

土粒子骨格構造からみた堤防の浸透・破壊について

前田 健一

名古屋工業大学
都市社会工学科
(環境都市系プログラム)
高度防災工学センター



名古屋工業大学の前田でございます。このような貴重な経験をさせていただきますことを非常にうれしく思っております。1時間ほど時間をいただきまして、今やっている研究についてお話しさせていただきたいと思います。実はここで話題提供するのを気軽に引き受けたのですが、委員会の名簿を見させていただくと、杉井先生や竹下先生が一番若手ということで、ちょっと何か今日は学生時代の審査会の気分のような感じがしていますけれども、一生懸命頑張りたいと思います。

本日は「土粒子骨格構造からみた堤防の浸透・破壊」というタイトルで、土粒子・土骨格レベルの話から堤防破壊へと繋げる流れで進めていきたいと思います。

現在、杉井先生や庄内川河川事務所と一緒に、堤防にセンサーを入れ、モニタリングを開始して、3年ぐらいになります。また、岡村先生をヘッドにして、地震と浸透の二つの外力を受けたときにちゃんと堤防が耐えられるようにするための研究に、国交省の予算をいただいているプロジェクトがあります。それらの内容から抜粋させていただいて、話題を提供させていただきたいと思います。

河川技術研究開発制度 地域課題研究 中間報告 (2013.3)

雨量履歴・水位履歴を考慮した河川堤防の安定性のリアルタイム予測方法の開発と安全性向上(ねばり)に関する研究

研究メンバー

前田健一	名古屋工業大学・教授	中部大学
杉井俊夫	中部大学工学部・教授	中部大学
小高猛司	名城大学工学部・教授	名城大学
神谷浩二	岐阜大学工学部・准教授	岐阜大学
斎藤秀樹	応用地質(株)技術本部技術研究所副所長	応用地質(株)
小林 剛	応用地質(株)計測システム事業部 グループリーダー	応用地質(株)

共同研究
中部地方整備局・庄内川河川事務所

2

河川技術分野公募 (24-T) 河川堤防の安全対策に関する技術研究開発

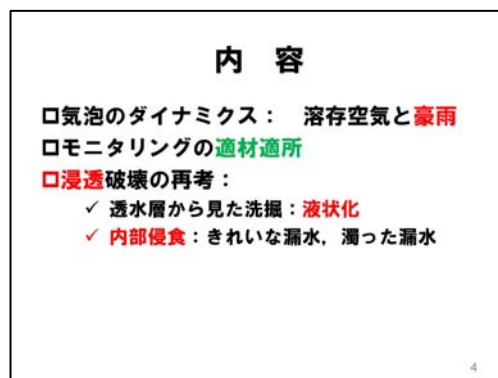
河川堤防の複合外力に対する総合的安全性点検のための解析手法と対策工法に関する技術研究開発

研究代表者	愛媛大学大学院	岡村 未対
共同研究者	北海道大学大学院	泉 典洋
	徳島大学工学部	渦岡 良介
	土木研究所	佐々木哲也
	応用地質(株)	新清 晃
	東京工業大学大学院	高橋 章浩
	名古屋工業大学	前田 健一

3

今日お話しさせていただきたい内容は、宇野先生も以前からご指摘されていますが、堤防に水が浸透する過程において、間隙中の空気が堤防にどういう影響を及ぼすかということについて、述べさせていただきます。

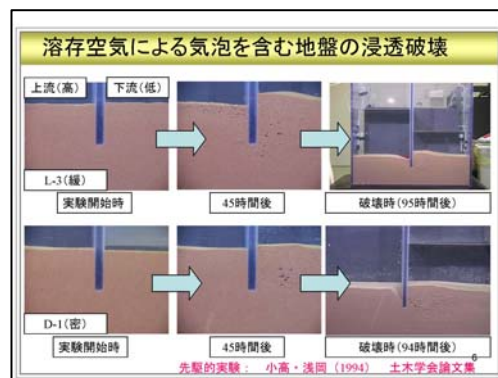
つぎに、先ほどモニタリングという話をしましたけれども、いろんな原理のセンサーがあって、それらを埋めるに当たって、センサーがどういう特性を持っているのかという、基礎的な検討をしてみましたので、その結果のご紹介をいたします。さらに、去年の矢部川の浸透破壊に見られるような、いわゆるパイピングなど、土が削られていくような破壊について、洗掘と内部侵食という観点から浸透破壊を考え直してみた内容についてお話しさせていただきます。



— 気泡のダイナミクス —

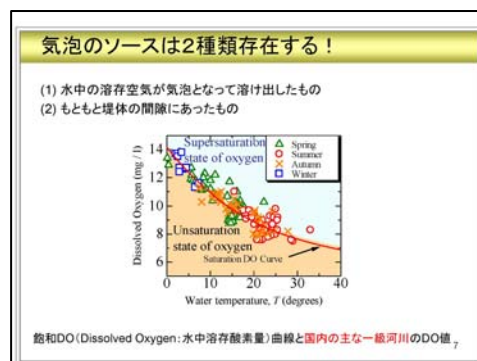
気泡のダイナミクスと書かせていただきましたが、地盤の中を気泡が動くことで土が傷むという話がございます。気泡のソースは2つございます。一つ目は「溶存空気」、二つ目は「豪雨」に起因します。1つ目の溶存空気については、実はこの研究は小高先生と浅岡先生が先駆的に始められた内容です。浸透破壊をきちんと実験したいと思っていると、間隙水中に空気がたくさん出てくるということで、それを問題視されたという話です。それをフォローさせていただいて、実験した結果をお見せしたいと思います。

これは、スライドにあるように、中央に矢板があって、上流から矢板の下端を通して下流に、水が回り込みます。なお水位は限界水位差の8割位の低い水位差のまま保っておきます。すると、このように、特に下流側で気泡がたくさん集まってきて、それが地盤を弱らせていくという現象です。今動画が流れましたが、水位差を一定に保っておくと、泡がだんだん大きくなって、時々ぽこぽこっと浮き上がってきます。そうすると、徐々に地盤が緩んできて、学生がずっと水槽を見ていると、いつか限界水位差より低いにもかかわらず壊れてしまうという現象があるということです。海岸べりとか河川な



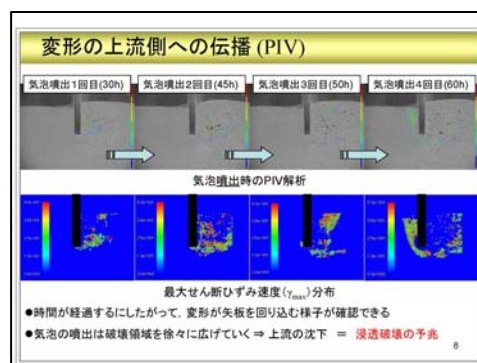
ど水位が変動するようなところでは、地盤あるいは土構造物の中がぶかぶかになるといったような話も聞かれ、その原因は何かというのを狙った研究です。

いろいろと実験を重ね、データを調べました。
ヘンリーの法則に従って算出される飽和溶存酸素量という、どれだけ水に酸素が溶けているかという、理論値があります。実際の自然の水というのは、河川も海も意外とこの理論線よりも上のDO値を示します。過飽和状態にあるということです。これはいろいろな季節の中で、自然界で調べられ



たデータに自分たちで計ったものも付加したデータです。結局、自然界では余分に溶けた空気が水の中にあるということになります。そうすると、この余分に溶けている空気というのは、早く水の中から出たいということで、ちょっとした刺激を受けると水の中から出てしまうということになります。

これが土の中を流れていくと、粒子と水が擦れ合って、よく見ていると、粒子の周りに小さい空気の粒が出てきています。それが集まって、大きな気泡をつくっていきます。大きな気泡というのは中の圧が低くて、小さい気泡というのは中の圧が高い、つまり安定しているので、大きい気泡の中に小さい気泡が入ってくる。そうすると、大きな気泡はどんどん大きくなっていくという状態です。それで下流のほうに流れていくと、浮力が大きくなり、地盤から吹き出そうとする現象が起きます。我々はエアブローと呼んでいます。



矢板を挟み上流から下流に水が流れていきますが、この図は、気泡の量と気泡の周りの地盤の変形を画像解析で処理したもので色付けされているのはひずみです。赤色ほど局所的にひずんでいる状態を示しています。大きな気泡が最初にポコッと出たときに、この気泡が出ることによって、水位差は限界水位差の8割位でずっと一定で外力は一定にもかかわらず、地盤内に局所的にひずみが生じます。2回目に吹き出すと、また地盤の中にひずみが蓄積し、4回目ぐらいになると、ひずみが上流側に遡上していきます。吹き出すことで地盤のダメージを受けた領域がだんだん上流側に拡がり、矢板周りがまるまるとな

ようなゆるんだ状態になります。

このスライドは、横軸に時間、縦軸に一定に保っている水位差を限界水位差で割ったもので表した図です。縦軸の1がいわゆる浸透破壊が生じるという条件です。結果を詳しく見ていきます。例えば、このデータの6割位に水位差を設定して、時間をおいて、もうさらに水位を上げていくと、限界水位差の8割位で壊れてしま

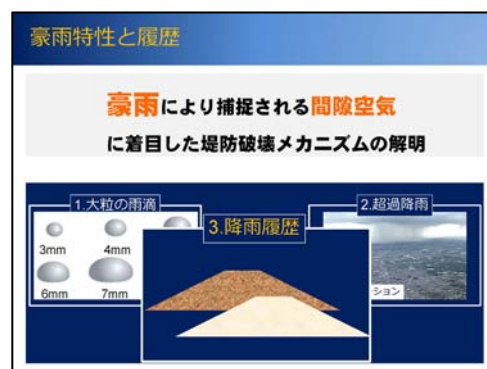
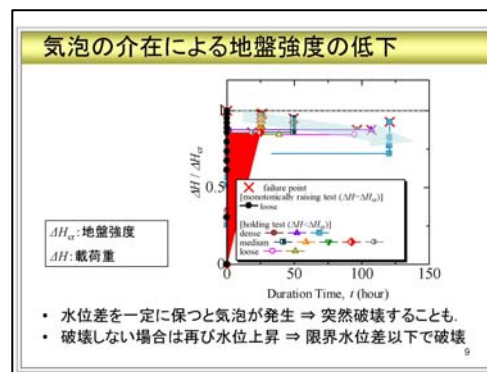
います。つぎに、限界水位差の8割ぐらいでずっと水位を保ちます。図中の×のうちのひとつですが、100時間、5日間ぐらい置いておくと、限界水位差以下ども、壊れてしまいます。要するに地盤が傷んでしまうということになります。大ざっぱにいうと、自然界の水が地盤の中を行き来することで小さい気泡が出てきて、それが成長して吹き出すことで地盤にゆるみが発生すると言えます。これが1つ、地盤中の気泡の発生ということになります。

もう一つの気泡に関する話題は、気泡発生ソースが、もともと堤防の中にある空気、間隙空気ということです。そこに、雨、特に豪雨が降ることが問題だという話です。豪雨というのはいわゆるゲリラ豪雨と言われるような、60ミリとか80ミリを超えるような雨の場合です。その場合について、豪雨が降った場合にどうい

うふうに間隙空気が反応するかということを話させていただきます。

ポイントは、豪雨と普通の雨は落ちてくる雨粒の密度や雨粒の大きさが違います。ゲリラ豪雨というのは普通の雨に比べて雨粒の大きさが3倍ぐらい大きいということです。それからもう一つは履歴です。今、雨が降っているけど、その前の天気はどうだったかということです。豪雨前の状況により堤防の応答の仕方が、浸潤の仕方が変わってくるという話です。

いろいろ見方があるのですが、東海豪雨のときには、堤防の亀裂がちょっと入ったときに白い泡が堤防の中からのり面に吹き出して、その後にゆっくり3時間かけて亀裂が入って行って破堤したという目撃証言があります。空気存在を臭わす話です。

