

堤防浸透破壊はどこまで 解明できたか

—河川堤防研究の進捗状況と今後の方向—

企画・進行: 堤防WG 諏訪(国総研)、笠井(水管理・国土保全局)
新清(応用地質(株))、溝口(名城大)

時 間: 6月16日(金) 11:00~12:00

場 所: 弥生講堂一条ホール

趣旨説明

国土技術政策総合研究所河川研究部 諏訪 義雄

- ▶ 河川シンポジウムでは 2010 年以降にはほぼ毎年河川堤防研究に関するセッションが企画され、堤防研究の重要性、研究動向、技術的課題、堤防設計の方向性などについて議論が深められてきた。
- ▶ このような積み重ねの結果、堤防研究の重要性は着実に浸透し、河川技術に関する論文集第 23 巻では、特に浸透破壊に関して研究の進捗を窺わせる論文が複数掲載された。
- ▶ 本セッションでは、このうち 5 編の論文を話題提供として発表していただき、堤防研究の進捗状況、研究成果の実務への反映の方向、今後の研究の方向について会場全体で議論する。

2017年度 河川技術に関するシンポジウム

【企画趣旨】

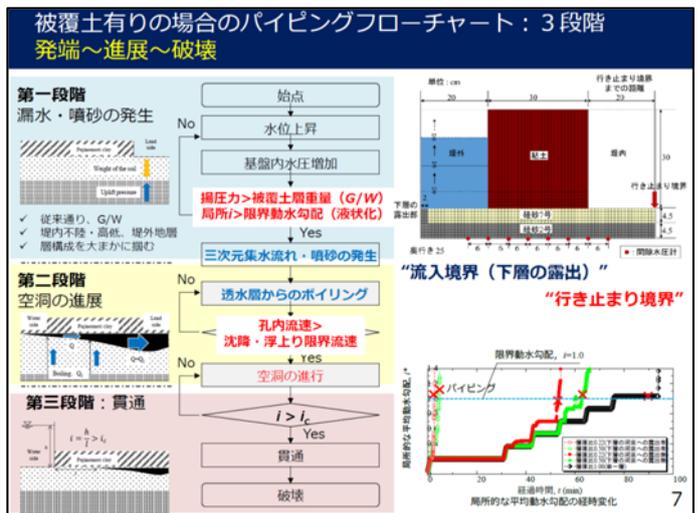
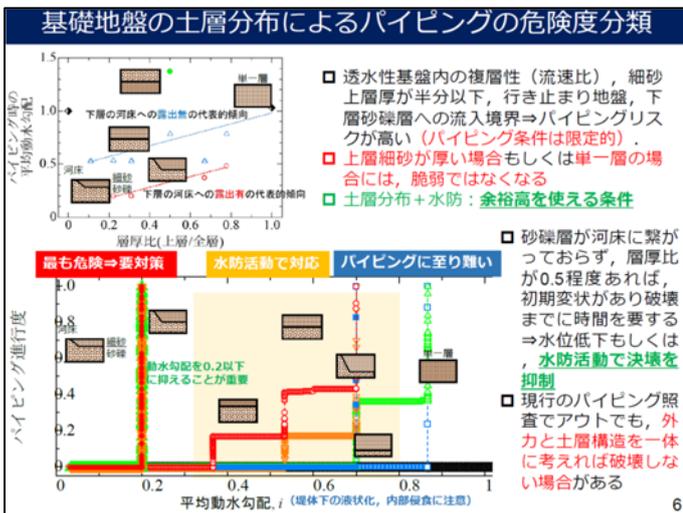
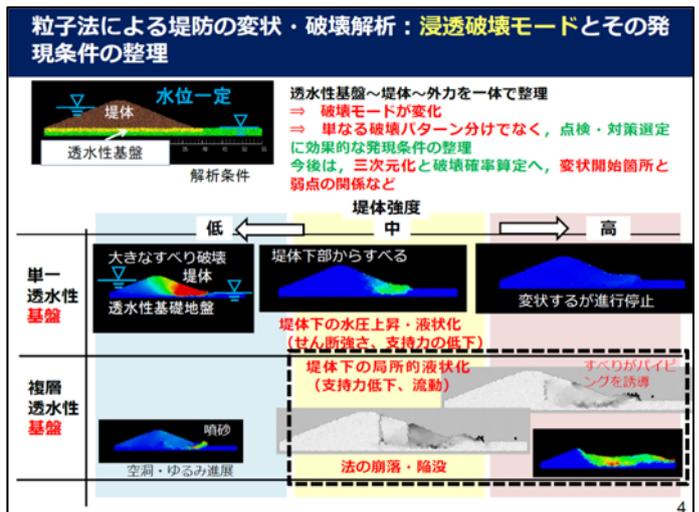
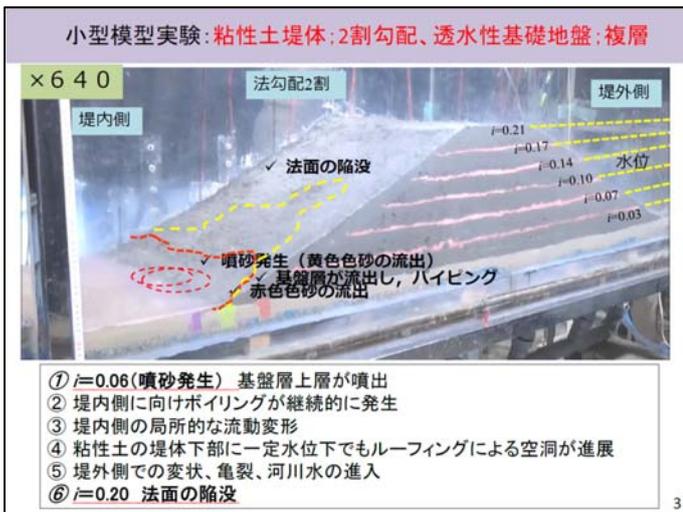
- 2010河川シンポ OPS1: 堤防の維持および管理のための技術～浸透・変状の調査・探査技術～～破壊過程の知見、並びに堤防の強化技術～堤防研究の輪を広げる重要性
- 2011河川シンポ OPS3: 堤防の安全性に関する技術の課題 堤防に関わる研究レビュー 地盤工学委員会との連携深める
- 2012河川シンポ OS・OPS2: 河川堤防の安全性に関する技術 断面の安定性を考えるのみでは堤防の安全性を高めることにはならない 堤防の安全を考えると治水システムそのものを考えること
- 2013河川シンポ OPS1: 堤防の浸透破壊～目に見えない堤体・基盤内からの破壊～より深い現象の理解と堤防管理の高度化を目指して 連携WG設置と矢部川パイピング破壊
- 2015河川シンポ OPS2: 河川堤防の効率的補強に関する技術的課題とその取り組みの方向性 連携WGの成果(アカデミックリサーチマップ等)
- 2016年9月 全国大会(仙台) 研究討論会(地盤工学委員会堤防小委員会主催) 最新の研究動向と堤防設計の方向

