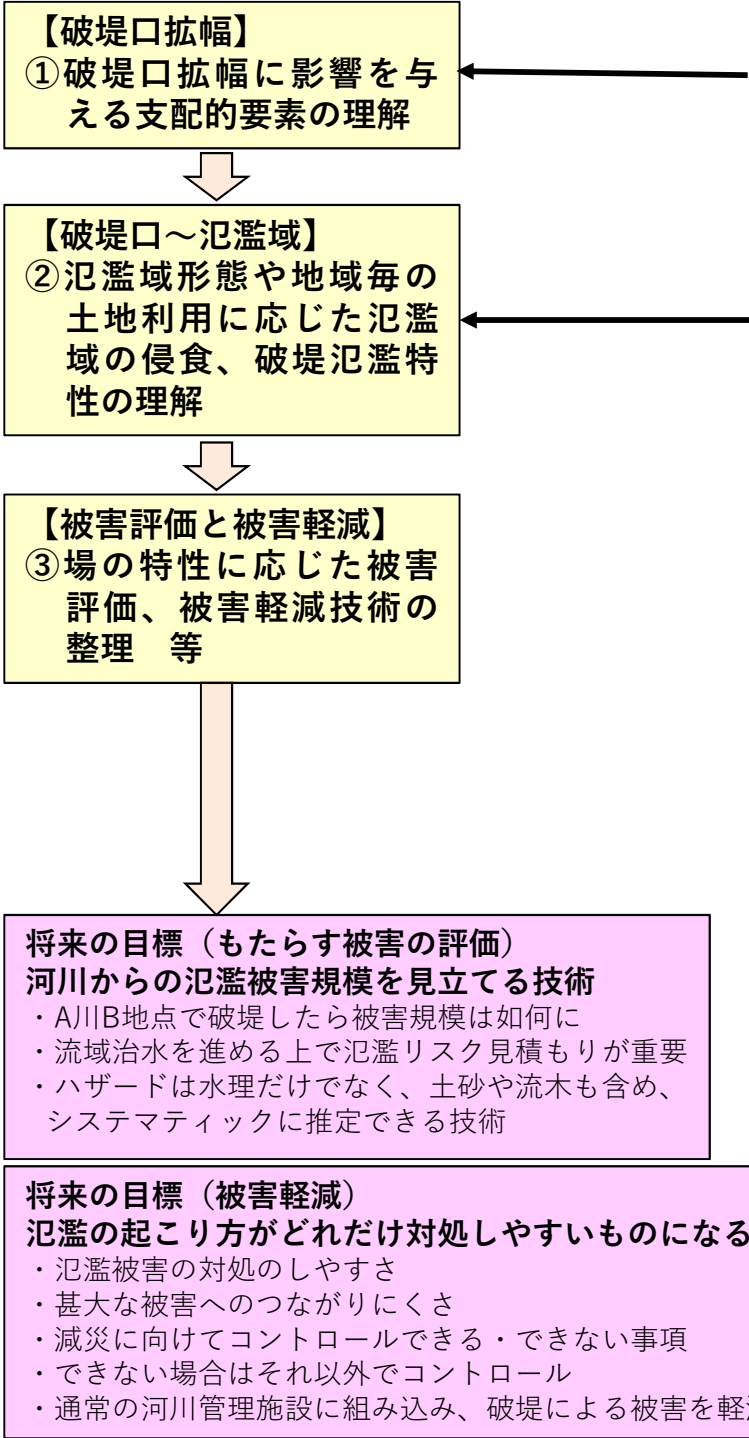


十勝川千代田実験水路実験検討会での議論を踏まえた今後の進め方

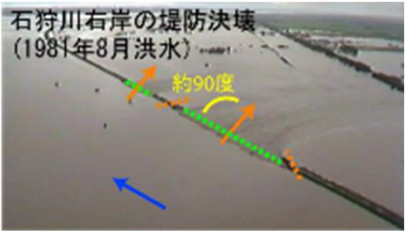
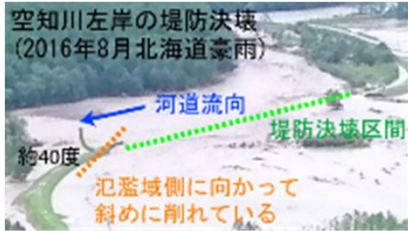
国土交通省 北海道開発局
(国研)土木研究所 寒地土木研究所