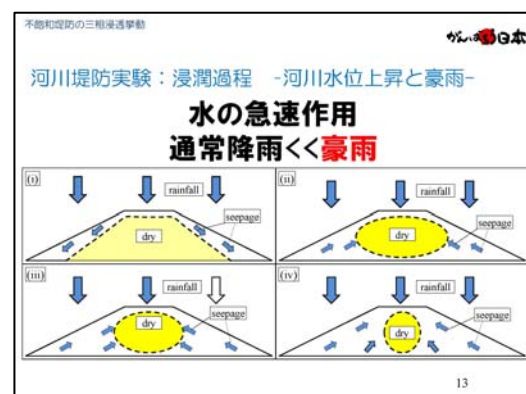
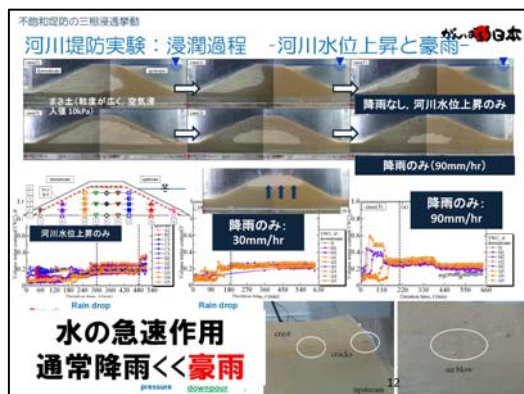


杉井先生達と、庄内川で5年目になります
が、いろいろモニタリングをさせていただ
いています。3年前の台風15号のときに、庄
内川が増水しました。台風本体が来る前の日
に前線が発達して大雨が降りました。図にあ
る洗堰をオーバーフローして遊水池に河川水が
流れ込みました。その洗堰の近くの天端の道
路脇で、数百メートルの区間に渡って、空気
が音を立てて吹き出しているのが観察されま
した。これがその時の動画です。これは庄内
川河川事務所の方が、河川の様子を視に行
き、音に驚き撮影したものです。



その2カ月前の7月の福島と新潟の豪雨の際に、河川水の水位が低下した後に、堤外側で数百メートルに渡って気泡が吹き出しているのが観察されました。強い雨と急激な水位変動を受けたときに、堤体の中から空気が出たと考えられます。でも、空気が出たけれども、破堤していないので、問題じゃないかという方もいますが、これは、空気がスムーズに排気してくれたことで、たまたま、堤体において、空気による大きな損傷がなかったということになります。

こういうシンプルな実験をしました。乾いた堤防に急激に水位を上げていくと、教科書とは違って、非常に曲率の高い浸潤線になります。これは時間30ミリの普通の雨。時間30ミ리를普通の雨と言っているかわかりませんが、豪雨ではないという意味です。時間30ミリの場合には、雨を降らせると、水が下まで浸透して行って、不透水層とした基盤層に達した後、下から浸潤線がきれいに上がっていくということになります。これに対して、非常に強い雨、時間90ミリの雨を降らせると、最初は雨が堤体内に入っていく

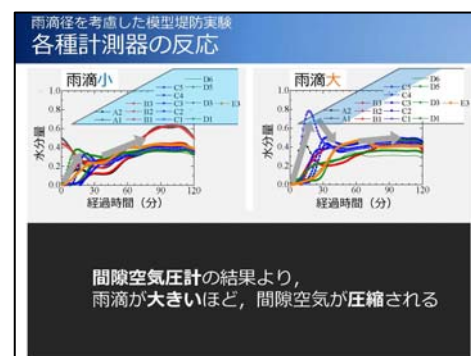
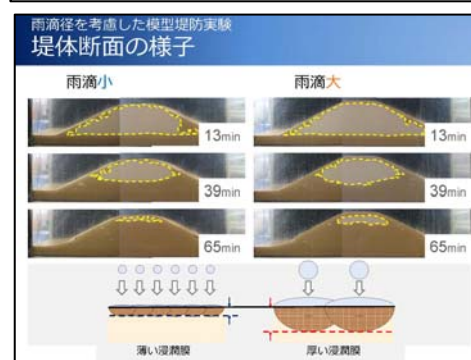
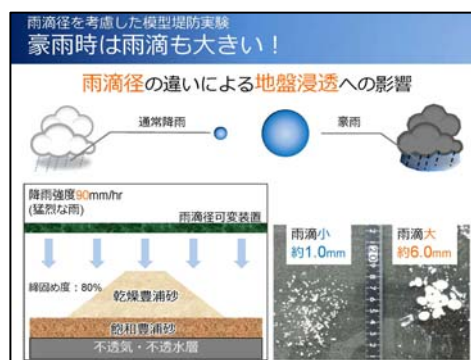


ません。入らずに、表面に浸潤ゾーンが現れるのですが、なかなか雨は入っていきません。そのうちに、堤防が台形状なので、横から浸潤が進み、図のように、空気がギョット潰されるようになります。この図は、堤体模型内に設置された水分計の値ですが、早く水が堤防の中に入ろうとすると、堤内の空気が邪魔をして、なかなか入れずに、浸潤が遅れています。遅れる原因は、堤体中の間隙空気圧が上がるためと考えています。

これの何が問題かという、このまま先ほどと同じようにここに水位を上げると、ブクブクとカニが泡を吹いたような感じが出てくるし、天端にクラックが入ってきます。水位を上げるとアップリフトで天端に逃げようとした圧縮された空気により、天端にクラックが入ってしまうというメカニズムかと思います。ですから、急激な水位変動にはこういう空気の話を考えなければいけないのではと思います。

それで、先ほど言ったように、普通の降雨と豪雨では雨粒の大きさが違うので、雨粒の大きさを変えて実験してみました。雨量強度は一緒で、雨粒の大きさを変えるという実験をしました。最初は学生に大雨が降ったときにアクリル板を空に向けてカメラを回して雨粒の大きさを測ったと言ったのですが、ちょっとそれは勘弁してください、ということで、水文分野で蓄積されたデータを調べると、雨の粒径分布が調べられていました。同じ雨量強度で、豪雨の方が雨粒の大きさが3倍ぐらい大きいということでした。雨粒の大きさで、浸潤の仕方が違って、雨粒が大きいほうが実は浸潤のスピードが遅いようです。

この図は浸潤時の水分量をはかったもので、こちらの図は、堤体中の空気圧を計ったものです。雨粒が大きいときは、空気圧がすばやく増加し、雨粒が小さいときは空気圧がなかなか上がらないことが分かります。この空気圧の上昇が浸潤をおくらせているということになります。

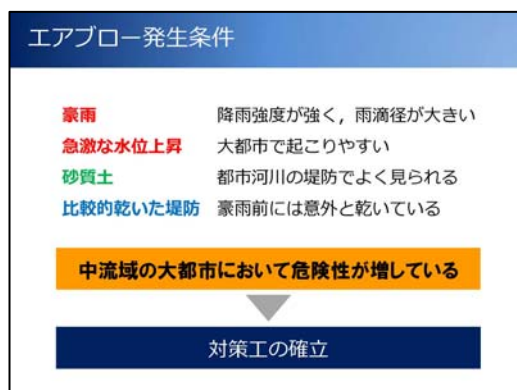
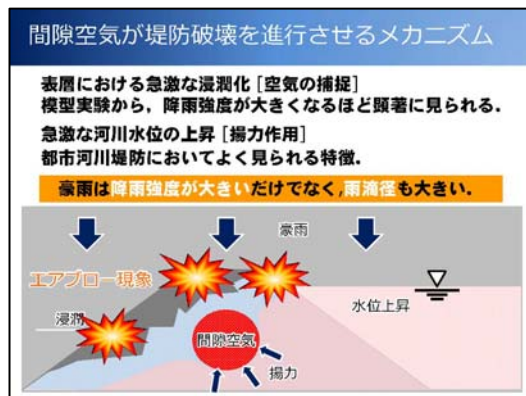


これは極端なアニメーションで申しわけないのですが、豪雨や速い浸潤に対して間隙空気が応答して、入れないようにします。そのうちに浸潤域が広がってきますので、浸潤域に囲まれた間隙空気の空気圧が上がる。それで河川水位が上昇し浸潤線がせまってくると、圧縮された空気塊にアップリフトがかかります

すから、上に抜けるか、弱部を探して抜けていくことになります。そうすると、水位上昇を受けたときに、堤防の中には浸潤していなくても堤防が傷んでしまうということがあるということです。つまり、豪雨対策というときには、堤体内に水が入らないことは一見よさそうですが、入らないのには理由があって、それは堤体内の空気圧が頑張っていて、堤防の中から傷めることがあるということです。これに対処しなければならない、と考えています。

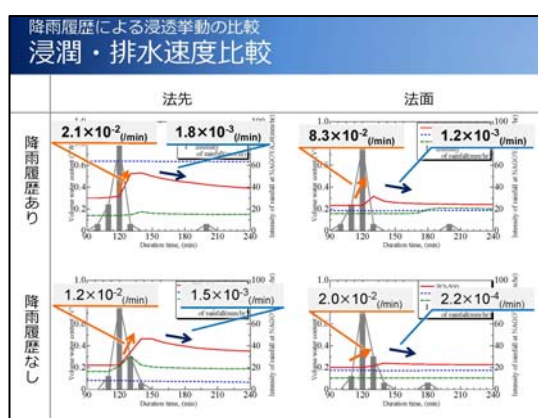
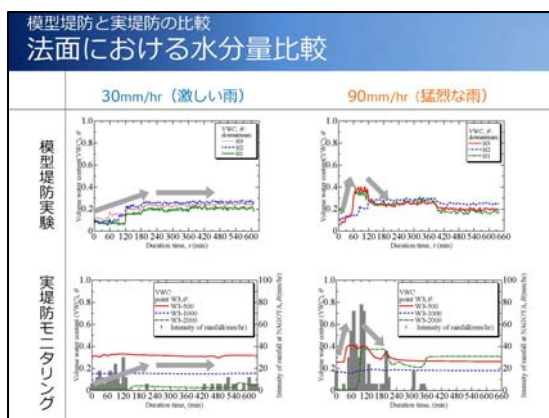
要するにエアブローのように、空気が問題になるのは、いろいろ実験して調べると、豪雨が45分位降って、その後、急激な水位上昇が起る条件のときです。この条件が、大都市の堤防にあてはまります。豪雨が増え、急激に水位が上がるということで、この条件が揃っています。それから、粘土だと堤体中の

空気が移動する現象は起きにくく、砂質土が起きやすいということになります。私も庄内川プロジェクトをさせて頂く前は、堤防が砂でできているとは思っていませんでした。しかし、大都市部ほど河床に砂が堆積し、それを浚渫し、その砂を腹づけしているので、大都市の大きな河川ほど砂で出てきていることになります。あともう一つは、結果をお示ししますが、乾いているということです。なるべく乾いた状態でどっと雨が降ると、堤体内の空気圧が上がりやすいので、豪雨の前にずっと晴れていて、一気に雨が降るという条件が厳しいことになります。大都市の河川堤防の補強には、堤体中の間隙空気圧の影響を考える必要性があると思います。

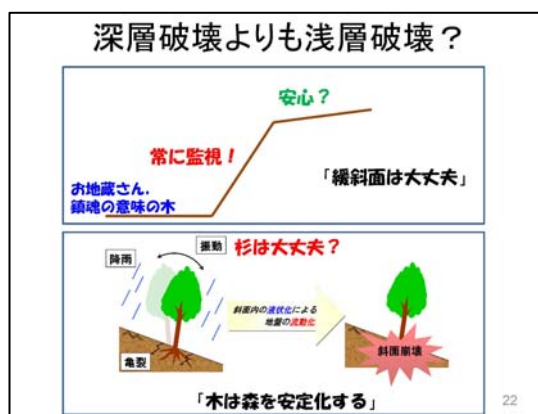


現在、庄内川と矢田川の背割堤と、矢田川の堤防に、水位計を埋めています。矢田川では、ドレーン工が思った通りの機能を果たしているのかについても計測しています。つまり、堤体内の河川水位が上がることに起因する浸潤線に対しては、ドレーン工が水を逃がすことになっていますが、雨についてはどういう働きをしているのかを捉えたいので、水位計等が埋まっているという状態です。

