

信頼性解析法の河川堤防への適用

－問題点の整理－

本城勇介
岐阜大学工学部
社会基盤工学科 教授



「信頼性解析法の河川堤防への適用」ということで、発表させていただきます。

本発表は、関東地方のある河川の中流域10kmのデータをいただいて、信頼性解析と称するものがどのくらいそこで有効なのかどうかということを、試験的にやってみたものであります。

結果が、私としては非常に不本意というか、それは私のやり方が悪いということもあるかもしれませんが、やはり堤防独特のいろいろな問題があるためになかなかうまくいかないことがあります。ここから発表することは、結論等を見ると一見うまくいっているようにも見えるかもしれませんが、非常に問題点が多いということを感じております。ですから、今日はその問題点について提示するような形で発表したいと思います。

ただ、信頼性設計がこんなに使えないのか、特に堤防のような線状の構造物で使えないのかということで、皆さんがあまりがっかりされると私としても不本意ですので、非常にうまくいく例もあるんだということもお示ししたいということで、今日は私と一緒に最近研究しております大竹さんに説明していただくもう1つの例があります。これは、延長12kmの水路の液状化対策について検討するために、液状化危険度解析を

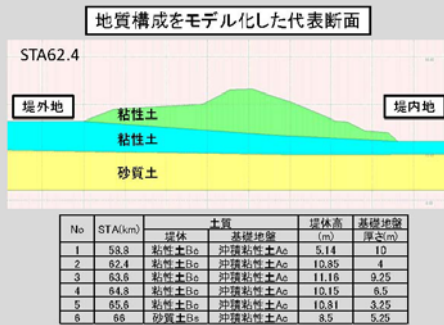
12kmにわたって行ったものです。この例などはかなりうまくいっているのではないかと私たちは考えております。この例については、土木学会の今年（2012年）の1月の土木学会論

内容

- 中流域堤防約10kmの信頼性解析 40分
 - － 例題提示と提案する信頼性解析法の枠組み
 - － 地盤解析：応答局面法の作成
 - － 不確実性解析
 - － 結果の提示
 - － まとめ
- 線状構造物の信頼性解析の成功例 20分
 - － 例題提示
 - － 地盤解析：応答局面法の作成
 - － 不確実性解析
 - － 結果の提示
 - － まとめ

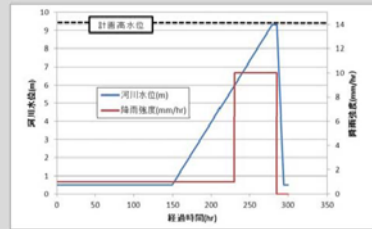


代表断面の設定と地質構成のモデル化



外力条件(降雨と河川水位)

過去の洪水記録を踏まえて、当該流域の設計外力(降雨量と水位の時間変化)が定められている。



この降雨波形と水位波形を組み合わせて、外力条件を設定する。

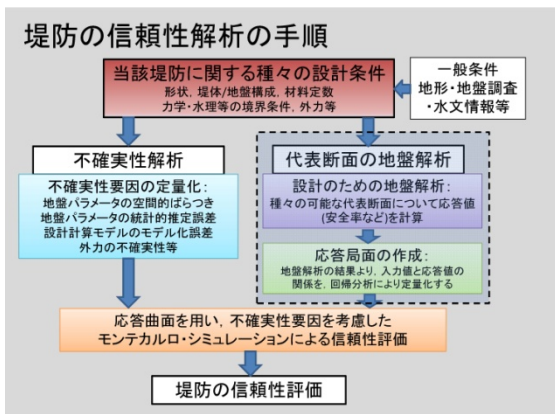
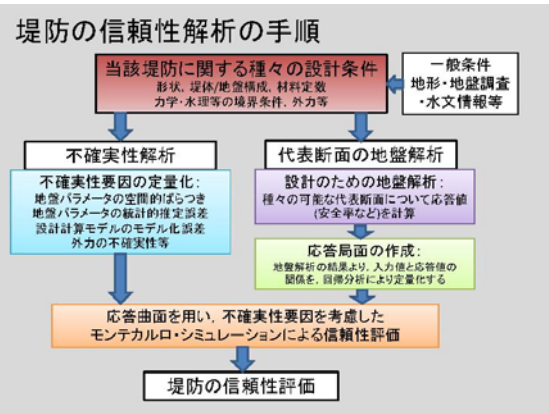
粘性土っぽい堤体がありまして、その下に粘性土があつて砂質土があるというような、土層構成となっています。

この図は、少しご説明したほうがいいと思うので、詳しく説明します。これは、私たちが最近信頼性解析を行うときに、大体踏んでいる手順を示したものです。長いこと私は信頼性解析というのをやっておりますが、なかなか受け入れられないということがございまして、いろいろ知恵を絞って、何とか少しでも普通の実務をやっている地盤の技術者がわかるような形で論を展開したいと思ひまして、こういう方法を考えております。

ここで一般条件とは、地質・地盤とか、ごく一般的な情報という意味です。それを、何らかの設計できる形に加工し設定するということがあります。

細分区間を決めるとか、代表断面を決めるとか、代表断面の土層構成を決めるとか、いろいろな意思決定が入っているわけです。

これの後を最近では2つにはっきり分けることにしております。1つが「地盤解析」といって、これは普通に地盤を解析する方法だというふうに考えていただきたいと思います。例えば堤防でしたら、「河川堤防の構造検討の手引き」にある手順を踏ん



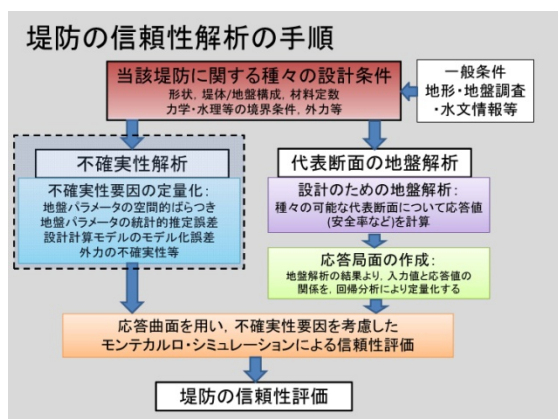
で、浸透解析をして、そして円弧すべり解析をしてその断面の安全性評価するという、そういう手順だと考えていただいてもいいと思います。

