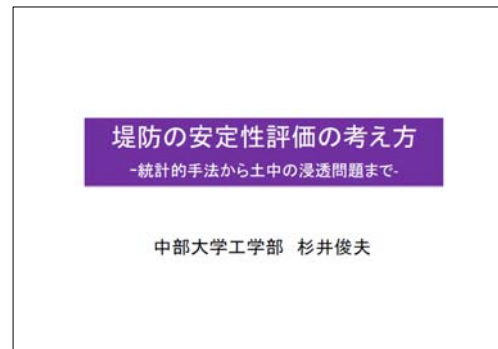


堤防の安定性評価の考え方 —統計的手法から土中の浸透問題まで—

杉井 俊夫
中部大学工学部
都市建設工学科 教授

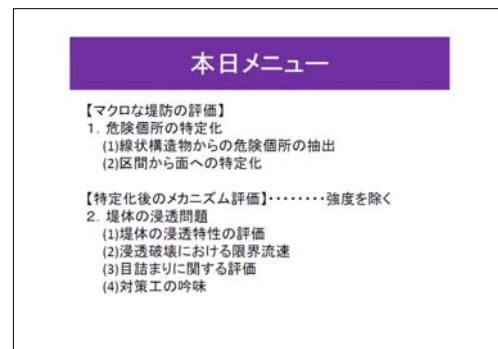


それでは、「堤防の安定性評価の考え方——統計的手法から土中の浸透問題まで——」という変なタイトルをつけさせていただいたんですけれども、本日、この堤防委員会でお話しさせていただきます。実は私、非常に緊張しております。お世話になった先生方がいらっしゃいますので、学位論文の公聴会みたいな感じで非常に緊張しております。



堤防というのは、私は学生のころから習ってきまして、その中で堤防の中身がよくわからないということで、最初にアプローチしたのが統計的手法です。現在ではいろいろな調査法とか解析技術がかなり進んでおりまして、ある程度内容がわかるようになってきたところなんです。私の中の歴史的なことも入っているかもわかりませんので、そこは申しわけないのですがご了承いただきたいと思います。

本日のメニューといたしましては、マクロに見た堤防の評価ということで、まず危険箇所の特定化という方法についてお話しさせていただいて、後半は特定後のメカニズム評価ということで、今回は強度については除いておりますが、浸透問題というところに特化いたしまして、お話しさせていただきたいと思っております。



また、少し時間がございましたら、今日の資料にはございませんが、ただいま中部地整と一緒に地域課題研究というものを去年から3年間ということでやっております。そのご紹介もさせていただく予定です。

堤防というのは皆さんご存じのように、線状構造物の中でどこが危険であるということを出出する必要があります。現在、国直轄河川では、概略点検、詳細点検を実施しています。堤防を概ね200メートルピッチで分割し、その中で代表断面をとらえて、そこで評価をしているということなんです。これはちょっと年代が古いんですけども、地方整備局別に見た堤防整備率です。大体60%ということがわかります。一般の方が聞いたらあまり理解できない数字なんですけれども、実際にはこの60%位というのが現状です。形でみるとこのような数字となりますが、安全性という性能で評価するため、概略点検、詳細点検というのが行われています。

これは皆さんご存じだと思いますけれども、概略点検の場合にはこういった土質条件によるものと、外力条件によるものでランクづけをしまして、さらに、被災履歴があるかないかによって、A、B、C、Dのランクを概略評価でつけています。危険度の高いものにつきましては詳細点検に入っていくわけです。

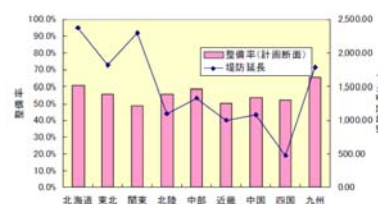


1. 危険個所の特定化

(1) 線状構造物からの危険個所の抽出



わが国の地方整備局別に見た整備率



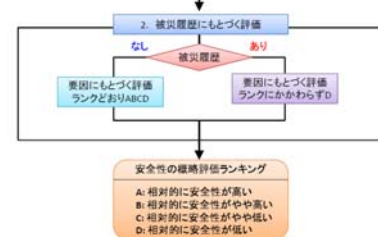
現状の堤防の評価方法 (概略点検・詳細点検)

平成14年7月「河川堤防設計指針」

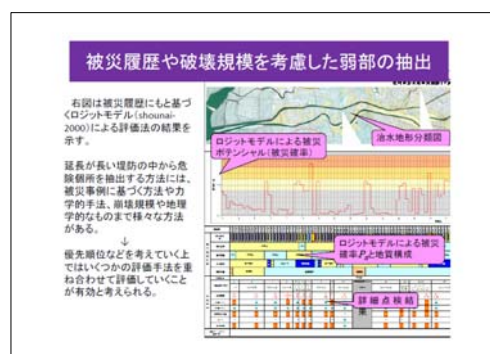
既往の堤防に対する安全性照査



概略点検

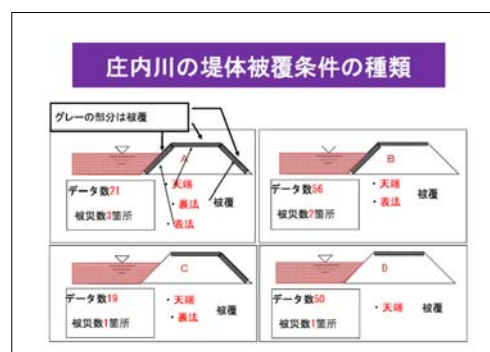
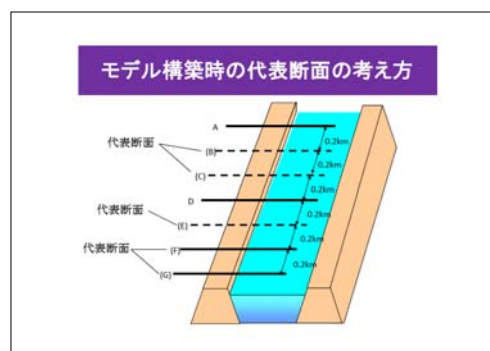


図が小さくて恐縮ですが、こちらに示しましたのは、下にあるのが、国交省のほうで詳細点検をやられたデータでございます。この上のほうが、私どもが過去の被災事例をもとに被災確率モデル、ロジットモデルという方法を使いまして、確率を表現しておるものです。これは赤いところに行くと非常に確率が高いことを表しています。



今回、これらを一つの方法ではなくて、重ね合わせて考えてみようということを検討しております。

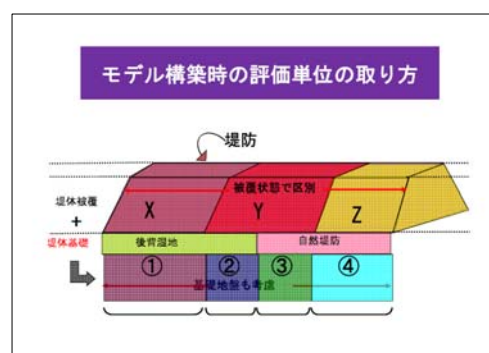
詳細点検は先ほどもお話ししましたように、200メートルのピッチで堤防が切られていまして、その代表断面で評価しています。統計手法でやる場合には、一つ一つのデータが本当にそれを反映しているかどうかというのが非常にぼやける場合があります。それは何かというと、200メートルの区間の中では、力学的にももちろんそうなんですけれども、かなり不均質なものもあります。そこで、この200メートルピッチの断面をとるだけでいいかどうかということをいろいろ検討してみました。これは中部地整の庄内川堤防です。ここでいろいろデータをとりますと被覆している、舗装しているところとか、植生のままであるとか、被覆条件が違って。それが200メートルのところではびったり切れているかどうかというところではなくて、あるところで変わっている。だから、代表断面が200メートル区間すべてを表していることではないということです。



それからもう一つは、基礎地盤の微地形を表した治水地形分類図というものがございます。200メートルピッチできれいに切られているかというと、200メートルの中では異なった基礎地盤があるということになります。これは被災割合を見たものですが、これだけを見ても旧河道のところがほかの基礎地盤に比べて被災割合が高いといった傾向が出ています。

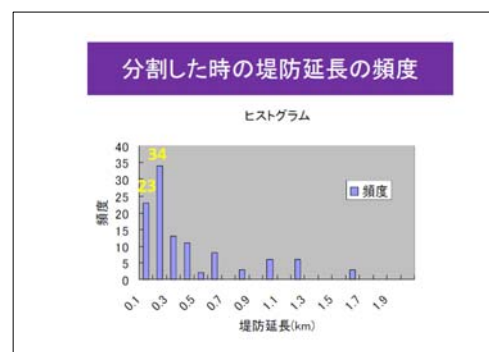


基礎地盤についてもデータを分けていく必要があるのではないかとということで、こんなような形でデータをつくっていきました。これは上が堤体の被覆状態です。それからこれが堤防の基礎地盤という形で、200メートルピッチで