背割堤には水分計が50センチ、1メートル、2メートルの深さで6カ所、サクション計が6本入っている状況です。それから、非抵抗をモニタリングできるように金属の棒が何十本も刺してあって、電気を流せばモニタリングできるような状態になっています。



最近、土砂災害が話題になっていてニュースにも取り上げられます。また、雨が降ると、深層崩壊も話題にのぼるようになりました。実はある急斜面のところに石があって、どの石が落ちてきたらどういうインパクトになるかということを計算し、急斜面を監視していました。しかし、大雨が降って上の緩斜面から土砂がすべってきて、土石流が発生しました。この緩斜面がなぜ大雨ですべるのか、急なところですべらないで緩斜面ですべったのはなぜか、ということを考えているのですが、もしかすると、先ほど説明したように強い雨が急激に降ったことで、降雨水が中にしみ込

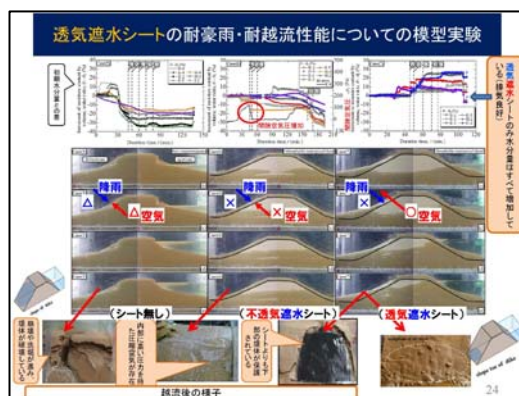


もうとしても間隙の空気圧が上がって、それを妨げ、表面は浸潤しどんどん雨が入ろうとすると、表層だけ流れやすくなって、表層の土を雨が削ってしまうということが起きているのかもしれませんが。大雨によって、急斜面だけでなく、緩斜面を薄く流動させるような破壊形態が現れている可能性があると考えています。

これは庄内川の洗堰ですが、渡良瀬遊水地にもついている空気抜きの管です。水が越える堤防には昔からこういうふうに空気抜きが設定されていて、堤体中の空気を抜くような仕組みになっています。ただし、河川砂防技術基準等の設計書には明文化されていないと思いますので、空気を出す装置の設計を以上の結果を踏まえて、工学的に考えてみたいと思います。



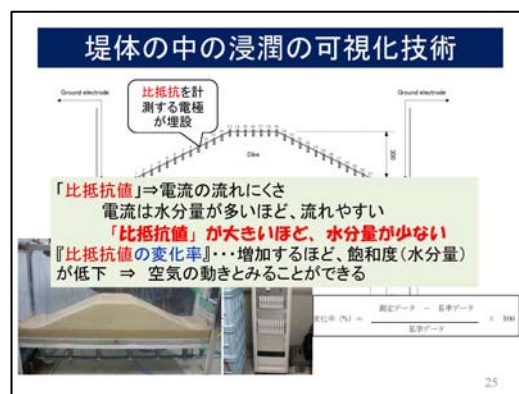
排気対策としては、幾つか考えられると思いますが、太陽工業様にご協力頂いた事例を紹介します。実験では、水も空気も通さないようなビニールシートを使用した場合と、外から水は入らないのですが、中から空気が抜けるような三層の構造のシートを用いて、三面張りの模型堤体について比較しました。前者は、不透気遮水シートとでも呼ぶとすると、後者は透気遮水シートで、ゴアテックスや蒸れないおむつのようなイメージです。何も通さない不透気遮水シートの場合については、雨を降らせて水位を上げて堤体内の空気圧が邪魔をしてなかなか水が入っていかず、あるところまで来ると中の空気圧が急激に上がって内部に浸潤せず、また空気圧が上がって、また下がって、もう一度上がり直すというようなことが起きています。



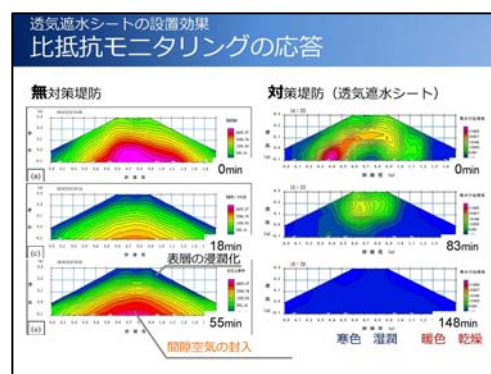
別に、このタイプのシートでも、水を堤体内に入れられないのだから、これでもいいじゃないかという話にもなります。しかし、実験では、圧縮された空気の塊が、天端方向には抜けられないので、他の弱部を探して、法先から一所懸命に抜けだそうという様子も観察されました。したがって、こういうふうに全部囲ってしまって、空気を制御しないと、思わぬところに破壊を加速させる弱部が形成されてしまうことにも繋がります。つまり、いつも上部が弱いわけではなく、弱部は外力条件によっても変わってくるようになります。一

方、透気遮水シートの場合には、空気圧は上がらないで、スムーズに水が入ってきます。堤防の中に水を入れることがいいのか悪いのか、という議論はあると思いますが、これは先ほど述べたような、急激に雨が入ろうとする、急激に河川水位が上がろうとする、そういう急激に作用する外力に対して、堤体内部から堤体を損傷させることがあるので、それも考慮した対策として、滑らかに浸潤させる方がよいのでは、という考えです。

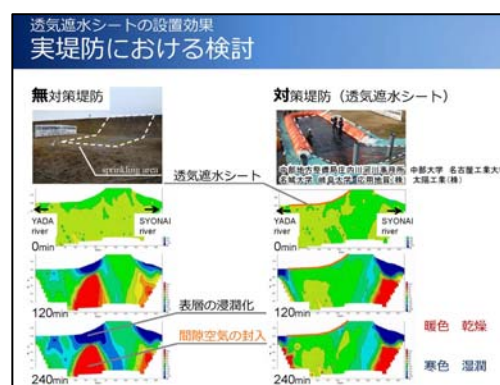
以上のような現象の可視化についても検討した結果を紹介します。定点観測としては、水分計を用いていますが、これは応用地質様と共同で行った比抵抗トモグラフィーの結果です。地盤に電気を通す金属の棒をいっぱい刺して、それらをつなげておいて、電気を流すと、堤防の中の比抵抗分布が算出できる方法です。乾いていけば電気が通り難いので抵抗値が高く、水分量が高くなると、電気が通りやすので抵抗値



が下がります。その抵抗値を二次元断面で見た結果がこのスライドです。青が最初の状態よりも抵抗値が下がって湿潤化している箇所、赤は抵抗値が最初の状態よりも上がっており湿潤化とは逆の乾燥化している箇所です。雨を降らせると、これは強い雨ですが、上のほうは青になっていて、真ん中のほうは赤くなっています。上のほうは浸潤してきて抵抗が下がっていますが、堤体の中はかえって最初よりも比抵抗値が上がってしまって、浸潤化とは逆の乾燥化のような現象が出ていることになります。



さらに、つぎのスライドは、庄内川の堤防での現場実験の結果です。先ほどの透気遮水シートを設置した箇所にいろんな計器を入れ、シート無しの場合と比較しました。冬の2月の寒いときにスプリンクラーで水まきを行いました。まず、シート無しの場合で、時間50ミリの雨を想定した水撒きを行ったときの結果です。こ



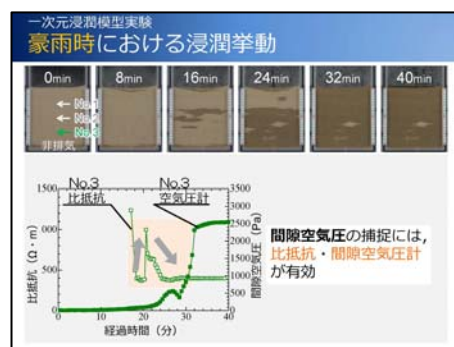
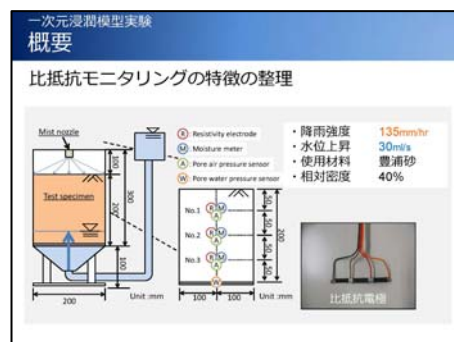
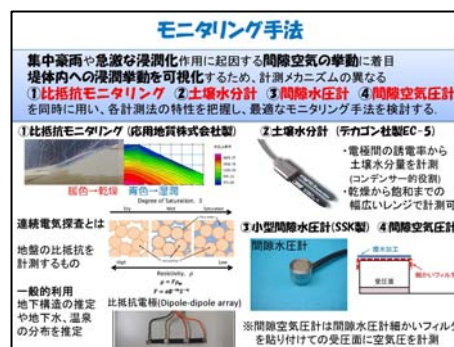
ういうところ（堤体法面表層より）に青色の箇所浸潤線、浸潤領域ができています。砂で腹づけした堤防ですが、雨を降らせると、法尻付近に青色の早く浸透する領域ができます。興味深いところは、この浸透しようとする領域の先のほうに赤色の領域が出てきて、浸潤と逆の動きをしようとしているようです。要するに、急激に浸潤しようとするとそのフロントでは土が応答しているということがわかります。こちらは先ほどの透気遮水シートで、水は入らないようにして、中から空気が抜けるシートを設置した箇所です。シートを被せていないところは浸潤しますが、ここは当然ながら水が入ってこないような状態になっていることが確認できました。堤体中を可視化できるということで、今年度は縦断方向も行い、三次元のような絵を描けたらいいかなと考えています。

— モニタリング手法の適材適所 —

先ほど述べたように、いわゆる圧力計と、2つ指のようなコンデンサーから成っていてその間の電磁誘導を計る水分計、電気を流して比抵抗を測る比抵抗値測定など、原理の違うセンサーを同じ場所に設置して、どのようにレスポンスが異なるのかを把握しておくことにしました。

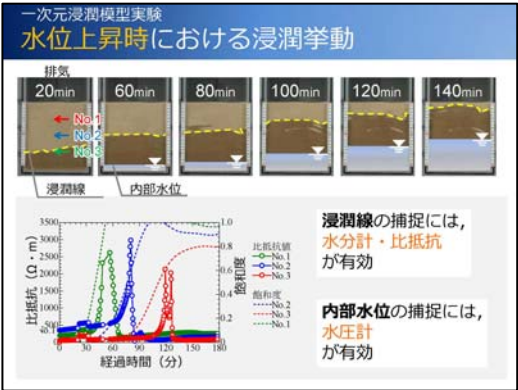
簡単な一次元の模型での実験結果をお話しします。

最初乾いた状態の砂に、上から、集中豪雨並みの雨を降らせ浸潤挙動をみました。例えば一つの結果ですが、時間とともに上から浸潤して来ると、比抵抗値はある時点で急激に下がります。土にとって水がそろそろ自分のところに来ると思ったら比抵抗値が下がって、その後、落ち着くというのが普通のパターンです。しかし、途中で比抵抗値が上がる場合があります。上がる場合というのは、集中豪雨並みを降らせたときです。同じポイントで空気圧を測ってみますと、抵抗値が上がるタイミングで、空気圧が上昇し始めます。つまり、この比抵抗測定、電

