

FT図を用いた粘り強い河川堤防の 信頼性向上手法に関する研究

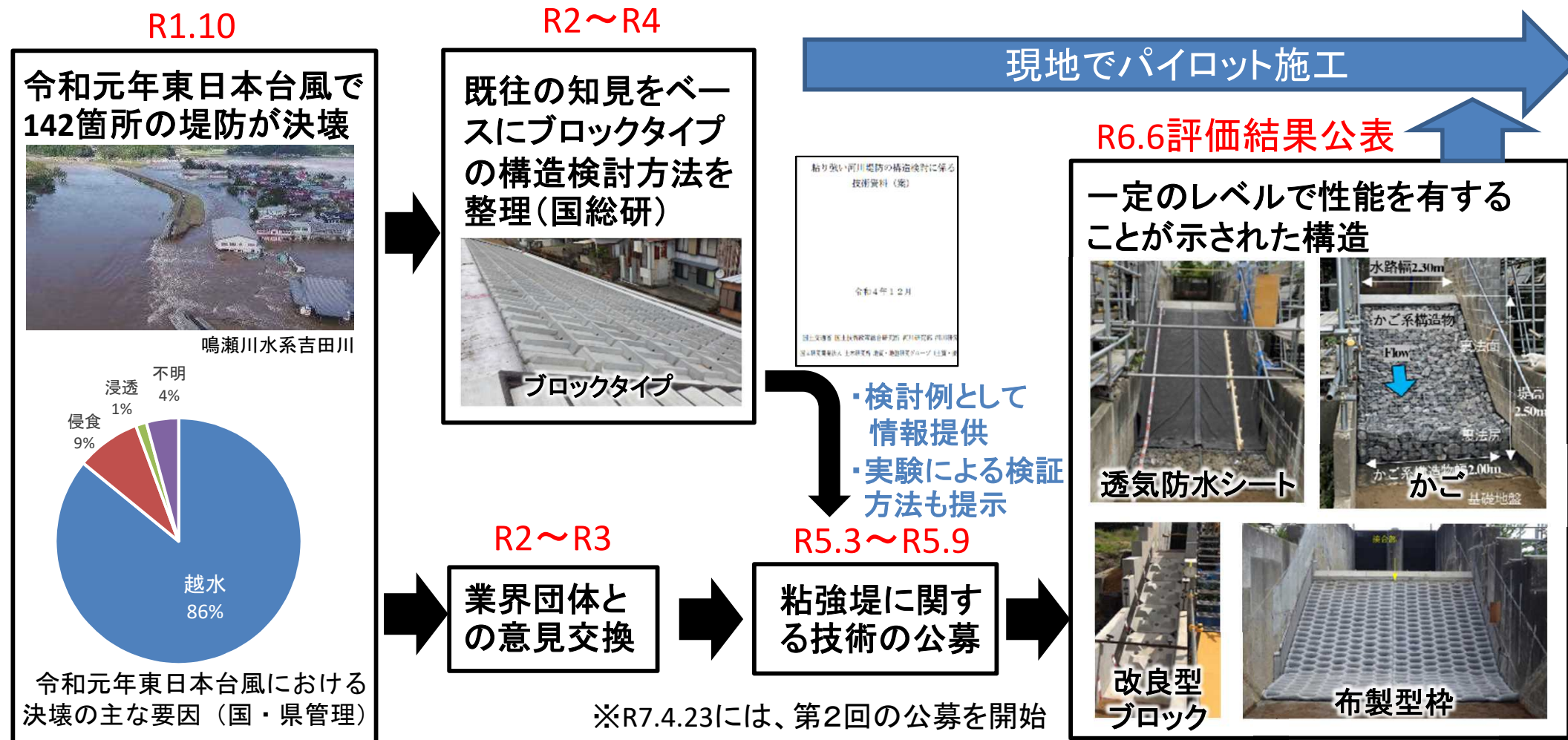
国土技術政策総合研究所河川研究部 河川研究室
日鉄建材株式会社 土木開発技術部
(元国土技術政策総合研究所河川研究部 河川研究室)
国土技術政策総合研究所河川研究部 河川研究室
同上
同上

○三好朋宏
河野努

松尾峰樹
福岡千陽
瀬崎智之

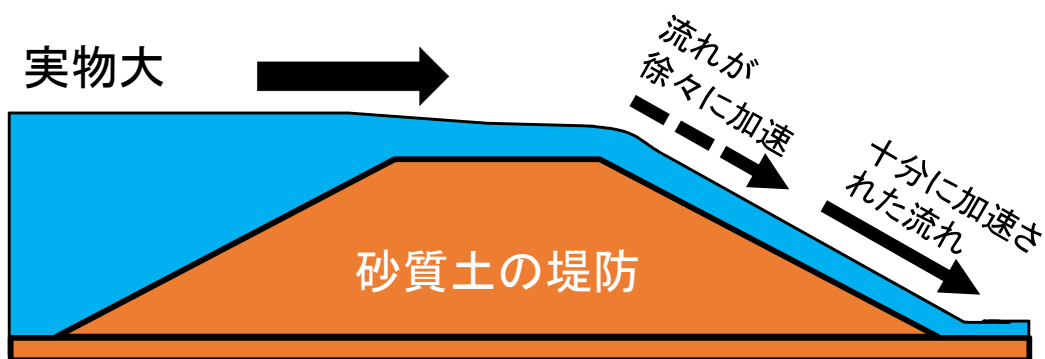
研究の背景(産学官連携による、これまでの開発経緯)

- 国総研で開発した構造について技術資料としてとりまとめて公表するとともに、産学に他の構造についても提案を求める公募を実施。
- 応募に当たっては、開発者が水路実験を行い越水性能を検証することを求めた。
- 既存の堤防に悪影響を与えず、一定の越水性能が示された構造については、現地パイロット施工によって更なる開発を推進。

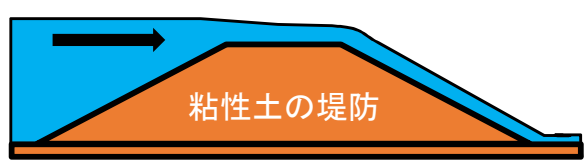


研究の必要性

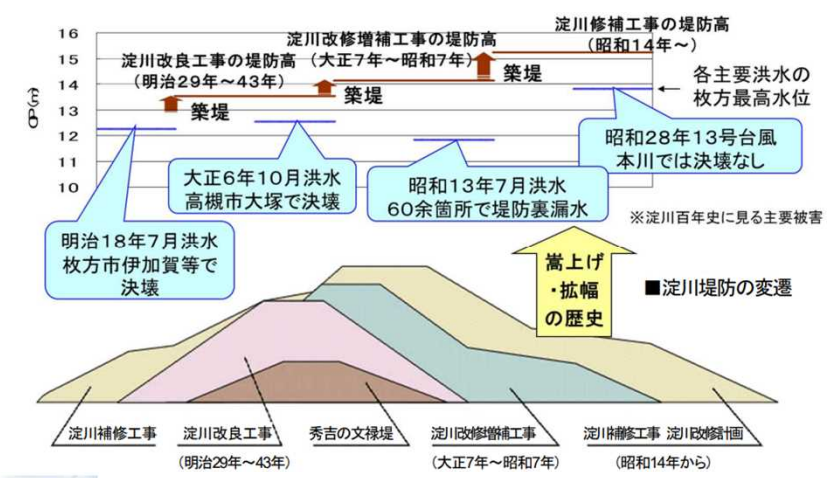
- 粘り強い河川堤防の性能は、丁寧に造られた新品の状態で実物大の水理模型実験を行い確認されていることが多い
- しかし、現場では、土堤や部材の形状・品質の経年的な変化、施工時に生じる軽微な誤差や不備等(以下「不確実性事象」という)が存在
- 事業で安心して使用するためには、不確実性事象が生じた状況下でも、性能を発揮する信頼性を有していることが望ましい(信頼性をどう向上させる?)