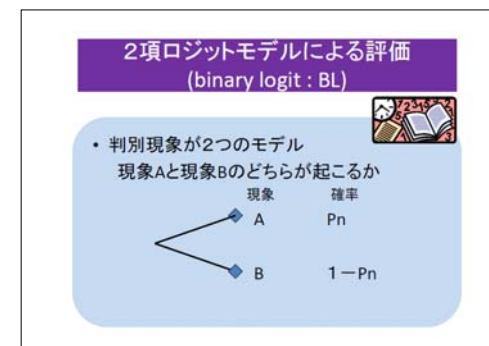


区切るのではなくて、堤防の被覆と基礎地盤等を考慮しながら、これを一つの断面という形でデータをつくりまして、モデルを構築しています。

では、堤防の延長は大体どういうふうに変ってくるかというと、大体100メートル、200メートル、それから300メートルぐらいの堤防延長の頻度になるということになります。それが大体同じ間隔感覚のデータ単位の塊という形になってきます。ちょっと長い1.7キロメートルというものもあるんですが、これは特殊堤になるかと思います。それからこちらのほうで200メートル、100メートル、300メートルというような形でデータをとりにまして、モデルを構築していきます。モデルは、前回、本城先生からもお話がございました。ロジットモデルを採用しました。



統計手法の一手法なんですけど、判別現象が二つのモデルだとします。現象Aと現象Bのどちらが起こるかということで、それぞれの確率を推定する形になります。これが二つに分かれるということで、二項ロジットモデルと呼ばれております。



このロジットモデルのメリットはということ
 ありますが、よく使われる数量化理論Ⅱ類と
 違いまして、データのタイプを選ばないという
 ことです。本モデルの場合には離散的データ、
 例えば植生とか地質とかといった定性的なデー
 タをそのまま取り扱える。これは数量化理論も
 同じですが、数値データの場合、勾配、高低差、

天端の幅とかといったものは、数値をそのまま直接使えるという利点があります。数量化
 理論Ⅱ類の場合も数値データを取り扱うことができるんですが、この下に書いてあります
 ような形で、実は人間の手でカテゴリ区分に分けているということがあります。例えば1
 メートルから2メートル、2メートルから3メートル、3メートル以上というような形で
 区分に分けている。実はこれに物理的な意味があるかということですが、この区分
 の分け方によっても結果が影響されてきます。ですから、数値データをそのまま直接使え
 るという点は非常に大きなメリットだと思っております。

それからもう一つ、これは確率として推定さ
 れますので、確率論との組み合わせが可能であ
 ります。ランダムサンプリングされたものにつ
 きましては、現象の起こりやすさ、確率で表現
 することができます。外力の生起確率などを用
 いたリスク評価の算出というものにも適用でき
 るということになります。

こういったメリットを持ったモデルを使うん
 ですが、非常に簡単なモデルです。重回帰モデ
 ルと同じような形の関数になっています。この
 X_{n1} 、 X_{n2} 、 X_{nk} というのが要因になり
 ます。この θ_k というのがモデルの推定された
 パラメータなんですけれども、まずこの X_{n1}
 から X_{nk} まで要因を、例えば天端の幅とかい

ろいろな情報を入れていく。 V_n は、この式の中にエクスポネンシャルを入れますと、こ
 の P_n というのが0から1までをとる関数になりますので、 V_n が大きくなればなるほど、

ロジットモデルのメリットは？

その1 →データのタイプを選ばない。

離散データ(植生、地質の種類など)→OK!
 数値データ(勾配、高低差など)→OK! 直接扱える。

※数量化Ⅱ類(数値データはカテゴリ区分といわれる
 数値をいくつか離散データに換える必要がある)

(例) 1m~2m この区分は
 2m~3m 物理的に意味を持つか
 3m以上

ロジットモデルのメリットは？

その2 →確率論との組み合わせが可能。

ランダムサンプリングされたデータ

その現象の起こりやすさ(確率)への適用

(例) 外力の生起確率などを用いたリスク評価の算出が可能

ロジットモデル



斜面などの個体 n が被災する確率 P_n は次式で算
 出される。

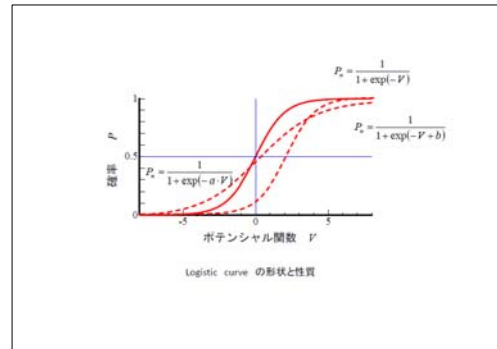
$$P_n = \frac{1}{1 + \exp(-V_n)}$$

$$V_n = \theta_0 + \theta_1 X_{n1} + \theta_2 X_{n2} + \dots + \theta_k X_{nk}$$

ここに、 θ_k : 推定されるパラメータ(フィッティング係数)
 X_{nk} : 斜面などの個体 n の k 番目の特性(入力値)

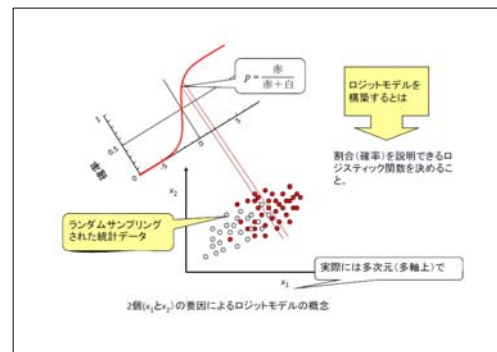
1に近づくという形です。V_nが小さくなればなるほど0に近づいていくという関数でございます。形としてはこんなようになりまして、0から1までを連続する関数になっております。

このロジスティックカーブ、ロジスティック曲線というのは非常に簡単な、自由自在に動くパラメータで、これに定数を足してやれば左に移動するし、係数をかけてやることによって回転もする、こういった関数になります。ですので、非常に使いやすい。私もいろいろなところでロジスティックカーブを使っております。



もう少しモデルの説明をさせていただきたいと思います。

ここにはX₁とX₂という要因、例えば天端の幅、法面の勾配というものを二つの要因だけで表して、被災データと壊れなかったデータと、ここに散布図を作成しております。赤が破壊した堤防、白が破壊していないというふうに考えていただければと思います。これをある区間、ある座標軸



出してやります。これを先ほどのロジスティックカーブにフィッティングさせてやるという方法です。ですので、一つの回帰分析で、非常に簡単なモデルになっています。この説明では、二次元だけでありますが、複数次元、いろいろな要因を多軸上で表現することによって確率として0から1までを表すことができる。したがって、確率論ですので、このデータというのがランダムサンプリングであること、または全数をサンプリングしてあるというどちらかのことが重要になってきます。

それで、被災確率としましては上式で表され、非被災確率、壊れない確率では、被災確率を1から引いてやれば、このような形で表せるということになります。

◆被災確率

$$P_{1n} = \frac{1}{1 + \exp(-V_n)}$$

◆非被災確率

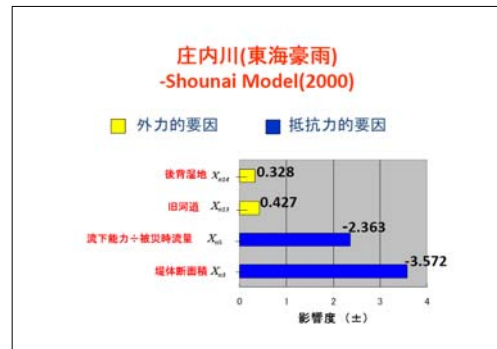
$$P_{2n} = 1 - P_{1n} = \frac{\exp(-V_n)}{1 + \exp(-V_n)}$$

$$V_n = \theta_0 + \theta_1 X_{n1} + \dots + \theta_k X_{nk}$$

次に、パラメータについて説明します。ここに書いてあります1から19までのいろいろなデータを入れてあります。例えば天端の幅、それから裏法高、堤体断面積、堤体土質・・・。堤体土質というのは、Taylorの定数を使っています。 $c/\gamma h$ を使っています。それから流下能力と被災時流量の比ですね。被災時にどれだけ堤防が洪水を流しているかを安全率のような形で表しています。それから法構造、天端の舗装、河道状況は3区分しており、蛇行部とか橋梁があるとかといった情報。それから漏水の有無。地形分類図からとった情報などです。これらのものを入れるわけですが、こちらの上の●は数値データとして、後半は1-0データとして入力されることになります。