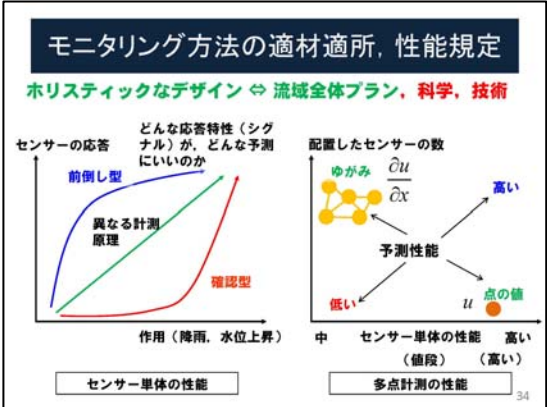


気を流して測る方法は、これから浸潤化が進み始める際に敏感に応答し、浸潤化が進んでしまうと変化が見られなくなる、という特徴をもっています。

それから、下から水を入れていった場合、底面に水圧計を入れておくと、水圧計は当然最初反応しません。見た目の水位は図中の黄色の破線の辺にありますが、水圧計が示す水頭は図中の水面のイラストの箇所です。毛管現象で不飽和帯が形成されるので、両者の差がでてきます。間隙水圧は、確かに、この現象をとらえるために大事ですし、土質力学で有効応力を算定するためには非常に大事ですが、現象が随分と進行してから反応してしまうので、予兆をモニタリングするという視点においては難点があるかとおもいます。



つまり、水圧計は、そこに現象が今起きましたよね、という確認型のタイプの計測器といえます。これから起きてくるぞという変化に対して反応する、電磁気系の水分計、比抵抗値などは、前倒し型と言えると思います。これらセンサーを浸潤が破壊を引き起こしそうな箇所にうまく配置してあげることで、予兆をキャッチし、今、土がどういう気持ちなのか、どうしたいのかを察知できると思います。このようなセンサーの適した配置や性能設計みたいなことをやっていかなければいけないと強く感じている次第です。



— 浸透破壊の再考 ～洗掘・液状化・内部侵食～ —

残りの時間は、矢部川の被災現場などを見させていただいて、浸透破壊について考え直したことについて、お話しさせていただきたいと思います。

ポイント、キーワードは、洗掘と液状化と内部侵食ということになります。これは今年の6月の河川技術シンポジウムでも話させていただきましたことですが、まず最初に、私が堤防の破壊って何なんだろうというふうに思った農村工学研究所での実験、フルスケールのため池の実験での経験をお話したいと思います。



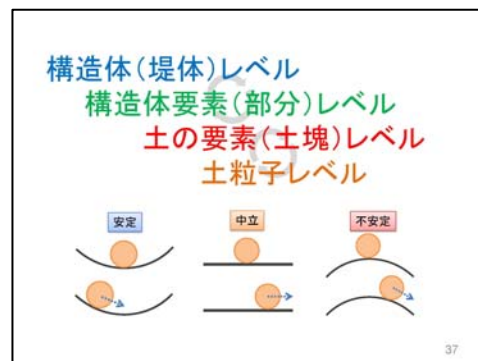
ため池で、90%位、水が張った状態で時間150ミリの雨を降らせたときです。農村研の毛利さん・堀さんのところで実験されたものです。雨を降らせると、まず雨がなかなか浸透していきません。150ミリの雨ですが、非常に表面をはねている音、非常に高い音がしていて、1時間ぐらいたってからやっと、何か音が低い音に変わって、雨がしみ込み出します。しみ込み出すと、設置されている変位計が反応し、天端の近くにクラックが発生して土塊がずるずると動き出すのを捉えます。私は、てっきりすべり始めた時点で堤体が壊れると思っていましたが、土塊が動いたら、土塊がとまってしまいました。せん断破壊が起きた瞬間にもうこの堤防はだめだ、という話にはならない、ということを見せられ、そうなんだと驚くとともに、新たな考えに至ったと感じました。

実はこの堤体で、すべり土塊ができてから、漏水している箇所があります。漏水しているのですが、最初はきれいな水が流れてきます。しかし、そのうちにだんだん、だんだん濁ってくる。濁ってきたら、人の目で見てわかるような穴があきます。穴があくと、当然水が勢いよく出てくるのですが、そのうちに今度は出てきた土で詰まります。詰まると、さっきまでとまっていた土塊がまた動き出す。それはすべり土塊の後ろに亀裂が入っていますから、時間150ミリの降雨が入っているので間隙水圧が上昇する結果と考えられます。漏水している間はこの土塊は安定しているのですが、漏水している場所が詰まると土塊が動き出します。動くと、またここがずれるので、まるでドレーンが設置されているように働き安定しています。また水がピューッと吹き出して、今度吹き出すと土塊がとまるというのを繰り返していることをみることができま



した。そのうち、堤防の中から雷のような音がゴロゴロし出して、何が起きるのかと思っていたら、だんだん粗い石が抜け出してきました。そのときには音がだんだん大きくなる。それで、土塊がまた動くというようなことでした。ここで、言いたいことは2つで、すべりが生じても堤体はまだ終わりではなく、その後の段階でも頑張れるステージがあるということ、最初きれいな漏水であってもだんだん濁ってくることで現象が加速するということで、興味深い現象でした。

それで、今日お話しするポイントは、漏水が濁るという話は、細かい粒子が抜けて内部侵食されるということで、土粒子レベル、土粒子の塊としての土の要素レベル、さらに構造体要素（部分）レベル、構造物としての堤防のレベルといった異なるスケール間で不安定な現象が進行するという話をしたいとおもいます。



安定、不安定と聞いて最初に思い浮かぶのは、変分の教科書に書いてあるような、釣り合っているけど、安定と不安定な状態がありますという説明です。そういう話があって、板の上にボールを置いて、この三つの図のいずれも、置いた瞬間は釣り合っていて、とまっています。ちょっと突つくと、お碗型の板の場合はすぐ元に戻ろうとし、外乱を与えても変位は発展しません。これが安定という表現になっています。中立というのは、平らな机の上に板を置いてボールを置き、コンと押すと動いていってしまいます。押す力に応じて変位します。一番に困った状態は、山状の板の頂上にボールを置く場合です。ちょっと押すと、このボールはどんどん転がって変位し、さらに変位しやすい状況になって、どんどん転がって、元には戻ってきません。これが不安定です。今回は、基本に立ち返って、なにかこういうセンスで浸透破壊を見直そうと考えました。

それで、矢部川の話です。矢部川の話のポイントは、同じ豪雨災害で、被災したところと被災しないところがあるということがポイントかと思えます。

被災という定義が難しいのですが、例えば決壊した箇所の上流のほうでは結構変状が見られ、堤内側の田んぼには地震時の液状化のときのような

平成24年九州北部豪雨に学ぶ

被災したところと、被災しないところ
破堤 ≠ 変状

矢部川調査委員会報告書（矢部川堤防調査委員会、国土交通省、九州地方整備局、筑後川河川事務所HP）

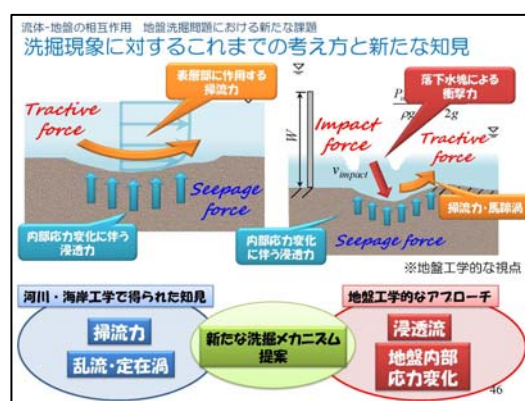
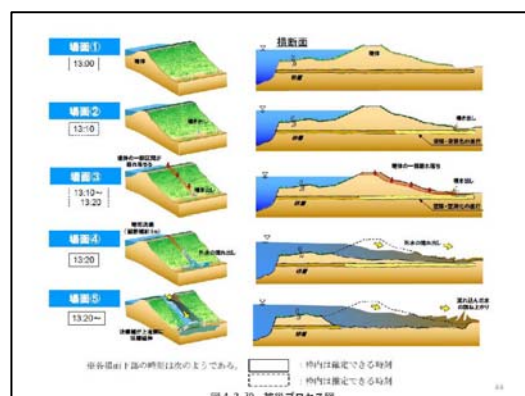
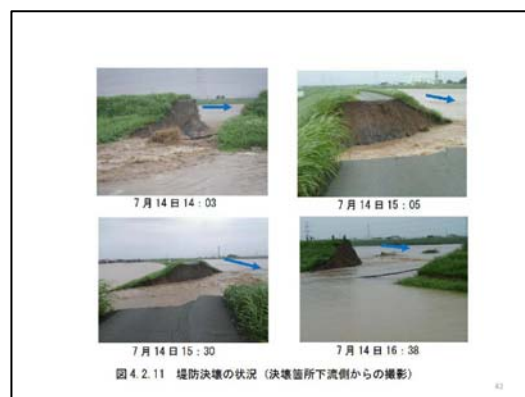
噴砂のクレータがあるのですが、これ以上の堤体の変状がない、つまり堤体の変状が発展しておらず決壊していないという箇所もあります。先に述べた、安定・不安定のボールで、お碗の中にボールがあるような状態で、ボールをトンと突ついても少しは変位するけれども、変位したことで元の状態に戻ろうとする効果のために変位が進行しないという状態に似ています。一方で、7. 3 k m地点では、変状がとまらず、破堤にいたっています。

この破壊の説明として、報告書の中では、粘土の堤防の下に砂層があって、水を吸って、水がどんどん集中して流れ、削られるという、いわゆるパイピングが生じることで、最後は堤防の天端が落ち、越流して壊れたという解釈をしています。堤体の変状がさらなる変状を生み出し、破堤に至っています。同様な浸透破壊現象が発生しているにも関わらず、堤体の変状の発展が止まった箇所もあります。

壊れなかったところも壊れたところも、漏水は起きていたと証言があります。ただ、壊れなかったところの漏水はきれいで、壊れたところの漏水は濁っていたというような証言があり、そのポイントに絞って話を進めます。

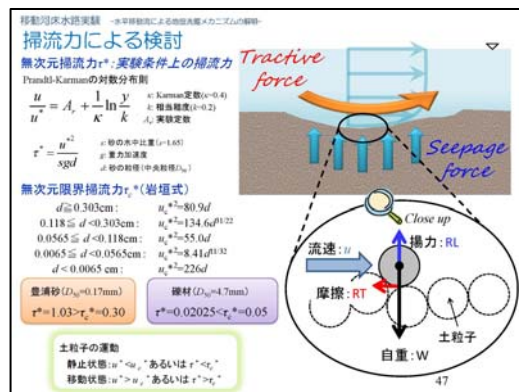
水により土が削れる話、洗掘です。ポイントだけ言うと、2つの実験をしました。水平な地盤の上に水平に水を流すパターンと、水を落として削るパターンです。

これを海岸工学と河川工学の公式集などを見て、シールド数を使って実験条件を定めました。底面の粒子の大きさと流速による摩擦速度など



で、決まるシールズ数が所定の値になるとデューンの形成や移動が起きます。洗掘が開始される条件はシールズ数で制御されているようです。

ですが、いろいろ実験をしていくと、例えば同じ土質であっても、緩い状態と密な状態で削れた後のデューンの進行が異なっています。また、土質屋らしく水圧計を埋めてみました。



