

次世代型堤防技術への期待

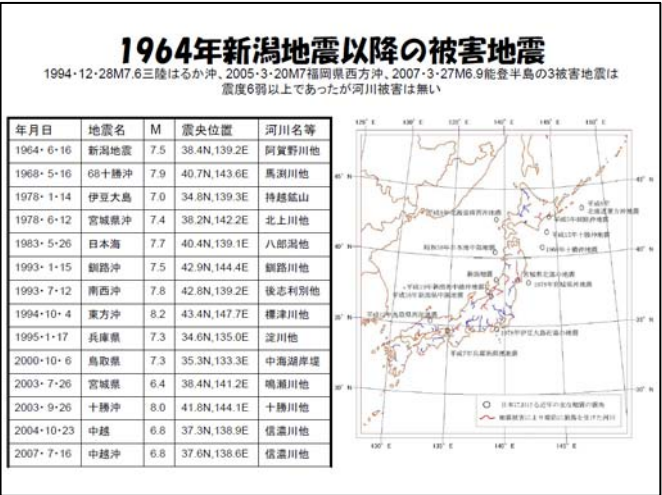
佐々木 康
(財)国土技術研究センター
技術顧問
(広島大学 名誉教授)



それでは、少しお時間をいただきましてお話をさせて頂きます。前回中島先生から伺った堤防技術の変遷のお話の中で僕の印象に残っているのは均一というか、画一的な断面でない外国の堤防例がいろいろあるよとご紹介いただきました。青山課長から、特別区間的な治水上の区間の区分け、区分の仕方が要るのではないか、堤防区間の考え方というのは従来の考え方でいいんだろうかというお話をいただきました。また、ただいまは宇野先生から格調の高いお話をいただいた後で話しづらいのですが、事務局からいただきました宿題は、地震についてとにかく話をしろということでございます。

次世代型堤防技術への期待

平成21年3月10日 国土技術研究センターにて
佐々木 康 (広島大学名誉教授)



ちょっと色が薄いんですけど、この図に新潟地震以降の我が国の河川堤防に被害が起こった地震が示してあります。ざっと拾い上げてみますと14地震ございます。被害地震の範囲は西が、中海、北のほうが石狩川の堤防まで、かなりの広範囲に広がって生じています。取り上げた地震被害のほかには震度6の地震が、例えば能登半島沖地震だとか、幾つかあるんですけども、河川堤防に被害がありませんからそういうものを除いたものを示しています。それでもこれぐらいございました。

こういう地震によって、生じた被害経験をもとにして堤防へ何か提言はないかというお話をいただいたんですけれども、私が知っているのはわずかなことであり、あまり大したことも勉強していないので、お伝えしたいことというものを書き出してみました。ここに書いてあるような、「モノサシ」として我々は適切なものを持っているのかという反省が大事なポイントのひとつです。いろいろ考えてみると、固定観念から脱却する必要があるのではないかとということで、むしろ次世代にバトンタッチをして、次の世代にお願いしたいという申し送りみたいな話を、させていただこうと思います。

幾つかの事例をご覧いただきたいと思いますが、78年の宮城県沖地震で、鳴瀬川の支川の吉田川左岸の山崎堤防でこんな亀裂が生じました。この区間は、昔の築堤時にお化け丁場と言われたところで、軟弱地震の上に盛った堤防区間の場所だったそうです。私のお師匠さんである山村先生が駆け出しのころに、ここでの築堤に随分苦勞した箇所だということを聞いたことがあります。後にお話しします泥炭地盤で、堤体の液状化ということが起こりますけれども、ここもひょっとしたらそういう区間だったのではないかと、釧路沖地震を経験した後思い出したんですが、残念ながらまだ十分調べにいく機会がないままになっています。

淀川の西島築堤（1995年兵庫県南部地震）



与えられた標題は
「地震面からの堤防への提言（仮称）」
であるが……。

……次世代への期待。

お伝えしたいこと

- ① われわれは適切なモノサシを手にしているか？
- ② 『適切』な工法は、本質的に『サイトスペシフィック』
- ③ 置かれた状況の中で、『最良』のモノツクリを
- ④ 『最良』を確認するモノサシの入手
- ⑤ 『固定観念からの脱却』