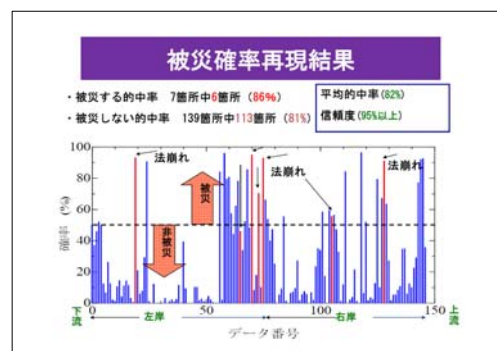
パラメーターの推定結果		
番号	説明	推定値
0	被災時のパラメータ	0.000
1	天端幅	10.000
2	裏法高	10.000
3	堤体断面積	-0.017
4	堤体土質	10.000
5	流下能力	-1.973
6	被災時流量	10.000
7	法構造	10.000
8	天端舗装	10.000
9	河道状況	10.000
10	蛇行部	10.000
11	橋梁	10.000
12	自然堤防	10.000
13	旧河道	10.000
14	背背湿地	10.000
15	低位デルタ	10.000
16	高位デルタ	10.000
17	堤防地形	10.000
18	河床	10.000
19	平均地	10.000
約中率	被災率 (X)	81.5
	被災率 (Y)	81.5
	被災率 (Z)	81.5
	被災率 (W)	81.5
	被災率 (V)	81.5
	被災率 (U)	81.5
	被災率 (T)	81.5
	被災率 (S)	81.5
	被災率 (R)	81.5
	被災率 (Q)	81.5
	被災率 (P)	81.5
	被災率 (O)	81.5
	被災率 (N)	81.5
	被災率 (M)	81.5
	被災率 (L)	81.5
	被災率 (K)	81.5
	被災率 (J)	81.5
	被災率 (I)	81.5
	被災率 (H)	81.5
	被災率 (G)	81.5
	被災率 (F)	81.5
	被災率 (E)	81.5
	被災率 (D)	81.5
	被災率 (C)	81.5
	被災率 (B)	81.5
	被災率 (A)	81.5

今回つくりましたのが、東海豪雨がございました2000年、ちょうど10年前ですが、そのときのデータを使いましてモデルを構築しています。的中率、再現性といったしましては81.5%。ここで斜線が引いてあるのは何かというと、統計処理におきましてt検定の結果です。t値が1.96を満たさない要因は有位水準5%で棄却されているという形です。信頼できるパラメータだけを拾っている形になります。

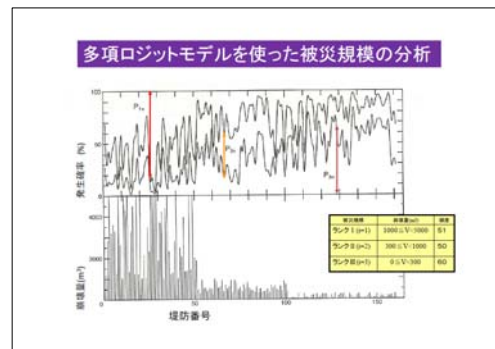


こちらがそのパラメータです。最終的にはこの四つしか残らなかったんですけど、黄色の部分の外力的要因になります。こちらのプラスの要因に該当すると、確率は上がるような形になります。それからマイナスのパラメータは抵抗力的要因になります。こちらが被災時流量と流下能力比、それから堤体断面積、ここでは堤体断面積が安定性として非常に利いてくるパラメータです。こういったものはほぼ同じぐらいですね。旧河道が若干高いような形になっています。

これは先ほどの再現した結果です。平均的中率が82%と書いてありますが、81.5%だったものですね。確率としては50%よりも高いところと低いところで見えています。若干外れておりますけれども、崩壊しているところは50%以上のところが多く、うまく再現されているということになります。これは実は10年前につくったモデルでございます。



そのほかに、多項ロジットモデルというものでございます。被災規模をランクづけできないかということでやったものです。先ほどのものは壊れるか、壊れないかという二つの現象を評価するモデルだったんですけれども、こちらの場合は規模を推定する。この場合にはランク 1

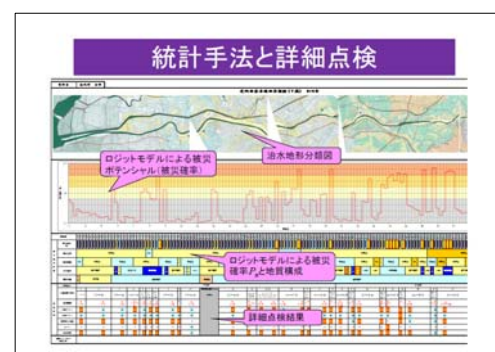


から 3 というような形でやっております。最も大きいのが P 1 n という確率のところにあります。この上のところは、こちらの崩壊量を見てもらうと非常に大きい。こちらの P 2 n は中ぐらいですのでこのぐらい。P 3 n はこちらというように、被災規模の分析にも、数値ではないんですけれども、ランクとして使うこともある程度可能であるということがあります。

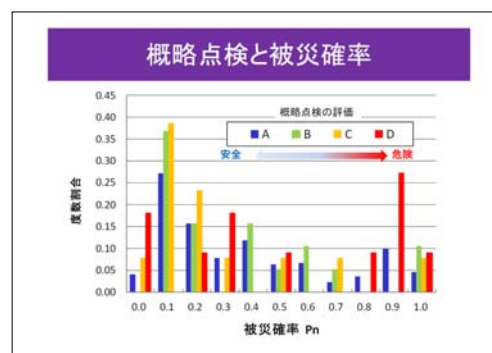
これらは 10 年前に構築したモデルを、今、地域課題研究でもやっております、かなりデータが揃ってきました。今は GIS というものがありますので、そういったツールを使って表現しています。右下のところが名古屋で、これが庄内川、



それから矢田川というものが流れ込んでいるところです。これを見ていただきますと、ここに被災確率が出ているんですが、赤いところが相対的に危険性が高いところです。名古屋のここら辺ですね。10 年前の東海豪雨で切れたのがこのあたりですね。新川がここら辺になるんですけれども、名古屋の北部のところで比較的赤い部分が多いということになっています。それを拡大するとこのようになります。これは 100%、90% で壊れるという意味ではなくて、その当時の外力データを使って危険度順位を測った場合という形です。ですので、その危険に関する優先順位という形で見ていただければと思います。被災データを使って統計手法をやった場合には、その外力に対して壊れた、壊れないというのを評価することになりますので、外力が変わりますとその結果というのが変わってきます。既往外力以上のものが発生した場合には、これとは全く違う結果になるというのはすぐに予想されるわけなんですけれども、相対的に見てこのような差は出てくるというのが一つの見方だと考えております。



現在行われている詳細点検、概略点検と比較をしてみましょうということをやったのが次の結果です。詳細点検のほうはまだデータがなかったので、概略点検のほうでやりました。A、B、C、Dランクを青、緑、黄、赤で示しております。ちょっと見にくいんですが、4本ずつで見ていただくと、若干ずれているんですけどもこれは0から0.1の間です。10%の間。こちらが90から100%の間です。これで見いただくと、相対的に被災確率が高いところはランクDのところが多く占めていることがわかります。しかし、Aランクにつきましては、こちらのほうが多いように見えるんですけども、高いところでも若干出ているのがあります。概略点検では被災履歴があると危険側に入るんですけども、そうでないものは入らない、C、Dには入ってこないということが一つあると思います。ただ、この被災確率が正しいかどうかというのもありますので、こういったものを照らし合わせまして、重ね合わせることによって危険に関する優先順位を決めていくというのを考える必要があるかと思います。

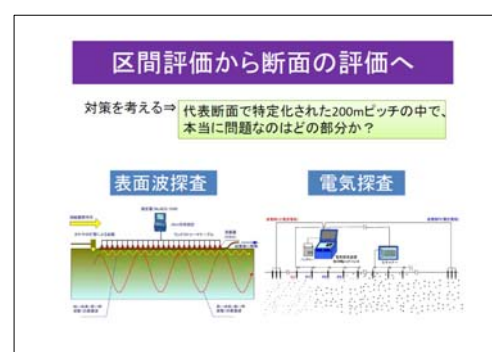


それともう一つは、まだ比較をしていないんですが、被災規模ですね。堤防の安全率で詳細点検されておりますけれども、薄い滑りとか、大きな滑りとかといったものの区別が全く入っていないということなので、そういったものも含めて、これをもう少し整理しまして、優先順位というのを決定していったらどうかということを考えております。

