

第 15 回堤防委員会基調講演

治水のための土の理解

……理解は十分か？ 東北地方太平洋沖地震を振り返って……

佐々木 康
(財)国土技術研究センター
技術顧問
(広島大学 名誉教授)



はじめに 2年前の3月11日の東日本大震災の直後に、河川施設の被災状況を記した国交省の災害速報を見ておりましたら、“堤防天端隆起”という記載が出てきました。東北地整管内の鳴瀬川の被災箇所でした。関東でも利根川ほか8箇所くらいで“堤防天端隆起”という表現があります。地殻変動の余

2013年2月26日 堤防委員会 JICE

治水のための土の理解

……理解は十分か？ 東北地方太平洋沖地震を振り返って……

佐々木 康

スライド - 1

効活動（断層活動の後遺症）の兆候はまだ報告されていないことを活断層の研究者に確認しておりましたので、一体何が起こったのだろうかと気にかかっておりました。

4月になって東北地整の“堤防天端隆起”と報告された被災現場を訪れる機会がありました。樋管などの堤防横断構造物が設置されてはいないこの被災箇所（区間延長 100m）では法肩や法面に縦断亀裂が入り天端は沈下していました。その様相は全体的にはほかの被災区間と変わりませんが、天端舗装に 2～3m の間隔を置いて 3本の横断亀裂が入り、両端の亀裂の外側（上下流側）から押されたように真ん中の亀裂を中心にして舗装版の端部が 0.5m 程度突き上げられていた模様で、被災区間全体が隆起したものではありませんでした。堤体の止水機能という面からみれば天端高が 100m の延長にわたって低くなっているにも拘らず、局所的な舗装版の持ち上がりだけを強調した報告になったものようでした。2000 箇所くらいの堤防被災箇所の中には、8 件くらい堤防全体の挙動を表す用語でない描写のも

東北地方太平洋沖地震の被害速報

- 被害速報で、「天端隆起」の記述（ほかにも関東、利根川ほかで 8 件）

宮城	鳴瀬川	鳴瀬川	(左)16.6	大崎市鹿島台	堤防天端隆起 H=1.0～1.5m L=100m	調査中
----	-----	-----	---------	--------	--------------------------	-----

平成23年3月17日5:00作成 東北地方太平洋沖地震(第21報)p21/84から

- 地殻変動の余効作用か？ ⇒ 単なる視点の違い
- 被害状況の記述の例(東北の被災統計、震後調査の手引き、災害申請) ⇒ 状況が適切に伝達されるためには同一概念を共有する用語の統一が必要(類似の例:消防の指揮班、軍隊)

スライド - 2

のが混ざっておりました。とにかく不思議に思った次第です。

もう一つこの地震に際して見られた経験をご紹介します。江戸川の 57～58 kmの左岸表法の崩壊箇所です。被災した翌日に応急復旧工事中に撮影された動画があります。崩壊箇所の法尻近くを重機で掘削したときの、基礎地盤の砂層上面で起こっていたボイリング現象が捉えられています。事務所からもらったこの動画のなかでは、立ち会っていたコンサルの人はこのボイリング現象を被圧地下水のせいであると説明をしています。しかし、周辺地形は浅いところに被圧地下水があるとは考えにくい箇所ですし、前日の地震により液状化した砂層内の過剰間隙水圧がまだ消散しきっていないことを示している可能性を否定できません。



スライド - 3 (動画)

以上の二つの事例は、堤防挙動を把握す

るために何を観察すべきか、観察結果をどのように解釈すべきか、堤防管理にあたる専門家や地盤調査に携わる専門家の間であっても震害実態についての知識は十分普及してはいないことを示しているように思われます。

また、前回の堤防委員会で辻本先生から“破堤は織り込み済み”と考えたらどうかというご提案がありました。地盤工学の分野からどこまで応えられるだろうかと悩みつつ答えが見つからないまま今日の日を迎えてしまいました。本日の話は、われわれはどこまで土を理解しているだろうか、知識の深化の妨げになっているのは何か、隘路打開にどのように取り組んだらよいかという、スライドに示す三つの側面からお話しさせていただきます。

大したお話もできないのですが、実務に携わる方々にもぜひ知っておいていただきたい地震時の堤防被災の実態を主体にお話をさせていただきます。幾度かお話をしてきたつもりですがどうも私が見聞した被災実態の知識は余り多くの方に伝わっていないように思われます。堤防の工学の限界をどう考えたらよいのかという視点で、再度ご紹介

内容構成

きっかけは

- 「天端隆起」「被圧」
- 「破堤は織り込み済み」

内容構成

- 第一部 堤防の震災対策技術の現況
- どこまで「土を理解」しているだろうか？「破堤は織り込み済み」の問題提起に答えられるだろうか？ **自問！**
- 第二部 東北地方太平洋沖地震で見られた啓発的な事象
- 技術の進歩と「知識の普及」の妨げ：枠のしぼり……前提条件の吟味
- 第三部 連鎖波及性の認識 隘路打開方策の模索
- 目下の自答は「**連鎖性・相互作用をもっと考えてみる**」

スライド - 4

なお、つい最近の建設業協会 PR 誌に風間先生がお書きになった「液状化は第一級の技術課題」、雑誌河川に掲載された藤田さんの「堤防の問題は総合的に考えなければいけない」という主張があります。隘路打開の方策につながる話題かと思ってスライドに示しましたが、急遽ご欠席とのことで風間先生との意見交換はできないのが残念です。

堤防に関する技術の進展経過をざっと眺めるために、便宜的に三期に分けてひし形の中に記してみました。第一期は長良川の破堤の直後の昭和 50 年代初めから兵庫県南部地震までの約 20 年間、第二期は兵庫県南部地震から東北地方太平洋沖地震までの 16 年間、第三期は東北地方太平洋沖地震以降の期間です。この期間わけが妥当であるかどうかの吟味は不十分です。

堤防の震災対策技術の現況

堤防研究会（本省、国総研、土研）
地整の堤防技術研究会
H20～

堤防技術研究会（本省、国総研、土研） H24～

施設計画の視点は希薄
都市化の進展
リスクの変化
新しい事象

堤防委員会 at JICE
H20～

不飽和土の飽和化

堤防委員会 本省、関東、土研
S53～

薄い砂層

長時間地震動 続々・分級 空洞化・堤体陥没

パイピング破壊

閉封飽和域の液状化

ストレッチ

耐震設計マニュアル H24

破壊メカニズム

堤防開削調査マニュアル H23

矢部川破壊堤

東北地方太平洋沖地震

ドレーン工設計マニュアル

浸透の詳細点検

L2指針 H19

堤体内応力

河川土工指針

第3期 強震計配置計画 H9

河川堤防構造検討の手引き

第1期 強震計配置計画

質的整備

耐震点検・強化 H8

液状化対策工法

兵庫県南部地震

液状化

南関東地震

笠かけ堤防

行き止まり型

堤防開削調査

Cs方式 ⇒ Δu法

治水地形分類図の作成

長良川の破壊堤（S51）

3

堤防に係る問題がクローズアップされたのは、昭和 50 年代の初めだったと思います。長良川の破堤を契機として、治水地形分類図が作成され、「行き止まり型」の地盤構造が危ないんだよとか、堤体に水を入れないための「笠かけ堤防」をやろうじゃないか、などの議論が 10～15 年くらい検討された時代がありました。地震の関連では当初、Cs 方式と称して堤防の地震時安定性を評価する技法が考案され、間隙水圧を用いて評価するか、慣性力で評価しようかというようなことが議論されておりました。

平成に入って兵庫県南部地震が起こり、堤防の耐震検討が始まりました。さらに、第一期の時期のいろいろな検討の結果が形になって、「河川堤防設計指針」とか「河川堤防構造検討の手引き」などが刊行されました。また、堤防の形状整備と併せて質的な強化が要るんだというような時代がその次に何年か続きました。

そして、2 年前には東北地方太平洋沖地震が起こって（第三期）、去年には矢部川の破堤が起こりました。

こういう時代背景の中で堤防に係る技術、土の知識がどのくらい活用されているだろうかということを考えてみました。辻本先生からは、都市化の進展とか、リスクの激化などが生じている今の状況において、地盤工学の立場の人は治水施設の計画に対する見方、都市化の進展やリスクの激化に対する見方、が不足しているのではないかというご指摘があったことをまずレビューしておきます。

さて、堤防の地震被災に関してどんなことが分かってきたのかという点についてご説明します。関東震災のときの鬼怒川の写真です。これを眺めてみると、最近になってわかってきたことが被災形態の記録映像の中にも残されていて、何回でも技術の進展のつど古い記録も見直す価値があるんだなと思います。壊れ方、亀裂の入り方に注目してみると、法肩近くの天端に亀裂が生じています。

その位置や亀裂面の傾斜の向きは近年の被災事例でみられるものと同じ特徴（後述）を有しています。しかし、震災報告をひも解いてもそのことに言及している記録はありません。新潟地震に先立つ 2 年前に起こった宮城県北部の地震では江合川の『堤防から水が噴き出した』、『土中の間隙水圧が上昇したことを示してい

濃尾地震／関東地震以降地震時の被災が記録に残されているが……

鬼怒川右岸堤防 1923年関東地震



S37宮城県北部の地震

本地区も先に述べた福沼地区も、ともに旧河道を掘立て築堤したので旧河床の砂れき層の上に不透水性の低いローム、シルト質の表土を被っているわけである。特筆すべきことはこのような条件の箇所では地震時に地下水が不透水性の表土を突き破って、砂と共に 2～3m の高さまで吹き出したことで、地震時に地盤中の間隙水圧が異常に高まると云うことである。同様な現象は江合川下流部の二の袋地区でも起こったと云われている。

スライド - 7

る』ということがきちんと記録に記述されていますが、河川施設の現場で観察されたこの現象が、新潟地震以降脚光を浴びることとなった液状化の検討のスタートにつながるということにはなりません。自然現象の示す“意味”を読み解くには、それなりに機が熟すというか、知識の集積、が必要ということかも知れません。