吉田川の山崎堤防（1978年宮城県沖地震）



次に、堤防の地震被害の例で忘れてならないのは、淀川の西島の堤防です。この地盤の特徴は、地表から10メートルぐらいの深さまで液状化する可能性のある地盤が堆積している。その地盤が、地震によって支持力を失ったために、結果として、その上に乗っている堤防が壊れてしまったと、こういう例です。

これは、淀川の例よりも2年ばかり前の釧路沖地震のときに十勝川の統内築堤というところで、地震が1月15日の夜ですけれども、翌日撮った写真です。その翌々日に雪が降って我々が行ったときには、こういう雪のない現場の写真というのはなかなか撮りづらかったんですけれども。

それから、ちょっと時期が前後しますが、八郎潟の干拓堤防で、左の上にあるような大きな噴砂が法尻に生じました。この噴砂が出ている場所というのは、下の部分のこの道路のわきになるんですけれども、こんな場所になります。八郎潟のもともとの軟弱粘性土が厚く堆積しているところで、湖底にある砂をしゅんせつして、ここへ置きかえて、その上に堤防をつくっていますから、淀川の例の10メートルほどありませんけれども、堤体の天端の直下にはかなり厚い砂の層がある。

十勝川の統内築堤（1993年釧路沖地震）



八郎潟干拓堤防（1983年日本海中部地震）

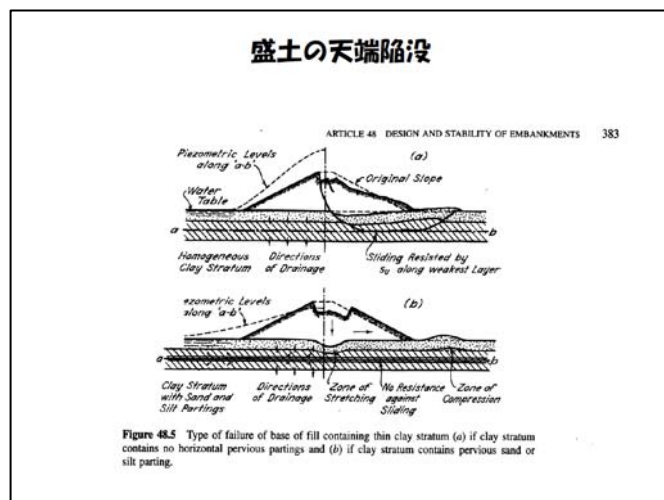


もう一つ、ちょっとご注意いただきたいのは、そういうところで壊れた破壊形態です。ここに洗濯板みたいに幾つか、1列、2列、縦断亀裂が入っていますが、縦断亀裂の亀裂面の傾斜に注意して見ていただきたいと思います。いわゆる円弧滑りで滑っている滑落崖の一番上に当たるところとは逆の方向で、堤体中央に向かって傾いているという壊れ方をしています。

似たような話ですが、93年の後志利別川の兜野築堤というところでは、後志利別川の河口から1キロ弱のところの左岸側にこういう兜野築堤というのがあって、天端が中央に向かうような傾斜に沿って滑って陥没をしているといったような被害が生じました。空から見ると、天端が白く映っていますけれども、縦断亀裂が入って、洪水時期にはばらばら噴砂が見られ、こちらの法尻にも噴砂がございます。



こういう天端が真ん中がどすんと下がってしまって、両わきが残るような壊れ方というのは、実はそうたびたび見られる例ではないんですけれども、教科書にも実は似たような盛土で破壊をするという例が示されています。テルツアギベックの教科書の383ページをコピーしたのですが、軟弱地盤の上に盛土をこうすると、この軟弱地盤には、上の圧密荷重に応じて、この三角形のような間隙水圧分布が生じます。破線をしてある部分が間隙水圧分布です。天端の直下に相当するところで水圧が最も高くなるから、このハッチしてある部分の層の強度が天端近くで一番低下量が大きくて、結果的にこういう円弧滑りみたいな壊れ方をすると。