1. 実験研究の進め方～第24回実験検討会での議論
2. 令和5・6年度の実験内容～第25回実験検討会での議論



・破堤口拡幅事例、場の整理

主な破堤拡幅災害事例、場の条件（これまでの川幅と河床勾配だけでなく、平面形状、堤体・基盤材料、ハイドロ、横断面形状等・・・）



	空知川	石狩川
川幅	100 m	900 m
水面勾配	1/210	1/4000
Fr数	0.90	0.17
氾濫流向	40度	90度

川幅と河床勾配に着目した破堤拡幅形状の整理例

・事例整理を踏まえ、破堤口拡幅モデルを用いた数値解析による感度分析により、破堤口拡幅に影響を与える支配的要素の整理

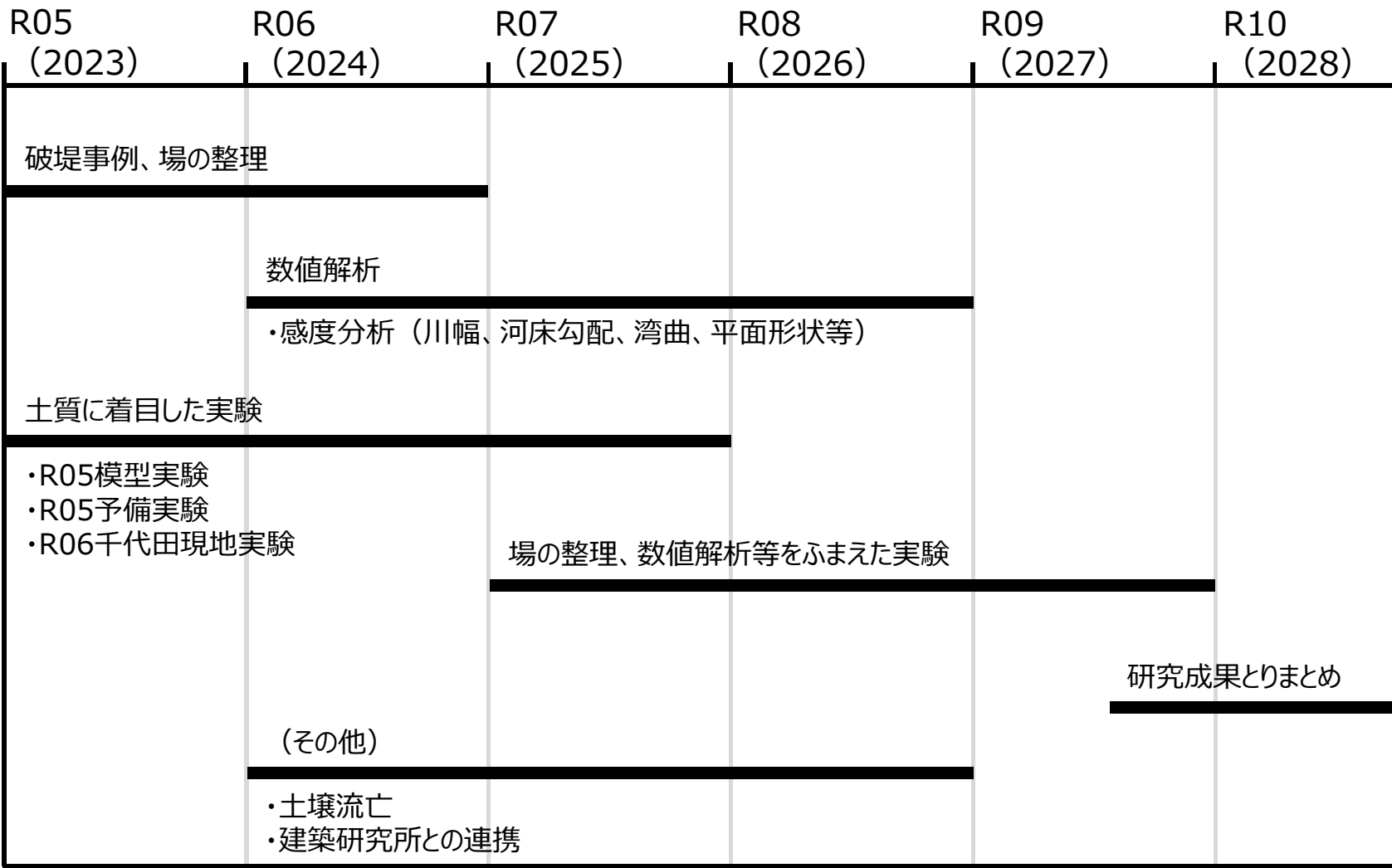
川幅、河床勾配、高水敷（有無、侵食有無、幅、高）、湾曲（内外岸、曲率半径、破堤箇所）、天井・掘込、材料（粘着性、堤体、基盤）、氾濫形態（流下、貯留、拡散）、土地利用状況（農地等）、堤体形状、堤内地盤高、堤防沿樹木（河道、氾濫域）、破堤水位（HWL、天端）、洪水継続時間 等

・数値解析では評価が難しい要素については縮尺模型実験（必要に応じて千代田実験水路）を併用

（材料）

粘着性を含む、堤体や基盤も含めた材料の相違が破堤口拡幅に与える影響

（その他）



- ・河川からの氾濫被害規模を見積もり技術の確立等を将来的な大目標として破堤口拡幅事例の整理、数値解析による破堤口拡幅に影響を与える要素の感度分析を実施する。
- ・また数値解析で評価が難しい要素は縮尺模型実験を併用して破堤口拡幅に与える影響を把握する。



数値解析で評価が難しい要素

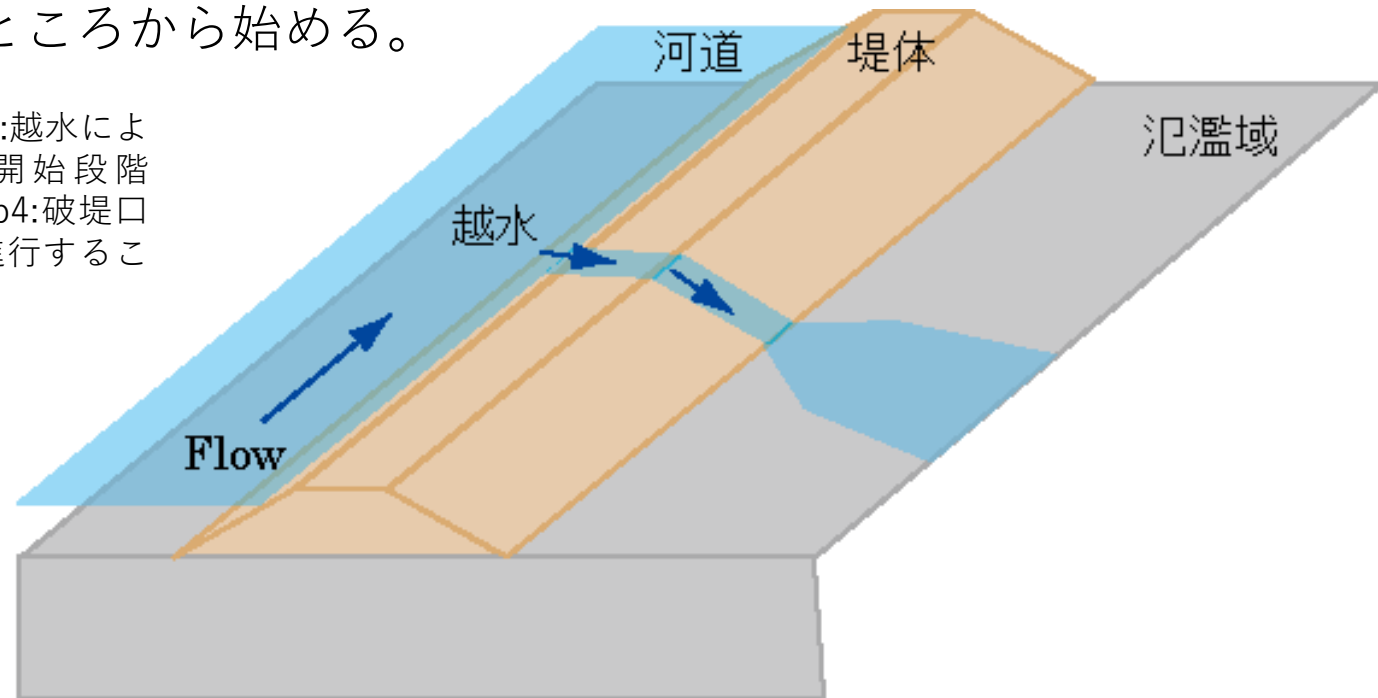
- ・粘着性を含む、堤体や基盤も含めた材料の相違が破堤口拡幅に与える影響
- ・破堤開始までの越流形態の相違が破堤初期～拡幅に与える影響

- ・今年度は土質の違いより破堤口拡幅の進行過程に相違が生じるか、また破堤口拡幅に影響を与える支配的な要素になるのか確認するところから始める。



過去の実験より、4つの段階（Step1:越水による堤体侵食→Step2:破堤口拡幅開始段階→Step3:破堤口拡幅加速段階→Step4:破堤口拡幅減速段階）を経て堤防決壊が進行することが分かっている

- ・堤体強度の相似則など議論の余地はあるものの、まずは縦断堤での縮尺模型実験により、土質の違いが越水から破堤口拡幅までの一連の現象に与える影響について、概略的な理解を得る。