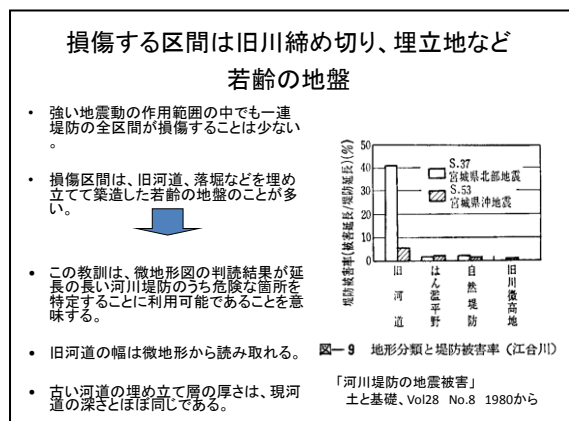
その後たびたびの地震で生じた色々な堤防被災の事例から、壊れ方が軟弱地盤でのすべり破壊に比べて非常にひどい、ときには堤体が分断される、周辺地盤の盤膨れは見られない、壊れた堤体土は遠くまで運ばれることがある、噴砂の痕跡が明白など、壊れ方や壊れた区間周辺の地盤の種類についての観察結果（知識）が増えてきました。

こうした知識の蓄積によって地震による堤防の大変形は液状化が

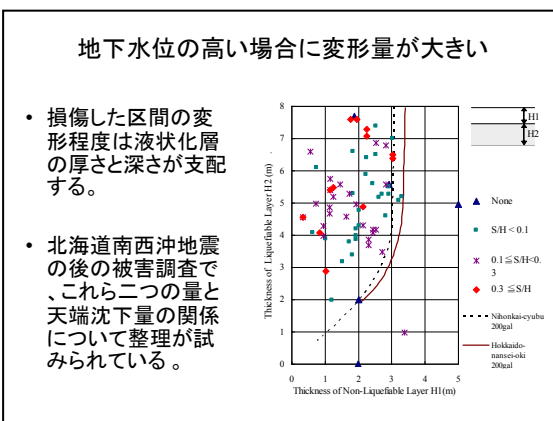
原因ということが分かってきて、変形の程度は液状化した土の厚さやその上の液状化しない層の厚さによって左右されるということが分かってきました。しかし、その知識は被災防止や復旧設計に十分活かされていないのではないのでしょうか。基礎地盤の液状化層厚と液状化しない層の厚さをそれぞれ横軸・縦軸にとった、石原先生が最初に提示された整理方法にあてはめていくと、液状化しない層が 3m 位あると堤防被災が起こらなくなる。こ



スライド - 8



スライド - 9



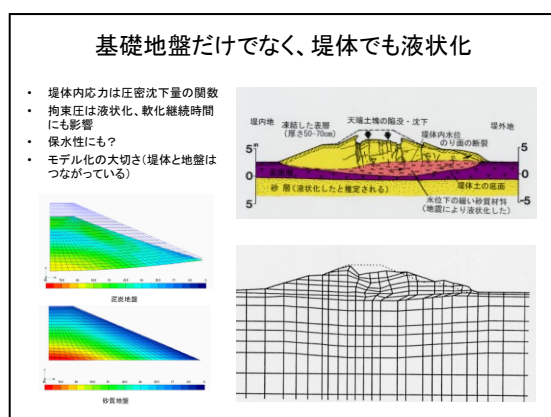
スライド - 10

んなことが平成 6 年に起こった北海道南西沖地震の後で見出されています。

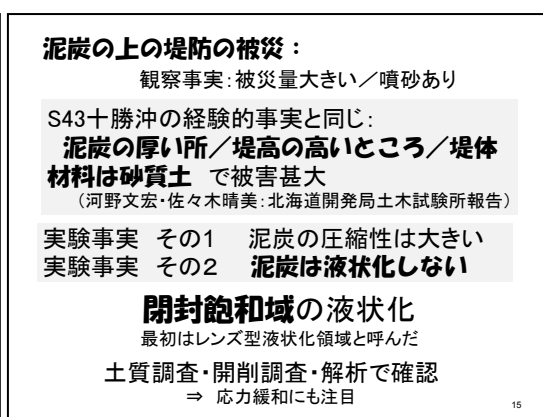
今から 20 年前、平成 5 年の釧路沖地震では堤体で液状化が生じたことが明らかになり

ましたので、平成 19 年の L2 指針の中には堤体の液状化について記述していただきましたが、対策マニュアルには反映されないまま 2 年前の東北地方太平洋沖地震を迎えてしまいました。残念なことです。

堤体液状化の発見の背景には、釧路沖地震以前の地震で、泥炭の層厚が厚くて、堤体荷重で沈下する量が大きく堤体材料が砂質の土の場合には被災度が大きくなるという調査結果が北海道開発局土木試験所報告に残されていましたし、さらに泥炭は液状化しないという室内試験結果が明らかにされていた（能登・熊谷、北海道開発局土木試験所資料）という知識の蓄積がありました。地道な検討の積み重ねと、総合的なものの見方が必要だということかと思います。考えてみると圧密量が大きいかどうかを検討する軟弱地盤分野を専門とする技術者と地震時に液状化するかどうかを扱う技術者は異なるジャンルを専門分野とする人たちであったために、総合的にみれば見えるものが専門分野だけから眺めていては見つからないということかと思います。専門分化が進んで畑が狭くなると気を付けなければならない点ではないでしょうか。



スライド - 11



スライド - 12

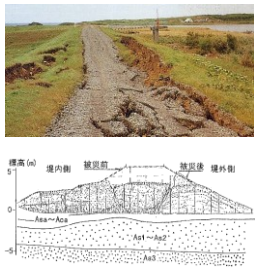
天端陥没というタイプの破壊形態もこのころ見つかりしております。北海道南西沖地震で被災した後志利別川の被災事例です。川裏・川表、両方の法肩よりも天端の方が低くなる変形結果が残されています。堤防表面に現れた縦断亀裂が堤体内の横断面でどこに入るのかを追跡した開削断面のスケッチです。

亀裂面の傾斜は円弧すべり破壊で生じるものとは逆方向に傾いていて、堤体表面で観察された亀裂上端の位置は法肩の少し下にあります。なぜこのような位置に亀裂が入って天端陥没型の破壊が生じるのか考えてみます。堤体の破壊は土の自重で壊れたものであり、そこでは土はランキンの主働崩壊状態にあるとみることができます。そのように単純化すると、亀裂面の傾斜角は主働崩壊角を表すものとなり、亀裂面の上にある土塊に作用する

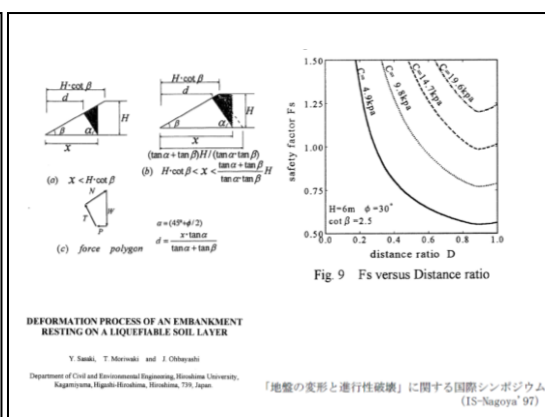
力のつり合いをもとに主働崩壊の最小安全率を算定してみると、最小安全率は亀裂位置によって変化します。スライドに示した図は亀裂面の位置（記号 d ：法面の水平距離に対する法尻から亀裂位置までの水平長さの比）を横軸にとり、縦軸に安全率を取っています。土の粘着力をパラメータにした曲線群は $d=0.9$ くらいのところで最小値を示し、堤体底面の水平せん断抵抗が低下して、堤体が主働崩壊するとき、最初に法肩近くの法面上部に亀裂が生じることが分かります。

天端陥没型の変形の例
北海道南西沖地震後の後志利別川・兜野築堤

- 天端中央付近が両法肩より低くなる天端陥没型の変形。
- この事例では、法肩から堤体底面中央部に向かう明瞭なすべり面が堤体内に形成されていた。
- 堤防下の浅いところで液化化⇒堤体底面境界のせん断抵抗が低下⇒堤体内応力の再分配 ⇒ 底部における堤防幅の拡張(ストレッチ)と天端の沈下。



スライド - 13

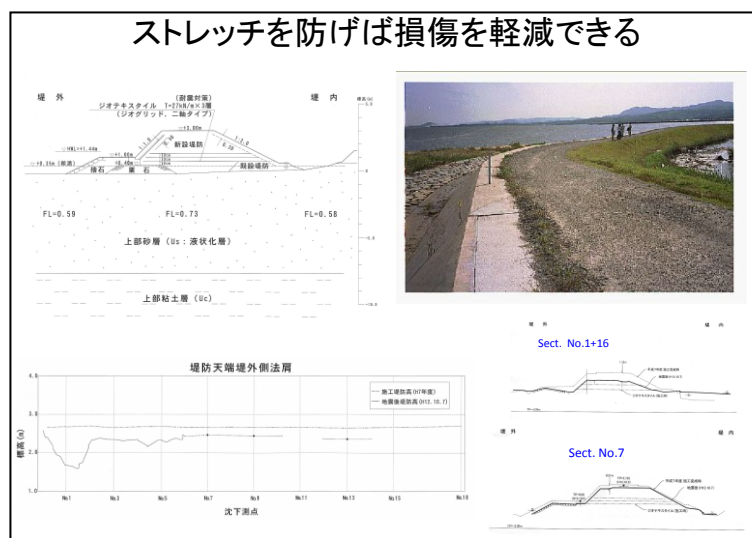


スライド - 14

堤防開削面で観察される亀裂の傾斜角を実際の被災箇所を観察してみると、鉛直の亀裂の場合も数多く観察されています。つまり場合によっては土の自立高さも考慮した自重破壊も考慮することが必要なのかもしれません。単純化した仮定どおりにものが起こっているのかどうか分かりませんが、堤防の下で液化化現象が起こり、堤体が自重破壊するときには、主働崩壊による股裂き現象とでも呼ぶような変形、ストレッチ変形と呼んでいる変形、が起こっているらしいということが分かります。しかし、この知識はあまり実務の方々には知られていないことのように思われます。

堤体の下部で液化化が起るときには、堤体は水平方向に引っ張られる変形、ストレッチ変形と呼んでいる変形、を生じます。

ストレッチ変形が実際に起こる証拠としては、ストレッチに抵抗する能力を付



スライド - 15

樋管に残されたストレッチの痕跡

- 基礎地盤の液状化程度によっては、堤体表面に亀裂や変形が認められないことがある。
- しかしそのような場合でも、条件によっては、堤体内の樋管に引っ張り力が作用することがある。

