

『治水対策を考える上での「破堤」の意味とそれに応じた研究』

辻本 哲郎
名古屋大学大学院
工学研究科
社会基盤工学専攻 教授



名古屋大学の辻本です。

堤防委員会では堤防の設計ということが多分中心なのでしょうが、我々河川とか水工学の人間からすると、やはり治水計画とかとどんなふうに絡めて考えるのかということがむしろ大きな関心事です。いつかここでもお話ししたときに、土質とか地盤の人と水工学の人が一緒にやっていかなければいけないとき、お互いの境界点をクリアにして、どこかで受け渡すのか、あるいは、ある程度お互いのことを知ってオーバーラップしながら研究していくのかというようなことが問題になったことがありました。かつて私は境界条件を明確にしてお互い専門のところをしっかりとやるのがいいのかなと思っていたのですが、この研究会に出させてもらって、かなりオーバーラップしなければいけないところがあるのかなという気がしてきました。宇野先生とお話している中でも、治水計画自身に問題があって堤防の問題がなかなかスムーズにいけないところも多々あるのではないかとこのことを感じています。

今日は、私の知っている範囲で、治水計画と絡めて堤防をどう考えるかということをお話しさせていただきたいと思います。

それからもう一つ、話のタイトルに破堤と書きましたが、いろいろな破堤があります。たとえば、新川破堤というのが2000年の東海豪雨のときにありました。それか



ら、2004年に豪雨が頻発したときには、五十嵐川、刈谷田川という信濃川の支川で破堤しました。そういうところをイメージした議論になっています。それぞれがどこが違うかというのも話の中でわかっていただければありがたいと思います。

治水計画と河川堤防の話をするとき、河川堤防の位置づけが重要です。また、治水対策が進捗中であるということ、治水計画どおりに河川堤防ができ上がっていて流域の安全性との関連があるのかということ、いや、治水対策というのは非常に時間をかけて進んでいて、なおかつ実は計画とは違って、破堤の危険性というのはいっぱい残っているというふうな話の中で、破堤過程の研究というものが重要になっているのではないかという気がしています。

内容:
1. 治水計画と河川堤防 水系治水における河川堤防の位置づけ 堤防設計の背景 河川整備基本方針と河川整備計画
2. 治水対策の進捗となお残る破堤の危険性 治水対策の進捗レベルと破堤 残る破堤の危険性をどう考えるのか
3. 破堤過程の研究 破堤をどう考えてきたか？ 防止するための研究から、過程を知って備えるための研究 アプローチの制約 実験と数値解析 河川・堤防・氾濫原を一体的に扱うこと

今日のまとめはそういう破堤過程の研究で、これまでは破堤をしないように、破堤というのはあってはならないものという形で、破堤しない堤防を一生懸命考えていたんだけど、今や破堤は計画の中で、私の言葉で言うと織り込み済みの話であるということですので、破堤というもののプロセスをちゃんと知って備えておく研究というのは非常に重要になっているんだということを話します。

また、破堤の話は、実験の面からいうと、非常に大きな実験をやらないとわからない、あるいは、現地で1つ1つ条件が違うんだというふうなことから1つ1つの破堤事例についての研究は進むけれども、一般的な解釈ができない。また、コントロールした実験をしようと思っても非常に大きな実験をしなければだめだという思い込みがありました。数値解析のほうも、破堤現象というのは非常に複雑で、局所流を正確にあらわさないと、あるいは攪乱した流れが正確に解けないと数値解析はできないのだということで、非常に局所流に限定してきたというふうなことがあって、一般化のためのアプローチという面では制約があったという気がしています。

それ以上に最近問題になっているのは、堤防が破堤すると川の水がそこから出ていくんだということで、川の中でもいろんなことが起こっているという事。例えば、出ていった水と土砂は氾濫原の中であるときには拡散するし、あるときには土砂を堆積させるし、あるときには落堀をつくるように、氾濫原の中でも洗掘、侵食現象が起こるというふうに、

やっぱり一体化して非常に大きなスケールで、大きなスケールの実験をしなければいけないということになります。なおかつ広い範囲を同時に扱わないとわからないということでもあります。確かに最近では氾濫原の中で氾濫シミュレーションなどが盛んに行われるようになってきたけれども、そのときに破堤口をどんなふうにか考えるのかということは切り離して考えていました。しかし実は、河川、堤防、氾濫原を一体的に扱うことというふうなイメージというものが非常に重要じゃないかということを今日はお話ししたいと思います。

さらに、今までアプローチの制約となっていた大きな実験はできない、局所流に着目したそこでの流れの局所性を、あるいは攪乱性に着目した研究ではなかなかこういう広い場所は使えないというふうな問題はどのようにするのかということがあります。その辺に対して1つの提案をしたいということで今日のお話をまとめてみました。

治水計画というのは、土質の先生方があまりご存じない場合もあるかと思うので、治水計画について簡単にさっと説明します。ただ単に輪中堤である地域を守るとかいうんじゃないくて、河川に沿って水系的に治水をするというのが今日の日本の治水のやり方で、そのためには連続堤防をつくる、あるいは上流側である程度洪水調節しないと堤防ではなかなか守れないというこの2つの方法で、下流側の重要なところを守っていくというのが水系治水の思想です。

1. 治水計画

水系治水
 連続堤防+洪水調節(ピークカット)
 by洪水調節施設(ダム、遊水地)

計画の洪水流量:
 計画レベルにあった降雨流出

基本高水(ハイドログラフ) 基本高水ピーク流量
 ピークカット

計画高水流量(計画高水位以下で安全に流す) 連続堤防
 HWL

河川堤防の設計
 計画高水位(HWL)以下で安全に流す。

そして、計画の洪水流量、計画の流量は計画レベルに合わせて決められます。この計画レベルはよく確率年、あるいはリターンピリオドで与えられるものですが、それに対応した雨が降ったときのハイドログラフ、すなわちどんなふうに流量が時間的に変化するのかというものを求めたものが基本高水です。この基本高水のピーク流量を対象として議論されます。実際、堤防の話をするとき、ハイドログラフと言われるように、継続時間なんかもほんとうは問題になるのですが、ダムとの関連でどんなふうにダムと河道で分担を割り振りするのかということを議論するときには、やはりピーク流量だけが大きな問題になっています。ピークカットするのは洪水調節施設で、ダムとか遊水池です。調節後に川に流れてくるのが計画高水流量で、堤防が持っている計画高水位あるいは危険水位以下で安全に

流す、こういう連続堤防をつくっていくというふうな考え方が前提になっています。

計画高水位がHWLで、堤防の設計というのは、計画高水位以下で流れているときに堤防が安全なんですかということを一生涯懸命やってきた。ここまでの条件ができ上がっているかどうかというのは、治水計画とか、あるいは治水事業の進捗とかいうふうなもの分担で、今までは切り分けて議論してきた。堤防を設計します、この川にはHWLより上には水は流れません、こういうふうな条件で堤防の中を洪水が安全に流れるように設計するのが河川堤防の設計だった。それは堤防の設計という意味ではそのとおりなんだろうけれども、治水計画としてほんとうにこういう話だけで堤防の議論ができるのかというのが今日の私の話の動機です。

今言ったように、HWL以下で安全に流すというときのHWLというのは、計画高水流量の計算水位に、その他、湾曲で上昇するとかいろいろな原因で上昇するものも含めてHWL以下におさめるということをやらず、その上に実はさらに必要な余裕高を積んでいて、越流を許容しない条件ということで堤防高を決めている。すなわちHWLより以下でしか水は流れないし、その上になおかつ余裕高が積まれた堤防、こういうものがほんとうに安全ですかというのが堤防設計の課題だったのです。

堤防の設計と治水計画をきっちりそこにおいて境界を設定して分けましょうと前にも言いました。土質の先生にはそこをしっかりとってもらって、計画高水位以下におさめることは河川工学の人がやるというふうな話です。しかし、実際にはそうはなかなかうまくいかない。例えば、水位がHWL以下におさまったとしても、危惧される他の破堤要因に対応して、すなわち堤防の表のり侵食とか表側の堤脚の洗掘、そういうものは河川工学の問題になるし、浸潤して裏のりすべりとかパイピングによる進行破壊というふうな話が土質とか地盤の人たちにはお願いしているところでした。そして、ある程度形状で規定して、その上で照査して必要な対策もやり、何とかHWL以下の水位条件では破堤しない設計をする、もうこれですべて堤防の設計は完了です。それでも非常に難しい問題が残っているという認識が昔持っていた堤防設計の意味です。