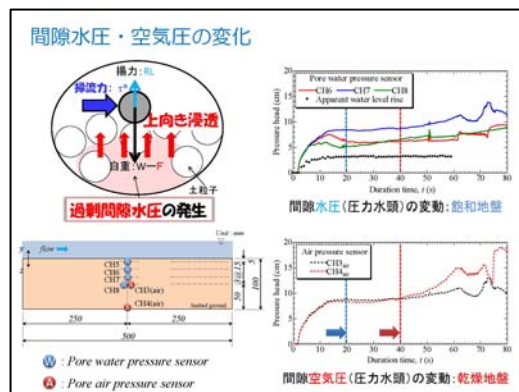
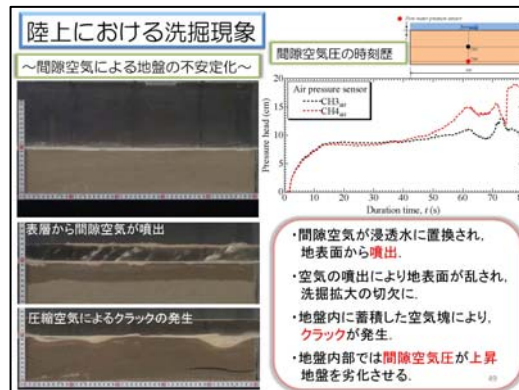
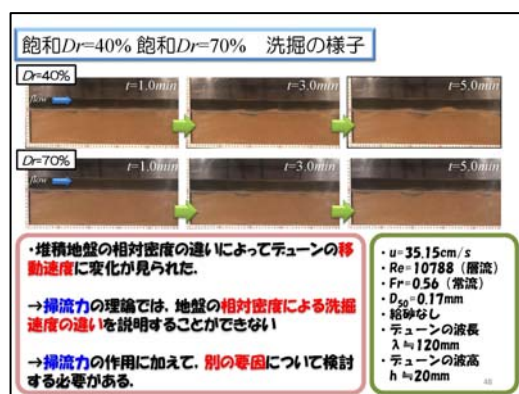
さらに、土が乾いた、要するに飽和していない状態での実験も追加しました。不飽和地盤では、地盤中から空気が吹き出てきます。

これは水が流れて、急激に下にしみ込むためには、地盤中の空気と置換しなければいけないので、吹き出し、エアブローが生じます。もっと興味深いのは、ずっと吹き出して、このままエアブローが治まるかということ、実はあるところ

で、地盤内部にクラックが生じて、地盤が縦に裂けています。水平な地盤に、水平に流しているにも関わらず、クラックが生じるのです。実はこの実験は河川を意識したよりは、津波を対象としたものです。遡上した津波が何十センチもあるような重たいコンクリート床板を動かす現象があつて、本当に水が掃く力だけでここまでの現象が起きたのかということ調べるために

実施したものです。地盤からのエアブローが表層のコンクリート板を剥がす助けをしているということになると考えられます。

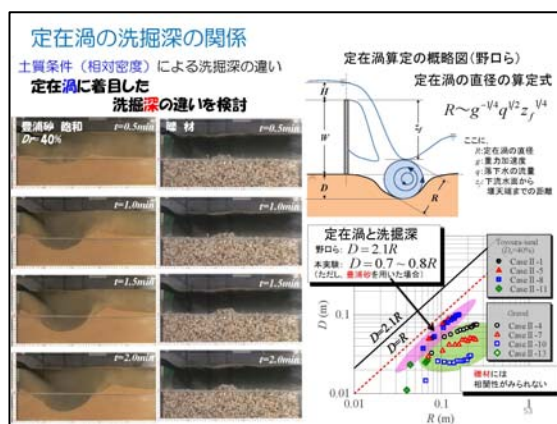
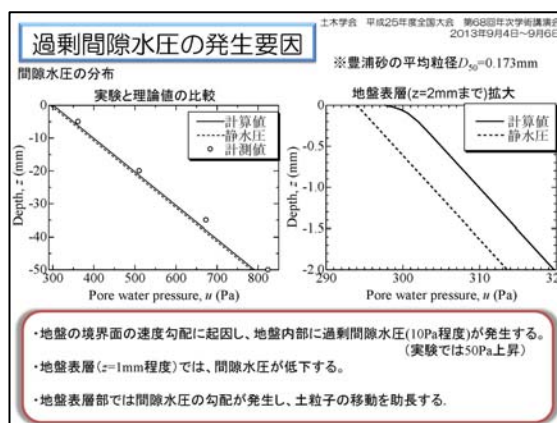
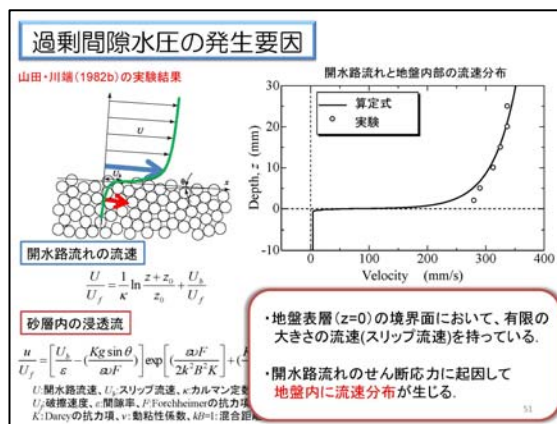
もう少し詳しく調べるために、間隙水圧計を細かく埋めてみました。この図は、水位から想定した静水圧と比較して、過剰間隙水圧を求めています。水平に流れているのにもかかわらず、過剰間隙水圧の分布から、上向きの動水勾配を持っていることがわかります。要するに粒数十



個分といいますか (ね)、平均粒径が0.2ミリの豊浦砂ですと、数センチぐらいの領域で実は上向きの動水勾配が起きて、土をゆるまさせています。つまり、水が土を掃こうとすることで、確かに掃く力で削られるのですが、地盤自信が中からそれを助けようとしているような状態になっていて、緩むことでなおさら洗掘が進行することだと思いました。一旦削ろうとすることで、実は中から削るのを助けるという、山状の板の上にボールを置いた状況と似ていると考えられます。

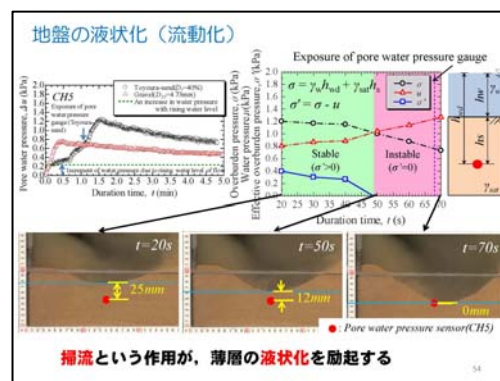
ゆるみの一番極端な状態が、今回のキーワードですと液状化という話です。山田先生はまだ来られていませんが、30年前に山田先生がやられた研究も参考にしながら、北大の泉先生と一緒にやったものです。堆積層よりも上部の流れが速いところと堆積層内の遅い流れが接しているのです、単純にベルヌーイの定理から考えると、ここで圧力勾配が生じることになります。そうすると、洗掘は、単に掃流力で削っているのではなくて、表層が液状化することで削るのを助けているというのが実は洗掘なんじゃないかと考えています。ですから、洗掘しないように大きな石を置くというのは、確かに一個の石は重くて流れ難いのですが、液状化という観点からすると、大きな石の集合体は透水性も高く、上昇した過剰間隙水圧を逃がすという効果もあるとダブルの効果働いているのではとも、考えられます。

もう一つの洗掘は、渦を巻くことで削っていく話です。できた渦の大きさと掘れる深さというのが海岸工学の分野で整理されています。古いデータですが、海岸工学の論文には細砂としか書いていなくて、どんな土を使ったかがわかりませんでした。こ



の図のように、渦の大きさと掘れた深さとの関係を調べてみると、豊浦砂については確かにこのように線形の関係が見られます。豊浦砂についてはもともと受けている水深とか実験条件を変えても一本の直線になりますが、礫材のように粗いものを入れると、実験条件によって異なった結果となります。

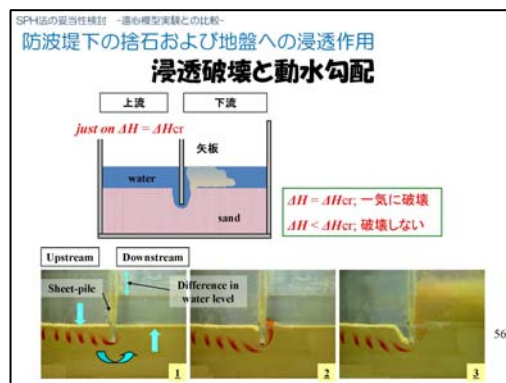
地盤中に水圧計を入れて測ってみました。結論から言いますと、観察された水位から算出された静水圧、有効土被り応力をプロットしてみました。青色が有効応力です。20秒、50秒、70秒の状態です。20秒については、まだ間隙水圧計でも上に土が載っているのです、この部分にはまだ有効力がある状態です。50ミリ



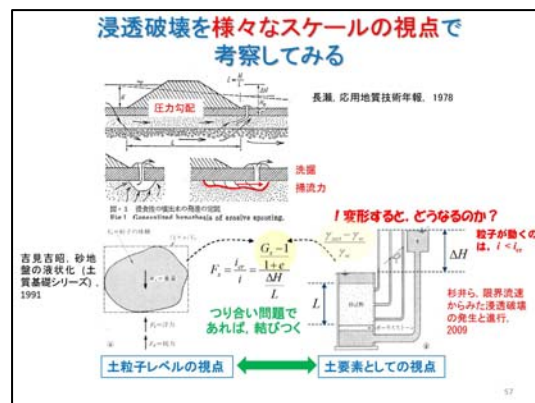
のとき、まだ上に土が載っかっているにも関わらず、過剰間隙水圧を引いてあげると有効応力がゼロになっています。つまり、この掘られている先に土があっても、その土の中は液状化しているということになります。ですから、早い流れで地表面から掘ろうとされると、地表面を介して流速が大きく異なることから過剰間隙水圧が発生し、地盤表面層が液状化状態に近づき、より掘り易くなると考えられます。つまり、洗掘は、土粒子のレベルのつり合いが崩れる不安定化だけでなく、粒子の集合体・土の要素レベルの液状化という不安定化が生じていると、考えることが一つポイントになるんじゃないかなと思います。

次に、パイピングのような浸透破壊の話題に移りたいと思います。現在、学会のWGで浸透破壊紙芝居をつくろうとしています。岡村先生をヘッドする地盤工学委員会・堤防研究委員会の中のワーキングがありまして、そのグループと服部室長率いる河川部会・堤防ワーキングと、合同で、30人ぐらいのグループで、水と土の分野の立場から堤防に関わる議論を進めています。

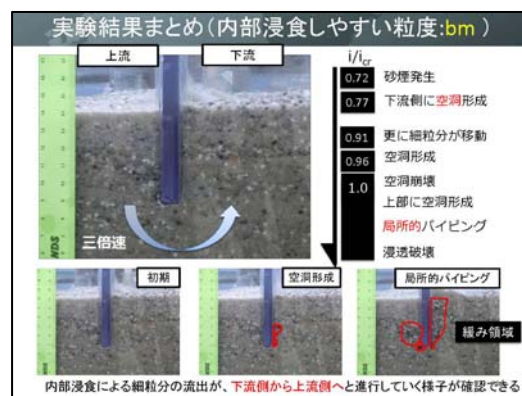
現在、浸透破壊にポイントを絞って、そのプロセスをより理解するために、紙芝居をつくって、それを基に議論したいと考えております。



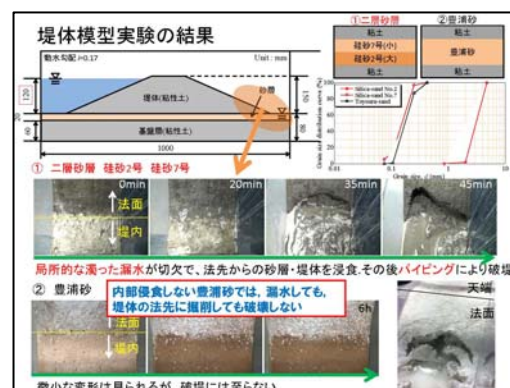
さて、まずこの図から説明したいと思います。
これは吉見先生の液状化の教科書に書いてある、土粒子レベルと土の要素レベルで、違うスケールのアプローチにも関わらず同じ限界動水勾配が算出されます。この場合に、杉井先生が指摘されているように、破壊する前に粒子が動いたらどのように考えるのか、動いた場合にはこの話が成り立つとかいう議論が必要になってきます。そうすると、粒子レベルの話と土の要素レベルでは現象を繋げることが難しくなってきます。