ただ、ちょっと違うところがあります。ここには確率・統計的な話は何もありません。ただ我々が「応答曲面」と呼んでおります、入力値と設計結果（安全率など）を結びつける関数を求める作業があります。このために、特に閾値あたりのクリティカルになるケースをかなりの数、計算して、それで入力と出力の関係を一つの簡単な関数（回帰分析で求める）で関連づけるようにいたします。でも、ここには回帰分析する以外は全く、確率とか統計とか不確実性とかバラツキとか、そういう話は入りません。全く地盤工学的な話です。

一方、こちらは、我々は「基本変数」と呼んでおりますが、いろいろな要因——後で出てきますが、単に地盤パラメータのバラツキばかりではなくて、少ないデータから地盤定数を決めているわけでありまして、空間的バラツキ、統計的推定誤差。それから、設計計算には理想化や単純化が含まれるので、モデル化の誤差というものがあります。さらに、外力の不確実性があります。今回は洪水は決め打ちで特に不確実性は考慮しておりませんが、そういうものを考える場合もございます。

最終的にこの2つを合わせて信頼性評価をすることになります。一方、不確実性の解析には、不確実性の扱い方に関するいろいろな知識が必要ですが、地盤解析・応答曲面に関しては全くそれは必要ないということです。

最後はモンテカルロ・シミュレーションでやるというふうにしております。計算機の能力が上がりまして、ほとんど計算に問題は生じません。



これは、ある断面を取ってきて、例えばこのケースだと、ここに1とか0.5とか書いてあるのは、決めた設計の非排水せん断強度の平均値（深度方向に増加していたりしてもいいんですが）、平均値を1として、その半分とか4分の1とか、もっといろいろなケースをやることはありますが、そういうものを入れて安全率を計算しております。普通の計算を何回もやっているということです。

結果的にこれは非常に単純な形にしておりますけど、こういうような、安全率とこれとの間の関係を導き出します。経験によりますと、応答曲面の誤差は、結果にあまり影響を与えません。

これを応答曲面と称しますが、これを単に1断面でやるのではなくて、決められた代表断面、今回は断面全部について一通り計算します。円弧すべりについて堤体でクリティカルなもの、と、基盤までするものと、両方それぞれ別々に考えております。

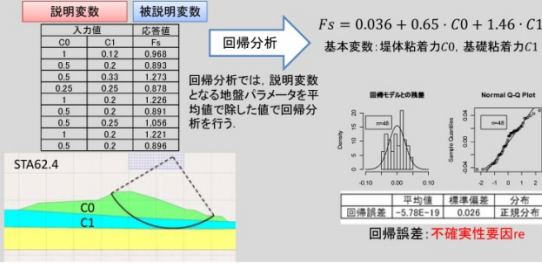
今日は、基盤まで通るものでお示したいと思います。

これらすべてをとにかくこういう形で決めてしまうわけです。決定係数というのは（これが1だとパーフェクトフィットですが）、どのケースを見ても十分に高いフィットをしているということがわかります。

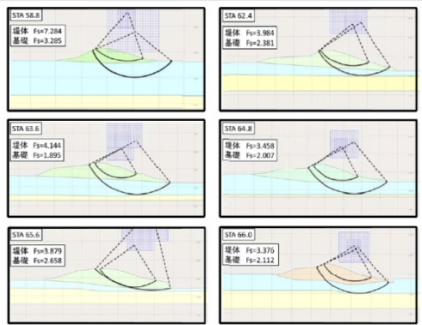
地盤解析と応答曲面の作成

（応答曲面）
地盤解析により導いた構造物の応答と基本変数（地盤パラメータなど）の近似的な関数関係

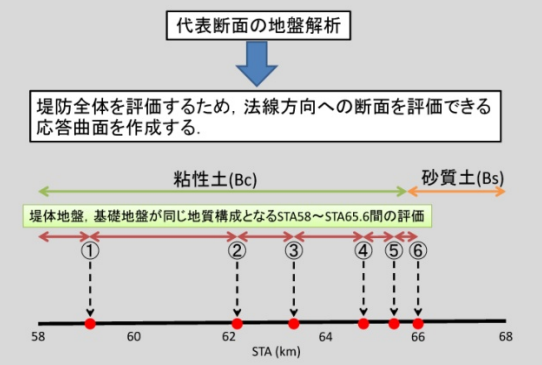
例：地盤解析で地盤パラメータを入力し、円弧すべり安全率Fsを計算



各代表断面における臨界円弧



代表断面から堤防全体へ



応答曲面(すべり破壊)

表 25 各代表断面 堤体すべり 応答曲面一覧

STA	堤体すべり 応答曲面	R ²
58.8km	$F_s = 0.091 + 6.52 \cdot C_0$	0.992
62.4km	$F_s = 0.028 + 3.66 \cdot C_0$	0.996
64.8km	$F_s = 0.051 + 3.87 \cdot C_0$	0.975
66.8km	$F_s = 0.031 + 3.19 \cdot C_0$	0.990
68.8km	$F_s = 0.038 + 3.69 \cdot C_0$	0.996
70.8km	$F_s = -0.0074 + 1.67 \cdot C_0 + 1.16 \cdot C_1 - 0.28 \cdot H + 0.29 \cdot L + 1$	0.986

表 26 各代表断面 基礎すべり 応答曲面一覧

STA	基礎すべり 応答曲面	R ²
58.8km	$F_s = 0.052 + 0.56 \cdot C_0 + 2.82 \cdot C_1$	0.987
62.4km	$F_s = 0.036 + 0.55 \cdot C_0 + 1.46 \cdot C_1$	0.992
64.8km	$F_s = 0.0082 + 0.41 \cdot C_0 + 1.41 \cdot C_1$	0.983
66.8km	$F_s = 0.014 + 0.51 \cdot C_0 + 1.45 \cdot C_1$	0.986
68.8km	$F_s = 0.048 + 1.40 \cdot C_0 + 1.17 \cdot C_1$	0.979
70.8km	$F_s = -0.015 + 0.23 \cdot C_0 + 0.12 \cdot C_1 + 0.16 \cdot C_2$	0.970

地盤パラメータだけでなく、形状を表すHとL、Ac層深さDを基本変数に加える

すべり位置	応答曲面	R ²
堤体	$F_s = 3.60 + 3.75 \cdot C_0 - 0.87 \cdot H + 0.050 \cdot H^2$	0.951
基礎	$F_s = 2.35 + 0.0066 \cdot C_0 \cdot L + 0.20 \cdot C_1 \cdot D - 0.055 \cdot H - 0.11 \cdot D - 0.013 \cdot L$	0.850