HWL以下の水位では破堤しない設計というんだけど、河川管理している人間はそ

河川堤防の設計

計画高水位(HWL)以下で安全に流す。

計画高水流量の「計算水位」+その他の水位上昇量を、
HWL以下に収める (一次元水理解析)

さらに必要な「余裕高」 越流を許容しない

水位がHWL以下におさまったとしても
危惧される他の破堤要因に対応。

堤防の表法侵食・表法堤脚洗掘
浸潤 裏法すべり破壊、パイピングによる進行破壊

形状規定、照査、対策工

HWL以下の水位条件では「破堤しない」設計。

の条件を満足していて破堤することはないと考えているのでしょうか。河川管理者は意外とノーと言うんです。HWL以下におさめていても切れることはあると言いかねません。それは本当はおかしい話ですね。形状規定を満足して、なおかつ照査して対策をとっているはずでしょうと、一般人とか、我々も含めてそう言いたいはずなだけけれども、いや、実際にはあり得ないわけではないのです。HWL以下で破堤するアクシデントというのは考えなくていいのかということも我々にとって、我々というのは河川管理の学を預かる河川工学からすると非常に気がかりなところです。

HWL以下の水位条件では「破堤しない」設計。
 ※その条件を満足して破堤することはないのか？
 ※HWL以下で破堤する状況 (accident) は考えないのか？

↑
必要な堤防断面の確保 (堤防整備・築堤)
 ↓↓
HWL+余裕高+堤防断面 (形状)+必要な対策工 (←照査)

↑
洪水を計画高水位 (HWL) に収めることが前提
 (氾濫) 危険水位

堤防の課題: 天端-余裕高-スライドダウン → 危険水位
 (断面不足など)

洪水を危険水位に収めることが前提

パワーポイントに書きましたけれども、そのHWL以下に対しては、HWLに余裕高を足して、なおかつ堤防の断面をしっかりとつけて照査して、必要な対策工、場合によっては腹づけしたり護岸をつけたり、場合によっては水制工で水はねしたり、何とかしながら、HWL以下では堤防は安全なようにすることが前提条件のはずです。ここまでの堤防設計の役割です。

HWLとは言っているだけけれども、堤防が必ずしもでき上がっていないときには、天端から余裕高を逆に引いて、さらに断面不足などを割引いて危険水位というものを仮想して、そこまでの堤防しかできていないんだというふうなイメージをすることもよくあります。HWLや危険水位以外にも、河川管理の面では氾濫危険水位というふうな考え方もあり、これらも併せてパワーポイントにはちょっとメモしておきました。

その次は計画の話です。どうしてそう思っているとおりでできていないのかということ、河川には河川整備の基本方針と言われる長期ビジョンがまずあります。これは、リターンピリオドで計画規模を規定して、1級水系では100年から200年のリターンピリオドをとっていて、なおかつ全国共通のある程度の基準を持っています。河川のサイズとか氾濫原のサイズ、人間活動、すなわち人口とか工業出荷額とかに合わせて、あるいは首都であるとか県庁所在地であるとかに合わせて、ある意味ではトップダウンで

河川整備基本計画 (長期ビジョン)

再帰年で計画規模を規定 一級水系直轄区間で100年~200年
 Return period
 河川のサイズ, 氾濫原のサイズ, 人間活動 (人口, 出荷高, ...)

基本高水 (ハイドログラフ)

計画対象降雨ハイトグラフ

確率 (1/再帰年) に応じた一洪水流域平均累積雨量に「引き伸ばし」たもの

基本高水ピーク流量 再帰年に応じたピーク流量
 ピークカット 洪水調節施設・運用の可能性
 計画高水流量 河川 (川幅・河積, 堤防高) の制限

決めています。この基本高水は、次のパワーポイントのようにして決められています。パワーポイントでは、計画対象降雨ハイトグラフと難しいことを書いています。ハイトグラフとは降雨量の時間的変化です。ここにも書いてあるように、確率に応じたこれまでの流域平均の累積雨量を引き伸ばして想定します。すなわち、今まで経験したものは、計画どおりの雨の量は降っていないですから、流域平均として累積降雨を計画規模の大きさに引き伸ばした幾つかのハイトグラフのサンプルをつくる、つまり、雨のパターンをこれまで経験したものに合わせて、総量としては100分の1とか200分の1の雨をつかって、それに対してどんな流量が出るかを見たものが基本高水です。同じような100年に1度の雨が降っても、さまざまなハイトグラフがあるからさまざまな基本高水のハイドログラフが出現するのですが、基本高水のピーク流量が一番大きくなるようなものを基本高水ピーク流量と呼んでいます。

さて、そのピークカットはダム等でやるわけですが、ダムの配置によっては、いくつかの計画対象降雨のどれにきくかはさまざまです。幾つかのハイトグラフパターンでつくった対象降雨の中からピークカットして基本方針の計画高水流量を決めている。ダムでカットした残りの分、これだけが川に流れてくるわけです。ダムでカットした後ではこれだけが川に流れてくるからあとは堤防をしっかりつくってくださいねとするわけです。ところが河川のほうも、川幅にしたって、周辺がもう発達しているし、既にでき上がっている人間活動の中で、川幅、河積とか堤防高も制限のある中で、適当なバランスの中で計画高水流量が先に決まる場合もあるでしょう。基本高水のうち、計画高水流量のほうが先に決まるかもしれない。その辺の兼ね合いの中で計画高水流量とダムのカット流量を決めておいて、さてこの計画高水流量に対して、これをHWL以下でうまく流しましょうということになります。

基本方針は時間無制限勝負だったので、河川整備計画は、20年、30年で達成するという計画にしていますので、予算規模からできることが決まっている。ここでもやはり基本高水と基本高水ピーク流量を考えているのですが、20年、30年の計画を、しかも流域での意見も聞きながら決めようとする、ある程度戦後最大とか、規模もそんなに大きいものでなくて、50年

河川整備計画(20~30年で達成 予算規模ほか)
基本高水(ハイドロ)・基本高水ピーク流量
対象洪水(戦後最大など) □「規模」(再帰年)の確認
 (一級水系直轄区間で50~100年程度)
計画対象降雨(様々なハイト)の同規模補正
河川整備に制約 □(河道断面拡大の困難さ)の検討
ダムの配置・効果 □計画対象降雨(複数)の検討
洪水調節量と計画高水流量(河道分担流量)を決定
計画高水位以下で河道に流す
計画高水流量 ピークカットを確実に □洪水調節施設
計画高水流量通過時の水位をHWL以下に
河積確保, 抵抗調整 □河道整備
計画高水位以下の状況で安全に疎通 □堤防整備
 (設計・施工, 維持管理, 照査, 対策工)

から100年程度、こういったところで基本高水の規模を決めています。本来ならば戦後最大など対象洪水が決まってからでも、ある程度規模を確認して幾つかの計画対象降雨を確認しなければいけないと思うのですが、『激特』と同じように、ある意味では特定の対象洪水に対して安全なような計画をつくっている川もないわけではありません。だから、整備計画の立て方は少し流量に対する柔軟性を欠いている可能性があります。

すなわち、例えば東海豪雨を対象にすれば、東海豪雨規模の雨が降りますよ、それに対して安全な整備計画をつくりますよといっても、同じ規模の雨でも降り方が違えば川に対する影響が違うので、本来なら整備計画は東海豪雨規模のリターンピリオドを持つさまざまな雨に対して安全なような整備計画を立てましょうというのが標準的な形になるはずですが、地域によっては、対象とする洪水そのものに対して安全になるように20年、30年で何をやっていいかという議論をして整備計画を立てているところもあるということです。

一方、『激特』と言われるように実際におこった大きな災害に対するハードな手当があります。例えば、東海豪雨規模に対して安全性を確保する『激特』がありました。だから、庄内川とか新川について言えば、『激特』の5年間でやったのは東海豪雨の雨に対しての安全確保でした。その後、庄内川では東海豪雨規模のリターンピリオドを持つさまざまな雨の降り方に対しても安全になるような整備計画というものをつくりました。すなわち雨に対するフレキシビリティも高めたし、ほかのところでさまざまな工事がされること、すなわち上流での治水計画が進むことも込み込みで全体の川の安全度が上がるような整備計画をつくりました。ところが、そういうことがなかなか難しく、大きな災害を受けたところは、『激特』と同じイメージで、その雨に対してだけ、その雨の降り方に対してだけ安全になるように20年、30年で治水を達成してしまおうというふうなやり方もないわけではありません。

