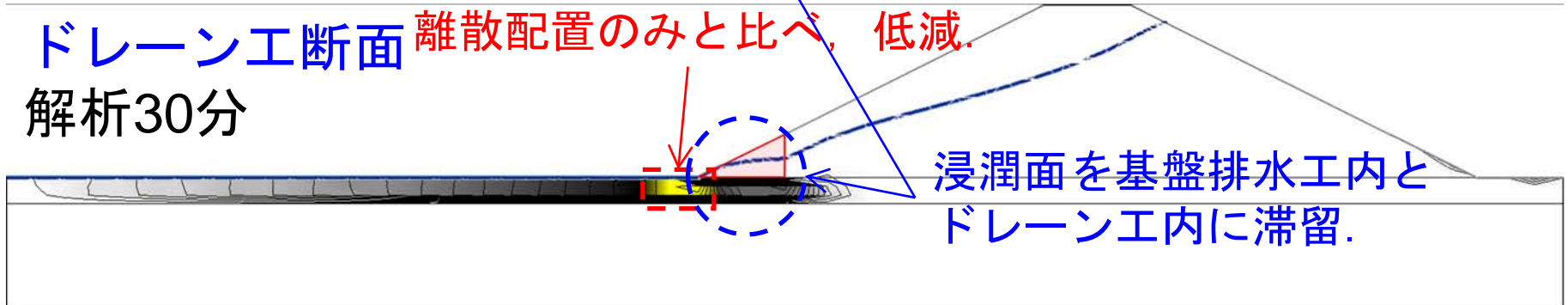
- 離散配置+ドレーン工を設けた基盤排水工の動水勾配 i_v の分布の検証



基盤排水工断面
解析30分



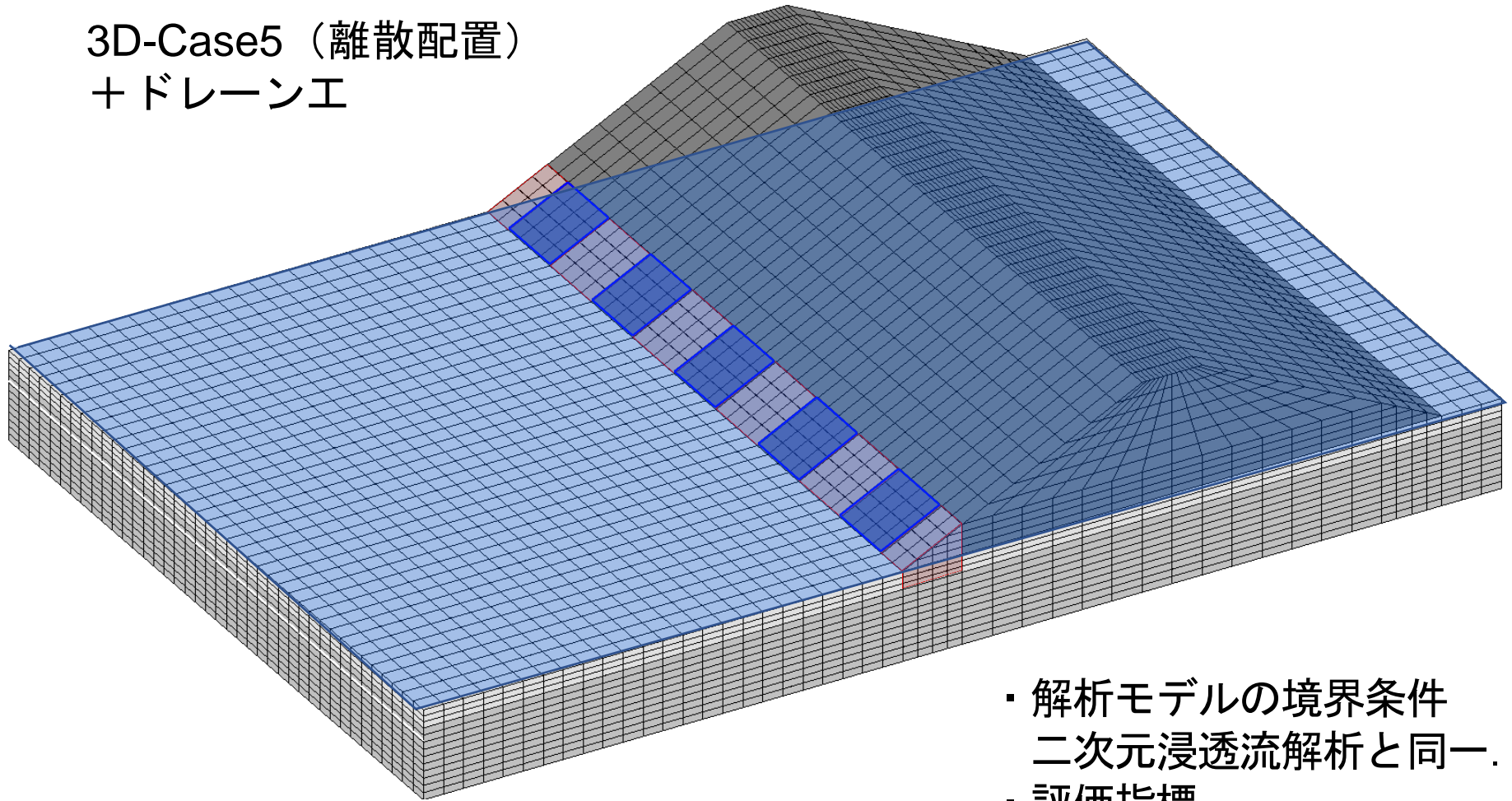
ドレーン工断面
解析30分



- ドレーン工断面において、盤ぶくれと噴砂を低減するとともに、法先での小規模すべりを抑制できる.

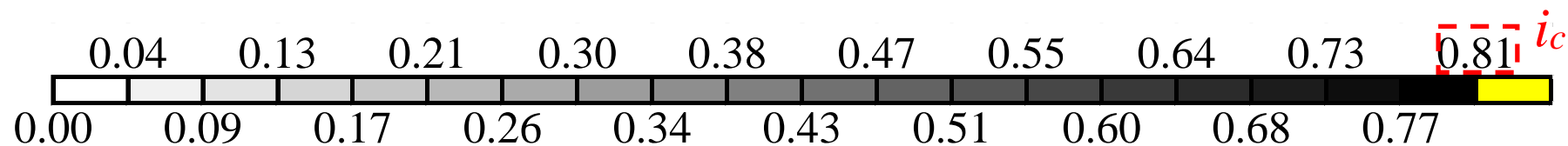
三次元浸透流解析の概要

- ・ 解析モデルの切断面
3D-Case5（離散配置）
+ ドレーン工

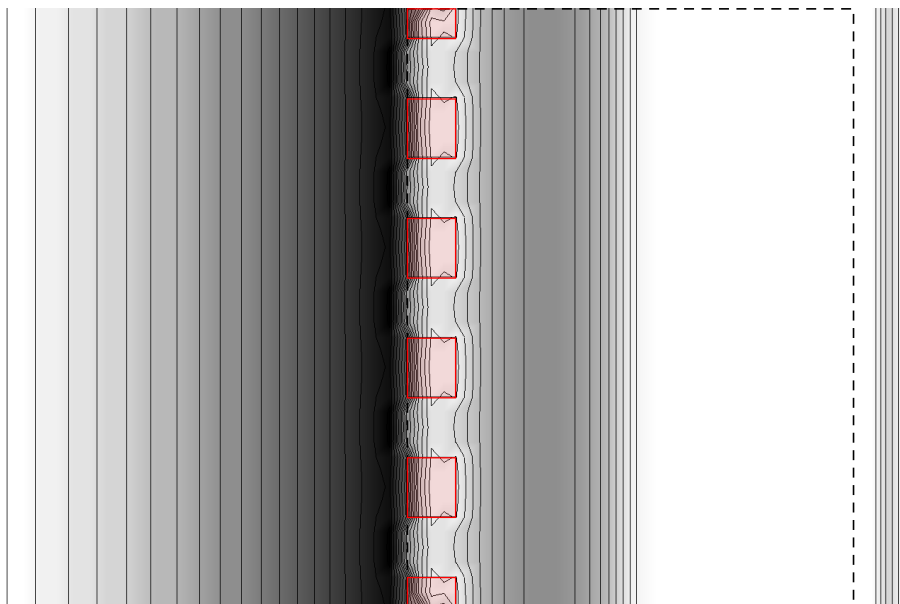


- ・ 解析モデルの境界条件
二次元浸透流解析と同一.
- ・ 評価指標
二次元浸透流解析と同一.

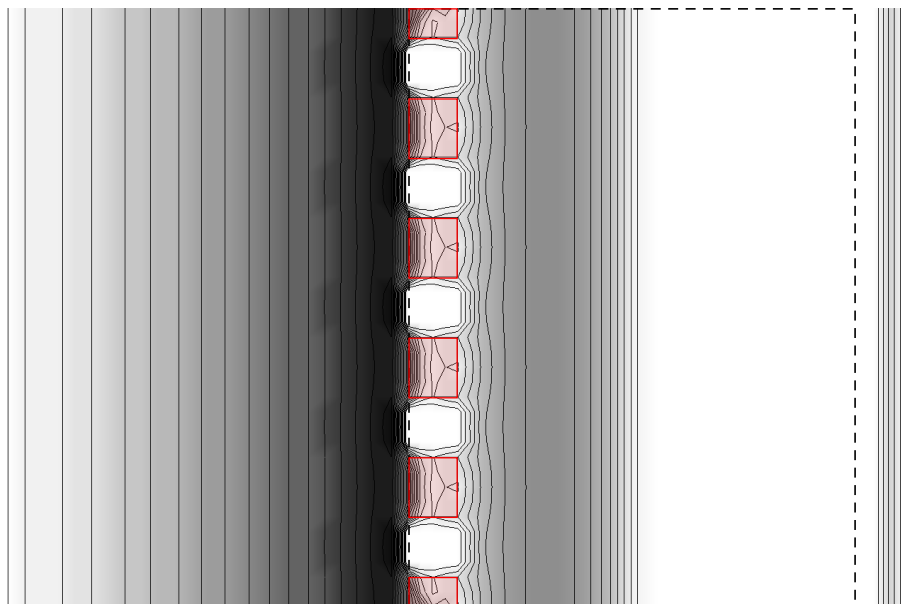
・ 地表面上の動水勾配 i_v の分布の検証



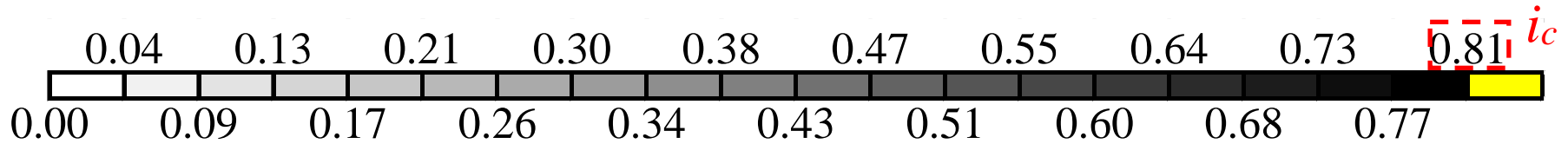
3D-Case5 (離散配置)
解析5分



離散配置+ドレーン工
解析5分

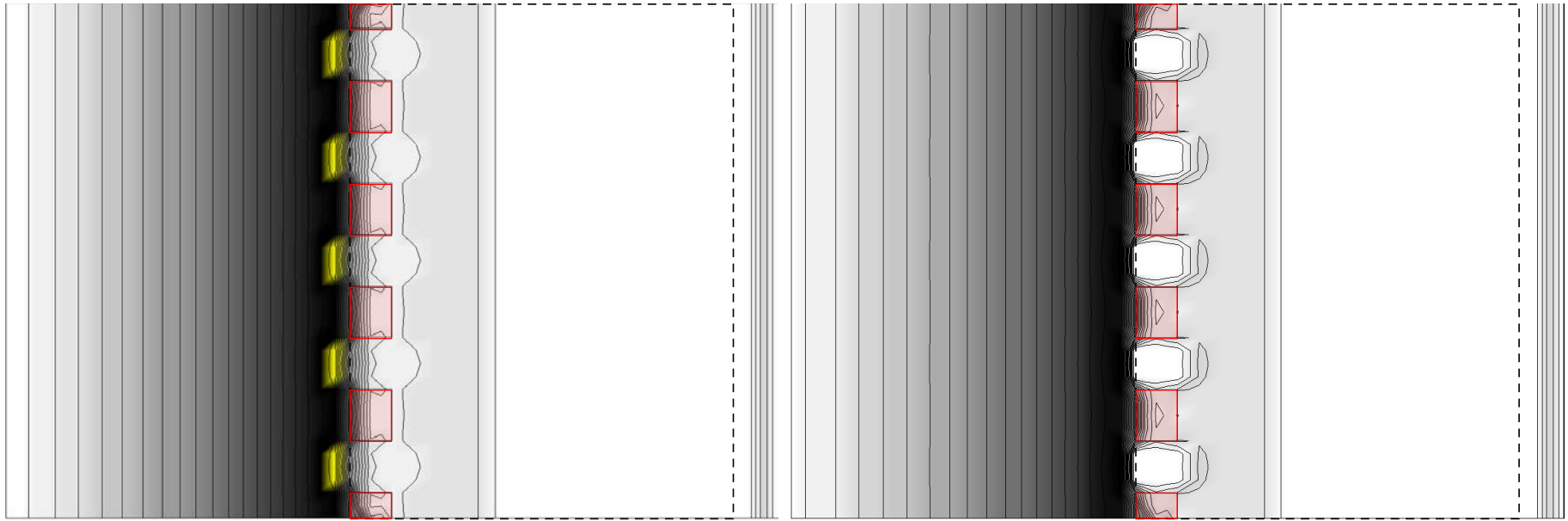


・ 地表面上の動水勾配 i_v の分布の検証

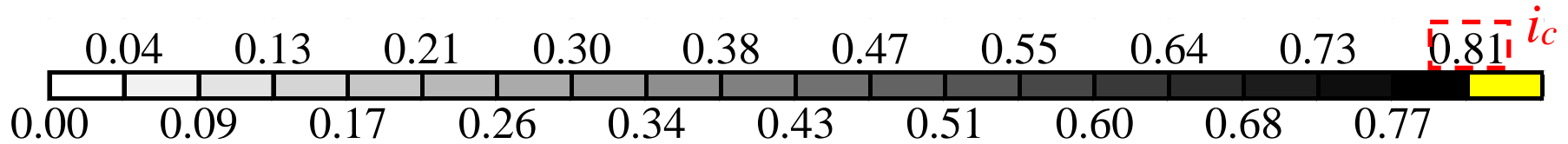


3D-Case5 (離散配置)
解析10分

離散配置+ドレーン工
解析10分

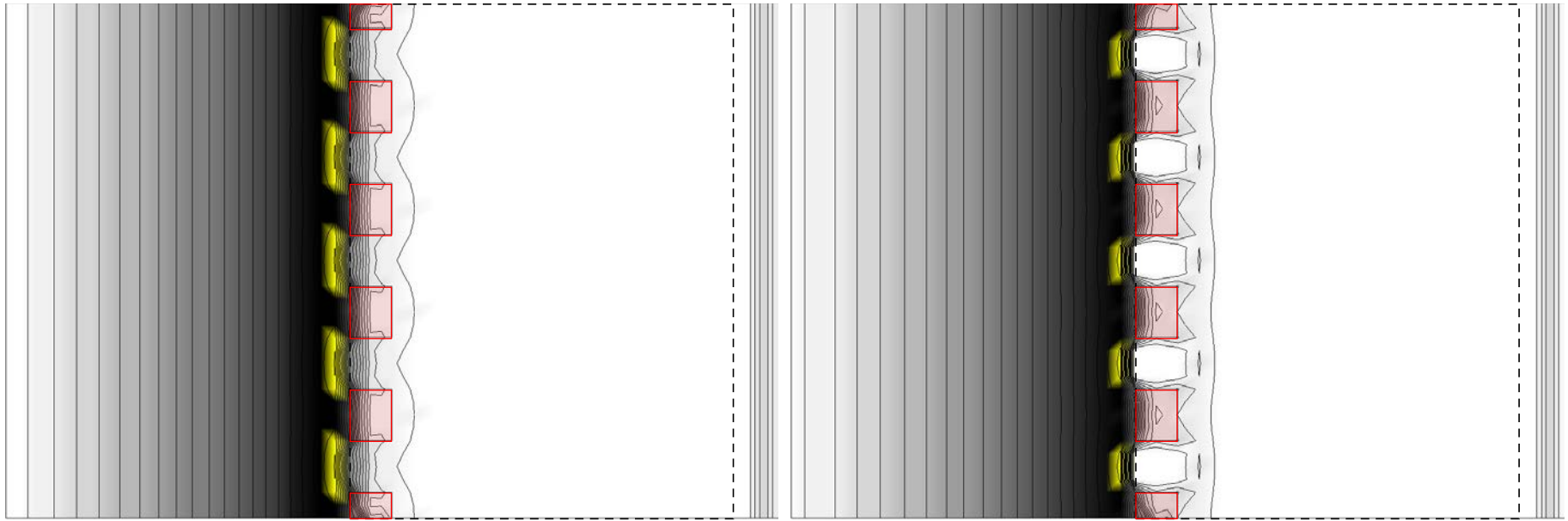


- ・ 地表面上の動水勾配 i_v の分布の検証

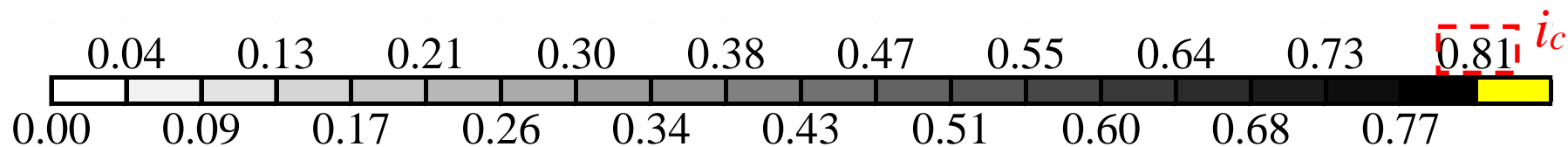


3D-Case5 (離散配置)
解析15分

離散配置+ドレーン工
解析15分

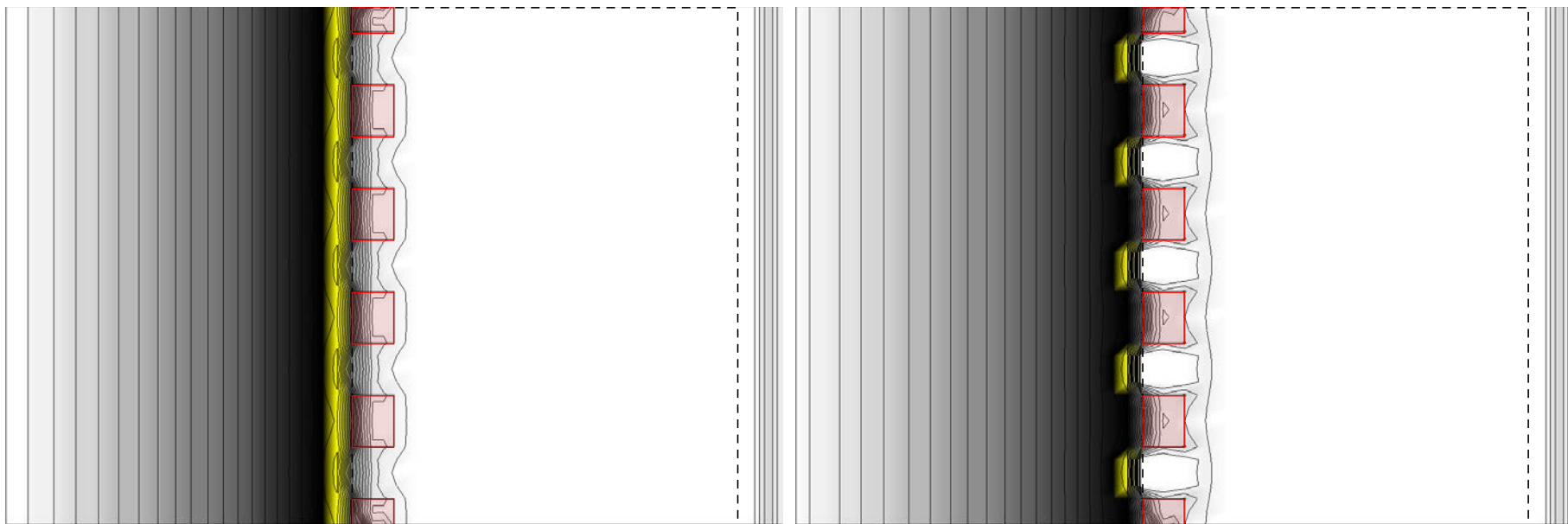


- ・ 地表面上の動水勾配 i_v の分布の検証

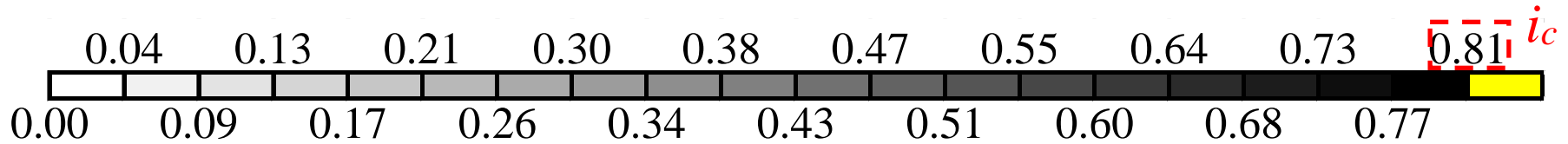


3D-Case5 (離散配置)
解析20分

離散配置+ドレーン工
解析20分

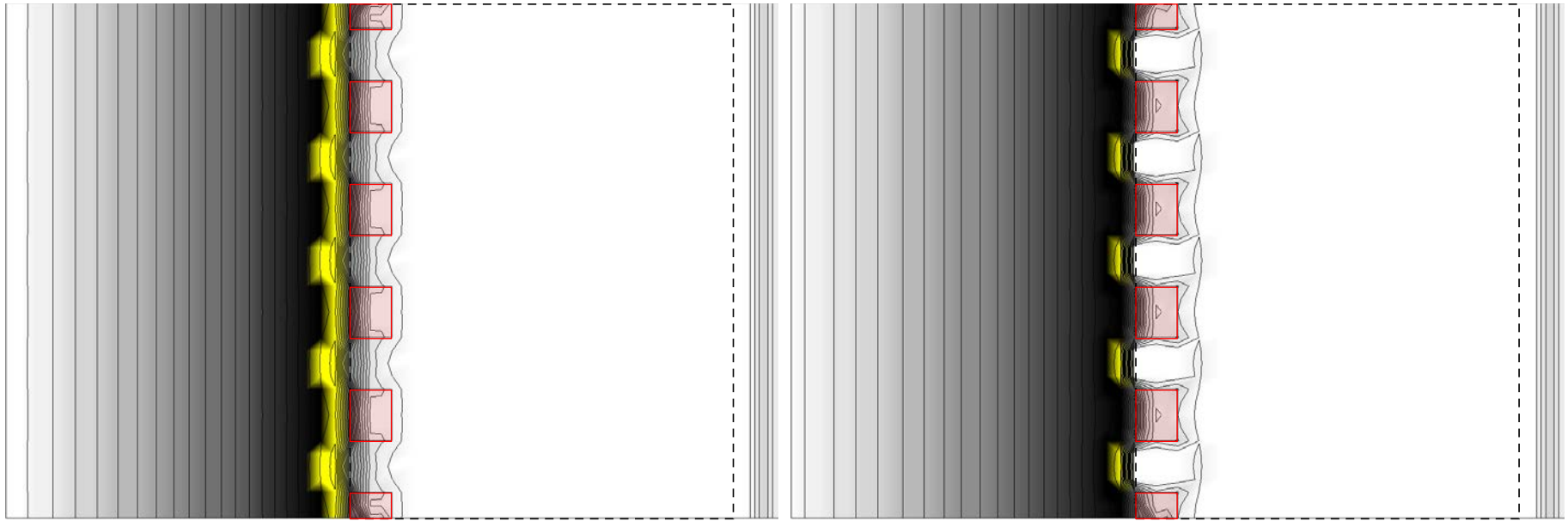


- ・ 地表面上の動水勾配 i_v の分布の検証

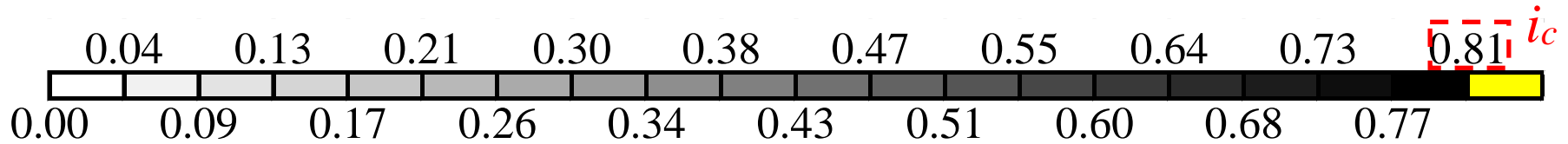


3D-Case5 (離散配置)
解析30分

離散配置+ドレーン工
解析30分

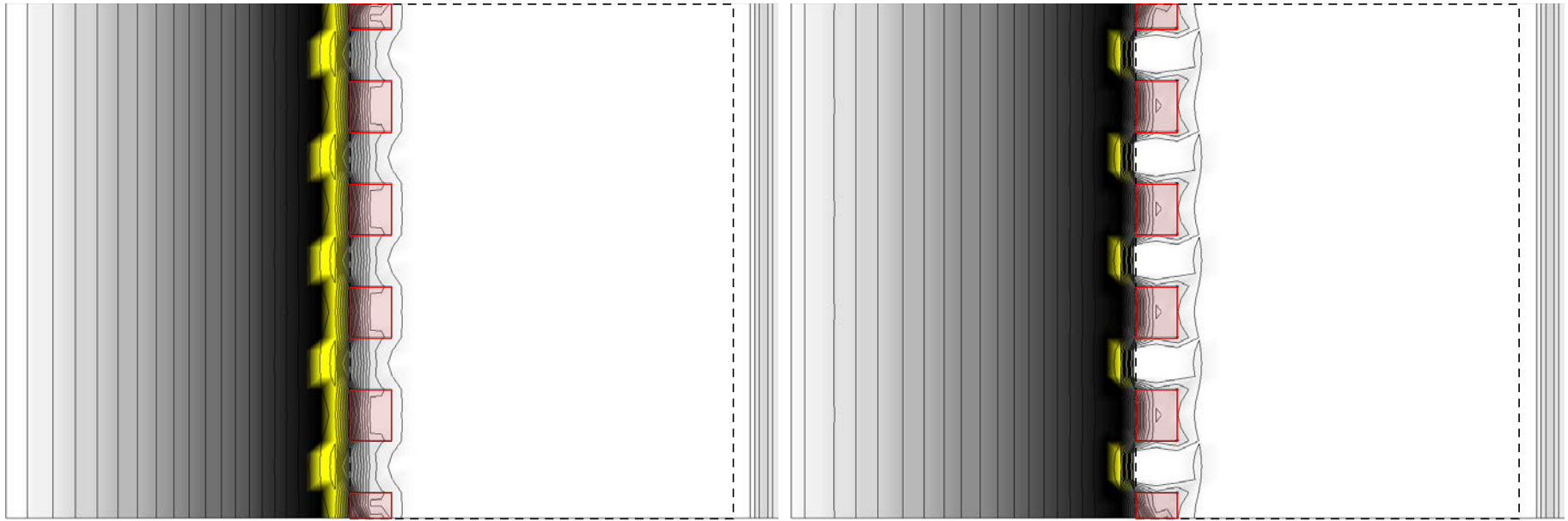


- ・ 地表面上の動水勾配 i_v の分布の検証



3D-Case5 (離散配置)
解析60分

離散配置+ドレーン工
解析60分



結論

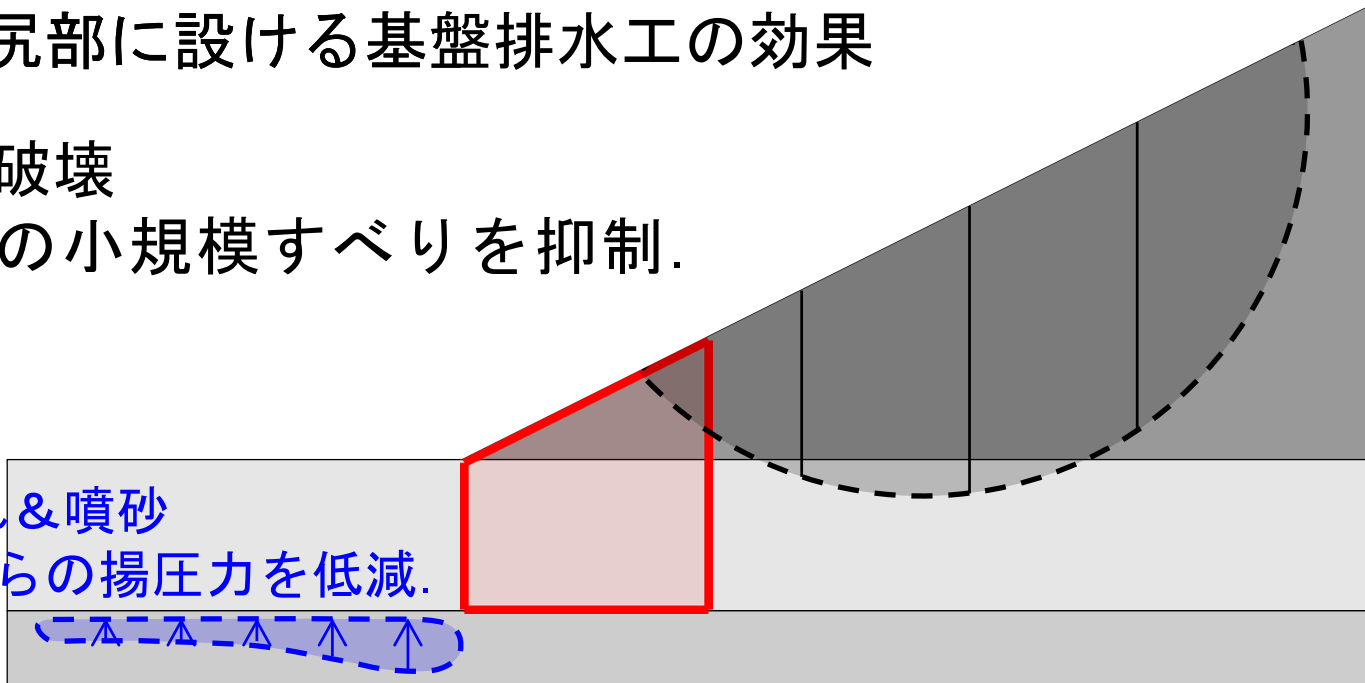
- ・ 堤体法尻部に設ける基盤排水工の効果

- ✓ すべり破壊

法先での小規模すべりを抑制.

- ✓ 盤ぶくれ&噴砂

透水層からの揚圧力を低減.



※基盤排水工を離散配置で設ける場合には、堤体内浸透を低減するために、ドレーン工を連続配置する必要がある。

河川堤防の浸透対策として、
堤体法尻部に設ける基盤排水工が効果的。

今回の講演の内容

- 浸透に伴う河川堤防の決壊と対策
～模型実験による検討～
- 越水に伴う河川堤防の決壊と対策
～模型実験による検討～

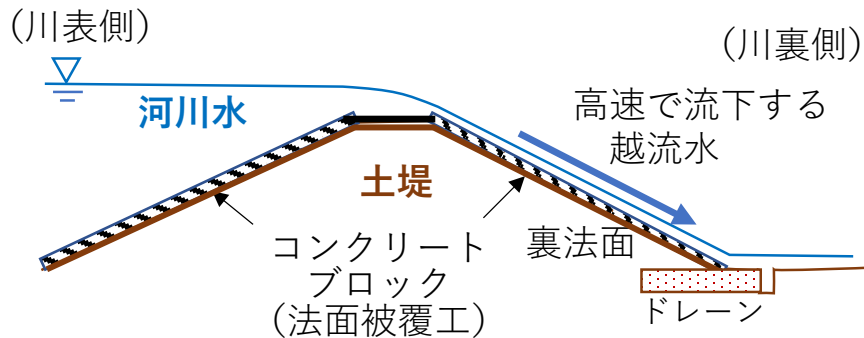
背景

近年豪雨災害の激甚化に伴い、越流による河川堤防の決壊が頻発。

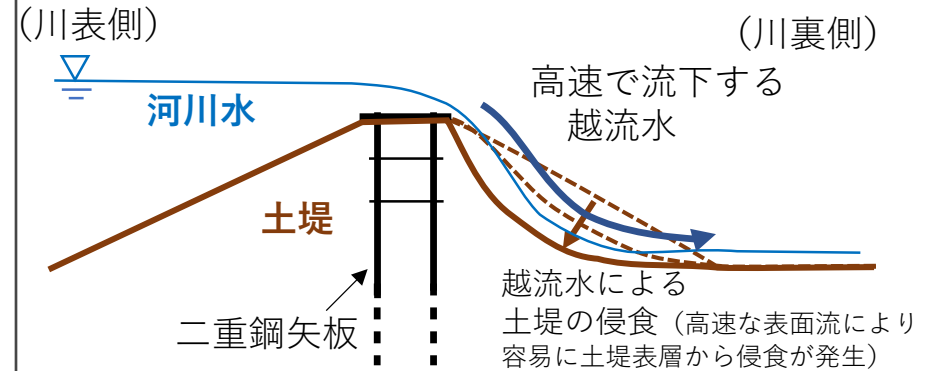
越流が発生した場合においても決壊するまでの時間を少しでも長くするための構造の「**粘り強い河川堤防**」の設計が急務。

表面被覆型や自立型など様々な対策工の検討が行われている。

表面被覆型



自立型



以下の内容の一部は

岡本・夏目・小高・李・松本・山上(2024): 堤防法尻侵食に伴う越流水の流れ構造の変化と法尻保護工の効果に関する実験的研究, 水工学講演会, 富山(12月).