このような、違うスケールでの現象を繋げること考えて、実験をしてみました。まず、このスライドは、わざと粗い粒子と細かい粒子を混ぜた砂を矢板周りに敷いて、浸透させたときの様子です。確かによく指摘されているように、まだ限界動水勾配前にも関わらず、細かい粒子が抜け出します。抜け出すと、抜け出ている箇所だけでなく、上流側のほうにも空洞ができたりして、土塊として不安定になって壊れます。つまり、出口から不安定化するだけではないようです。



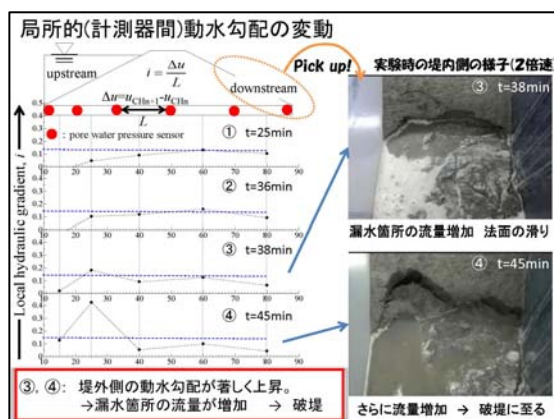
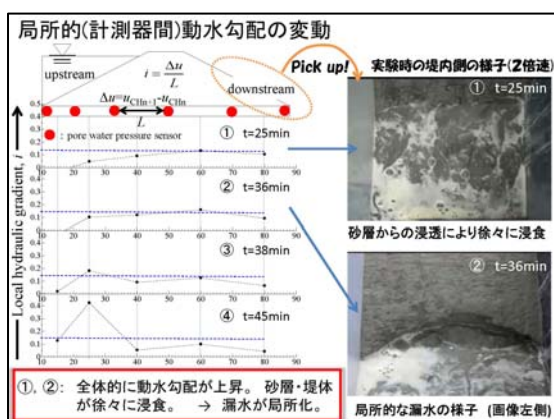
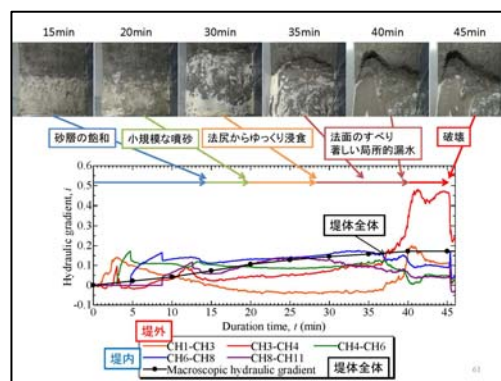
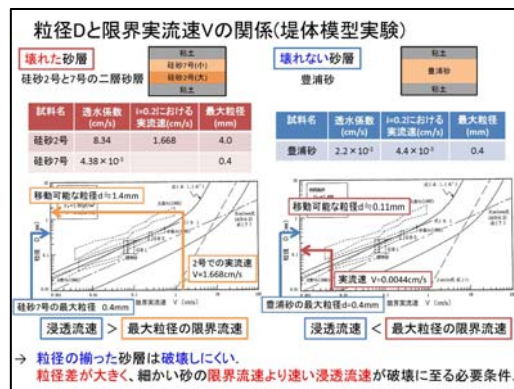
そこで、こういう矢部川の結果を模擬した実験をしてみました。堤体と基礎地盤は同じ材料の粘土を用い、堤体下には透水層を設置しました。透水層には、豊浦砂を敷いた場合と、珪砂の大きいのと小さいのを互層に置いた状態を作った場合の2種類の実験をしました。結果から言いますと、豊浦砂の場合については水が非常によく通っていて、ここからはきれいな漏水が、どんどん流れてきますが、堤防は壊れません。そこで学生が、教科書に書いてあるように、水道の距離を短くするために、堤内側から豊浦砂の透水層の土を掘掘ったんですけども、掘っても掘ってもパイピング口のようなそんな進行的な破壊はしません。一方、珪砂の大きい粒子のものと小さい粒子のものが混ざったような層の場合については、どんどんと破壊が進行していきました。その様子はこんな感じです。



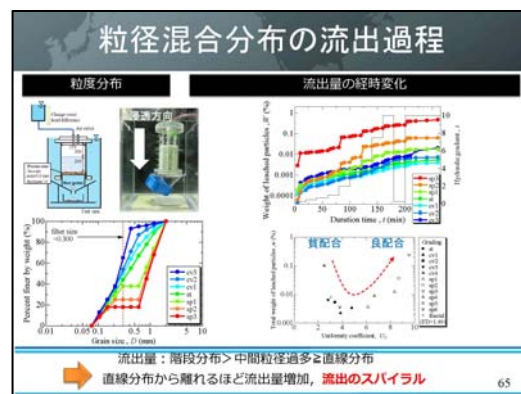
実はこの粒度の設定には苦労しました。限界実流速とその速度で動くとしてある粒径との関係図がありますが、これを横目に睨みながら、決定しました。豊浦砂のケースだと、実験での生じる速度に対して粒子が大き過ぎるので動かないという結果になって、一方で、先ほど述べた珪砂の混合砂のケースでは、小さい方の粒子

は算定される実流速で動くという結果になります。漏水しているけれども、豊浦砂の場合はきれいな漏水で、混合砂では濁った漏水でした。そして、きれいな漏水の豊浦砂のケースでは決壊せず、濁った漏水の混合砂では決壊しました。

このスライドは、透水層のところに間隙水圧計をセットしておいて、時間とともに、場所毎の動水勾配の分布がどうなっているかを整理したものです。最初は裏法の下部で動水勾配が上がって、表法の下部の方では余り高くありません。透水層はどんどん掘れていくのですが、下がった箇所より上流が上がって、その部分がまた壊れるという現象を呈しています。最後、表側に達するときは、非常に大きな動水勾配が生じていました。これらの図は、まるで尺取り虫のようにどんどんと表側に上がっていくということがわかりました。

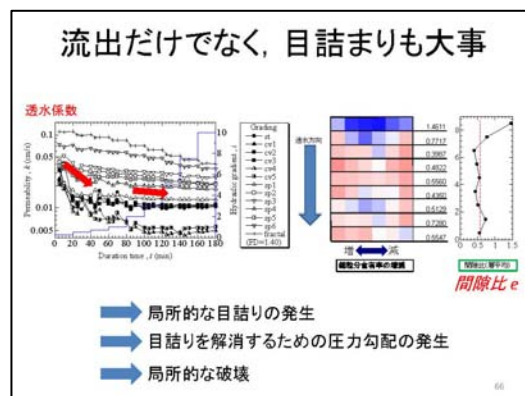


この土の粒子が抜けるという土粒子レベルの現象と土塊・土の要素レベルの現象とを結びつけるために、図のような一次元の透水実験をやって、どんな粒度分布だったら粒子が抜けやすいか、ということを調べました。粒度分布は広ければ抜けなくて良い土というわけではなく、粒度分布の形状でかなり違います。粒子が抜ける



る量は粒度形状によってログスケールで異なります。しかし違って、下に凸状の粒度分布の形のときは細かい粒子が抜けやすく、上に凸の場合については、細かいにとっては、自分と同じサイズの粒子の中を抜けていくことはかなり難しい。直線的な粒度分布の場合も、細かい粒子はほとんど動けず、抜けてこないということがわかりました。

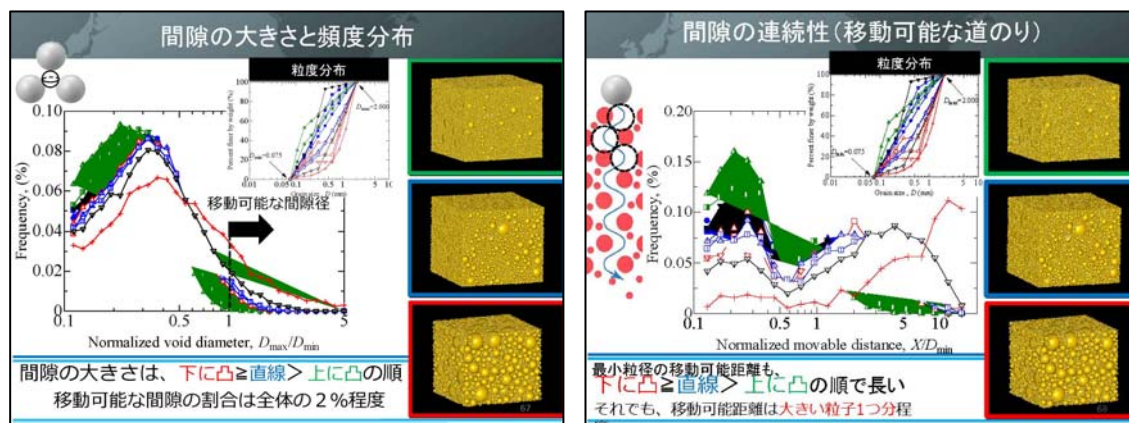
この実験の過程で、動水勾配を上げていくと、全体の透水係数は落ちてくるのが分かりました。粒子が抜けて隙間が増え、透水係数が大きくなるような気がしますが、透水性は低下します。供試体を縦に切って、どれだけ粒が詰まっているかというのを数えると、赤が細かい粒子が増えたところで、青が細かい粒子が減ったところ



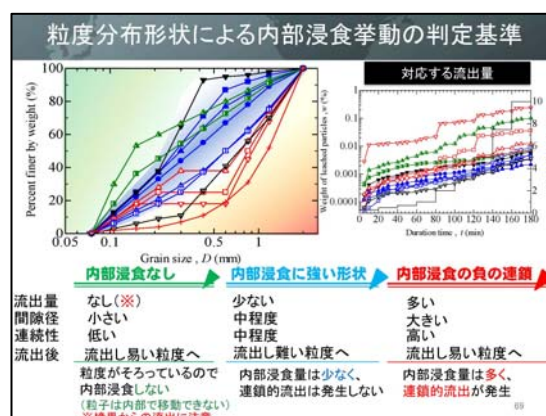
ところです。粒子が抜けるという内部侵食は、抜けることが問題なんですけれども、抜けていった粒子はどこかで詰まることになります。詰まったことで、その領域では動水勾配が上昇し、その詰りを抜こうとする力が土の中に生じることも、不安定化の原因となり、問題になると考えられます。

ここで、個別要素法を使って、粒度分布の形によって、なぜ、抜けやすいのかと抜けにくいのかを調べてみました。要は下に凸のほうが間隙の大きさが比較的大きく、抜けやすい可能性が高いということです。

それからもう一つ調べたのは、その大きな間隙がどれだけ繋がっているかという度合いを調べました。そうすると、図のように、下に凸の粒度形状を持つ土の場合はこのようになります。間隙の径も大きいし、それが多くつながっているので、粒子が抜け易いということがわかってきました。



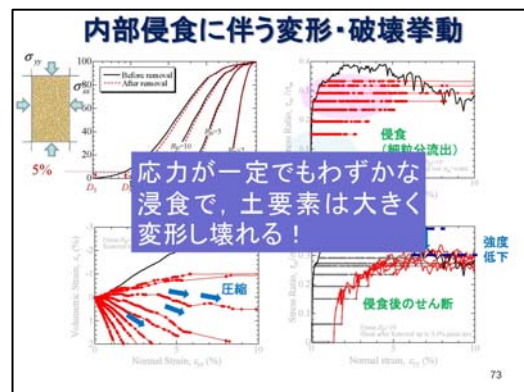
それで、このようなチャートにまとめてみました。粒度分布の幅、広さというのは従来から土の分類において着目されてきましたが、今回のように、粒度の広さよりも粒度分布の形状が重要である場合があります。上に凸の粒度形状をもつ土（緑のゾーン）は、細かい粒子も揃っているので抜けにくく、内部侵食は無しというような