河川整備計画でも基本方針と同じようにダムとか遊水池でどれだけ洪水調節して、河道にどれだけの水を流すかということを決めます。河川整備計画レベルの洪水に対して計画高水位以下で何とか川に流そうと計画します。だから、整備計画のレベル以上の水が来れば当然計画高水位を上回ってしまって川は非常に危なくなる、堤防は非常に危なくなるということです。

そうすると、堤防側からすると、まず計画高水流量で仮に議論するにしても、ピークカットを確実にしてくれよというふうなことを言いたくなります。堤防を設計する者にとっ

ては。

1/100で守ると言っているのに、上流にダムができていないためにそれ以上の流量が流れてくることはしばしばおこる訳です。洪水調節施設ができていないかによって、河川堤防の設計というのは非常に不安定なところで設計しないとイケない。それから、計画高水流量通過時の水位をHWL以下にするという条件もあります。実は河積が足りないとか、河道が掘っていないとか、川の中にいっぱい木が生えているとか、そういうことで、つまり河道整備が十分でないために計画高水流量よりも小さい流量でHWLより上になることすらしばしばあり得ます。そんなことまで堤防設計に文句を言われたらたまらないという話になります。

計画高水位以下の状況で安全に疎通することを目標に堤防を設計・施工し、維持管理し、照査したり、それに応じて対策をとってくるというのが本来の堤防の話だったんですが、治水整備、時間軸ということ考えると、ほんとうの意味での役割が分担できないんじゃないかというのが今日のお話のモチベーションでもあるわけです。

それで、2番目は、そういう中で治水対策がなかなか進捗していないために破堤の危険

性は残っているということです。これまでほとんどふうに治水は進められてきたかという、工事实施基本計画というのが新河川法改正より前の進め方です。これも、一応5カ年計画とか、ある程度段階的にやってきたけれども、ある程度時間制限なしで工事实施基本計画、現在でいう基本方針レベルを目指して着々と、着々とというか、

長らくやってきた。一方、ある実際に起こったパターンの雨に対しては災害復旧をやっているんで、あちらこちらの安全度は上がっているというのが現在の治水の状況です。このような状況で実際には、基本方針の達成レベルより整備計画の達成レベルは圧倒的に小さいし、現時点の整備レベルはもっと小さいということで、さまざまなタイプで災害が起こることがわかります。

各地点で洪水がHWLあるいは危険水位を超える頻度は整備計画の水準よりも当然高いし、基本方針の達成レベルからはもっと高いというふうなことになっています。その中身はどういうことかということ、堤防断面が完成していない。これは整備が進んでいないのと

2. 治水対策の進捗となお残る破堤の危険性

これまでの治水対策 工事实施基本計画(基本方針レベル)の進捗, 災害復旧

現時点での整備レベル < 整備計画の達成レベル < 基本方針の達成レベル

河道の各地点で、洪水位がHWL・危険水位を超える頻度は計画水準より高い

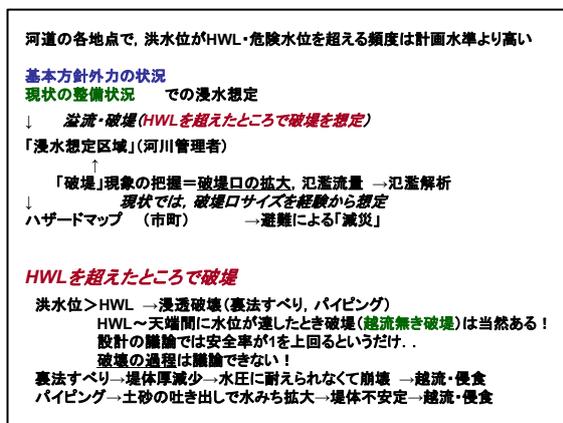
↑

堤防断面が完成していない	← 堤防整備, 維持管理
河積が不十分	← 河道整備, 維持管理
ピークカットされていない	← 洪水調整施設, 積み上げ
計画進捗していない	← 整備計画メニュー, 基本方針メニュー
超過洪水	<input type="checkbox"/> Possible

さらに ← 地球温暖化・気候変動による
豪雨確率母集団の変化

維持管理ができていないために、あるいは、河積が不足していて、小さい流量でもHWLを超えるということ。河道整備がおくれている、維持管理ができていない、木がいっぱい生えている。あるいはピークカットがされていない。上流のほうで洪水調節施設が未整備だ。全体として計画が進捗していない。それから、超過洪水。もともと計画というのは確率論的にやってきたもので、超過洪水はあり得るもので、さらに地球温暖化とか気候変動によって豪雨の確率母集団が変化しているので、何分の1と言われているようなものが変化していることもあります。

基本方針外力が来たときに、現状の整備状況で、すなわち川の整備状況は現在の姿で、もし将来ここまでやると言っているような雨の状況でどんなことが起きるかということ、すなわち浸水想定を最近やるようになっていきます。つまり、破堤箇所を設定し、破堤したことにして、河川管理者が浸水想定区域図を作成しています。ここまで、ある意味じゃ破堤ありきの議論は進んできました。防災計画上は破堤ありきなんだと。河川管理者がこういうことをもうやっています。



ただし、破堤現象を把握していないために、破堤口の拡大とか氾濫流量の変化とかいうものは経験から仮定せざるを得ないという状況です。どんなふうに破堤していったら流量が集中して氾濫が進むのか、あるいは水だけでなく土砂が出てきて農地災害を引き起こしたり家の中に土砂が入ったりするというような災害のパターンになるのかということの方があまり見えていない。しかし、破堤口の拡大とかいうものをある程度想定しながら氾濫、浸水想定区域図を出すことは河川管理者がやり、それをもとに市町村がハザードマップを作成し、避難による減災などを行っている現状です。

そうであれば、河川管理者は、河川と堤防と氾濫原を管理している者として、もう少し破堤のことをしっかり情報提供する必要があるんじゃないでしょうか。



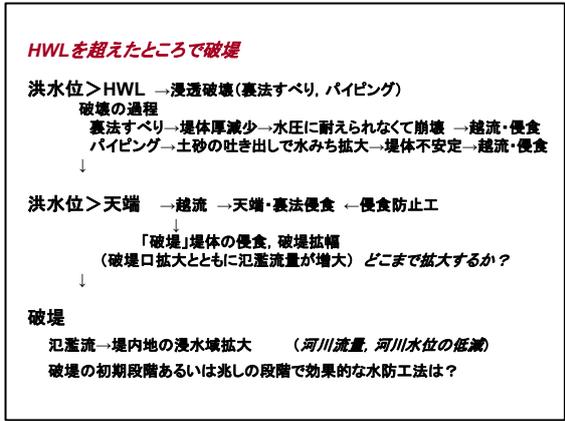
さて、HWLを超えたところでほんとうに破堤するんでしょうかというふうな話がそこ

にあります。まず、洪水位がHWLを超したら浸透破壊するはずですが、HWL以下だとそうしない、そうさせないというふうに取り組んできましたから、洪水位がHWLを超すと浸透破壊が出てくるはずですが、もちろん侵食、洗掘破壊も当然、いわゆる越流なき破堤ということです。

HWLから天端間でも、いわゆる越流なき破堤という形で破堤はあるという覚悟です。河川管理者は、HWLを超すと、堤防を保証していないわけです。越流していなくて、いわゆる越流なき破堤というのは何か特別みたいに言われているんだけど、HWLさえ超せば、天端に水が達していなくても破堤は当然ある。これは覚悟しているはずですが。