例えば、堤防形状、土の粒径を1/5



流れの相似則(フルード則)が満たされていても粘着力が発揮され、実物大より強い堤防になる



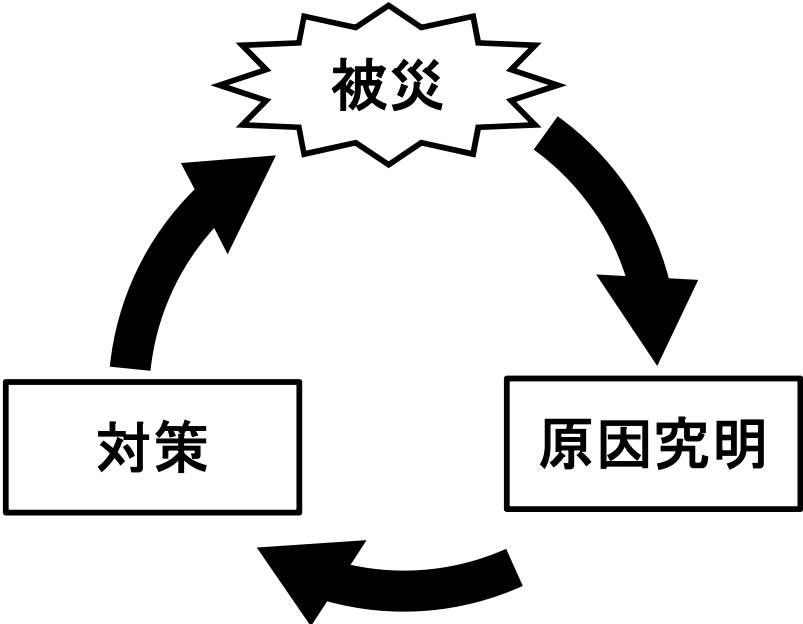
(例: 信濃川-32年経過 法面)



研究の課題(信頼性向上にあたっての課題)

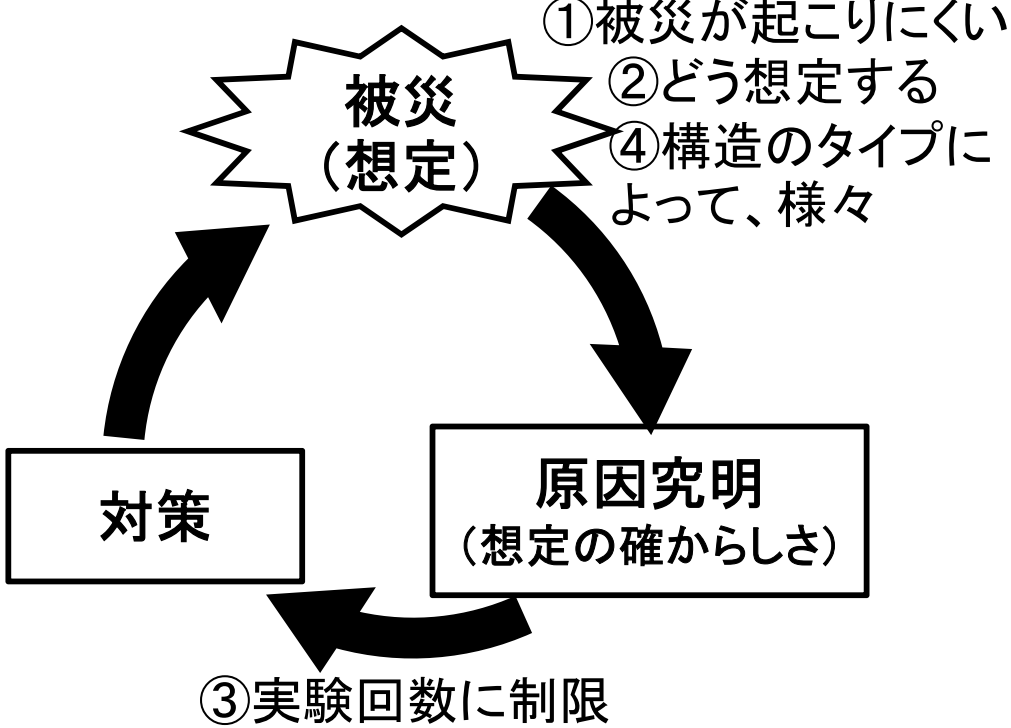
- 信頼性を向上させ、それを証明するには、4つの課題がある。
 - ①発生が稀な越水を対象としているため、被災経験を踏まえた信頼性の向上が難しい
 - ②被災時に生じる事象を事前に想定する必要があるが、網羅的な想定が難しい
 - ③時間と費用の制約から、想定した事象を確認する実験の回数に限りがある
 - ④粘り強さを発揮する原理が異なる様々なタイプの構造があり、それらの信頼性を示す外力条件等は統一的には示し得ない

被災後の
信頼性向上サイクル



※護岸等の河川構造物を想定

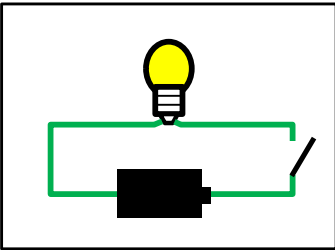
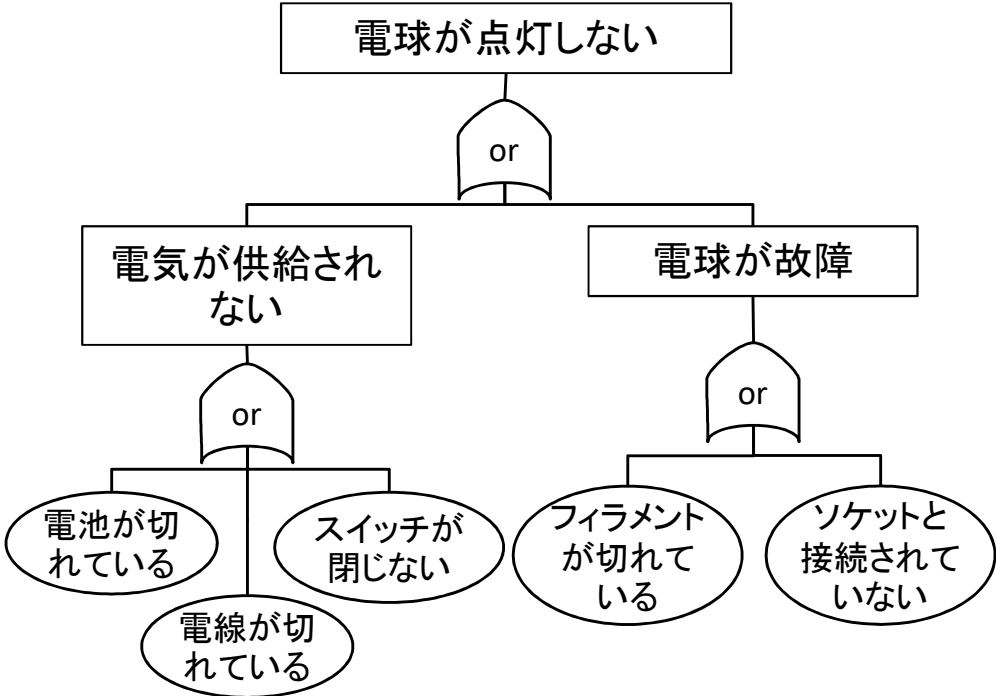
被災前の
信頼性向上サイクル