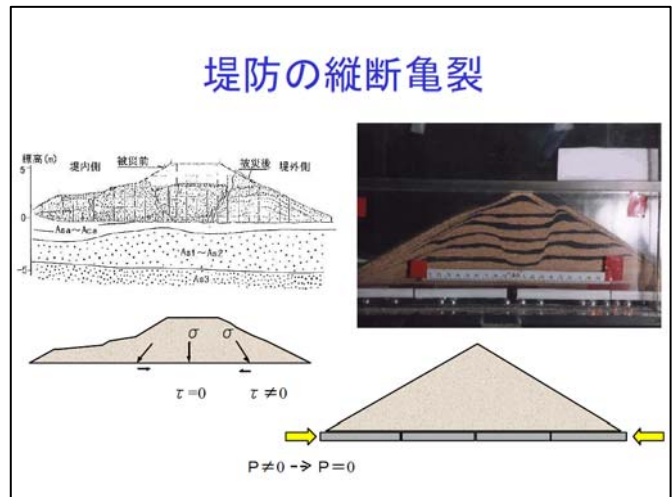


もしも、この軟弱地盤の中に、下ですが、薄いサンドシームがあったら、厚い圧密荷重で生じた間隙水圧は法尻のほうにも伝播されますから、間隙水圧分布というのはフラットになって、相対的には法先のほうが地盤のより大きな強度低下をもたらすようなことになる。そういう場合には、法先が横へ広がって天端が陥没する、いわゆるストレッチというタイプの被害が生じるよということが、実は後になってわかった話なんです。

テルペクの本に気がつくより先には、申し上げたようなメカニズムで起こるんだらうと推定しまして、4枚の板の下へパチンコ玉を並べて盛土をつくって、そして、横から拘束をしていた力を緩めると、もともとこういう法面の下には水平方向にこの白い板を押し出すような力が働いていますから、横方向に広がって、こういう落ち込みが全く似たような形になる。

最近また地震断層のことをいろいろ調べてお

りましたら、この手の破壊というのがストレッチと呼ぶのがいいのか、あるいは地滑りとか、地形学のほうでは、グラビティグラーベンとかいうようなことを言うそうですが、むしろそういうほかの分野との、同じ現象をどういうふう理解をしているかということをもっと知る必要があるなと感じている次第です。



2003年には十勝沖地震が生じて、これは大津の十勝川河口部の右岸ですけれども、大きな滑りが1カ所、2カ所、3カ所、場所によってはこの辺の一番下流のものが人家に近いものですから、大いにマスコミに宣伝されたところです。今日時間がないので、あまりお話できませんが、ここにちょっとした橋梁（管理橋）が見えていますが、ここの部分が大津市街樋門というところで、こういう滑り破壊みたいなものは生じてはいませんが、先ほどご覧いただいたような

ストレッチ型の変形が起こって、ここの部分の長さ80メートルの樋管が4メートルぐらい長くなっている。液状化した部分だけの伸び、ひずみにしたら2%ぐらい伸びているんですが、堤防の堤体表面には出てこない。こういう被害事例が経験されております。

以上が、ざっと地震のときにどんな壊れ方をするかという話なんですけど、対策をした結果の事例というのはないのか、3つばかりご紹介したいと思います。先ほどご覧いただいた十勝川の統内築堤の、この被害区間のちょっと先なんですけど、逆の方向に向いて写真を撮ると、こういう蛇かごが三段、積んでありまして、大体こういう広い場所ですから地盤条件は、もう少し写真に写っている奥のほうから手前の被害のあったところまで、縦断的にそんなに大きな変化があるわけではありません。

ここは、先ほど冒頭の吉田川山崎堤防で言ったのと同じように、軟弱地盤で築堤のときに地盤破壊を生じて、うまく築堤ができない。したがって、それを抑える目的でこの蛇かごを設置して築堤をした区間です。その結果、蛇かごのドレーン効果で堤体内の水のたまり、堤体内地下水の上昇を抑制することができて、結果的に左側のように抑制できなかったところでは、堤体内地下水が高くなって壊れたのに対し、被害が生じないで済むということがございました。

この場所はSCPで地盤改良しましたから、2003年十勝沖のときには被害を受けないで済んでお



ります。

釧路川の遊水地堤防もSCP改良をやりまして、後ろの山の形でご覧いただきたいと思います。天端の2メートル近い沈下区間がその竣工後、半年ぐらいで起こった北海道東方沖地盤でびくともしないで済んでいると。こんなことです。