設計の議論では安全率が指標です。HWLを超して天端までの間に水位が達しているときには安全率がどうも小さくなっていそう。もちろん1を割り込まない場合もありますが、少なくともHWL以下では割り込まないようにしているわけです。しかし、そういうことだけでは破堤のプロセスの議論はできないと思います。例えば裏のりがすべったときにどれぐらい堤体厚が減少して、水圧に耐えられなくて崩壊していくのか、その後は越流により侵食して堤防の破堤口がどんどん拡大していく、拡大するということはどんどん氾濫流が増えたり、氾濫土砂が増えていくということです。そういうプロセスがなかなか見えない。越流してしまえば後は1つのパターンなのです。パイピングの場合も同じです。パイピングで水が抜けているのはともかくとして、土砂まで吐き出されて水みちが拡大して堤体が不安定だというんだけど、どんなふうにつぶれるんだらう、どれぐらいつぶれたら今度は越流が始まって土砂が洗い流されて破堤口が大きくなっていくんだらうというふうな話につなげていけるんだらうかというふうなことをパワーポイントに書いております。難しいこと書いてるだけで、できていないというのが非常に申しわけないところです。まあ、一つのモチベーションを持つことが重要です。

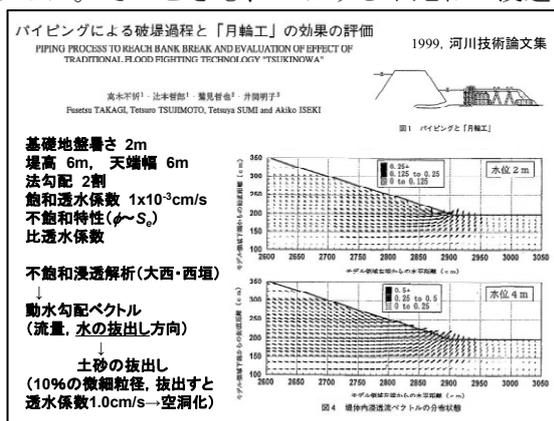
HWLを超えたときの破堤というのは、洪水位がHWLを超えてこういう問題が起こるというふうに、スライドの真ん中ぐらいから書いています。洪水位が天端を超したら越流で、天端とか裏のりが侵食されて、幾ら侵食防止工をやっていたとしても、堤体が侵食して破堤口がだんだん切れ込んでいって、切れ込むとその後だんだん拡大していって氾濫流量が大きくなる。氾濫流量が



大きくなるから現象が進行的であって、破堤口から同じ流量がずっと流れてくるとだんだん現象はおさまってくる傾向となるのですが、幅が拡大し、どんどん流量がそこへ集中してきて、さらにどんどん拡大していくということが破堤という現象が起こる理由だと我々は考えています。

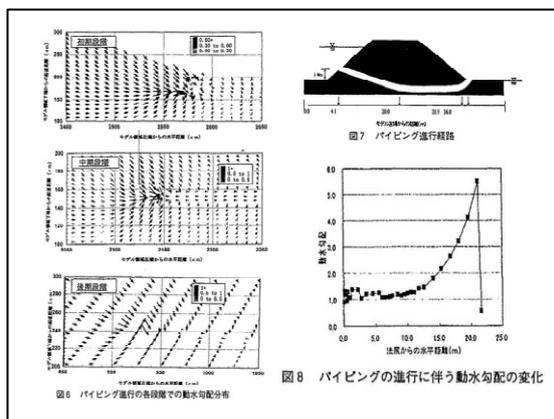
破堤というのは、氾濫流が堤内地の浸水域を拡大するということで、破堤の初期段階とか兆しの段階で効果的な水防工法というふうな意味での研究も必要だなという気がします。

例えば、だいぶ前にこんなことをやってみました。そのときも、いわゆる不飽和の浸透解析はプログラムを使えばできるんですけども、ある程度流量が大きくなると土砂が抜け出す。この研究では、土砂は10%の微細粒径を含んでいて、これが抜け出すことによって透水係数がだんだん大きくなってきて、当初、10のマイナス3乗ぐらいあった堤防が10%の微細粒が抜けてしまうと透水係数が変わってしまうということを、段階段階で、いわゆる透水係数の変わったところをフォローしながら、追いかけて、いつごろになったらかなりの流量が出るような、いわゆる破堤に近い状況になるだろうかということを追跡するような計算を昔やっていたことがあります。なかなか試みだけで、ほんとうに合理性のある研究かと言われたら、ちょっとまだまだおかしいところがあるかもしれません。



次に、パイピングと月の輪と書きましたけれども、今度は下流端のところである程度水位をせき上げておくとどんなふうに進み方が変わるのか、水防工法で言う『月の輪』でどれぐらい破堤に至る時間をかせげるのかというようなことの議論もできそうだなという話は当時感じました。スライドの図では穴のあいたところでの透水係数が上がり、動水勾配はあつという間に上昇してしまう。このようなところで破堤だと判断するのもあり得るのかなと考えたわけです。そして、こういった応用問題もあり得たんだなというように当時感じました。

それからこども、動機のところのまとめ



です。破堤・氾濫状況は治水計画に織り込み済みのはずではないのでしょうか。治水計画は堤防が壊れない計画というんじゃないかと、堤防が壊れることがちゃんと織り込まれていないと計画だと言えないのじゃないか。それにもかかわらず破堤についての情報が不十分で、知識は蓄積されていないし、情報も伝達されていないということが破堤の研究をやってみようと思った動機です。

破堤の危険性

「計画」の安全度まで事業が進んでいない **河川管理者の役割**

「計画」と「現状」のギャップ
 現実に対応しなければならない避難

「基本方針」と「整備計画」のギャップ 計画上想定される避難
 (地球温暖化・気候変動による計画水準の目減り)

氾濫想定シミュレーション 仮想破堤箇所・想定破堤口形状
 (個別の破堤箇所ごとの氾濫伝播過程は計算されている)

最大氾濫水深の重ね合せ＝「浸水想定区域図」

ハザードマップHM作成・配布 **市町の役割**

避難勧告発令者 河川情報 気象情報
 市民

河川の危険水位超過の危険性
 どこで危険水位超過か？ 河川管理者

避難勧告発令(浸水想定区域を含む行政区域に発令) HM
破堤想定箇所別の浸水想定

住民の避難行動
 個々の生活場、被害拡大時の避難経路など危険性判断 HM

各時点での破堤危険箇所
 浸水の伝播時間情報

破堤・氾濫状況は「治水計画」に織り込み済みのはずでは？
 それにもかかわらず、
 「破堤」についての情報が不十分(知識の蓄積、情報伝達)

破堤の研究は、まず機構の類推、これは、破堤の機構を類推しないと破堤を防止する設計法とか照査もやれなかった。越流破堤機構とか浸透によるすべりの機構とか。破堤が始まる段階での機構としては、メカニズムとして研究されてきたんだけど、この機構のもとにプロセスをきちっと記述しないと避難とか水防とか応急復旧の話にまで進まないんじゃないかという主張です。

3. 破堤過程の研究

破堤:
機構の類推 破堤を防止する設計法、照査によって破堤を免れる対応

機構をもとに破堤の過程を記述することが重要
 破堤したときの対応(避難行動、水防活動、応急復旧)

破堤現象へのアプローチ:

- ・出来るだけ大きな実験 正面越流による大型実験
 (耐侵食性、破堤過程、破堤形状など)
- ・複雑な流れを計算する数値解析 局所計算領域
 (破堤口近傍の複雑な局所流の理解)

アプローチとしては、当然破堤の研究をするのならできるだけ大きな実験をしましょう、土研では正面越流によって大型実験をやっていました。すなわち川の流れがなくて、たまっている水が堤防に直角に流れるような実験を大型化して、一生懸命耐侵食性とか破堤形状とかを研究してきました。でも、実際には川には流れがあって、三次元的な現象であるため、大型実験は土研たりともなかなかできない。一方、複雑な流れを計算する数値解析は研究者が一生懸命やったんだけど、それは破堤口近傍の複雑な局所流の理解につながるだけで、そこから先、なかなか進展ができなかった。

こうしたアプローチで不十分になる破堤の本質的特徴というのは、まず河川域が変わること。河川流の影響を破堤は受けます。正面越流とは異なって、破堤口の拡大が河川流に

よって非対称になります。拡大過程は、鉛直方向の侵食と、それがある程度進むと今度は川の方向、堤防の縦断方向への拡幅が生じていくプロセスに移行する。こうしたプロセスをしっかりとらえなければいけないのですが、やれていなかったところです。

それから、河道の平面形状の中で、内岸とか外岸とかというのは当然川の中の流れを変えています。蛇行していたり水衝部であったりというふうなことも違うでしょう。

それから、流れの境界条件ということもあまり意識していませんでした。川の下流部であれば、海が近ければ逆流してでもどれだけでも氾濫の水は供給されますけれども、中流部であれば、破堤してしまうと今度は川に水が流れなくなって、流量がなくなることによって破堤は終息します。このように境界条件も非常に重要な問題で、これも一緒に解かなければいけない。