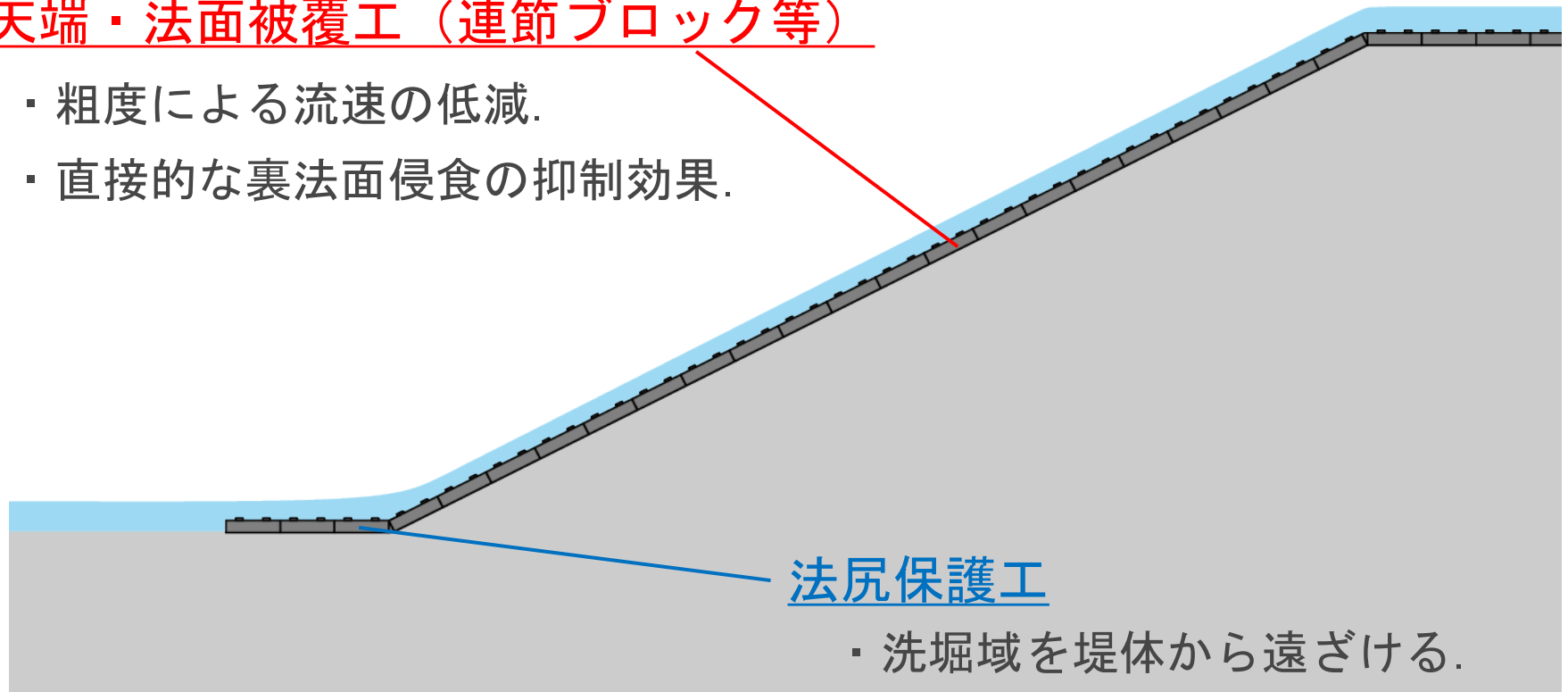
で発表

背景

表面被覆型の対策工

天端・法面被覆工（連節ブロック等）

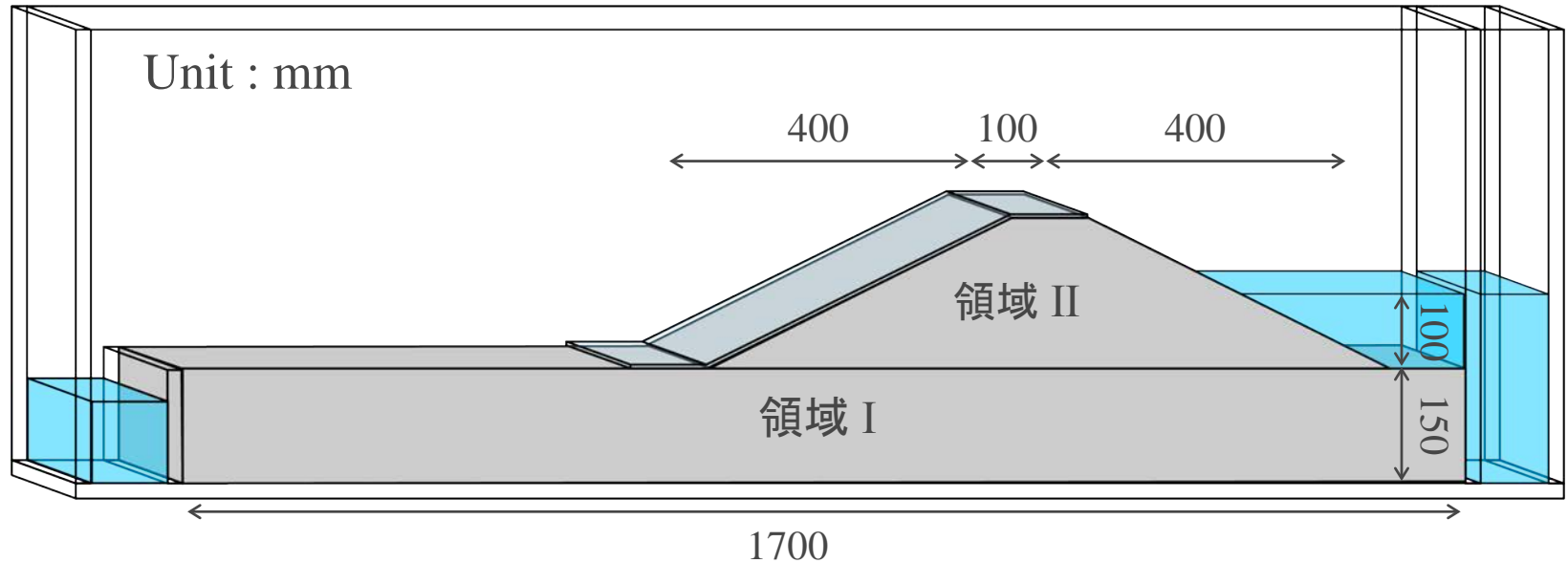
- ・ 粗度による流速の低減.
- ・ 直接的な裏法面侵食の抑制効果.



越流侵食に対して一定の効果が期待されるものの、
被覆工を施した堤体内部で発生する現象については明らかでない。

実験概要

・ 模型地盤の寸法



・ 各領域の地盤材料

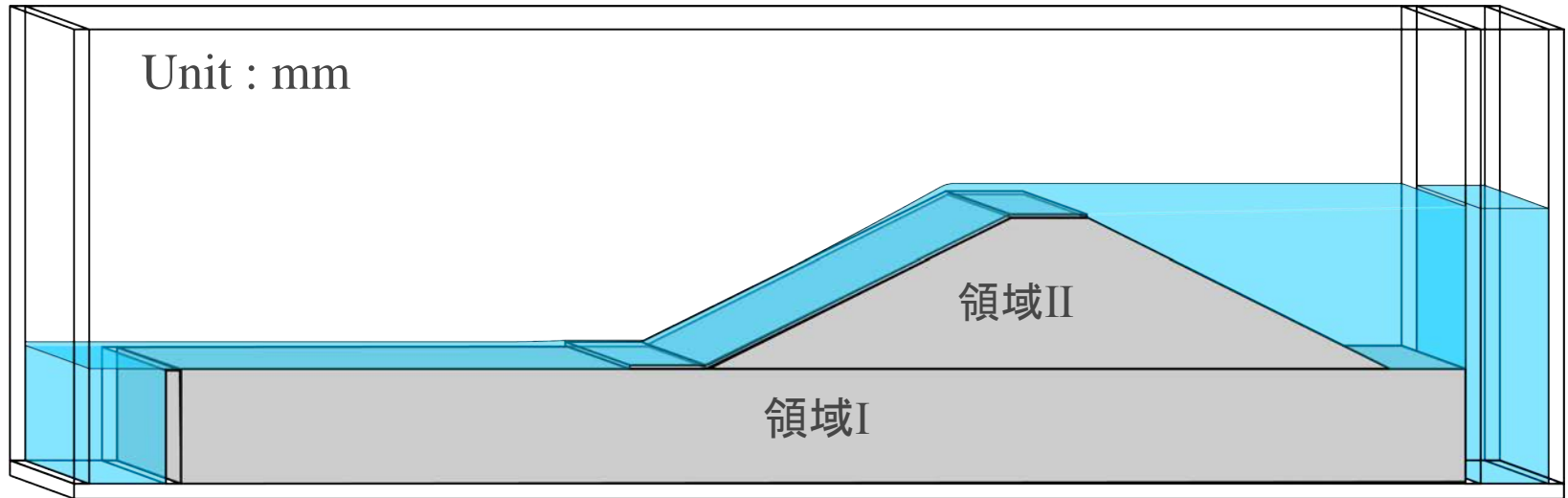
領域 I	領域 II
8号砂 ($e=1.06, k=3.98 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)	

・ 被覆材料

表面をやすりで加工したアクリル板を用い、アクリル板の両側に止水ゴムを貼り、模型の壁面同士で挟み込むようにして固定。

実験概要

・ 模型地盤の寸法



・ 模型実験の手順

実験準備

1. すべての地盤材料の含水比を4%に調整し，模型地盤を作製する.
2. 給水槽の水位を250mm，排水槽の水位を100mmに100分間保ち，基礎地盤を飽和させる.

実験開始

3. 給水槽の水位を一気に上昇，越流水深10mmで水位を保ちながら越流に伴う堤体の挙動を観察する.

実験概要

・ 実験Case

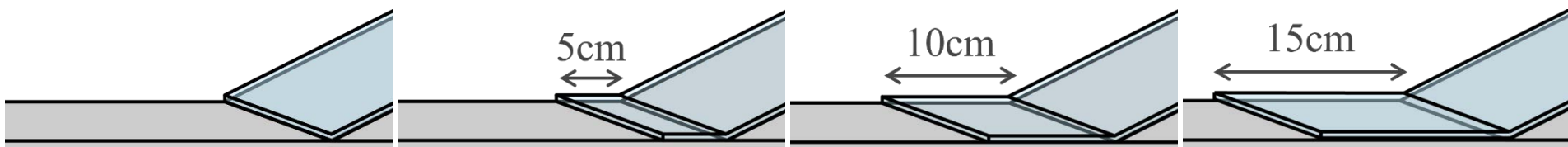
	実験条件	実験内容
Case1	無対策	越流実験
Case2	天端・法面被覆 / 法尻保護工0cm	越流実験 / PIV
Case3	天端・法面被覆 / 法尻保護工5cm	越流実験 / PIV
Case4	天端・法面被覆 / 法尻保護工10cm	越流実験 / PIV
Case5	天端・法面被覆 / 法尻保護工15cm	越流実験 / PIV
Case6	天端・法面被覆 / 法尻保護工0cm, ドレーン工	越流実験 / 浸透流解析
Case7	天端・法面被覆 / 法尻保護工0cm, 三面張り	越流実験 / 浸透流解析

Case2 保護工0cm

Case3 保護工5cm

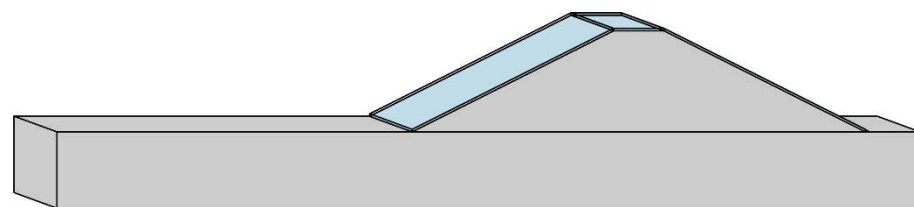
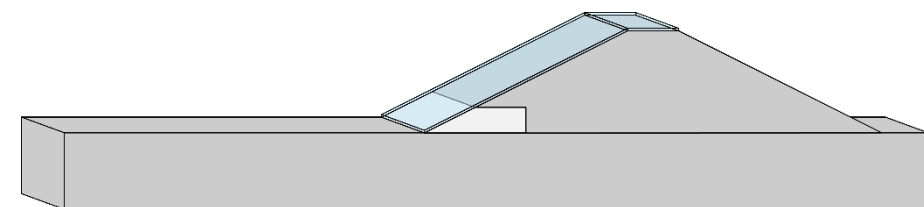
Case4 保護工10cm

Case5 保護工15cm



Case6 (天端・法面被覆・法尻保護工0cm, ドレーン工)

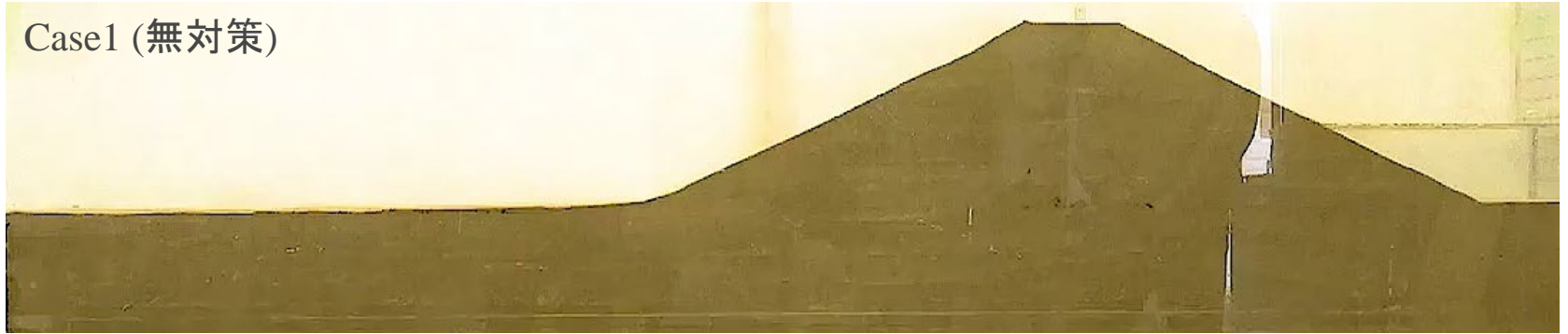
Case7 (天端・法面被覆・法尻保護工0cm, 三面張り)



実験結果 (Case1, Case2)

- ・ 表面被覆工の耐越流侵食効果の検証

Case1 (無対策)



Case2 (天端・法面被覆 / 法尻保護工0cm)



- Case1 (無対策)では、越流直後、法尻から天端にかけて侵食が進行、最終的に天端が消失し、約20sで決壊へと至った。
 - Case2では、被覆工により堤体法面への侵食は見られないが、基礎地盤が大きく洗堀され、約773sで決壊へと至った。
- 被覆工の設置により決壊までの時間を大幅に延ばすことができる。

実験結果 (Case1, Case2)

Case2 (天端・法面被覆 / 法尻保護工0cm) 検証



越流開始から43s

43s以降

川裏側



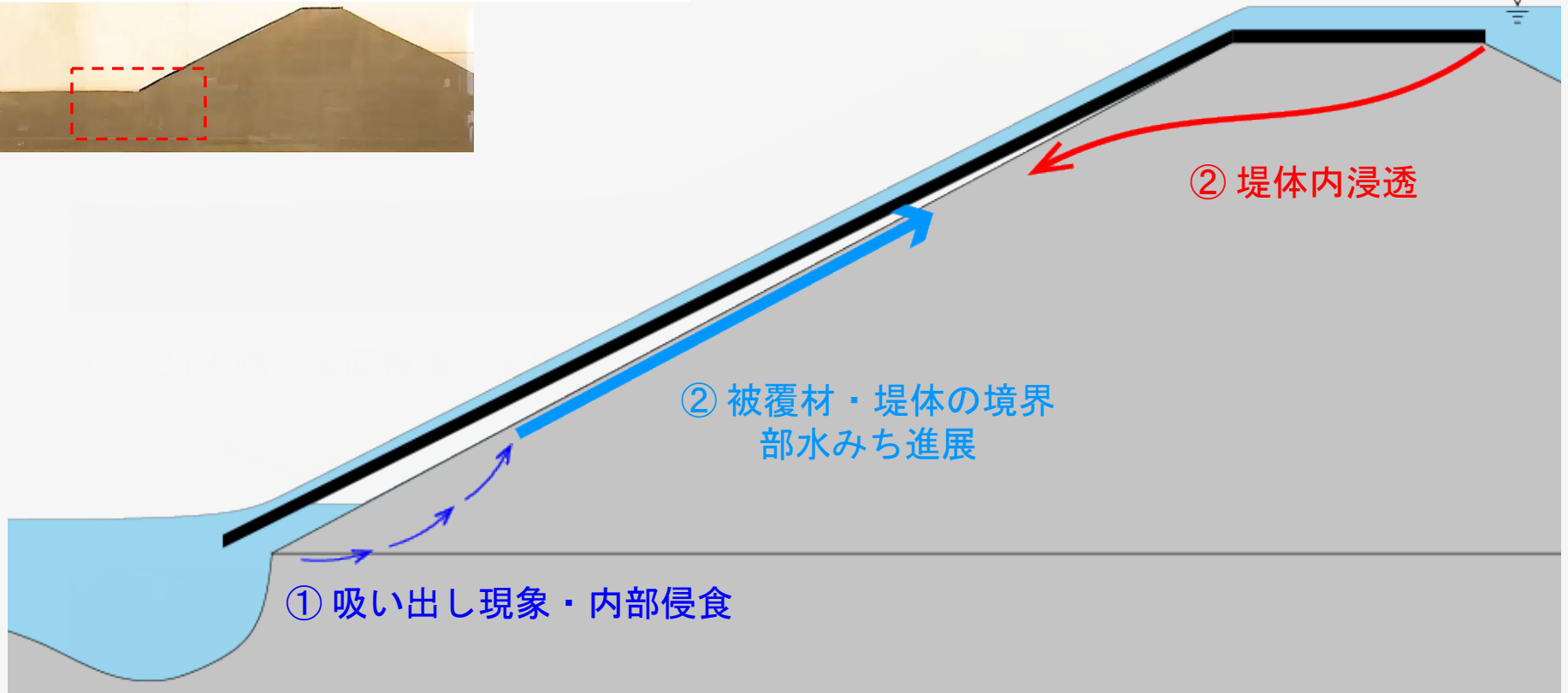
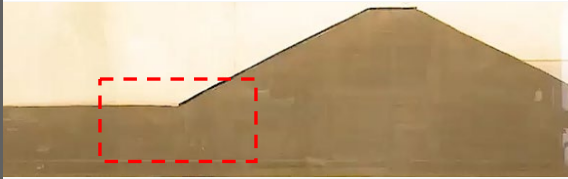
川表側



- 越流開始から43sまでは，川裏側へ向かって基礎地盤の侵食が進行.
- 43s以降，法尻部の吸出しによって堤体土砂が川裏側へと流出し，裏法面被覆材に沿って川表側へと**内部侵食 (backward erosion)**が進行.

実験結果 (Case1, Case2)

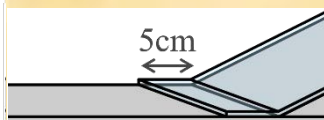
Case2 (天端・法面被覆 / 法尻保護工0cm)



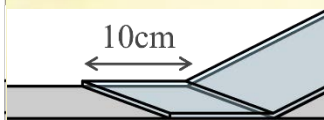
1. 越流水に起因する堤体法尻部の吸い出し現象・内部侵食の発生.
2. 被覆材・堤体の境界部における水みちの進展.
堤体内の浸透と内部侵食で形成された水みちが連通することで崩壊.

実験結果 (Case3, Case4, Case5)

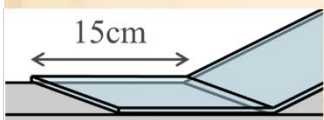
Case3 (天端・法面被覆 / 法尻保護工5cm)



Case4 (天端・法面被覆 / 法尻保護工10cm)



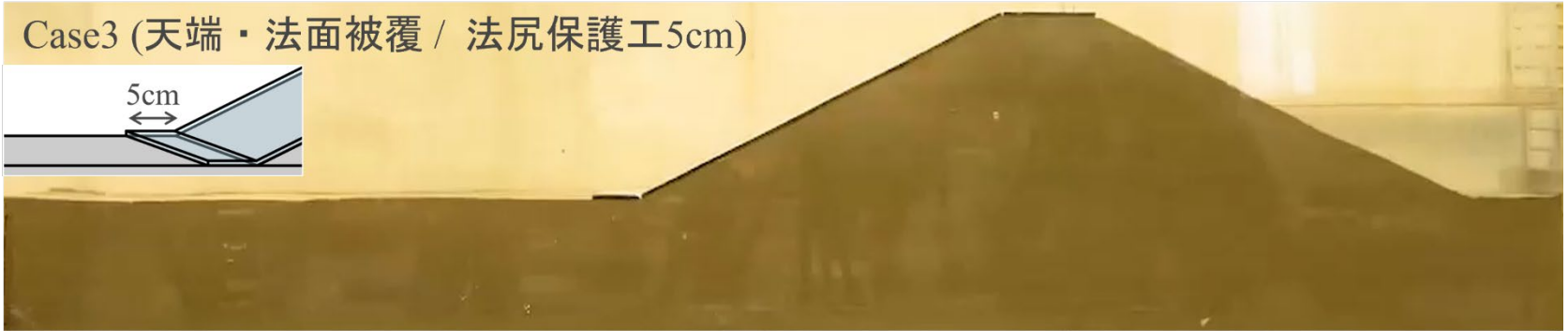
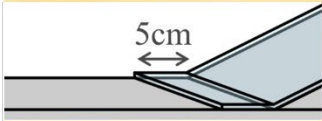
Case5 (天端・法面被覆 / 法尻保護工15cm)



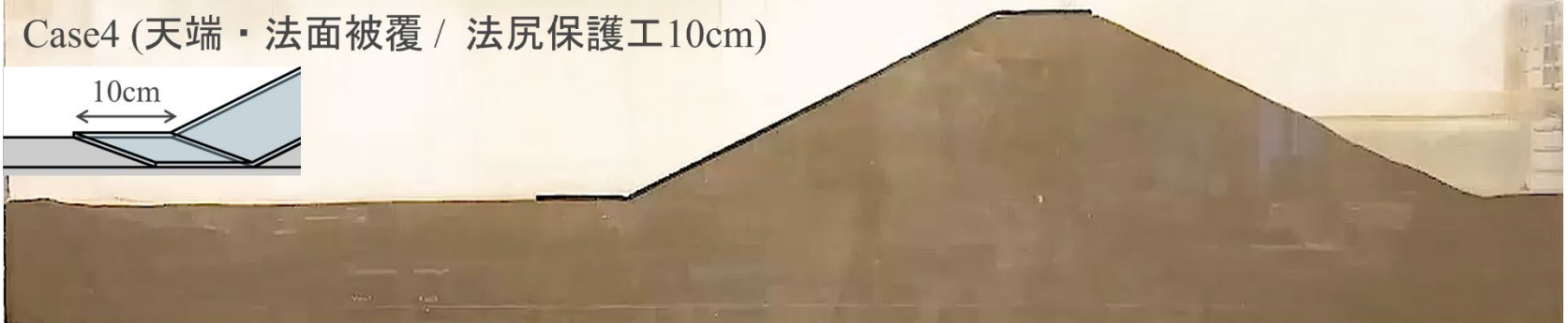
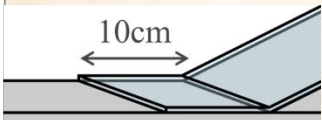
- Case3 (法尻保護工5cm)では、Case2と同様に吸出しによる内部侵食が進行し、最終的に越流開始から約**28min11s**で決壊へと至る。
- Case4 (法尻保護工10cm)では、越流開始から約**41min20s**で決壊へと至る。

実験結果 (Case3, Case4, Case5)

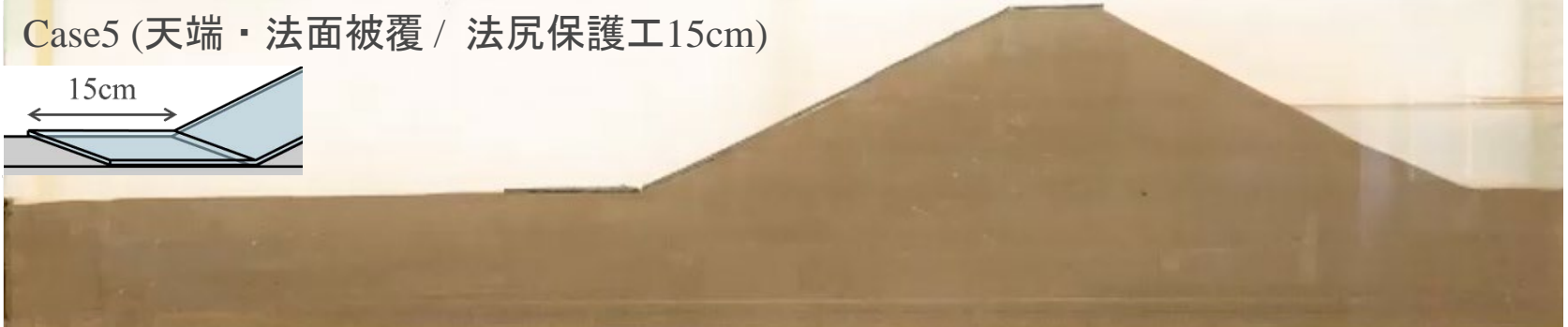
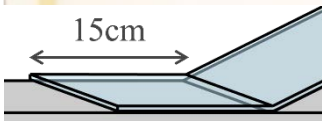
Case3 (天端・法面被覆 / 法尻保護工5cm)



Case4 (天端・法面被覆 / 法尻保護工10cm)



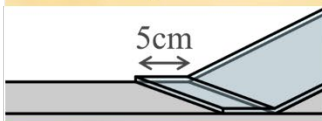
Case5 (天端・法面被覆 / 法尻保護工15cm)



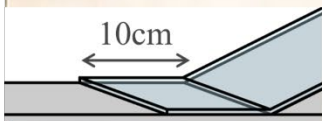
- Case5 (法尻保護工15cm)では、**90min**堤体の変状は見られず。
→ 浸潤面が法面被覆工まで到達.

実験結果 (Case3, Case4, Case5)

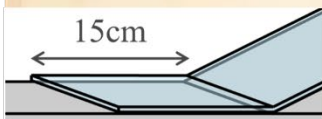
Case3 (天端・法面被覆 / 法尻保護工5cm)



Case4 (天端・法面被覆 / 法尻保護工10cm)

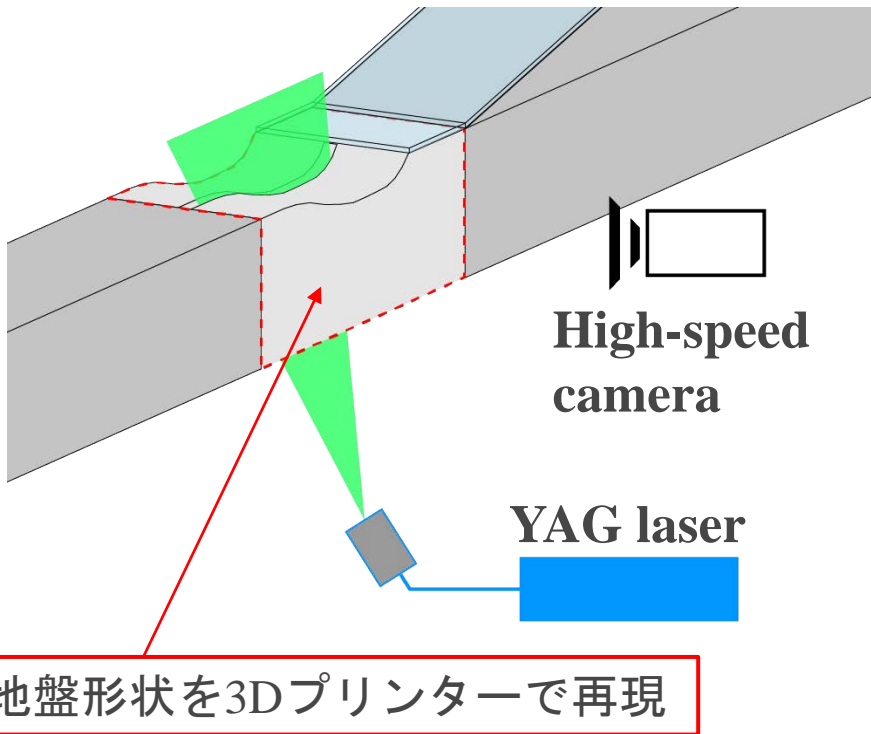


Case5 (天端・法面被覆 / 法尻保護工15cm)



法尻保護工の長さを十分に確保することで、堤体崩壊のトリガーとなる吸い出し・内部侵食を抑制することができる。

PIV概要

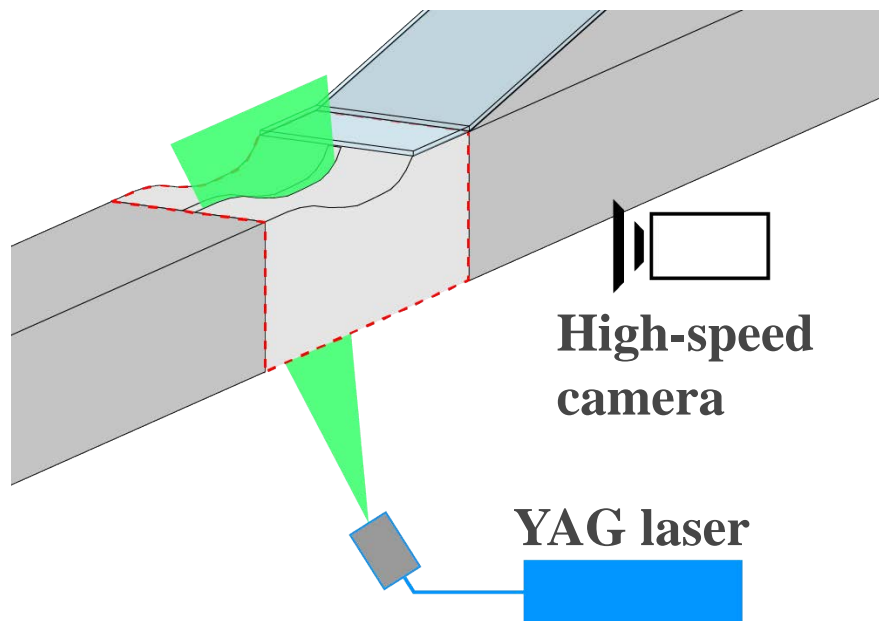


平均断面流速 U_m	22.5 cm/s
フルード数 Fr	0.72
レーザーシート厚さ	2mm
カメラ画素数	1280 × 1024 pixel
撮影領域	約20cm × 20cm

PIV計測の手順

1. 越流侵食実験で得られた地盤形状を3Dプリンターで再現し固定床の堤体を作製.
2. 土槽底面からレーザー光を照射させ、トレーサー粒子を流し通水して洗堀孔内の流れをPIV計測を行う.

実験概要 (Case2)



平均断面流速 U_m	22.5 cm/s
フルード数 Fr	0.72
レーザーシート厚さ	2mm
カメラ画素数	1280 × 1024 pixel
撮影領域	約20cm × 20cm

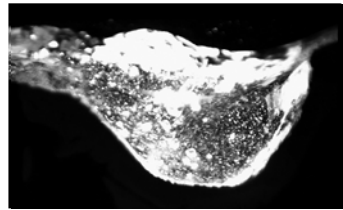
PIV計測Case

	実験条件	地盤形状
Case2	天端・法面被覆 / 法尻保護工0cm	$t = 10s, t = 753s$ (崩壊直前)
Case3	天端・法面被覆 / 法尻保護工5cm	$t = 10s$
Case4	天端・法面被覆 / 法尻保護工10cm	$t = 10s$
Case5	天端・法面被覆 / 法尻保護工15cm	$t = 10s$

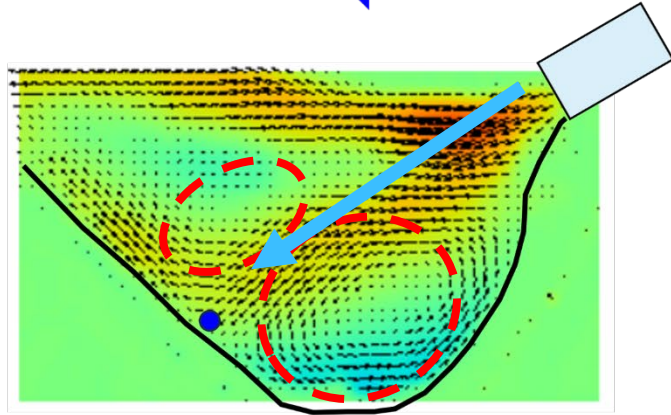
PIV結果 Case2

時間平均主流速 U のコンター図と流速ベクトル(U, V)

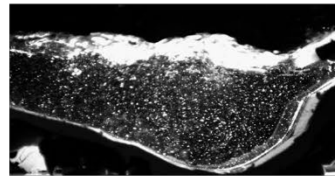
Case2 (保護工0cm) : $t = 10s$



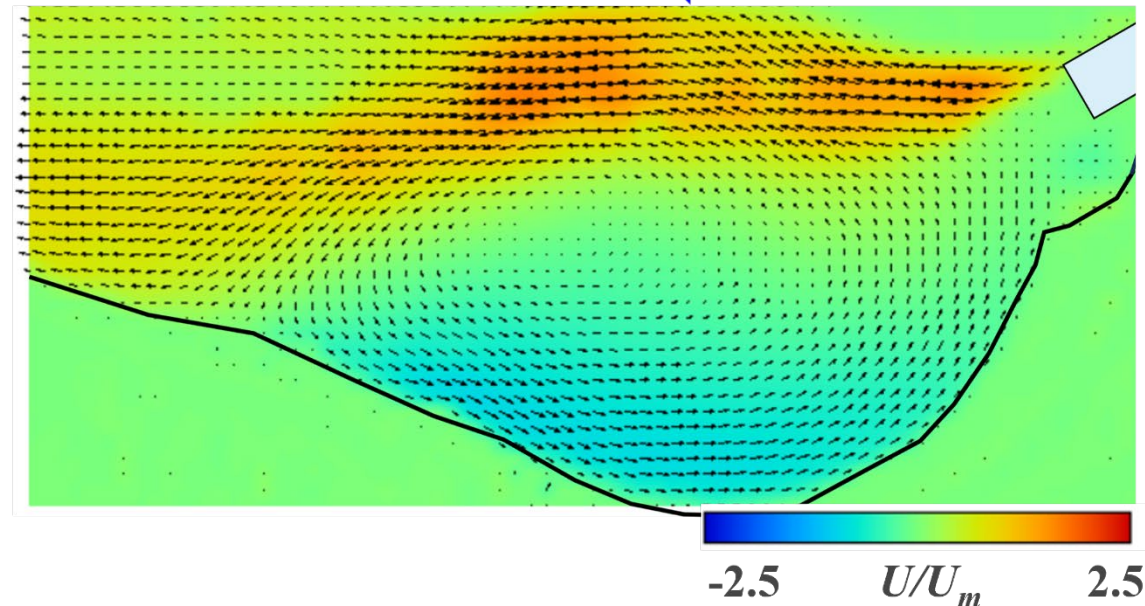
Flow



Case2 (保護工0cm) : $t = 753s$ (崩壊直前)



Flow

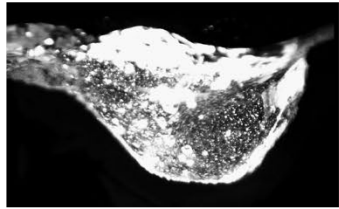


- Case2 (保護工0cm) : $t = 10s$ では、法面被覆工から吐出された越流水が基礎地盤に直接衝突し、反時計周りと時計周りの渦が形成される。
→ これらの渦が川表側への内部侵食 (backward erosion) に影響している。

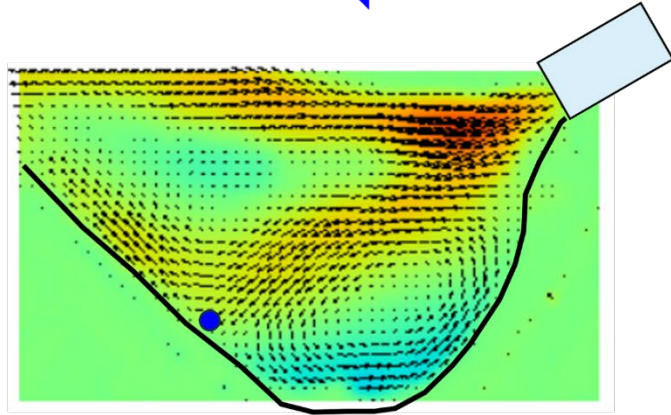
PIV結果 Case2

時間平均主流速 U のコンター図と流速ベクトル(U, V)

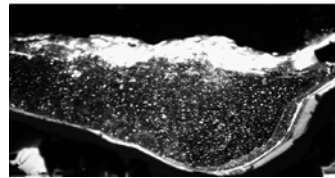
Case2 (保護工0cm) : $t = 10s$



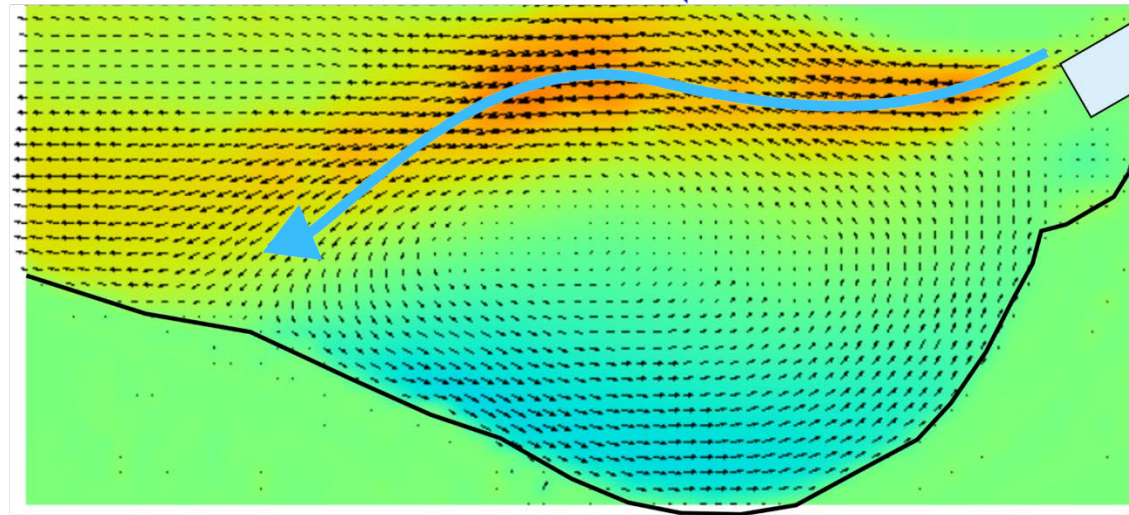
← Flow



Case2 (保護工0cm) : $t = 753s$ (崩壊直前)