堤体のストレッチが樋管の目地開きを引き起こす

液状化の工学的取り扱い

- **地盤特性**
土層構成、密度、地下水位など
- **地震動特性**
最大加速度、繰り返し回数
- **構造物の特性**
 - 液状化した土の扱い方(堤防)
 - 近似 1 **流体**と仮定
 - 近似 2 **柔らかい固体**と仮定
 - ⇒ **自重解析**(静的解析)
 - 近似 3 **土の応力ひずみ関係**と過剰間隙水圧の発生特性を仮定
 - ⇒ **時刻歴解析**(動的解析)
- **液状化判定**
・・・FL値など
- **変形量や被害の予測**
 - **対策**
地盤改良・構造変更など

解析天端沈下量

堤体の分断 再現できない

解析での天端沈下量(m)

実被害天端沈下量(m)

◆ LUCA
 ● LUP
 ▲ ALID
 ■ 数値モデル
 × マニュアル

河川堤防の地震時被害量の解析手法、
 (財)国土技術研究センター、平成14年2月

8

化をもたらすだけ十分大きなものかどうかという視点でとらえ、変形量を静的解析、あるいは動的解析の二つのグループのいずれかのアプローチで計算し、その結果を用いて被害の度合いを推定してるといったところが実態、現況だろうと思います。

解析技術の進歩によって変形の状況を逐次追跡できるようになってきていますが、これらの予測方法では、いずれの方法でも堤体の分断を取り扱うことは不可能です。連続体としての解析しかできないのが河川堤防にとっては最大の問題であろうと思います。

以上、知識の現況について振り返ってみた第一部の要点をこのスライドに示しています。堤防の地震時被災の主因は土の液状化ですが、振動中の慣性力の影響が全くないと言い切っているわけではなくて、止水機能という視点から変形量を考える時には慣性力の影響をどのように考えていかなければならないのかというのが次のステップへの展開に必要な事項の一つではないかと思っています。

後でもお話しますが、今回の地震でも堤体の中の液状化が問題になりましたが、その原因は堤体の中に地下水があるからで、その地下水はどこから涵養されているかということも問題ではないかと思っています。

第一部のまとめ

- **主因は土の液状化** 厚さと深さがカギ
 - 慣性力の影響が全くないことが証明されているわけではない
 - 堤防の地震時変形は液状化後の土の剛性が支配的 …… 剛性低下の継続時間は不詳
 - 自重効果のみを考慮した簡易計算、時刻歴解析の二種類の解析方法
- **地盤でだけではなく、堤体でも液状化**
 - 地盤の圧密沈下が堤体底部の飽和化をもたらす
- **堤体内に地下水がある**
 - 周辺地盤の地下水位より高い堤体内地下水位の出現理由は未解明
- **天端陥没の横断面内には逆八の字型の亀裂**
 - いつもではない 粘着力大きい堤体土の場合には鉛直の亀裂
- **液状化時に堤体はストレッチすることがある**
 - ストレッチ防止のジオグリッドが変形を軽減
- **樋管が引っ張り力を受けることがある**
- **間歇的に被災箇所が発生することがある(三次元的応答?)**

スライド - 21

一様な地盤条件、一様な堤体条件と思われる区間の中でも壊れる断面と壊れない断面が間歇的に飛び飛びに現れる場合も見つかっています。天端陥没や堤体内の逆八の字型の亀裂、堤体のストレッチ、樋管の引張変形の三つの事象はいずれも地震時に生じる“堤体の変形”の問題です。堤防震災の議論の場では天端沈下量に目を向けます。天端沈下量は液状化部分の変形が主だと考えています。これらの三つの事象（天端陥没・堤体内逆八の字型亀裂、堤体のストレッチ、樋管の引張変形）は、液状化部分の変形というよりも液状化した部分に境界を接する液状化していない部分に生じる変形あるいは応力状態の変化の問題であり、技術進歩の次のステップのためには早急に取り組まなければならない事象だろうと考えています。

重力効果だけを考えた液状化部分の変形についても、振動中の慣性力の問題に加えて三次元応答の問題である“間歇的な被災の発生”についても検討を進めなくてはならないのではないのでしょうか。

第二部 「東北地方太平洋沖地震で見られた啓発的な事象」の話に移ります。

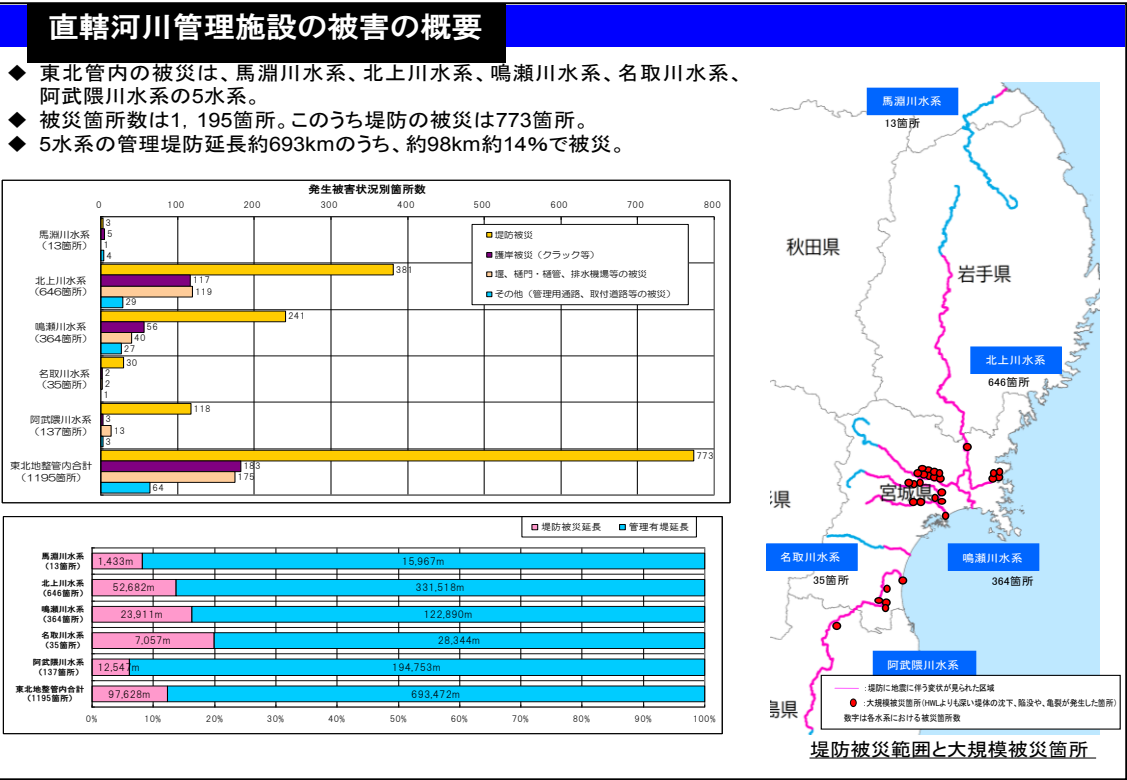
第一部としてお話しした技術現況、つまり我々が有している知識の現況、経験知、に加えてもう少し考えなければならぬ事項が今回の東方地方太平洋沖地震で現れております。それで今回の地震からくみ取らねばならない啓発的な事項は何かという視点でお話を進めさせていただきます。

まずこの地震による堤防被害の全体像を最初に振り返っておきます。堤防が壊れた区間は東北管内では 773 箇所、管理有堤延長と呼んでいます、堤防延長の 14%

第二部

東北地方太平洋沖地震で見られた啓発的な事象

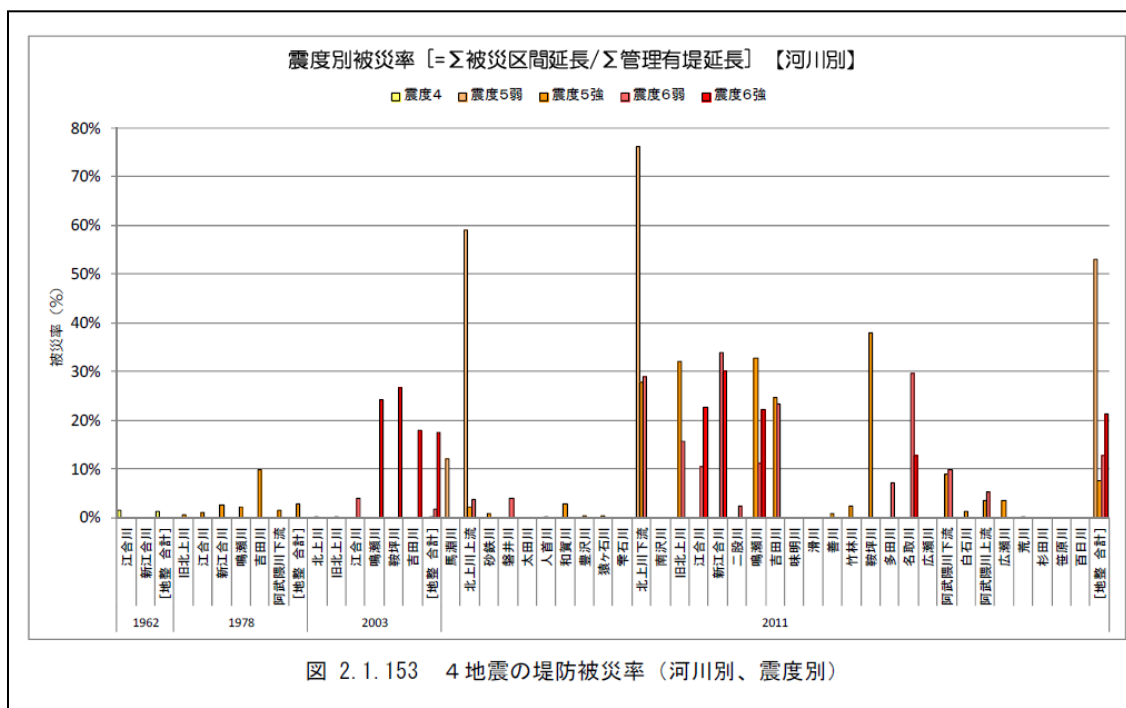
スライド - 22



スライド - 23

ぐらいが壊れました。地震が起こったらどこでもかしこでも壊れるかというわけではないことを理解しておきたいと思います。

東北管内では過去に何回か堤防の地震災害が発生していますが、1962 年、1978 年、2003 年、2011 年の地震による直轄堤防の被害率（管理有堤延長に対する被災延長の百分率）を河川別、被災区間の気象庁震度別に示しています。一部、データ処理が不十分で被災率の高すぎる結果となっていますが、地整全体の被災統計を示した右端の棒グラフを見ていただくと、2011 年の地震では震度 5 強の揺れの区間では 10%未満の延長で壊れ、震度 6 弱では 10%ちょっと、震度 6 強になると 20%となり、東北地方の堤防の地震動強度に対する脆弱性特性が示されていることが分かります。震度 6 強のところでは被災率が高いのは津波の越流した阿武隈川や新北上川の河口付近の被害が関与しているのではないかと思います。この 2 年間は被災区間の復旧に注力してきたために、こうした後世へ伝えるべき教訓の整理は手つかずの状態の部分がたくさん残っています。ぜひ、記録に残された資料の持つ意味の整理をして、後世につなげていって欲しいと思っています。