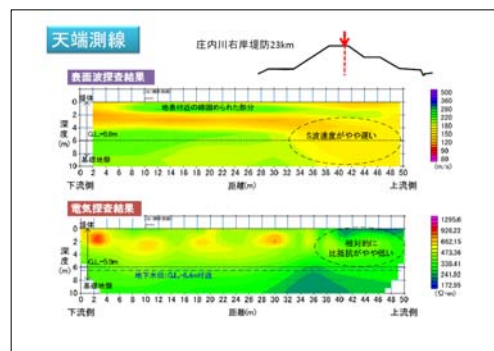
一つ言い忘れましたけれども、モデルをつくったのは200メートルピッチではなくて、先ほどの断面をとっています。今回適用しているのは、200メートルピッチのところの断面に適用して被災確率を計算しておりますので、そのところはちょっと違うのでつけて加えておきます。

一つ言い忘れましたけれども、モデルをつくったのは200メートルピッチではなくて、先ほどの断面をとっています。今回適用しているのは、200メートルピッチのところの断面に適用して被災確率を計算しておりますので、そのところはちょっと違うのでつけて加えておきます。

区間区分というのは200メートルピッチになったんですが、その中でどの断面が本当に問題なのか、対策を考える上で200メートルすべてを検討しないといけないかということになるわけです。近年表面波探査とか、電気探査というのがよく行われるようになってきてまして、これは非常に有効な方法ではないかと考えております。

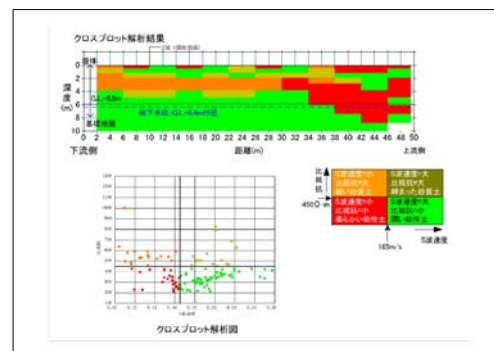


これは、庄内川の堤防で昨年度やった結果になります。表面波探査の特徴としましては、凹凸があるところでは精度が落ちますので、天端舗装があつた横の部分、肩のところで50メートルにわたって表面波探査をやりました。そうしますと、ここら辺にS波のやや遅いところが出て



くる。50メートルの範囲の中でこういったところがあるということでもあります。それから電気探査も同時にここにかけまして、相対的に比抵抗が低いところがある。速度が遅いということで、ここは固い地盤ではなくて、非常に軟らかい土質になっているということと、比抵抗が低いということは、水分が多い部分があるということがここで判断できます。

こういったものを使いますと、200メートルのピッチの中で、全部同じではなくて、その中でどこの部分が危険であるかどうかというのをある程度判断することができると思います。現在では、クロスプロットをすると電気探査と表面波探査である程度の地盤の構成が推定されるということなんですが、ただこれは、実際にはボーリングデータとかいろいろなものがあることが前提です。映像としましてどこが相対的に軟らかいか、水が多いのかというのがわかるというだけでも、非常に大きいのではないかと考えております。



こういったことによって、非常に延長の長い堤防を区間で区切りまして、さらにその中で断面をとるという形を考えています。実は11月ごろに表面波をやろうと考えております。また時間があつたらご説明します。

これは豊川の堤防です。こういうデータ、堤防の中身というのは切って初めて出てくるといふことなんですね。豊川の樋門を改修したときの開削断面です。堤防の中身というのが実はデータとしてあまりありません。それをやるのも非常に大変なので、先ほど言ったような形で、区間に絞って、危険とされたところに関しては、物探である程度見ていくというのも一つの手ではないかなと考えております。



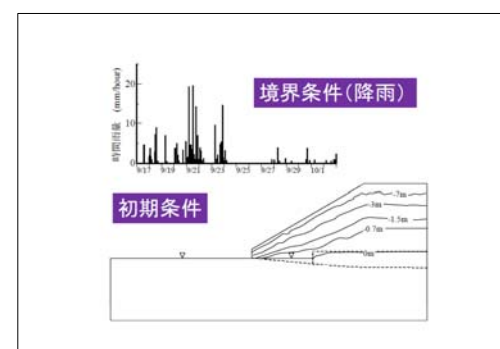
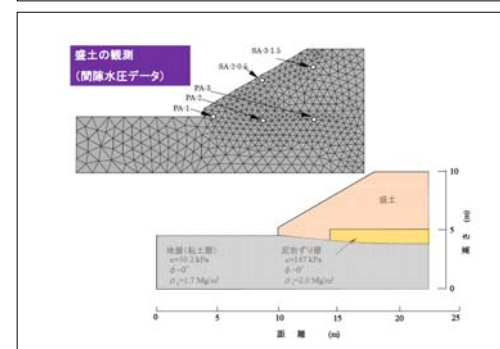
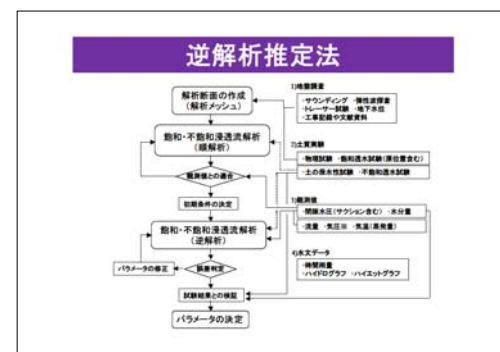
続いて、堤体の浸透問題について話します。

不飽和土の浸透特性というのは、今、堤防の問題ではそこまでやらないよというか、一応この土質であれば浸透特性はこういうものだというルールづけがあるわけですが、それは、一つとしては、堤防の浸透特性を評価するというのが難しいということでもあります。ここに挙げた

のは、幾つかの海外事例です。こういったものが実際にはありますが、国内ではそういった基準化もいまだされておりません。ただ、傾向として定常法にかわって、今は非定常法というもので計測するのが、室内でも原位置でも多くなってきています。定常法には時間的な問題がかかりますので、非定常法が多くなってきています。さらにセンサーが非常によくなくなったということもあるわけですが、そういった面で、今、非定常法による方法がございます。今日は詳細を省略させていただきます。

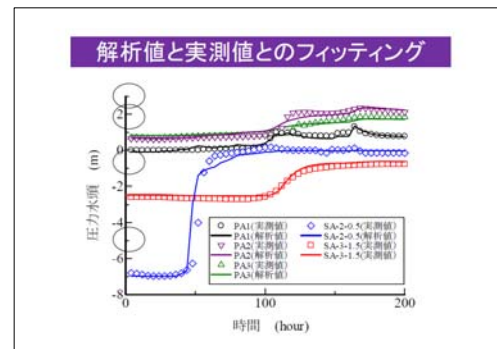
もう一つ、原位置のほうではこういったものがあるかということで、一つは逆解析推定法というのが、浸透問題ではよく使われています。このフローチャートには細かいことが書いてあるんですけども、数値解析で普通やるのは順解析というものです。水圧とか、雨が降ったりするとどういった水の動きをするかというのが順解析であるわけですが、逆解析としては、観測データを取りまして、その観測値に合うような物性を推定するという方法になります。これは堤防盛土で逆解析をして求めたものです。その場合にはいろいろなセンサーを埋め込んでいく必要がある。長期データを収納していく必要があるということですね。この場合には、ここに圧力計、間隙水圧の水圧計を入れてあります。こういった盛土をモデル化しまして、境界条件としては降雨等を入れまして、それから初期条件もセン

2. 堤体の浸透問題 (1)堤体の浸透特性の評価			
不飽和浸透特性の原位置試験法			
試験方法	特徴	利点	難点
Grout	定常	理論が単純 マクロポアでの浸透流を評価	多大な労力が必要 高サクション領域での計測が困難 計測領域は表面近傍に限定
Instantaneous Profile	非定常	理論が単純 試験対象領域が大きい 多深さでの透水係数が計測可能 水分特性曲線が測定可能 高サクション領域での計測が可能	多大な労力が必要 多くのセンサーが必要 計測が複雑 試験は長時間 計測領域は表面近傍に限定
Tension Infiltrometer / Disk Permeameter	非定常	計測が簡便 原位置試験	不飽和透水係数の推定形式 試験対象領域が小さい 計測領域は表面近傍に限定
Cone Penetrometer	非定常	深い地点での試験が可能 計測が簡便	数値解析による逆解析が必要 試験対象領域が小さい コーン貫入による地盤の乱れ