縦断堤での縮尺模型実験を実施



事務局から今年度の実験計画（案）や今後の実験の方向性に向けた検討資料等について説明し、その後委員により活発な意見交換が行われた。

【議題と結果】

(1) 検討会委員長の互選について

- 検討会テーマである堤体材料及び支持地盤を含めた堤防決壊の検討を進めるにあたり、土質・地盤工学に精通している九州工業大学大学院の川尻委員を委員長と選定した。

(順不同)		
氏 名	所 属	職 名
戸 田 祐 嗣	名古屋大学大学院 工学研究科	教授
前 田 健 一	名古屋工業大学 社会工学科 環境都市分野	教授
川 尻 峻 三	九州工業大学大学院 工学研究院	准教授
岩 崎 理 樹	北海道大学大学院 工学研究院	准教授
久 加 朋 子	富山県立大学 工学部 環境・社会基盤工学科	准教授
白 井 秀 和	北見工業大学 社会環境工学系	准教授
瀬 崎 智 之	国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室	室長
石 原 雅 規	国立研究開発法人 土木研究所 地質・地盤研究グループ	特命上席研究員
大 串 弘 哉	国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 寒地河川チーム	上席研究員
柿 沼 孝 治	国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 水環境保全チーム	上席研究員
林 宏 親	国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 寒地地盤チーム	上席研究員
田 代 隆 志	北海道開発局建設部 河川計画課	河川調整推進官
古 溝 幸 永	北海道開発局建設部 河川工事課	河川技術対策官

（2）千代田実験水路等を活用した令和5年度からの実験計画（案）

- ・ 氾濫がもたらす被害の評価、被害軽減のための氾濫に対する対処のしやすさ（しづらさ）の評価といった将来的な大目標を念頭において進める。
- ・ 実験計画（案）については、破堤口拡幅事例の整理、数値解析による破堤口拡幅に影響を与える要素の感度分析を実施する。
- ・ また数値解析で評価が難しい要素は縮尺模型実験（必要に応じて千代田実験水路での実物大実験）を併用して破堤口拡幅に与える影響を把握する。
- ・ 今年度の縮尺模型実験は堤体材料及び基盤材料の土質の違いに着目した実験を行う。

【主な意見】

- ・最終破堤口幅は川幅スケールだけでなく、河道特性（縦横断形状や平面形状など）に着目することで傾向が見えてくる可能性がある。
- ・破堤口拡幅に影響を与える支配的要素を明らかにするため、破堤事例の整理や数値解析による分析を行いながら、これらだけでは評価が難しい項目などに着目し、実験条件として設定するのがよい。
- ・拡幅までの時間を評価する場合など、実験条件によるばらつきがあるため1回の実験で評価して良いか留意が必要であり、特に縮尺模型実験では粘性土の粘着力の影響がより大きくなることを考慮しなければならない。
- ・縮尺模型と実物大規模では堤体を同等の強度で作って崩れ方が異なる可能性があり、堤体強度の相似測などの条件をそろえることが難しいため、これまでの千代田実験で得た知見を基にして条件設定することが現実的である。
- ・土質が均一な条件で行なった実験から得られた結果を、均一ではない土質分布である現地の堤防に反映させるには、実験がどれくらい現地を再現できているのかを含めて検討していく必要がある。
- ・実験結果をどのように被害の評価や被害軽減につなげていくことが出来るのか、イメージしながら実験内容について整理する必要がある。

1. 実験研究の進め方～第24回実験検討会での議論
2. 令和5・6年度の実験内容～第25回実験検討会での議論

【R05】 土質の違いに着目した実験の実施

○縮尺模型実験の実施

- ・縦断堤での縮尺模型実験により、越水から破堤口拡幅までの一連の現象を確認
- ・砂礫土、粘性土を組み合わせ実施



R05.10.26実施
堤体材料：粘性土
基盤材料：砂礫土



R05.11.30実施
堤体材料：粘性土
基盤材料：粘性土

【R06】 千代田実験水路での実験

○R05予備実験

- ・千代田現地実験に向けて、観測配置や実験実施に向けた留意点の確認などを目的に、予備実験として縮尺模型実験を実施

○R06千代田現地実験

- ・破堤口拡幅進行過程の4つの段階のうち、被害規模が大きく切り替わる前半に着目し、千代田実験水路で横断堤での実験を実施（6月下旬）



R06.01.30実施。堤体材料：粘性土、基盤材料：砂礫土



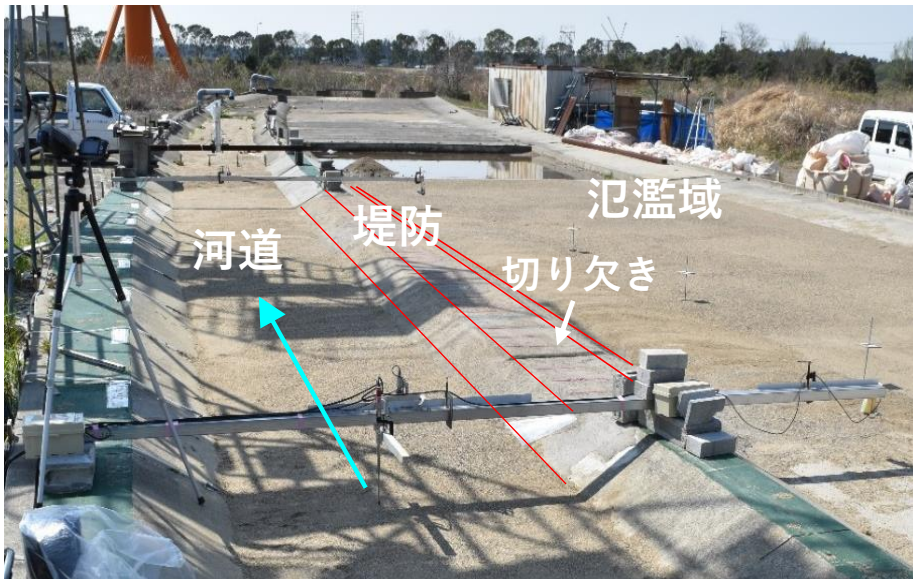
【R07以降】

- ・R05-06の実験結果や、事例整理を踏まえた実験

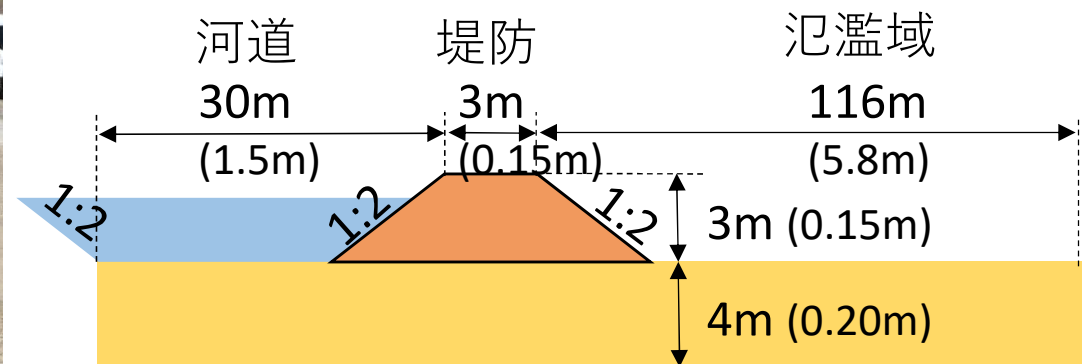
土質材料に着目した縦断堤模型実験

< 概要 >

- ・ 場所：国総研内の千代田実験水路20分の1縮尺模型水路
- ・ 時期：2023年10月～12月（対照実験のケース1は2015年）
- ・ 目的：堤体と基盤の土質の違いに着目し、越水破堤現象を明らかにする
- ・ 内容：3ケース
 - ケース1：堤体・基盤ともに砂礫
 - ケース2：堤体粘性土、基盤砂礫
 - ケース3：堤体・基盤ともに粘性土