C0: 堤体地盤の粘着力, C1: 基礎地盤の粘着力, H: 堤体高さ, L: 堤体幅, D: 基礎地盤Ac層深さ

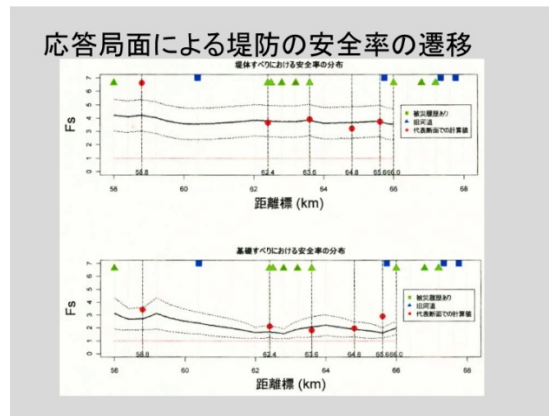
これが最終的に基盤のすべりについてこのケースで用いているものです。Hが堤体の高さ、Dが基盤のやわらかい層の深さ、Lが堤体の幅、 C_0 というのが堤体の強度で、 C_1 が地盤の強度です。この例では基盤を通るすべり安全率の決定係数はあまり高くないように見えますが、後でお示ししますが、他の不確実性に比べると、この程度の誤差はほとんど問題にならないということがわかります。

安全率の分布を法線方向に内挿したのが実線です。こうすると、安全率の縦断方向分布推移がみえてくるわけです。特に今回は安全率は下流のほうが高く上流のこの辺が一番低くて、また少し上がるというような、全体ではこういうような分布になっております。

以上が応答曲面です。どういうところを計算するか、どういうところに注意するとかいう説明は省きましたが、やっている

ことは大体わかっていただけたと思います。非常に荒っぽいといえ荒っぽいですが、今の設計法を踏襲してそういうふうにしたということです。

事務所等によっては、堤防の安全性というのは、どういうところが危ないとか危なくなるとかいう経験則を持っている事務所があるというようなことも聞きますが、そういう方法を多少システマティックにやったということでもあります。



次に、不確実性の解析です。我々は普通、信頼性解析をやるときは、地盤パラメータの空間的バラツキ(土層厚を含む)。それから、地盤パラメータの統計的推定誤差—これは、調査地点から離れていれば、それだけ不確実性が大きくなるだろうということです。それから、設計計算モデルのモデル化誤差です。モデル化誤差を定量化するには、実際の破壊例と比較するのが一番いいと思うんですが、実際に破壊するのは、安全率が1のときであるわけでもありません。1より多少大きくて破壊してしまうものもあれば、1を過ぎて、0.9とかで破壊するものもあります。そういうものが、要するに現在の設計計算法の精度だというふうに考えて、その不確実性を定量化するのは。さらに、外力の不確実性ということがあります。

特に、この2年間ぐらいは地盤パラメータの空間的バラツキと統計的推定誤差というのを、きちんとした理論にまとめようとしてやってきているんですが、今回のケースでは、そのような理論を駆使できるような状況には、あまりにもデータが少なすぎる状況でした。このため、かなり原始的にというか、かなり無理をして計算をしております。

実際にどのぐらいデータがあるかというと、ここに書いてあるようなデータの数があります。ここにありますように、堤体についてはUU試験と書いてあるものが全部で31個ぐらいある。基礎については、やはり31個あります。こういうデータを見ると本当に悩んでしまうんですが、これがUU試験の結果だといってこういうふうにプロットされても、どういうふうに考えていいのかがよくわからないので、このケースでは、 ϕ があるものは無視して、 $\phi=0$ のもののだけで計算します。この辺は議論がいろいろ

不確実性解析

- 地盤パラメータの空間的ばらつき(土層厚を含む)
 - 地盤調査データより設定。特に堤体の地盤パラメータ(強度と透水性)の設定に苦慮。
- 地盤パラメータの統計的推定誤差
 - 地盤調査データにより設定。方法論あり。堤体の地盤パラメータの設定に苦慮。
- 設計計算モデルのモデル化誤差
 - 国総研資料「堤防の浸透破壊に対する安全性評価の度向上に関する調査」(菊森(2008))より解析。不十分。
- 外力の不確実性
 - 今回の解析では、洪水と降雨は所与。不確実性考慮せず。

不確実性解析(地盤パラメータ)

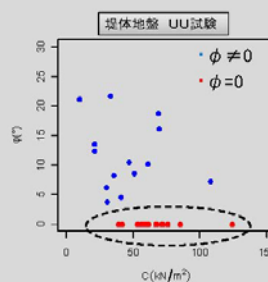
地盤解析で扱う地盤パラメータ

ρ_t : 湿潤密度
 C : 粘着力
 ϕ : 内部摩擦角
 k : 透水係数

解析するデータの検討

項目	試験値	試験値	試験値	試験値
C: 粘着力 (kN/m ²)	UU試験値 $\phi=0$	17	UU試験値 $\phi=0$	23
	UU試験値 $\phi \neq 0$	14	UU試験値 $\phi \neq 0$	8
	CU試験値	4	CU試験値	19
ϕ : 内部摩擦角 (°)	UU試験値 $\phi \neq 0$	14	UU試験値 $\phi=0$	8
	CU試験値	4	CU試験値	10
k: 透水係数	As試験値	33	As試験値	56
Cresswell標準値 (m/s)	As試験値	54	As試験値	129
ρ_t : 湿潤密度 (g/cm ³)	As試験値	35	ρ_t : 湿潤密度 (g/cm ³)	41