3つ目の対策の事例で、中海湖岸堤をご覧ください。中海のここに飯梨川という川が注ぎ込んでいる、この最先端部、拡大した写真がこれですが、飯梨川の河口部に当る区間に湖岸堤を新築することになりました。阪神地震の年に築堤の設計段階でしたから地盤液状化に留意して地盤条件を調べてみると、非常に緩い砂があつて、何もしないで築堤すると液状化によってストレッチタイプの被害が起こりそうということが分かりました。そこでここにありまうように、合成樹脂の網を三段敷く工法を採用

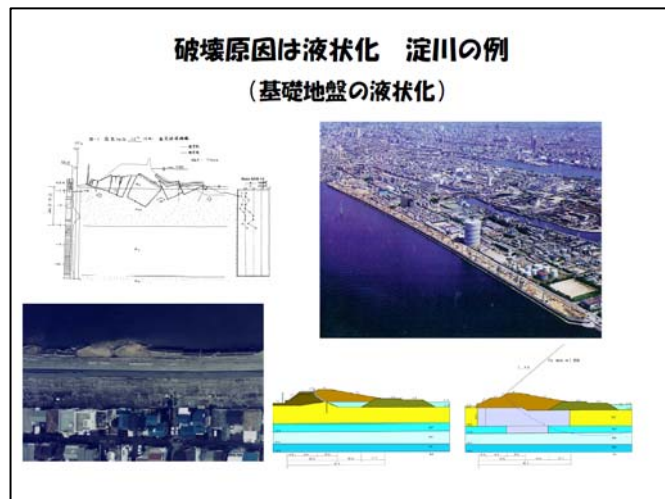
しました。1枚だけでは張力が足りないものですから、3枚設置いたしました。新規の築堤ですからこうい



うことができるんですけども、一番下の段でも、地下水面より上になるようなところにジオグリッドを敷設しました。直ぐに地震に見舞われることはないだろうと思っていましたが、竣工後、4年を経て鳥取県西部地震が起きました。ジオグリッドを敷設した長さ800メートルの区間のうち、170メートルぐらいの区間は1メートルぐらい沈下したけれども、延長にして7割か8割ぐらいはほとんど無傷で被害がなくて済んだという、鳥取県西部地震の事例でございます。

これが地震後の状況ですけども、被害があった区間というのは河口にすぐ続く曲線部、曲がっている部分で、これでわかりにくいんですが、トンパットの1個分、つまり1メートルぐらいの沈下量があると。だけれども、そういう沈下量を縦断的に書きますと、1メートルぐらいのが生じたのはここですが、残りはほとんど20センチか30センチぐらいです。20センチか30センチという沈下量が明らかにされている例は、これは非常に珍しい事例で、こういうジオグリッドを敷いた堤防というのは、河川堤防では初めてのことですし、よく決断されたと思うんですが、試験区間としてやってみようという事で実施されました。

試験区間だから3カ月に1回測量をやっているんですけど、4、5年測量を続けていたところ、突然予期せず鳥取県西部地震が起こったので、10月に起こる前の7月の天端標高というのはきちんと押さえてあると。土堤で、しかも年4回という測量結果が残っている事例というのは、多分世界でもこの1つではないかなという場所であります。



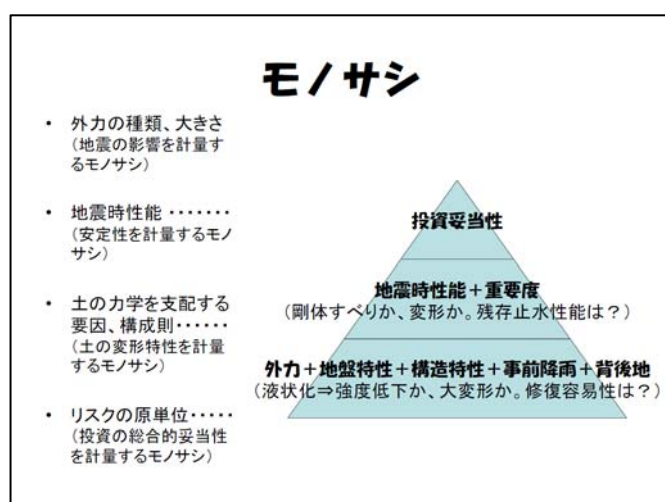
以上、まとめると、地震による堤防被害の典型例のひとつは淀川の例でご覧いただいたように、基礎地盤の液状化が原因で生じます。つまり基礎地盤の液状化で基礎地盤が支持力を失うから堤防が壊れる。したがって設計は、対策のためには液状化する土層を改良してあげて、対策設計はそこの部分の剪断強度の増加を考慮した力の釣り合いを考えればよいということになります。したがって設計は円弧滑り計算をやればよいという考えがとられています。