スライド - 24

次の写真は新北上川河口部左岸の写真です。落橋した新北上川大橋のずっと上流部まで天端を津波が越流していますが、越流すれば土堤部分は全て機能喪失するかというところでもなく、越流時間が短ければ土堤もそこそこ強いという印象を与える写真です。

さて、壊れ方と復旧について東北地方太平洋沖地震から学ぶべきではないかと考える特

徴的な事象を三つばかり（長距離流動／三次元流動／止水機能の低下）取り上げてみます。

一つは長距離流動という問題です。

左上は鳴瀬川左岸 30 km地点の上流から撮った写真、右側の写真は下流から撮った写真ですけれども、天端が陥没して法面の土は水平方向に 18m 位の長距離移動をしています。地域の特



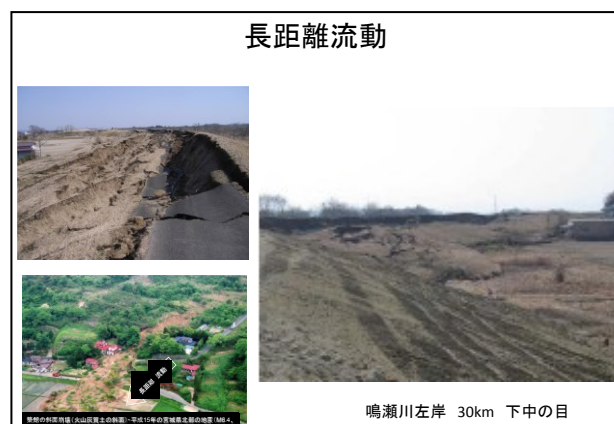
スライド - 25

徴というか、地域性を反映して、ここの堤体材料には火山灰質の土が使われています。この地方の火山灰質の土が液状化した時には非常に大きく流動するということが起こります。左下の写真は平成 15 年の時の事例です。このほかに昭和 43 年の十勝沖地震の時にも青森県目時に位置する 4 号線の高さ 2〜3m 程度の道路盛土が何十メートルか流れ出すという被害も起こりました。

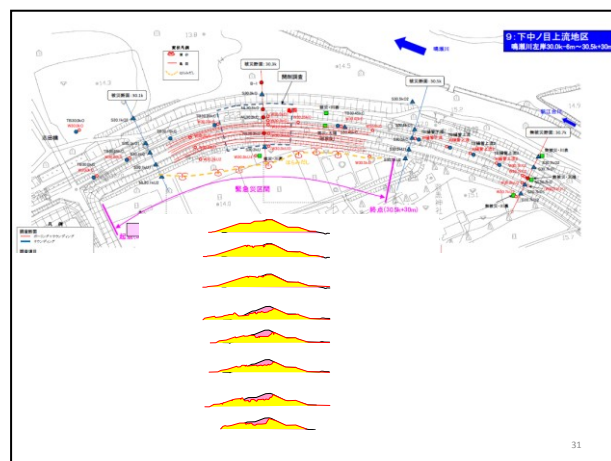
つまり、東北地方では盛土材料として手に入る土が火山灰質の土しかなく、そのために条件によっては地震時の変形の様相が極めて甚大になる場合がある、すなわち災害事象や土の挙動の解釈には地域性の理解（条件によって長距離流動が起こる）が欠かせないことが示されています。

二つ目に、三次元流動（動的三次元応答とは別）という問題をお話しします。

このスライドは先ほどの下中の目の被災箇所の平面図です。堤防の平面線形はこのあたりでカーブしています。画面の真ん中あたりの横断面が最も変形量の大きい断面になります。平面図



スライド - 26

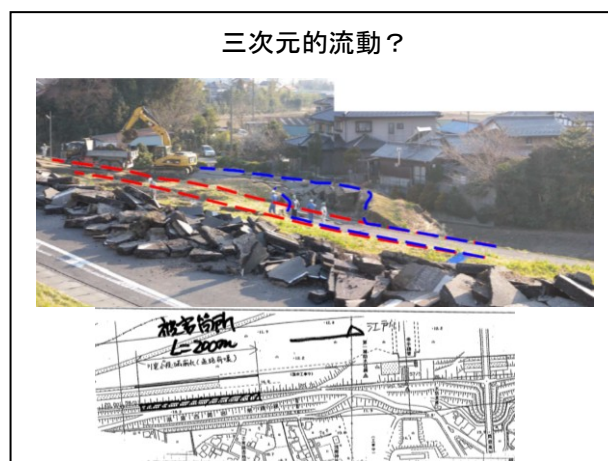


スライド - 27

の下に示した被災後の横断測量結果では上から 4 番目の図面になりますが被災区間の中では天端が一番大きく落ちた箇所、法尻は裏法方向に 18m 位移動しました。横断形状のこのような変形は、天端沈下の結果減少した断面積と、法尻方向に膨れだした増加面積とは釣り合う等体積変形が起こるのが普通の変形ですが、この箇所では増加面積の方がやや大きい。この理由の一つは平面線形のカーブのところでは二つの方向からの土塊移動が重なって、特定の断面で計測すると結果的に見掛け上の水平移動量が大きくなるということが起こっているのではないかと思います。

つまり、地震時の堤防の変形予測をするときには通常二次元の横断面を対象に変形計算をしますが、現実の堤防の変形は条件によっては検討断面に直交する方向（堤防の法線方向）の変形も含む三次元的な変形が起こる場合があります、計算結果に含まれる幾分かの誤差が含まれるということを意識しておく必要があります。

この地震で経験された三次元流動の
もう一つの事例として、江戸川右岸 57
km の西関宿の被災箇所があります。天
端から川裏方向をとったこの写真の中
の赤い線が法尻近くを通る市道です。
地震後の応急復旧でこの市道の舗装を
壊していますが、この市道は地震後
には青い線のところまで水平移動を
してしまいました。スライドの下側に平面



スライド - 28

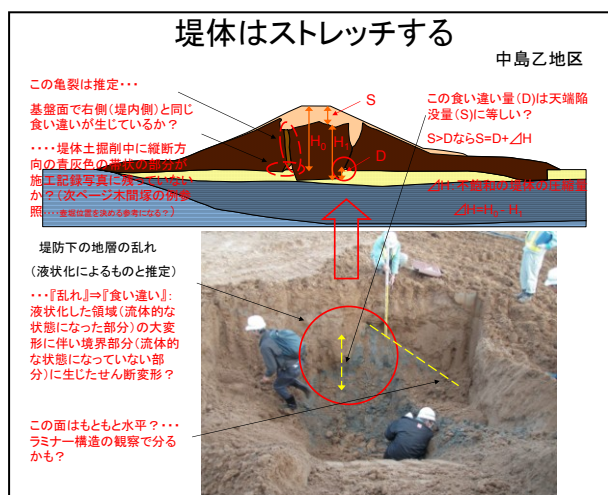
図が示してあります。小段を通るやや幅の広い道路は県道です。市道の水平移動量の最も大きいところは後ろに写っている家屋の近く、平面図ではここになりますが、県道の舗装に現れた沈下区間（堤防小段の沈下区間）は平面図にハッチをした部分で、市道（法尻）の最大移動箇所とはずれています。堤防の小段が下がるということは、その下の土がどこかに逃げているというか、移動しているわけですが、区間全体の堤防と周辺地盤の変形状況を見ると、小段の下がったところの横断方向に移動しているのではなく、市道の最大移動位置に向かってこう回り込んでくるという三次元的な挙動が起こったことを示しています。

二次元断面で解析的に検討する場合に、堤防縦断方向のこうした土の移動による変形も起こり得るということを意識して代表断面を選んだり、解析結果を解釈して対策に反映さ

せることが必要ではないでしょうか。

次に、堤防の止水機能の低下という視点からのこの地震の経験に話を移します。先ほど過去の事例でストレッチが起こるということをお話しましたが、そういうものがやはり鳴瀬川、江合川でも見られています。

中島乙という箇所の開削調査の途中段階の写真です。堤防底面と思われる粘性土層と砂層との境界面は大局的には全体が沈下しているようですが、局所的には逆八の字型の堤体内亀裂の延長と思われるところで下の写真にあるような食い違いが観察されています。この局所的な食い違いの部分は無視する

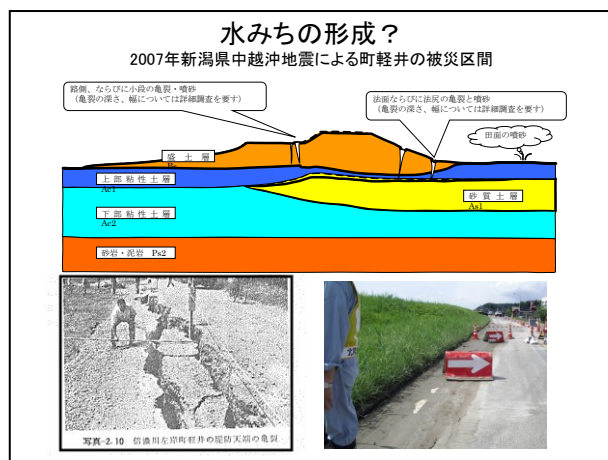


スライド - 29

としても、底面の沈下と天端の沈下量は同じであるかどうか気になります。底面の沈下量より天端の沈下量の方が大きいのではないかと考えられますが、そうすると堤体の横方向への伸びが大きくて鉛直方向には圧縮されている変形を生じていることになります。このような変形によって堤体の止水機能はどれだけ影響を受けているのか解明するに十分な観察事例は集まっていますが、少なくともこの図に示した左側の亀裂は将来的に水みちになる恐れはないかという視点で評価する必要がありますのではないのでしょうか。

昭和 39 年の新潟地震で被災した信濃川の左岸町軽井というところで平成 19 年の新潟県中越沖地震で再び堤防被災が発生しました。この被災区間は漏水の見られる箇所というところで中越沖地震の前には重要水防箇所調書に記載されていた区間です。被災状況から判断して、堤体の下の砂層が液状化のみならず透水層として堤防の洪水時の安定性に危険を及ぼす可能性のある状況ではなかったかと懸念されるわけです。