投稿論文からの話題提供

【話題提供 1】パイピングの発生条件

名古屋工業大学 前田 健一

- パイピングの発生条件は、堤体および基盤層の両者の地盤条件が重要な指標となる。
- 例えば、堤体および基盤層の両者が砂質土で構成される場合は、堤体の砂質土が基盤層の空洞を塞ぐため、パイピングは発生しづらい。一方で、堤体を粘性土とした場合の小型模型実験では、パイピングが発生した。
- 基盤層の土層分布に着目したパイピングリスクが高い条件は、透水性基盤内が複層、細砂上層厚が半分以下、行き止まり地盤、下層砂礫層への流入境界である。一方で、上層細砂が厚い場合や単一層の場合は、パイピングリスクは低くなる。
- 透水性基盤内が複層の場合、基盤内の水圧増加が堤内側まで到達し、不陸などで地盤高の低い箇所があるとそこに流れが集中して孔内流速が増大し、パイピングが発生する。



【話題提供 2】裏法すべりの破壊危険性評価

愛媛大学大学院 岡村 未対

- 高水時における裏法すべり破壊に対する安定性は浸透流解析により照査されるが、浸透流解析で用いられるピーク強度は土の状態によって大きく変化するため強度評価が困難である。
- そこで、土の状態に依存しない残留強度 (限界状態摩擦) を用いて、崩壊領域の位置や大きさ、変状後の最終的な堤体の形状を評価する実用的な方法を検討した。
- 砂質土堤防を対象とした遠心模型実験により、高水時における裏法すべり破壊の領域範囲は、土の残留強