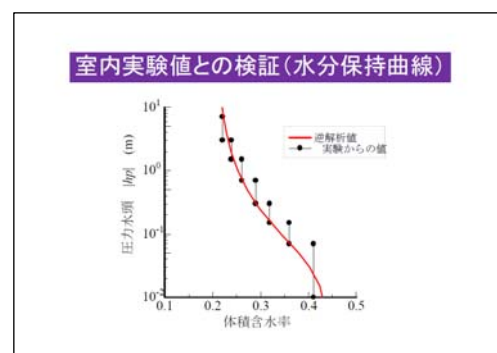


サーを入れていくことによってわかりますので、こういった情報を使いまして逆解析をやっていくという形になります。逆解析の場合には、この○印が実際の計測値になります。実線で書いてあるものが解析値を示しております。実験値と解析値がマッチングするような形で、最初に仮定した物性値を繰り返し修正して合わせていく、フィッティングさせていくという方法になります。こういったものが逆解析では使われる。今後、モニタリングとか何かをされる現場が多くなってくるかと思いますが、そういったところでは、この逆解析をすることが可能かと思えます。この○印がずれているんですが、一つ難しいのが初期値の設定です。何回か繰り返してやって、定常な状態をつくってやるというのが逆解析の場合の面倒なところかと思えます。

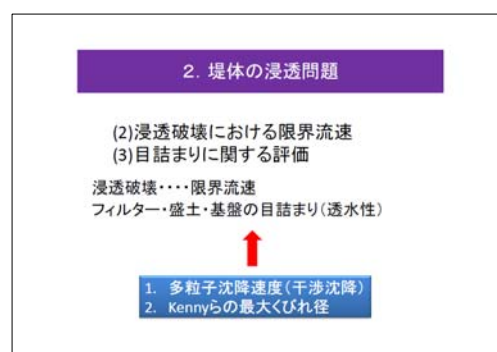
これが実験値と逆解析で得られたものの比較です。実は実験値の正確な値が出ていませんで、幾つかから幾つもの範囲というデータしかなかったもので、それを用い、不飽和浸透特性の中の一つである水分特性曲線、水分保持曲線を求めました。これに関しましては、逆解析の値と実験値の値がほぼ一致しているであろうという形です。



こういったモデルの場合には、マクロに見ていますのでフィッティングとしては非常によいのではないかと思います。例えば室内試験としましては、そういったポイントワイズなデータを使っていきますので、それを堤体全体の透水係数とかというような形で表すのはなかなか難しいところがありますが、逆解析をやる方法はそういった一つのメリットがあるのではないかと思います。



もう少しメカニズム的な話になってくるんですが、堤体の浸透問題の中で、今、浸透破壊というものがよく出てきます。浸透破壊における限界流速と目詰まりに関する評価というお話をさせていただきます。



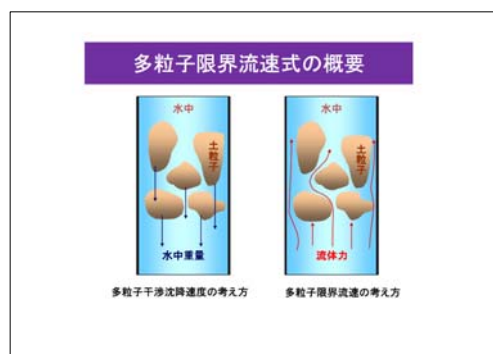
浸透破壊という、これまで動水勾配がよく使われていました。限界流速としては、Justinの限界流速というのがあったんですが、あまりにもずれるということで、今はもう見直されてしまっているんですけども、私はずっと限界流速というものに着目してまいりました。大分昔ですが、私が国際会議に2回目ぐらいに出た

ときに、オーストラリアの先生から「何でお前は流速を使うんだ。なぜ、応力とか動水勾配を使わないのか」と聞かれたんですが、そのときはその英語もよく意味がわからなくて、十分な答えができなかった悔しい思いがしているんですが、今は、動水勾配というものも必要ですが、流速という考え方は間違いではないんじゃないかなと思っております。それは、次の目詰まりという話に関連してきます。フィルター・盛土・基盤の目詰まりということで、これは透水性も低下してきますし、それから動水勾配も上昇しまして浸透破壊を発生させるということになります。

その中で私がずっと提案してきているのは、多粒子沈降速度を使った多粒子限界流速というものです。多粒子沈降速度とは、土粒子が一粒沈降していく速度よりも、実は多粒子、粒子群で沈降していくときのほうが沈降速度がゆっくりで、一つだと非常に速いんですが、幾つかの粒子がある、群になって、塊になって落ちていく

ときには沈降速度が小さくなるという考え方です。それからKenneyらの最大くびれ径というものがあります。フィルター自体の安定性を判断するときに使っていた最大くびれ径というのがございます。それを使いまして、目詰まりの挙動について検討しております。

ではまず、その多粒子限界流速式の概要でございます。多粒子限界流速というのはどういうふう考えたかという、先ほど申しました多粒子干渉沈降速度というのがあります。粒子の沈降速度というのは、一粒の粒子というのがあるわけですが、こういった粒子群で、群



多粒子干渉沈降速度式

$$V_n = \alpha \times V_c$$

$\alpha = n^{1/m}$ n : 間隙率(-)

$Re < 0.2$ のとき $1/m = 3.65 + 19.5 \cdot d/D$
 $0.2 < Re < 1.0$ のとき $1/m = (4.46 + 17.5 \cdot d/D) Re^{-0.15}$
 $1.0 < Re < 500$ のとき $1/m = 4.45 Re^{-0.1}$
 $500 < Re < 7000$ のとき $1/m = 1.39$

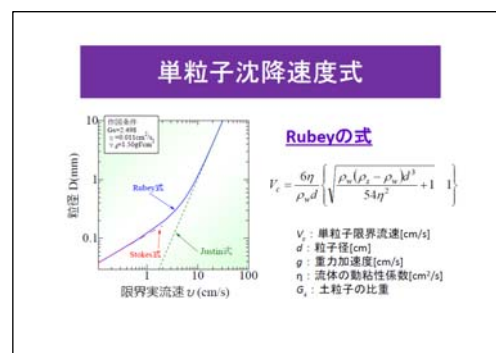
多粒子限界流速式

$$V_{cn} = n^{1/m} \cdot \frac{6\mu}{\rho_s d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_s (\rho_s - \rho_w) g d^3}{54\mu^2}} + 1 - 1 \right\}$$

ただし、 n : 間隙率、 ρ_s : 土粒子密度 [g/cm³]、 ρ_w : 液体の密度 [g/cm³]
 μ : 液体の粘性係数 [g/(cm·s)]、 d : 粒子径 [cm]
 g : 重力加速度 [cm/s²]
 $1/m$ は Reynolds 数によって決まるパラメーターである。

れになって落ちていくときには、実は一粒よりもゆっくりになる。さらにこの密度がもっと高くなってきますと、土粒子がいっぱい群れをなして沈降すると、どんどん速度が遅くなっていくという考えです。それを逆に使ってやろうというのが、多粒子の限界流速という考え方です。粒子のほうに止まっていまして、水が流体力としてかかるわけですが、相対速度を逆に使ってやろうという考え方です。これが多粒子限界流速という考え方であります。

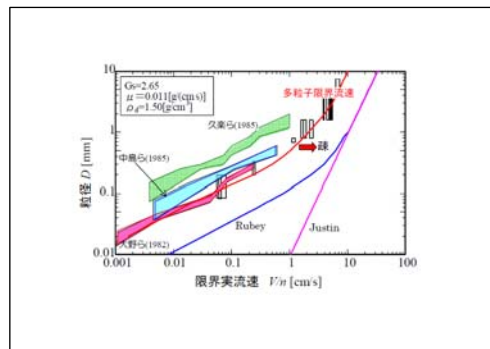
実は、単粒子沈降速度というものがあります。Justinの式というのは昔から有名ですが、Justinの式というのはもう乱流状態に近いような状態の速度になる形になります。実はRubeyの式という、水理学の教科書にも出てくる式なんです、これは砂粒の沈降速度式です。これは半実験式なんです、非常に適用性が高い。層



流域から乱流域まで表現するフィッティングがいい式なんです、こういったような形になります。教科書に出てくる形はもう少し違う形なんですけれども、私はV c（流速）＝の形に直しております。こういった形になります。そうしますと、層流域ではStokesの式と重なり、乱流域になりますとJustinの式と重なった、こういった式になります。一つの式でこれだけを表現するというのは、すごく素晴らしいなと私も感心している式なんです。多粒子沈降速度式というのは、Richardsonという方が、単粒子の沈降速度にαを掛けて算出しています。そのαは補正係数ですが、それはReynolds数に関するこういった式です。さらに間隙率に関係しているものになります。こういった式を使ってV cに掛けてやりますと、多粒子の沈降速度式になります。これをそのまま逆に使ってやろうというのが、今回の方法です。

それでできたのがこちらです。多粒子限界流速式。後ろのほうは単粒子の沈降速度式でRubeyの式に相当するんですが、このところが多粒子限界流速式になります。この式の誘導に関しましては、文献にございますので、また後でご参考にいただければと思います。