たびたび出ました、北海道の泥炭地盤上のケースですが、これも液状化被害の典型例のひとつです。実は昭和51年から53年にかけての札幌での勤務中に泥炭が液状化するかどうか試験をやって、液状化は起こらないということがわかっていましたから、液状化被害の典型例というと奇異に聞こえるかも知れません。そういうところで起こる被害というのは、実は泥炭ではなくて、泥炭が圧縮されて堤体が地下水の下にめり込んで起こる堤体土の液状化による被害であります。

つまり、液状化による被害というのは2種類あるんだということを認識する必要があるということをお伝えしておきたいと思います。そういう壊れ方であるとか、液状化は基礎地盤で生じるのか堤体で生じるのかをきちんと理解した上で何をチェック対象として取り上げるか、あるいは危ないか判断しなければならない。そのような危険度を判断するモノサシを我々はきちんと持っているんだろうかと反省しなければならないと思います。

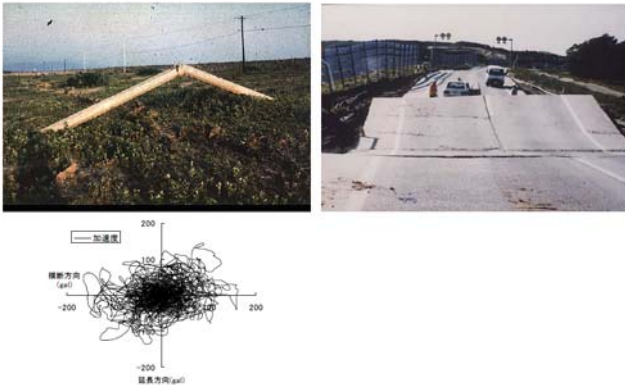
下の右側の三角形を見ていただきたいんですが、外力の大きさ、地盤特性、構造特性、今までの耐震計算というのはこういうものに対して、地震時の剛体滑りか、変形かはともかくとして、どれぐらい変形するんだと予測・評価してきました。しかも、その変形は天端沈下量だけで評価しています。そういうことをやっていますが、その変形のぐあいというのは、先ほど今岡さんからのお話にもありましたが、事前の雨によって堤体部分の土が湿っていれば変形は大きくなる、そうでなければそうでないと。そういうものを含めて、本当は地震時性能を評価すべきだし、築堤工事、あるいは強化対策の工事というのは、築堤区間が守っている背後地の重要度を総合的に評価して、一番上の投資妥当性というのを総合評価する。



こういうモノサシであるべきなんですけれども、従来の地盤、地震工学が左側の3分の2にしかとどまっていない点を改善する必要があると思うわけです。

以上、時間が大体30分になりましたから、今の三角形で一応お話を閉じたいと思います。やりとりの中で、ここに挙げている、まとめのその1から6までの話に関連する話題は、質問があったらお話をしたいと思います。

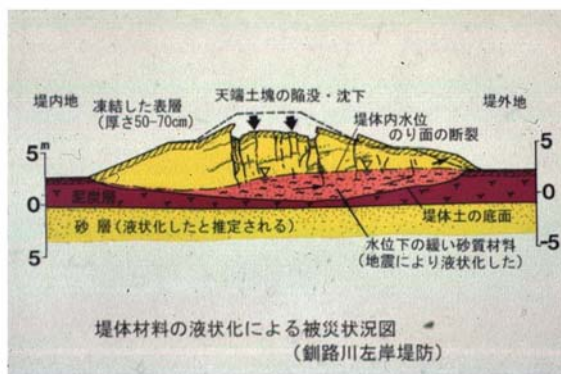
まとめ・・・“設計”上の問題点 その1 外力か耐力か (いつ? 破壊や変形が生じるのか)



まとめ・・・“設計”上の問題点 その2 破壊モード 亀裂の色々



まとめ・・・“設計”上の問題点 その3 境界の影響 初期条件 (応力・含水比)



まとめ・・・“設計”上の問題点 その4 保水性 (無効雨量)



まとめ・・・“設計”上の問題点 その5 (区間分け (標準断面だけでは“設計”にはならない!))