UU試験



UU条件(非圧密非排水)の三軸圧縮試験では、 $\phi=0$ として扱う

UU試験で $\phi \neq 0$ でない試験結果のデータは使用しない

UU試験($\phi=0$)の結果を粘性土に適用する

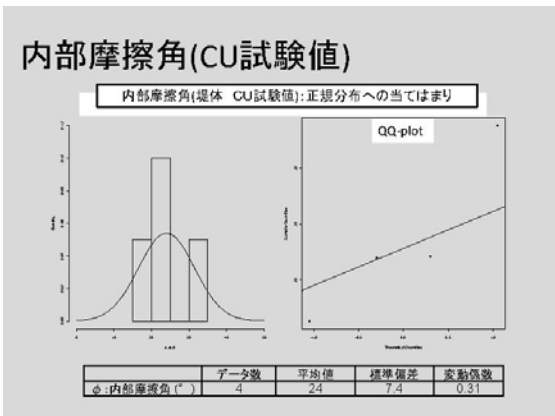
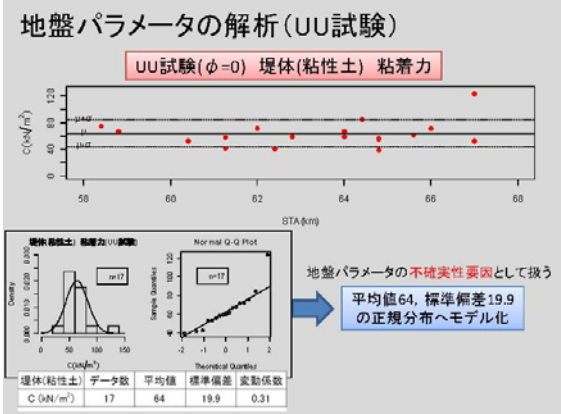
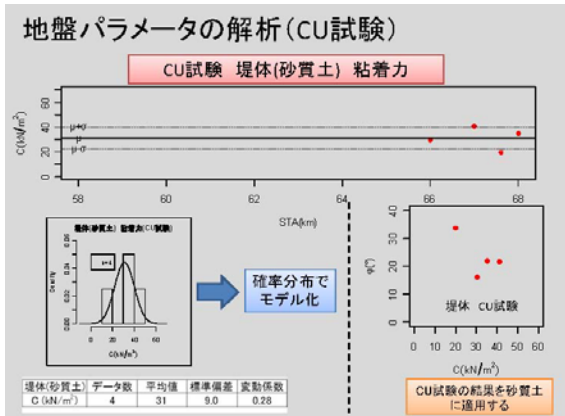
あるでしょうけれど、とにかくこのケースはこういうふうにしてやりました。

見ていただくと、図中の丸の中にあるようなバラツキを持っております。

それだけ取りだして堤防の縦断方向にプロットしてみると、大体このようなバラツキになります。このバラツキというのは見かけ上のバラツキで、実際に設計に関係するバラツキは、後で言いますが、もっとずっと小さいものだろうと考えております。このケースでは統計的な推定誤差もよくわからないし、これをバラツキだというふうに考えて計算しました。かなり過大評価だと思います。

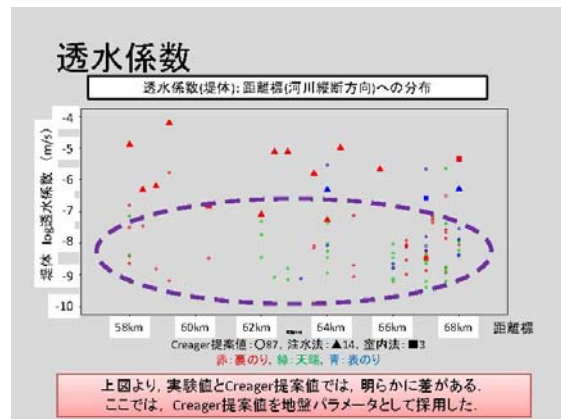
それから、C U試験は上流区間で実施しており、こんなふうになっております。

これはその整理したデータです。



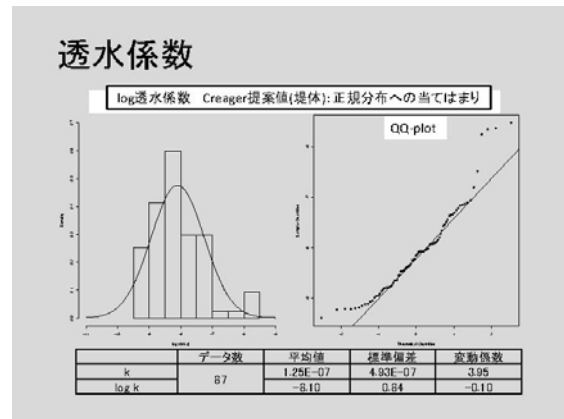
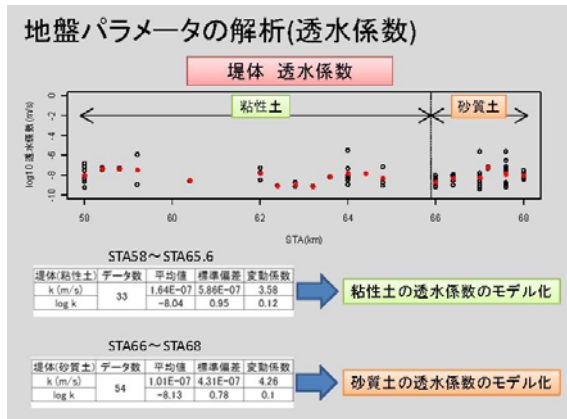
透水係数もまた問題で、Creagerの式から決めた、 D_{20} を中心に決めた値が下のほうにばらついている値です。どういう透水試験をしたのか。室内か屋外かはわかりませんが、試験方法はよくわかりませんでした。大体このようなバラツキのオーダーです。logスケールですから非常に大きなバラツキを持っております。

このケースも、我々も迷ったのですが、とにかくCreagerの式をとろうということ



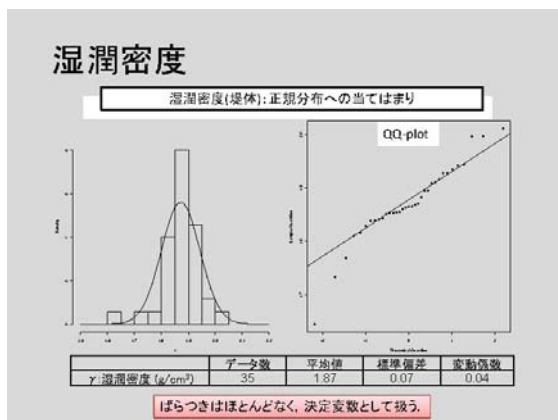
で、Creagerの式で評価をすることにしました。

これがそのCreagerで取った場合の平均と、データのバラツキについてです。赤いものがそれぞれの断面での平均値です。こういうものを使ってモデル化しました。



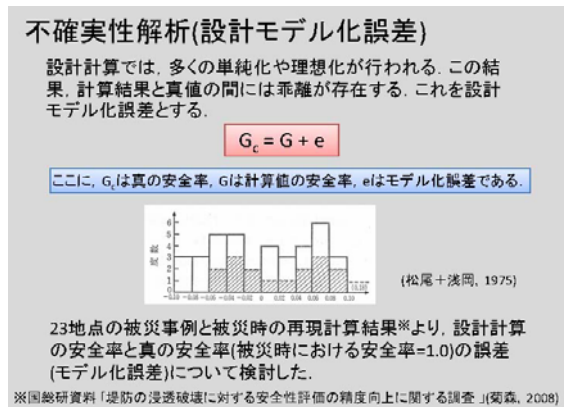
湿潤密度は、大体ばらつかないものですが、このケースでも変動係数0.04という非常に小さなバラツキなので、これは平均の $\gamma = 1.87$ (g/cm³)として決定値として取り扱いました。