← Flow

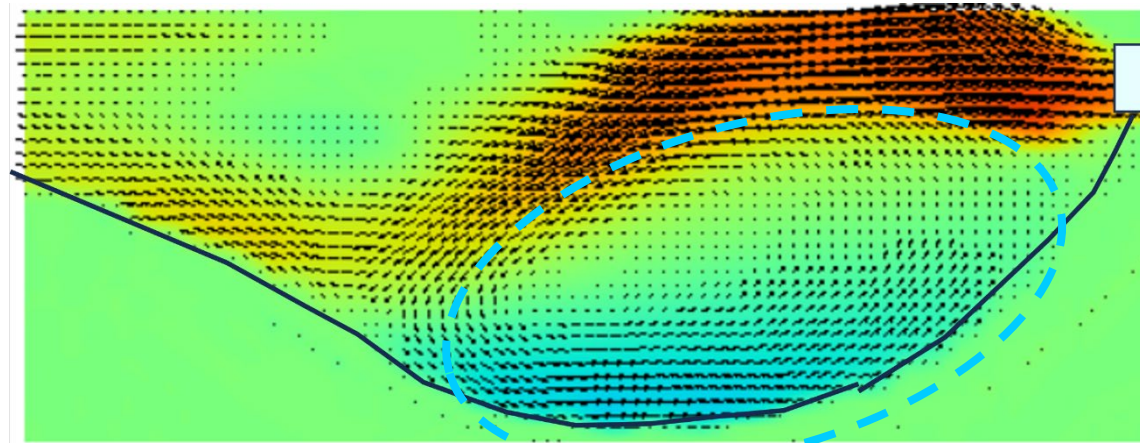


- $t = 753s$ (崩壊直前)では、法面被覆工から吐出された越流水が基礎地盤に直接衝突せず、水平方向に流れている。

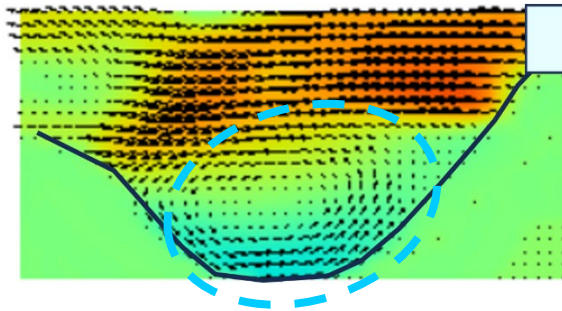
→ 洗堀の進展により洗堀孔内の水深が大きくなることで、**ウォータークッション効果**で流向が変化している。

実験概要

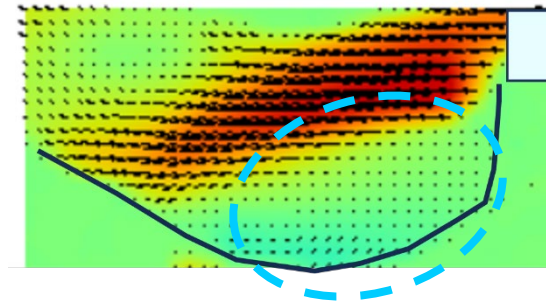
Case3 (保護工5cm) : $t = 10s$



Case4 (保護工10cm) : $t = 10s$



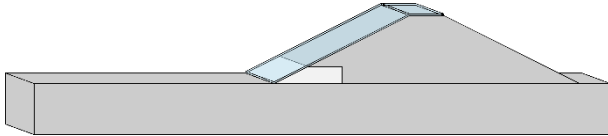
Case5 (保護工15cm) : $t = 10s$



- Case3,4,5では、越流水がほぼ**水平方向**に向かって法尻保護工から吐出される。
- 法尻保護工設置により、基礎地盤に衝突する流れが弱まり、川表側の渦領域ベクトルが小さくなっている。
→ 法尻保護工の長さを伸ばすことで、**川表側への侵食を抑制**。

実験結果 (Case1, Case2)

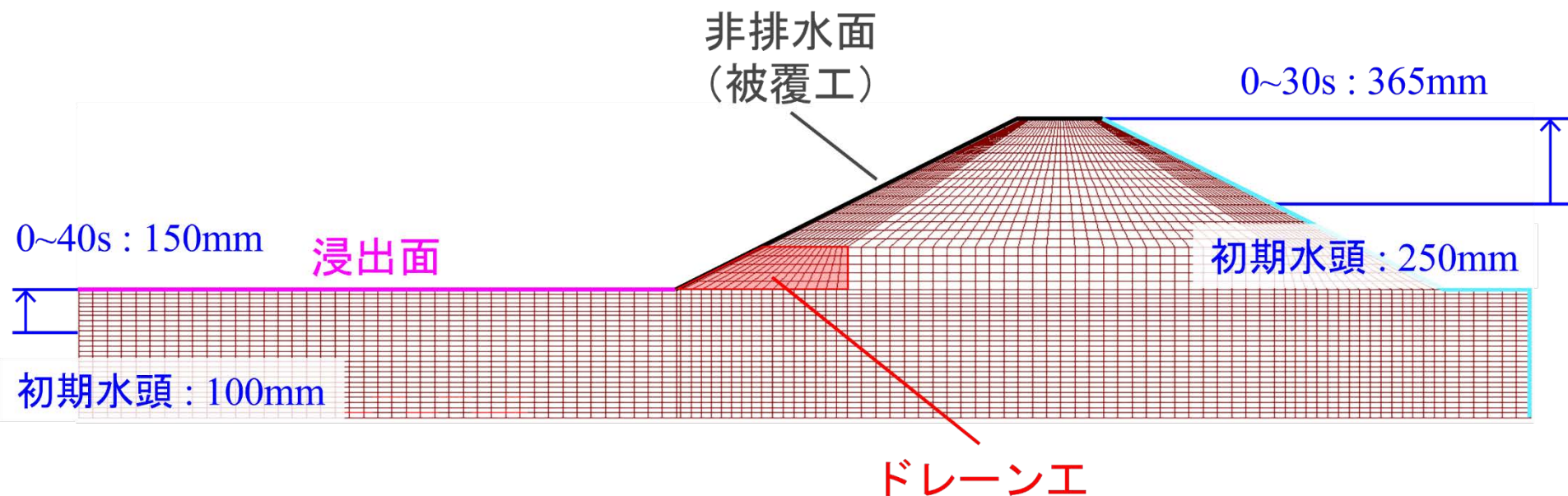
Case6 (天端・法面被覆・法尻保護工0cm, ドレーン工)



- Case6 (法尻保護工0cm+ドレーン工)では, **90min**堤体の変状は見られず.
- ドレーン工設置により浸潤面を低下により浸潤面が被覆工に到達しない.

2次元浸透流解析の概要

・ 解析モデルの境界条件



解析手順

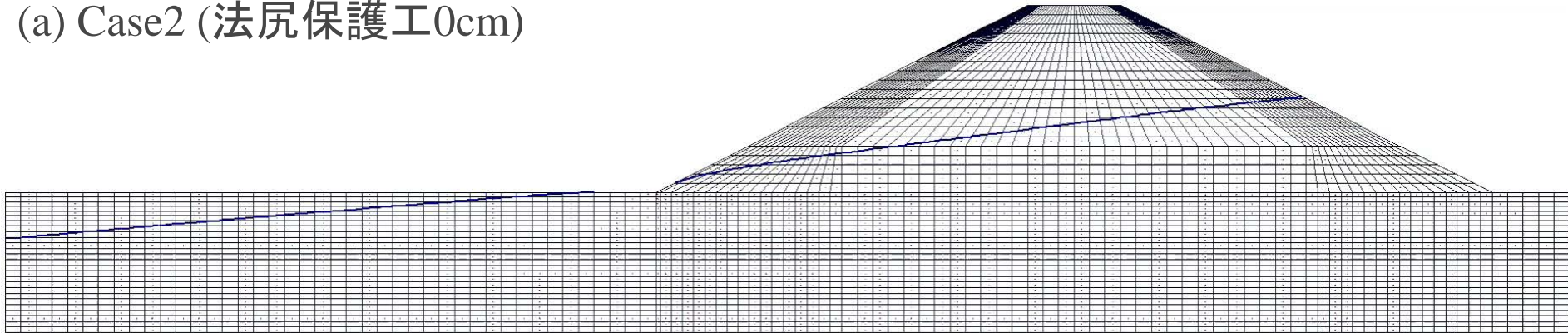
- ① 模型実験の浸透過程に合わせて初期水頭（250mm, 100mm）を与える。
- ② 川表側（給水槽）の水位30sで365mm, 排水槽の水位を40sで150mmに到達するように変動水頭を与える。

解析Case

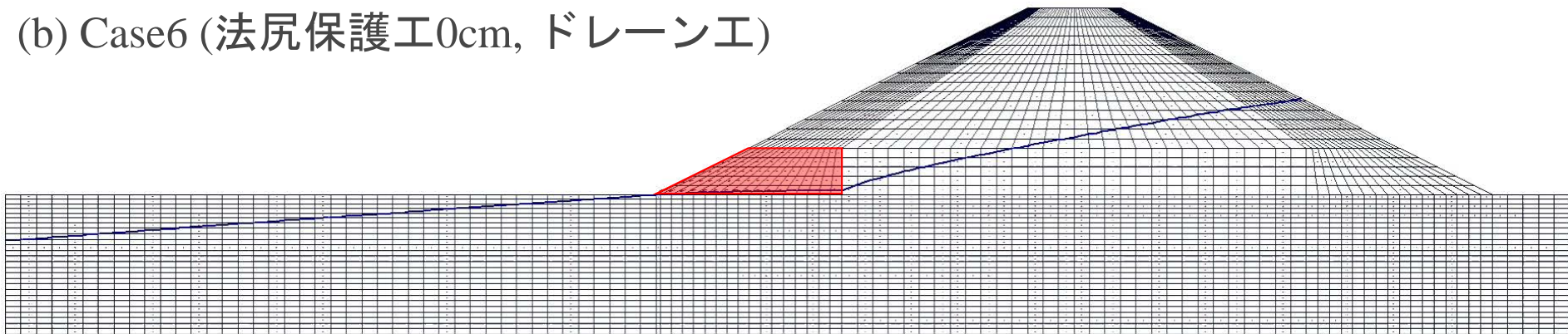
(a) Case2 (法尻保護工0cm), (b) Case6 (法尻保護工0cm, ドレーン工)

2次元浸透流解析の結果

(a) Case2 (法尻保護工0cm)



(b) Case6 (法尻保護工0cm, ドレーン工)



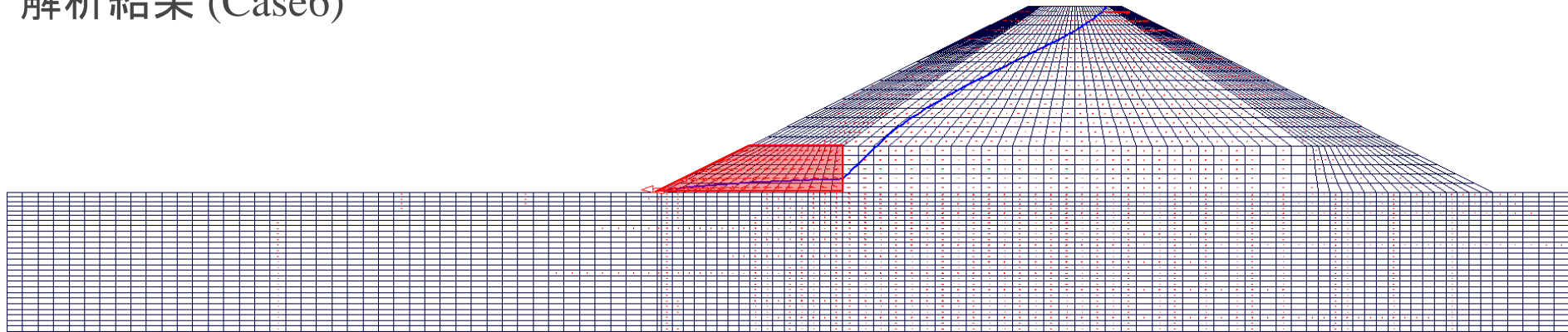
- Case2 (法尻保護工0cm)では、浸潤面が川裏法面の約7割ほどの高さまで到達.
- Case6 (法尻保護工0cm, ドレーン工)では、ドレーン工の設置により、浸潤面を大幅に低下.

2次元浸透流解析の結果

模型実験 (Case6)



解析結果 (Case6)

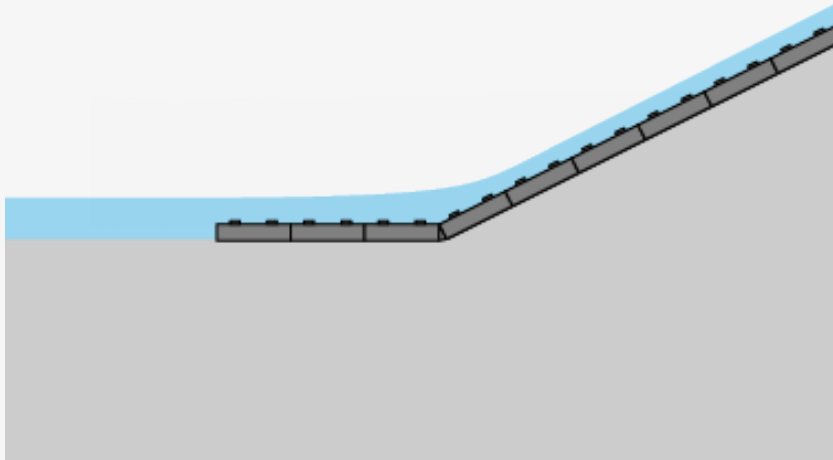


- 模型実験及び浸透流解析の結果からドレーン工設置することで浸潤面を低下させ、被覆工にまで浸潤面を到達させないことが決壊へと至らない要因である。

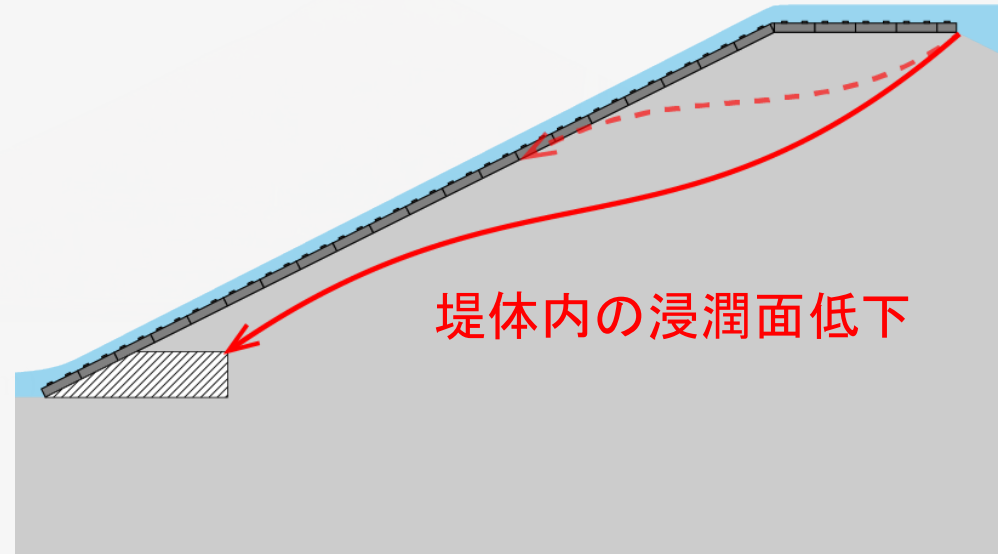
堤体崩壊のトリガーとなる堤体と被覆材との境界における水みちの形成を抑制。

ここまでのまとめ

法尻保護工



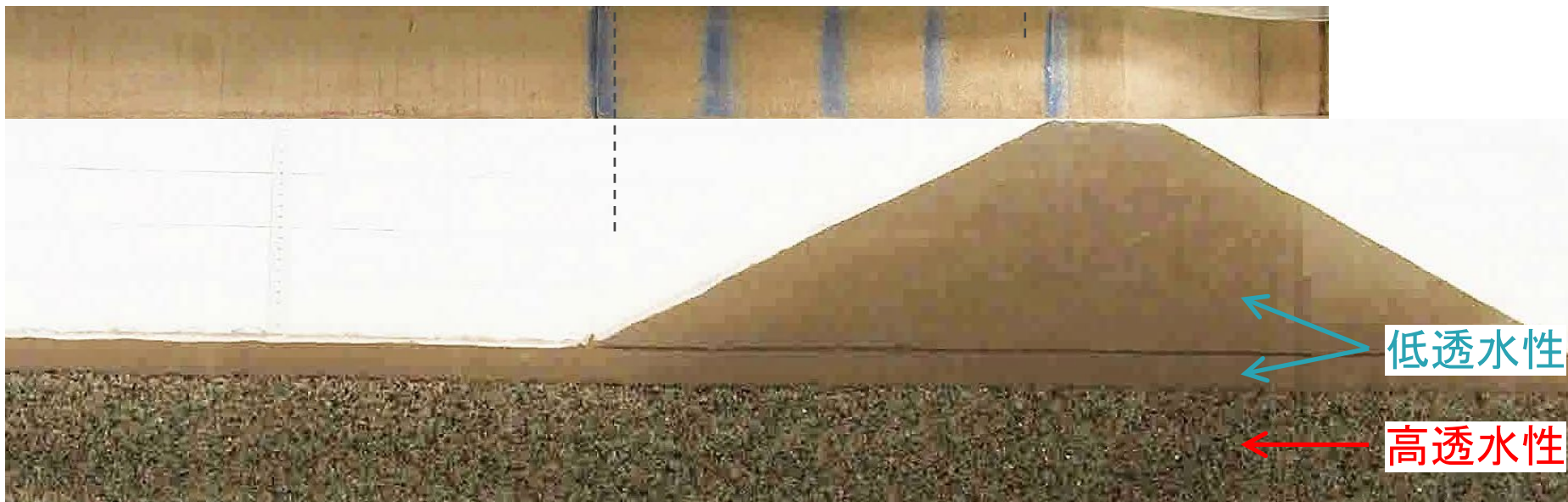
被覆工+ドレーン工



- 1) 越流侵食実験により，表面被覆工の設置及び保護工の長さを長くすることで，決壊までの時間を引き延ばすことを示した。
- 2) 被覆工を設置した堤体では，吸い出し現象による内部侵食をトリガーとする水みちの形成・連通による崩壊メカニズムを示した。
- 3) 粘り強い堤防のためには，法尻保護工の長さを十分に確保するもしくは，浸潤面を低下させるために被覆工と併せてドレーン工を設置することの重要性を示した。

高透水性基礎地盤上の河川堤防における，裏法面被覆工
ならび法尻保護工の越流侵食に対する効果の検討.

◆ 複層構造を有した堤防におけるパイピング現象の模型実験

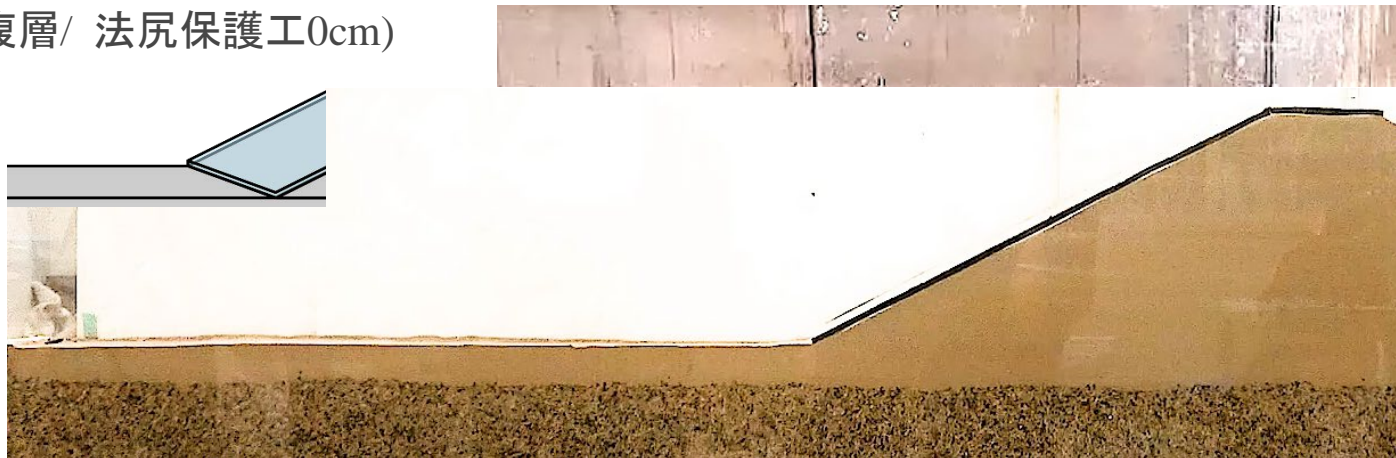


透水性のギャップの大きい地層境界部で水みちが発生。
高透水性の基礎地盤に起因するパイピングが懸念される。

パイピングが発生しやすい高透水性基礎地盤上の河川堤防における、裏法面被覆工・法尻保護工の越流決壊に対する効果は明らかでない。

実験結果 (Case8, Case9)

Case8 (複層/ 法尻保護工0cm)



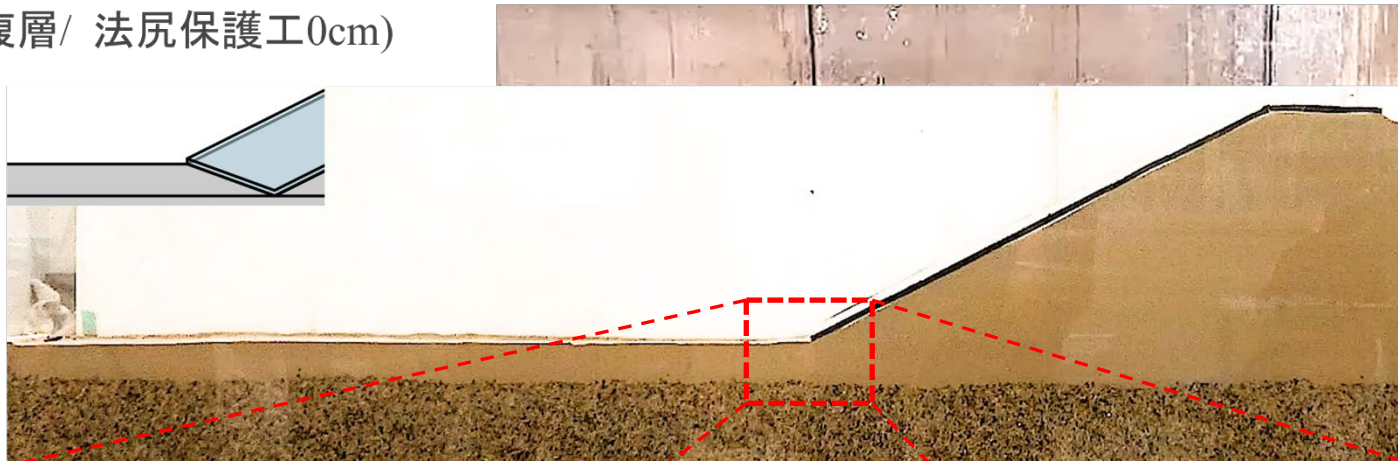
Case9 (複層/ 法尻保護工10cm)



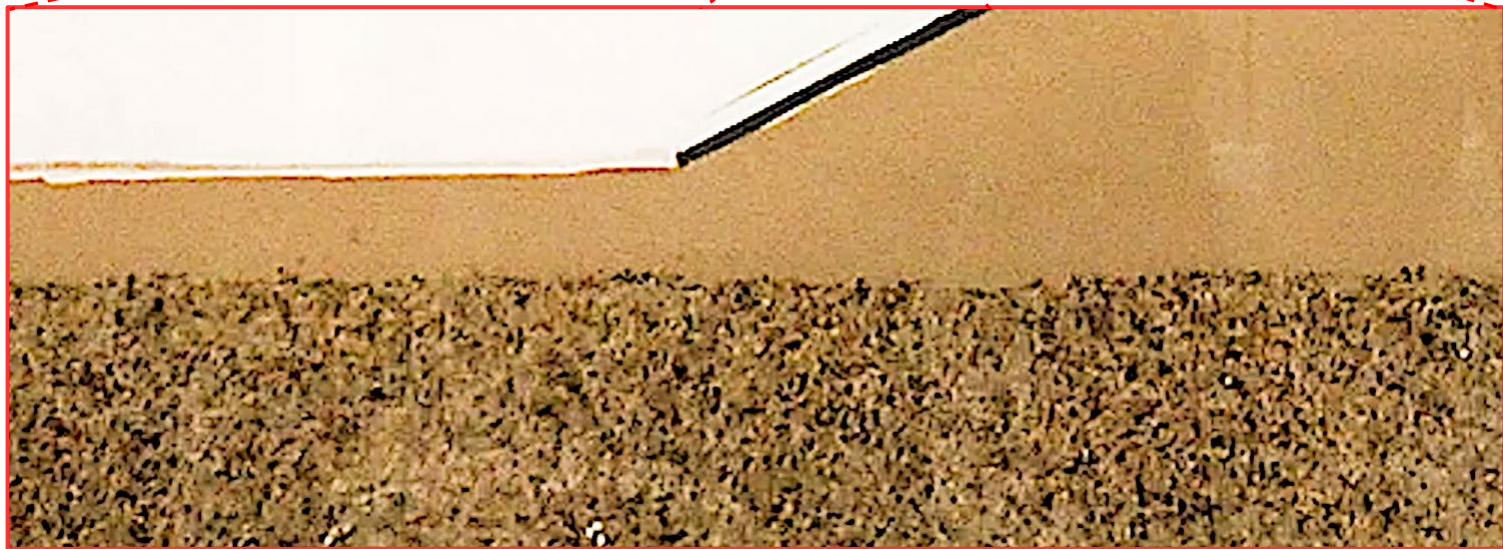
- Case8では、Case1と同様に被覆工により堤体法面への侵食は見られないが、基礎地盤が大きく洗堀され、**1分30秒**で決壊へと至った。
- Case9 (法尻保護工10cm)では、**4分35秒**で決壊へと至った。

実験結果 (Case8, Case9)

Case8 (複層/ 法尻保護工0cm)



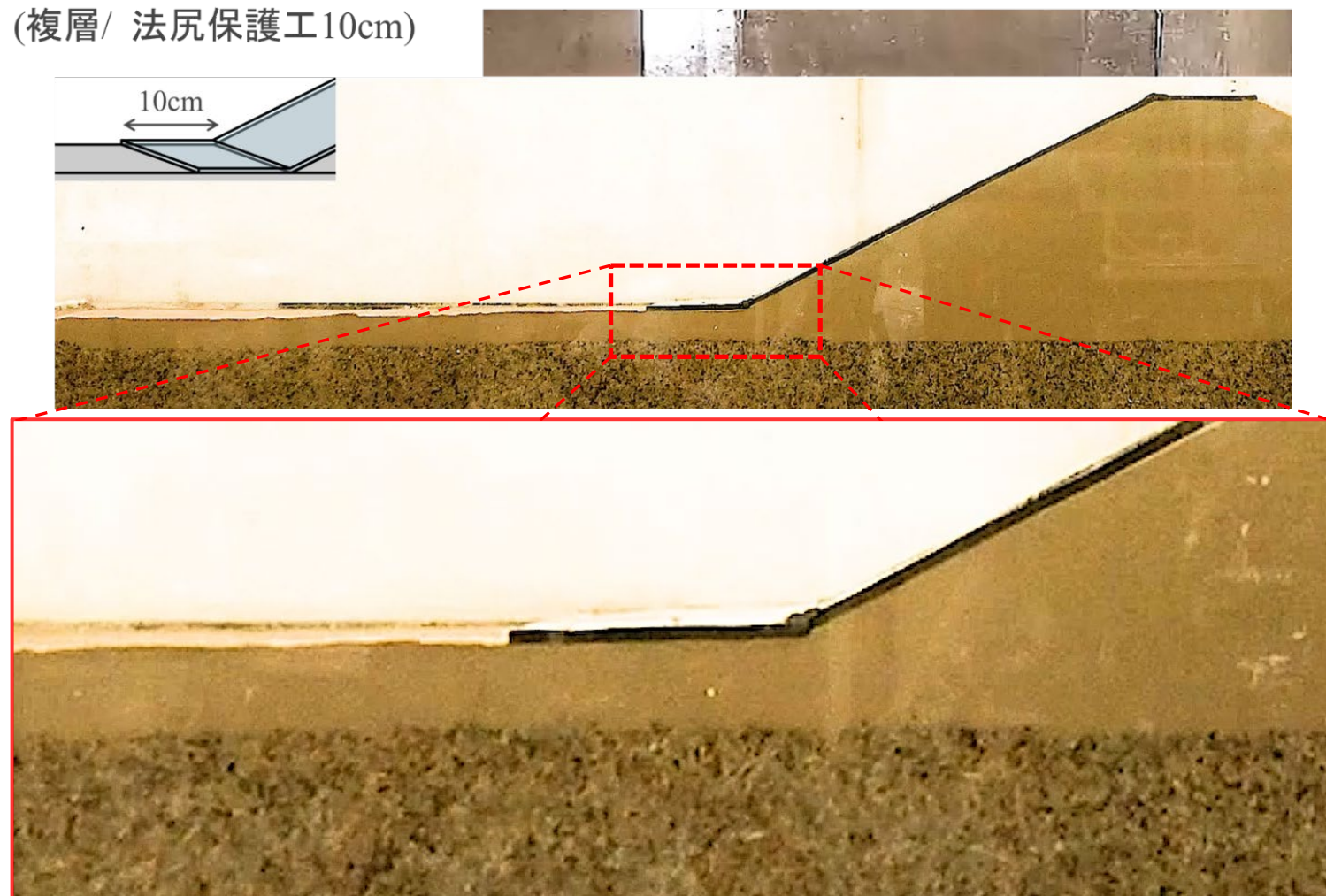
Case4



- 越流による吸出しに加え，高透水性の基礎地盤から供給される浸透水により法尻部の土砂の流出が促進される。
→ Case2(単層 / 保護工0cm)よりも早く決壊へと至る.

実験結果 (Case8, Case9)

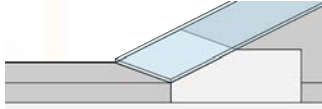
Case9 (複層 / 法尻保護工10cm)



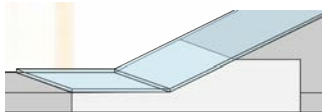
- Case4(単層 / 保護工10cm)では決壊へと至らなかったが、高透水性基礎地盤から供給される浸透水によって、法尻保護工下の領域IIの被覆土層を流出させることで水みちが川表側へ進行し、決壊へと至る。

実験結果 (Case11, Case12)

Case11 (複層/ 法尻保護工0cm)

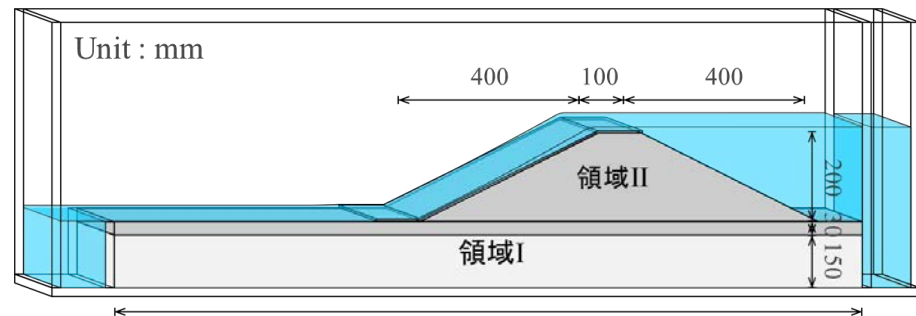


Case12 (複層/ 法尻保護工15cm)



- Case11ではドレーン工を設置より，吸出しによる内部侵食や下層基盤からのパイピングによる侵食を抑制. (90分間堤体の変状は見られず.)
- Case12でも同様に90分間，堤体の変状は見られず.