度と堤体内の浸潤面位置および法尻の条件によって説明できることが分かった。また、同実験結果に基づき、簡便な破壊領域の評価法を提案した。

裏面滑りに対する安定性評価

- 外力: 降雨+外水位上昇
 - 浸透流解析による浸潤線
- 抵抗: 土のピーク強度 (強度の評価は難しい問題の一つ)
 - 円弧滑り計算によるFs評価

変状が始まるか否かを評価

何らかの原因で一旦破壊が開始: どこまで破壊が進展するのか?

- 抵抗: 土のピーク強度 → 残留強度
- 残留強度は状態によらずほぼ一定
- 砂の限界状態摩擦角は鉱物に依存。長石砂: 約40°, 石英砂: は33°程度。表面の滑らかなガラスビーズでも25°程度

最終的な崩壊形状の評価

- 不透水性基礎地盤
- 透水性基礎地盤
- 行き止まり地盤
- 長時間高水を与え、最終的な破壊形状調べる実験を実施

残留強度(限界状態摩擦角)で破壊領域の大きさを評価できる

①浸透流解析で浸潤線と上向ききの動水勾配を算出
②表面摩擦角を求め、法尻と浸潤面の交点を通る崩壊面を決める

(a) 堤内側に水平地盤がない場合
(b) 堤内側に水平地盤がある場合

崩壊面積と体積面積が等しくなるよう崩壊面の位置を決める

行き止まり

- 堤内側水平地盤面の重要性
- 法尻腰壁の効果,
- 水防工法

実規模堤体の検討

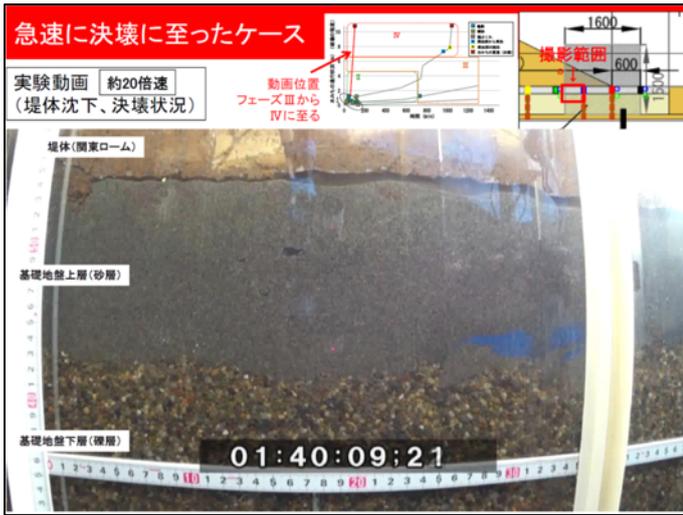
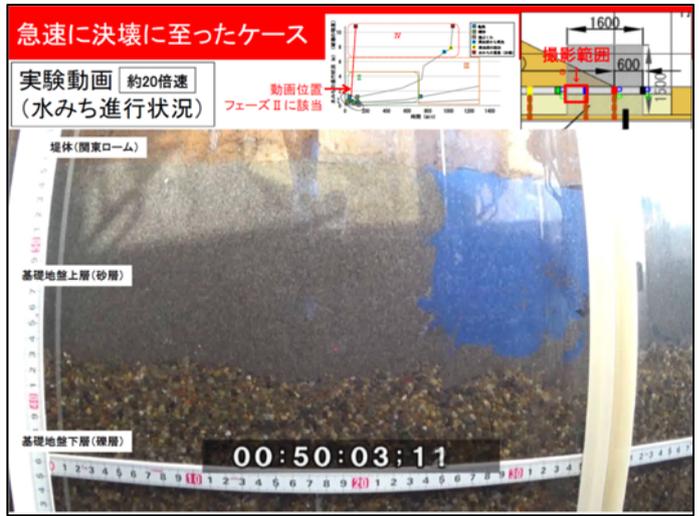
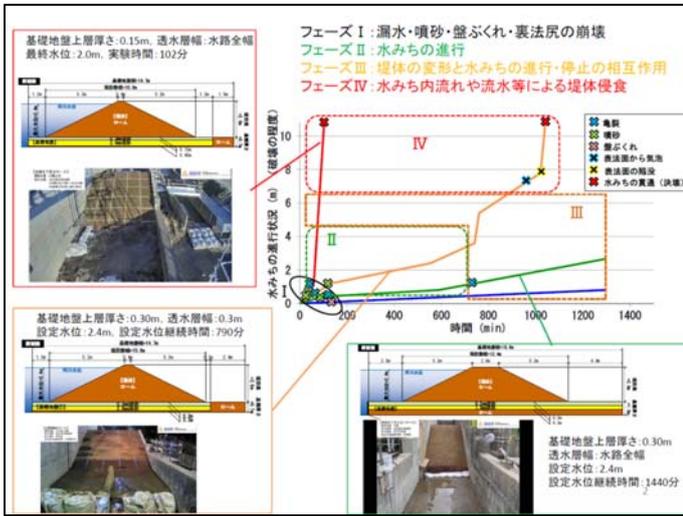
- 検討モデル堤体とハイドログラフ