- 航空宇宙業界や自動車業界などにおいて、工業製品の信頼性向上に用いられている故障の木解析(FTA: fault tree analysis)と故障モード・影響解析(FMEA: failure mode and effects anaysis)を組み合わせ、故障プロセスを想定する手法を粘り強い河川堤防の信頼性向上に適用することを考案

FTA

設定した事象の発生の原因等を抽出し、それらの関係を論理記号で繋げたFT(fault tree)図を用いて、信頼性の解析を行う手法



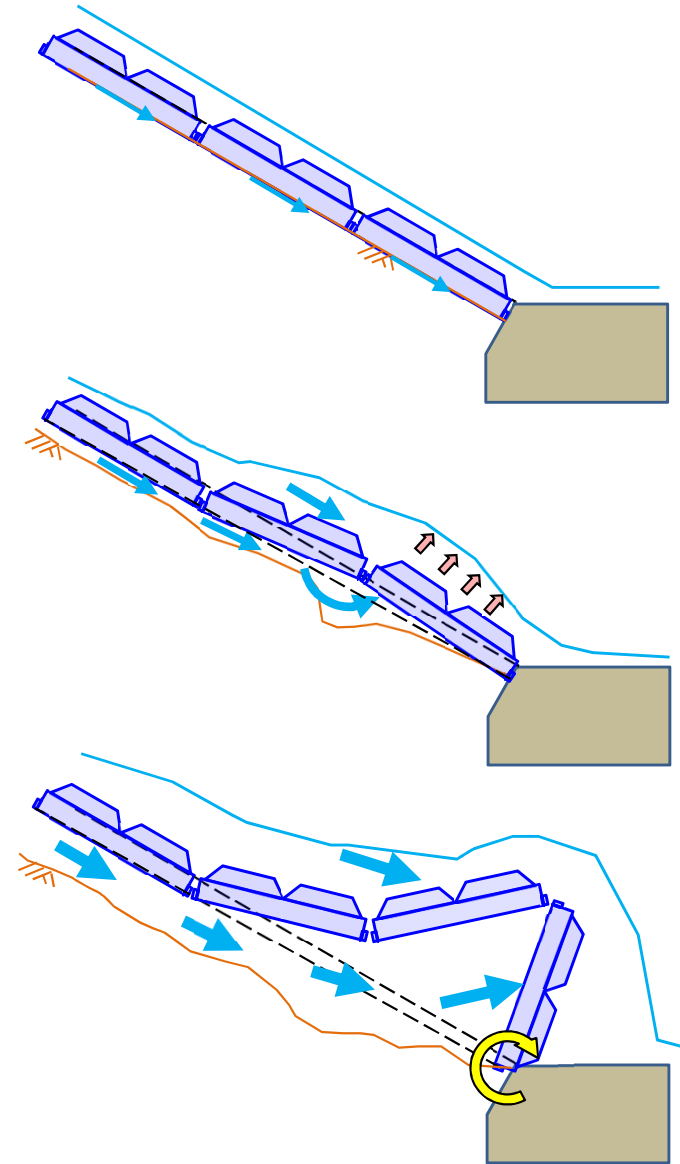
FMEA

潜在的な故障モードを抽出し、それらの原因及び影響を明確にすることを目的に実施する解析手法

構成品		機能	故障モード	要因
電球	フィラメント	発光	断裂	経年劣化 運送時のゆれ
	ソケット	電球に電気を通す	接触不良	接触部の汚れ
回路	電池	外部に電気を流す	電池切れ 接触不良	経年劣化 接触部の汚れ
	電線	電気を伝達する	断裂	経年劣化 ねじれ
	スイッチ	電気信号のオンオフを切り替える	接触不良	接触部の汚れ

着目した壊れ方

- 過去の実験で確認されている座屈による壊れ方に着目

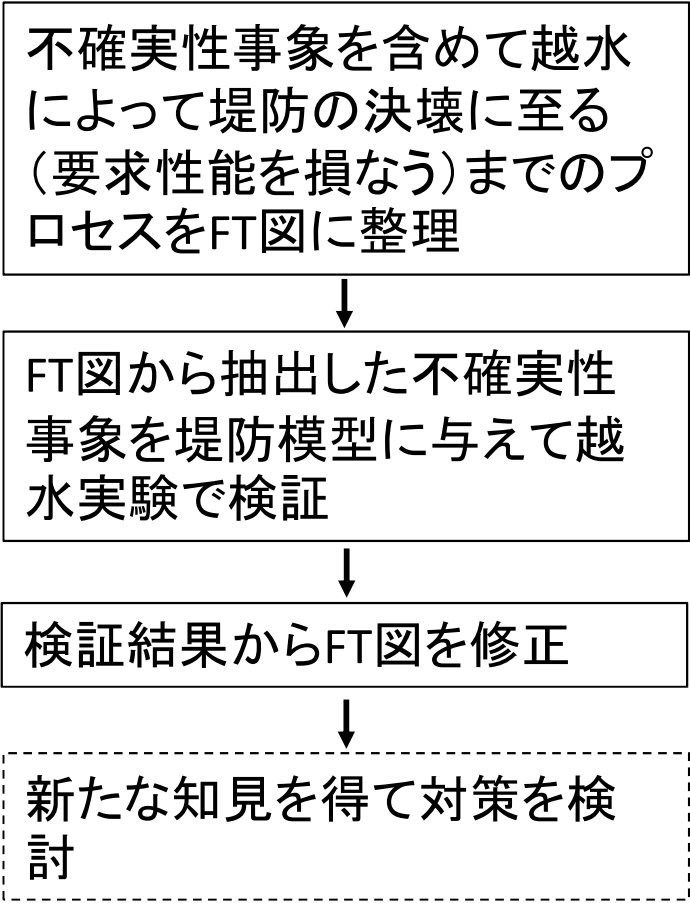
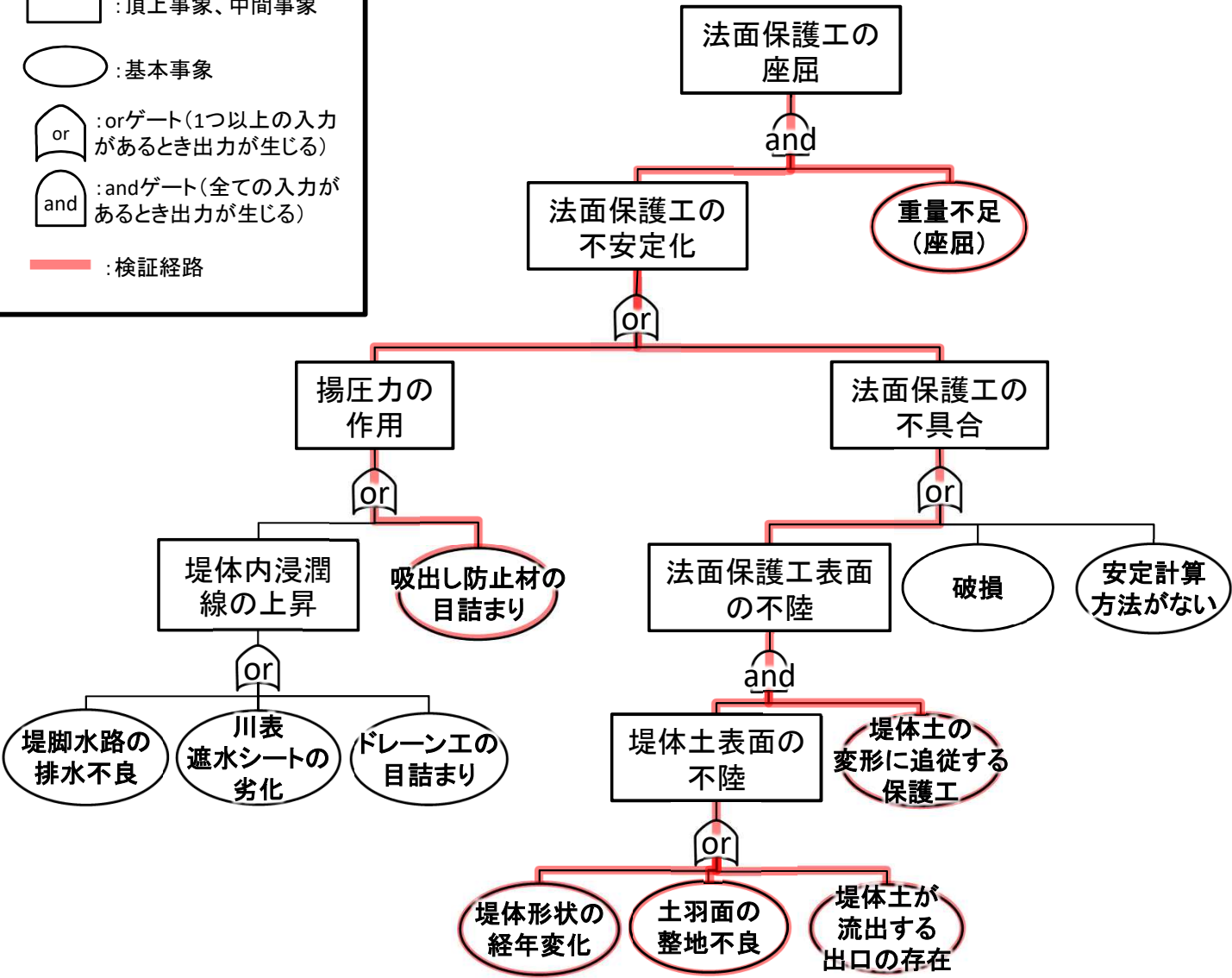
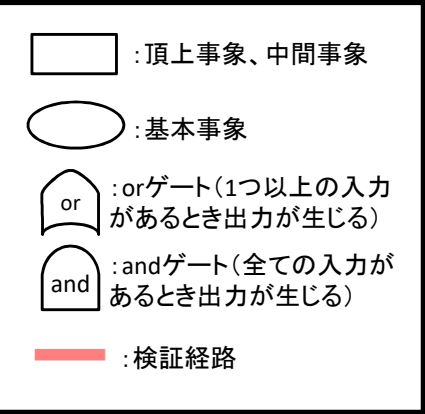