- 越流対策には裏法被覆工が効果があるが、堤体の透水性によって効果が異なる。



Case2

単層_保護工0cm



Case3

単層_保護工5cm

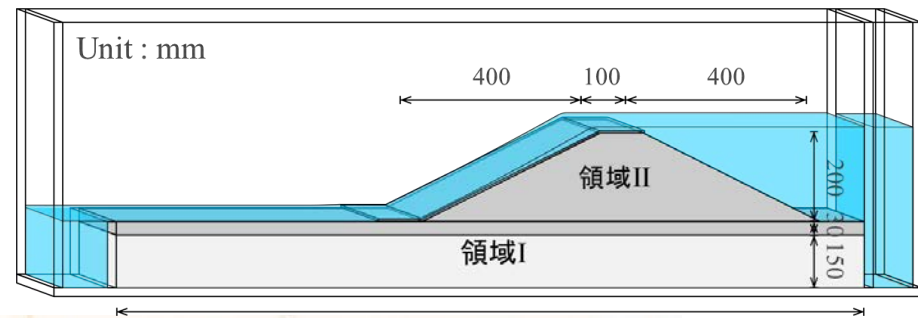


Case5

単層_保護工15cm



- 基礎地盤が高透水の場合、裏法被覆工はほとんど効果がない場合がある。



Case8

複層_保護工0cm



Case9

複層_保護工10cm



Case10

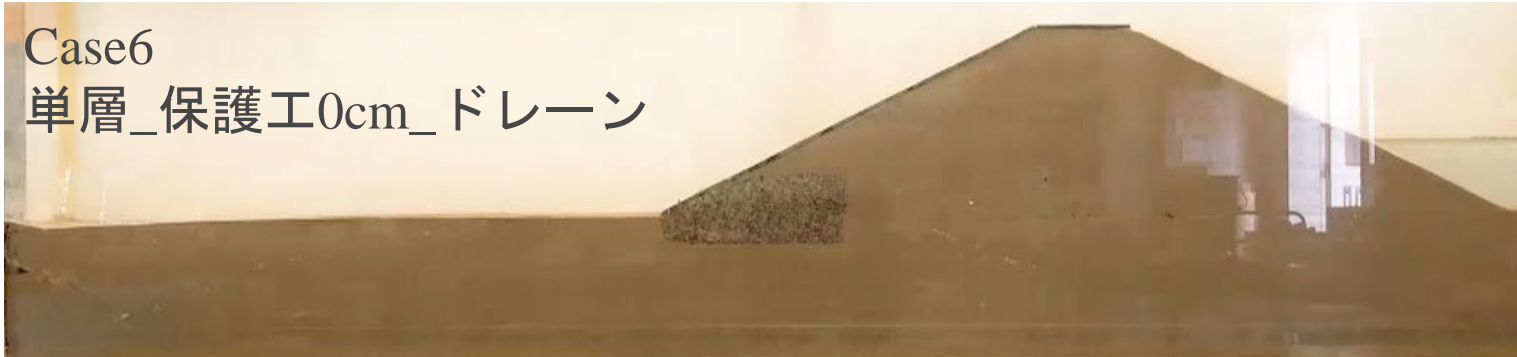
複層_保護工15cm



- ・ドレーン（あるいは基盤排水工）との併用によって、裏法被覆工の越流対策の効果が向上する。

Case6

単層_保護工0cm_ドレーン



Case7

単層_保護工10cm_ドレーン



Case11

複層_保護工0cm



「粘り強い」から「決壊しない」 河川堤防を目指して

ドレーン工・基盤排水工は、浸透と越流に対して効果が高い。

(ただし、被覆工無しでのドレーン工は、越流に対する効果はないので注意)

堤防の透水性や堤体の強度の不確実性や不均質性による危険性をカバーしつつ、安価に現実的に堤防を強化できる。

水産系副産物の貝殻で補強する河川堤防裏法面 ～ 環境・防災面に加え CO₂の地中貯蔵にも貢献～

令和6年 11月14日 (木)

茨城大学大学院教授 都市システム工学専攻
工学部附属都市・地域デザイン教育研究センター長
小林 薫



13 気候変動に
具体的な対策を



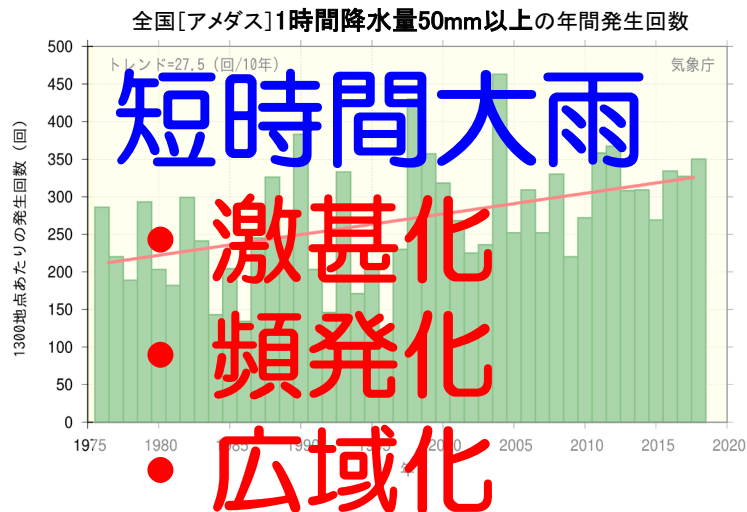
11 住み続けられる
まちづくりを



E-mail : kaoru.kobayashi.kk@vc.ibaraki.ac.jp

本日の内容

1. 茨城県内における近年の堤防決壊について
2. 越水による堤防決壊への対応への貝殻活用
3. 貝殻活用による堤防裏法面の補強対策
4. CO₂の放出量削減と浅層地盤への貯留



● 令和元年度台風19号災害

⇒



□ 関東・東北豪雨 https://www.ibaraki.ac.jp/common/pdf/generalinfo/completereport_2016_910suigai.pdf

□ 台風19号 <https://lrii.or.jp/new/news/501.html>

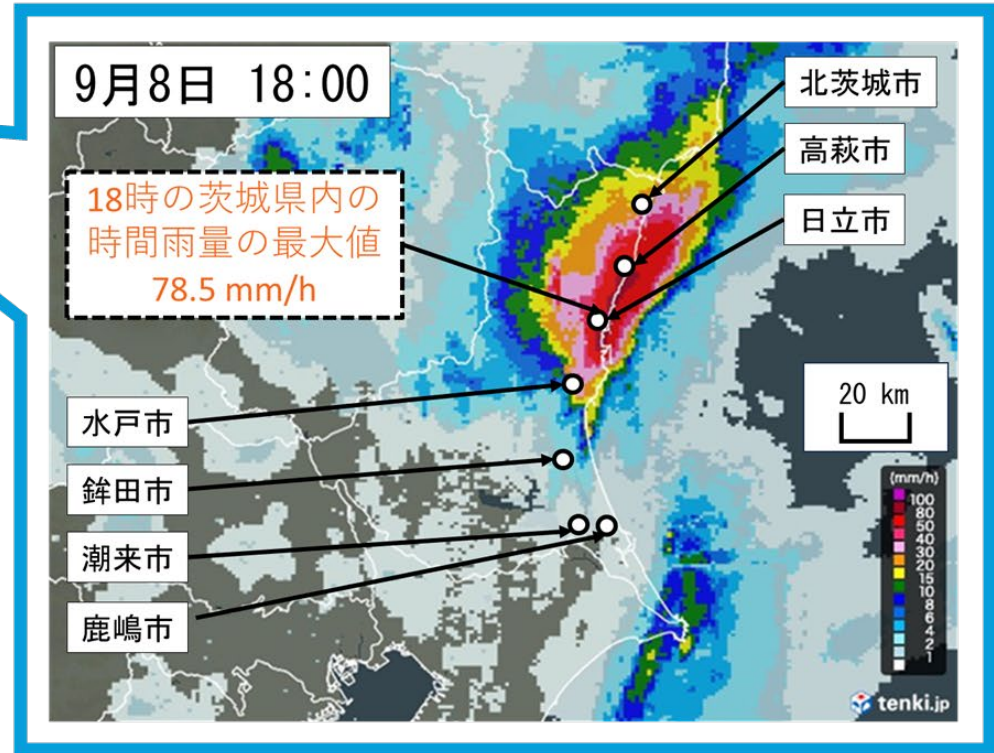
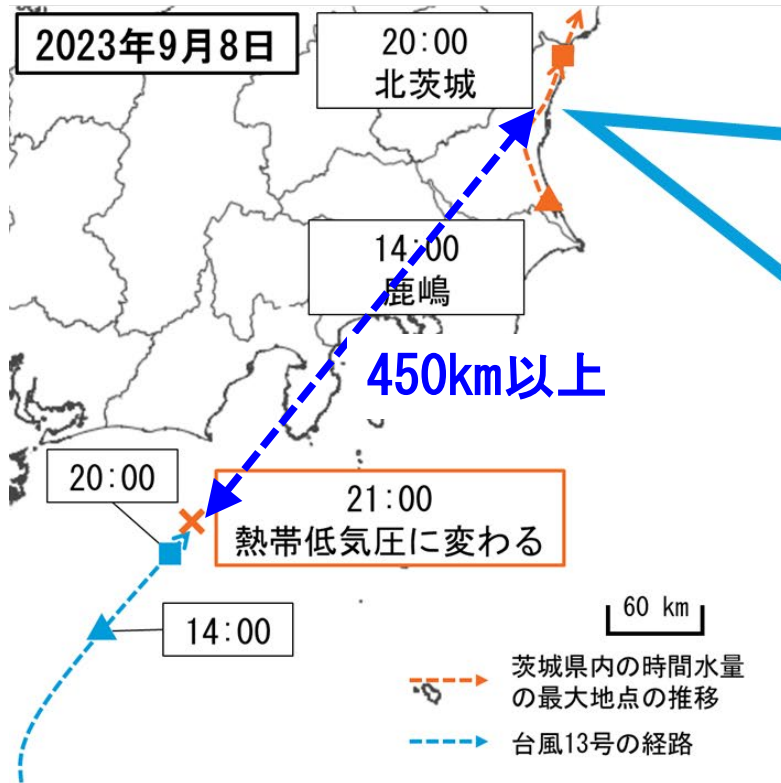
茨城大学では、被災状況等を調査し、学術的な観点などから、今後に向けた各種の提言を行ってきました。

2023年9月8日台風13号 による豪雨災害研究 中間報告会

令和6年3月15日

工学部附属都市・地域デザイン教育研究センター
工学部都市システム工学科

【台風13号の経路と時間雨量の最大地点】



* 台風を中心位置から450km以上も離れていた。

2023年10月27日(金)

茨城県日立市の小川春樹市長は、
(2023年10月) 26日の定例記者会見
で、今回の大雨では市内を流れる67
河川のうち39河川が氾濫し、このう
ち市管理の小規模な河川が8割を占
めた。

本日の内容

1. 茨城県内における近年の堤防決壊について
2. 越水による堤防決壊への対応に貝殻活用
3. 貝殻活用による堤防裏法面の補強対策
4. CO₂の放出量削減と浅層地盤への貯留

- 令和元年度台風19号災害

⇒



□ 令和元年台風19号 <https://lrri.or.jp/new/news/501.html>

令和元年台風第19号による洪水では、国土交通省の調べによると、全国で142箇所
の堤防決壊が発生した。

1. 茨城県内における近年の堤防決壊について

第6久慈川橋りょう（袋田駅～常陸大子駅間）の現地調査結果と現状 橋梁の上流部側



被災前の橋梁下部付近のブロック状況

<http://wikimapia.org/23314196/ja/> に加筆



被災後のピア上流側設置ブロックは残っている

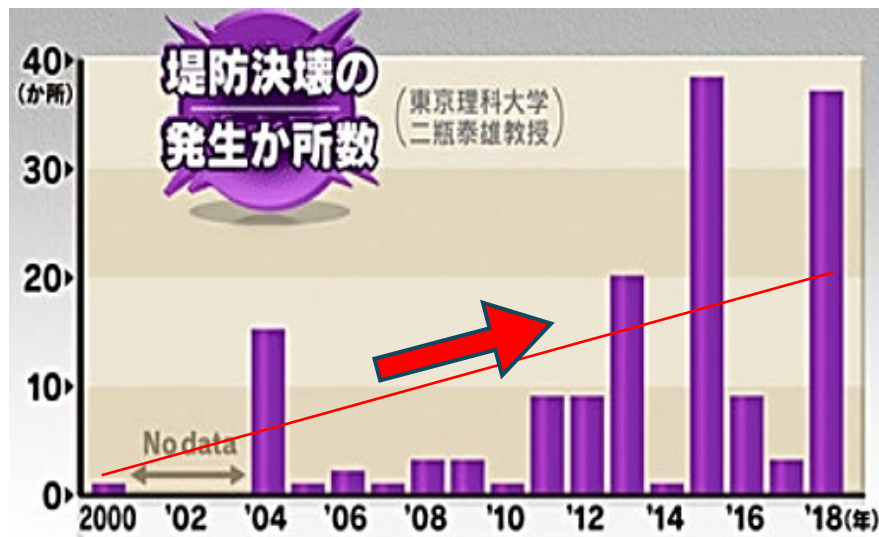


現状はピア1本



被災後のピア上流側設置ブロックなし

短時間豪雨の多発化→堤防決壊、河川氾濫が増加

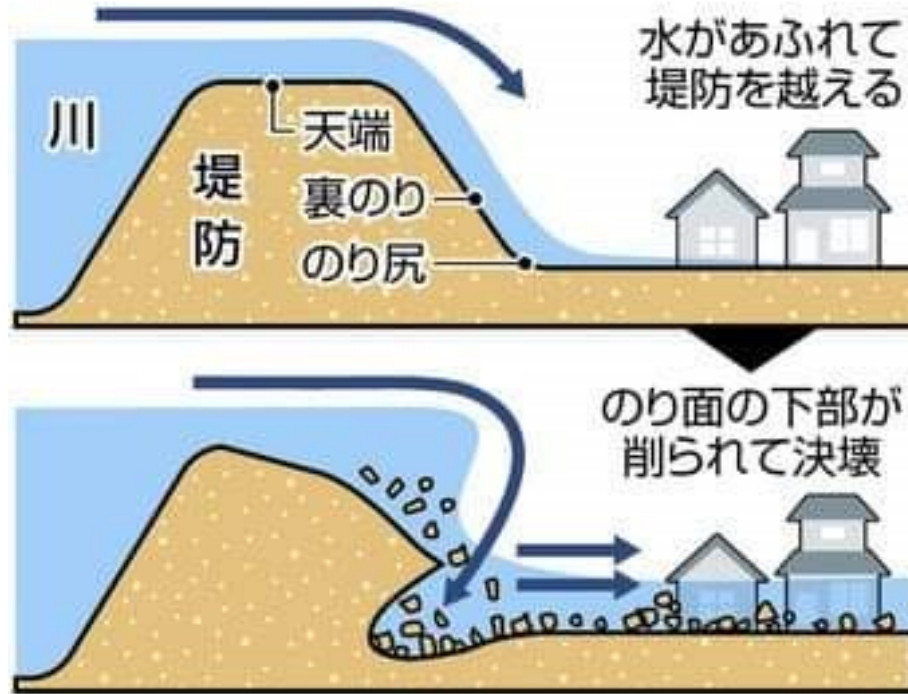


堤防決壊の発生件数の推移

令和元年
台風第19号による
洪水では、
国土交通省の
調べによると、
全国で142箇所の
堤防決壊が発生

加速的な増加

越水による堤防決壊



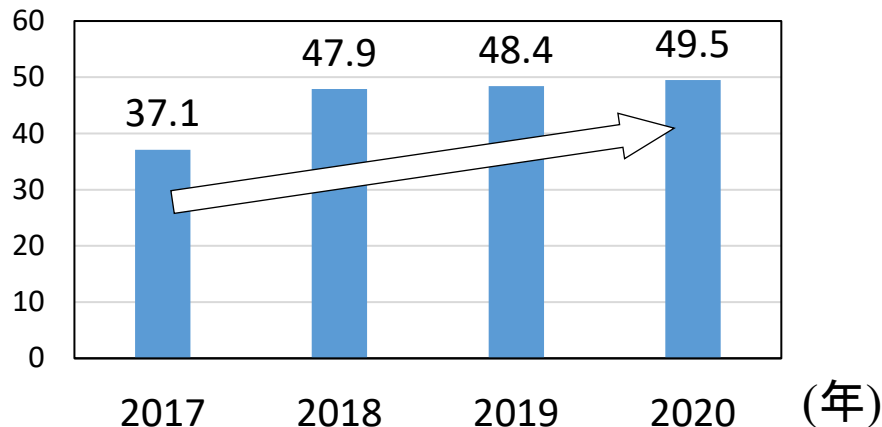
堤防決壊の要因

90%近くが越水

* 令和元年台風19号では、86% (国交省より)

ホタテ貝の生産量と野積みされたホタテ貝殻

万(t) ホタテ貝の生産量



農林水産省：令和2年度年漁業・養殖業生産統計より

野積みにされるホタテ貝殻



ホタテ貝殻のバイオニックデザインより

大量のホタテ貝殻は処分方法が確立されていない
漁港周辺（北海道・青森県等）に野積み状態にされている

野積みの問題点

- ・ 悪臭や景観の問題
- ・ 酸性雨、降雨量増大等によるCO₂放出（排出）

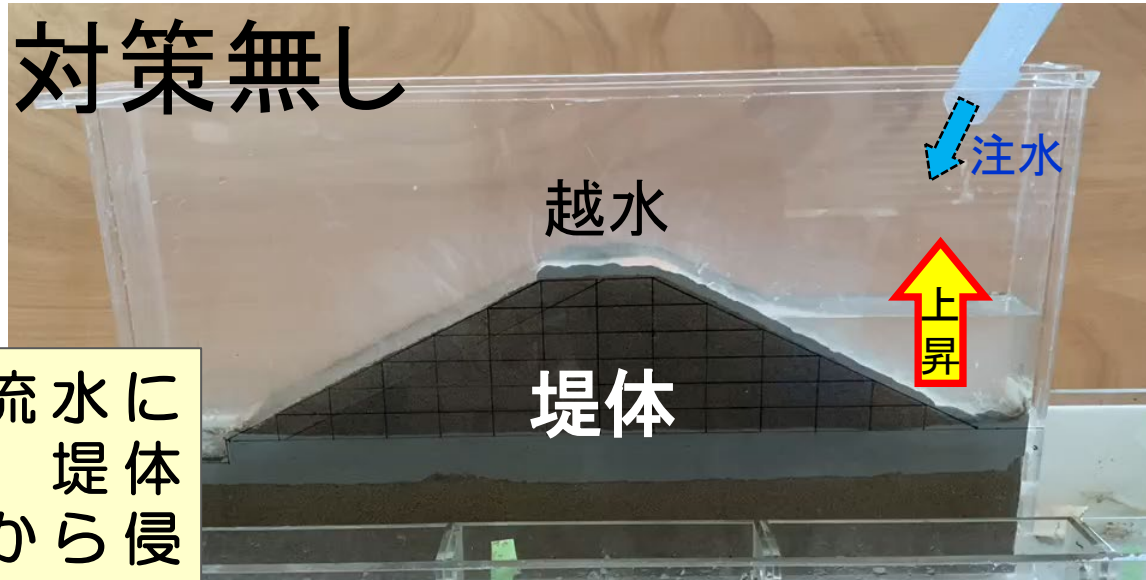


ホタテ貝殻のリサイクルより



傾斜路と破碎貝殻を用いた予備実験

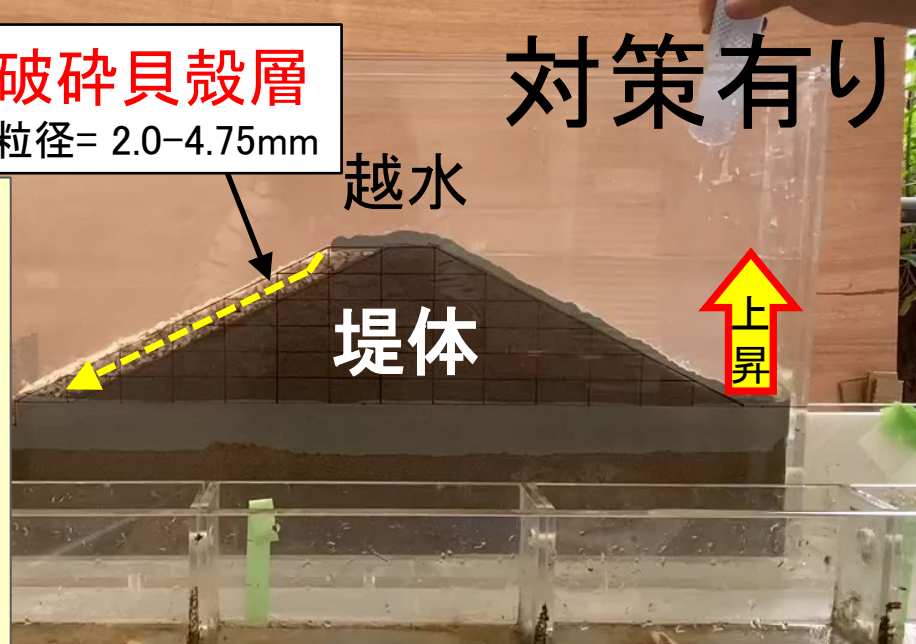
対策無し



越流水により、堤体表面から侵食された。

対策有り

破碎貝殻層
粒径= 2.0-4.75mm



本実験の範囲ではあるが、破碎貝殻層は透水係数が大きく、越流水による堤体表面(上記)からの侵食を、貝殻層下面の侵食に変えるなど、密着した破碎貝殻層による侵食抑制効果を確認することができた。

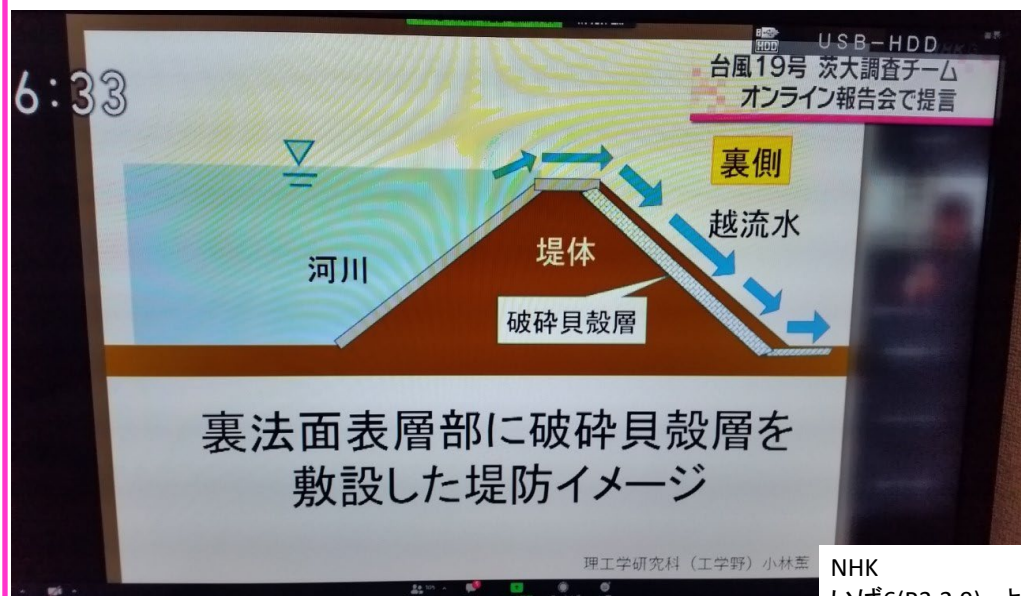
短時間大雨

- 激甚化
- 頻発化
- 広域化



- 令和元年度台風19号災害
⇒経済性も高い貝殻を活用した
「粘り強い堤防裏法面」構築可能か

NHK 「いば6」【総合】(茨城県域)月～金曜日 午後6時10分～7時



台風19号 堤防改善や防災啓発を 茨城大調査団 最終報告 温暖化影響に警鐘

2019年10月に県内外で甚大な被害をもたらした「台風19号災害」について調査研究する茨城大調査団



の最終報告会が5日、オンライン会議方式で開かれ、災害過程説明グループなどテーマごとに結成された各チームが、被害状況の分析結果、課題や必要な対策などを報告した。調査団としての活動は

これで終了し、3月末までに最終報告書を発行する予定。

同グループは、那珂川や久慈川水系の堤防決壊や周辺の浸水状況、今後の気候変動の影響評価などを説明。「内水側の堤防浸食が激しく、越水から破堤につながった」とし、対策として廃棄物の目殻を敷設した「耐越水浸食型」の低コスト堤防を提案した。

また、大子町に残る1800人（月台3）の手り大共く

害へのさらなる「要」と指摘した情報伝達・避

目殻で堤防強化を

台風19号調査団 茨城大が最終報告

二〇一九年十月に本県に甚大な被害をもたらした台風19号について幅広い観点で調べている茨城大（水戸市）の「台風19号災害調査団」は五日、オンライン会議アプリ「Zoom」で最終報告会を開き、各調査グループが調査結果の概要を紹介した。報告書は三月末までに発行する。

台風19号では、那珂川と久慈川や支流の計十二カ所で堤防が決壊したほか、堤防を水が乗り越える越水な

「被災過程説明」グループは、堤防が内側から激しく浸食され、越水した水によって壊れるに至ったメカニズムを検証。内側の表面に目殻を敷設することで、低コストで堤防を強化する方法を提案した。

「情報伝達・避難行動」グループは、水戸市と大子町の被災地で実施したアンケートを分析。「自分は大丈夫」と思ってしまう正常性バイアス（思い込み）や、「他の人が避難してい

このほか「農業・生業系」「住民ケア支援」「化学財レスキュー」のニグループと、学内の公募で選ばれた「災害支援に対する自治体の情報発信と報道量」関係」など三グループが、各教員の専門を生かした調査に取り組んだ。

調査団は昨年四月に中間報告書を公表。最終報告書は当初、台風発生から一ヶ月の昨年十月に出す予定だったが、新型コロナウイルス感染症拡大の影響で現場の聞き取り調査などが進まず、大幅に遅れが生じた。

（宮尾幹成）

これまで、堤防裏法面の全面を遮水シートやコンクリートブロック等で被覆することで、越水時の侵食を防止する

アーマーレビーなどの耐越水堤防

が複数個所で試験施工されてきた。試験施工の報告等を踏まえて対応策が必要である。

本日の内容

1. 茨城県内における近年の堤防決壊について
2. 越水による堤防決壊への対応に貝殻活用
- 3. 貝殻活用による堤防裏法面の補強対策**
4. CO₂の放出量削減と浅層地盤への貯留

洪水時の越水に対する主な対策としては常田らは、

I) 堤体の不飽和化

II) 天端構造の裏法侵食の抑制
(アスファルト舗装など)

III) 裏法面の難侵食化

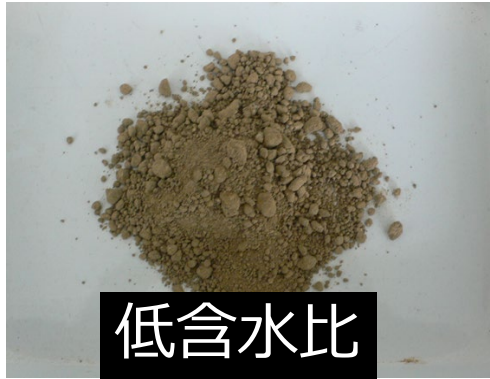
などを挙げている。

常田賢一, 植田裕也, 跡治志由大, 小柿裕治, 藤木孝則: 越流に対する堤防の粘り強さの向上に関する検討, 土木学会 第4回河川堤防技術シンポジウム講演概要集, pp.23-26, 2016.

1) 堤体の不飽和化

土は、含水状態により半固体（低含水比）
～塑性体～液体（高含水比）に変化する。

①



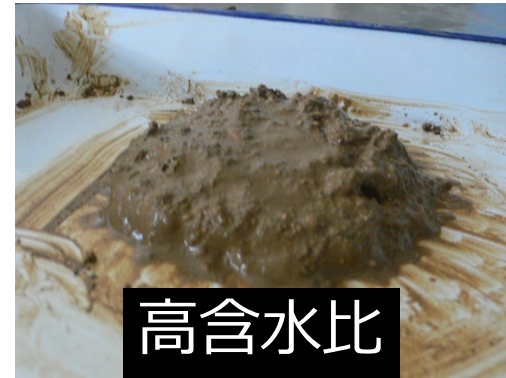
②



③

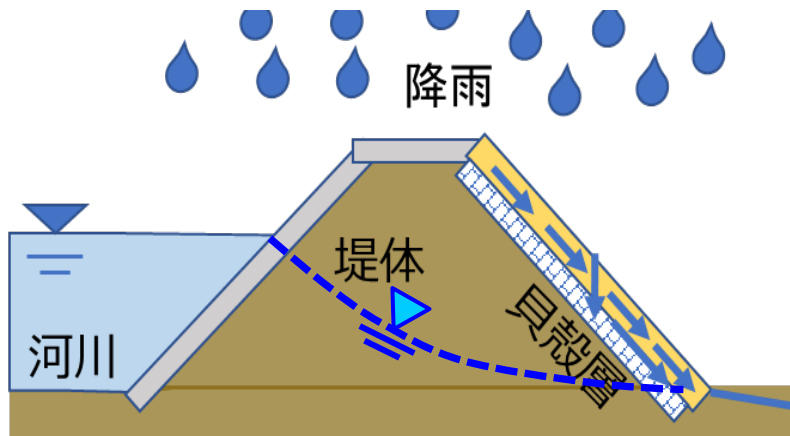


④



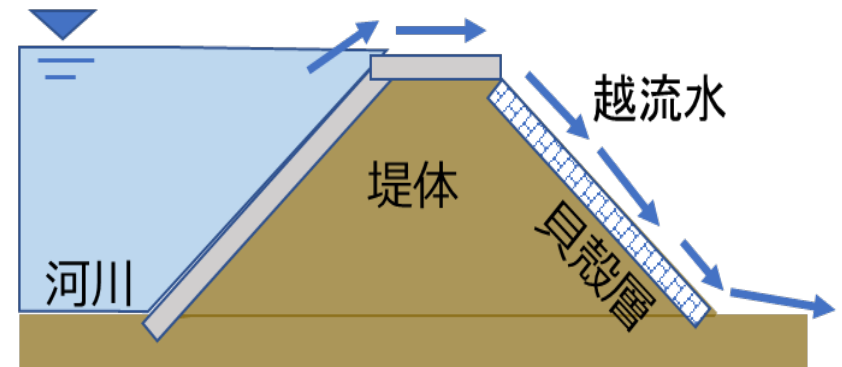
貝殻活用による堤防裏法面の補強対策

I) 堤体の不飽和化



降雨浸透抑制

III) 裏法面の難侵食化



侵食抑制

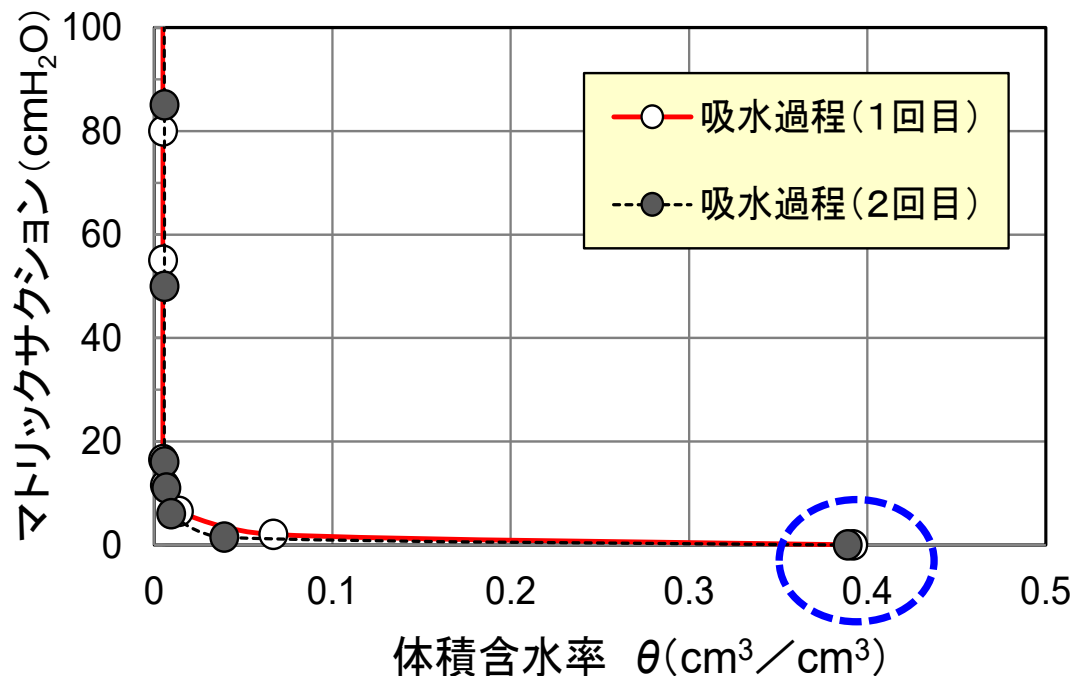
防災面 盛土内への降雨浸透抑制 + 越水時の侵食抑制
に有効である

環境面 野積み状態の放置貝殻の削減（周辺環境の改善）
+ ホタテ貝殻からのCO₂放出量抑制が期待できる

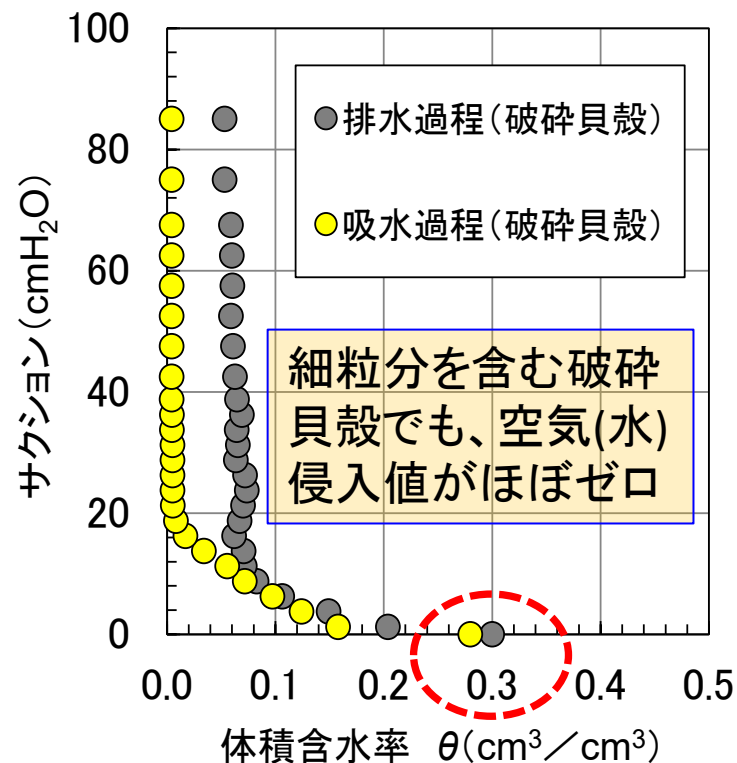


I) 堤体の不飽和化

水分特性曲線 (SWCC)



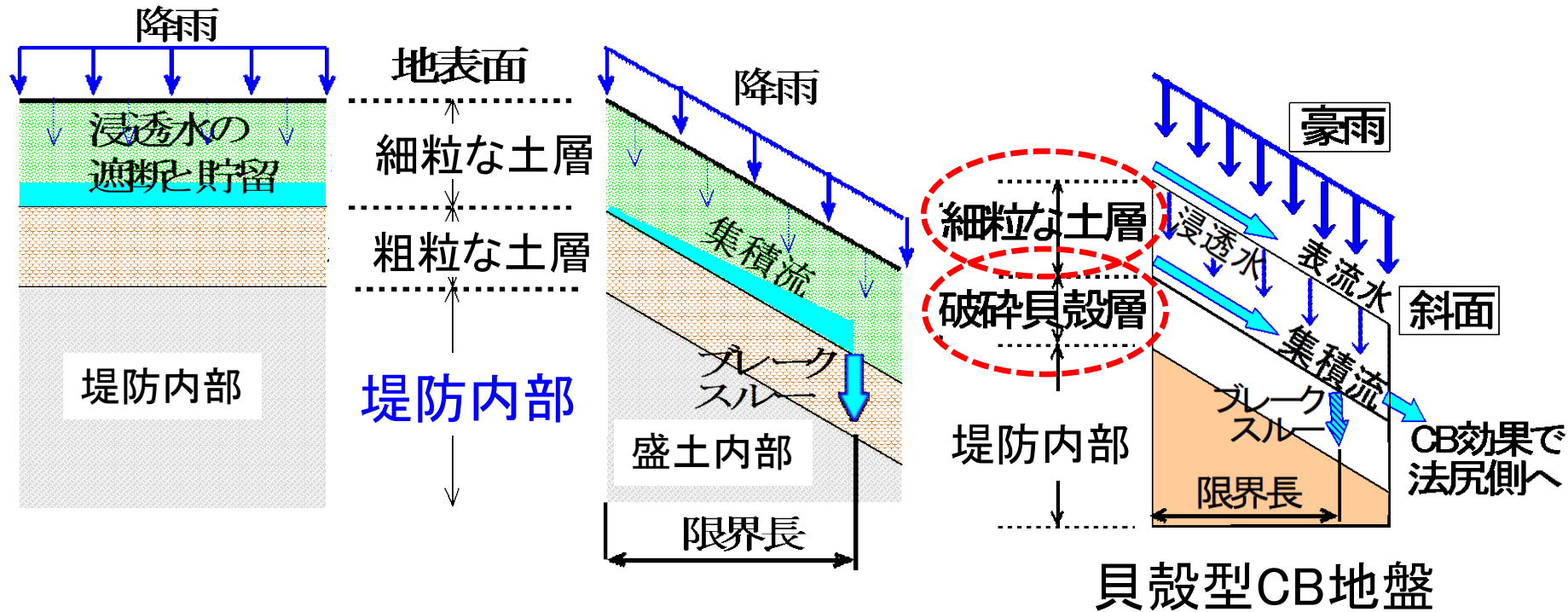
礫材のSWCC



破碎貝殻のSWCC

○ 礫材 (粗粒な土) と類似したSWCCを有する貝殻の地盤工学的特性を有効利用し、キャピラリーバリアを構築する粗粒な土層に用いることが可能⇒加えて、細粒な土の混入が少ない。