これが今回用いたものですが、UU試験のCの値を確率的な値として用いました。



次が、現在用いられている堤防の設計法、解析法にどれぐらいの不確実性があるかというところについて調べようと思いました。先ほど申し上げましたように、真の安全率Gに誤差eが入っているというふうに考えました。

これは、1975年に松尾先生とか浅岡先生が出した論文で、非常に世界的にも評価されている論文からとった図です。軟弱



地盤上の盛土について、現位置ベーン試験か、一軸圧縮強度試験結果が、非排水せん断強度を出して、あとはFellenius法で円弧すべり計算して、実際に破壊した地盤（破壊したということは真の安全率は1だということなので）、そのときにどのぐらいの誤差があるかということ調べたものです。

そうすると、eが-0.1から0.1の間にほとんどのものが分布します。つまり、これだけの精度があるということです。ですから、この安定解析で求められる安全率は、±10%の精度で、かつ偏りが無いということになります。

こういうことがわかると、強度のバラツキは除いてどれぐらいの破壊確率があるのかということ計算できるということになります。

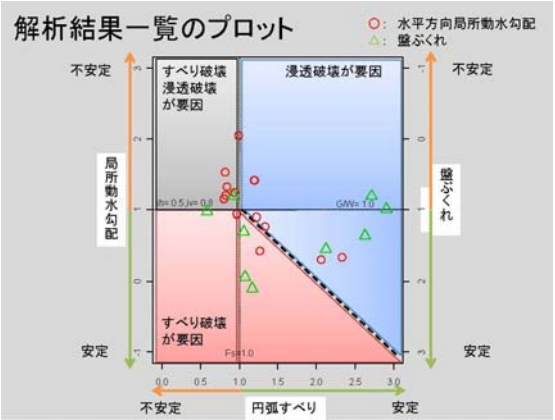
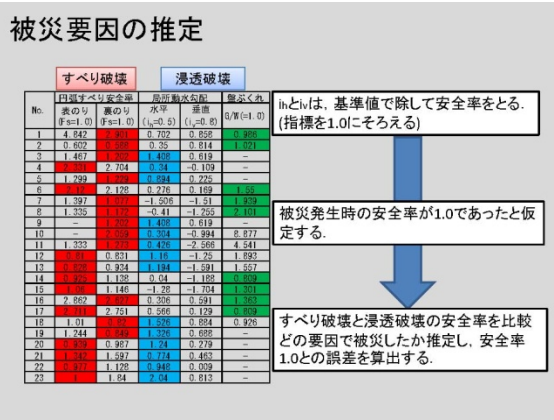
それで、これと同じようなことを堤防にしようとしたわけです。

ここに1つ文献がありまして、菊森さんという方が2008年に国総研資料として出されているものです。被災があったと判断された23例の堤防断面を集めてきて、現在の手引きで推薦されている設計方法によって安全性照査をやり直してみたという例がありました。円弧すべり解析とか、それから限界動水勾配とか、粘性土地盤があれば盤ぶくれとか、そういうものについて安全率が計算されております。

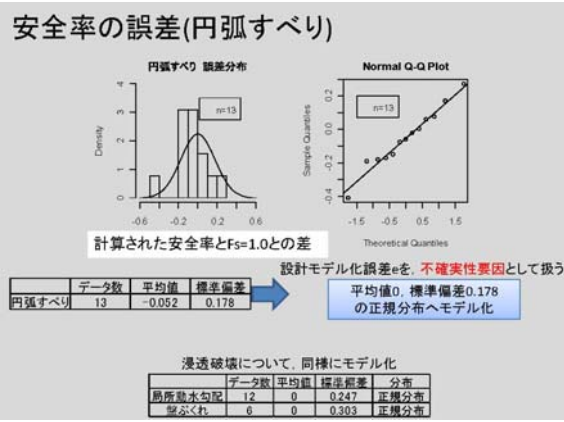
被災事例と再現計算結果(菊森, 2008)

No.	被災事例	断面	土質	高さ	円弧すべり安全率	浸透破壊	盤ぶくれ
1	最上川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
2	新武蔵野川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
3	東武川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
4	中武蔵野川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
5	新武蔵野川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
6	江戸川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
7	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
8	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
9	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
10	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
11	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
12	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
13	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
14	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
15	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
16	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
17	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
18	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
19	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
20	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
21	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
22	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999
23	荒川 (堤防) (L=100m)	円弧すべり	砂質土	3.5	0.943	0.999	0.999

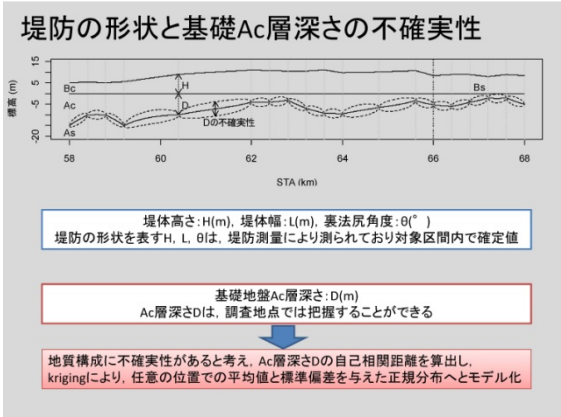
残念ながら、どういふ変状があったということが個々にはっきりしておりませんので、このケースでは計算上一番クリティカルになる現象をもって判断しました。ですから、すべり破壊、浸透破壊、いろいろ見まして、低いところを持ってくるわけですね。



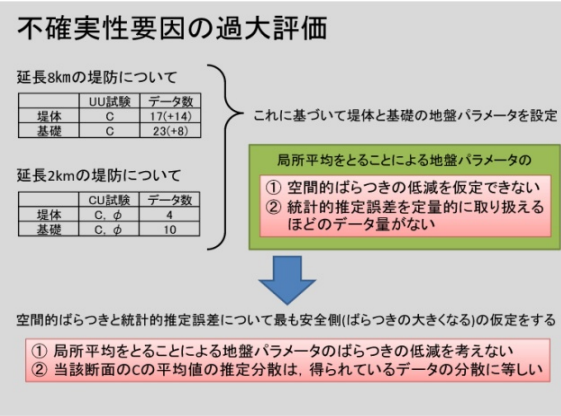
このケースでは、円弧すべりによる安全率がクリティカルになるケースが23のうち13個だったというわけです。そのときに安全率はほぼ1だったということですね。平均0.052と書いてあるのは、これは誤差なので、ほとんど0ということで偏差はないということですね。さらに、eの標準偏差が0.178。先ほどの松尾・浅岡の例などから見ても、大体オーダーは同じぐらいで、若干大きいかなという程度です。