粘り強い河川堤防にFMEAの考え方を適用

構成部材		機能	故障モード	故障モードを生じさせる要因	隣接する構成部材への影響	構造全体として求める要求性能への影響	影響のきびしさ
法面保護工	コンクリートブロック	吸出し防止材のバタつき防止	滑動	流体力（重量不足） 法尻保護工の流出	なし	表面被覆材によって被覆された状態が維持できなくなる	致命的
				流体力（重量不足） 法肩保護工の流出			
			転動	流体力（重量不足） 法肩保護工の流出	なし	表面被覆材によって被覆された状態が維持できなくなる	致命的
				流体力（重量不足） 堤体土の侵食 不同沈下等	なし	表面被覆材によって被覆された状態が維持できなくなる	致命的
			座屈	流体力（重量不足） 堤体土の侵食 連結材、連節材の破断、伸び	なし	表面被覆材によって被覆された状態が維持できなくなる	致命的
				経年劣化 施工不良	法面保護工が陥没しやすくなる	なし	限定的
			陥没	堤体土の侵食 連結材、連節材の破断、伸び		なし	致命的
				経年劣化 バタつき 施工不良	なし	HWL以下の安全性の喪失	致命的
	連結材、連節材	コンクリートブロック同士の連結	破断、伸び	経年劣化 施工不良		なし	限定的
	吸出し防止材	堤体土の侵食防止	破損	経年劣化 バタつき 施工不良			
		堤体内からの水の排出を 阻害しない	目詰まり	経年劣化	法面保護工が座屈しやすくなる	なし	限定的

粘り強い河川堤防にFTAの考え方を適用

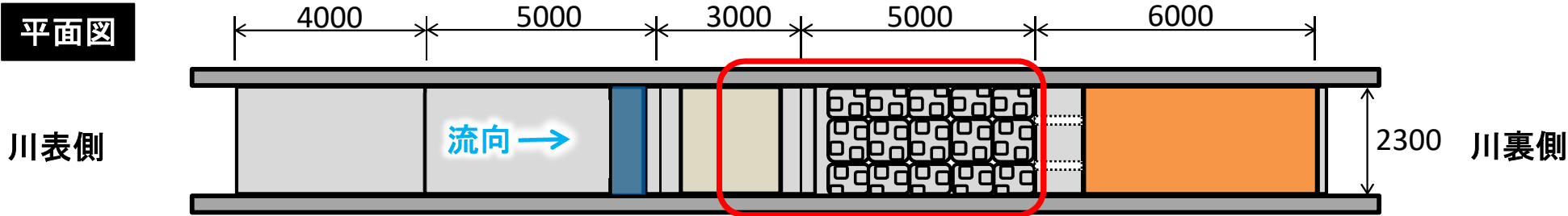
凡例



実験模型の概要

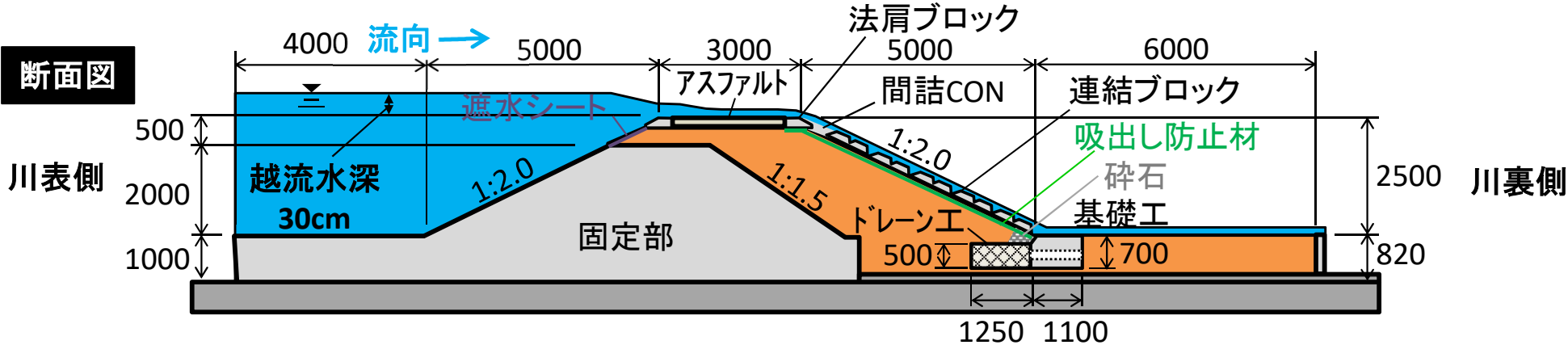
● 不確実性事象を堤防模型に与えて越水実験(越流水深30cm)で検証

平面図



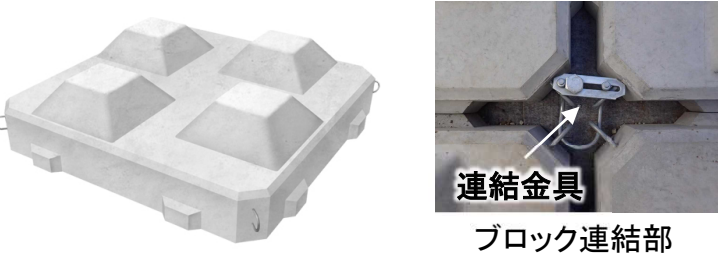
堤防模型に想定される変状を再現

断面図



■ 連結ブロックの諸元

ブロック全厚:0.220m 突起高:0.120m
ブロック質量:305kg/個 (305kg/m²)