キャピラリーバリア (CB) 地盤について



(a) 水平CB地盤

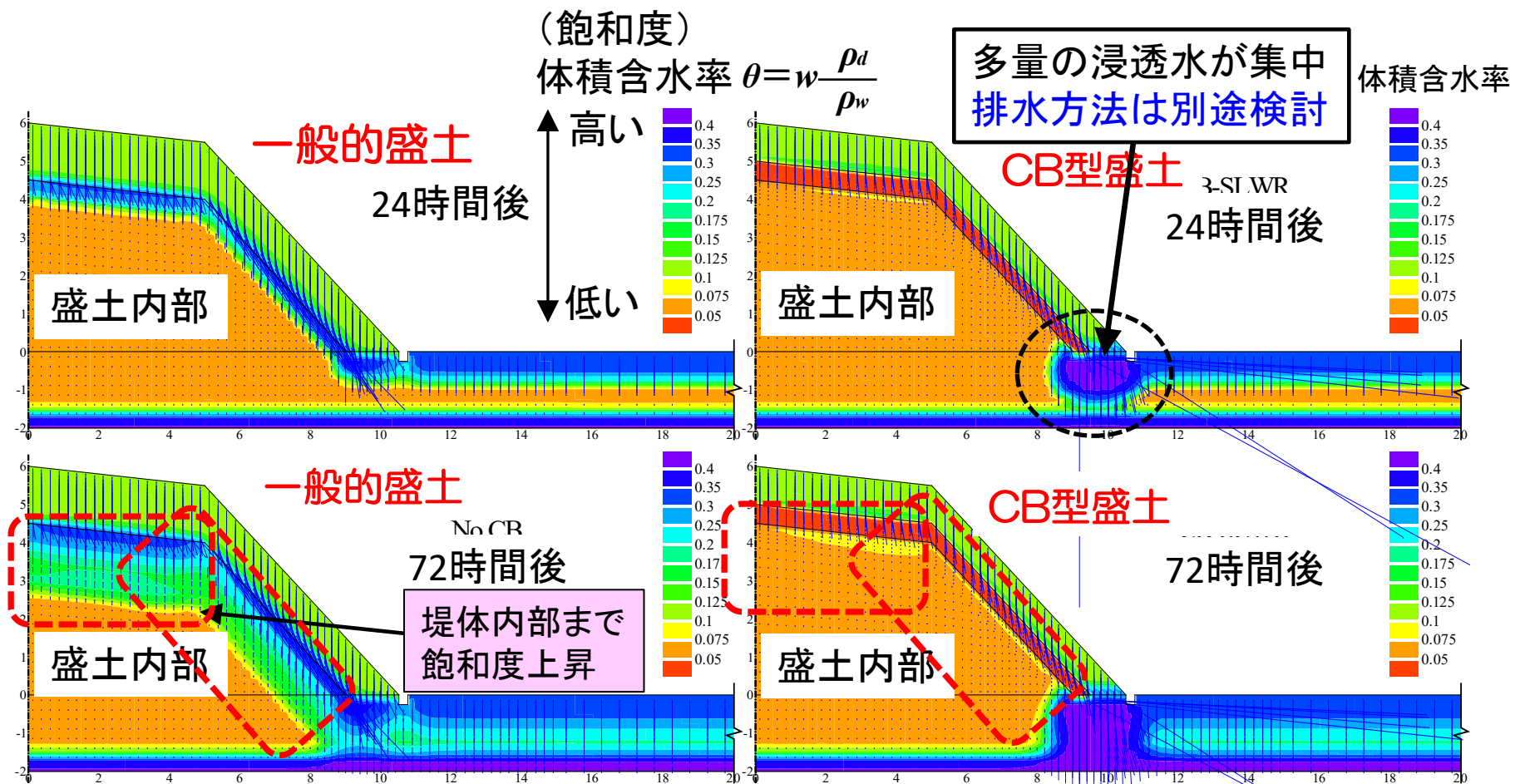
(b) 傾斜CB地盤

貝殻型CB地盤

CB地盤の限界長の概要図

重ね合わせて、両層の保水性の違いから、浸透水を遮断・貯留・流下させることが可能。
⇒ 浸透抑制効果あり

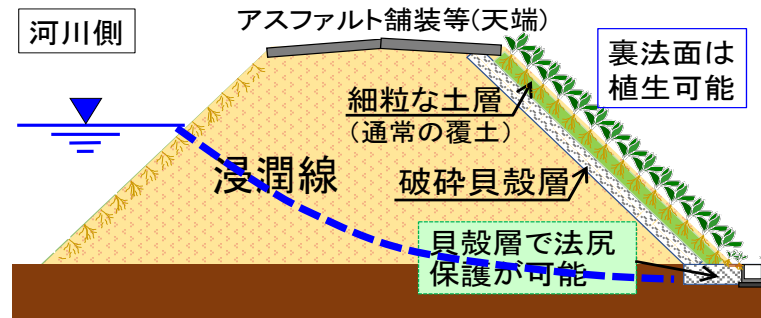
I) 堤体の不飽和化 (堤体内の飽和度について)



将来に想定される短時間強雨に対するCBの遮水機能
(一般的盛土は、CB機能を持たない盛土)

実規模大の堤防裏法面の安定性検証

1) 盛土内への降雨浸透抑制 (土の保水性の違いを活かした貝殻型CB活用)



2) 越水時の侵食抑制に有効 (裏法面の難侵食化への貝殻層を活用)

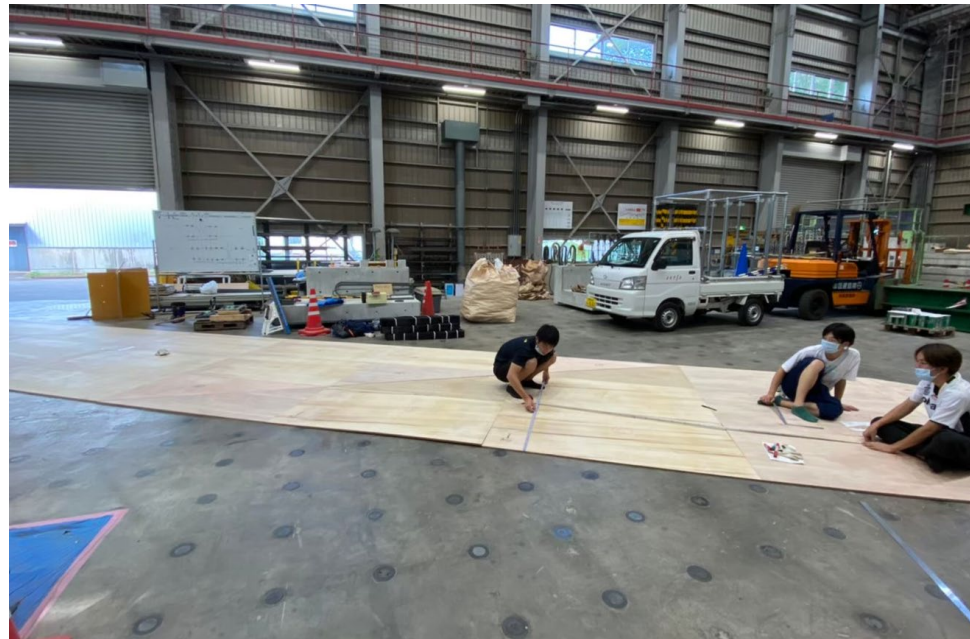
貝殻の破碎（特別な機械、装置は必要としない）



実規模大の堤防裏法面の安定性検証



堤防構築基盤の整地



堤防構築時の両側面板の加工

実規模大の堤防裏法面の安定性検証



両サイドに堤体形状の
コンパネ設置状況



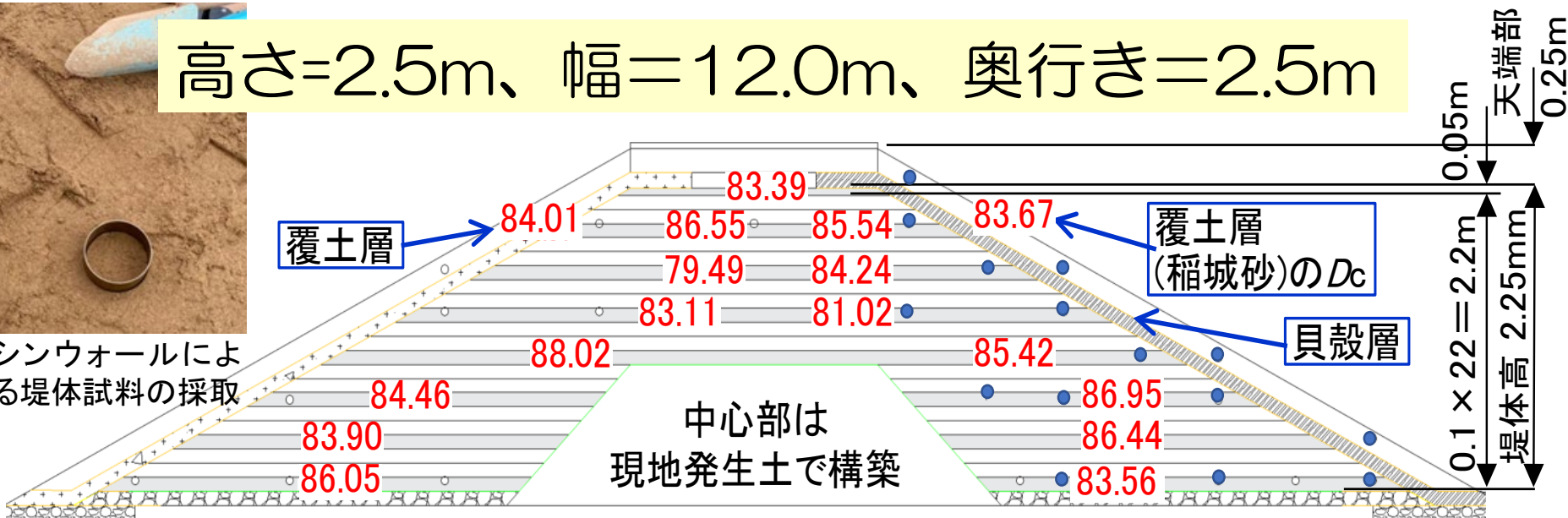
堤体の構築状況

実規模大の堤防裏法面の安定性検証

高さ=2.5m、幅=12.0m、奥行き=2.5m



シンワールによる堤体試料の採取



- ・数値: その位置の締固め度 D_c (%)を示す。
- ・●は、センサー設置位置を示す。

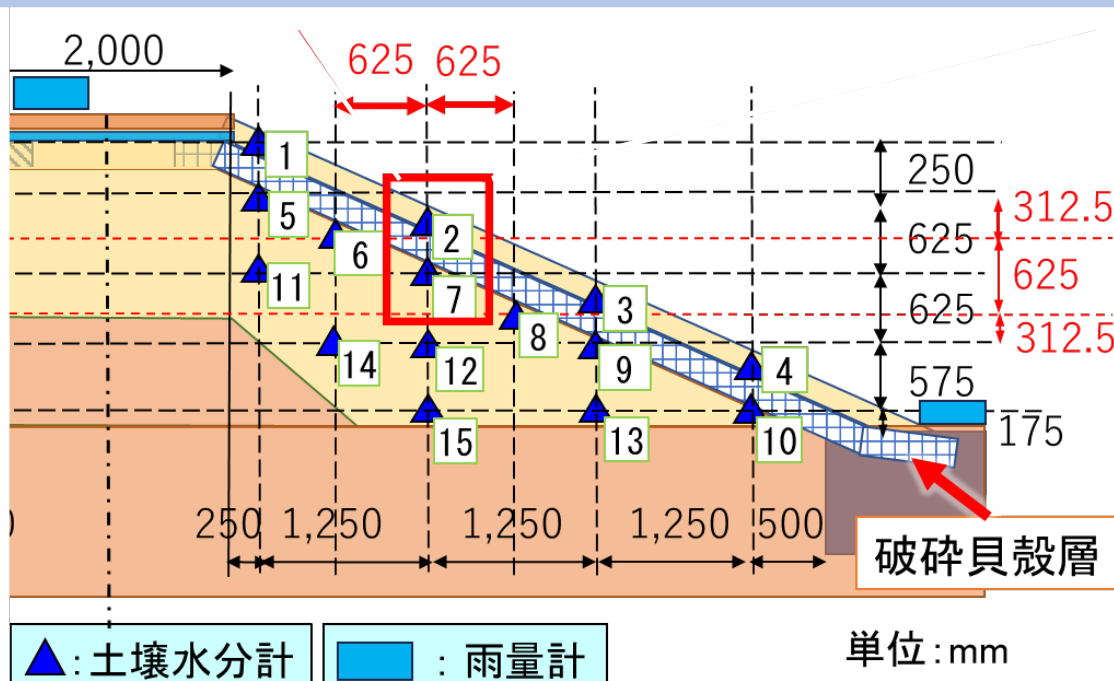
構築した堤体の締固め度 D_c の測定結果

含水比調整した土を所定の厚さで撒き出して、所定の厚さに仕上げ密度管理をしました。その結果、上記の様な締固め度 D_c です。

実規模大の堤防裏法面の安定性検証



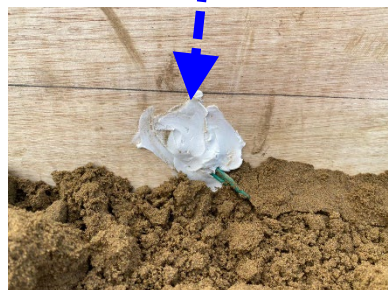
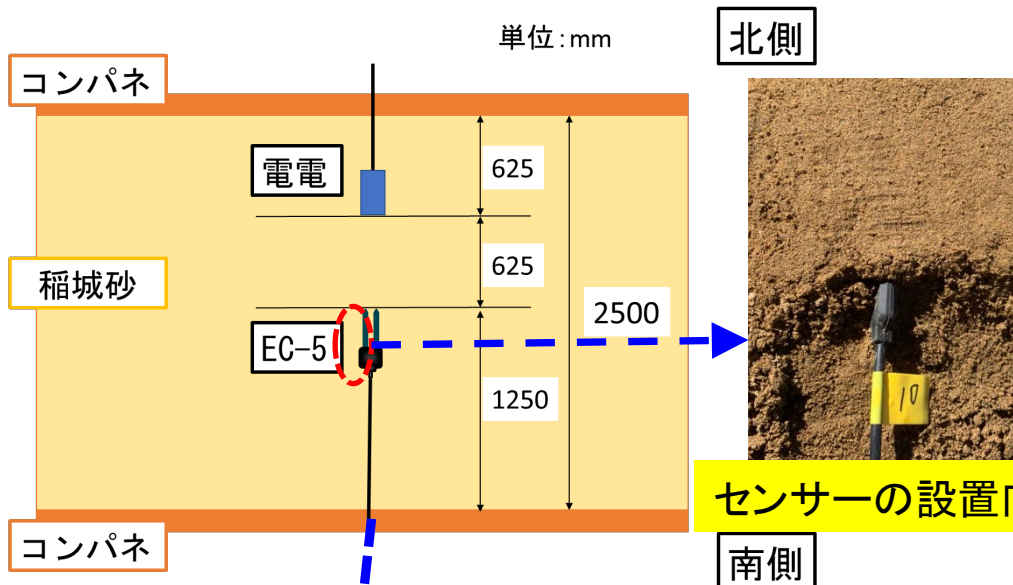
覆土層の状況



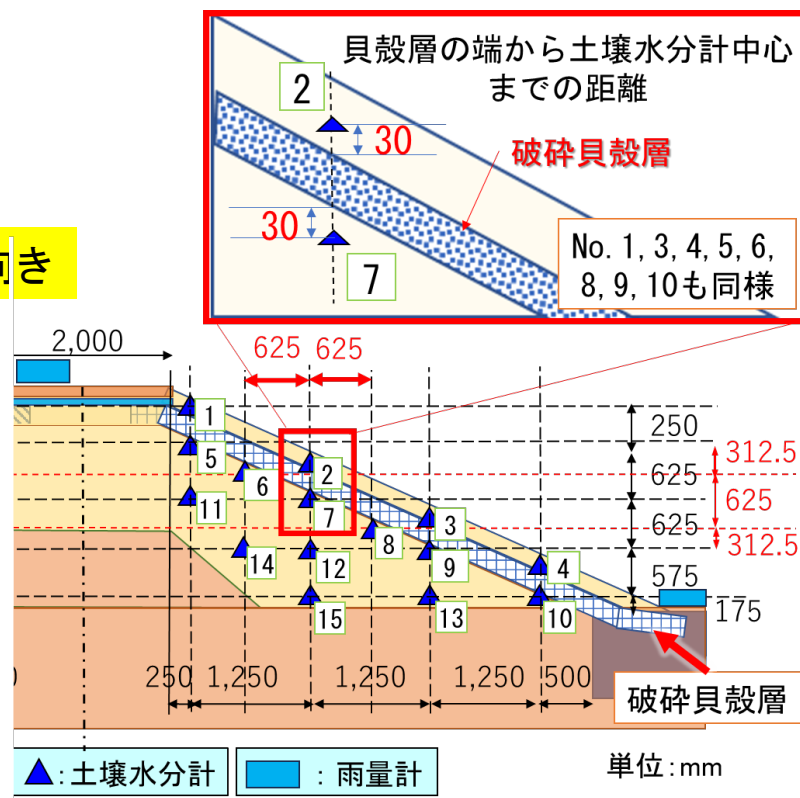
土壌水分計の設置位置 奥行1.25mの位置(盛土の中心部)

貝殻層が弱面にならないのか、実降雨(大雨)や地震による盛土変形を観察すると共に、貝殻層を裏法面浅層部に敷設することで、降雨浸透を防止・抑制するCB機能の長期的安定性を検証した。

◇堤体内に水分量測定用の計測センサーを設置



油粘土でコンパネの孔を塞いだ



法面内の計測センサー設置の状況

法面上の破碎貝殻の施工性確認



拡大
写真

径0.01m孔

破碎貝殻層の層厚、品質管理を考慮してジオセル(厚さ10cm)施工

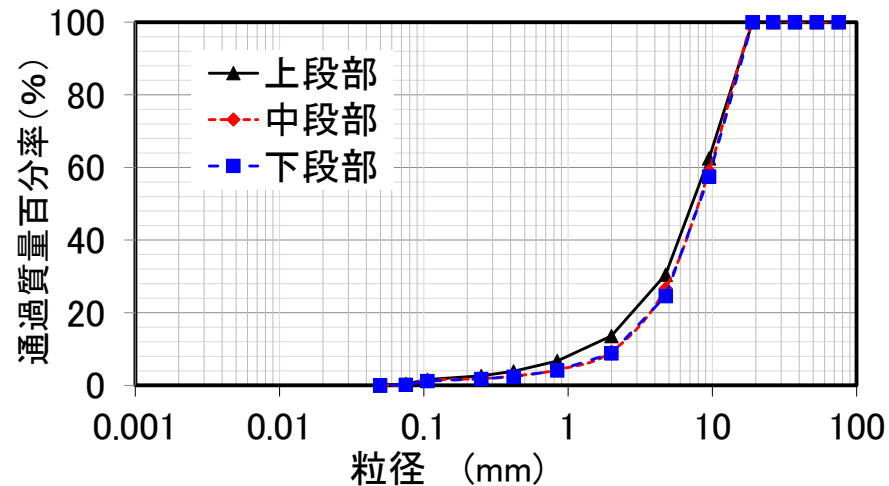
法面上に破碎貝殻を10cm厚さで施工



排水を考慮し
下端まで施工

破碎貝殻層の表面の凹凸を整形

法面上の破碎貝殻層の密度管理



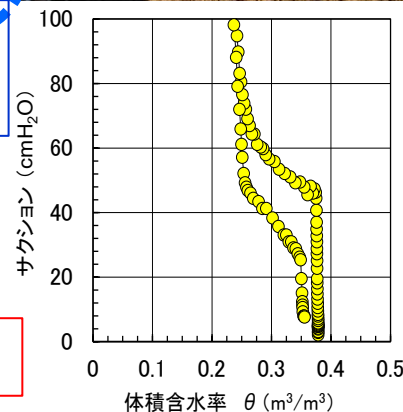
サンプリング位置	乾燥密度 ρ_d (Mg/m ³)
1) 法面上の上部	0.828
2) 法面上の中部	0.837
3) 法面上の下部	0.857

破砕貝殻層の上面に**覆土(表層)**を施工

施工性確認



埋設したセンサーの
ケーブル保護シース類



稲城砂のSWCC





実規模大の堤防裏法面の安定性検証

短時間大雨時や地震時などの影響を長期観測を行い、堤防の長期的安定性を実証する。



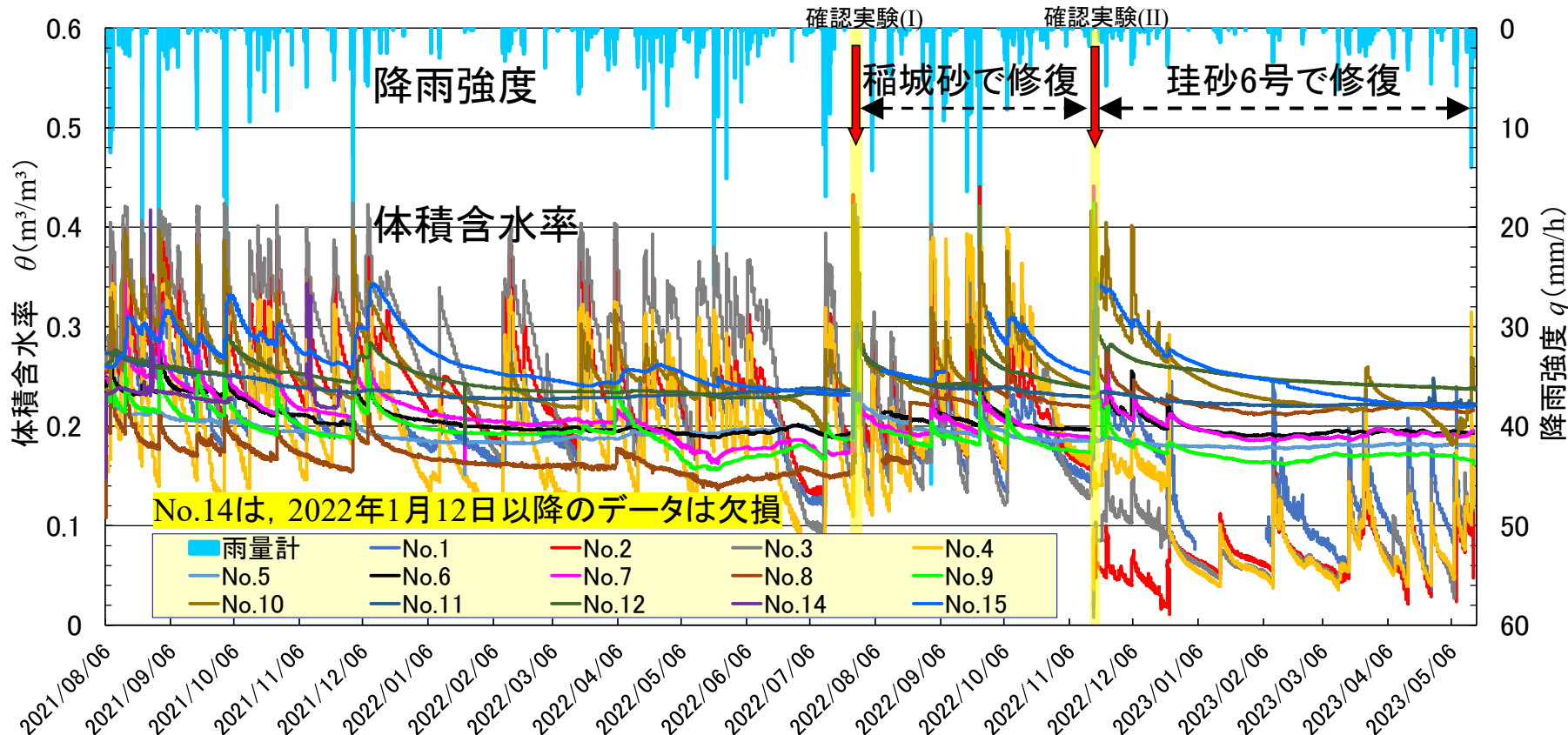
堤防盛土構築は、日本原子力発電株式会社「防災・関係する研究及び啓発活動等の実施事業」の支援を受けて



毎年、堤防決壊は複数発生している。適応策等はスピード感が重要

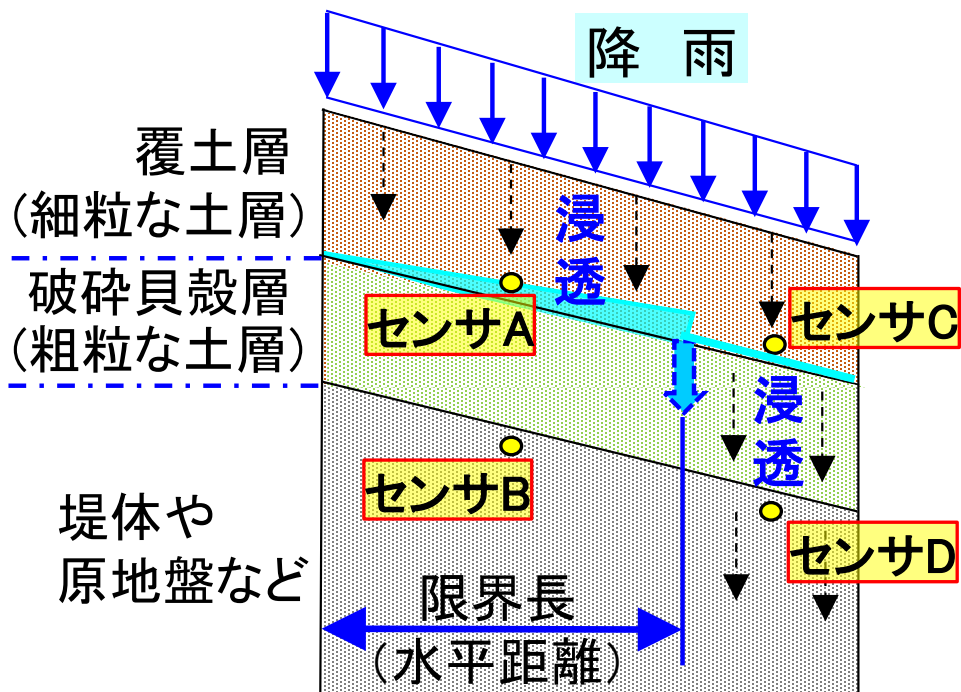
実規模大の堤防裏法面の安定性検証

破碎貝殻層の侵食抑制
効果の確認実験（2回）



体積含水率 θ と降雨強度 q の長期観測結果
(観測期間:2021年8月~2023年5月)

実規模大の堤防裏法面の安定性検証



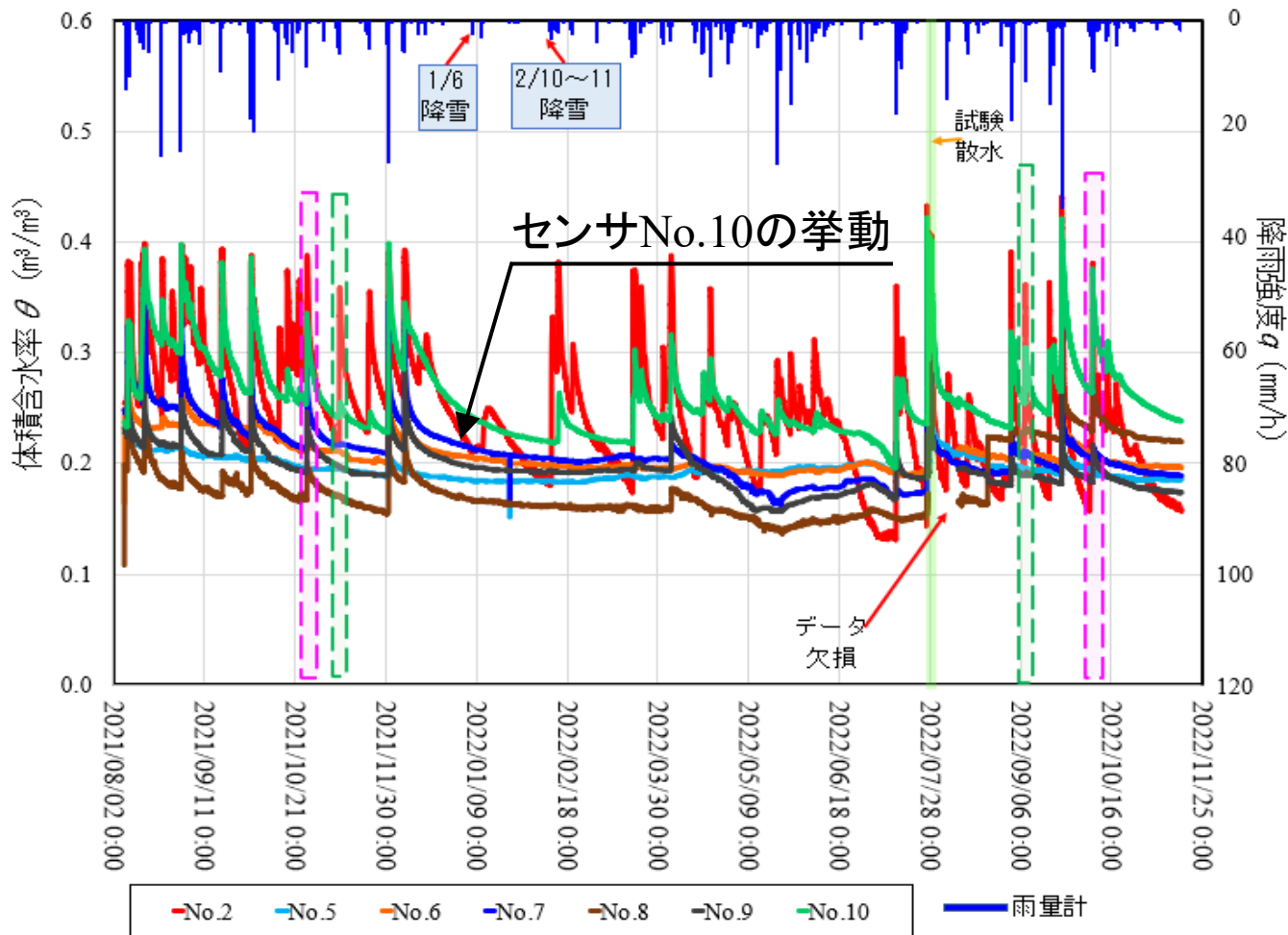
ブレイクスルーとその位置の判定説明図

式より算定した降雨強度 q に対する限界長(cm)

降雨強度 q (mm/h)	2.0	5.0	7.0	10.0	15.0
稲城砂	403(451)	161(180)	115(129)	81(90)	54(60)
珪砂6号	2,536(2,836)	1,014(1,134)	724(810)	507(567)	338(378)

注) 表中の()内の値は、盛土法肩からの斜距離(cm)を示す。

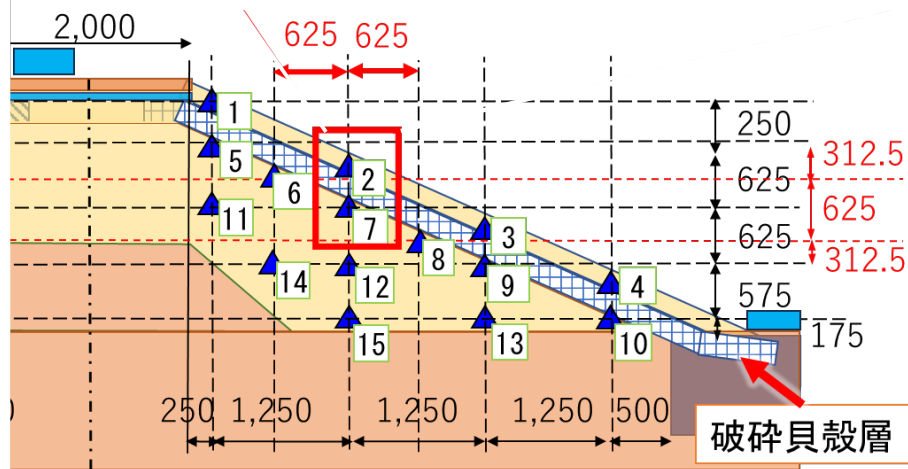
実規模大の堤防裏法面の安定性検証



破碎貝殻層の上部と下部に設置したセンサの 体積含水率 θ と降雨強度 q の観測結果

- 1) 大埜明日香、小林 薫、松元和伸、森井俊広: 貝殻を用いたキャピラリーバリア土層で被覆された堤体法面における雨水浸透抑制効果、地盤工学ジャーナル, Vol.19, No.1, pp. 17-32, 2024.3, 10.3208/jgs.19.17

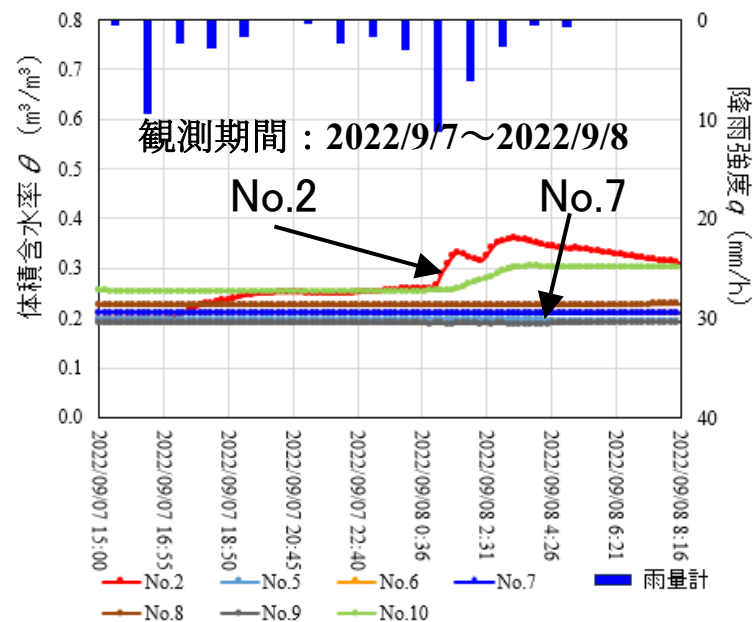
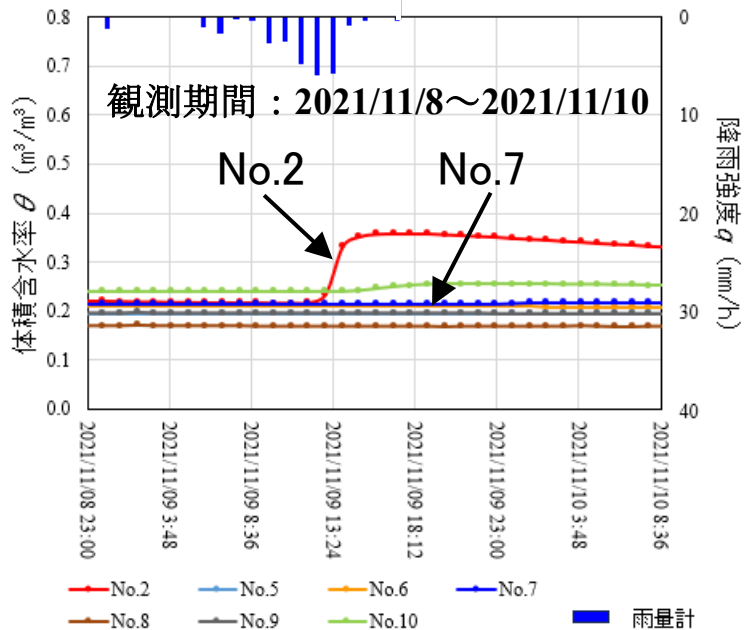
実規模大の堤防裏法面の安定性検証