言い方も大ざっぱに言えると思います。直線形状の粒度の土（青のゾーン）では、細かい粒子が周りの粒子に捉えられ、拘束されていて動き難く、ほとんど侵食されません。下に凸の粒度形状の土（赤のゾーン）は、大きな粒子の個数が増えるので、細かい粒子が周りの粒子から拘束されにくく、リラックスした状態なので、透水力がかかると抜けやすく内部侵食しやすい土に分類されることになります。もう一つの問題は、下に凸のものは、細かい粒子が抜けるとさらに粒度分布は下に凸形状になり、より大きな粒子が抜けやすい状態になるといえます。つまり、この負のスパイラルに入ること、内部侵食の可能性が非常に高いということです。粒度分布の形は、透水や透気の問題では、とても大事なことと言えます。

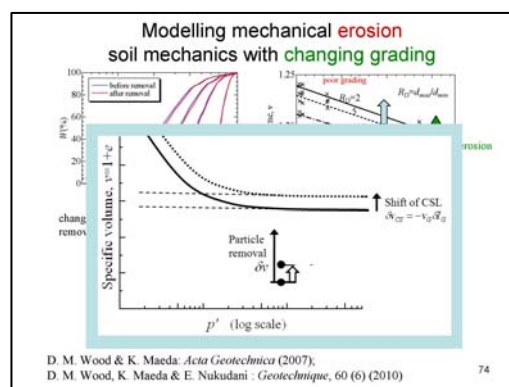
さらに、細かい粒子が抜けるとなぜ悪いかという話ですが、抜けると、確かに隙間はできて、水を引き寄せます。引き寄せるから、また抜けやすくなるのではないかと考えられます。それについて検討してみました。

土粒子をパソコンの中でつくって、個別要素法で計算したものです。黒色を原粒度とする粒度分布を持った供試体から、細かい粒子を抜いていく作業をします。抜いていき、原粒度の5%粒度ぐらいまで抜くと、黒から赤色の粒度分布のラインまで変化します。ほとんど絵で描くとわからないくらいです。次のスライドは、横軸



は軸ひずみと縦軸はせん断応力比で供試体をゆがませ壊そうとするせん断レベルです。ゼロは等方状態で、供試体の縦横とも同じ圧力を受けた状態です。原粒度の5%まで細かい粒子を抜いてあげると、応力は一定ですが、変形し始めます。ただし、等方応力状態では変形しますが、5%まで抜いても供試体には大きなダメージにはならずに変形は収束します。一方で、せん断応力が作用した状態、つまり堤防でいうと、法先部とか、そこに近いところはもともと大きなせん断応力比が作用した状態がかかった状態です。この状態では、5%も抜かないで、2%とか3%抜く程度で、応力が一定条件下であってもひずみだけ先行して発生し、ひずみが10%を超えて、壊れてしまうということになります。法先部では、粒子が抜け始めると、大きなせん断変形が発生し不安定化してしまいます。

また、どのような変形形態を示すかという、実は基本的には縮みます。粒子が抜けていくと間隙が大きくなるんですが、それで縮みます。縮むと、密になるのではと思いますが、粒状体中では、抜いた粒子の体積分だけ圧縮するというのは結構難しい話です。つまり、抜くことで間隙は大きくなろうとしますが、粒子骨格構造は損傷しますので縮む現象が生じます。しかも、この縮む量は、抜いた粒子の堆積よりも小さいので、縮みながら間隙比が大きくなります。

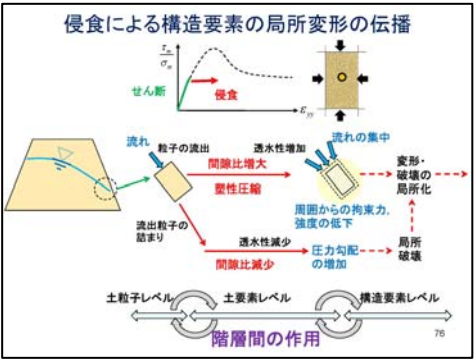
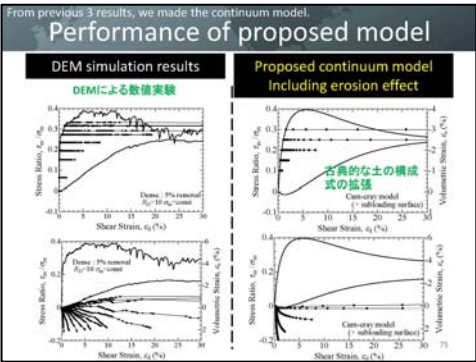


これをDEMを活用して、内部侵食を受けるということ、粒度分布が変わるということに置き換え、材料が変わったと考えて解析結果を整理しました。応力は一定なまま、内

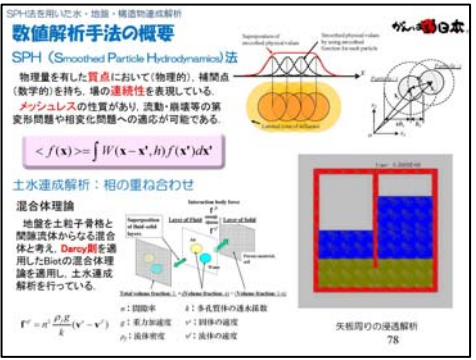
部侵食で、粒度が変化して、材料に固有の限界状態線が変化すると考えると解釈できます。つまり、粒度がどんどん悪くなっていくと、間隙が大きくなっていく。なので、応力は一定だけど、供試体が壊れる限界状態がどんどん変わっていくと解釈できます。ということで、従来からある土質の限界状態の概念をもつ構成モデルを修正することで、粒子が抜けて、塑性変形が出るというモデル化を行いました。

内部侵食の構成モデルの計算結果です。こちらがDEMで供試体を計算した結果で、古典的なカムクレイモデルを用いて計算すると、似たような、結果が得られます。

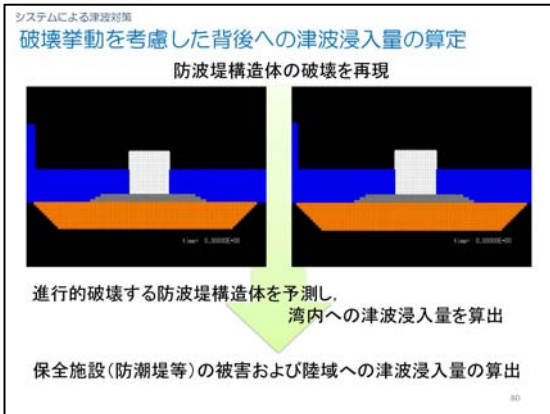
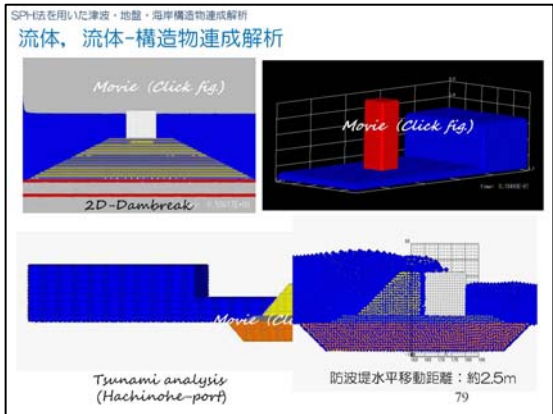
今の話を補足すると、粒子が抜けて、間隙が大きくなりながら縮むわけですが、土はもともとお互い突っ張り、押し合って支え合っているの、内部侵食を受けた土の要素だけ縮んでしまうとともの場合によっては局所的に破壊してしまうと、その領域にゆるみが生じてしまうととも、流されやすくなります。結果的にゆるみ領域は拡大され、侵食を受けやすくなります。この土粒子レベルの粒子の抜け出し、土の要素レベルでの間隙比の増加と塑性変形、要素の周辺とのゆるみといった様々なスケールのレベルにおいて負のスパイラルが発生します。この不安定性のメカニズムが、状況が進行的破壊の原因となるのでは、と考えられます。



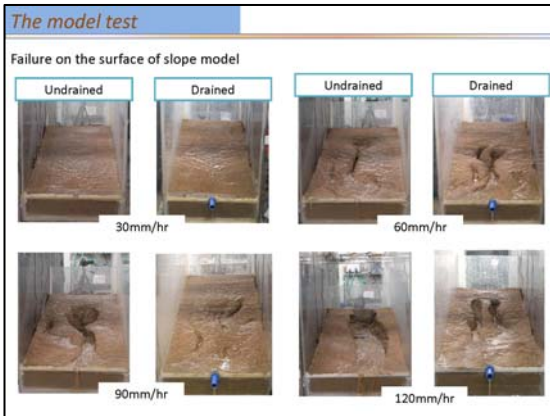
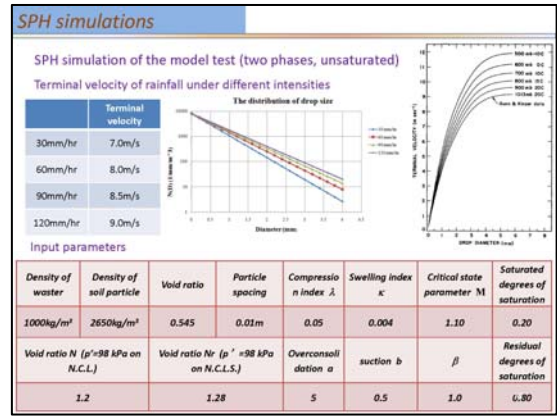
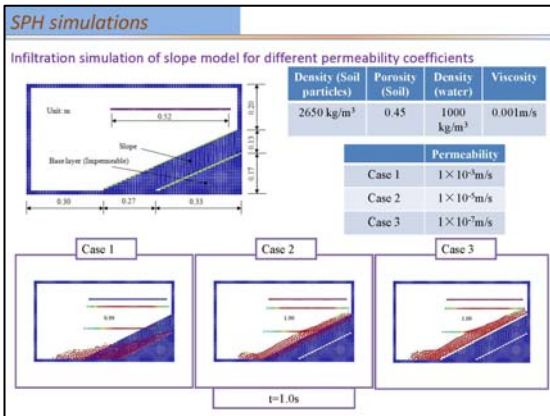
このプロセスを数値計算に組み込もうということで、有限要素法ではなくて、粒子法のSPHと言われるような方法で、固・液・気相の三相連成、大変形とか亀裂まで追える計算の手法に乗せてみました。

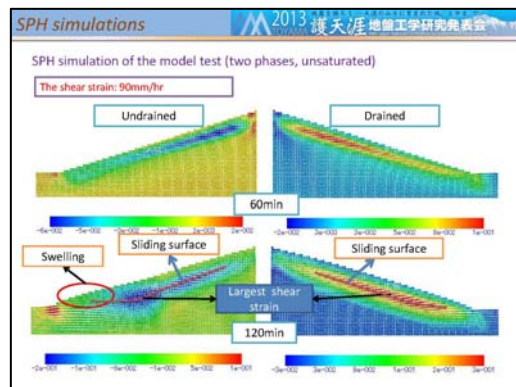
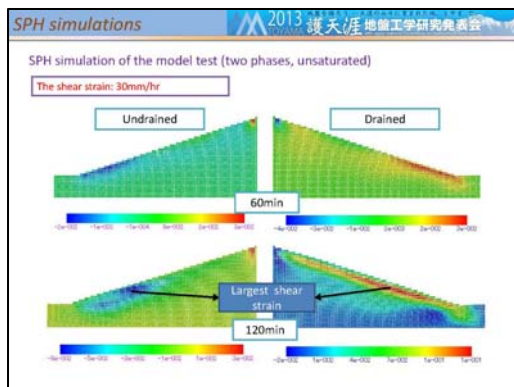