実験水路全景

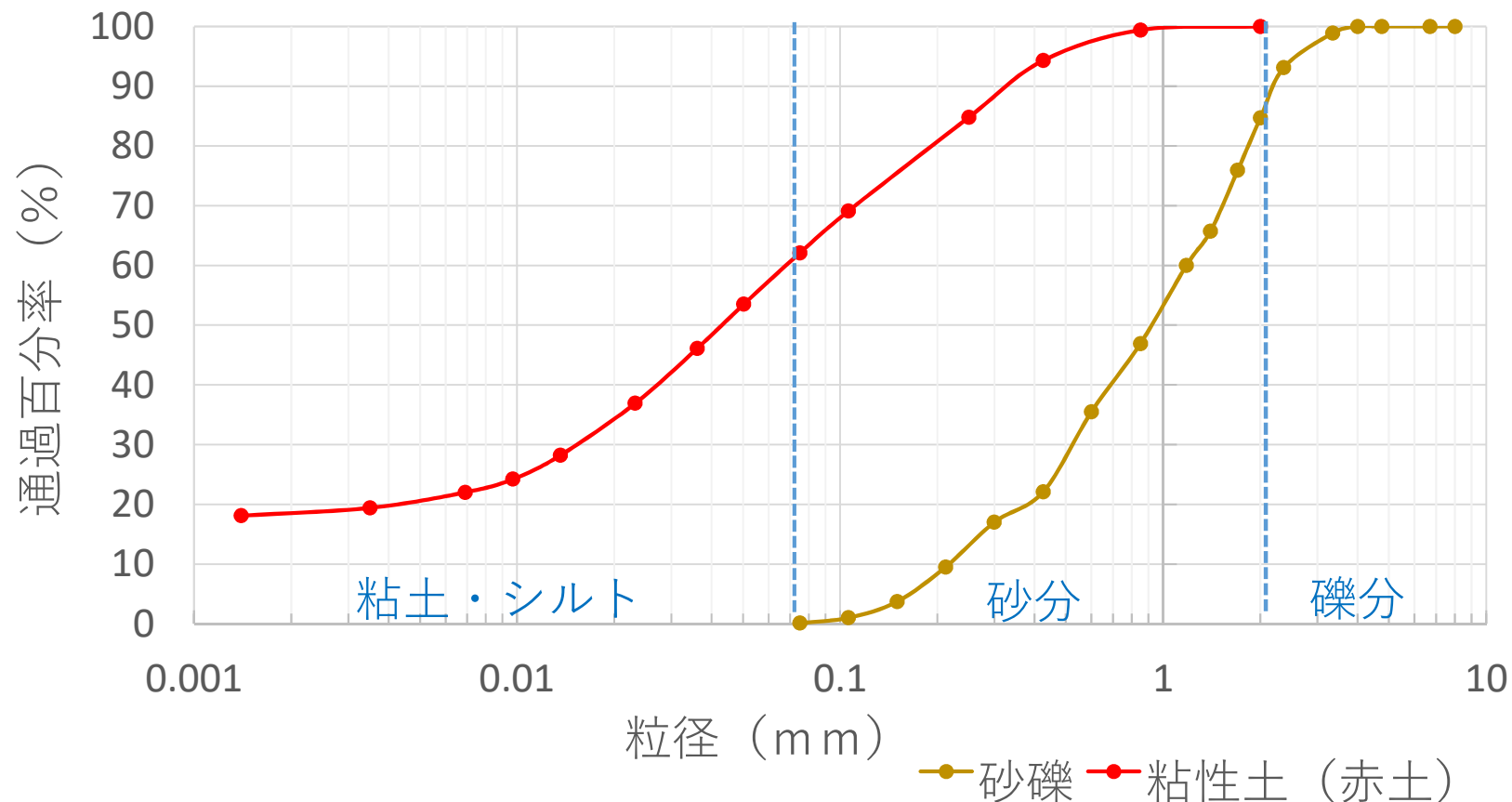


水路断面図 () は模型値

実験条件

- ・土質材料：砂礫土と粘性土（赤土）の2種類
- ・河床勾配：1/500
- ・下流端等流水深：2.75m（切欠部の越流水深0.75m）
- ・流量：315m³/s
- ・フルード数：0.47

※現地換算値 土質以外の条件はすべて千代田現地の1/20で統一



実験結果（動画）

ケース1

堤体基盤ともに砂礫土



ケース2

堤体粘性土、基盤砂礫



ケース3

堤体基盤ともに粘性土



（10倍速）

- ケース 1 越水初期：越水開始直後から裏法面が侵食される
 拡幅後：堤体下部が侵食後、上部が薄く剥離する
- ケース 2 越水初期：裏法面を侵食せずに流下し、基盤が洗堀される
 拡幅後：堤体下部が侵食後、上部が塊状に崩落する
- ケース 3 越水初期：ケース 2 同様（基盤洗堀深は小さい）
 拡幅後：ケース 2 同様（基盤洗堀深は小さい）

粘性土堤防の特徴的な破堤状況

切り欠き部の侵食状況（10倍速）



切り欠き部の表法面が残存し、氾濫流量が抑制された（表法面補強効果あり？）

破堤進行後の流況（1倍速）



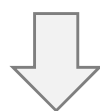
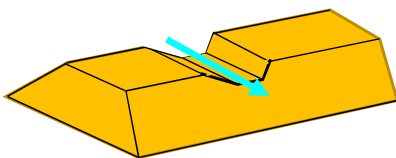
基盤と堤体下部が侵食後、オーバーハングした状態から上部が塊状に崩落する