赤色: No.2
青色: No.7
緑色: No.10

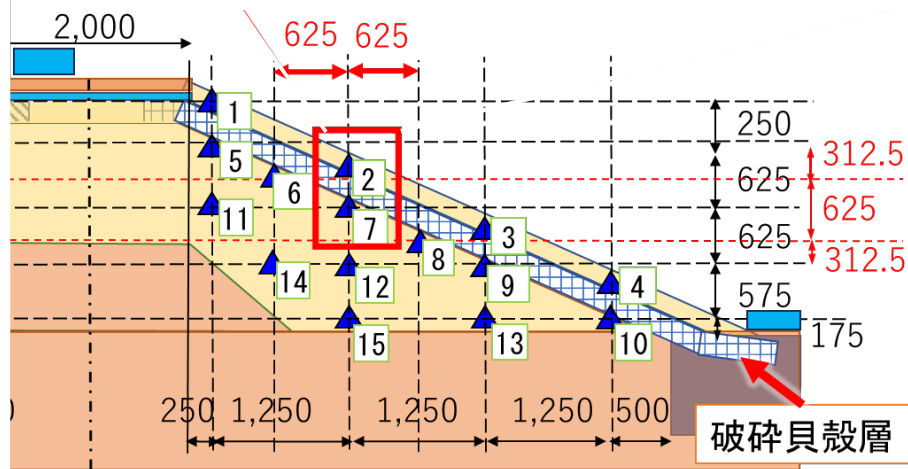
▲: 土壌水分計 ■: 雨量計

単位: mm



降雨強度が比較的弱い図の緑色破線囲み部における体積含水率 θ と降雨強度 q の関係

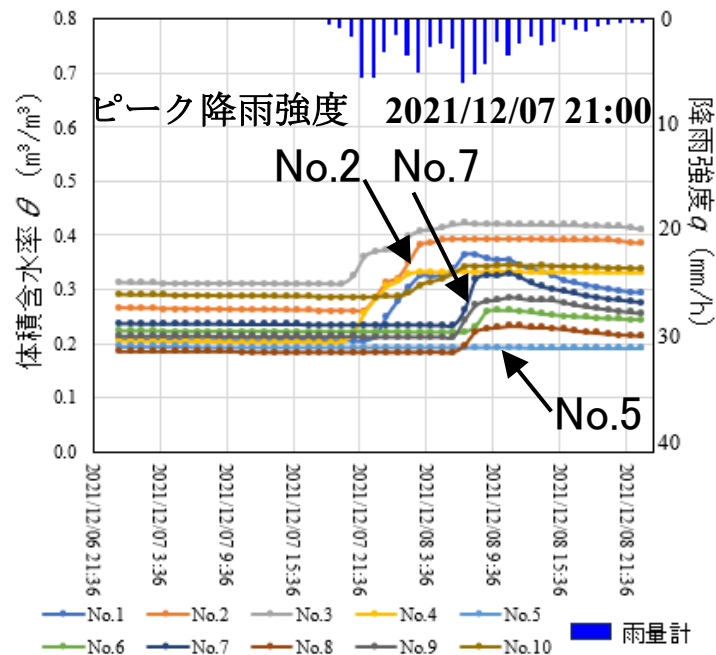
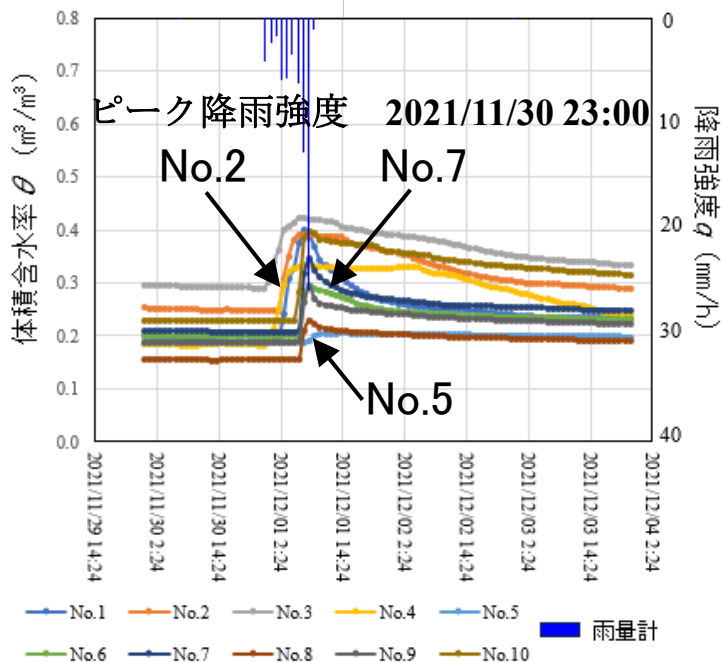
実規模大の堤防裏法面の安定性検証



オレンジ色: No.2
水色: No.5
紺色: No.7

▲: 土壌水分計 ■: 雨量計

単位: mm



ブレイクスルー時の体積含水率 θ と降雨強度 q の関係

実規模大の堤防裏法面の安定性検証

侵食実験(確認実験(I))

(期間: 2022/7/25~29)

⇒貝殻層の侵食抑制および覆土修復後の
CB機能の回復を確認した。



(a)放流後の侵食法面状況



(b)修復後の法面状況

侵食後および修復後の法面状況(確認実験I)

侵食実験(確認実験(II))

(期間:2022/11/16~18)

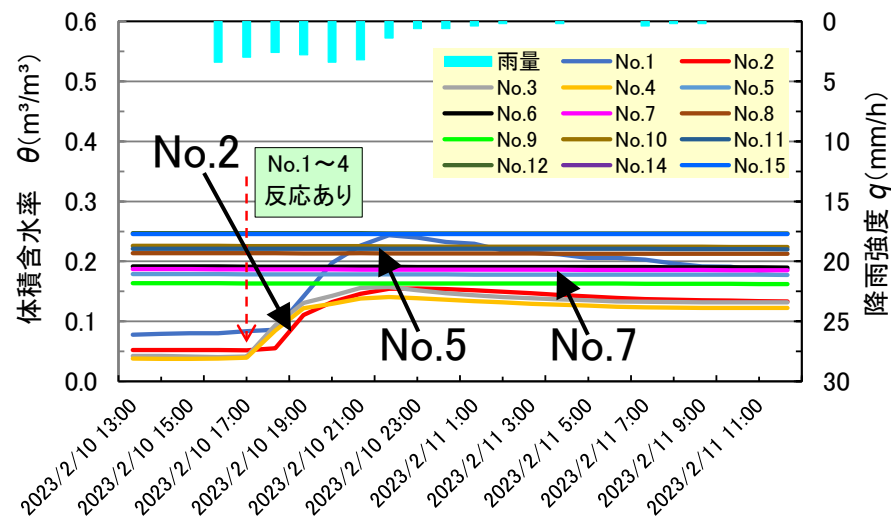
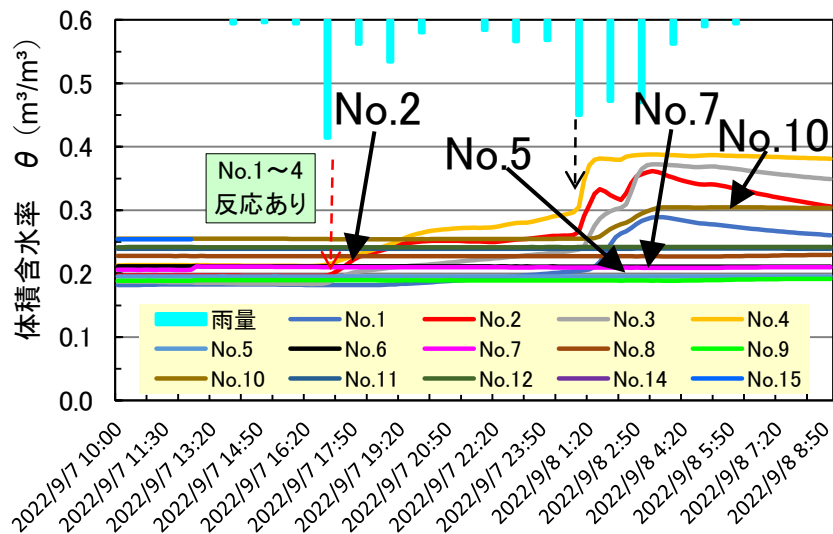
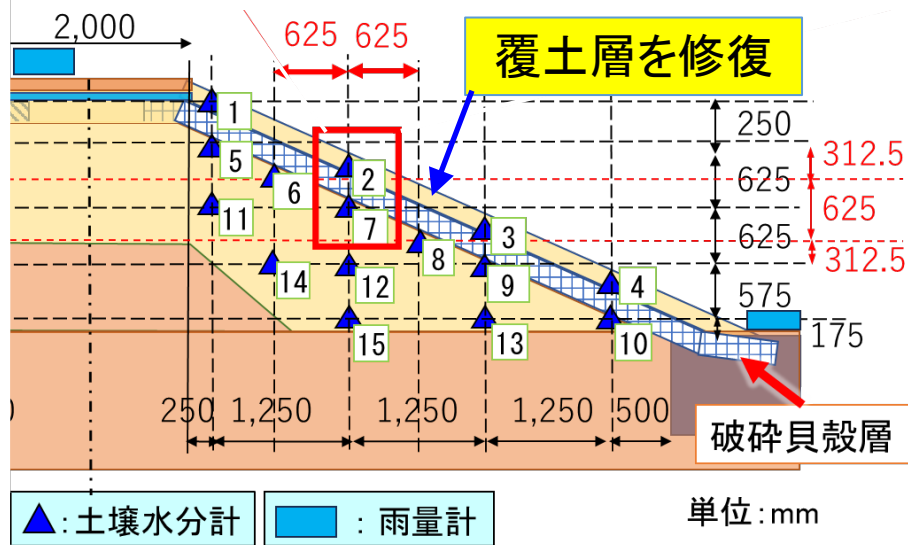
⇒貝殻層の侵食抑制および覆土修復後のCB機能の回復を確認した。

流水を1時間連続で流し続けた



貝殻層ありは侵食無し

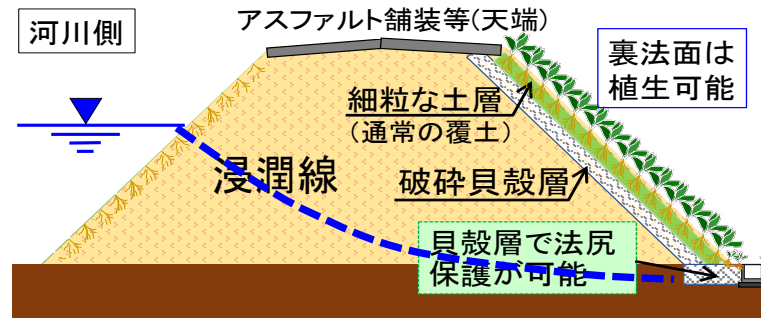
実規模大の堤防裏法面の安定性検証



覆土層を修復した後のCB機能の回復挙動

実規模大の堤防裏法面の安定性検証

1) 盛土内への降雨浸透抑制 (土の保水性の違いを活かした貝殻型CB活用)



2) 越水時の侵食抑制に有効 (裏法面の難侵食化への貝殻層を活用)

洪水時の越水に対する主な対策とし

ては常田らは、

I) 堤体の不飽和化

II) 天端構造の裏法侵食の抑制

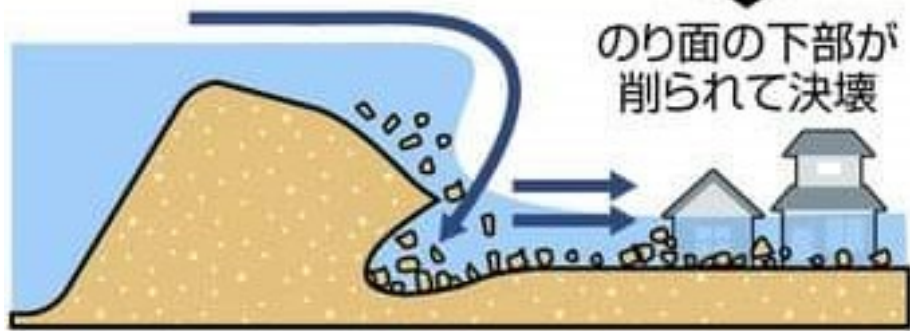
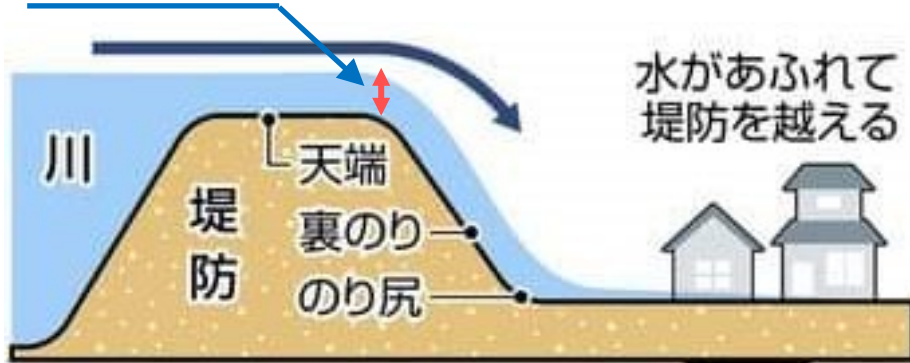
III) 裏法面の難侵食化

などを挙げている。

常田賢一，植田裕也，跡治志由大，小柿裕治，藤木孝則：越流に対する堤防の粘り強さの向上に関する検討，土木学会 第4回河川堤防技術シンポジウム講演概要集，pp.23-26，2016.

III) 裏法面の難侵食化

越流水深



耐越水堤防なら...



国土交通省では、

粘り強い河川堤防

(損傷を抑制し決壊までの時間を引き延ばせる河川堤防)の技術開発目標として、

越流水深30 cm,

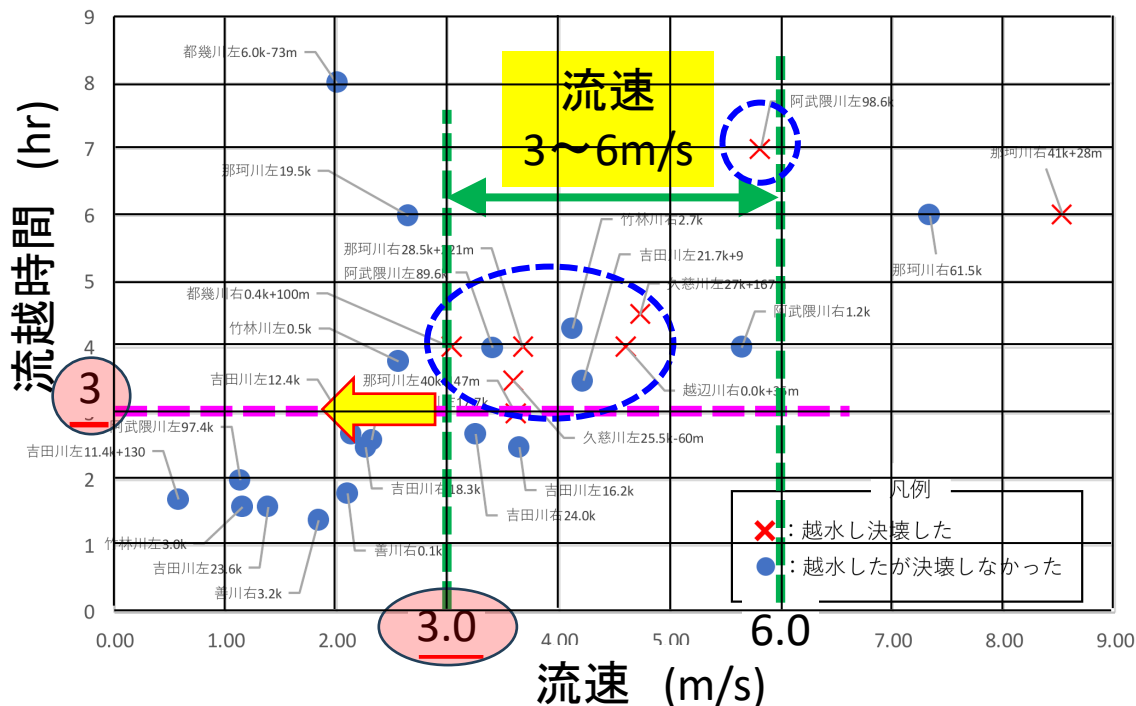
越流時間3時間が

示されている。

「流速」、「作用時間」と被災状況との関係

- 越水による外力と決壊の関係を見るために、越水により決壊した箇所と決壊しなかった箇所における越流時間と流速(等流流速)の関係を整理。
- 法尻付近での流速(裏法部の等流流速)が3m/s未満の箇所で今回決壊している箇所はない。
- また、越流時間が3時間未満の箇所で今回決壊している箇所はない。
- 既往の知見^{※)}によると、「流速2m/sを目安として、芝の耐侵食性は確保されている」とされている。
- 一方、今回の洪水では、法尻付近の流速が3m/s未満であれば堤防裏法面および法尻表面の耐侵食性は一定程度、確保されているものと考えられる。

第2回 令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会の配付資料より



※)福岡捷二・藤田光一・加藤善明・森田克史: 堤防法面の芝の耐侵食特性, 土木技術資料29-12, 1987.

国土交通省：令和4年5月20日に行われた技術検討会で、粘り強い性能（以下、「越水に対する性能」という）を付加する「粘り強い性能に関する基本的な考え方」等が示された。

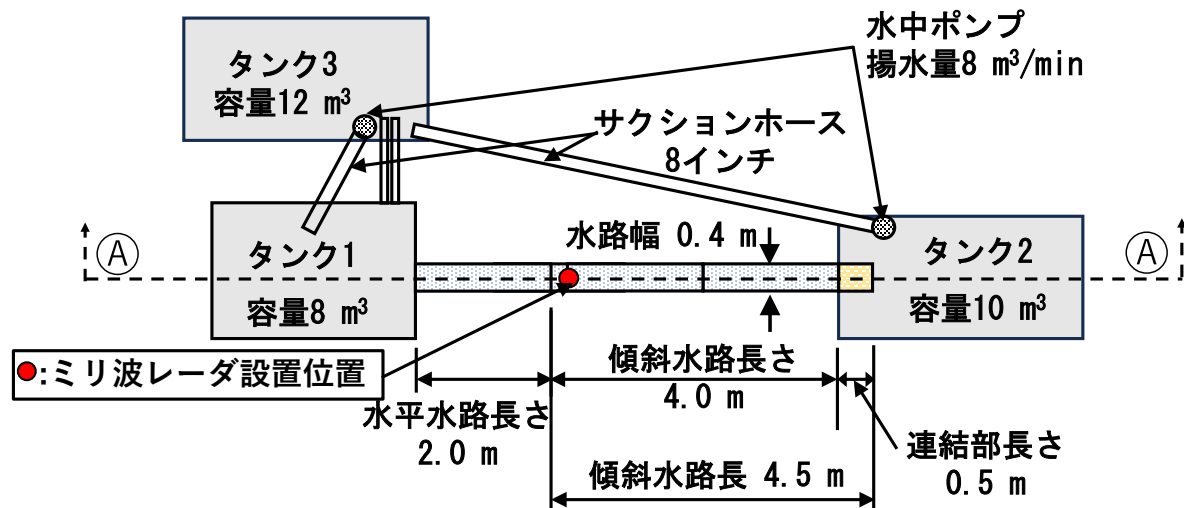
⇒ **粘り強い河川堤防**（損傷を抑制し決壊までの時間を引き延ばせる河川堤防）の技術開発目標

◇越流水深30 cm, 越流時間3 時間

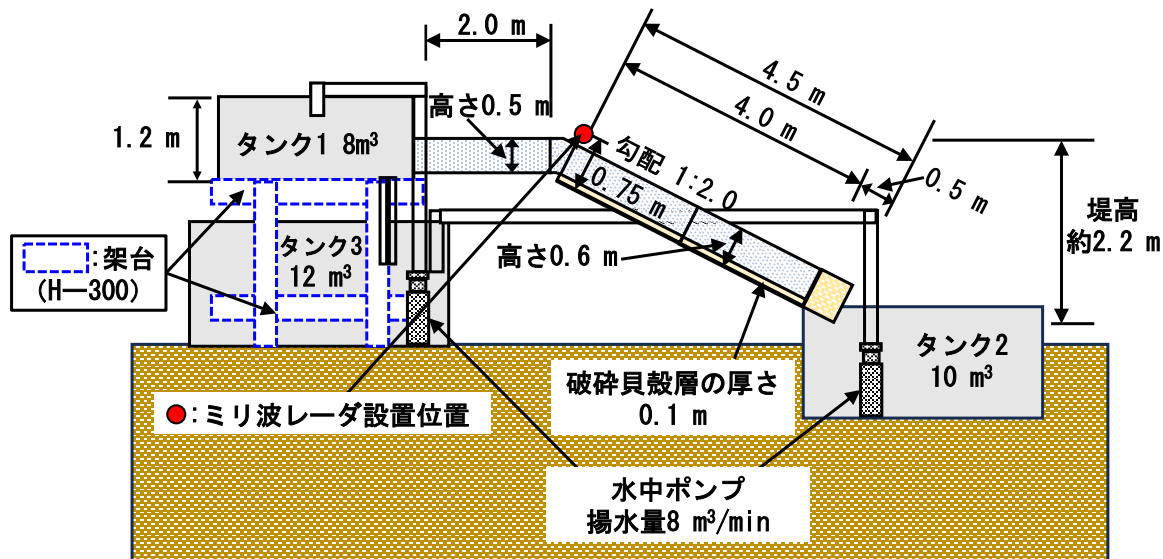
これまでの破堤した現地調査結果（報告書）より、

越流流速 3 m/s超を評価の目安に追加して評価

貝殻で補強する河川堤防裏法面



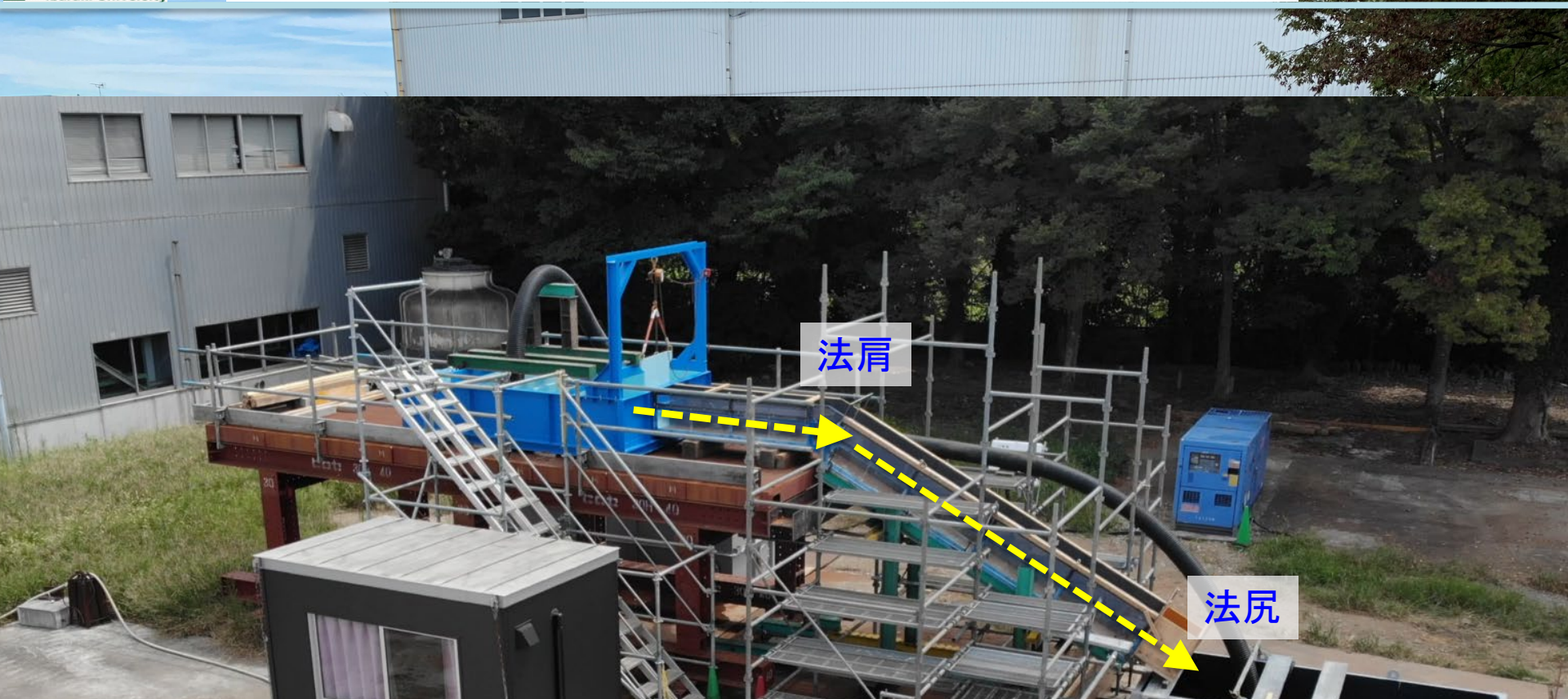
(a) 実験装置平面図



(b) 実験装置①—①断面図

破砕貝殻層(シェルネット等)の越流時侵食抑制効果検証のための実験装置

貝殻で補強する河川堤防裏法面



国土交通省では、**粘り強い河川堤防**（損傷を抑制し決壊までの時間を引き延ばせる河川堤防）の技術開発目標として、**越流水深30 cm, 越流時間3 時間**が示されている。

越流流速 3 m/s超を評価に追加

越流水深 (30 cm) の確認

○越流水深測定方法

越流水深は水平部水路の法面側で測定し
各目標越流水深が発揮されるか確認した。

越流水深測定位置



装置側面図

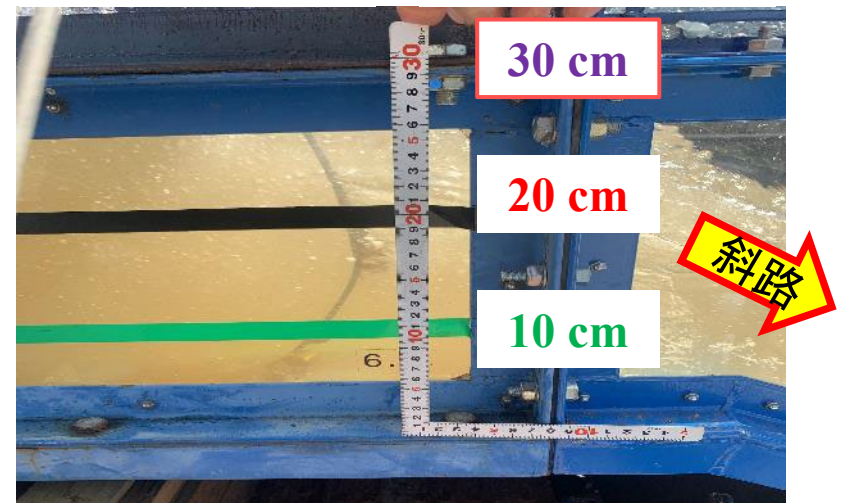
○結果



越流水深10 cm



越流水深20 cm



越流水深30 cm

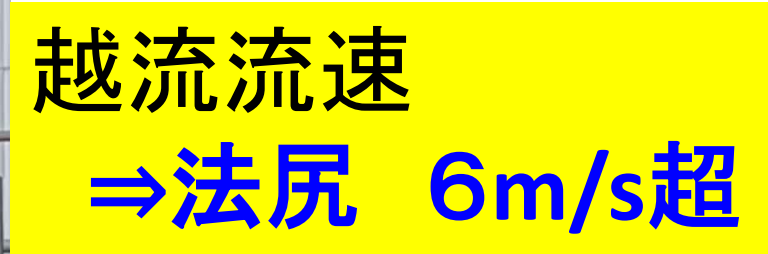
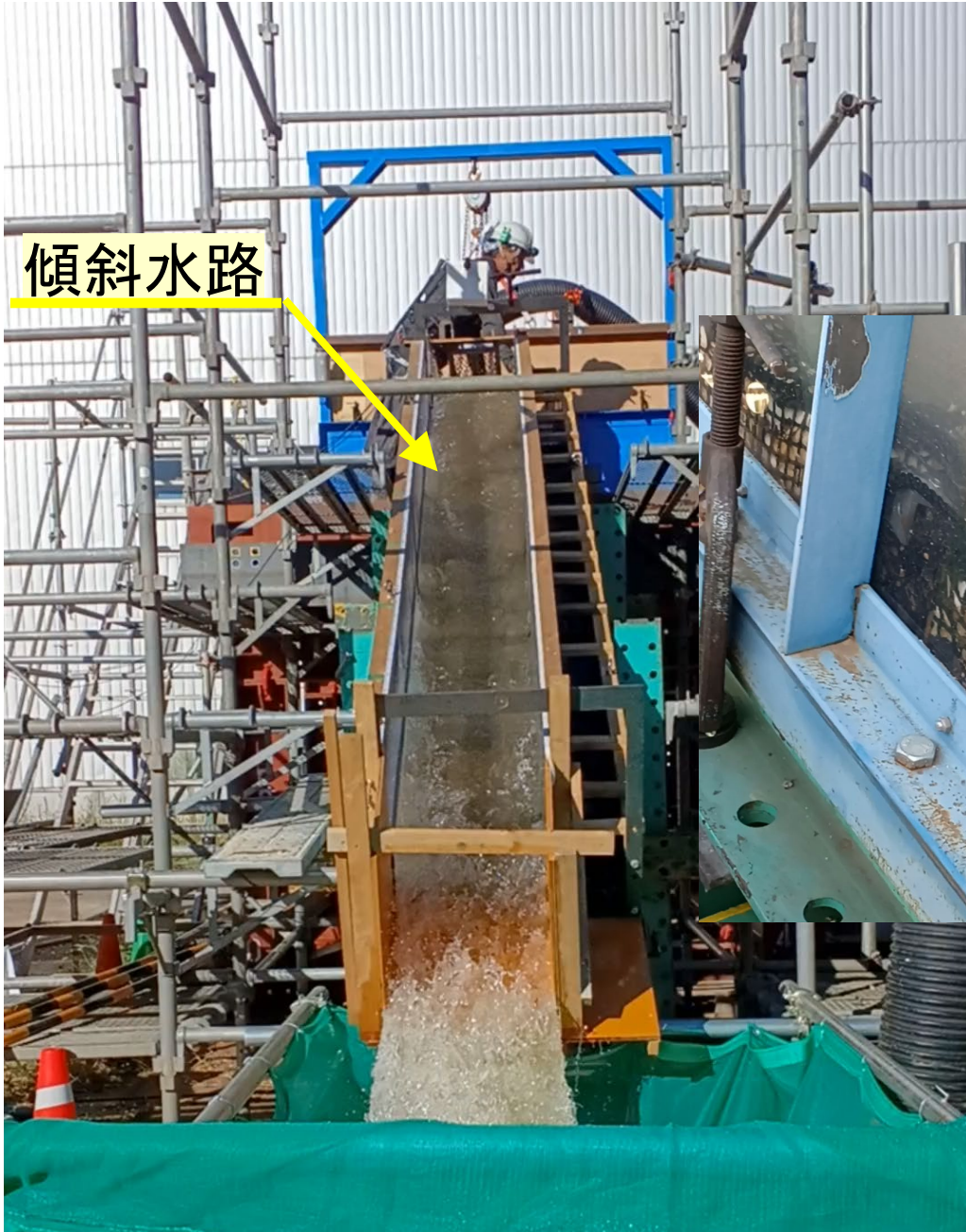
貝殻で補強する河川堤防裏法面

傾斜水路

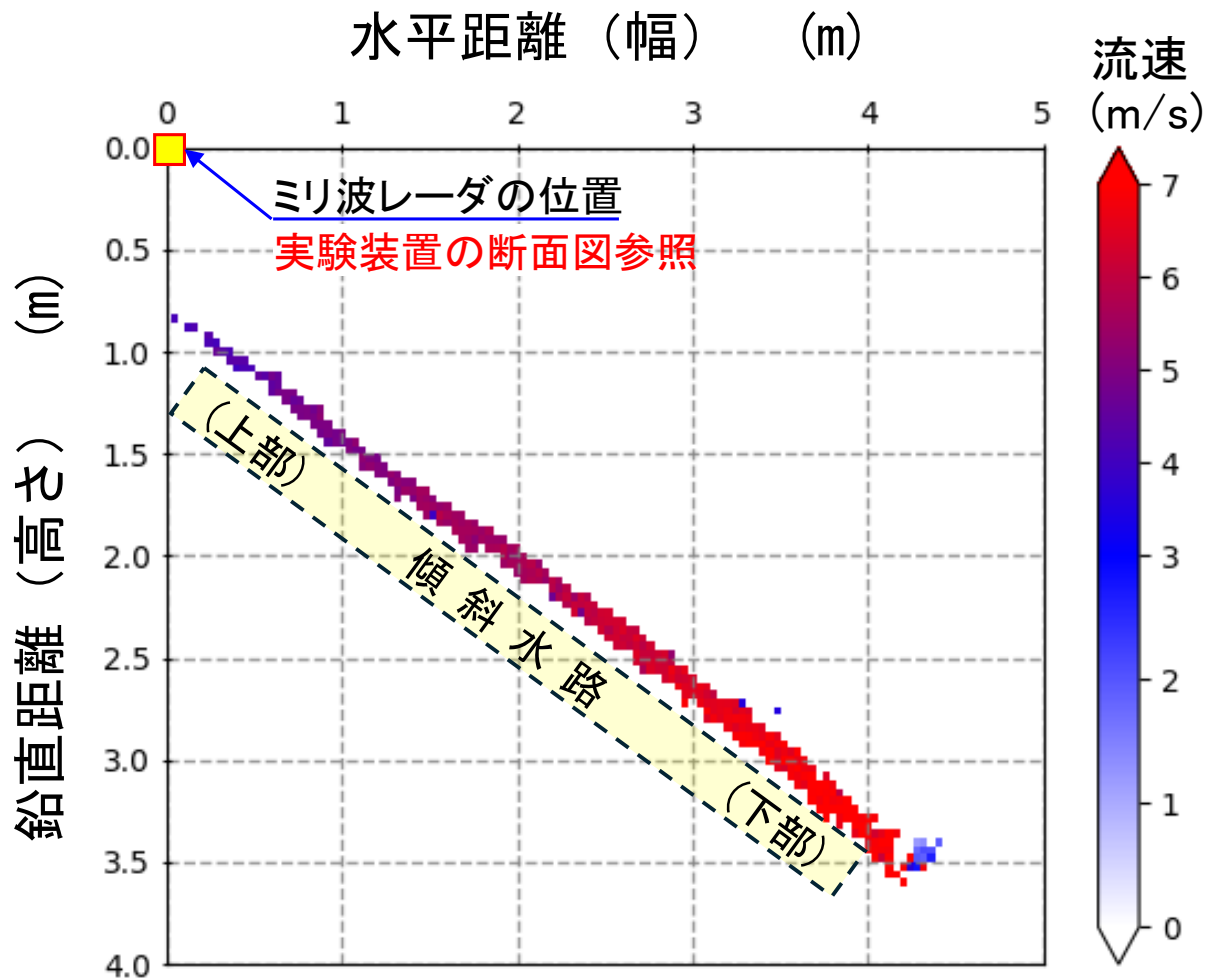
越流流速

⇒法尻 6m/s超

ネットに入れた破碎貝殻



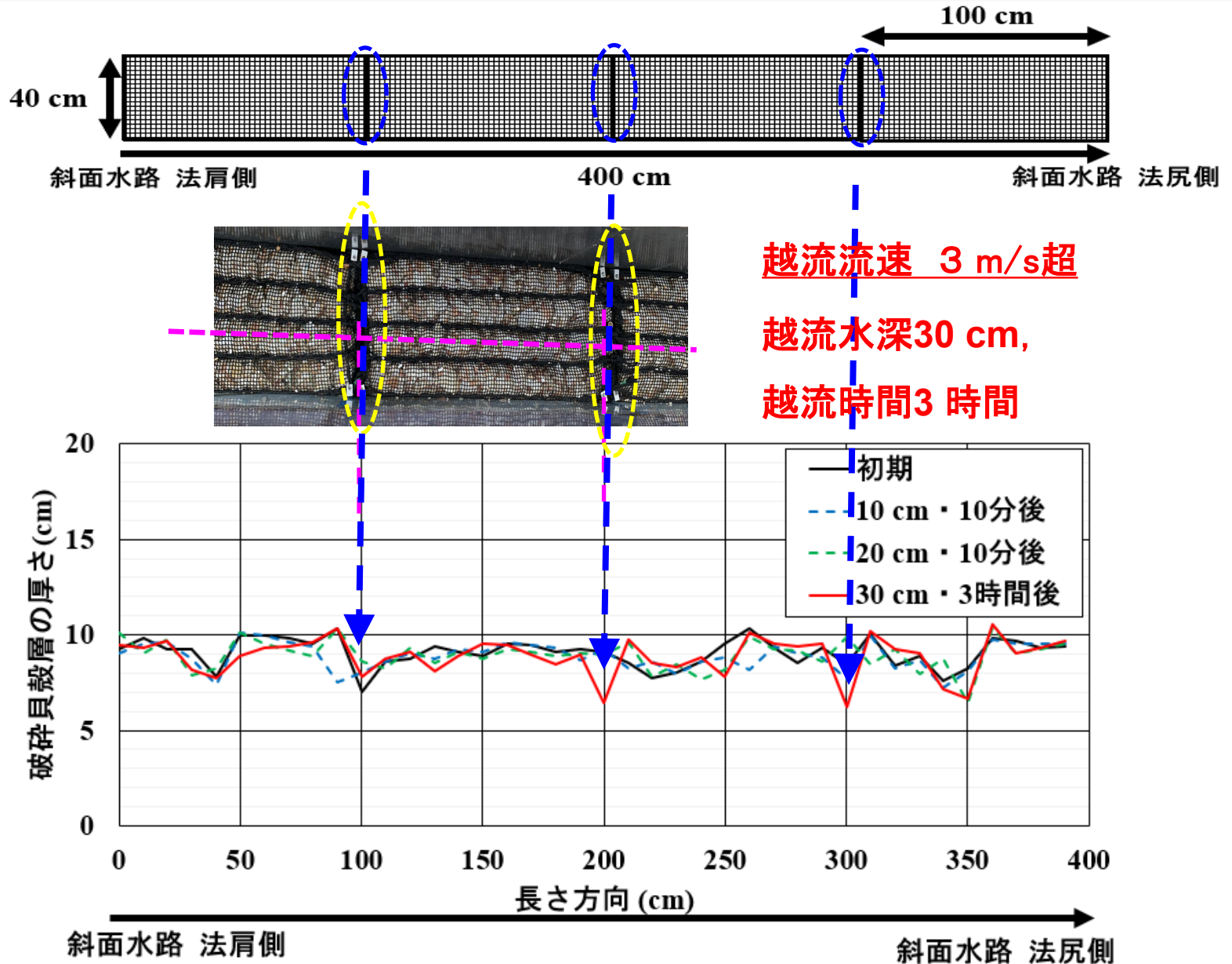
貝殻で補強する河川堤防裏法面



傾斜水路上の越流水表面の流速分布

- 1) R. Sun, S. Tsukamoto, K. Suzuki, S. Takeda, T. Nemoto, K. Kobayashi, K. Matsumoto: Experiments of Overflow Velocity Measurement using Millimeter-Wave MIMO Radar with a Real-Scale Pseudo Embankment, *IEEE Sensors Journal* (IF=4.3), Volume: 24, Issue: 19, pp.30958-30967, 2024.10.1, 10.1109/JSEN.2024.3436901