- 高水継続時間の長い場合(常浸透), 変状発生後、外水位の上昇とともに変状域は急速に法尻に向かって進展し、これは法面勾配や天端幅が小さいほど顕著。
- 法面勾配が1:4で堤体土の摩擦角が大きければ、高水条件によらず堤体に生じ得る破壊域の高さは堤高の1/2以下で、堤体は破壊に対する安定性を保つ。
- 摩擦角の小さい1:4勾配の堤防は、摩擦角の大きい1:2勾配の堤防とほぼ同程度の安定性。

【話題提供 3】 実物大実験によるパイピング破壊

国土技術政策総合研究所河川研究部 笹岡 信吾

- 堤体亀裂の発生や盤ぶくれ、噴砂といった現象は、変状の初期に発生する。
- その後の水みちの発達や堤体土の崩壊といった現象は、基礎地盤や堤体土質の条件等によって発生の有無やその進行速度が異なる。
- パイピングが継続して進行し決壊にまで至るのか、堤体の崩壊により進行が遅くなるかの判別が行えれば、優先的に対策を実施する箇所を選別でき、効率的な堤防強化につながる。
- 堤防安定性評価の発展、変形量照査などの次のステップを目指す場合、各フェーズに至る時間や決壊までの時間の評価が不可欠となる。



【話題提供 4】 縦断的危険箇所評価手法—堤防脆弱性評価指標—

中央大学研究開発機構 田端 幸輔

- 堤体の浸透破壊を対象に、次元解析および透水性基盤を考慮した堤体内浸透流解析に基づいて導出される堤防脆弱性指標を提案した。
- 平成 27 年 9 月に発生した鬼怒川の洪水では、堤防脆弱性指標により堤防破壊危険性を良好に説明することができた。
- 堤防脆弱性指標を用いることで、堤体浸透の観点から見た縦断的な被災危険箇所や、どの程度の被災がどれ位の割合で生じる危険性があるのかについて推定可能であることが分かった。

堤体の浸透破壊

堤体浸透による破壊:
河川水が堤体に浸透した結果、堤体内浸潤面が形成、発達し、堤体の裏法先部分の泥濁化や裏法滑りによる堤防破壊を生じさせる。

鬼怒川左岸20.5k付近 (平成27年9月洪水)

堤防の断面形、最大動水勾配、土質区分を重視した、「断面」での評価

- 縦断水面形の時間変化の観測
- 堤防ボーリング調査データの蓄積

洪水の継続時間、浸透時間に着目した、「縦断的」な評価が可能ではないか?