それから、川の中には流砂があります。川の形がそれによって決まっています。破堤というのは水が出るときに土砂も出ていくわけですから、上流からどんどん運ばれてきた土砂が下流に伝わらずに氾濫原へ出てしまう。こうなると、河道の中で河床低下が起こります。後からも少し言いますが、例えば上流で河床低下が起こると上流のほうへ破堤

口が拡大していく可能性があるし、下流側に河床低下が進む場合、すなわち流れているはずの土砂が全部氾濫原に出てしまうと下流には今度は土砂は供給されませんから、ダムの下流と同じように河床低下します。何故上流側が河床低下するのかというと、土砂がどんどん氾濫原に出ますと、特に上流側の河床が非常に高いときには、下流側へ伝わるよりも先に氾濫原へ出てしまうので、上流側の砂は全部氾濫原に出てしまっていて、一方、下流側の河床はそのまま保たれるというような現象が起こります。

というふうに土砂の問題もさらに検討しなければいけないことだし、河川域の状況以外に、氾濫原での状況も詳細に知らないといけない。氾濫原が浸水しているかどうかによっ

破堤現象へのアプローチ
 出来るだけ大きな実験
 複雑な流れを計算する数値解析 局所計算領域

こうしたアプローチで不十分になる破堤の本質的特徴

河川域の状況

- ・河川流の影響 □正面越流とは異なる
 □破堤口の拡大過程(下刻・拡幅)への影響
 河川流による現象の非対称化
- ・河道条件:
 平面形状: 湾曲部(外岸・内岸)、蛇行・水衝部、流砂・河床変化の影響
- ・水理境界条件 下流端(ハイドロ変化に伴う水位決定条件)
- ・河道流砂、河道動態
 河道動態の影響(砂州など)

破堤による横流出 □氾濫原堆積
 □河道の縦断方向非平衡 □河床変化 □氾濫流の変化
 河床・氾濫原比高 □新たな堤防不安定(破堤拡大要因)



て破堤口というのは違うし、氾濫原がどんな地味条件か、あるいは植生状態か、樹林があるかということによって破堤の状況も変わってくるというふうなことです。

それから、落堀がよく気にされますけれども、特に低平地で落堀ができるようなときには、落堀ができることが実は破堤を助長している。舗装などで落堀ができないようにしてやれば破堤の進行は小さくなるとか、中流以上のところではなかなか落堀はできないとか、あるいは、実は氾濫原へ築堤材料だけでなく河道流砂も出て行って氾濫原での農地災害が拡大しているというようなこともある程度解析的手段も用いて定量的に知らなければいけないと思っています。

つまり、こんな状況を全部扱いたいねということになります。そうするとどんなことかといったら、これだけのものを全部おさめるということは、かなり小さなスケールの実験をしなければいけない。小さな縮尺で実験しなければいけないということです。

堤体への着目したアプローチで不十分になる破堤の本質的特徴

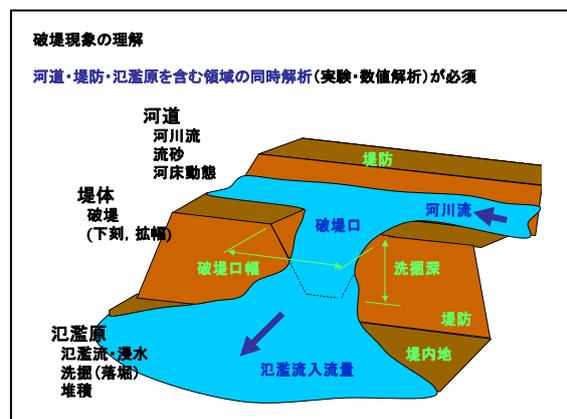
河川域の状況

- 河川流の影響 □正面越流とは異なる
- 河道条件:
- 水理境界条件 □下流端(ハイドロ変化に伴う水位決定条件)
- 河道流砂, 河道動態

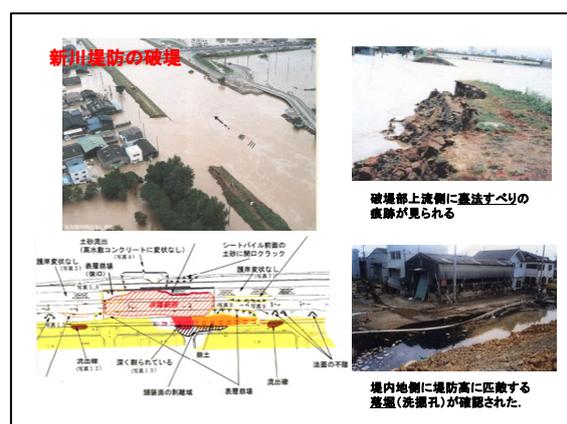
氾濫原の状況

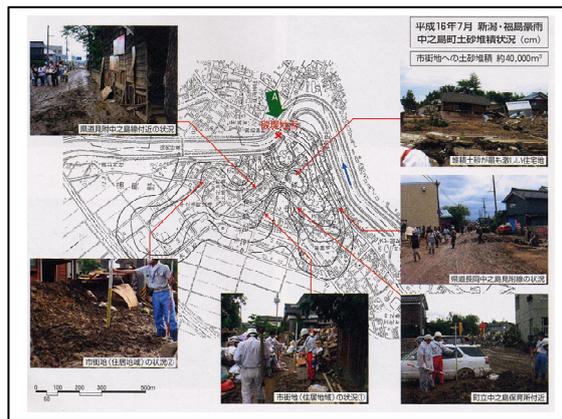
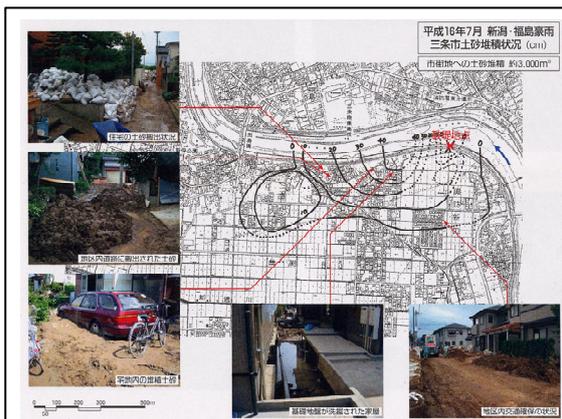
- 氾濫流量 □破堤口の変化, 河川流量・水理条件 (従来は破堤口を仮定して氾濫解析を別途実施)
- 堤内地浸水 □浸水想定・ハザードマップ
- 氾濫原での洗掘(落堀)・堆積 □築堤材料

河道流砂の横流出(とくに高い河床高の場合)



これは新川の破堤例です、落堀が右のところに出ています。それから、これが五十嵐川で、今日の話にあった九州の矢部川と同様、内岸側破堤のところ、土砂がいっぱい出ているところの状況です。三条市まで氾濫が伝播した。こちらは刈谷田川で、これは右から流れてきて、1つの湾曲を超えて、次の湾曲の突部のほうで破堤したものです。湾曲の凸部で破堤すると報道のほうも、あ、これはやっぱり湾曲の外側なので破堤しましたねと最近は言ってくれるようです。しかし、実際には必ずしも素人的常識が正しいわけではありません。





河道、堤防、氾濫原を含む領域の同時解析が実験でも数値解析でも必須ではあるんだけど、こんなことができるのだろうか。まず、材料の問題が出てきます。最近では、堤体材料に山砂を幾らか混ぜなさいとか、堤防の土工指針があるようですけども、実際に現存していて破堤の対象になるようなところでは、氾濫原も川も実は堤防もほとんど同じ土砂です。表層の差異は、現象が進んでくれば、先ほど言いましたけれども、表層に微細砂が入っていたり粘性土が入っていたりするということが最初に耐侵食性としてきくだけで、あとは破堤が進行してしまえば、ほとんど同じだとみなすことができるでしょう。一つの仮説です。

河道・堤防・氾濫原を含む領域の同時解析(実験・数値解析)が必須

材料 (河床材料が氾濫原基盤、築堤材料)
 表層の差異「破堤のきっかけは異なるが、拡大過程に大きな差ない」
 これまでは破堤が起きるかどうかに関心事
 新視点は破堤拡大の時間過程