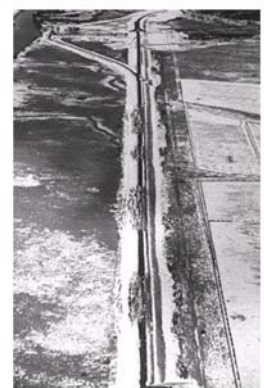
- 道路の設計と橋の設計
- 川の設計と堤防の設計
- 背後地への配慮は?



まとめ・・・“設計”上の問題点 その6 残留天端高さ (液状化層の変形ではなく堤体の変形を心配!)



- 液状化層の変形ではなく堤体の変形を心配しなければならない!
- 境界条件変化がもたらす堤体内変化 (堤体内亀裂) の評価 モデル化の説明



なお、時間が許せばばらばらとやってもいいんだけど、むしろ質問をいただいたときのほうがよくて。1つだけ、質問が出ない可能性があるので触れておくとする、先ほどの浸潤破壊に関連する話題なんです、この保水性（無効雨量）と書いているこの航空写真は、平成11年だったと思いますが、広島県豪雨災害で壊れた広島市の市街地の航空写真です。

この崩壊が起こったときの雨というのは、1週間ぐらいしとしとした雨が降っていて、朝から強い雨が降って、非常に強い雨が午後3時ごろ降り始めたら、強い雨の領域でばさばさ壊れ始めて、雨の領域がだんだん北へ動いていくと、壊れる場所もだんだん北へ動いていったと。ということで、壊れるときに事前に降っている雨の量と、それから強い雨が降っている2つの量が破壊につながる、その破壊のつながり方というのは、斜面の中の地下水面の形成、あるいは地下水面の高さでありまして、もともとあった含水比が高くなっているところへ、さらに強い雨が来ると、実は非常に早く浸透して、斜面が法先から右側にあるように崩壊をしていく。

堤防の堤体の崩壊というのも、実はこの保水性と切り離しては考えられない話でありまして、一昨年から、その前か、関東のある河川事務所で、今岡さんも一緒だったのですが、こういう雨の指標をもっと堤防管理に生かしたらどうですかと申し上げただけけれども、残念ながらご担当の方々のご理解にならないで、1年ぽっきりで検討をおやめになって、今でも大変残念に思っています。

もっともっと液状化なら地盤が液状化する。あるいは、液状化したときに堤体が濡れているか、湿っているか、そういう初期条件をもっと考えないと、今までの土質力学というのは単純化し過ぎていて、境界面の形状変化だとか、初期含水率のような初期条件とか、こういうものの勉強の仕方が足りないよというのが、まとめの6項目の中の1つということです。

シグナルを読み解く大切さ

- ・ **情報とは、量が多ければそれをもとにして下す判断もより正確度が増す、とは、全くの誤解である。**
- ・ **情報は、たとえ与えられる量が少なくても、その意味を素早く正確に読み取る能力を持った人の手に渡ったときに、初めて活きる。**

塩野七生：ローマ亡き後の地中海世界（上） 新潮社 2008.12.20 p57

総まとめ

- ・ **思考停止への反省** **固定観念からの脱却**
 - ・ 外力の種類、大きさ……………（地震の影響を計量するモノサシ）
 - ・ 地震時性能……………（安定性を計量するモノサシ）
 - ・ 土の力学を支配する要因、構成則……………（土の変形特性を計量するモノサシ）
 - ・ リスクの原単位……………（投資の総合的妥当性を計量するモノサシ）
- ・ **固定観念からの脱却**
 - ・ （第一種のモデル化）……“ポスト液状化”“不飽和土の初期条件”など因果関係を単純化するモデル化
 - ・ （第二種のモデル化）……外力、地盤特性、構造特性、リスクなどを類型化し、単純化するモデル化