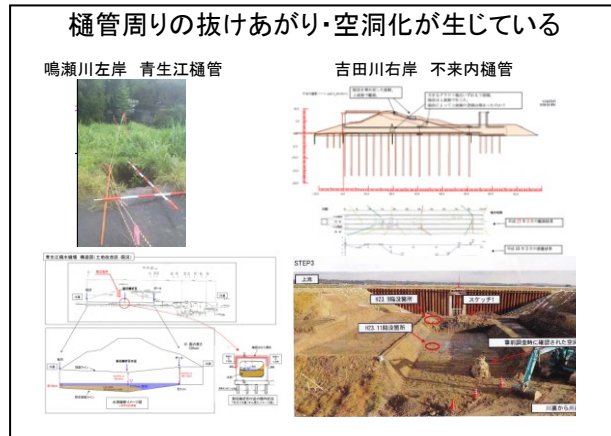
止水機能の低下という視点からもう一つの東北地方太平洋沖地震で新しく



スライド - 30

見られた事例をあげます。樋管周りの堤防天端や法面に穴が開いた陥没現象です。先ほどの事例の鳴瀬川左岸下中の目の長距離流動の箇所直上流に位置する青生江樋管と、吉田川右岸の不来内樋管です。青生江樋管では震後の調査によって、堤体拡幅時の樋管継ぎ足し部分である中央付近で折れ曲がって沈下していることが見つかり、心配しておりましたが、平成 23 年（2011 年）9 月に台風が襲来し、その降雨の最中に堤防天端に陥没が起きました。吉田川の不来内樋管では地震後に異常は報告されておりませんでした、やはり 9 月の台風時に堤防の裏法尻ならびに川裏側の法肩付近の法面に陥没が起きました。いずれも基礎杭を有する構造ですので、長年の間の抜け上がりとか空洞化も堤体表面の陥没に影響している可能性があります、原因調査は現在進行中の状況です。

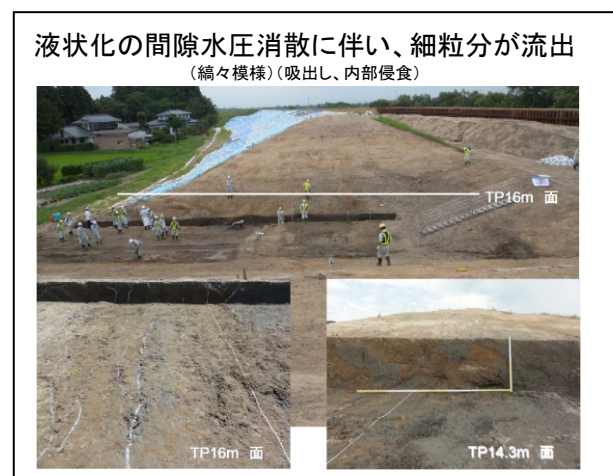
空洞化につながる事象としては、浸透流による選択的な吸出し現象についても目を向けなければならないのではないかと考えています。浸透流の原因としては降雨や洪水時の浸透流と液状化後の間隙水圧消散時の上向き浸透流があります。このスライドは下中の目の開削調査時の写真ですが、ベンチカット面に堤防縦断方向の縞々模様（濃い灰色の細粒分）が残されていることが観察されました。これをどう理解するかなんですが、間隙水圧が消散するときには水が移動する、水だけが移動すると思いがちなんで



スライド - 31



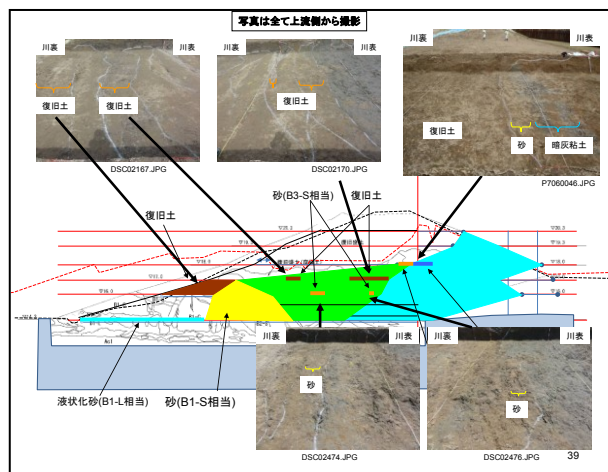
スライド - 32



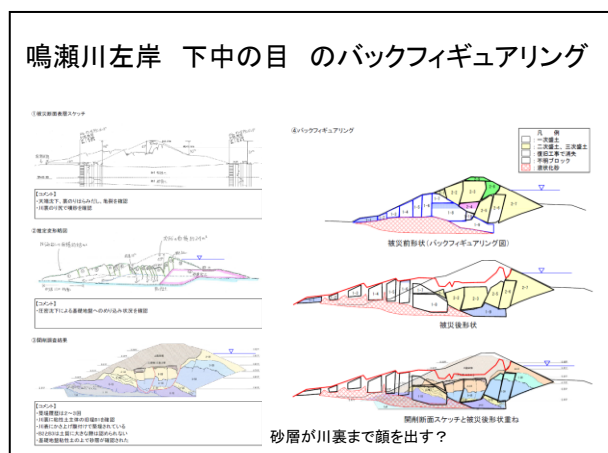
スライド - 33

ですが実際は水と細粒分と一緒に移動しているということを示していると思います。ということは、水が抜けた砂の層の粒度組成は細粒分が失われるわけですから透水性も状況によっては変化する可能性があることになります。地震の後で水みちにつながるようになるのかどうか、少々細粒分の流失は無視して良いのかどうか確認をしなければならない項目の一つだろうと思います。

地震被害の復旧に当たって傷んだ堤体だけを直す場合があります。被災の原因を除去しないで堤防の形だけを直す原型復旧に潜む危うさの懸念です。このスライドは鳴瀬川下中の目の被災調査結果をもとにして、ジグソーパズルと同じような要領で推定したバックフィギュアリングの結果です。下中の目では全断面切り返しを行い、地盤改良もしています。したがって原型復旧に潜む危うさは残っておりませんし、全断面切り返しであったから、このような開削調査の実施が可能となった区間です。ここでは、液状化部分が大変形して堤体が分断されたわけですが、大変形した液状化層は砂の層であって、水を通しやすい層が川裏に顔を出すとということになります。



スライド - 34



スライド - 35

仮にこのまま堤体部分だけを復旧した場合には、切り返し範囲の設定次第で川裏まで顔を出した堤体の下の透水層が残ることになりますから、天端や法面に現れた変形の裏に隠された堤防機能にとっての支障・悪条件をどのように理解するかが大事になります。

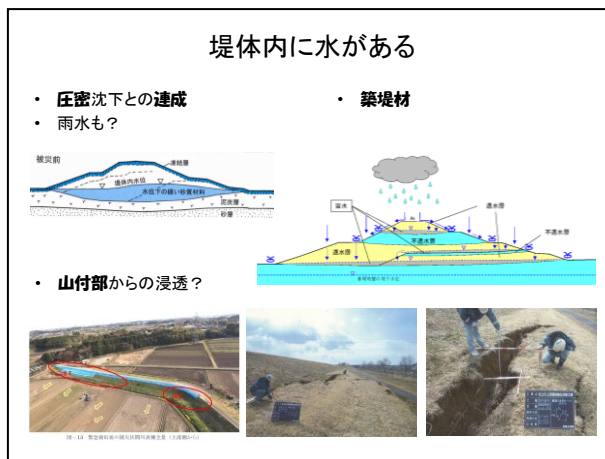
似たような事例が次のスライドの下段に示す久慈川で起こっています。この箇所では堤体の下部で液状化が起こったことが疑われる箇所ですが、復旧は基礎地盤の液状化変形防止の鋼矢板を法尻に打設し、堤体形状を原型に戻す工事が行われています。ここでの浅い

地下水位の涵養源を探ってみると、この箇所が山付き区間であって台地のはずれにある井戸の水位が高いことが確認されましたから、この台地から地下水が供給されている可能性がかなり高いと考えられます。

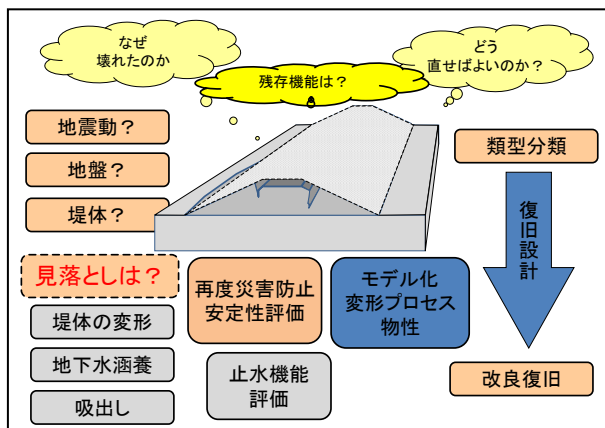
堤体内に水があるという点に関して全く別のタイプの地下水涵養ですが、一関遊水地の事例が観察されています。ここでは 15m 近い高さの堤防が築造されていますが、何年にもわたる築堤工事であり築堤材料が施工年度によって異なっていて透水性の異なる土が用いられているために水平成層をなしています。堤体の中の難透水の土層の上の砂質系の層では

雨水の浸透した水が滞留するような状況になっていることが今回の地震の後の調査で判明しました。一関遊水地で起こった堤防の亀裂や法面の一部がはらみだすという被災はどうもこんな堤防構造に原因がありそうです。

いろいろ新しい事象も見られましたが、地震直後からのこの 2 年間はどうか復旧するかということが大命題でしたから、新しく認識された課題を細かく分析する時間的余裕は少なく、時日が経過しました。東北地整では復旧設計に当たって、スライドに示すように被災主因を地震動・地盤・堤体到大分類し、被害の大小ならびに、土の液状化は堤体で生じたのか地盤で生じたのかを検討して、再度災害の防止を復旧目標にすえ復旧設計を行い、工事を実施してこられました。復旧の現況の中で気になりながら残っている部分を灰色で示しています。堤体の圧縮量の算定は変形予測の解析の中で不十分と感じている部分ですが、実態はどうであったか、また、地下水の涵養源はどこにあったのか、あるいは縞々模様と表現した細粒分が吸い出される痕跡・亀裂や砂層の変形など堤防の止水機能への影響という問題については実態分析がまだまだ必要なことではないでしょうか。