広範囲

実験
 大縮尺実験=千代田実験水路(2011)での経験
 (高さ4m, 天端幅5m, 河道幅8m, 氾濫原幅80m, 流量70m³/s)
 小縮尺化 ←スケール効果?
 (砂を用いた藤田の実験経験 1980年代)

↑
数値解析→漸変流・水深平均平面2次元解析の適用
 (NHSED2D, Ric-Nays (i-RIC)など)
 ←破堤事例での解析実施の経験(新川, 刈谷田川・五十嵐川)

一方では大縮尺実験が始まっています。十勝川の千代田の実験水路です。高さ4m、天端幅5m、河道幅8m、実験水路です。氾濫原の幅を80mにして70m³/s流すような実験が昨年から実施されていました。ということで、この話を今日ちょっと紹介させていただきます。私たまたまアドバイザー会議の座長ですが、何かの機会に、ここの帯広で実験されている方々にこの話を詳しくしてもらおうのいいのかなと思います。

一方では小縮尺の実験、スケール効果云々の問題を抱きながらも、まあやってみようということです。実は1980年代に藤田裕一郎さんが既に実験しています。

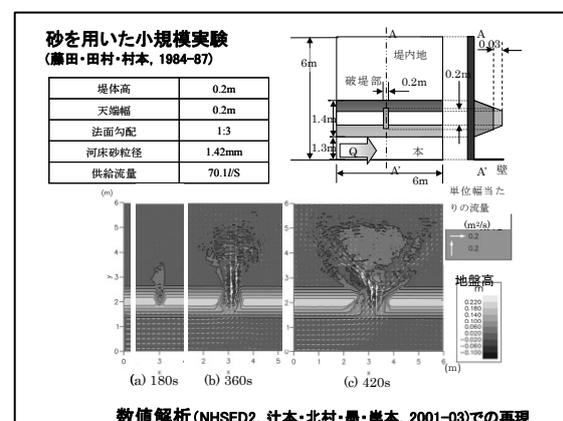
それから数値解析、これだけ広いところの現象では、何が一番きいているんだろうといったら、むしろ漸変流。必ずしも急変流でなくてもいいじゃないかと割り切りましょう。水深平均の平面2次元。現象は3次元であっても2次元でどれぐらい扱えるかが重要なポイントです。NHSEDというのは、我々のところで開発したプログラム、あるいはRic-Nays

というフリーで提供されている平面2次元解析ソフト。その2つで解析してみました。結果はあまり変わらない。大体のところをあらわすことができますといった感触です。

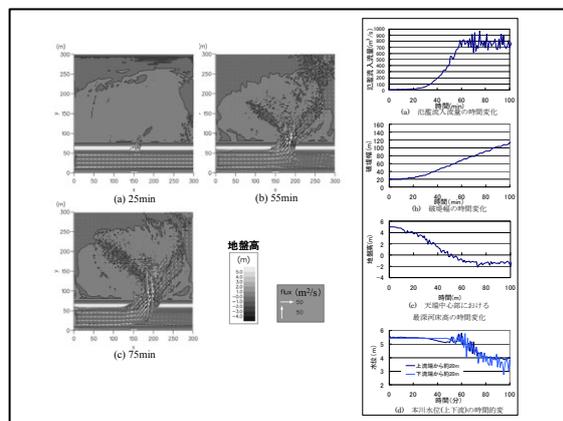
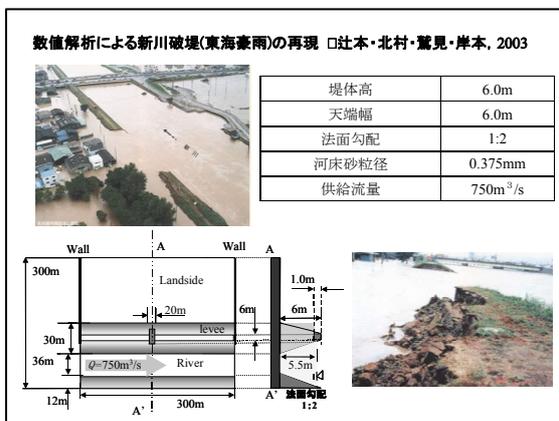
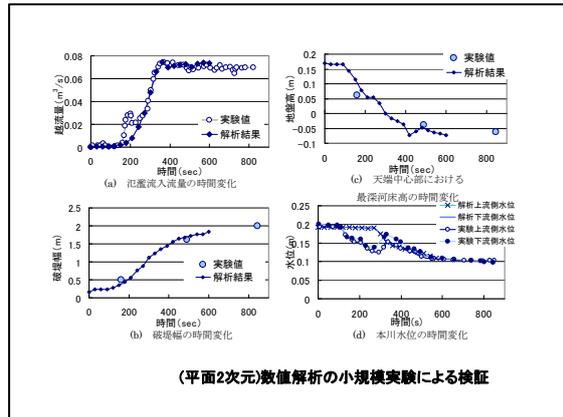
これが千代田の実験水路で、背割堤を利用した破堤実験をやっています。右下のように壊れています。我々も見ていましたが、天端に切り欠きをつくって、そこから越流するよ
うに条件を仕向けてやりますと、法面が被覆されているのがどんな状況であっても、ちゃんと待っておれば破堤します。越流したのに破堤しないというのは、よっぽど幅が広く越流して、流量が集中してきて鉛直の下刻が進むことがないとかいうふうな、すなわち現象が流量、越流量の時間的増加によって現象が増幅的でないときはなかなか進まないんでしょうけれども、小さな切り欠きから水を導入してやりますと、鉛直侵食が進んで、だんだん流量がそこへ集中してくるために確実に破堤します。これはどっちかという上から流れてきた裏のりの土砂が扇状地を形成するような形で、落堀はほとんど形成されないまま現象が進んでいくような中流部のれき堤防の破堤の実験です。



それから、岐阜大の藤田裕一郎さんが80年代にこんな実験をしました。そこにスケールが書いています。非常に小さいもので、しかも砂で実験して、かなり実際の破堤現象によく似たものを再現することができています(実験の再現性が確保されている)。その実験結果をまた我々のところで数値解析でかなりきれいに再現することができます。2次元平面解析、すなわち局所流における静水圧近似を外れる条件で攪乱の非常に大きな3次元的な流れであることを気にすることはなく、現象を再現できそうです。つ



まり、おおむね堤防の中でどんな流れができて、堤防の土砂がどれだけ吐き出されて氾濫原にどれだけ堆積するか。そして、氾濫流はどんな挙動をするかもよく表すことができる。最初は八の字型の破堤口ができるとかいうふうなところまでかなりきれいに解析できることがわかっています。また、小規模実験と数値解析はある程度良く合うことも示されました。また実現象の破堤も同じように説明できるだろうかといったら、新川のプロセスも計算できて、合わせられるところでは、どこが合うのか合わないのかというようなことをチェックしています。



破堤のきっかけ現象をちゃんと与える、すなわち初期切り欠きをちゃんと与えてやると現象は確定的になります。きっかけ現象がないとどこで破堤するかわからないんだけど、きっかけ現象さえ与えてやれば決まった現象になるということです。

それから、破堤現象の理解は小規模実験である程度できるようになったということと、かなり広範囲を扱う水深平均の2次元の計算ができるようになると、お互いに補完し合いますので、すなわち小規模実験ではなかなか測定できないところを、全体像が合っているから内部構造を数値解析で知ることができるということも大事なことだと言えます。また、今まで心配だった相似則の困難さとかも数値解析によってお互い補完することになります。