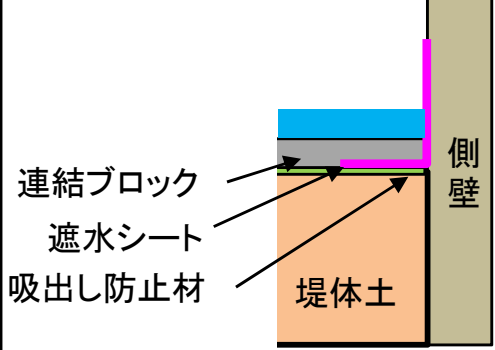


■ 吸出し防止材の諸元



厚さ (mm)	透水係数 (cm/s)	密度 (g/cm ³)	材質
10	1.16×10^{-1}	0.14	PET不織布

■ 側壁際の構造



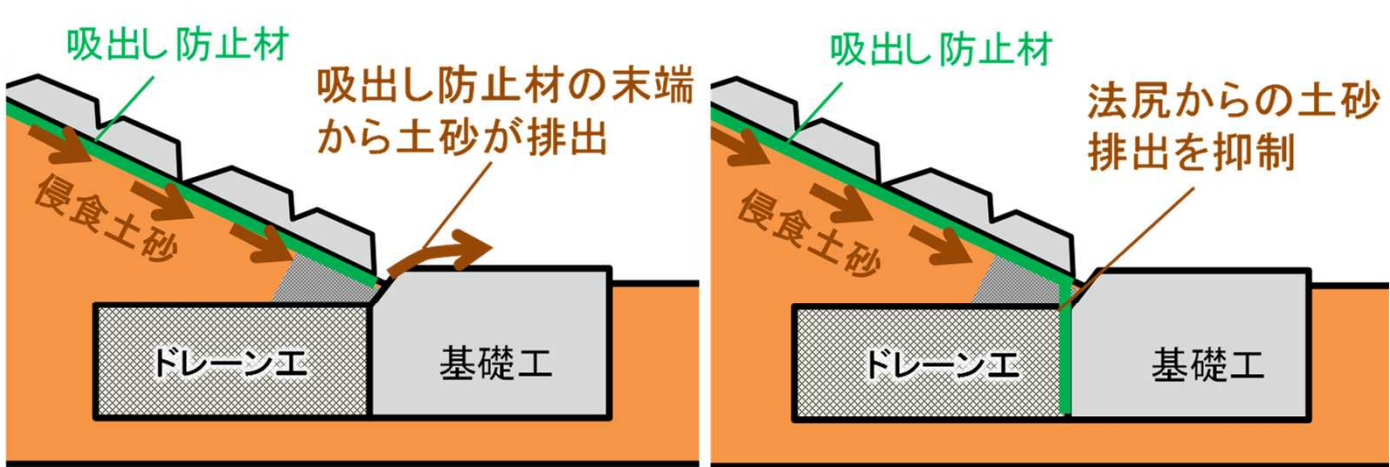
実験ケースの概要

- ブロックの座屈破壊に影響しそうな以下2点を検証
 - ・法面保護工と土羽面の間の隙間の発生→隙間に高流速→侵食
 - ・法尻部での吸出し防止材の巻き込み(侵食土砂の出口がないと侵食しない?)

ケース	堤防模型に再現する 不確実性事象	通水時間	通水結果概要	
			堤体土の侵食の有無	ブロックの流出の有無
1	標準的な構造	9時間	あり	なし
2	縦溝(ガリ侵食)が発生した場合	1時間	あり	あり
3	吸出し防止材を基礎工とドレーン工の間に巻き込む	3時間	なし	なし
4	ケース2+ケース3	5分	あり	あり



縦溝の状況
(ケース2,4)



吸出し防止材の敷設範囲
(ケース1)

吸出し防止材の敷設範囲
(ケース3,4)

実験結果(縦溝)

- ブロック直下(縦溝①)よりもブロック目地部(縦溝②・③)での侵食が進行しやすいことを確認。
- 累積1時間程度の通水でブロックが流出し、土羽面の侵食も顕著。

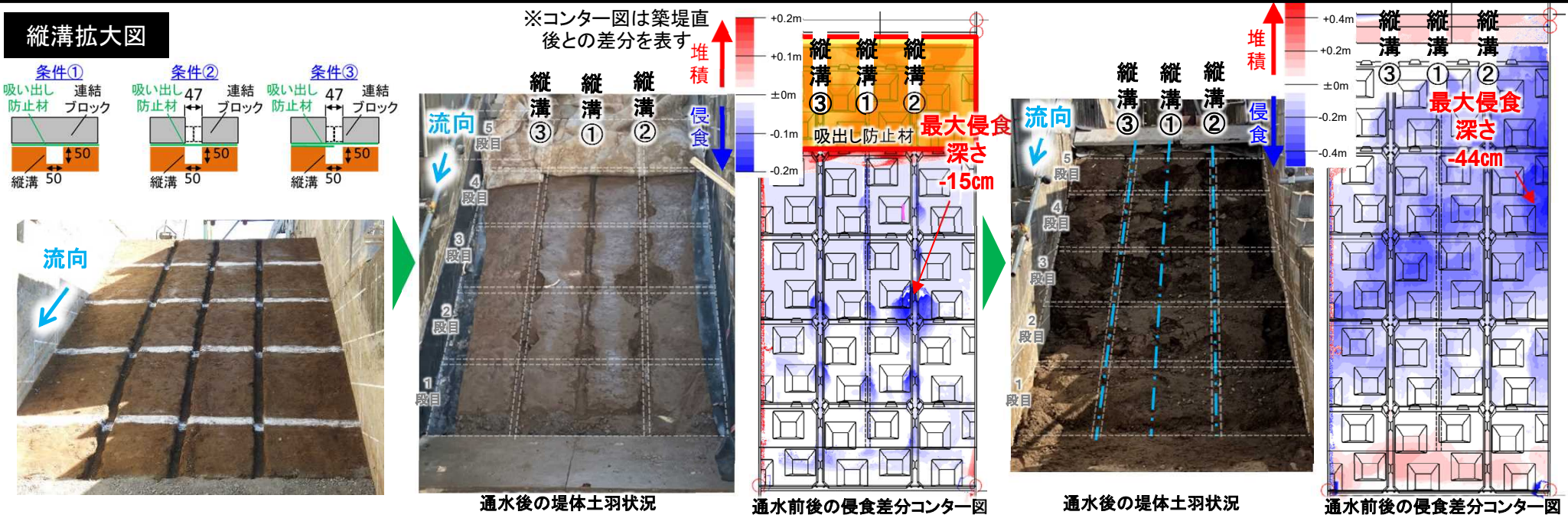
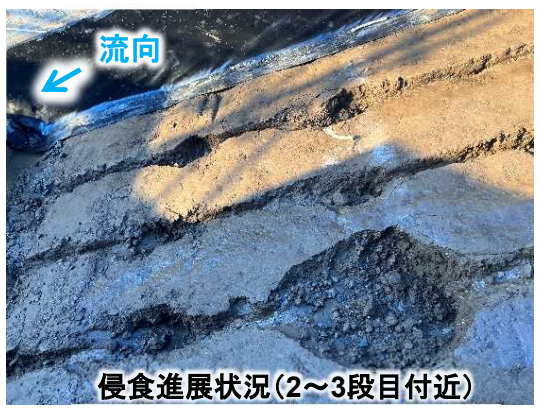