堤防脆弱性指標 t^* の考え方

堤防脆弱性指標 $t^* = \frac{\text{高水敷に冠水してからの洪水の継続時間 } t'}{\text{浸潤線が堤防裏法先まで進むための浸透時間 } T}$

水位H

時間

継続時間 t'

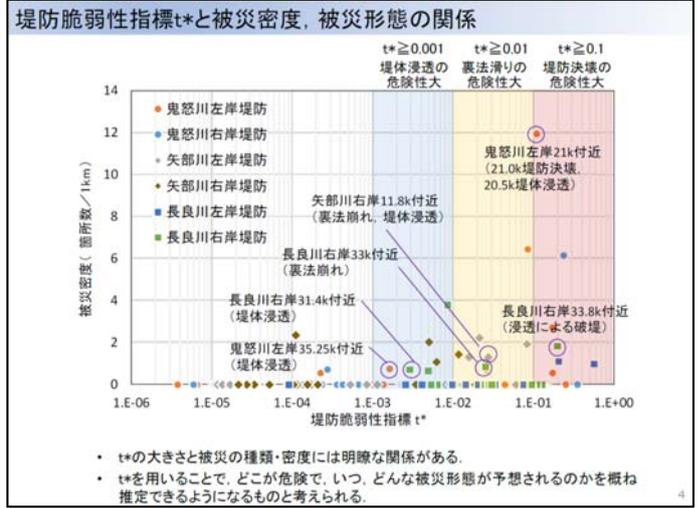
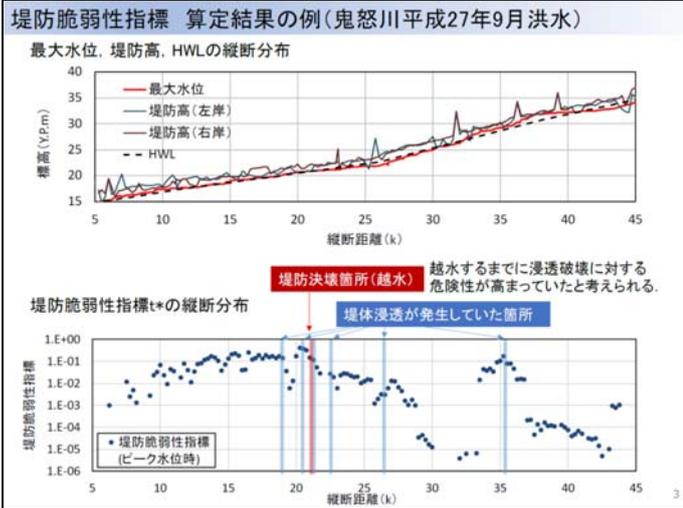
浸透時間 $T \approx \lambda b^2 / Hk$

9つの次元量(H, p, x, t, k, p, \sigma, \lambda, g)を用いた次元解析のπ定理から導かれる。

堤防脆弱性指標: $t^* = \frac{t'}{T} = \frac{8 H k t'}{3 \lambda b^2}$

水深、堤防幅、透水性係数、洪水継続時間、空隙率のコンビネーションによって表された時間に関する無次元量

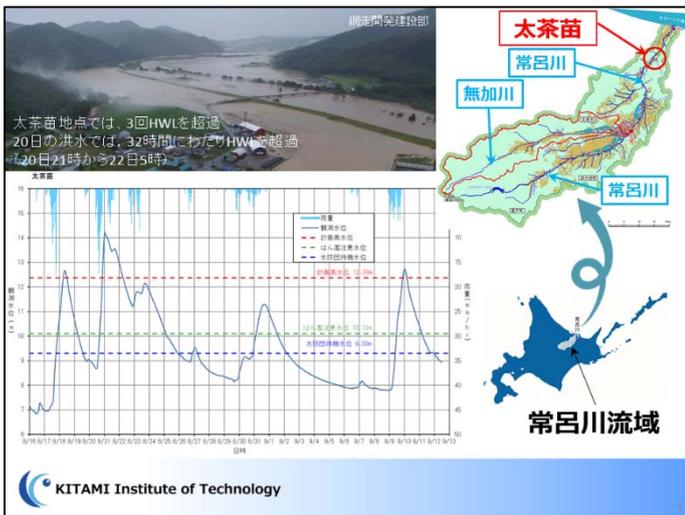
H: 河川水位, k: 堤体透水性係数, λ : 空隙率, b: 水際から裏法先までの水平距離, 係数: 図解法による内田茂男の式(1952)を参考に決定。