地盤の深さについてだけは、クリギングという方法を使って、調査しているところは正確にわかる、していないところは補完していることによる誤差があるという仮定のもとに、こういうふうに入挿しました。ですから、地盤形状については若干の不確実性をこういう形で（ある意味のこれは統計的推定誤差ですが）、これを入れました。それで計算しました。



空間的バラツキということと統計的推定誤差というのは、実は分離するのがなかなか難しいということがあります。これは、元の原因をただすと同じだからです。つまり、地盤パラメータというのは空間的にばらついている訳です。ばらついているがゆえに、何カ所かで調査をしたときに統計的推定誤差が残るわけですね。ですから、これらは分離できないのです。詳しくは説明しませんが、我々は今のような、いわゆる一つの供試体のバラツキですべての供試体の断面のいろいろな箇所の強度を推定するというのは、ものすごく過大にバラツキを評価していることになると考えております。なぜかというと、1つの断面の中にたくさんのバラツキがあると、それはキャンセルし合って、結果



的に平均値に非常に近づくということがあるからです。ですから、この計算結果はかなり不確実性を過大評価しているというふうに考えてください。

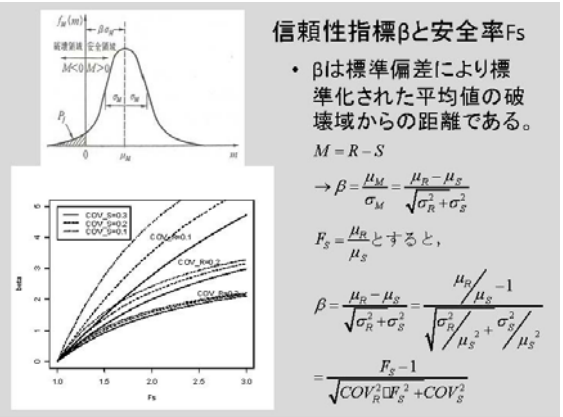
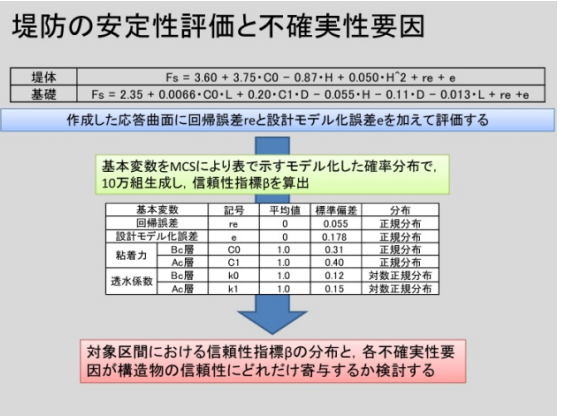
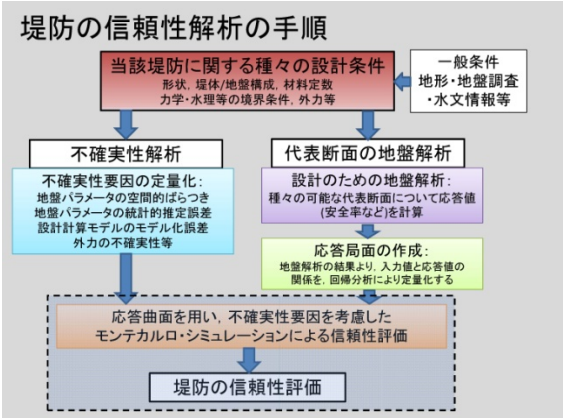
ご説明してきたのはこの地盤解析によって応答曲面というものをづくり、それからいろいろな不確実性を一つずつ個別に解析してきたということです。最終的にこれを合わせて評価するということになります。

そのときにやるのは、使う式は極めて簡単な式ですし、それからこういう不確実性に関する一覧表をつくりまして、どういう誤差を考慮したかということを示します。回帰誤差というのは、応答曲面の誤差です。全体的見ると、これは極めて小さいということがわかります。それから設計モデル誤差が、さっき述べました0.178です。透水係数は対数正規分布ですので、対数のときの値ですから、普通の算術のスケールで考えればもっとずっと大きなバラツキになります。

ここで採用した応答曲面の式ならば、今の計算機なら1億回だろうと簡単に計算してしまいます。

結果として出てきたものは、こういうものであります。これは β という指標で、信頼性指標といわれています。

物事を非常に単純化すると、抵抗から外力を引いたそれを安全性余裕といいます。安全性余裕というのを最終的にプロットして、例えば正規分布すればこういうものになります。これが安全性余裕の平均値で、これが0以下ということは、外力(S)が抵抗(R)を上回るので破壊してしまうので、



ここがいわゆる設計点といわれるポイントです。

一時的にバラツキをあらわすのは標準偏差ですので、この平均値を標準偏差で割ることによって、破壊点から平均値が標準化された距離でどのくらいあるかということを経算することになり、それが β というものです。ですから、 β が高いほど安全率と同じように安全であります、ここにはバラツキの情報も含まれているということです。

先ほどの安全率の図と似ているんですけど、大体下流のこの辺が高くて、途中が低く、上流で少し上がるというようになります。

こういうふうに β が上がっている地点は、ボーリングがあって地盤深さがはっきりわかっているのが高めが出て、こういうところは情報の不足のために安全性が下がるということです。

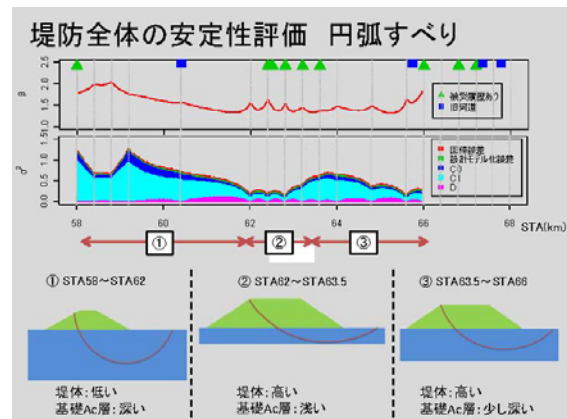
ざっと見ていったときに、対象区間の下流部は堤体が低くて、基礎のAc層という粘性地盤が比較的厚いというパターンで、この辺が高くて浅いというパターンです。