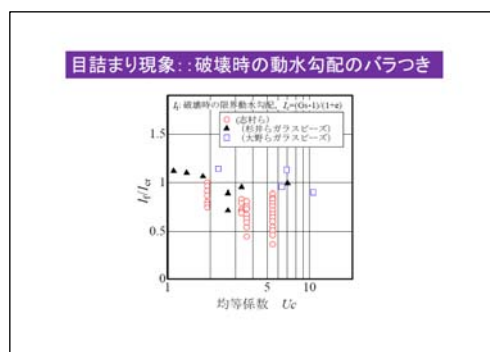
この図面は、縦軸が粒径、横軸が限界実流速です。この場合、間隙率で割っております。大野先生、中島先生、それから久楽さんらのデータがありますが、これは私のほうで実験をやったものです。この辺は非常に粒の大きい乱流域になりますので、こちらは実際にトレーサーを入れて流速を図っております。Justinはほとんど



どちらのほうで、かなり離れていたんですけども、今回、この多粒子限界流速で行きますと、いろいろなものがほぼ説明できるのではないかと考えております。久楽さんらのデータは、水平流れが卓越しておりますので、これは鉛直方向の式なので小さくなって当然であります。大体半分、0.5から0.3ぐらい小さめになります。動水勾配と同様に、係数を流速に掛けてやると、水平部分になってくるとい形になります。

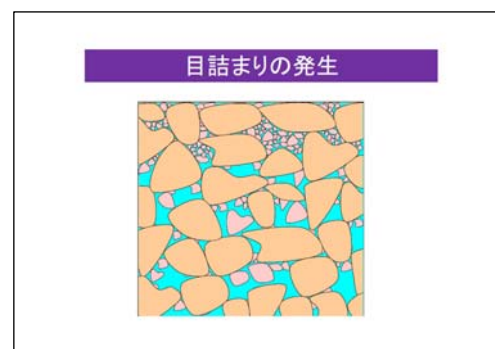
この多粒子限界流速の土のほうがどんどん疎になっていくと、乱流、またはJustinの式、Rubeyの式に近くなっていく。間隙率の n を小さくしてやると、どんどんこちらのほうに近づいていくという形になりまして、広い範囲で適用できるのではないかと考えております。ただしこれは鉛直方向のつり合いだけを考慮しておりますので、水平につきましては、現在考えられている水平の動水勾配の考え方みたいな形で、0.5とかといった係数が必要ではないかとも考えております。

これは限界動水勾配と実際に破壊したものの比です。1という値になるのが、限界動水勾配に相当するものですね。I f というのが実験で破壊したときの動水勾配の関係です。均等係数が大きくなればなるほど、実はばらつきが大きくなっている傾向があります。電中研の志村先生らのデータであります、そういったところでも均等係数



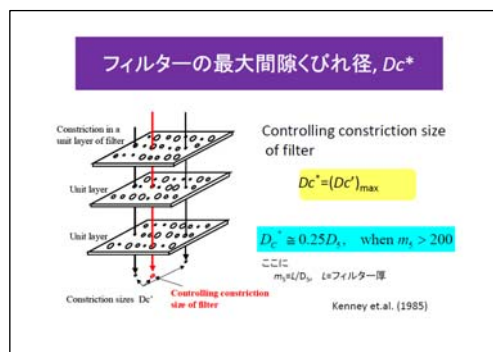
が大きくなるほど、理論値の限界動水勾配よりも小さめで崩壊する可能性が出てくるというような結果が出ています。我々もやったところ、そういった傾向が見えてきています。

これは一体何かというと、実は、土の中の細かい粒子が既に移動し始めているんですね。それで、あるところで目詰まりをして、動水勾配に達して崩壊してしまっているということなので、いわゆる局所動水勾配的な考え方に近い、その根拠になる図面だと思っております。



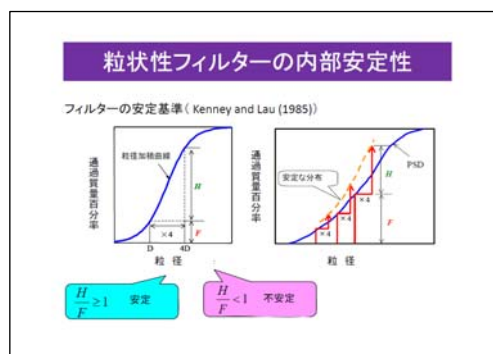
目詰まりの発生ということですが、目詰まりの発生というのは、こういった形で細かい粒子がありますけれども、土のマトリックスの中の細かい粒子が移動し始めて、大きな粒子は変わっていないんですけれども、細かな粒子があるところで目詰まりを起こして、局部的に動水勾配が上がってしまう。これが非常に大きな原因になりますし、それから透水性も同時に低下していくだろうということでもあります。

これを何とか考えようとしたのが、先ほどちょっとお話ししました、Kenneyさんの論文でございます。これはジオテクの1985年にある論文でございますが、フィルターの最大間隙くびれ径というのを提案しておられます。これは、フィルター自体が不安定か安定かというのを調べる一つの指標になっています。どういうふう



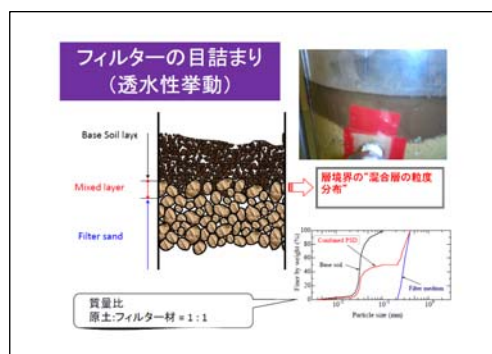
になっているかということ、土の中の間隙というものを考えますと、いろいろなモデル化をして、何層かに層を分けます。そうしますと、そこに大小のいろいろな孔が開いている。その中を下まで通過する粒の大きさを求めます。その中で一番大きなものを最大間隙くびれ径といっています。全ての孔の開いた板を通過する粒の大きさをくびれ径というんですけども、その中で最も大きなもの、上から下までの層を通過する最大の間隙くびれ径という名前で使っています。英語ではControlling constriction size of filterという形で、この D_c の中の一番大きなものをとっています。数々の実験の中で、それは最小粒径、5%粒径の4分の1にほぼ近いというふうに彼は求めております。実は、これが成り立つのには条件がありまして、この土の層の長さ最小粒径の比が200よりも大きくなければならないというのがあります。ですから、非常に細かいシルト系ですと、ちょっとの厚さで対応できるような形になります。これを使いますと、土の最小径というのが D_{c*} 、最大間隙くびれ径というもので定義できるわけです。これを使おうということです。

それからもう一つ、フィルターの安定基準としてKenneyとLauはこういうことを言っています。ちょっとわかりにくいかもしれませんが、フィルターの流動分布がありますと、ある粒径の4倍のところの H と F の割合が1よりも大きいと安定する。すなわち、この部分がたくさん



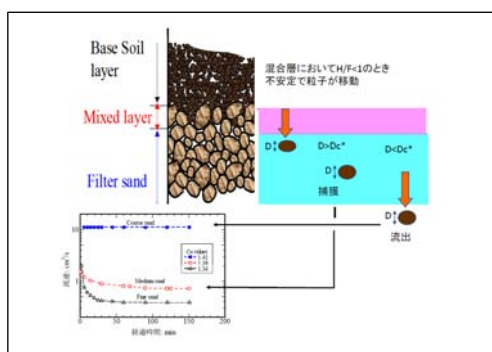
あれば安定するという事です。Fが大きくてHのほうが小さいと不安定になるということを行っています。この安定・不安定は何かというと、フィルターの中で細かいのが移動してしまうということを行っています。結局は、元の流動分布を左に4分の1スライドさせてやって、その差を求めてやればこのHとFというのが求まります。

実はこれを目詰まりという問題に使えないかということで考えました。これは簡単な実験のモデル化なんですけれども、上の部分がBase Soilという形で、土だと考えて下さい。下にフィルター層があります。目詰まりがどこで起こるかという、この境界のところで起こる訳です。ここをMixed layerということで、混合層という名前をつけています。粒径が混合されるところなので、混合層という形で言っています。

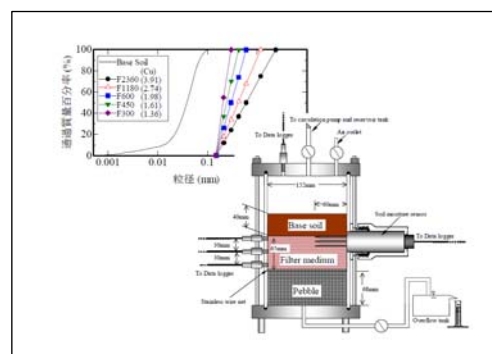


ここの部分だけの流動分布を考えてみましょうということでやったのがこちらの図です。ここの質量比は、1対1でやっているんですけれども、密度の比でとってもいいと考えています。これがフィルターの粒径で、これがベース材です。ベース材とここの混合比、1対1、または間隙率の関係で比で表らわしてもいいんですけれども、そうして新たに出来上がったのがこの粒度分布です。この粒度分布が、先ほどのKenneyのフィルターの安定する条件に合うかどうかを比較してやろうという考えであります。こういった層のところ、非常に薄い層です。ただし、この理論が成立するには先ほどのMが200以上という条件があります。