貝殻で補強する河川堤防裏法面



貝殻で補強する河川堤防裏法面

ひたちなか市と連携した
貝殻で補強する河川堤防裏法面 (継続中)



ドローンによる上空からの試験堤防法面の撮影

貝殻で補強する河川堤防裏法面

貝殻層の密度管理及び高さ管理のため⇒**ジオネット**
再生ポリエステル繊維，NT-45（標準タイプ），目合い10mm



ジオネット+貝殻（タイプC）の施工状況

貝殻で補強する河川堤防裏法面

貝殻層の密度管理及び高さ管理のため⇒**ジオセル**
高密度ポリエチレン製，S型孔あきタイプ（径0.01m孔）



ジオセル+貝殻(タイプB)の施工状況

貝殻で補強する河川堤防裏法面

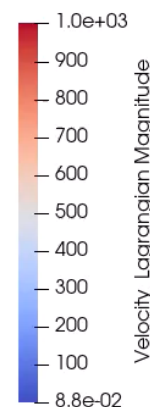
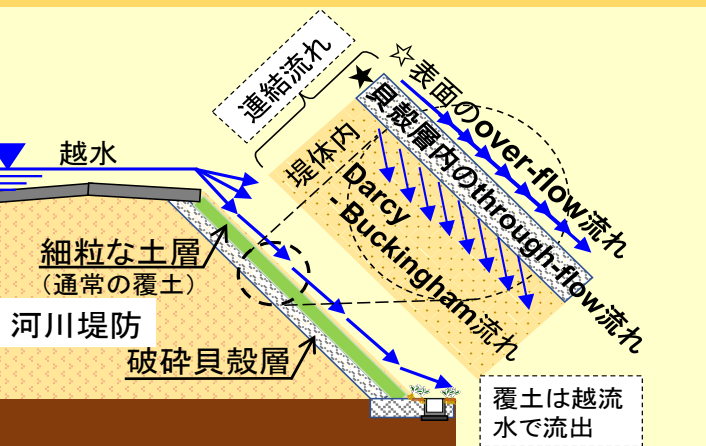
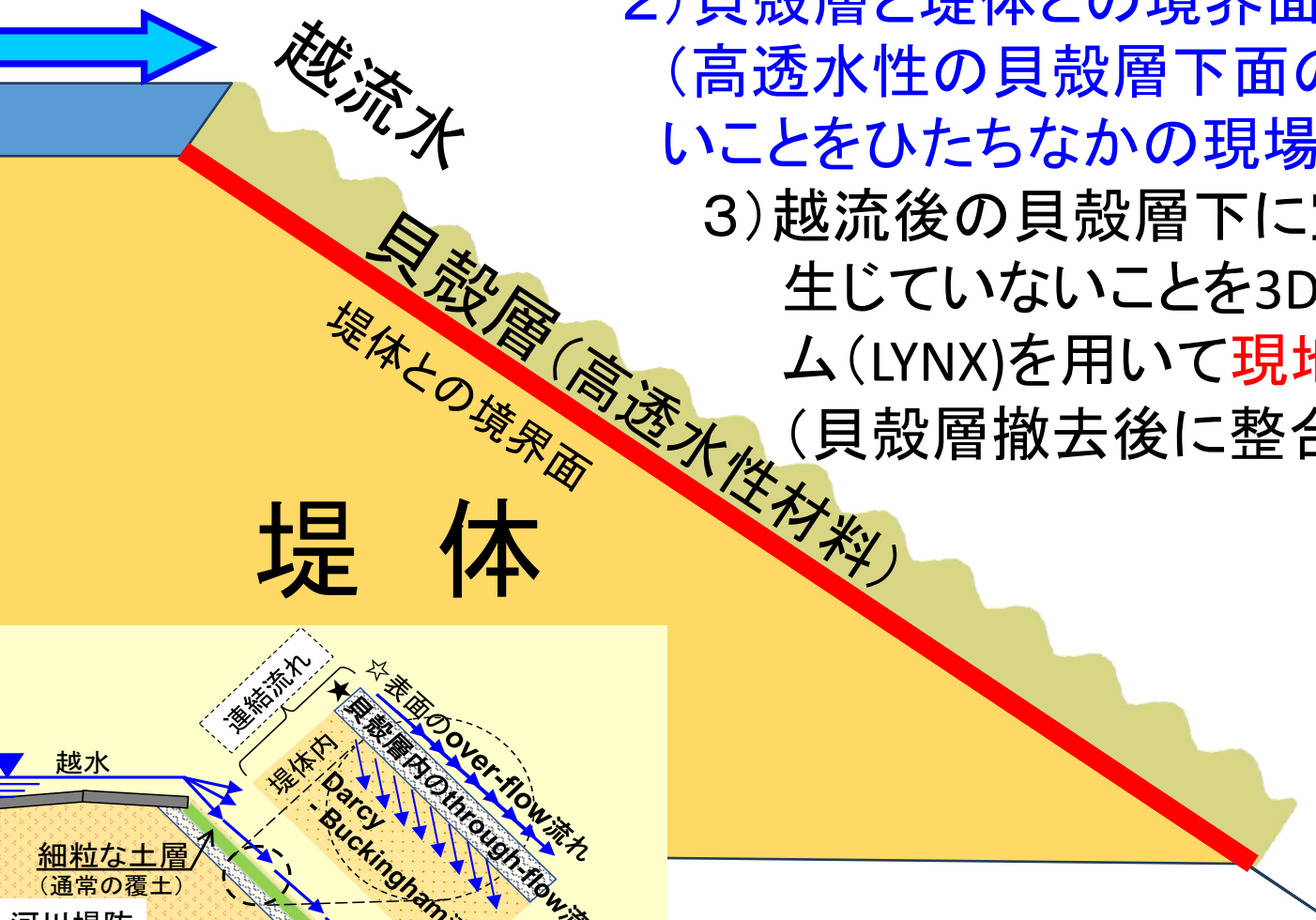


短時間大雨で河川水位上昇に伴う越流実験場所

貝殻で補強する河川堤防裏法面

早期社会実装のために！

- 1) 貝殻層内の間隙水圧分布を解析的評価
(貝殻層下の堤体土の吸出しについて**評価中**)
- 2) 貝殻層と堤体との境界面について検討
(高透水性の貝殻層下面の堤体に侵食が無いことをひたちなかの現場で**評価中**)
- 3) 越流後の貝殻層下に空洞(水みち)等が生じていないことを3D地中レーダシステム(LYNX)を用いて**現地計測予定**。
(貝殻層撤去後に整合性検証**実施予定**)



本研究における各種実験および数値解析では、

- ・ひたちなか市(市長、建設部河川課)
- ・りんかい日産建設株式会社
- ・株式会社 開発計画研究所
- ・飛島建設株式会社
- ・有限会社 TNS
- ・株式会社 エーバイシー
- ・ナカダ産業株式会社
- ・東京インキ株式会社
- ・株式会社 RSダイナミックス
- ・日本原子力発電株式会社
- ・新潟大学
- ・東北大学
- ・茨城大学

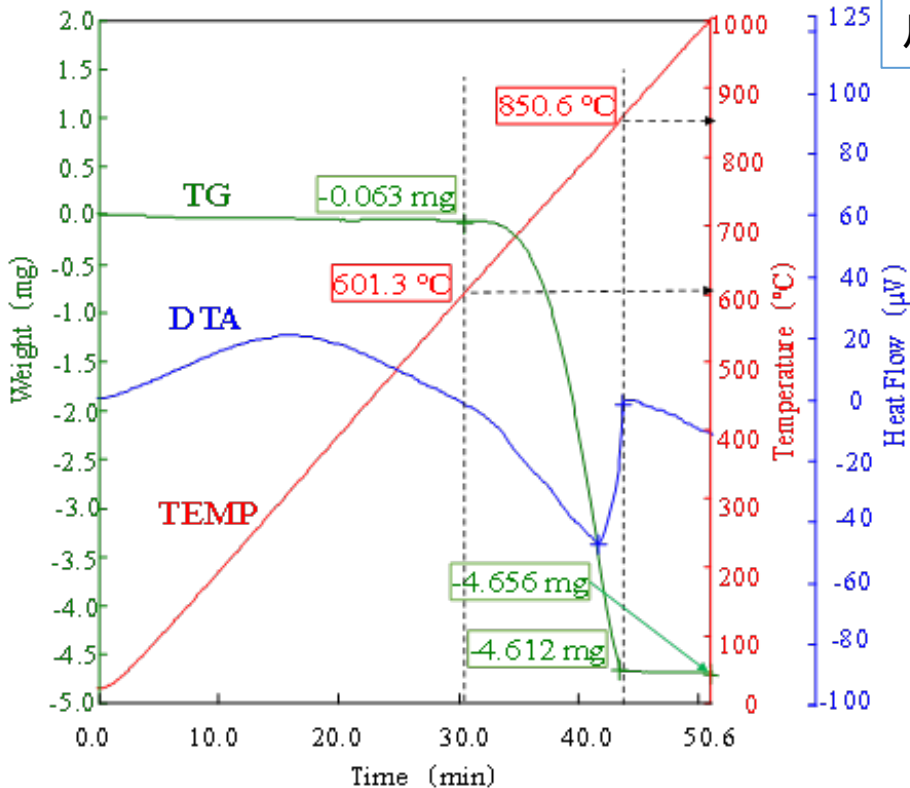
など、多くの方にご支援・ご協力いただいております。
ここに記して謝意を示します。

本日の内容

1. 茨城県内における近年の堤防決壊について
2. 越水による堤防決壊への対応に貝殻活用
3. 貝殻活用による堤防裏法面の補強対策
4. **CO₂の放出量削減と浅層地盤への貯留**

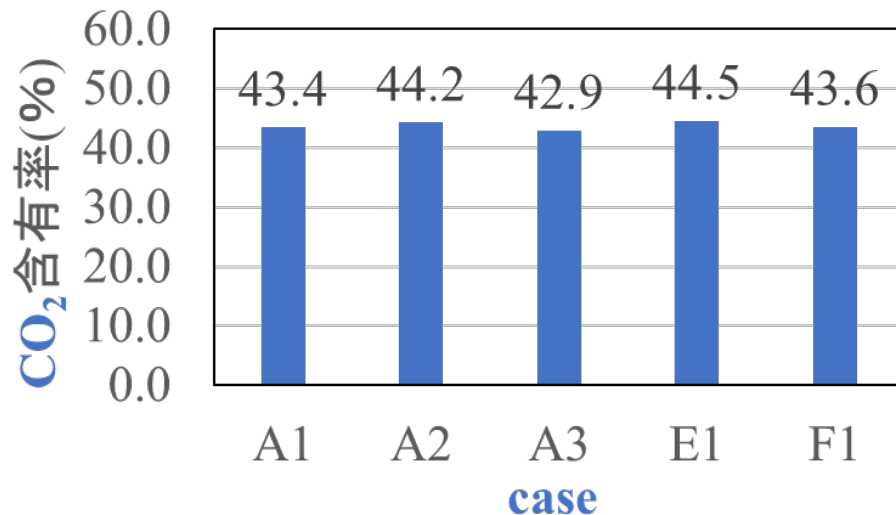
ホタテ貝殻の熱分析結果

ホタテ貝殻の熱分析測定結果の一例



図中の記号は、TGは質量、DTAは反応の状態、TEMPは温度を示す。

ホタテ貝殻の熱分析測定結果一覧



質量減少分



ホタテ貝殻は約95%が炭酸カルシウム (CaCO₃) できている。貝殻質量の約43%がCO₂である。





<現状>

ホタテ貝殻がこういった環境下（酸性雨、降雨量増加など）で、どの様に、どの程度のCO₂を大気中に放出しているのか？明らかにになっていない



<研究の目的>

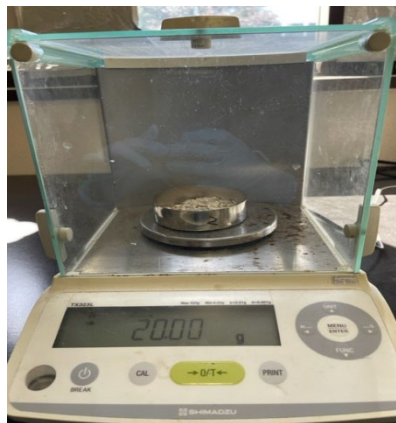
- 1)酸性雨によるホタテ貝殻の質量減少の傾向を明らかにする（研究は安全側の浸漬条件で行う）
- 2)ホタテ貝殻の質量減少量を定量的に把握する
- 3)堤防裏法面に貝殻を埋設した際のCO₂放出抑制量を明らかにする

試験ケース一覧

CASE		溶液のpH(-)	貝殻の粒径(mm)	浸漬日数(日)
CaseA	CaseA1	3.0	2.0-4.75	15
	CaseA2	5.0		
	CaseA3	7.8		
CaseB	CaseB1	3.0	4.75-9.5	15
	CaseB2	5.0		
	CaseB3	7.8		
CaseC	CaseC1	3.0	9.5-19.0	15
	CaseC2	5.0		
	CaseC3	7.8		
CaseD	CaseD1	3.0	37.5-53.0	15
	CaseD2	5.0		
	CaseD3	7.8		
CaseE	CaseE1	3.0	2.0-4.75	30
	CaseE2	5.0		
	CaseE3	7.8		
CaseF	CaseF1	3.0	2.0-4.75	45
	CaseF2	5.0		
	CaseF3	7.8		

酸性溶液を用いた簡易浸漬促進試験

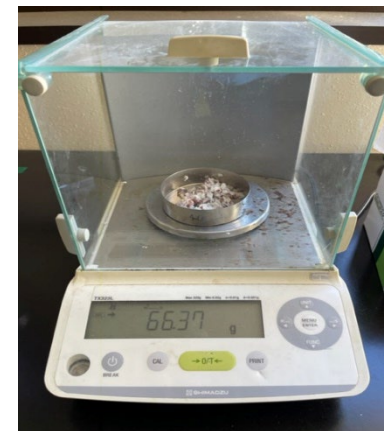
①質量測定



②15日間浸漬



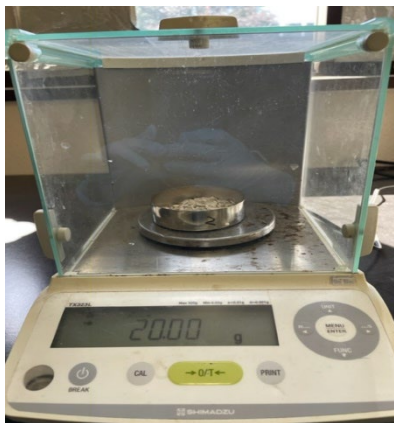
③質量測定



CASE	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3
粒径	2.0mm-4.75mm			4.75mm-9.5mm			9.5mm-19.0mm			37.5mm-53.0mm		
写真												
pH	3	5	7.8	3	5	7.8	3	5	7.8	3	5	7.8
浸漬日数	15日											

酸性溶液を用いた簡易浸漬促進試験

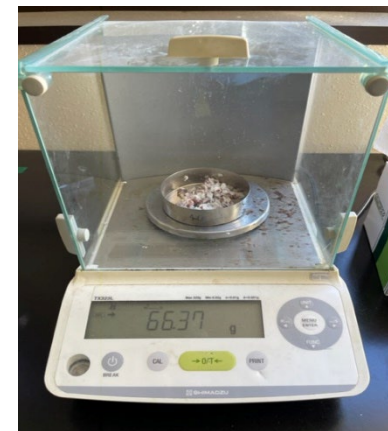
①質量測定



②浸漬

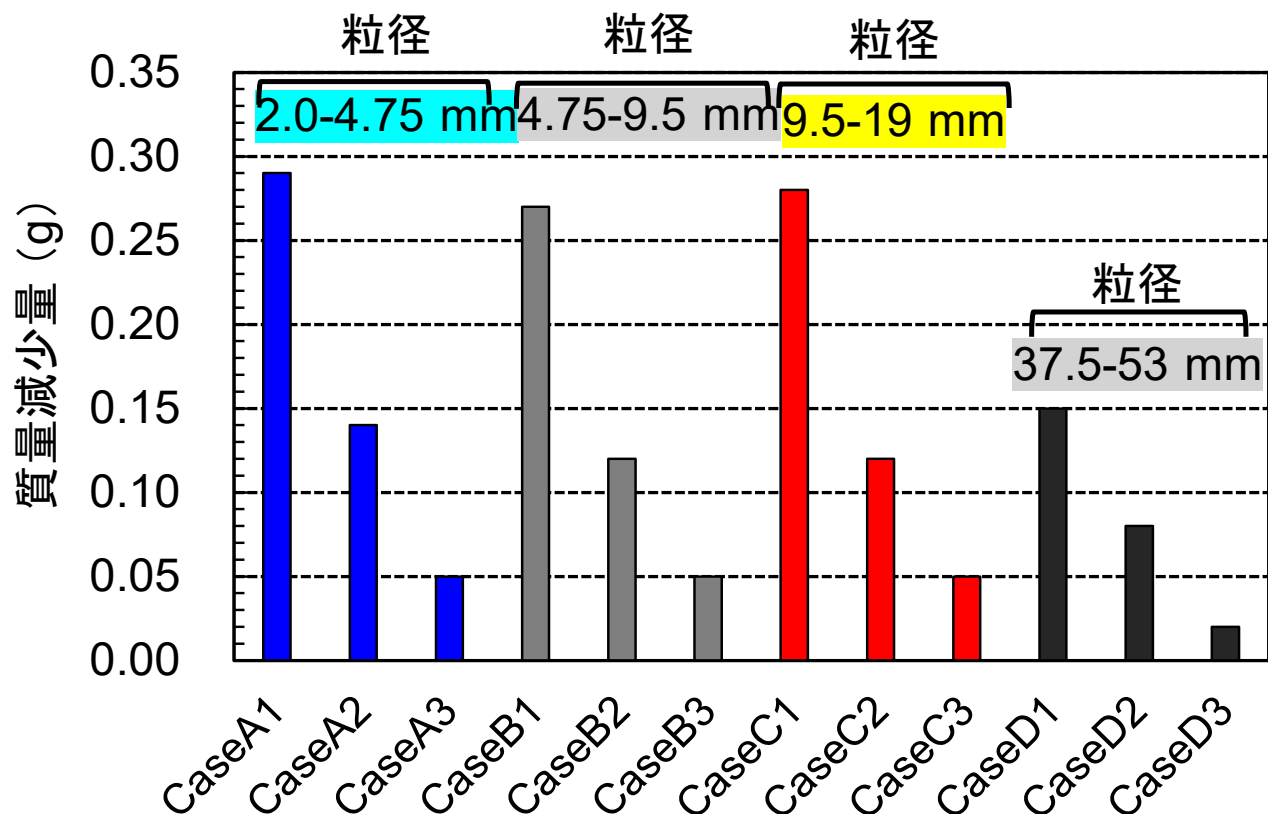


③質量測定



CASE	A1	A2	A3	E1	E2	E3	F1	F2	F3
粒径	2.0mm-4.75mm								
写真									
pH	3	5	7.8	3	5	7.8	3	5	7.8
浸漬日数	15			30			45		

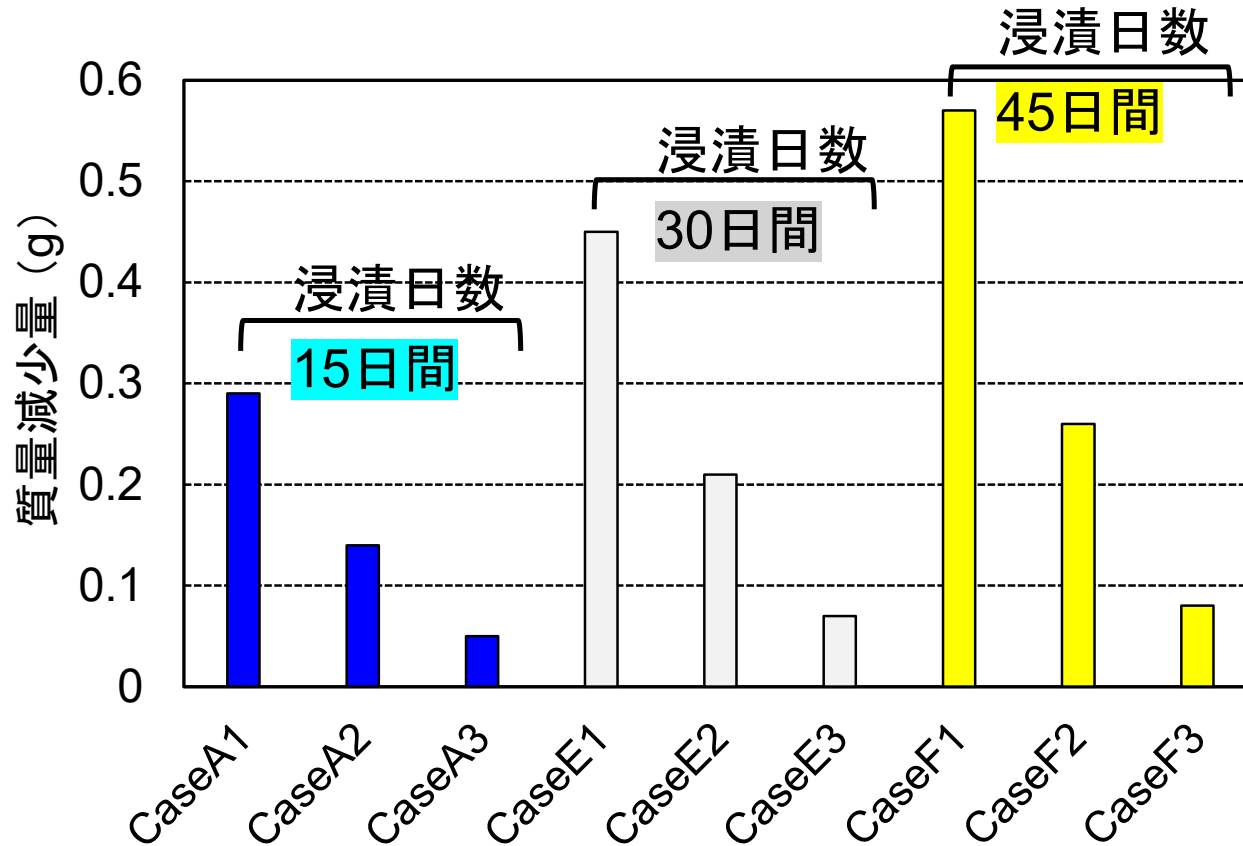
酸性溶液を用いた簡易浸漬促進試験



貝殻の質量変化に及ぼす酸性溶液のpH, 粒径の影響

- 1) 小林 薫、原 龍正、松元和伸、安原一哉: ホタテ貝殻の地盤工学的活用による環境保全と超浅層地盤内へのCO₂固定化, 土木学会論文集、Vol.79, No.27, 23-270008, pp.1-9, 2024.2, 10.2208/jscej.23-27008

酸性溶液を用いた簡易浸漬促進試験



貝殻の質量変化に及ぼす浸漬日数の影響

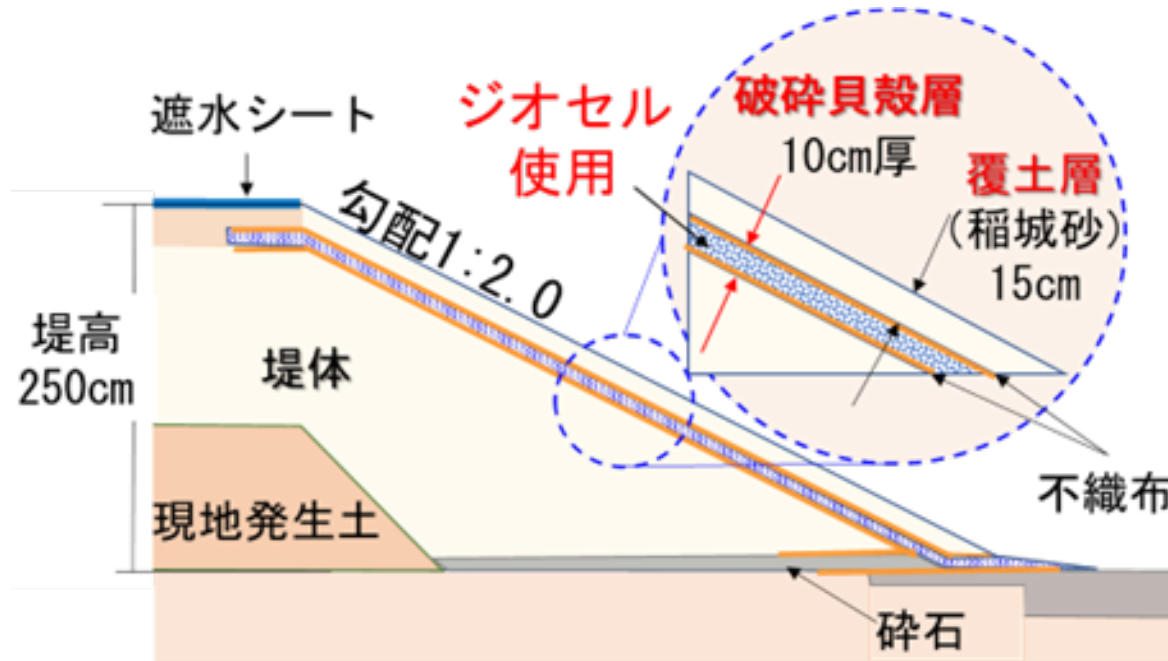
酸性溶液を用いた簡易浸漬促進試験

15日間ごとの質量減少量の変化量 (g)

経過日数		0日	15日	30日	45日
酸性液 の初期pH	区間 日数	15日間	15日間	15日間	
	⇒	0.29	0.16	0.12	
	⇒	0.14	0.07	0.05	
	⇒	0.05	0.02	0.01	

国内の酸性雨

pH=4.8~5.6



【CO₂放出抑制量の試算条件】

- ・ 中小河川（北海道・青森県）の両岸に貝殻層を埋設した堤防を施工
- ・ 貝殻層の厚さ：0.1（m）
- ・ ホタテ貝殻の乾燥密度：0.84（Mg/m³）
- ・ 試算する堤防の規模は上図参照のこと



破碎貝殻層の厚さ(m)	貝殻層高さ(法面高さ)(m)	貝殻層長さ(法面長)(m)	貝殻の乾燥密度(Mg/m ³)
0.1	2.25 (2.5)	5.0 (5.6)	0.84

$$\text{CO}_2\text{放出抑制量 (t-CO}_2\text{/年)} = (A/15) \times (B/C) \times D \times E \quad (1)$$

ここで、A：暴露日数で、最近10年間の北海道の降水日数^{注4)}の平均日数（日/年），15：浸漬促進試験時の浸漬日数（日），B：浸漬促進試験時の貝殻質量の減少量（pH=5の酸性溶液時は0.14 g）（g），C：浸漬試験促進時の貝殻質量（= 20 g）（g），D：貝殻質量に占める二酸化炭素の質量割合（= 43.4%，青森県産），E：堤防裏法面に敷設した貝殻質量（t）である。

ホタテ貝殻を適用した場合の試算CO₂放出抑制量

堤防裏法面 延長	暴露日数 (日/年)	貝殻体積(m ³)	浅層敷設の 貝殻質量(t)	CO ₂ 放出抑制量 (t-CO ₂ /年)	備考 ^{注)}
100 m当り	148	100.0	84.0	2.50	
2,646 km		264.6万	222.3万	6.6万	50%
1,323 km		132.3万	111万	3.3万	25%

注) 北海道+青森の2級河川の全長^{注6)} 約5,291 kmに対する比率

CO₂の放出量削減と浅層地盤への貯留

運搬車両(10 tonダンプ)の試算されたCO₂排出量

堤防裏法面延長	E: 浅層敷設の貝殻質量(t)	10 tonダンプの台数(台)	F: ダンプ運搬距離(km)	G: 1km走行時の排出量(t-CO ₂ /km)	運搬によるCO ₂ 排出量(t-CO ₂)	備考 ^{注)}
100 m当り	84.0	9	900	0.00061	0.55	
2,646 km	222.3万	22.23万	2,223万		1.36万	50%
1,323 km	111.1万	11.11万	1,111万		0.68万	25%

注) 北海道+青森の2級河川の全長^{注5)} 約5,291 kmに対する比率

ホタテ貝殻を適用した場合の試算CO₂削減量

堤防裏法面延長	①CO ₂ 放出抑制量(t-CO ₂ /年)	②運搬によるCO ₂ 排出量(t-CO ₂)	③ ①-②(CO ₂ 削減量)(t-CO ₂)	2050年 ^{注)} までの削減量(t-CO ₂)	50年間のCO ₂ 削減量(t-CO ₂)
100 m当り	2.50	0.55	1.95	67.0	125.0
2,646 km	6.6万	1.36万	5.24万	176.6万	328.6万
1,323km	3.3万	0.68万	2.62万	88.4万	164.3万

注) 2050年カーボンニュートラルに向けた今後27年間におけるCO₂削減量を示す。

試算されたCO₂削減量は、**施工後50年間で328万6千t-CO₂**である。これは、公表されている2013年度の温室効果ガス総排出量^{注)}(14億800万t-CO₂)の約0.233%に相当する。また、**植林面積に換算^{注)}すると723万ヘクタール(日本の国土面積(3,780万ヘクタール)の約20%の面積)**に相当する規模である。

注) 環境省 地球環境局 総務課 脱炭素化イノベーション研究調査: 森林吸収源について(令和4年3月), <https://www.env.go.jp/content/900446213.pdf>

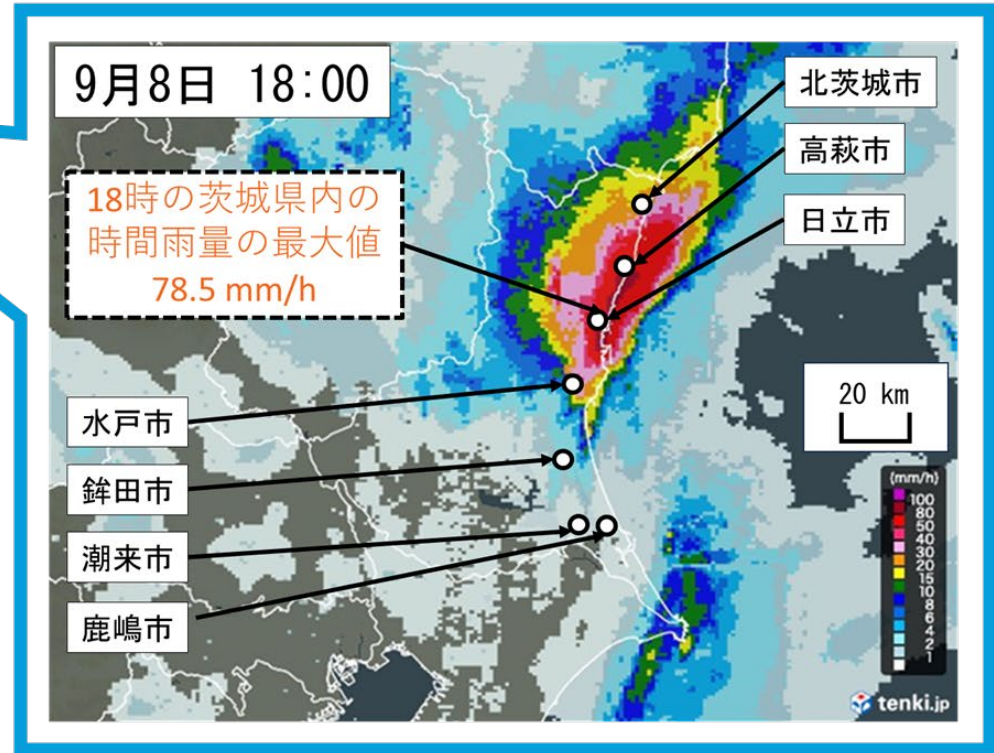
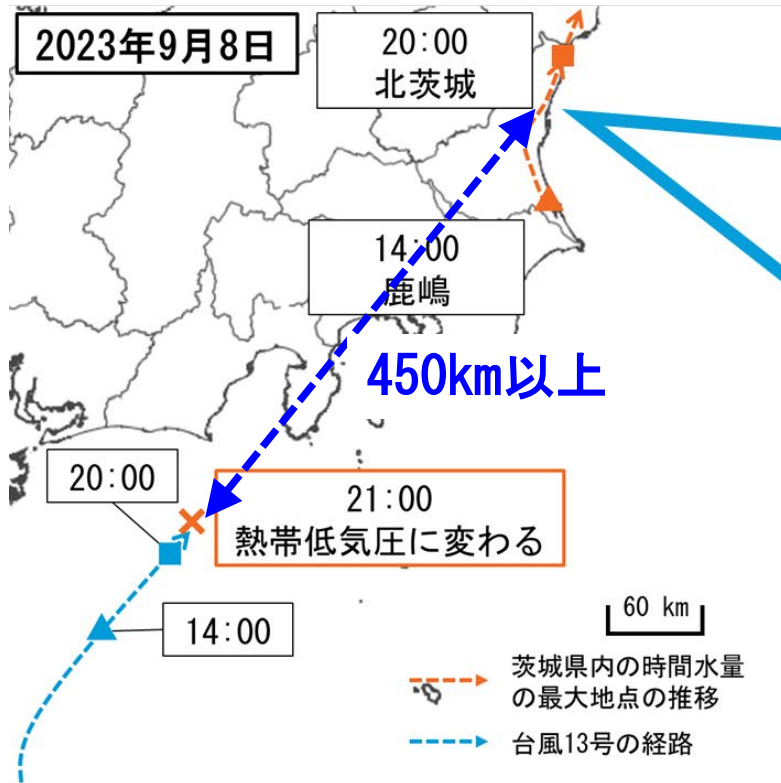
- (1)酸性雨のpHを考慮した酸性溶液を用いた簡易浸漬促進試験における、ホタテ貝殻の質量変化に及ぼす酸性溶液のpH, 破碎貝殻の粒径および浸漬日数の影響を定量的に明らかにした.
- (2)自治体管理の北海道・青森県エリアに位置する河川延長約5,291 kmの50%の堤防裏法面(両岸)に適用した場合, 浅層敷設に用いる貝殻質量は222.3万ton(貝殻体積は264.6万m³)となり, 野積み貝殻の削減に大きく貢献すると共に, 試算されたCO₂削減量は50年間で328.6万t-CO₂と試算・評価され, その潜在的なポテンシャルの高さを確認することができた.