いただいたデータには過去の被災履歴とか旧河道とか、そういうようなマークがあるわけですが、やはりこの辺はトラブルがいろいろ過去にあったということがわかります。

これが全体としての標準偏差であらわした不確実性です。それが基礎地盤の深さだったのか堤防の強度なのか、モデル誤差なのか回帰誤差なのか、それぞれがどれくらいコントリビュートしているかということがわかります。

基礎地盤のAc層が深いところは、やっぱり円弧が長いので、基礎地盤の強度のコントリビューションが大きいということがわかります。ここへくると少ないですね。Dというのは深さですが、深さの不確実性のコントリビューションは、内挿しているために、ボーリングデータがあるところは無いけれど、ボーリングデータの無いところで大きくなっているということがわかります。

こういうグラフを見て、不確実性を下げる方法を検討することに役立てます。例えば、補強する前にもっと情報を集めるとか、そういう方法もあるわけです。



ただ、現時点でいろいろやってみて、いろいろと感じたことがあります。それをここに書いてみました。

応答曲面を用いるという方法は、最初はあまり線状構造物に使うというのを考えていなかったんですが、連続的に堤体や層厚の諸元が変化しているような場合には、うまく使えば使える可能性があると思うようになりました。

私は今まで「道路橋示方書」で橋の橋脚とかそういうものについてやってきたのですが、そういうものに比べて堤防は地盤調査が少ないなと感じました。それからもう1つ非常に困ったのは、基礎地盤は、例えば大きな沖積平野であれば、その沖積平野で形成された、ある土層については大体同じような性質があるとか、堆積の環境から見て水平方向に相関が高いだろうとか、かなりいろいろな仮定することができるし、一応、認められているわけですが、堤防というのは人工構造物であるために、そういう仮定をたてるのが正しいかどうか極めて怪しいというので、非常に困ってしまいます。

それから、信頼性設計というのは、何かバラツキがあれば何でもできるように誤解されておりますけれど、よく考えてみると、この方法というのは二次近似に近いことを扱う。つまり、平均値は大体推定できるんだけど、その周りでどの程度平均値に対して精度があるのかということを問題にするのが本来の考え方です。それが現在の堤防の設計法が地盤工学のレベルとして、大体平均値を推定しているのかということについて、私としては確信が持てない部分が多かったので、本当に困ったわけです。

現時点のまとめ

- 応答局面を用いる方法は、堤防の信頼性解析に適用可能と思われる。
- 地盤調査が余りに少ない。また、下手に人口構造物であるため、自然地盤であれば仮定できる(確率場の)定常性などの仮定に問題がある。
- 信頼性設計は不確実性を扱う。これは**平均はだいたい推定できる**としてその信頼性を問題にするということである。**現在の堤防の設計法が、地盤工学としてこの「平均値をだいたい推定できる」レベルに達しているか疑問に感じる。**



最近、堤防設計の世界に入ってきた者ということで、かなり言いたい放題なんですけど、設計をしていて困ることがルーチン的にあります。つまり、河川事務所からお借りした報告書を見たりしても非常に困ってしまうこととして、例えば、強度パラメータをどういうふうに決定するのかということについて、統一した見解が見られないんじゃないかなと思いました。

現行堤防設計法の地盤工学的問題点

—国土センター(2002)「河川堤防の構造検討の手引き」による設計法—

- 強度パラメータ(C' , ϕ' あるいは全応力強度)の決定法: UU試験?
- 安定解析: 有効応力vs.全応力, 局所的(浅層)すべり破壊の扱い
- 透水係数の決定(粒度vs.現場 or 室内透水試験)
- 不飽和浸透解析: 情報量と方法のミスマッチ
- 限界動水勾配: (特異点付近の)判定の一定性?

伝統的な設計法は、その発展の経緯の中で、**地盤調査・地盤パラメータの決定・設計計算**という一連の流れの中に調和を保ち、ある程度の精度を確保している。堤防の設計法にその調和を見出すことができないように思う。歴史が浅い設計法であるためと思われる。

それから、UU試験というのをどう解釈していいのか、 ϕ があるようなUU試験とかそういうものが出てくると、どうしていいのか非常に困ったということです。それから、安定解析について有効応力、全応力、いろいろあります。これも、地盤パラメータの取り方と相まって、どう選択すればよいか。それから、借用した検討書を見ると、局所的な浅層すべりでクリティカルというケースが極めて多くて、これがほんとうに堤防にとって致命的な破壊なのかどうか。それから、 c がない場合、 ϕ の値によっては非常に浅いところで非常に小さな安全率を出すというのはよく知られた事実です。そういうものをどういうふうに規定するのかあまりはっきりしない。

さらに、透水係数の決定ということで、先ほどの例にもありましたけど、粒度からいくのか現場透水試験からやるのか、室内に持ち込んでやるのか、どれを信用するのかというようなことが非常に難しい。

さらに、不飽和浸透流の解析をしますが、与えられている情報のレベルに比べて、解析法がデリケートすぎるのではないかというふうにつくづく感じます。日本の堤防には不飽和浸透のほうが適しているという理屈はわかりますが、非常に扱いにくい。

それから、ルーチンで使われているソフトウェアで限界動水勾配の危ないところを見ると、要するに端部であるとか、特異点に近いようなところで、恐らく非常に数値的な処理が難しいというようなところが出ています。またこれが、FEMのメッシュの取り方を変えると変わったりするので、そういうことについてもどういうふうに考えるのかということがよくわからない……。これは全部土質力学の問題です。

だから、もう少し設計法を一定の方法に固定しないと、なかなか定量的に安全性を議論するということが難しいなということを、地盤工学的には感じました。

ここに長良川の洪水の写真を出しました。これは1976年ですが、私たち岐阜に住んでいる者には見なれている風景が、洪水のときってこんなになってしまうのかというような写真なので、ちょっと印象深かったので載せました。別に今回、長良川を解析しているという意味ではありません。

ということで、申し上げにくいこともいろいろ申し上げましたけれど、信頼性解析ということをしていて、むしろ土質力学的に決めてほしいといえますか、設計法というの、ある一定の手続きに従って一定の