まずこのMixed layerというところで、もしKenneyの言うFとHの比が1よりも小さければ粒子が移動し始めるということなので、この混合層からフィルター層に移動してしまうということです。このフィルター層に移動したら、先ほどの最大間隙径との比較をします。それよりも大きければ、このフィルターの中にどんどん溜まっていくような形になります。一方、ここの最小径である D_{c*} よりも粒径が小さければ、このフィルター層も通過して流出してしまうと考えました。

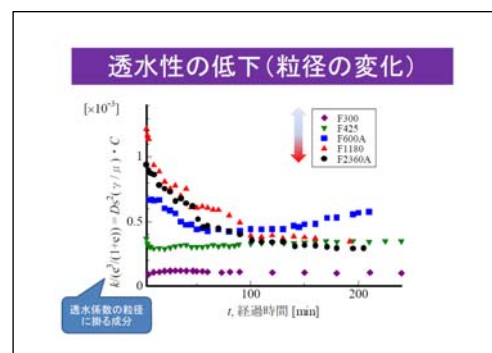


そして、実験データで整理してみるとこんな
ような形ですね。捕獲されるものは、透水係数
がどんどん下がっていく。流出するものは下が
ってもその後一定のままという形になります。
これは実験をやった結果でございますが、いろ
んな粒度分布を考えるのは非常に難しいんで
すけれども、線形のもので1回やってみました。



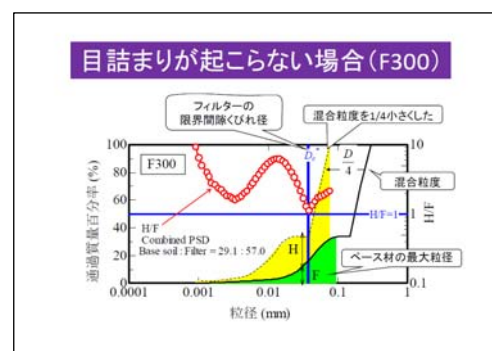
最小粒径だけ合わせておいて、最大粒径を変えて、こういう線形の粒度分布をとっていま
す。数値が大きいものほど粒径幅が広い。ここにC Uと書いてあるものはU Cです。

こちらは透水性の低下の経過時間を見たもの
になります。フィルター層の大きいものほど広
い分布を持ったものになります。赤とか黒いの
は、透水係数が低下していくのが見えます。青
いのは透水係数の低下が低くなってきます。緑
のF 3 0 0というのは非常に安定していて、透
水係数はほとんど変わってきていません。



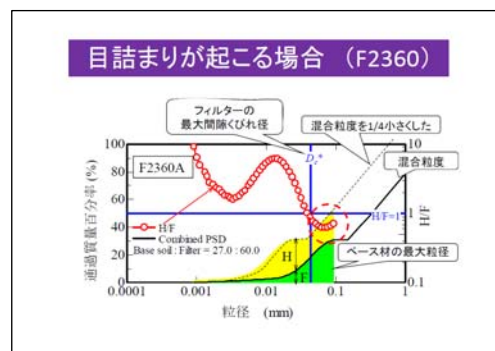
これは透水係数とっているんですが、実は間隙の値も変わってくるのではないかと
いうことで、透水係数を間隙情報で割っております。ここでは何が出てくるかというと、粒
径の形状、粒径の大きさを評価しているものとも見ることができます。そうしますと、時
間が経つにつれ、フィルターの中に細かいものがどんどん入ってくることによって、そこ
の平均径がどんどん小さくなっているということが言えます。一方、F 6 0 0は途中で若
干上がっています。これは、そこに一旦入ってからまた抜けていくのではないかと考えて
おります。

もう少しこれらの情報を実用的にするにはど
うしたらいいかという、細かい図で申しわけ
ないんですけども、先ほどの混合層をつくり
ます。これは今29対1、50対57と、これ
は間隙率でまぜ合わせた混合粒度をつくって
おります。ベース材の最大粒径はここまでです。
だから、ここから下だけを考えればいいという



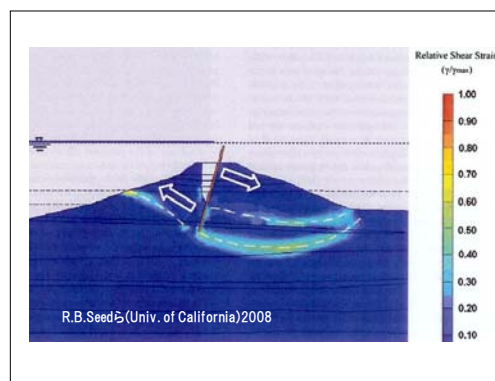
ことですね。この黄色の部分、この混合粒度を4分の1左側にずらしてやる、すなわちFを計算するために、わかるようにずらしただけです。そうすると、このHとFが出てきますので、このH/Fが1より大きいかどうかというのを、このベース材の最大粒径から小さいところで表らわしたのがこの赤い線になります。こうしますと、H/Fというのはすべて1よりも大きいので、このF300というのは安定したフィルターである。目詰まりも起こっていない。透水性も1回も低下していないということが言えます。

一方、先ほど低下していたF2360という物ですね。これにつきましては、この部分でH/Fが1を下回っている。すなわち、この混合層は不安定になっているということで、細かいのが移動します。移動するんですが、移動してフィルターの中に入ると、フィルターのD_c、最小の径になりますが、それよりも大きい



ので、そこで捕獲されていく。フィルターの中でどんどん捕獲されていって、透水係数がどんどん低下していくというのが、この粒度分布から推定することができます。境界のところの混合した粒度分布を使ったら、目詰まりがどのように起こる・起こらない、それから透水性が低下していくのかというのはある程度推定できると考えております。こういった方法をやりました。

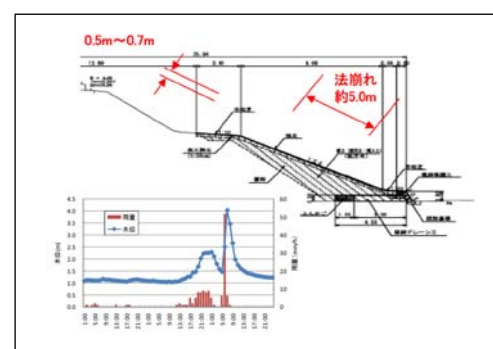
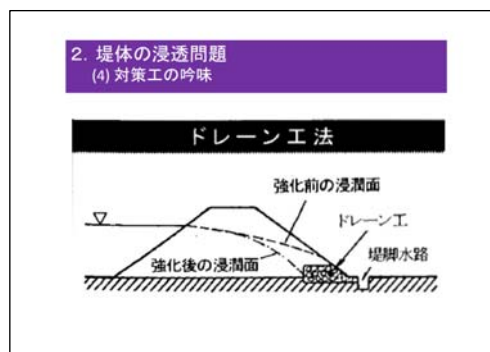
これは、去年地盤工学会で提言した中の一つなんですが、地震と豪雨に対して総合的に評価し、適正な対策工法が不可欠であるという提言があります。下の絵は私がちょっとつけ加えたもので、実はこの絵は有名な絵でご存じの方もみえるかも知れませんが、カトリナが来たときの堤防の破壊です。実は、堤防の中にこういったシートパイルが入っておりまして、越水



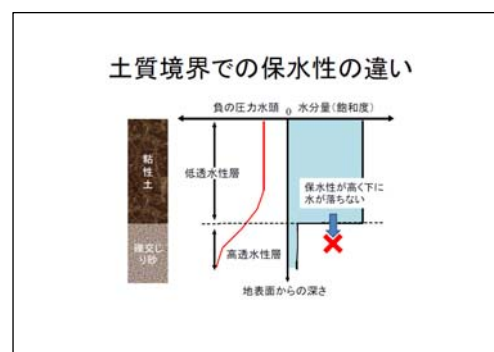
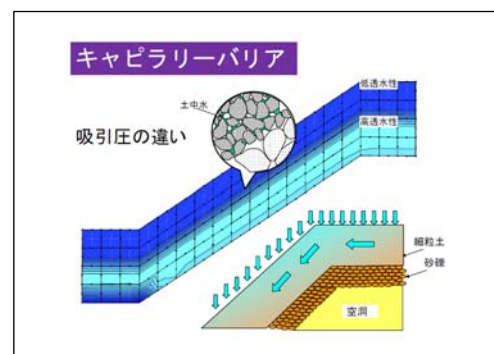
しないような形をとっていたんですが、実際にはこの波が襲ってきたことによって、シートパイルを倒しながら堤防を乱しているような状態になって、最終的に崩壊してしまった。こういった現象というのは、越水しないためにシートパイルを打ったにもかかわらず、そういう特殊堤が逆に堤防を乱してしまうことになってしまったということで、対策を考え