越水初期における土質の影響

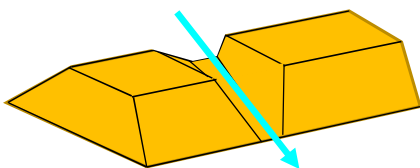
堤体が砂礫の場合

①越水開始

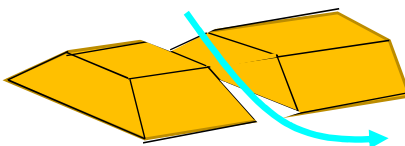
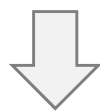
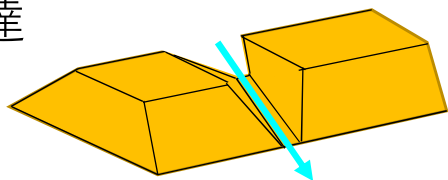
②裏法面を侵食しながら下刻



③堤体下部が残存したまま法面侵食が表法肩に到達

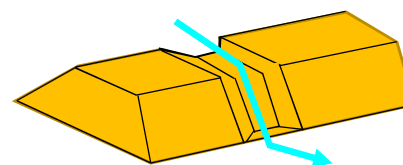


④表法肩に到達後、堤体が基盤高まで侵食され、破堤拡幅開始

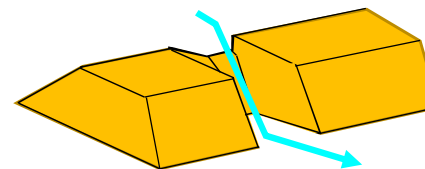


堤体が粘性土の場合

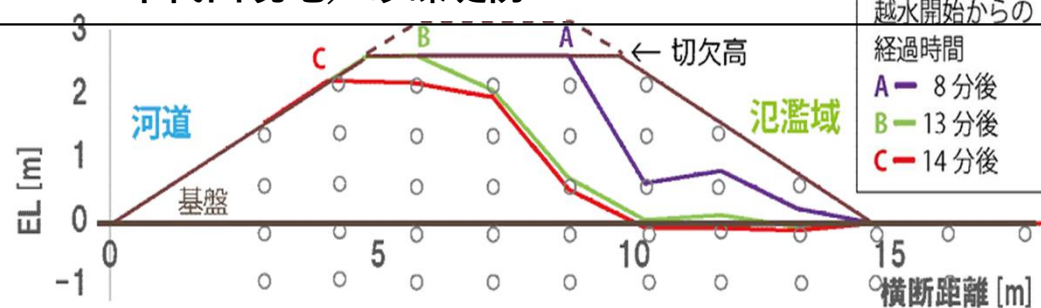
②裏法面を侵食せず裏法尻付近の基盤が洗掘されて階段状になる



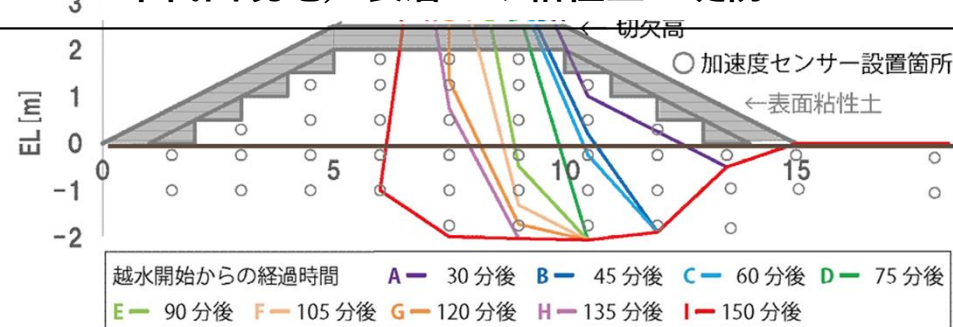
③基盤洗掘が表法肩に到達する



千代田現地) 砂礫堤防

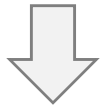


千代田現地) 表層のみ粘性土の堤防



拡幅開始後における土質の影響

①堤内外の水位差により氾濫流が流出



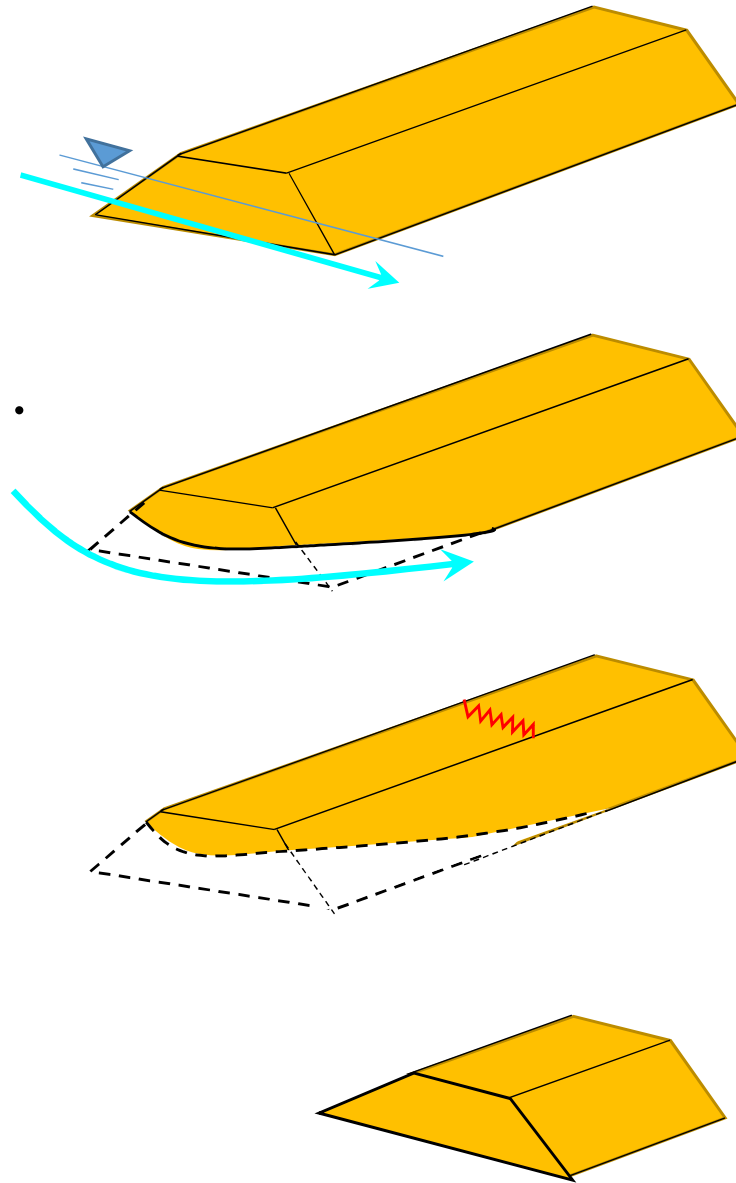
②氾濫流により基盤・堤体下部が侵食
(側方侵食と同様)