図 通水前の土羽面状況

図 通水30分後の土羽状況

図 通水1時間後(ブロック崩落時)の土羽状況



実験結果(法尻部吸出し防止材巻き込み)

- 3時間通水しても侵食は殆ど生じず、法尻端部処理の変更による効果を確認。

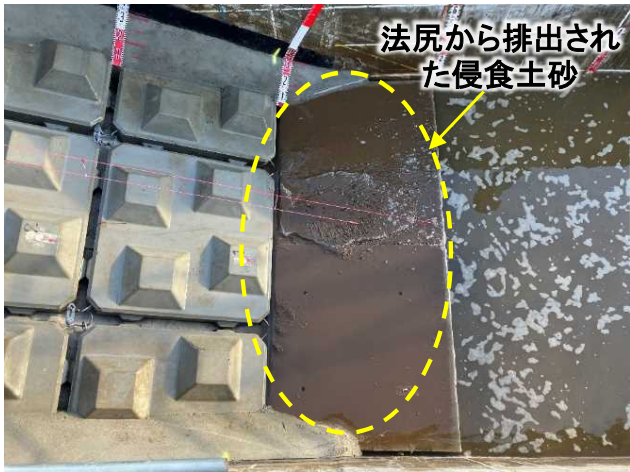


図 通水による土砂の排出状況



図 吸出し防止材による巻き込み状況



通水後の堤体土羽状況

通水による法尻部からの土砂排出は見られなかった



図 通水3時間後の状況

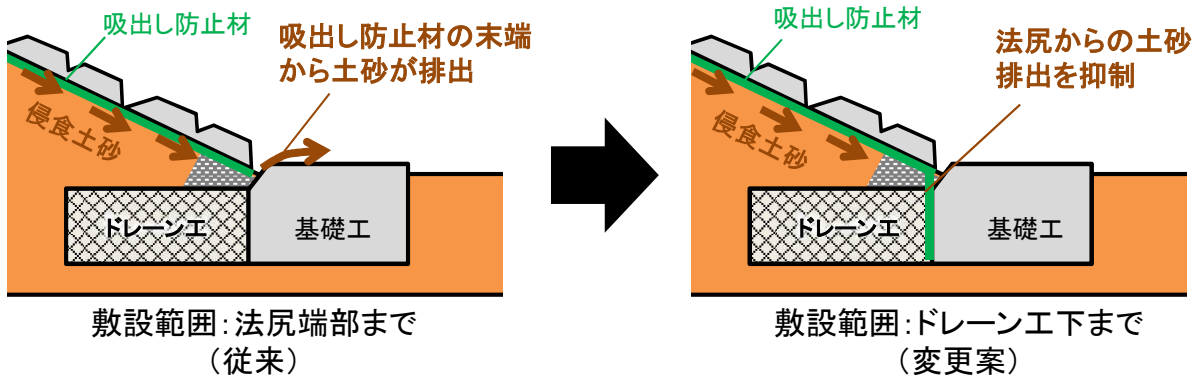


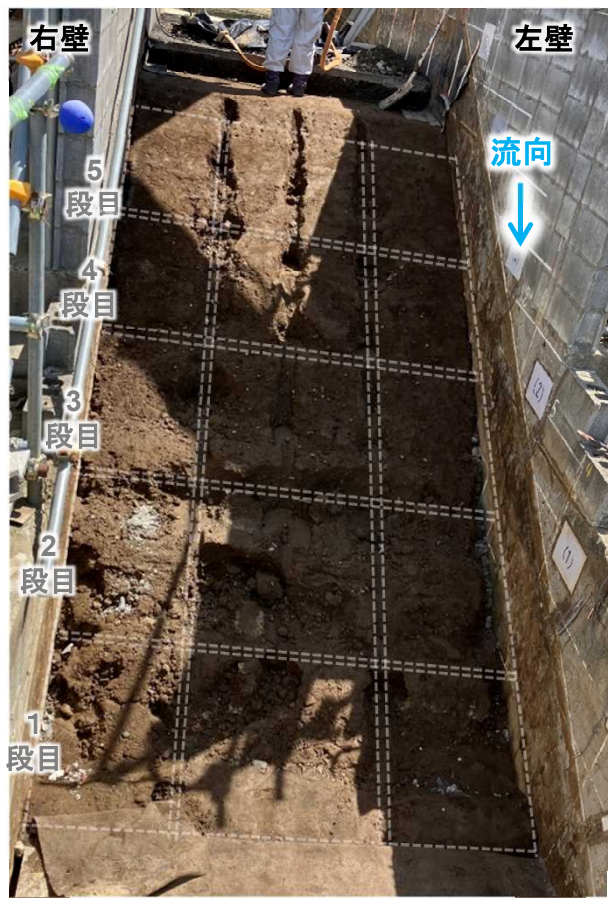
図 吸出し防止材敷設概略図

実験結果(縦溝+吸出し防止材巻き込み)

- 通水5分程度で、すぐに法面ブロックが流出(座屈破壊)
- 縦溝がある状態では、法尻部で吸出し防止材を巻き込むことで、逆に弱くなることが確認された → 溝内部の流れが影響か



法面ブロック撤去後の状況



通水後の堤体土羽状況

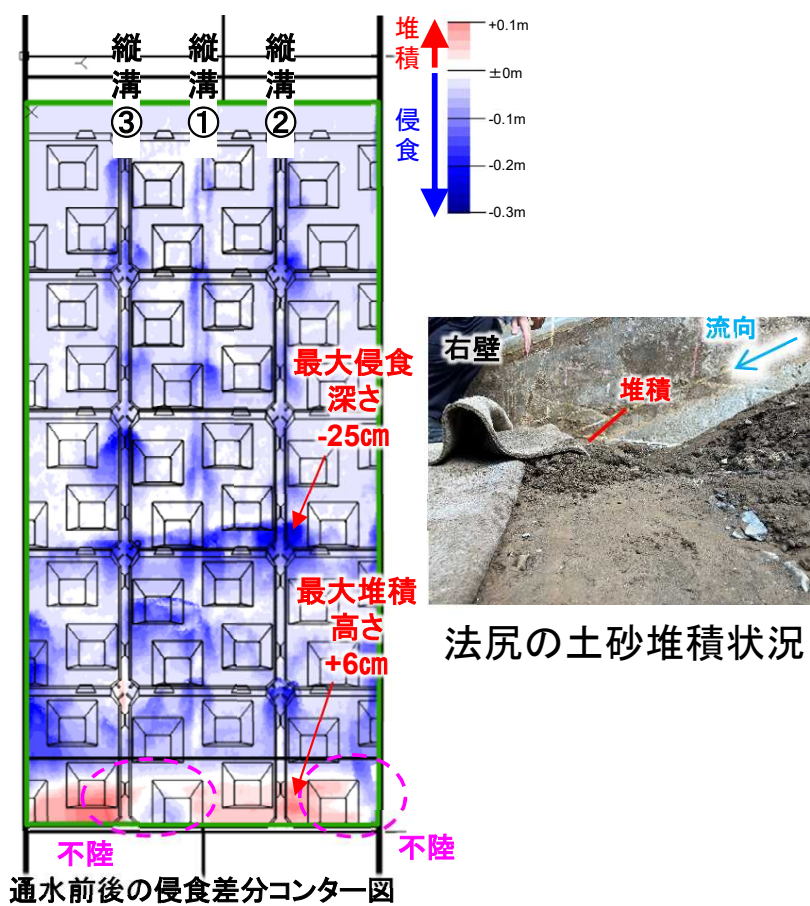


図 通水後の堤体状況

解析結果(ブロック下面に作用する圧力)