実験・数値解析によるアプローチ

破堤過程に着目 □きっかけ現象を所与
破堤現象の開始 □きっかけ現象

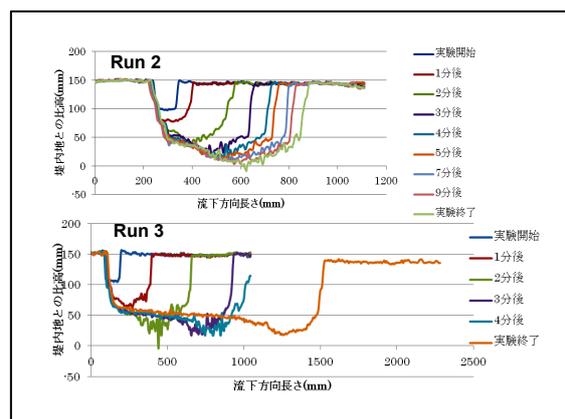
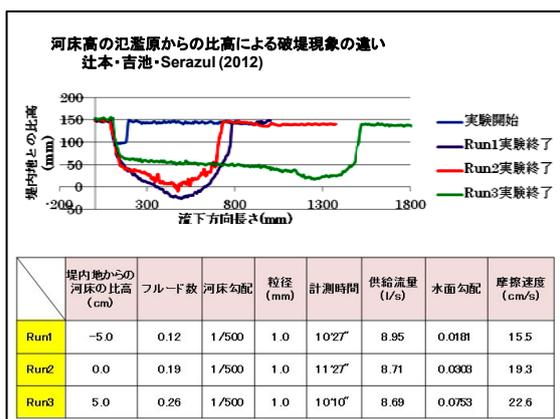
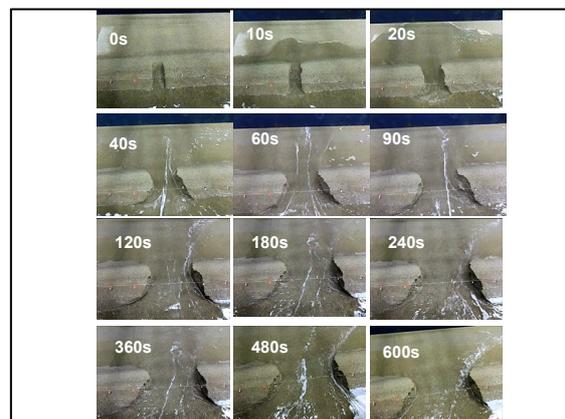
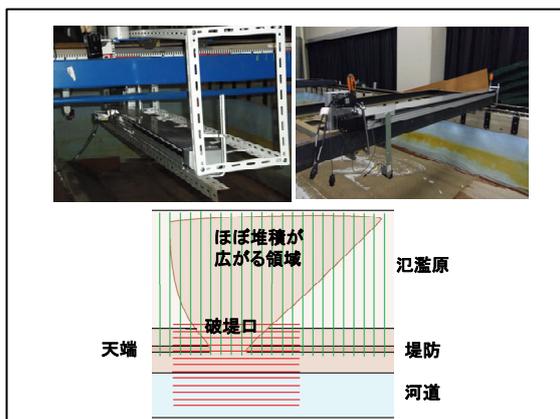
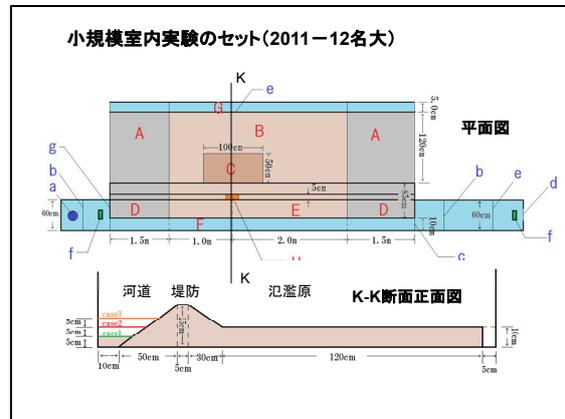
確率的 確定的(初期切欠き)

破堤過程の理解

小規模実験 TM 数値解析(規模を問わない)
測定困難項目 補完
相似則の困難さ

大規模実験
事例(条件のあいまいさ)

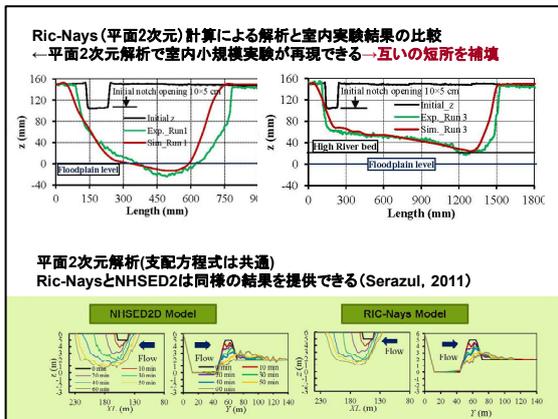
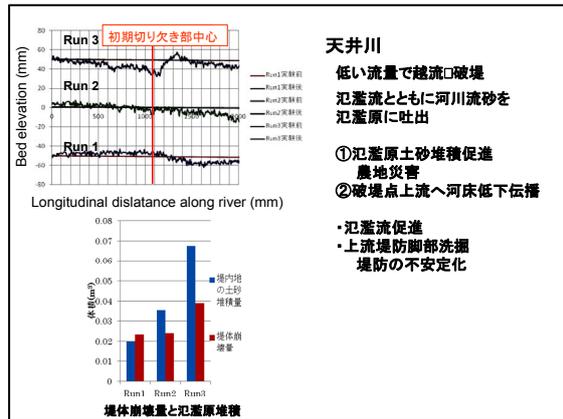
これは去年我々の大学でやってみた実験ですけれども、こういうふうにかなり狭いところで、河川の氾濫原に対する河床の比高を変えてみてやってみました。実験では、氾濫原も堤防の地形も川の地形もはかれるように計測装置をセットしました。破堤がかなりリアルに見ることができた。本当ではないにしても、かなり本質的な現象をちゃんとみんなが見ることができて、ある意味じゃ、さまざまな人、実験者だけでなく、数値解析やっている人、水理解析やっている人、あるいは氾濫原管理をやっている人にも使えるというふうな感じです。



氾濫原から川が高い状態、いわゆる天井川であればどんな問題が起こるのかというのは、牧田川という揖斐川に西から流入する川のところで、気になっておりましたので、それに合わせてやってみました。河床比高が高いと、天井川になっていると、破堤幅が非常に顕

著に広がります。あれぐらいの規模の実験でどんなふうに拡大していくか、鉛直方向に拡大していった後、縦断方向にいわゆる拡幅していくというようなことが分かります。

川の流れは左側が上流で右側が下流ですが、天井川の場合、先ほど言いましたように、川の中では高いところの河床材料が全部氾濫原に出てしまうために上流側の河床が下がって、上流側の堤防の堤脚が非常に不安定になって、そこでの堤防被害の危険性が増すということがわかるし、河川が低かった場合でも、今度は川の土砂が氾濫原に出るために、川に土砂が供給されなくなって下流側のほうで河床低下が起こるとか、そういった理解も進むこととなります。今やった実験をRic-Naysという北海道河川財団が関与しているフリーのソフトでやっても大体実験とは、下流端境界条件を実験と合わせながら数値解析すると、いわゆる河床変動と同じような解析をしてもこれぐらいのところは表現できるといふようなことです。

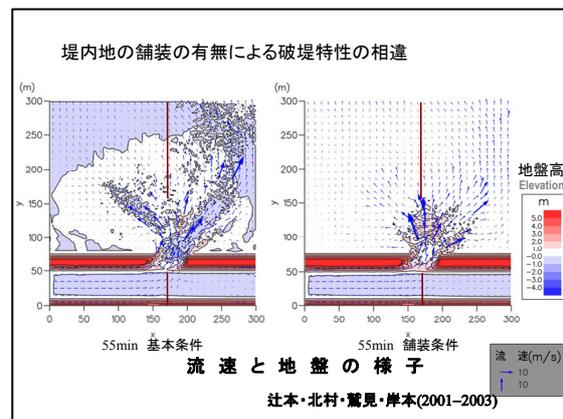


破堤過程の理解
 破堤を時間軸で捉える
 下刻・破堤口拡大(落堀の付随過程)
 破堤口への流量集中
 氾濫流量、流砂量の増加 ™ 河道条件の変化 (河道流量・水位、河床高変化)