結果だけ紹介します。これは研究室の別のチームで、ドクター3年で津波の研究をしている学生がいるのですが、彼の結果をまず、デモとして紹介します。床掘りの砂層があって、石のマウンド、コンクリート・ケーソンからなる防波堤に津波が作用した場合、最初の波の先端が防波堤構造体に作用する波圧だけでなく、地盤中への浸透の作用の効果を計算したものです。このような解析手法に、先ほどの内部侵食のメカニズムを組み入れます。



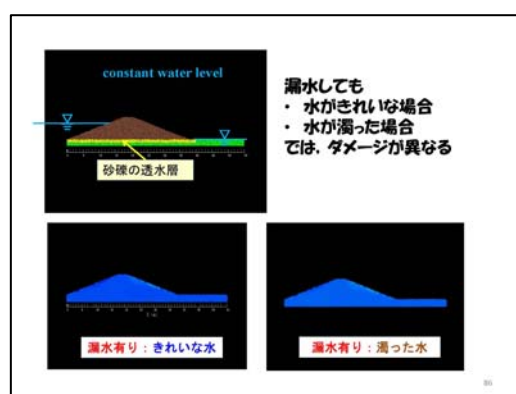
計算結果です。まず、雨自体も粒子法の粒子で再現して、降雨による法面の破壊を計算した例を示します。土の粒子と流体の粒子の間には、ダルシー則を仮定しています。





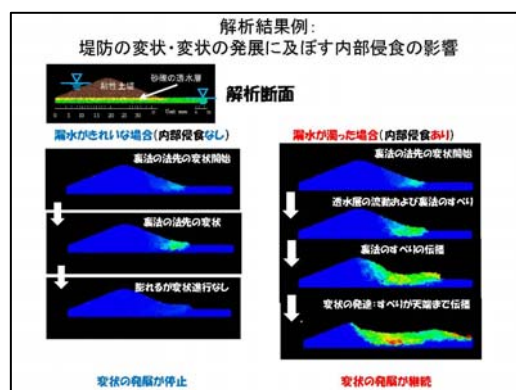
次に、矢部川を想定したモデルです。堤体と基盤は水が通り難い層となっていて、堤体下の黄色い層が透水性の高い層です。水位差を一定に保ったままにします。ここでは、固体の土の部分だけの粒子要素をお見せします。

そうすると、例えばこういう大変形が発生し、堤防が大きく壊れていく様子が表現できます。



こちらの図を見てください。これは粒子が抜ける内部侵食の効果を代入していない場合です。つまり、裏法の法先から漏水があるケースですが、きれいな漏水の場合に相当します。法先で変形が生じますが、ここで少し盛り上がり、少しダメージを受ける程度で、変形がとまってしまいます。不安定な負の連鎖が生じませんし、変形後のヒービングによる盛り上がりによって圧力の解法や土被り圧の再配分が、何かうまい、バランスがとれたと考えられます。

つぎに、粒子が抜ける内部侵食が発生し、漏水が濁った場合です。先ほどのと同様に、裏法の法先から変形が生じます。透水層の変形の速度が減衰することなく、つぎつぎと流れ方向に動き、現象は堤外側に伝播していきます。それと連動して段階的に法面が崩れているようです。最後には、すべりは天端に達し越流することで流動化します。同じ外力にも関わらず、破壊が進行していく点が特徴的です。スパイラル的に負の連鎖が生じる不安定な浸透破壊といえます。



— 浸透破壊紙芝居の作成に向けて —

最後に、浸透破壊紙芝居作成について、述べさせていただきたいと思います。

まず、平成24年度に、「想定外を減らすための力学と技術」という研究討論会を応用力学委員会の企画でやりました。それから、名工大で沿岸シンポジウムも実行しました。キーワードは、「ねばり」という言葉です。

「ねばり」という言葉が、いつごろから使われているのか調べてみると、1968年の十勝沖地震で、それまでせん断破壊しないとしていたのが、鉄筋コンクリートがせん断破壊して、こんな壊し方をしていたら、効果的に安全性が十分に保つことは難しいということで、ここで初めて設計上に、ねばりという言葉が出てきているようです。ここで耐震設計の考え方が変わってきています。

その後、想定外力が上がるたびに、ねばりの話が出てくるわけですが、これは構造物を対象としたものです。では、地盤で最初に「ねばり」を定義しているのは、1991年に出版されている吉見先生の教科書「砂地盤の液状化」ではないかと思います。第7章液状化対策の最初に、ねばりの定義があって、地震も不確かで改良も不確かを含んでいるおり、次の二つを考えなければいけないとしています。それは、材料の靱性（ダクティリティ）と構造的多重性（リダンダンシー）です。これが揃って、「ねばり」のシステムが実現するとされています。

この図は、液状化のハンドブックの性能照査の章に描かれているものです。これは外力に対しての被害について示していますが、例えば青のラインは、設計する構造物に、どの程度の外力に対してどの程度の性能を求めるのかという関係が、滑らかな曲線で描かれています。外力が大きくなっ

進行性破壊の理解に向けて

- **パイピング**の進行に必要なのは、
 - ✓ 開口部分の掃流、表面洗掘
 - ✓ 土要素内の内部侵食と目詰まり（圧力勾配の変動）
- **進行性破壊**には、**スケール間ループ（負のスパイラル）**が必要
 - ✓ 土粒子～土要素～構造要素～構造体（堤防）のが必要。
- **階層（スケール）間**を結ぶ力学モデル、数学モデルの必要性
- 本当の**弱部**はどこか？（地層構造のみでなく、**外力にも依存**）
- （地）**粒度分布の形状**を軽視していた？早い流れ、乱流は？
- （地）**ゆるみ**と波長・波形を工夫した探査
- （水）土粒子レベル（極表面）—水の相互作用式
OK！？ 式は多いが、意外と多い実験パラメータ！！
- **破壊制御（航空機、家電...）**
破壊力学では、脆性破壊、延性破壊、強度の速度依存が明瞭

90

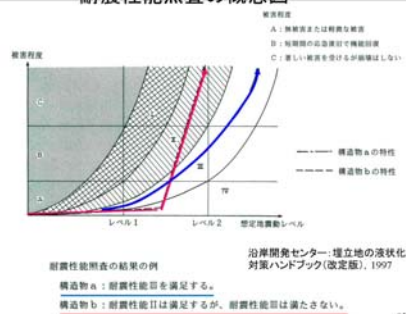
想定外を減らすための力学と技術

2012 土木学会研究討論会 & 名工大沿岸シンポジウム

- 想定することは、とても高度な設計行為
- 航空機の世界には想定外がない、壊れ方を決めていく。
- 破壊力学では、脆性破壊、延性破壊、強度の速度依存が明瞭 → 「ねばり」
- 「**こんな場合もあるかもしれない**」 → 「シナリオの追加」 → 「見落としているかも」（内から外に広げる） → おわりが見えない → 疲れてしまう → 「**想定外はそうそうにおきないんじゃない...**」
- 「想定はここまでです。それ以上はこうなります。後はご協力おねがいします」と明示、オープン。
- **ねばりの再定義**

91

耐震性能照査の概念図



95

でも、急激に被害が大きくなり、性能が著しく低下しない設計をすることを意味します。ある程度の外力までは耐えられるのですが、ある外力を超えると、一気に被害が大きく、性能が低下することを示しています。ねばりとは逆です。

例えば、改良をして、大きな外力が作用した際に、破壊モードが大きく変化して、想定していたよりも大規模な損傷を受けることも考えられます。また、斜面などで、表層を補強することで、深いすべりが起きてしまう場合もあります。さらに、耐えることができる津波の規模が大きくなった一方で、作用する外力が大きくなり、下の地盤が崩壊して、大きな変形を生じるということも考えられます。堤防におけるねばりの定義も難しいかもしれませんが、先に述べさせて頂いた、不安定の連鎖を起こさないようにしなければいけないと思います。

それから、今、医学のほうではホリスティックな医療という話題があるようです。一つの病気、症状に対しては、一つの薬、対処法を施すというのが通常です。そこで、もし複数の症状が出たら、たくさんの処方を同時にするのですか、そんなことは当然やりませんよね、という問いにどのように答えていくのかを問題にしているようです。それらの症状に潜む根源をみつけて、それを集中的に、最も効果的に思われる処方

医療と工学・技術：有機化・最適化・総合化

ホリスティックな医療：「加齢です...」

- A) 各症状をみて、いままでの経験から、治療法と薬をきめる対処 → 典型的方法
- B) もし、複合的な重度の病気だとしたら → 様々な薬や方法をためず、→ それも一見総合的な治療。
- C) でも、治療じゃなくて、根本をみなおして、最適で効果的な方法、プロセスを考える → 「これぞ名医」!

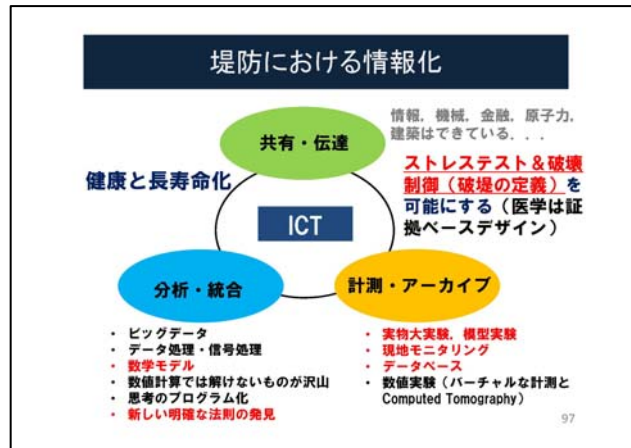
土木・総合工学(防災・減災も)に当てはめると

- A) 個々の問題の一面を解決するために個別の技術の開発や高度化、最適化に力を注ぐ
- B) もし、複雑・複合的な問題に出くわしたら、各技術にかせられた課題に対して最適化された技術をいっしょに投入 → これも一見総合的な技術 → これぞ、土木! → いや??? ?
- C) そもそも、目指すべき社会やシステムの姿ってなんだっけ → それに必要な、実現に必要な技術を考えていく → これぞ体系的、総合技術(ホリスティック)....?

96

を施す必要がある、というのがホリスティックな医療のようです。これを土木に当てはめると。いろんな個別の技術を開発したけれども、じゃ、それを全部高度化して、効率化して一気に登用すればよい結果がうまれるのか、という問いになるかとおもいます。それでは上手な設計はできないと考えられます。このホリスティックという医学の世界の一つの言葉に良いヒントがあるのではと最近考えています。

最後になりますけれども、さっきの破壊の計算なんかをして、何がしたいかというと、端的に申しますと、ストレステストと破壊制御を堤防でもできるようにしたい、と考えています。それに代わる方法でも良いとおもいます。他の工学分野である、情報、機械、原子力、建築、それから金融においても



ストレステストが行われています。基礎理論、シンプルで確かなモデルと有益なデータベースがストレステストには不可欠です。土木では、なかなか物は壊せないですけれども、それを言っても始まらないので、いろいろモニタリングをしてデータを蓄積するとか、点検や点結果の利活用を考え直す、などの策が必要と考えられます。他の産業や技術と競争できるようにするためにも、また、堤防にいろんな技術が導入できるようにするためにも、ストレステストという考えを導入することを考えてみても良いかなと思います。また、様々な工学の分野の教科書・参考書の後ろの方の章には破壊制御もしくはそれに近い言葉が書かれているものが少なくありません。要するに、破壊させないようにするという話じゃなくて、うまく破壊をさせるという話が他分野の本では教科書にちゃんと書いてあって、非常に前向きな感じがします。もし、地盤の本にも、最後の章は「破壊制御」とか、何かそういう話で前向きに取り組んでいくような話があったらいいな、というふうに思う次第です。それを実現化するための情報化、データの蓄積がやれたらいいなと、考えている次第です。

ご清聴ありがとうございました。