- 溝ありの場合は、ある所を境に、圧力水頭の正負が逆転している(溝内への水の流入出の領域が分かれている)
- 溝なしに比べ、溝ありの方が下流側の圧力が高まる傾向が示されている

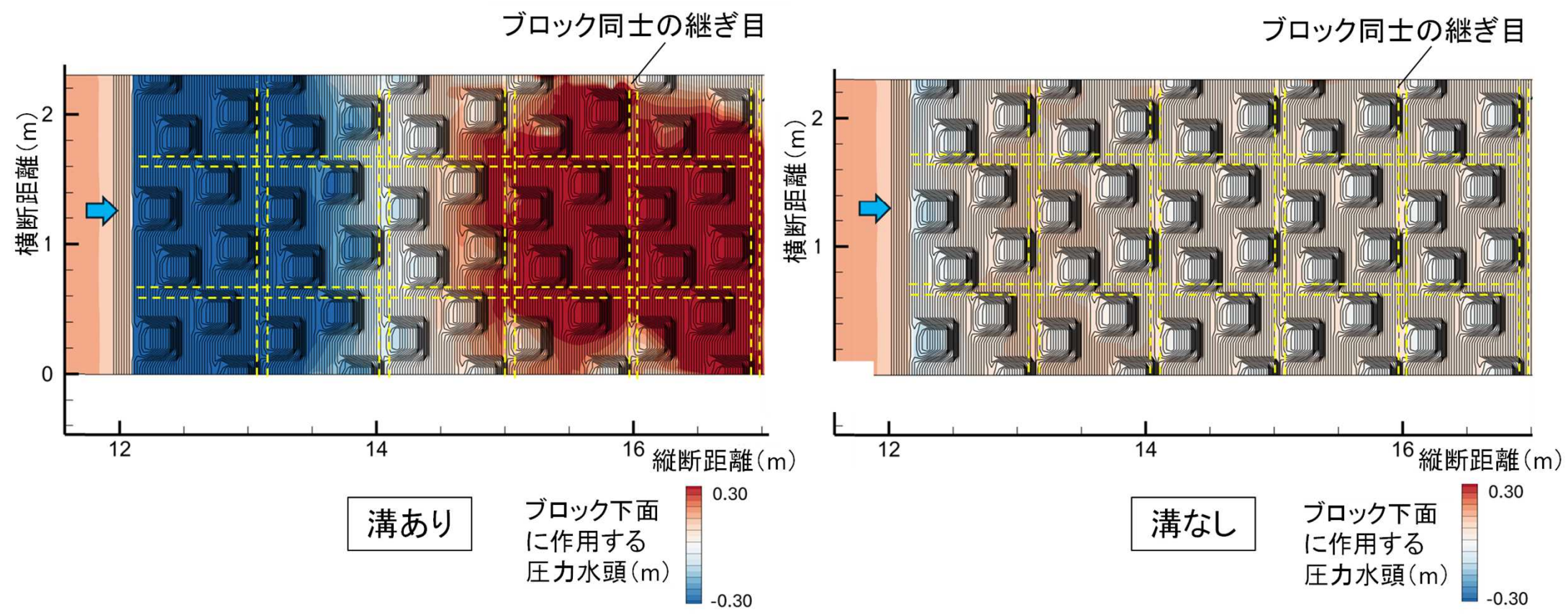
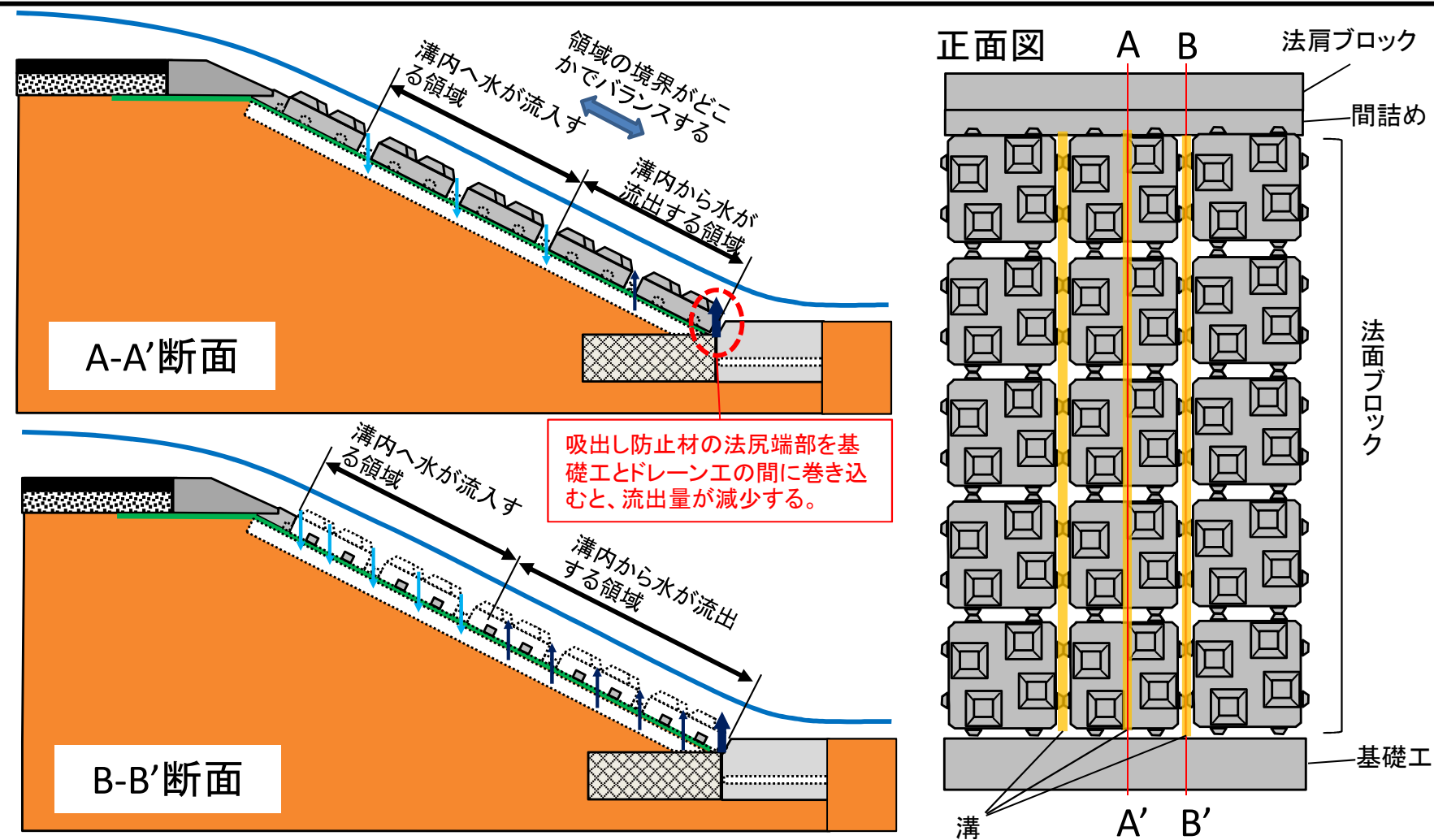