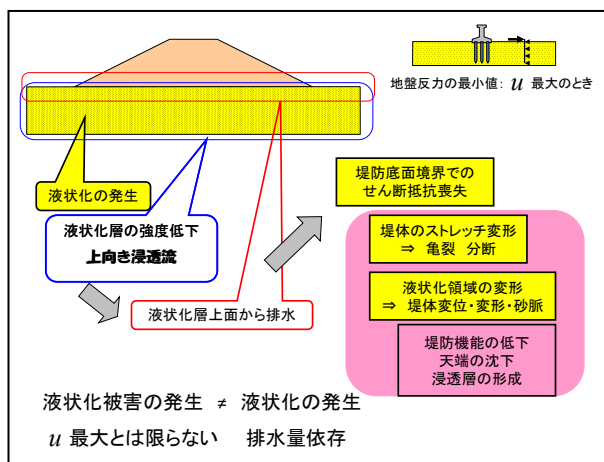
スライド - 36



スライド - 37

もう1点、ちょっとブルーに書いておきましたが、復旧設計の段階で実務を実行するコンサルの方々は、事前補強のために法先を地盤改良するという設計の経験は有していても、全断面切り返しのような箇所の復旧における地震対策設計（堤体の下のかなりの幅の部分の地盤改良できる状況）については設計の経験が乏しいためでしょうか、既設堤防の耐震補強で経験されている法先補強の考え方が優先しているという印象を強く与えるものでした。

抛り所となる国交省・土研のお作り



スライド - 38

になったマニュアルの充実が必要のように思います。考えてみたら、堤防は古くから作られたもので、状況によっては長年の間に品質が悪くなっている区間も混在している、そういう機能が不十分と思われる区間が地震によってあぶりだされたと捉えれば、全断面切り返し区間を根本から強化することのできる又とない機会でもあるわけです。聞きようによっては語弊があるかもしれませんが、そういうことを考えて復旧の設計を行う、という姿勢が必要だと思います。

そのためにも、実際に起こった事象の変形のプロセスだとか、

第二部のまとめ

- ・ 長時間地震動／広域
- ・ すぐには対応困難 実態把握の迅速化・対応の効率化(戦略性)への準備
- ・ 津波の越流で堤防全部が壊滅するわけではない
- ・ 東北の堤防被災率は14%、津波区間だけでは？
- ・ 既往対策区間での被害軽減
- ・ 長距離流動 …… 火山灰質土ゆえ？
- ・ 地域性 それとも 振動継続時間？
- ・ 三次元的流動も生じている
- ・ 天端沈下量の大小に液状化流動のみならず堤体変形も寄与
- ・ 樋管周りの抜けあがり・空洞化
- ・ 浸透危険性も増大？
- ・ 液状化の間隙水圧消散に伴い、細粒分が流出する(縞々模様)
- ・ 研究動向(吸水変形、内部侵食)

スライド - 39

「変形過程」の理解の不足 不十分さ

従来の考え方

- ・ 堤体内地下水面考慮せず
- ・ 変形の発生は主要動終了後に、一気に(簡易判定法)
- ・ 堤体は分断しない
- ・ 天端沈下量の大部分は液状化領域の流動変形
- ・ 土砂収支は二次元断面内でバランス(非排水変形)
- ・ 止水機能の低下度合い計量尺度は天端沈下量で充分
- ・ 樋管への影響

検討を要する事項

- ・ 堤体内地下水面・堤体内滞留水が存在
- ・ 振動台実験では加振中に累積的に変形が進行、江戸川の事例では終了間際に一気に
- ・ 多くの箇所では堤体分断(淀川西島、鳴瀬川下中の目ほか)
- ・ 堤体の分断、分断土塊の主働崩壊型変形も発生
- ・ 横移動(堤防縦断方向)も考慮(関宿、下中の目)
- ・ 堤体の分断(亀裂の発生位置)、分断土塊の主働崩壊型変形も加算の必要性？ 流動変形に伴う砂層(透水層)の状態変化も評価の必要性？ 【地震時変形と浸透安全性の関連性】
- ・ ストレッチの影響(十勝川・大津市街樋門)

スライド - 40

そこに残っている堤体土や地盤の特徴などを適切に反映したモデル化の技術がどうも満足すべき状況ではないのではないかと懸念されますので、これを充実させることが大切だと考えています。

変形過程の理解を深めるためには、従来あまりきちんと現場条件を反映させることをしなかった地下水位の深さであるとか、変形が従来の仮定のとおりに主要動の終了後に起こったのか、などといった従来の考え方の出発点にある仮定について、この地震の啓発的な事象を生かしながら将来に生かしていくことが必要であろうと思います。

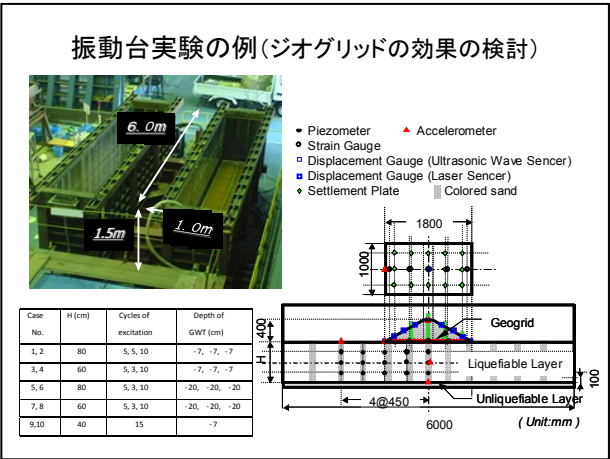
これらの、モデル化とそれにつながる課題、ならびに復旧設計を特に急がれる事項として青色で塗りつぶしています。

さらに、止水機能の低下度合いを天端沈下量だけで評価していてよいのだろうか、堤体が分断するとか液状化した砂層の流動変形など堤体・地盤の透水性・止水性の変化をも評価に当たって考えなければいけない。言葉を換えれば、地震時の変形と、復旧され後々に残る堤防の浸透に対する安定性とは、

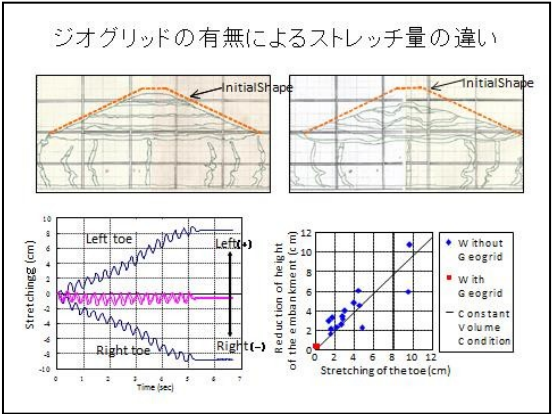
非常に密接に絡む問題として認識をしなければならないんじゃないかという風に考えています。

先ほどの慣性力を考えなくていいのかという問題に関連して模型振動実験の一例をご紹介します。

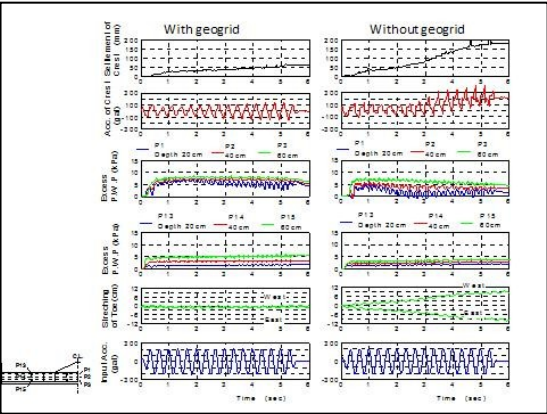
実験は液状化する地盤の上の堤体変形を抑制する目的で堤体下部に敷設したジオグリッドの効果を吟味するもの



スライド - 41



スライド - 42



スライド - 43

ですが、この図は変形の計量尺度として法尻の水平移動量の時間的変化です。先ほどお話しした解析計算の一つのグループでは液状化した時に地盤の剛性が低下して、その途端に堤体変形が起こると仮定していますが、この実験では加振中に変形が時間の経過につれて上がっていきます。ここでは変形量の計量尺度として法尻の水平移動量（ストレッチ量）をとっています。その時間経過は加振継続中は増加し続け、加振停止とともに止まります。つまり液状化した後の変形も慣性力的作用によって増加しています。

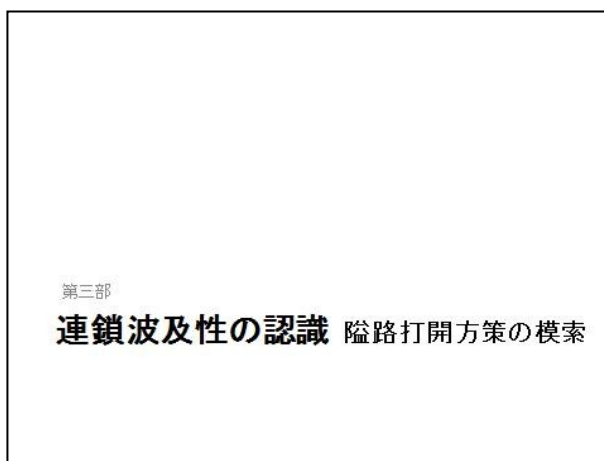
変形予測の簡易計算法では液状化した時に一気に剛性が小さくなって、剛塑性的な変形をするという近似をしているわけですが、今回の地震のような長時間の地震動の場合には、もう少しこのような経過、すなわち間隙水圧上昇後の加振の影響、も考慮に入れながら、地震後の低下させる計算上の剛性に反映しなければならないと考えています。

第三部 さて最後に、連鎖波及性の認識という点についてお話をさせていただきます。

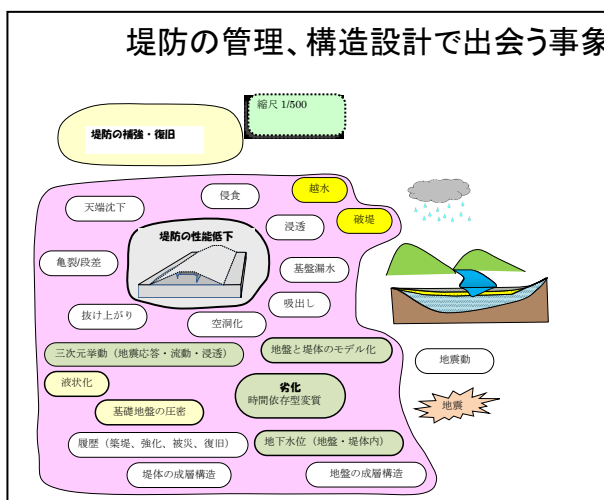
東北地方太平洋沖地震で見られた事象に接して感じたいろいろな課題を申し上げましたけれども、最後の結論はいろいろな事象の間のお互いの関連性をもっと認識する必要があるという点につきます。