③天端にクラックが入る



④上部堤体が崩落



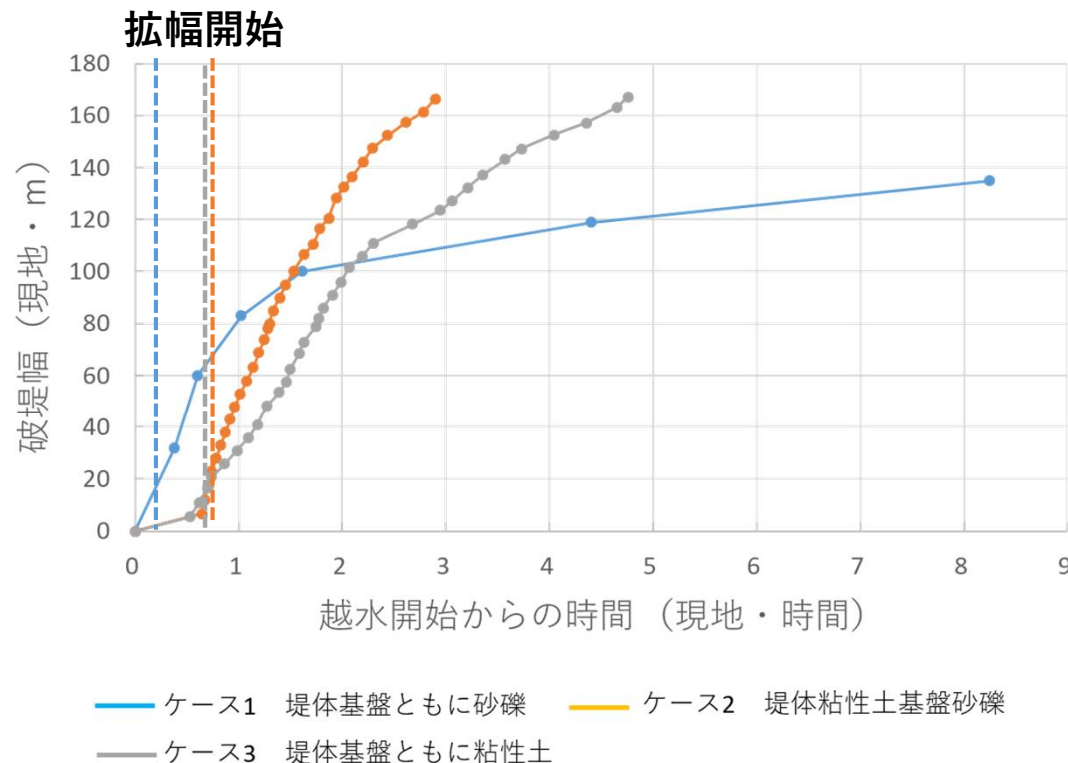
砂礫土堤防・・・
1回あたりの崩壊量が
少なく、
崩壊回数が多い

粘性土堤防・・・
1回あたりの崩壊量
が多く、
崩壊回数が少ない

※基盤の違いが与える影響については検討中

破堤進行速度に及ぼす土質の影響

- ・堤体が粘性土（ケース2, 3）の場合、破堤拡幅開始が遅くなった
→越水初期（氾濫流速、水深小）には、粘着力の影響が大きいのでは
- ・ケース1が140m程度で停止したのに対し、ケース2、3は堤防移動床区間末端まで到達した
→破堤拡幅後（氾濫流速、水深大）には、限界掃流力の影響が大きく、
粒径の小さい方が侵食を受けやすかったのでは
また、崩落した粘性土がすぐに飽和状態になり、粘着力を失ったのでは



<まとめ>

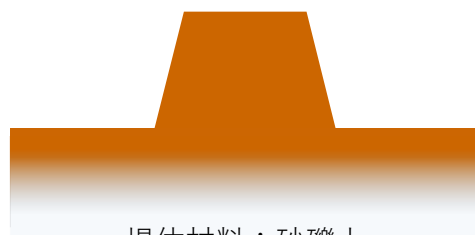
- ・土質の違いが越水破堤現象に与える影響を明らかにするために実験を実施した
- ・粘性土堤防の決壊過程（越水初期、拡幅開始後）を定性的に把握することができた
- ・侵食形態や破堤速度の違いを確認することができた

<検討会意見を踏まえた課題>

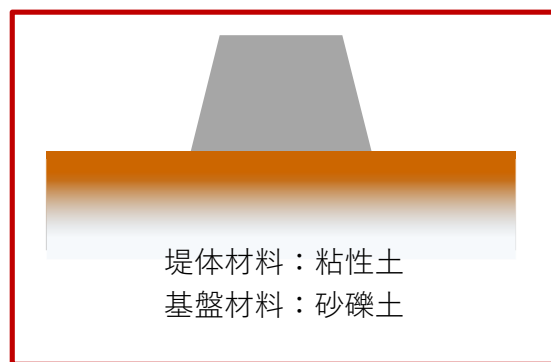
- ・縮尺条件下での築堤条件の統一や粘着力（赤土、ベントナイト）の調整が難しい
- ・模型実験では堤体や基盤の内部崩壊過程が十分に把握できないため、現地実験で着目すべきである
- ・土質の観点から追加で定量的な考察を行い、既往災害の傾向と合致しているか再確認する必要がある

- ・ R05縮尺模型実験より、用いた材料が異なる場合、特に越水から破堤口拡幅開始段階において現象に大きな相違が見られた。
- ・ 検討会では「縮尺模型と実物大規模で崩れ方が異なる可能性があり、堤体強度の相似則などの条件をそろえることが難しい」とご意見を頂いた。
- ・ 材料の相違に着目した実物大規模の実験を行うにあたり、縦断堤による越水破堤実験では進行過程が複雑になることから、R06は越水から破堤口拡幅開始段階までに着目し、横断堤での実験を実施する。
- ・ これまでの千代田現地実験では堤体材料を砂礫土で実施済みであること、また現地条件として基盤が砂礫土であることから、堤体材料を粘性土、基盤材料を砂礫土の条件とする。