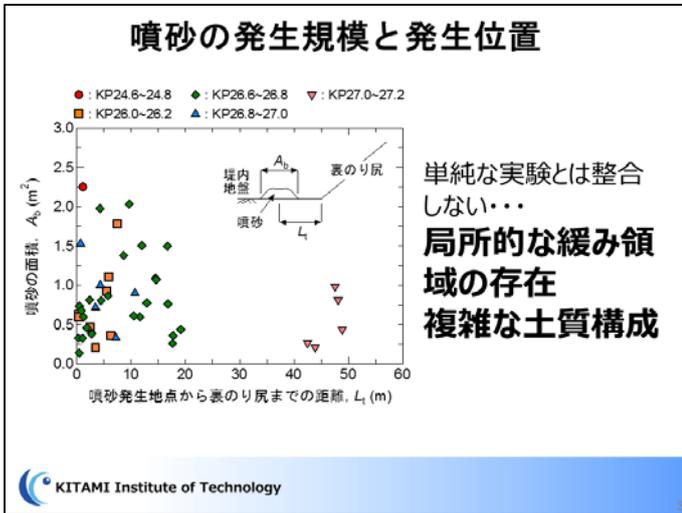


【話題提供 5】2016年8月常呂川洪水で見られた浸透被災

北見工業大学 渡邊 康玄

- 河道内の水位は、1ヶ月間でHWLを3回超過した。特に、8月20日洪水では、32時間にわたりHWLを超過した。
- 支川では破堤が発生したが、本川では越水したものの破堤は発生しなかった。土質調査結果からは、破堤の有無を説明できる有意な違いは見られなかった。
- KP24~27の5km区間で空気湧出や多数の噴砂(最大で直径2m, 深さ50cm)が確認された。大規模の噴砂が確認された箇所では、堤内外で砂質土層が連通しており、噴砂の規模は地下地盤の影響を大きく受けることが示唆された。
- 被災調査結果により得られた今後の課題として、噴砂や内水の湛水が破堤に及ぼす影響の明確化、堤体・基盤の土質構造が破堤に及ぼす影響など検討が挙げられる。





まとめ

	噴砂： 大(KP24.6)	噴砂： 中(KP26.2)
噴砂形態・規模		
砂質土層	堤内～堤外(連通) 噴砂の供給源が多い →噴砂規模が大	行止まり難透水性層 噴砂の供給源が少ない →噴砂規模は大きくなる
発生位置	裏のり尻近傍 圧力解放し易い地点	裏のり尻から8m堤内側 遷移流に遠くまで圧力が伝播 シルト層が薄い圧力解放され易い箇所
堤体への影響	堤内直下に砂質土が分布 安定性に影響する	堤体直下には砂質土が無い 直ちに安定性に影響しない

KITAMI Institute of Technology

全体討議

司会：全体討議に際し、以下の2点について会場のご意見を賜りたい。

- ① 研究進捗の評価
- ② 実務への反映、今後取り組む研究の方向

岡村：地盤工学の専門家と河川工学の専門家の中で、土の強度についての認識に大きな差異があると感じる。河川工学における土の捉え方では、泥濘化が始まると直ちに土の強度が無くなるという扱いをされている場合が多いようだが、地盤工学的には、それでも最低限この程度の強度はある、という認識がある。両分野の認識差異を埋めるような歩み寄りが必要ではないかと思われる。

会場：縦断も含めた治水全体のスキームについて、非常に整理されてきていると感じる。堤防脆弱性指標については、堤防幅が2乗で効いてくるというのが印象深かった。差異時間的スケールが検討に取り込まれている点も重要。

渡邊：常呂川洪水では噴砂がいたるところで発生した。発災時の多忙なかで、その全ての噴砂に対して一斉に対策を施すことが本当に必要かどうかについては検討が必要ではないか。噴射という現象の危険性の認識を再検討する必要があるのではないか。

田端：一か所の噴砂ではあまり破壊には直結せず、縦断的に噴砂が密に発生すると危険になってくる。密度の少ない噴砂はあまり重要ではない印象がある。噴射発生の密度が高くなってくるとリスクが上がってくるのではないか。堤体の体積に対して抜ける砂の体積を考えれば、堤体の安定性が把握できる可能性がある。