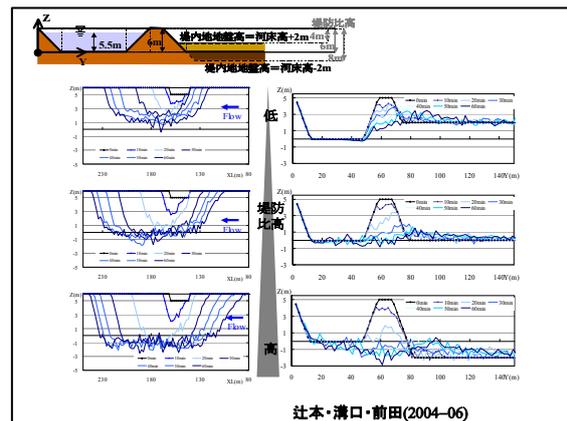
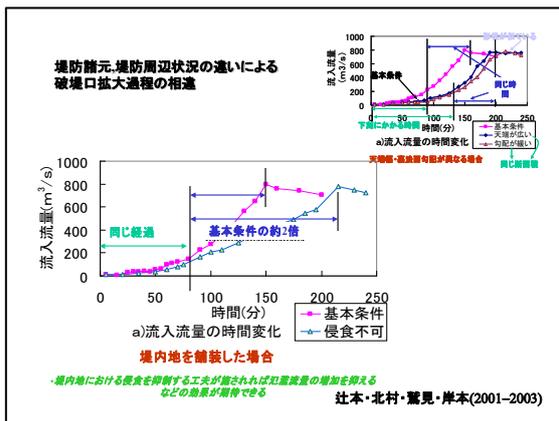
浸水、土砂堆積、氾濫原(堤内地土地利用条件)

「破堤対応」
 破堤箇所ごとの浸水伝播(水深・流速) 避難戦略
 新しいハザードマップ
 破堤部近傍の局所水理条件 水防・応急復旧
 氾濫原の堆積 農地被害

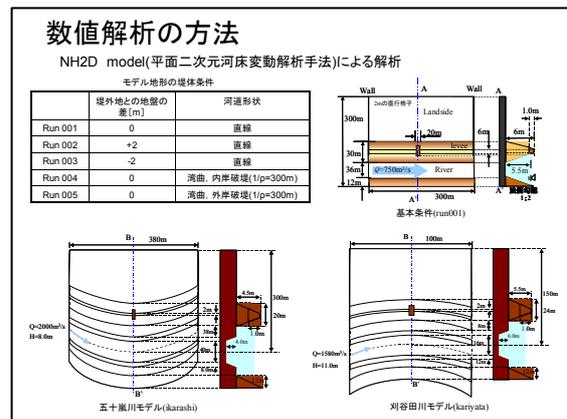
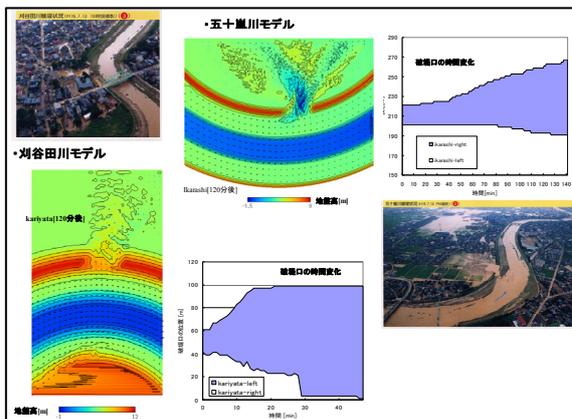
堤内地の舗装の有無というのを少し言いましたけれども、その話を少し追加しましょう。下流の、低平地の河川を対象とした計算例ですが、スライドの左側の落堀ができる条件に比べ、右側の落堀ができないときには、破堤現象が非常におくれる。いわゆる落堀は、特に低平地の場合、破堤の拡大現象に相乗効果



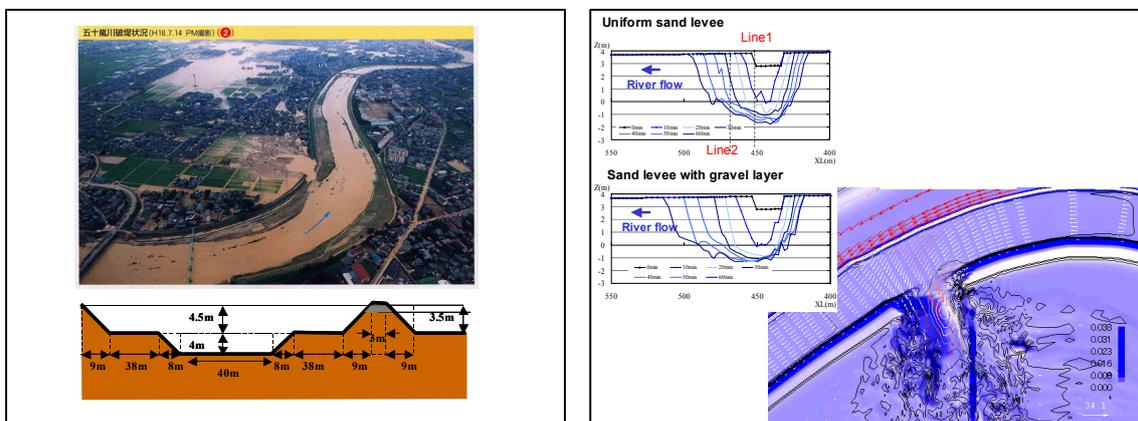
を及ぼしているとか、そういったこともこういった数値計算で知られます。つまり破堤に関連した河川計画あるいは周辺整備の議論ができるということです。これも堤内地盤との違いが破堤プロセスに及ぼす影響を調べたもので、数値計算でこういった、いわゆる正面から見た堤防とかその辺の諸元の違いによってどんなふうに堤防が壊れていって拡大していくのかというのがアウトプットされますし、もちろん当然流量も計算できる。



さて、刈谷田川は外岸があふれました。内岸で破堤するような五十嵐川のケースだってあります。そのときにどんなふうに計算したらいいでしょう。こうした問いにもある程度これぐらいのところでいろんな議論ができます。



これは五十嵐川の例です。実は粗いれきがかなり散乱したというふうなことで、基盤漏水でパイピングがあったとかいうふうな議論をされた方がいたのですが、実はそうでなくて、大きなれきが築堤材の中からそこまで運ばれたということを証明するような計算もやりました。



今日の私のお話は、『治水計画と河川堤防』ということで、水系治水における河川堤防の位置づけを計画論との中で見ていくというふうなアプローチと、それから、なおこういう状況で破堤の危険性があるために、実は破堤・氾濫というのは治水計画の中に織り込み済みであるべきだということをお話しました。計画の中にあるにもかかわらず破堤状況の知見が情報不足、知見も不足しているし情報を流すことも不足しているなという気がしています。

そして最後が、破堤の研究、今までは破堤を防止するという観点からメカニズムを知ろうというのが動機だったのですが、今度は破堤するプロセスを知りましょうという提案です。そのときには河川、堤防、氾濫原を一体的に扱うことの重要性を指摘しました。それから、アプローチに制約があって、大実験でだめだとか局所流が解析で

まとめ:

1. 治水計画と河川堤防

水系治水における河川堤防の位置づけ
堤防設計の背景 (HWL以下で安全に流す)
河川整備基本方針と河川整備計画

2. 治水対策の進捗となお残る破堤の危険性

治水対策の進捗レベルと破堤
残る破堤の危険性をどう考えるのか
ハザードマップ・避難
→「破堤・氾濫」は[治水計画]に織り込み済みのはず
にもかかわらず、[破堤状況]の知見, 情報不足

3. 破堤過程の研究

破堤をどう考えてきたか?

防止するための研究から、過程を知って備えるための研究

河川・堤防・氾濫原を一体的に扱うことの重要性

アプローチに制約

大実験でないとだめ

局所流が解析できる数値解析でないとだめ

克服!

小規模実験, 平面2次元解析の有効性

↓
河床変動や水位特性の「破堤」への影響

破堤口拡大に伴う氾濫原浸水の伝播

河床土砂の吐出による河床低下→河川流況変化

→氾濫原土砂堆積

河道特性(湾曲や合流)の「破堤」, 「破堤過程」への影

↓
「破堤」を織り込み済みの「水害対応」, 「治水計画」

きないとだめだと言っていたのだけれども、これぐらいの範囲のところの大まかな議論、特にいろんな対策をとっていきようなことに対する知見は十分小規模実験と平面2次元の数値解析でやれて、特に河床変動や水位特性の破堤への影響とか、破堤口拡大による氾濫水の伝播とか、あるいは土砂の吐き出しによって河床が低下するとか、そういった非常に重要なことこそが指摘できるのではないかということです。

何よりも、一番最後に、破堤を織り込み済みの計画をしているんでしょうという主張を繰り返します。そして、それならその対応をやっぱり皆で考えていきたい、こういうことの話提供とさせていただきます。

ありがとうございました。

— 了 —