るときに、ある一つのことだけを考えると、別のことを見落としてしまう可能性があるのではないかとということではないかと私は思っております。総合的に評価するというのは、いろいろな見地から見ていかないといけないということだと思っております。

その中で一つ、私がずっと疑問に思っているのが、ドレーン工法です。ドレーンの工法といたしまして、堤体内の浸潤面を下げるためにドレーン工を堤防の中に打つわけですが、そういったときに、堤防を1回開削して、ドレーン工を入れて、またここを埋め戻す施工をします。実はこの形状というのが、昔から気になっておりました。場所はあまり詳しく言いたくないんですけども、ある法面が壊れたところです。実はこの下にドレーンが入っていて、この白いのがわかると思いますが、ドレーンを入れてすぐというか、そんなに日が経っていないときです。そのときに、結構雨は降ったんですけども、水位はあまり上がらなかったわけです。古いブロックが載っていますけれども、この上には新しいものが載せられています。下からは水がちょろちょろと出ているんですが、このときは50ミリぐらいの雨量で、河川水位としては4メートルぐらいです。そんなに高い水位ではなかった。浸潤面が非常に高い位置に来たわけではないんですけども、法面が崩壊してしまったということです。それも、ドレーン工を入れて半年も経たないうちに崩壊したという事例です。

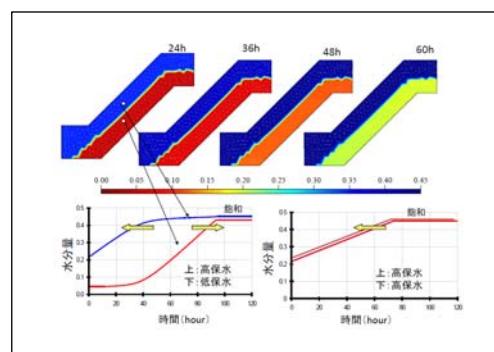


この原因が何かというと、はっきりは申しませんが、一つとしてキャピラリーバリアという現象が考えられます。今日はおられないんですが西垣先生がよくご存じだと思うんですけど、吸引圧の違いによって水が流れない。キャピラリーというのは毛管ですね。毛管によるバリアということです。実はこれは古墳の構造です。半築構造で、砂礫の上に細粒土が載っている。土でできているのに古墳の中には水が入ってこないというのは、実はこのキャピラリーバリアを使っているというのが大きなところなんです。すなわち、雨が浸み込むとどうなるかという、この表面を流れてしまって、中に水が入らないということです。実は上層が低透水で高保水性、



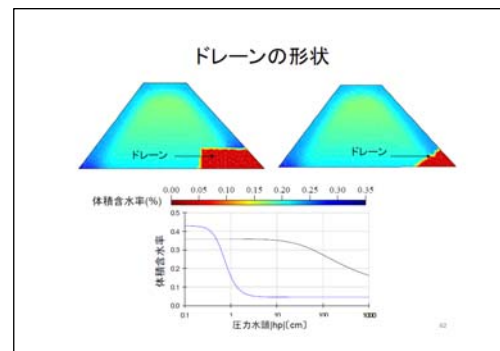
下層が高い透水性で保水性が低い。この境界のところを拡大してみます。大きな粒径と小さな粒径でいきますと、ここに水が入ってきます。そうすると、細かい間隙になりますので、このところに水が吸収されます。吸引圧が高い。ですので、下のほうには水がなかなか入りにくい。さらにここが飽和するとやっと入ってくるんですが、飽和する前に横に流れてしまうという現象になります。勾配を少しつけてやると斜めに流れていくということで、下には水が入ってこないという現象になります。これをキャピラリーバリアということで、今、廃棄物処理場の第1次バリアとして、表面のところにも使われているわけです。

こういった現象が、実はドレーンをつくったときに起こっていないかということがあります。これは若干理解しにくいのかもわかりませんが、圧力というものは、土の境界層を連続してつながりますが、水分量というのは、今見ていただいたような形で不連続になります。境界層において不連続になります。こういった現象が今のキャピラリーバリアになるのですが、これは上が高保水で下は低保水の場合のも



のです。上から水を飽和させていきますと、上のところはどんどん飽和します。下のところはゆっくりと飽和して、約90時間後に飽和する。下も上も高保水のものを使ってやるとどうなるかという、この初期値が高さによって違うのでちょっとずれていますが、70時間ぐらいで全部飽和してしまうということになります。ですので、こういった下が低保水の、礫のほうが全体が飽和するのに時間がかかるということがわかります。

これが先ほどのドレーンのところで、こういった形状というのがあることによって、この部分のところに水が溜まりやすくなっているんじゃないか。実際にはドレーン計算するとき、河川水のほうをすごく気にされるんですけども、上から来ている雨量に対して表層の滑りが発生しやすくなる形状になっているんじゃないかということが懸念していることです。従って、ドレーンの形状を変えてやるとか、留意する必要があると思います。



今回、評価を特定する場合に幾つかの手法の比較とか、破壊規模を考慮して優先順位を決めていく必要があるのではないかと、それから現地調査、非破壊試験方法の開発とか、そういったものの重要性というのがあることをお話ししてきました。お金もかかるかもわかりませんが、それが普及されることによってどん

どんコストも安くなっていくことですし、今のセンサー技術というものも、10年、20年前とは大きく変わってきました。コストも非常に安くなってきております。そういった試験、調査法の開発というのは非常に重要で。特に、非破壊の試験方法については、これからいろいろなものに適用していく必要があるのではないかと考えます。

それから、浸透破壊と目詰まりというのは、単独では考えられない。両方一緒に考えていく必要がある。最近では局所動水勾配という考え方はこれにのっとっているものであるというと思います。今後、目詰まりとかを考えていくときに、なかなかマトリックス解析とか何かでは説明できない点がございしますので、今、粒子解析とかいろいろなものがありますけれども、そういったものも重要になってくるのではないかと考えます。それでさらにどん

おわりに

- ・ 評価特定化するには、いくつかの手法との比較や破壊規模なども考慮する(被災履歴も含む)。
- ・ 現地調査・非破壊試験方法の開発の重要性。
- ・ 浸透破壊と目詰まり問題への対応
- ・ 対策法の吟味(本来の目的以外への影響)

どん明らかになってくる事項もあるのではないかと考えております。

また、対策の吟味としては、一つの目的だけを考えると、ひょっとして過ちをおかす可能性があるのではないかとということで、総合的評価という見方で対策法も考えていく必要があるのではないかとことがあります。今回、一つの例を挙げたんですけれども、それ以外にも幾つかあると思いますので、そういった点を我々は注意していく必要があるのではないかと思います。

最後に残された時間を使いまして地域課題研究として、中部地整と一緒にやっている調査内容の一部を報告します。先ほどの表面波のほうでは、こういったようなクロス分析もやりまし、堤防断面に散水をさせてもらい、時間経過による電気探査の比抵抗の変化を見えています。これは応用地質の小林さんがやられている一つの研究ですけれども、比抵抗の変化率がどういうふうになっているかということで、比抵抗が増えるというのは水が入ってくるんですけれども、比抵抗が減るところが出てくるというのはどういうことかということ、そのところに空気が入ることによって比抵抗が下がるので、空気の挙動を調べるということをしました。これが散水したところになります。

これは見かけの比抵抗なので、そのままダイレクトの値なんですけれども、これを差し引きすると、これがそうですね。これが変化率です。ここは比抵抗が増加しているということは、水分がここに集まっているんですけれども、青いようなところが減少しているんですね。そうすると、時間的に見ていくと、そこに空気が移動していくのではないかとというようなことを見えています。ここもそうですね。

比抵抗の場合は、単一で行くとすごく範囲が狭いので、ほとんどわからないんですけれども、変化率で表すとある程度、水分が減っているところと上がっているところがわかるということで、その差を求めています。

あと、先ほどもちょっと出たんですけれども、堤防断面の表面波探査では、EPSを使えないかということを考えています。表面波の場合に、凹凸の部分ではできないところがあるので、EPSで盛土の高さまで仮盛土みたいな形にして、その上で表面波を測ろうということを言っています。今のところ、実際にはEPSで施工された盛土でも測れることが観測データとして得られていますので、一度この堤体の小段のところでやってみようということを考えています。一番心配なのは密着のところなんですけれども、金具等を使いまして密着しています。

調査のほうが遅れておりますので結果はまた報告させていただきたいと思います。