堤防の構造設計にまつわる地盤工学的な知識の数々を拾い上げてみました。堤防の性能劣化につながる事象には、亀裂、天端沈下、抜け上がり、空洞化、降雨・洪水時の浸透、侵食などなどがあります。

性能劣化のプロセス、要因を考えると、下半分に示したように、基礎地盤・堤体の成層構造、地下水などがあり、さらには雨水の浸透によって選択的吸出しのような現象が起これば堤体は時間的に劣化しますし、地盤の圧密沈下に伴うストレッチ変形などによっても時間的な堤体の劣化が生じます。



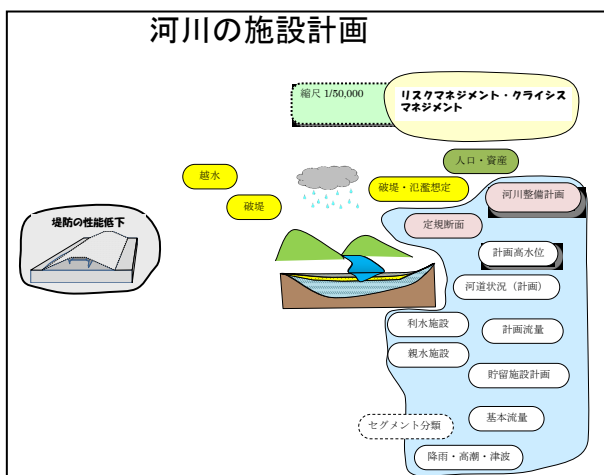
スライド - 44



スライド - 45

これらの初期条件・境界条件をいかに適切にモデル化して設計に引き渡すかというところが一つのポイントだろうと思います。

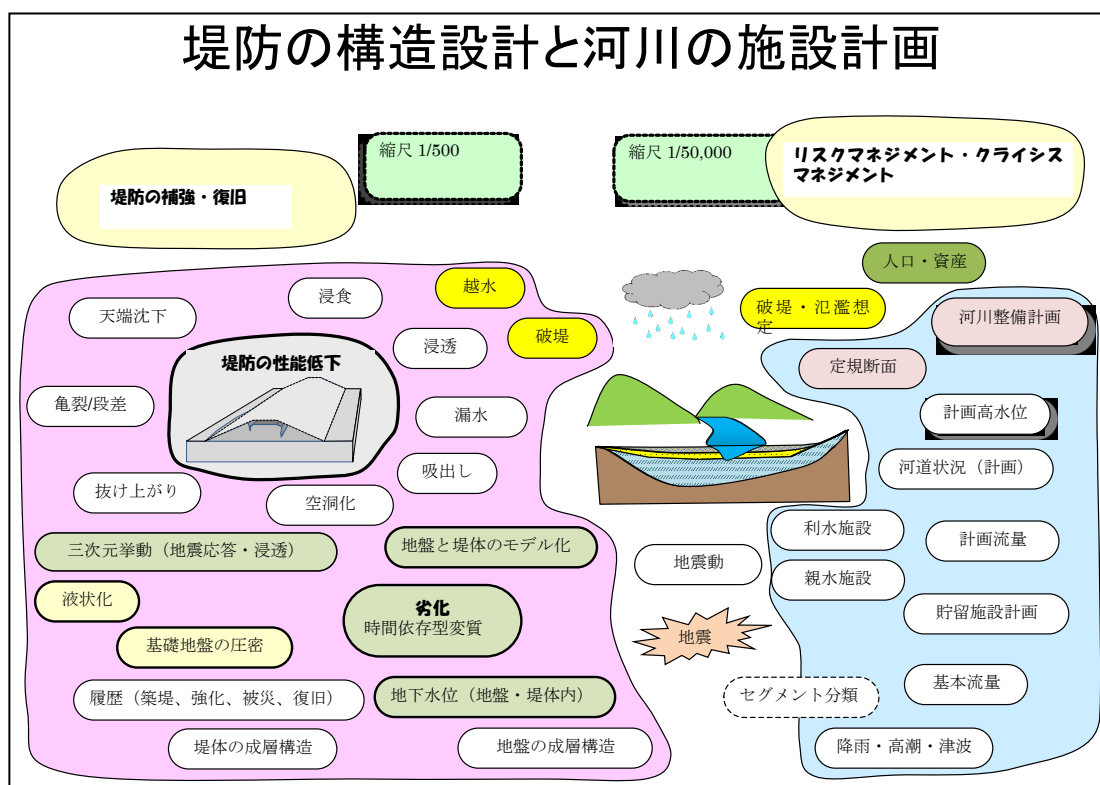
次のスライドに、先回の辻本先生の基調講演でお話をいただいた河川の施設計画を私なりの理解の範囲で示してみました。降った雨水から基本流量を定め、計画高水位を求めて堤防の定規断面を定める。こういう手順で考え、堤防背後地にももしも溢れてきたらどうするか、多分、



スライド - 46

リスクマネジメントの問題だろうと理解をしていますが、間違っていたら後でご指摘をいただきたいと思います。

河川の施設計画と堤防の構造設計を重ね合わせて、必要知識が十分かどうか考えてみると、二つの領域の間には何かしら乖離がある。受け渡しがスムーズにいけない何かがある。それは何だろうか……。頭を悩ませました。先の二つのスライドを重ね合わせてみます。



スライド - 47

施設計画では縮尺で表現をすると大体、5 万分の 1 くらいで、検討対象は流域空間を対象に検討する、構造設計の方は 500 分の 1 とか 200 分の 1 くらいの縮尺で横断形状を対象に検討する。縮尺に関して 100 倍くらいスケールの違うものを考えていることになります。しかも、堤防の構造検討では、先ほども指摘したように、堤防縦断方向の 3 次元的条件変化や外力に対する 3 次元の挙動は設計では考えていません。

二つの領域（河川工学・水理学と地盤工学）の受け渡しのために一体どういう点に配慮しながら工夫したらいいんだろうか、縮尺の違いはこんな疑問に答えを見つける鍵のひとつであるように思います。

地盤工学の立場から言うと、堤防の治水機能というのは大きく分けて断面欠損と品質劣化の二つを検討・吟味しておくという立場で取り扱います。これに加えて、どれだけの洪水、水位を流せるかが付加されるべきと考えます。

このスライドの下の方に青字で書きましたが、両方のフィールドの受け渡しの円滑化・連続性のために、従来用いてきた地盤工学的安定性の検討結果を「逆算安全水位」のような堤防機能を洪水処理に直結する指標に置き換え

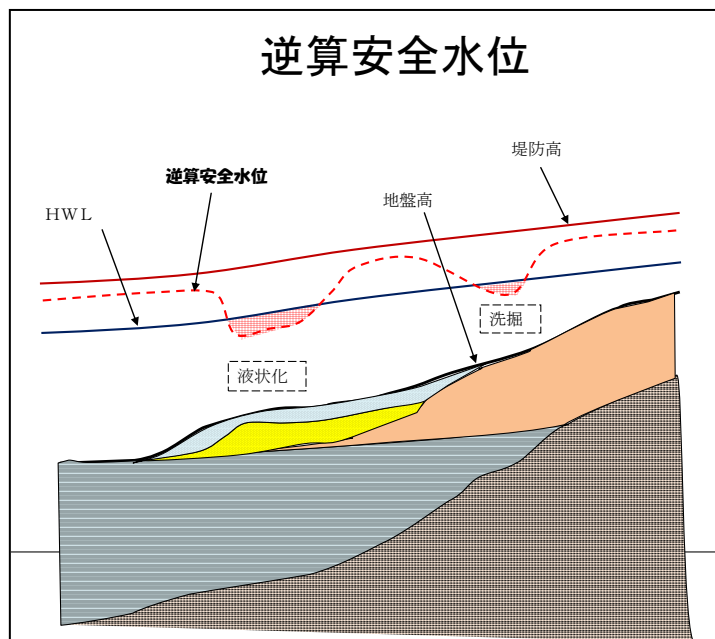
て提示するという方法を考えてみました。逆算安全水位の概念を河道縦断図の上で示したのが次のスライドです。

先般堤防のリスクアナリシスの検討結果をご説明いただいた本城先生の表現方法に準じたものですが、違いは縦軸に断面安全率ではなくて水位を取っている点にあります。計画高水位があって、堤防・地盤の止水機能を逆算すると、例えばこの辺は

堤防を取り巻く事象

- ・（断面欠損の種類一直接原因別）：
 - ・ 締固め不足による堤体圧縮
 - ・ 洪水や雨水の侵食による断面欠損（高さ不足につながる、法裾の洗掘により主働崩壊）
 - ・ 地震時変形による断面欠損（高さ不足）
 - ・ 《基礎地盤の圧密沈下》による高さ不足
 - ・ 《基礎地盤の圧密沈下》による抜け上がり …… 堤体断面なのか地盤を含めた断面なのか
 - ・ 浸透流の《内部侵食》による空洞化
- ・（堤体の品質劣化の種類一直接原因別）：
 - ・ 吸出しによる粒度の変化（止水性低下）
 - ・ 液状化流動による透水路の形状変化（分断化、止水性劣化）
 - ・ 応力緩和による液状化強度低下（拘束応力の低下）
 - ・ 亀裂充填不足による雨水浸透能の増加
 - ・ 保水性による堤体内滞留水（洪水時の初期状態の悪化）
- ・（堤防機能の評価）：堤防の性能とは定規断面！ ⇒ 逆算安全水位？ 縮尺の問題 到達目標の問題 災害の進化 浸透・侵食・地震の区分でよいのか 区間分けをどう考えるか

スライド - 48



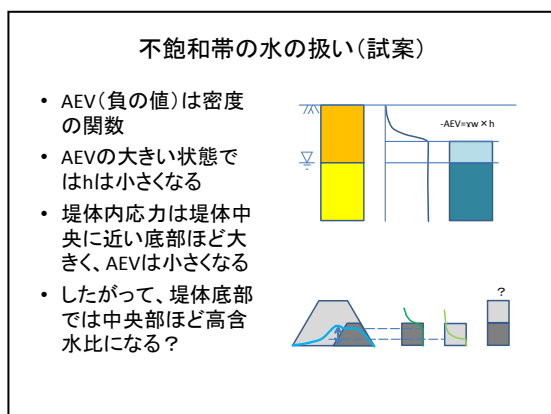
スライド - 49

洗掘で危ない、この辺は液状化で危ない、といった地盤工学的な検討結果が得られます。得られた検討結果を従来は平面図で表現することが行われてきましたが、これを治水計画的評価に直接活かせる逆算安全水位として提示したらどうかと考えたわけです。