R06千代田現地実験



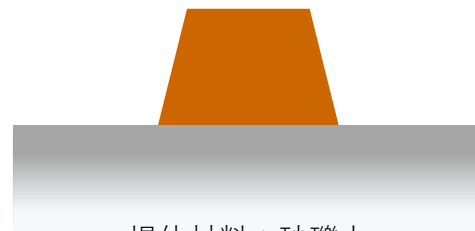
堤体材料：砂礫土
基盤材料：砂礫土



堤体材料：粘性土
基盤材料：砂礫土



堤体材料：粘性土
基盤材料：粘性土



堤体材料：砂礫土
基盤材料：粘性土

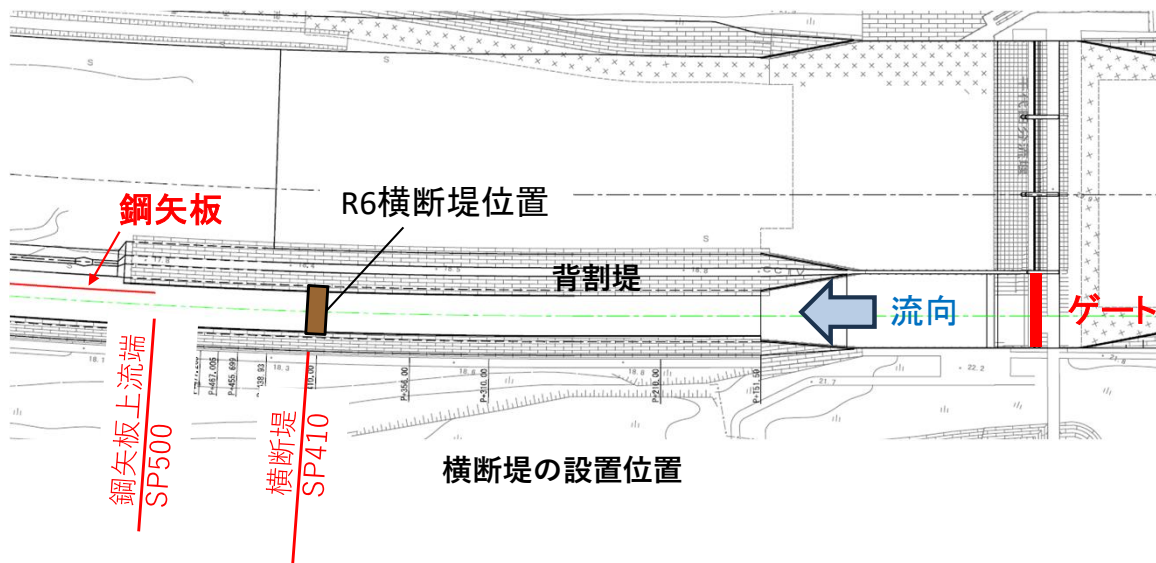


横断堤設置箇所のイメージ

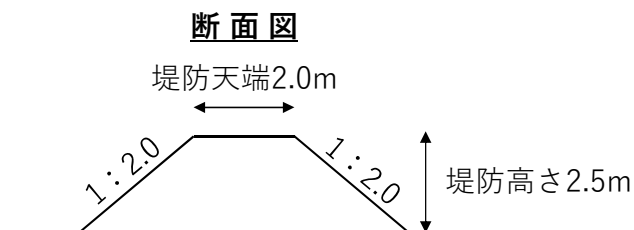
※H20には堤体材料：砂礫土、基盤材料：砂礫土の材料で横断堤の実験を実施している。R06千代田現地実験ではH20との比較も出来るよう横断堤で実験を実施する。

堤体の形状、設置位置、切欠き形状の設定

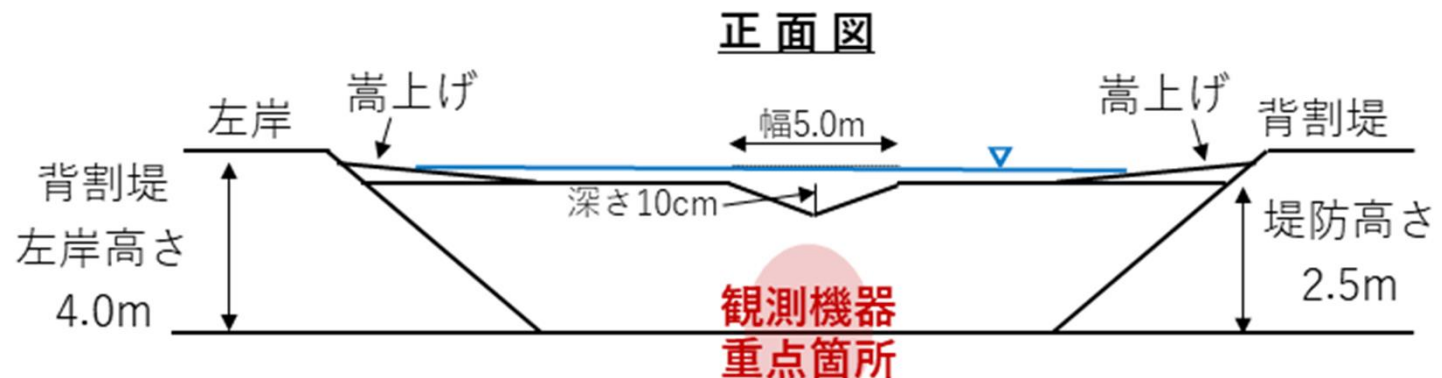
- ・ R06千代田現地実験での堤体形状は高さ2.5m、天端幅2.0m、法面勾配2割とする。
- ・ 横断堤設置位置は、過去の実験で設置した鋼矢板の設置範囲、および想定される落掘形状を考慮して、SP410に設置する。
- ・ 重点的に観測機器を配置している堤体中央から越水が始まるよう、幅5.0m、深さ10cmの切欠きを設置する。また端部からの越水を防ぐために端部を嵩上げする。



鋼矢板の設置状況



堤体形状



切欠き形状と端部の嵩上げ

堤体材料の設定

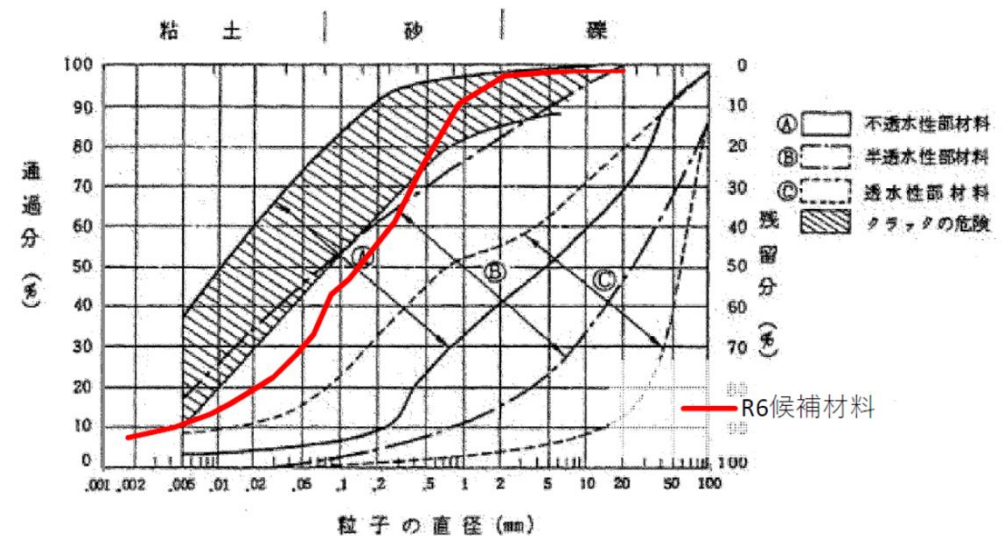
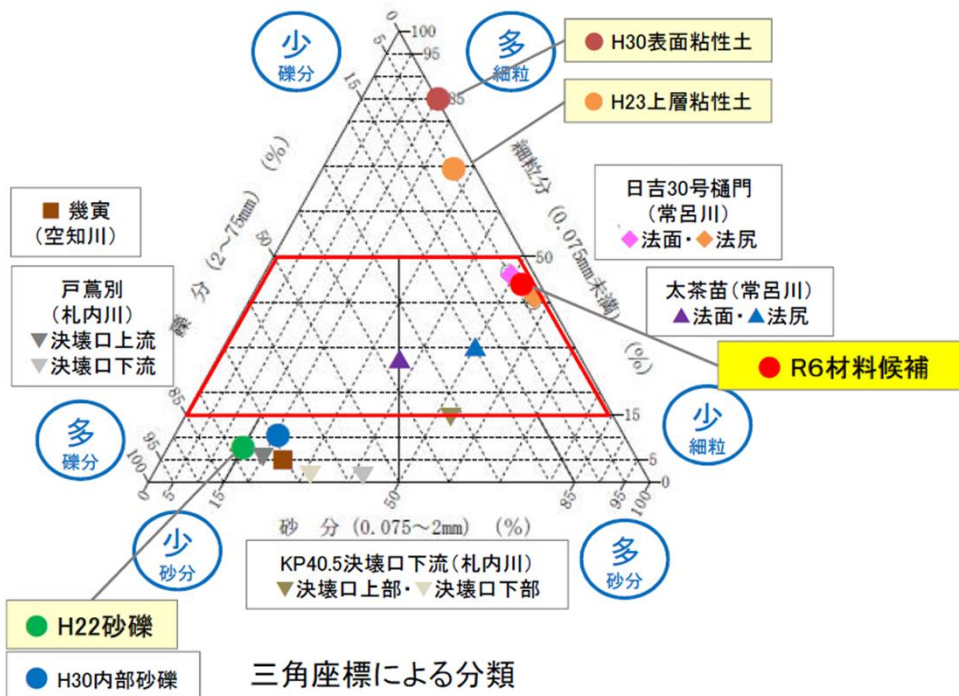
- 河川土工マニュアルで示されている堤体材料の適正範囲を参考に、千代田実験水路周辺で十分な土砂量が確保可能なものを今回の材料として選定した。