図 通水30分後においてブロック下面に作用する圧力

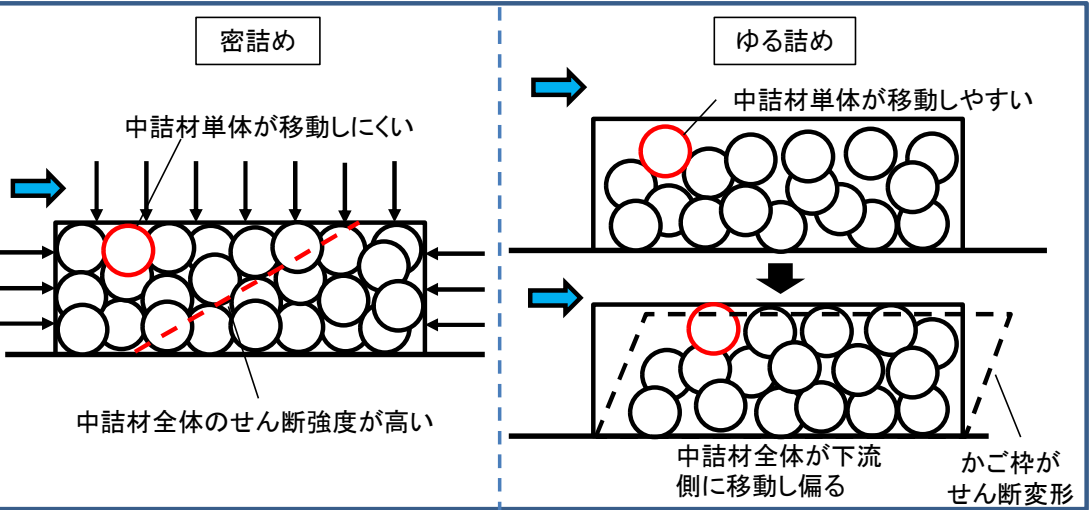
溝内の流れ、ブロック座屈に関する仮説

- 溝内への水の流入出は、主に吸出し防止材(透水係数 $0.12 \times 10^{-2} \text{cm/s}$)または、吸出し防止材の法尻端部における基礎工との隙間を通じて行われる
- 溝内のある水位を境界に溝内への流入出の領域が分かれる
- 境界は、越流量、溝内への流入出量、流下能力、法尻の流出条件などで定まる
- 溝内の水位上昇に伴い、ブロック下面に作用する圧力が上昇し、不安定化する

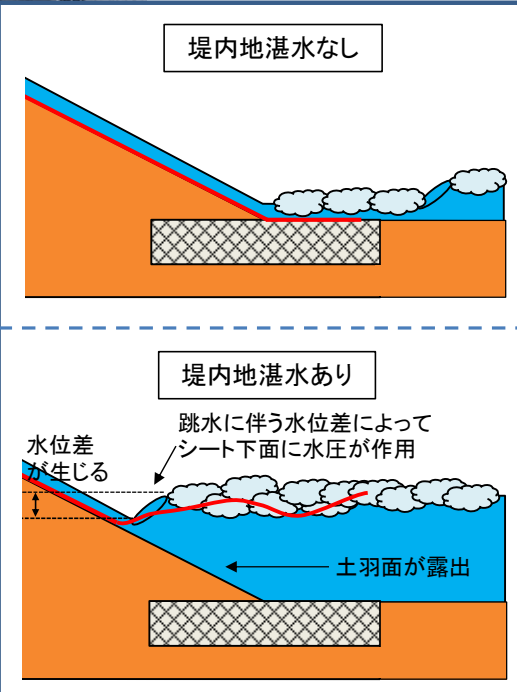
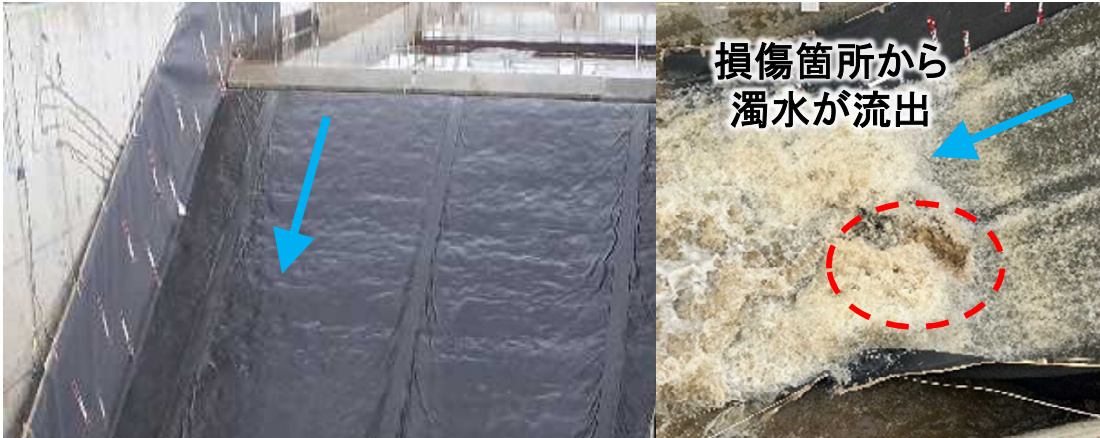


他構造への適用(詳細は別の機会に報告)

かご構造



シート構造



目指すべき信頼性の水準について

- 信頼性を評価する利点として、個々の技術が目標とする信頼性の水準を定め、それを達成するように技術開発を行うことが可能となる点がある。
- しかし、現在の技術水準では、堤防の信頼性を定量的に示すことが困難であることから、目標とする信頼性の水準は、「現場でも通常は性能を発揮する」というような定性的なものにならざるを得ない。
- そのため、様々な可能性を考慮し、生じないこと、あるいは生じる確率が非常に小さいことが明確でない不確実性事象について逐次検証し、想定外の事象が確認された場合には、その要因を分析し、対策方法を検討する（不確実性事象を克服する）ことが基本スタンスとして必要と思われる。
- 一方で、際限なく検討することは不可能である。
- 予期せぬ事故や、重大なヒューマンエラー、設計を上回る外力の作用等の不確実性事象は対象とせず、限られた実験において、対象となる構造への影響の感度を把握すること（対象となる構造の不確実性事象に対する長所、短所を把握すること）が重要と考える。

- FT図を用いた粘り強い河川堤防の信頼性向上手法を提案した。
- 当該手法は、FMEAやFTAの考え方を参考としており、水理模型実験等を組み合わせることで、効率的に致命的となる故障の要因を見極め、体系的に整理することを補助するものである。
- 当該手法を、タイプの異なる3つの粘り強い河川堤防構造に適用した結果、それぞれの構造において、以下のような新たな潜在的リスクの存在が示唆され、それらのリスクに対応することで効率的に信頼性の向上が図れることを示した。
 - ブロック構造では、被覆材と土羽面との隙間に水が溜まることによって圧力が高まり、座屈破壊に繋がること
 - かご構造では、中詰材の量が減少した際に、かご枠に顕著な変形が生じること。
 - シート構造では、堤内地湛水時に、シートの浮き上がりやバタつきが生じ、跳水付近の激しい流水の乱れによってシートが損傷するおそれがあること。
- 今後、これらの構造の特徴に応じた信頼性の向上手法の適用上の留意点を整理する予定である。
- なお、上記リスクについては、定量的な根拠データの蓄積と併せて、詳細な検証が必要である。