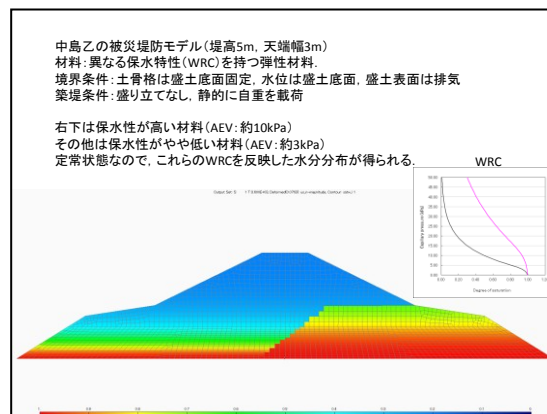
次に堤体の中の地下水が高い理由は何故だろうかという問題を取り上げてみます。スライドは堤体の深さ方向の飽和度分布を示したものです。ここで飽和していて飽和度 100%、その上位に空気侵入値に相当する深さまで、ほとんど飽和に近い地下水がある。液状化するのはいくつかの部分まで含めた挙動のように思われるわけです。堤体横断方向で真ん中が高くなるような水というのは計算上は再現が難しく、定常状態では水平になるようです。

しかし、既往の震災事例でもそうですが今回の被災箇所のいくつかでは、現場でボーリングしてみると高い水位が堤体の中に現れています。被害を受けなかったところでは水位がないわけですが、なぜ水位が高い区間と高くはない箇所あるのか、こういう均質な断面を仮定すると説明がつかない。仮に旧堤があって、そこでは空気侵入値の違う材料があるときにはどうなるかということで、昨夜渦岡先生から送ってもらった試算結果を急遽ここに入れてみました。

雨水の浸透による堤体内飽和度分布が、実務上定常状態と近似できるに至るまでの必要な時間のほかに、堤体内の保水性の違いが飽和度分布にどんな影響を与えているのかも明らかにしておくことが必要ではないかと考えたわけですが、こういう考え方が妥当なのかどうか先生方のご感想をお聞かせいただければと思います。



スライド - 50



スライド - 51

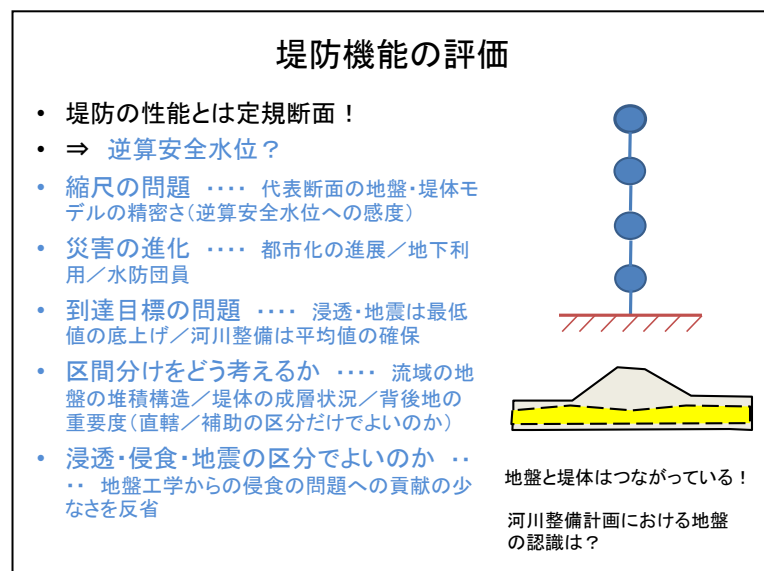
従来堤防の性能は定規断面を満足すれば充足されていると考えてきたわけですが、これを逆算安全水位の概念を取り入れて考えなきゃいけないんじゃないか。そのように考えて堤防機能の評価の課題をこの図(堤防機能の評価のスライド)に整理してみました。縮尺の問題。災害の進化、これは小さい字で書きましたが流域の都市化、地下利用の進展など

流域の社会の時代的变化ですね。到達目標の問題というのは流域全体を評価するときに、連続的に変化する堤防の状態をどう織り込むかということで、区間分けをして区間ごとに代表断面のモデル化をする。そのモデルの予測挙動に基づいて判断をしていくということで、区間分けというキーワードを書きました。提案した逆算安全水位は、いろいろなロジックと手法によって計算結果が異なると思いますが、計算条件がどのくらいの精度で水位に影響を及ぼすかということが最終判断をする治水計画の立場から多分必要になるんじゃないかと思います。そういう意味で縮尺の問題と書きましたけれども、5 万分の 1 で表現をして、区間分けをどのくらいで考えるかという問題。区間分けを考える上では都市化の進展とか、流域内の地下利用（ダメージポテンシャルの変化）だとか、都市化が進んで水防団員が集まらないとか、こういう状況も判断対象の一つになっていくだろうと思います。

また、到達目標を考えると、今の質的強化というような問題や、あるいは地震の事前補強のスクリーニングは、縦断方向で変動している**最低値**を引き上げようという基本的立場で考えて

いるのに対して、いわゆる河川計画・施設計画は**平均値**を目標に合うように整備していると考えているという違いもあるように思います。そういう到達目標が異なっている点をどうにかして整合させた中で、堤防機能について両者がうまく議論できるような状況を考えなければいけないんじゃないかと思います。で、区間分けというのはどう考えればいいのか、現状では、流域の堆積環境・成層構造とか堤体の地盤工学的特性とかで区間分けをし、背後地の重要度に関しては直轄・補助の区分けとなっていますが、もっと細かく細分した堤防構造の分類を考えなければいけないという、青山元治水課長の主張（何種何級というような分類）に共感を覚えます。

なお、前回 JICE から ET や FT を使って堤防の技術問題の検討を進めたいというご提



スライド - 52

案がありましたけれども、そのベースになっているのは、冒頭にご紹介しました昭和 50 年代の浸透・侵食・地震という三つの区分けにしたがって調査から設計に至る問題点を整理するという考え方を踏襲しているように受け止められます。

そうであれば、すでに質的整備の目標まで到達をしていて、今いろいろなことが分かってきた段階ですので、もう一度この三つの仕分けを見直す必要はないだろうかということも感じています。地盤工学分野で侵食の問題への技術的解明がどの程度進んでいるのか不勉強のまま、スライドには貢献の少なさを反省と書いてしまっています。

今回のお話をする準備段階で、前にお話いただいた諸先生の基調講演を読み返させて頂きましたら第 1 回目の時、中島さんは「堤防と地盤はつながっているんだよ」と極めて核心に触れるご発言をなさっていました。右側の串団子の絵は、地震工学分野の古くからの笑い話で、構造系の人たちは構造特性の詳細な検討のためにバネと質量を詳しくモデル化するがそれを支える基礎地盤に関しては水平線を 1 本引いてここから下は基礎地盤！と単純化してしまう。しかし、地盤の土層構成や力学特性によって、構造物に入力される地震動特性そのものが左右され、構造物の応答は違ったものになる可能性があるので、これではバランスが取れていないということになります。堤防問題も、河川工学と地盤工学の間で似たようにならないことを祈りたいと思います。

そんな次第で、堤防と地盤はつながっている、河川整備計画の中での、自然状況の記述の中の地盤や堤体の地盤工学的特性についての記述部分のさらなる充実を期待して、本日の標題を「治水のための土の理解」とさせていただきました。

まとめはもういらないと思いますが、天端隆起とか、液状化後の地盤を被圧と誤認するような問題に対して、地盤工学の力不足の部分もありますけれども、破堤は河川計画において織り込み済みという辻本先生の問題指摘に

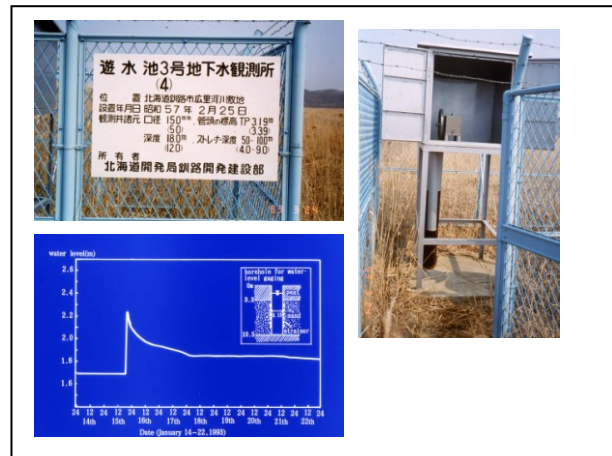
まとめ 課題解決へのみち

- 天端隆起: 手引きにおける形態分類に描かれていない事象に直面した時の判断 …… (何が大事か理解できていない どの部分を報告すればよいか掴めないでいる)
- 被圧 …… 知識普及の不足/解明の遅れ = 体系化の遅れ/解説の不足・不十分さ
- 織り込み済み …… という問題提起
- ⇒ 集約 知識は十分か (自問)
- 「変形過程」の理解の不足 不十分さ事例により抽出
- 知識の不十分さの原因は「近似(割り切り)」の適切性の吟味
- 液状化の発生過程のみならず、終焉過程、並びに液状化領域の周囲の土層・堤体への影響の丁寧な解説
- 織り込み済みへの直接回答 ⇒ 計量指標「逆算安全水位」への換算可能性
- 割り切りの不適切性解消/換算可能性「連鎖/連成/相互作用を考えてみる！」

スライド - 53

関しては、治水安全度の評価項目・計量指標を吟味するとか逆算安全水位のような表現手法を導入することによって技術の進展を図る必要があるように思っています。そのときにいろいろな事象の間の連鎖とか連成とか相互作用を考えなければいけないんじゃないかということでもあります。それで、「連鎖波及性の認識」のお話をさせていただきました。

なお、蛇足ですが、江戸川のボーリング現象に関連する参考資料として、釧路遊水地に設置してある水位計の記録によれば、釧路沖地震の翌日でもまだ上昇した水位は低下しきれず、間隙水圧の低下に時間がかかることを示した図が残っていますことをご紹介してお話を終えたいと思います。



スライド - 54

整理不十分な話にお付き合いいただきましてありがとうございました。