【粒度】

- 細粒分：44%、砂分54.6%、礫分1.4%
- 最大粒径19mm、50%粒径0.12mm、10%粒径0.0031mm

【コンシステンシー特性】

- 液性限界 w_L 76.52%、塑性限界 w_p 46.98%、塑性指数 I_p 29.54



令和6年度千代田現地実験での観測計画

- ・ R06千代田現地実験では、以下の項目の観測を実施する。

観測項目	観測機器	観測目的
水位	ダイバー式水位計（水圧式） 簡易電波式水位計 量水標	実験水路内の水位の変化を把握 横断堤上流の貯水量変化から氾濫流量を推定 越流水深の推定
破堤部水面 形状把握	デジタルカメラ 3D画像解析	破堤開口部周辺の面的水面形状の記録
流速	トレーサー PIV観測	破堤氾濫流況の面的把握
実験状況 モニタリング	ビデオカメラ（地上・高所作業車）	実験時および、実験前後の堤体形状などの変化や実験状況を把握
堤体侵食	加速度センサー 色砂	水面下不可視部分の堤体侵食過程の追跡
測量	形状測量（地上レーザー）	通水前後および通水中の堤体形状の把握 （上流・堤体・下流）
材料調査	材料分析（粒度、密度、 透水試験、液性限界、塑性限界）	堤体、河床材料の把握

事務局から令和5年度に実施した縮尺模型実験の実験結果や、令和6年度千代田現地実験の実験計画について説明し、その後委員により活発な意見交換が行われた。

（1）第24回実験検討会での議論を踏まえた今後の進め方

【議題と結果】

- ・概ね5年間のスケジュールとして、破堤事例の整理や土質に着目した実験を行いながら、数値解析による感度分析を行う。また氾濫時の被害軽減に資する研究も行っていく。

【主な意見】

- ・これまでの千代田実験水路を活用した越水破堤実験を踏まえて、まだ明らかに出来ないことを示した上で、今後、どのような検討を行なう必要があるのかを明確にする必要がある。例えばこれまでの実験では堤体材料が砂礫であることから掃流砂量式で評価できたが、粘性土だと数値解析では現象を表現することが出来ないため、材料に着目した実験が必要など。

(2) 千代田縮尺模型実験水路を活用した土質材料に着目した越水破堤実験結果

【議題と結果】

- ・粘性土の堤防による決壊過程を定性的に把握することができ、堤体と基盤の土質の組み合わせによる破堤口拡幅開始の時間や破堤口拡幅の進行速度の違いを確認できた。

【主な意見】

- ・氾濫流量に一定の上限があるが、拡幅口拡幅開始から上限までに達する時間は堤防の土質によらず同程度になるのではないかと考えられる。そうであれば拡幅開始までの時間をいかに延ばすことが出来るかが、堤防の粘り強さや減災という観点から重要。
- ・模型実験で氾濫流量が頭打ちになるのは実験水路での設定流量の制約によるものと考えられる。たとえば石狩川のような大河川の場合、氾濫流量に比べて本川の流量が多く、縦断水面勾配が緩勾配であることから、破堤口が拡幅しても高い水位が続くため氾濫流量が実験とは異なる可能性があることを念頭に置く必要がある。
- ・東日本台風後に決壊箇所と堤防土質の関係を整理した際、細粒分が多いほど決壊口幅が小さい傾向が確認されている。今回の縮尺模型実験と実災害で共通する部分と異なる部分があるので、千代田実験水路の実物大規模での実験が出来る特徴を活かして、どこに着目するかを明確にすることが望ましい。
- ・塑性指数IPを粘土分含有率で除した指標を用いると、越水から破堤口拡幅開始までの時間の長短と関連付けが可能となり、堤体の強度として評価できる。また粘着力を考えると粘性土の自立高さに対する堤防高の比率が堤防の壊れやすさに影響すると考えられるので、これらの視点も入れると整理できる可能性がある。

（3）令和6年度千代田現地実験の実験計画

【議題と結果】

- ・土質の違いによる越水から破堤口拡幅までの一連の現象を理解するため縮尺模型実験を実施したが、内部崩壊履歴の追跡など現象に不明な点も多い。このため令和6年度千代田現地実験では越水による堤体侵食から破堤口の拡幅初期段階の現象を理解するため、堤体材料を粘性土、基盤材料を砂礫土とした横断堤での実験を実施する。

【主な意見】

- ・選定した堤体材料は細粒分を含む粘性土であるが、現地で施工する際に細粒分がダマ状に固まった状態だと、実験中に礫のような動きをして、細粒分が塊となって多く流出する可能性があるため、ダマができないように施工時に留意が必要である。
- ・千代田現地実験を年に複数回実施することは難しいので、1回の実験で定量的に行えるような準備が必要になる。
- ・堤体の安定性を測る指標として、土壌水分計等を設置して堤体がどのくらい水を含んだかを観測することも良い。国総研の実験で様々な計測機器を使用していると聞いているので、それらを含め計測機器の設置案を検討いただきたい。