水産系副産物の貝殻で補強する河川堤防裏法面 ～ 環境・防災面に加え CO₂の地中貯蔵にも貢献～



ご清聴ありがとうございました。

【台風13号の経路と時間雨量の最大地点】



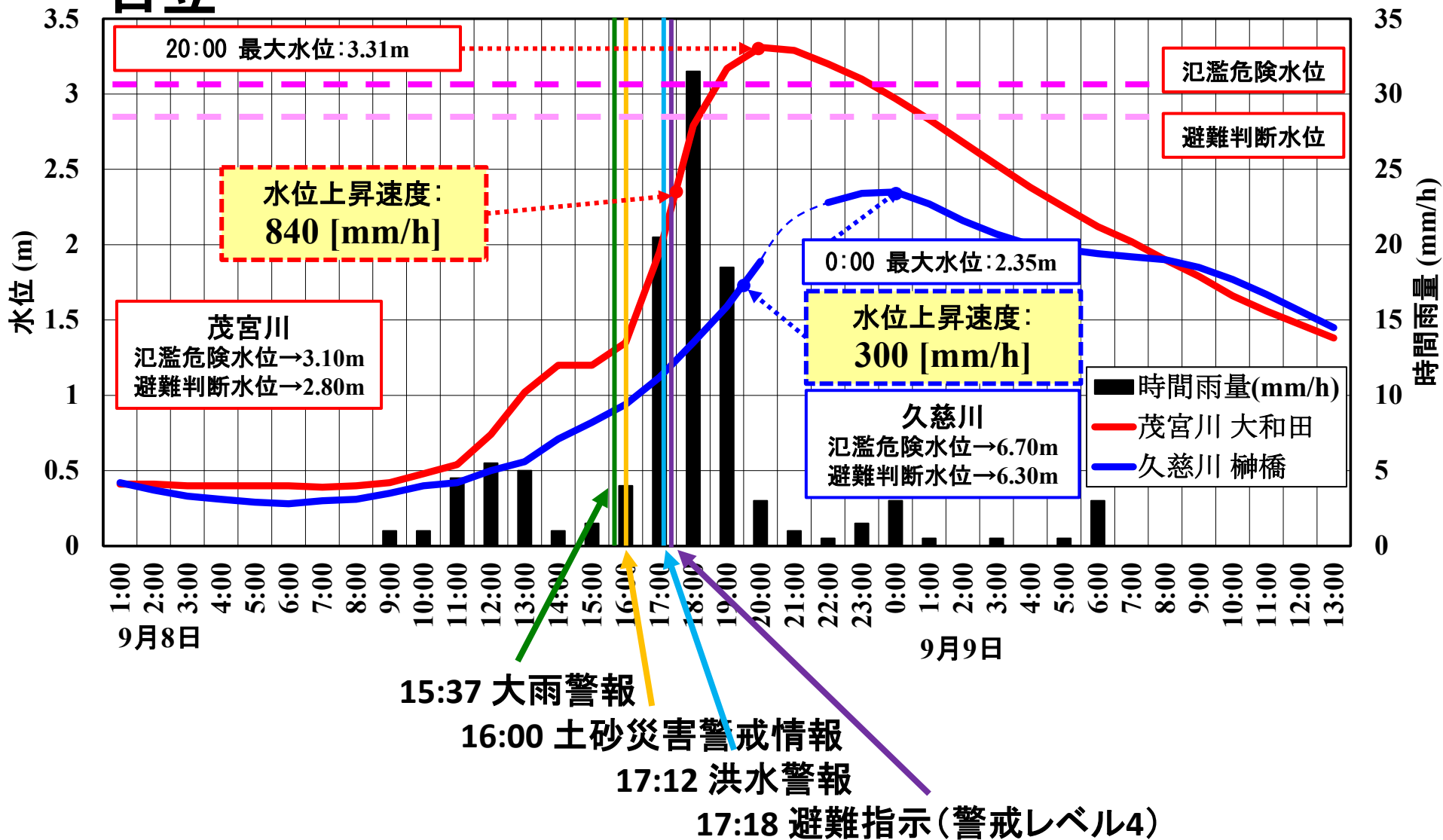
* 台風を中心位置から450km以上も離れていた。

2023年10月27日(金)

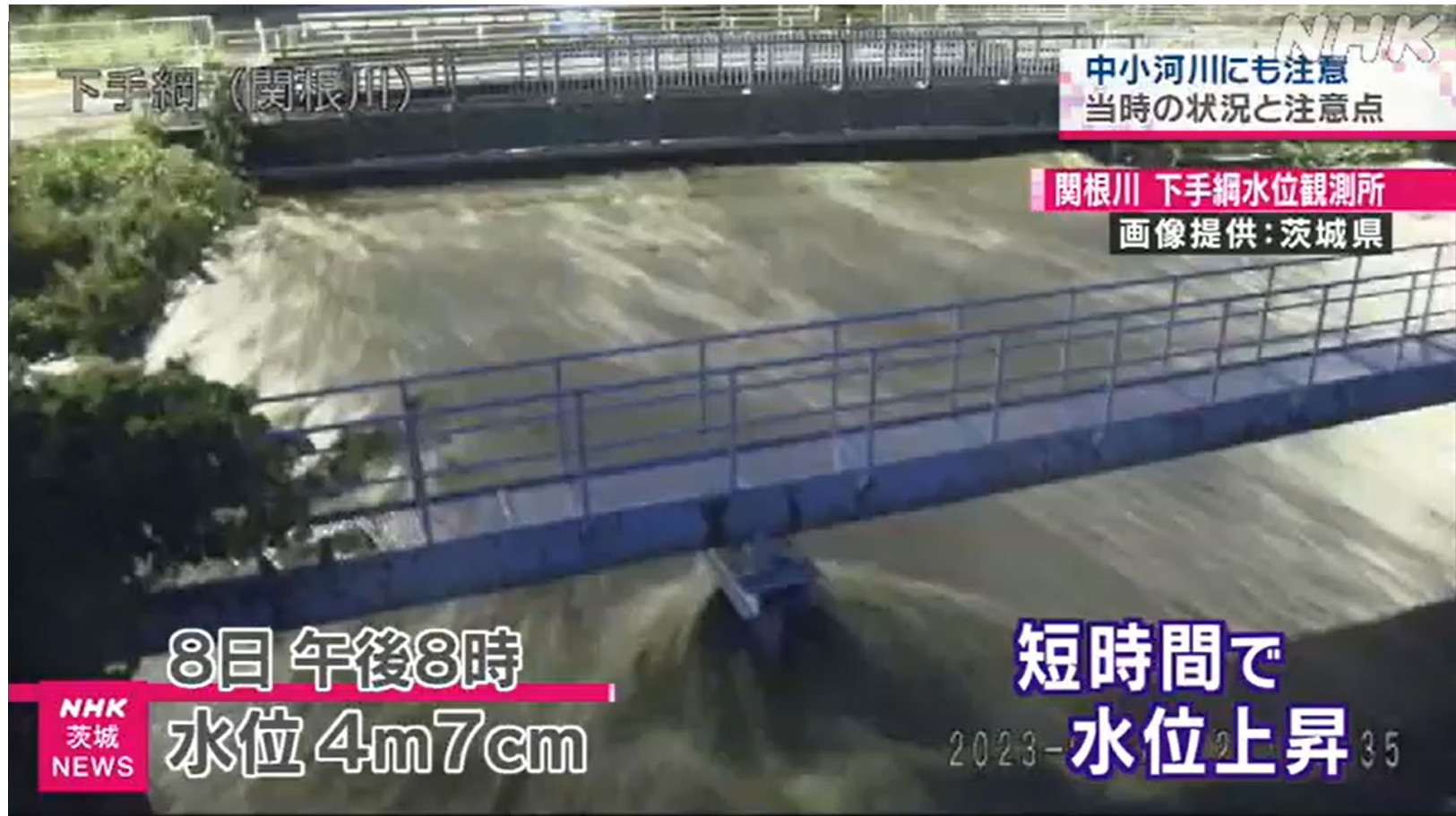
茨城県日立市の小川春樹市長は、
(2023年10月) 26日の定例記者会見
で、今回の大雨では市内を流れる67
河川のうち39河川が氾濫し、このう
ち市管理の小規模な河川が8割を占
めた。

大規模な河川と中規模な河川の水位上昇の違い

日立



茨城 NEWS WEB

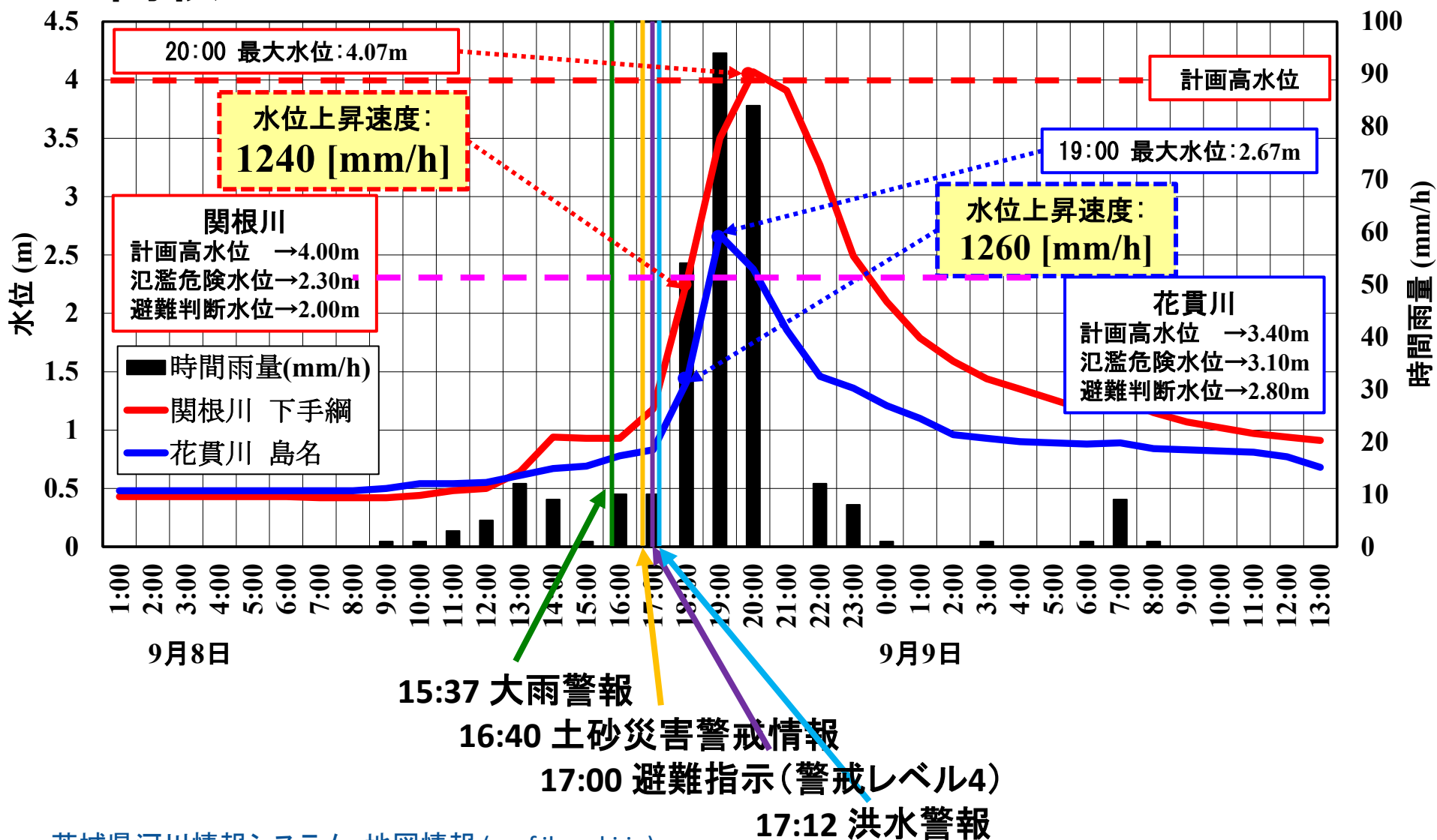


(NHK水戸放送局 小野田明記者)

<https://www3.nhk.or.jp/lnews/mito/20230921/1070022362.html> より

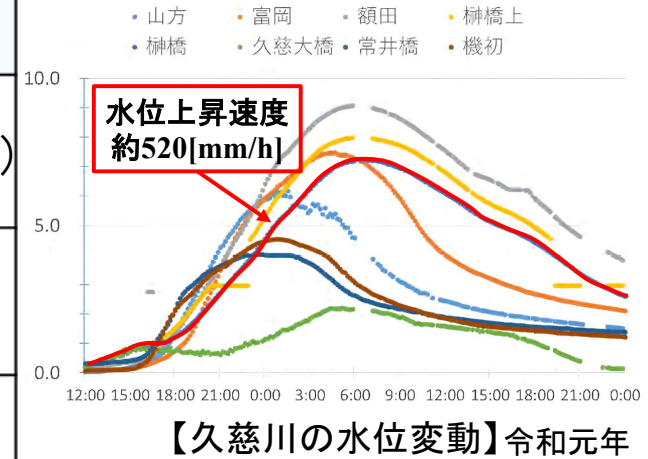
中規模な河川の水位上昇

高萩



【水位上昇速度の比較】

河川	水位上昇速度 [mm/h]
久慈川 (令和元年台風19号)	520(概算値)
久慈川 (令和5年台風13号)	300
茂宮川 (令和5年台風13号)	840
関根川 (令和5年台風13号)	1240
花貫川 (令和5年台風13号)	1260



現地のヒアリング時に、河川氾濫、浸水までの時間が**短時間**であったとの情報と合致する様な結果であった。

• 平成27年9月関東・東北豪雨災害



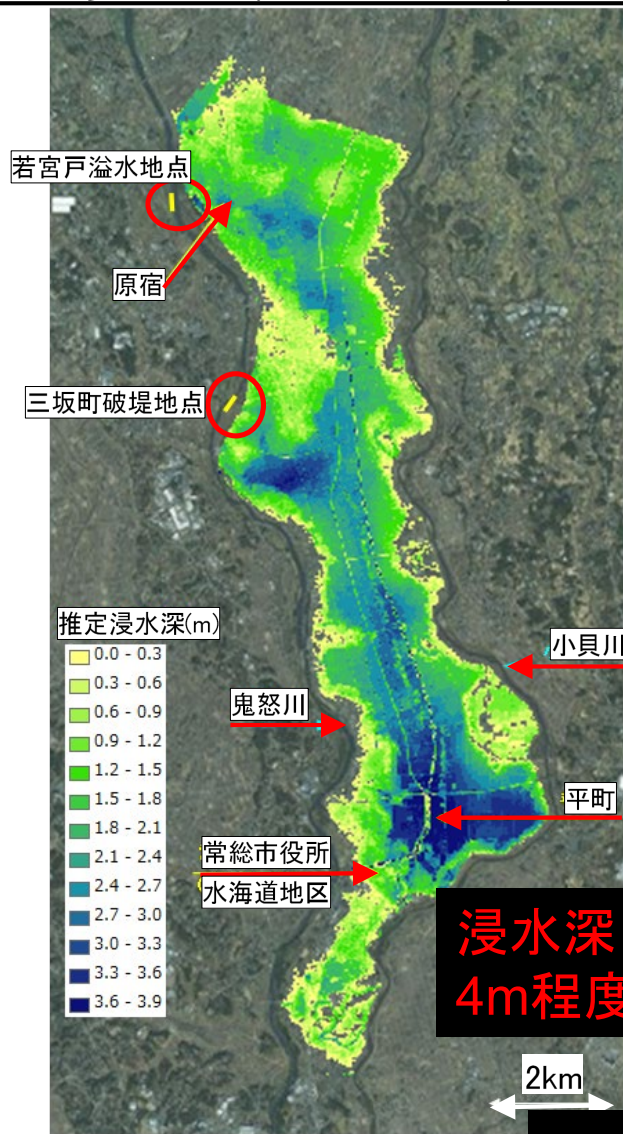
□ 関東・東北豪雨 https://www.ibaraki.ac.jp/common/pdf/generalinfo/completereport_2016_910suigai.pdf

堤防決壊に伴う大規模浸水が、常総市内の地下水質及ぼす影響を調査した。常総市は、上水道普及率が低い地域であった。

鬼怒川堤防の決壊に伴う浸水状況の概要

茨城県常総市三坂地区で生じた鬼怒川堤防の決壊並びに若宮戸の溢水（**図の2箇所**の○印位置）は、今回の水害において当該地域のみならず、上流から下流に位置する地域までも甚大な被害をもたらした。

図には、水害時の常総市内における**推定浸水深**の概要図を示す。常総市全域に浸水が及んでいることがわかる。**下水道整備が低い！**



常総市内の浸水深の推定図

被害状況例

水道水断水

清掃不可(不衛生)、風呂、トイレ用の水もなく不自由



破堤周辺地域の浸水後の状況 (平成27年9月16日撮影)

井戸の地表部状況

井戸の上端部には、コンクリート製または木材製などの簡易な蓋が設置され、その構造・設置状況などから判断して、浸水時には井戸上部より濁水などが流入したものと推察される（下流域では、 浸水状況）。



今回調査した井戸の深度は、全ての井戸について把握することが出来なかったが、井戸保有者に対するヒアリングの結果から、比較的浅い井戸で20 m程度（季節によって井戸枯れあり）、比較的深い井戸で180 m程度であった。

浸水後の井戸水の水質調査概要

井戸水の水質調査は、2015年9月19日～12月20日までの間に受け付けられた計6回分の検体について実施された。

- 地下水（井戸水）の水質調査（常総市内の井戸のみ）
- 2015年9月19日～12月20日
- 水質検査の総検体数＝616件

3.1 浸水から3カ月後まで

水質調査の検体受付期間と検体数

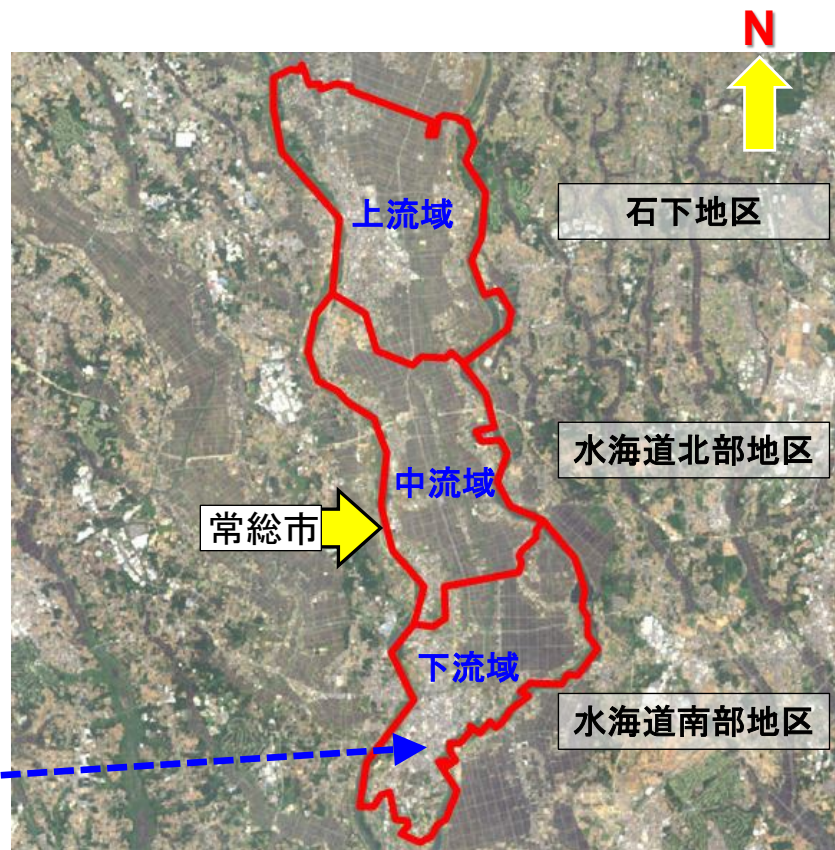
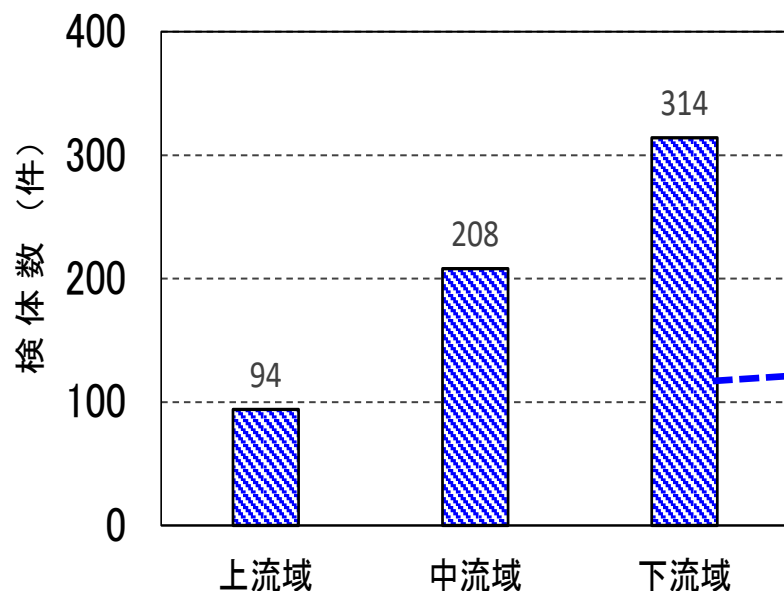
	検体受付期間	検体数（件）	比率(%) 検体数／総検体数
[1]	2015/9/19～9/23	125	20.3
[2]	2015/9/25～10/1	167	27.1
[3]	2015/10/4～10/8	78	12.7
[4]	2015/10/12～10/15	86	14.0
[5]	2015/10/18～10/31	125	20.3
[6]	2015/12/6～12/20	35	5.7
	計	616	100.0

なお、上記の[1]～[5]：
茨城県、[6]：常総市から
データをご提供頂きました。

2) 短時間大雨と堤防決壊

井戸水の水質調査は、井戸水の採水場所と破堤箇所、地下水流動などの関係と密接に関連するものと考えられる。

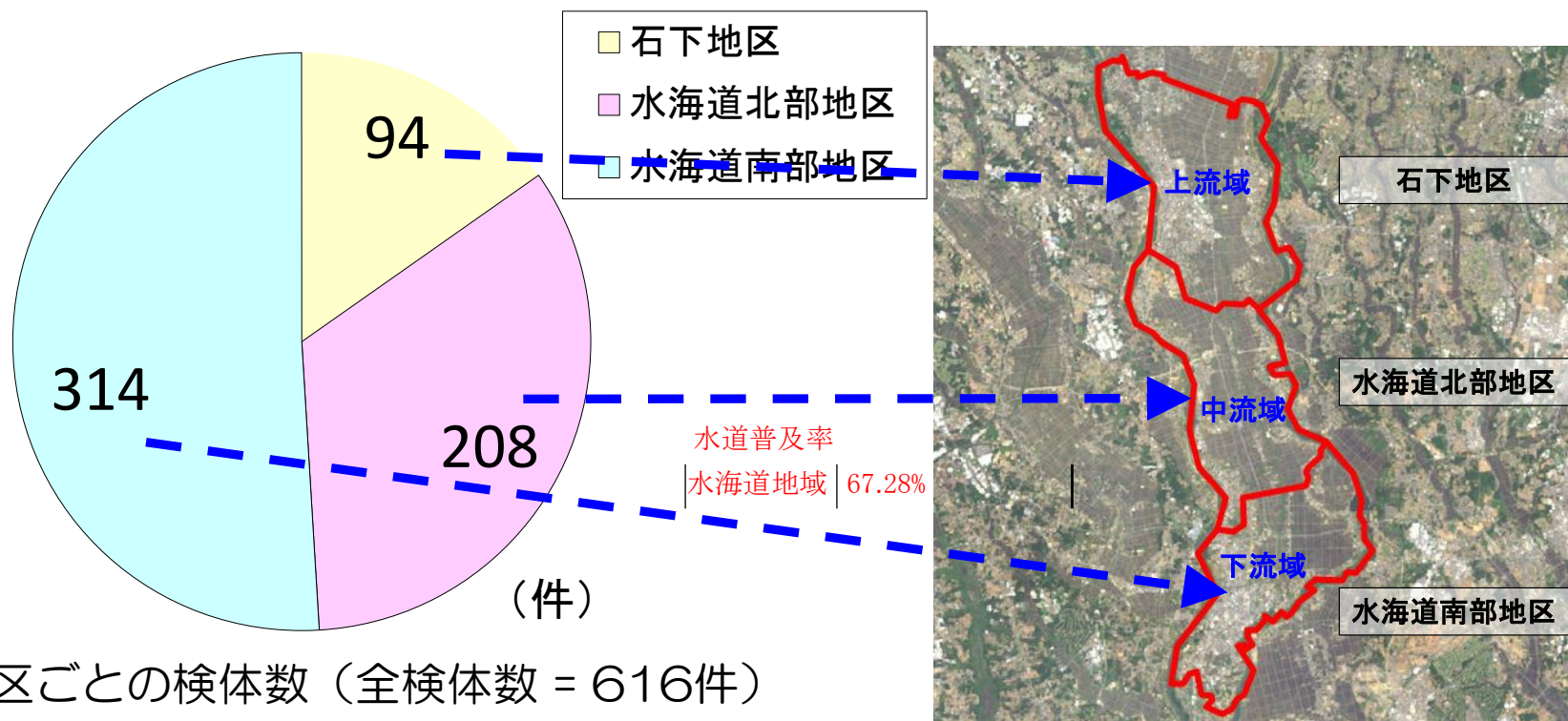
分析や評価を行う上で浸水被害を受けた領域を常総市北部の上流から、石下地区（上流域）、水海道北部地区（中流域）および水海道南部地区（下流域）の3つに区分した。



水質調査を実施した対象地域の区分け

2) 短時間大雨と堤防決壊

今回の水質調査対象となる地区ごとの検体数は下図に示す。

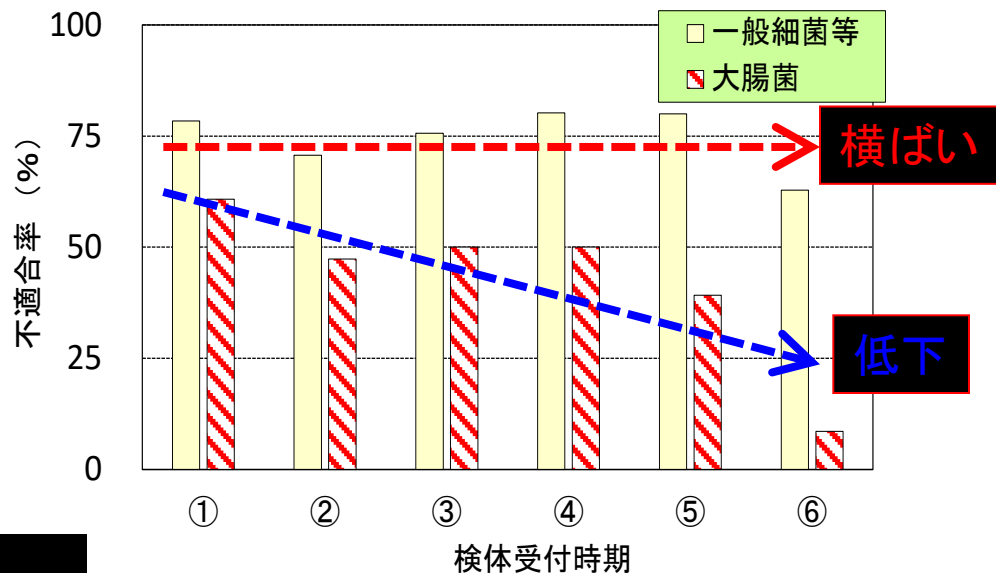
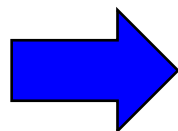
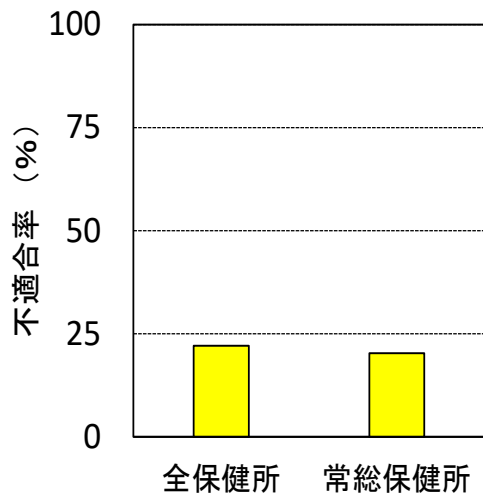


地区ごとの検体数 (全検体数 = 616件)

検査数：下流域ほど多いことが分かる

水質調査を実施した対象地域の区分け(上・中・下流域の3区分)

水質検査結果（全体）



細菌検査結果

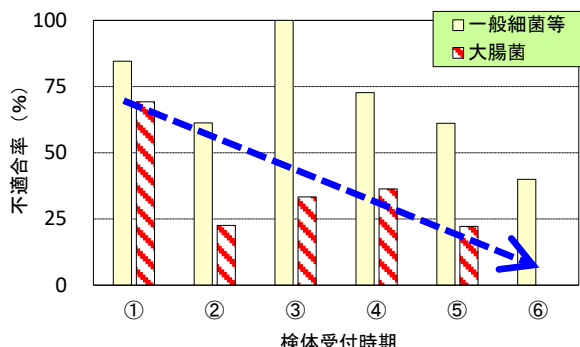
浸水後の経過日数に伴う一般細菌等および大腸菌群による不適合率

＊） 不適合率（菌検出件数／全検査数の比率）

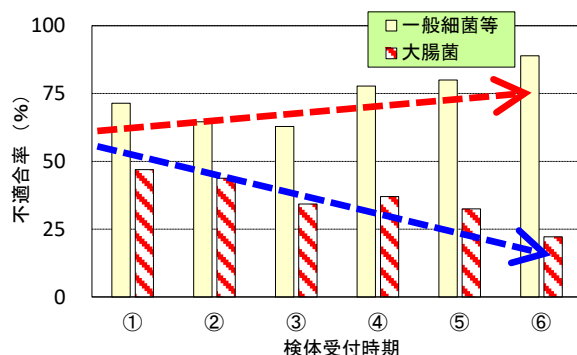
浸水前の地下水（井戸水）の一般細菌検査、大腸菌検査における不適合率は、前者は概ね20%程度、後者は3%程度である。

- ・ 浸水直後は一般細菌等、大腸菌群による水質基準不適合率が80%と60%程度
- ・ 特に大腸菌群の不適合率は、浸水前後で顕著に増加
→ 浸水被害は、地下水（井戸水）水質に対する影響は極めて大きい

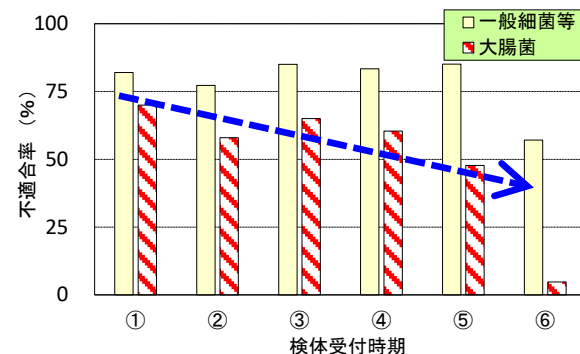
水質検査結果（上・中・下流域ごと）



(a) 石下地区（上流域）



(b) 水海道北部地区（中流域）



(c) 水海道南部地区（下流域）

上・中・下流域共に、時間経過に伴い**大腸菌**による不適合率の割合は、**低下傾向**を示した。
一方、**一般細菌等**による不適合率の割合は、全域において大幅な低下傾向は見受けられず、**横ばい状態**である。**一般細菌等**による不適合率に関しては、**長期間に渡り継続する傾向**が伺える。

浸水から**3ヵ月後**でも、**一般細菌等**については、**高い不適合率**を示した。

浸水後の経過日数に伴う一般細菌等および大腸菌による不適合率の変化

適応策

○井戸水の必要性（有効性）

現代社会は便利になった反面，電気・ガス・水道などが地震時，水害時などの災害時に供給されなくなると，災害時だけではなく，その後も日常生活にも大きな影響を長期間に渡り及ぼすことになる。

その際，もっとも必要性が高く，無くてはならない物の1つとして「水」がある。

飲み水はペットボトル等で対応せざるを得ないが，ヒアリング結果では，断水時（停電時）でも大量に必要となるトイレ用の排水，風呂用の水，屋内外の清掃水や散水及び緊急時の飲料水などとして，特に災害初期段階では井戸水は極めて有効性が高いことが再認識された。

地盤環境（特に、井戸水）へ与えた影響と適応策

○適応策について

汲み上げ用ポンプが必要になるが、停電では水道だけではなく井戸水も汲み上げることができない。

停電時でも井戸水を汲み上げ可能な体制を構築しておくことが必要である。

- ①停電時でもポンプ稼働用の小型発電機を備えておく
- ②ロープ付きの手桶（浅井戸）や手押しポンプ型にする
- ③非常用井戸は地震時と共に、浸水時も考慮しておく。

（例えば、浸水が井戸に直接入らない様にしておく等）

→上記の対応は、行政と協働して災害時における「非常用井戸」を有効に機能させるために検討・配備が必要

→ろ過による細菌の完全な除去は困難。しかし、短時間でも煮沸を行えば、一般細菌，大腸菌群の細菌類を殺菌可能

手押しポンプ → 手押しポンプ + 浸水対応



構造面から見て(外力)

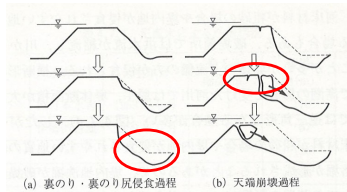
破堤原因 越水が7~8割

越流水の侵食外力が大きい

耐越水性向上に簡易な方法は、**天端アスファルト舗装**

* 破堤率 舗装なし59%、舗装あり**25%**(287事例)

* 堤体は土塊状に崩落する ← 不安定な形状、天端にクラック



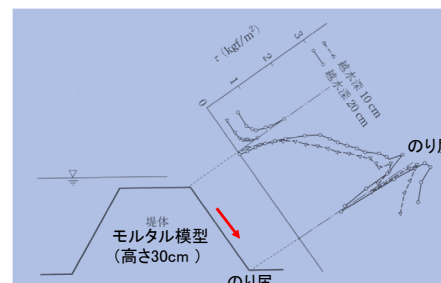
出典)須賀ほか:越水堤防調査
 中間報告書一解析編一、土研
 資料、1760号、1982

1

せん断力 天端<のり面<のり尻

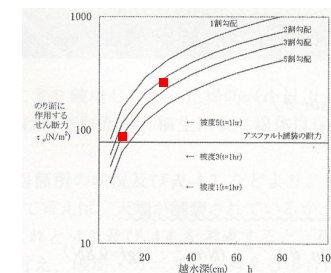
舗装の耐力は100N/m²以下 → のり面のせん断力は
 越水深10cm・3割勾配で89N/m²、30cm・2割勾配で305N/m²

* 刈谷田川、足羽川(福井)水害(2004)でも、300~500N/m²



せん断力 τ の分布

出典)吉野ほか:越流水による堤防法面の破壊特性、水理講演会、1980



越水深・のり勾配とせん断力 τ

出典)末次ほか:実効的な減災対策に関する研究報告書、国総研資料、2006

2

構造面から見て(対策)

- せん断力 のり尻 > のり面 > 天端
 のり尻工 シート 舗装
 ブロック

のり面保護

ブロックを主 ⇒ シートないと、越流水がブロック下に入り、のり面・のり尻付近を侵食

シートだけ(覆土) ⇒ 越流水の浮力により浮き上がり、重ね合わせからの越流水侵入

* シートを敷いて、ブロック(重し)でおさえる

* 堤体土の締固め度

85%以上 ⇒ のり面 90%以上で耐越水

3

構造面以外も含めて

- 土木研究所の石川主研(1982)
 破堤・非破堤データを**数量化Ⅱ類**で解析
 数値以外も要因分析

「越水に強い堤防」

- 1) 堤体土質が砂質でない: 粘性
- 2) 天端舗装
- 3) 天端幅/越流高が大きい(平べったい堤防)
- 4) 水防活動が行われた



那珂川の越水: 出典)建設省常陸工事事務所資料

4

破堤に影響した要因

- 浸透による堤防の弱体化

新旧堤防交差箇所(千曲川)、樋門周辺

- 裏のり面の植生なし(五十嵐川*)

- 堤体内に異物

松杭、玉石(刈谷田川*)

* 信濃川水系

- 堤体の圧密沈下、地盤沈下

円山川

- * 非破壊検査、堤防高管理を行う

<管理面での対応>



重信川の陥没箇所

出典)山崎:重信川の堤防変状の要因調査および復旧工事、四国技報、2018