笹岡：先ほど紹介した実験では、弱部を一か所だけ作って実施したがメディアによる撮影中は破堤に至らず、その後継続すると破堤した。不明な点はまだ多いが、噴砂現象が破堤のリスクになっていることを認識した。

前田：河川から遠く離れた場所における噴砂は、地盤条件が複層になっていて上層が砂層の場合に発生し、上層

が薄いほど遠くで噴砂する。

遠くで噴砂している状態での危険は少ないが、洪水が長時間継続すると危険性が増す。

単純な計算結果であるが、2m くらい掘れると上が粘着力で支えられている堤防が自重で落ちてくる。

ただし、鬼怒川のような砂分の多い堤防は、堤防自体が流されていくことによる危険性があるため、区分けして考える必要がある。

会場：岡村先生ご指摘の土の強度に関する議論は、河川の専門家が堤防の余裕高の部分を危機管理として取り扱っているのと同様で、管理の理論かと思う。その一方で、土の強度に関する部分の検討については是非引き続き進めていただきたい。

洪水脆弱性指数については、洪水継続時間がパラメータとして使用されているが、脆弱性指標が 10^{-3} 程のときは噴射になり、継続時間が長くなることでオーダーが変わることで滑りなどの他のリスクを表すこととなる。

ひとつ考え方を出し、そこからトータルの指標に検討を進めることが必要。

会場：漏水が発生しなかった場合であっても、実は基盤の砂が少し抜けていたなど、繰り返し洪水が発生することで強度というものは次第に下がっていくと考えるべきなのか。

堤防は出水などで次第に劣化すると考えられるのか？

前田：応用地質の新清様が実験状況を CT でとったデータがあるが、表面に変状が表れていなくても堤体と基礎地盤の境目等、堤体の内部で緩みが生じており、先行して受けた緩みが起点となってそこから次の緩みが進行していく様子が確認できている。

H/D が 0.2 くらいに抑えられていると、実験上では 100 回繰り返しても変状は進行しない結果があり、

H/D を 0.2 以内に抑えておけば変状が進行しないという知見がある。

会場：過去の経験で肝を冷やした事がある。

一か月の間にほぼ同規模の出水が 2 度生じた。

最初の出水の際には何も生じなかったが、2 度目の出水のピーク水位が下がり始めてから、大規模漏水が発生した。

堤防は既成概念では養生期には弱いですが、次第に強くなると考えられてきた。

陥没や亀裂など、多少の損傷があっても、堤防自体の作用でそれが埋まり修復されると考えられており、

「だから堤防は土なんだ」という議論が過去にはなされてきた。

そこに、出水の履歴によって劣化するという概念は無かった。

「堤防は劣化する構造物であると考えべきか？」これを今後の研究のターゲットに加えていただきたい。

そしてその知見を元に、メンテナンスの必要を取り入れた、維持管理業務の見直しをしていく必要があるのではないか。

会場：今後どうやって堤防を強化していくかについて、近世の技術の中には、堤防に木を植える等の工法もある。

法面樹木は越流する流速も弱める効果も期待できるので、そういった知見も含めた総合技術に展開してほしい。

笠井：昨今の出水では、水防活動の担い手が不足しており、その体制作りをどうするかという課題がある。

堤防についても、詳細点検と称して滑りとパイピングの危険箇所を抽出しているが、無対策の部分がまだ

3000 キロ残っており，どう優先順位をつけて対策を実施していくのかを，予算制約も含めて実務に反映するための議論を行っている。

堤防脆弱性指標の適用も検討中である。

また，今後ボーリング本数を増やすことは難しいが，例えば法尻のみについて集中的に物理探査をかけるなどの検討を含め地盤工学会の合同 WG の中でも検討中である。

溝口：侵食が深刻となる急勾配の河川と，より浸透が深刻になるような低平地河川とでは，必要な対策が異なるものと思われる。

これらの点について河川工学の側から検討すべき課題がある。

新清：全体の 4 割程の要対策区間からどのように優先度をつけていくか，というときに岡村先生の残留強度，前田先生の極浅い位置の砂層の影響など，多くの知見が得られた。

実務に反映して，どこが本当に危険なのかについて優先度選定に活用できればと考えている。

以上。