方法で計算した値がどうかということを議論することができるのだと思います。設計法が、一定のやり方でやっていれば、その一定のやり方によってなされた評価と実績とつき合わせることによって、いろいろ議論ができるはずですけど、堤防ではなかなかそれができる状態にまだ至っていないのではないかなというのが率直な感想です。

こんなに文句ばかり言って、信頼性設計というのは全然役立たないのかということの名誉挽回のために、非常にうまくいくケースがあるということと一緒に研究をしている大竹先生より発表します。なぜこちらではうまくいってこちらではうまくいかないのか、私たちが考えている設計の手順というのが悪いのかもしれませんが、その点はぜひどんどんご指摘いただいて、こういうふうにしたらいいいというように教えていただければ幸いです。



液状化地盤上の長大水路の信頼性解析

大竹 雄
岐阜大学工学部
社会基盤工学科 特任助教



私は、堤防ではございませんけれども、類似構造物ということで水路の問題を一昨年解析しましたので、その結果をお知らせしたいと思います。

対象といたしましたのは、航空写真にあるように、ある一級河川に沿って設置された水路でございまして、昭和50年代につくられて、延長12キロの非常に長い水路です。これは農業用水や周辺の上水にも使われているということで、非常に重要な水路です。

水路断面は非常にシンプルな構造になっていまして、基本的には盛土タイプと我々は名前をつけたんですけど、RCのフレームの構造に、周辺に管理用、通路用の高さ2メートルぐらいの盛土を盛って設置していけるというふうな状況です。

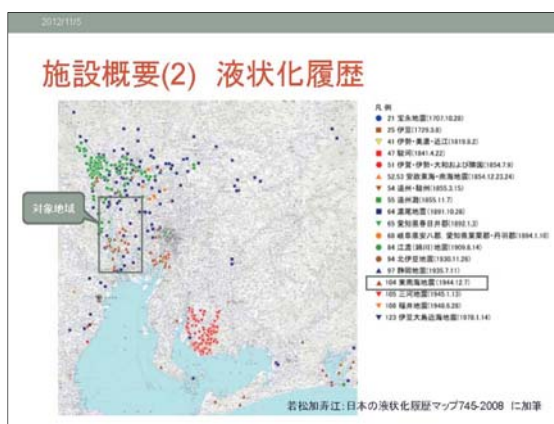
ただし、交差交通とかがある場合は掘込式とか、サイフォンにしたりとかの形式もあります。幅が8メートルぐらいの、農業用水の水路としては比較的大きな水路を対象にしています。

東海・東南海地震が発生したら被害が発生するような地域でございまして、基礎地盤の液状化懸念層が非常に厚く堆積しているということで、地震後にもちゃんと水が周辺に行き渡るんだろうかということを、管理者は非常に懸念していました。



まずは履歴を調べてみました。これは若松加寿江さんの有名な液状化履歴マップで、ここが対象地域でございますけれども、過去の被災履歴を見てみますと、やはりこの周辺では液状化があるなというようなことがわかります。

かつ、非常に問題だなと思ったのは、これは詳細に拡大した図なんですけれども、この赤のところは1944年の東南海地震のときに液状化をしたというところだそうです。実は、ここに旧河道が走っていて、それが廃川されてこちらの本川に合流したわけです。実はこの旧河道をそのまま利用してつくったのが今の水路ということで、非常に液状化の懸念性、発生が問題になるというような水路を対象にしました。



調査をしてなくて、N値も3カ所ぐらいしか測ってないような状況です。それから、近年やったのが19カ所、こちらが13カ所、合計32カ所あり、このN値が解析の基礎になるデータになります。

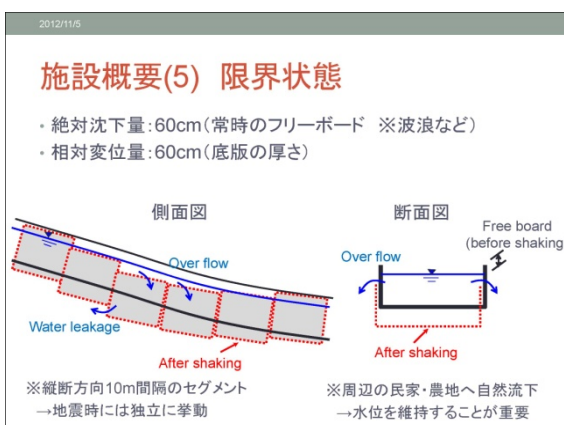
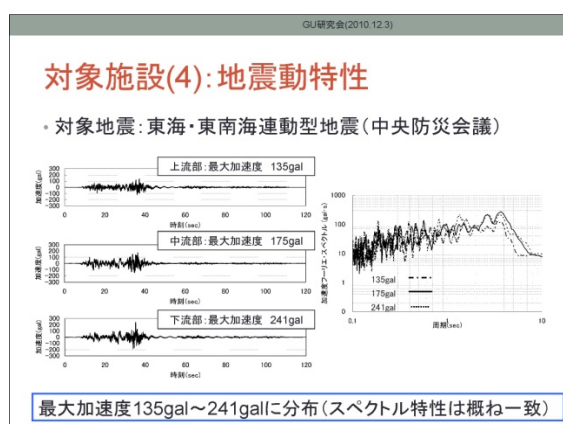
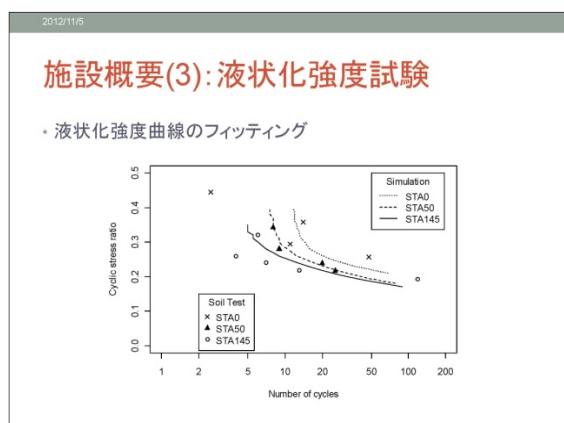
それから、液状化強度試験も3カ所、上、下、中流でやっています。ちょっと見えづらいですけど、20回液状化強度でいくと、0.2から0.3ぐらいの液状化強度があって、上流に行くほど強度が高くなるというような傾向がございました。

続いて、施設の関連として地震動の特性を整理しました。信頼性解析の中では確定値として扱いましたが、地震動としては中央防災会議が公表している東海・東南海地震の連動地震波形を使いました。

ここに波形を並べて書いていますけれども、下流側が震源に近いものですから、やや大きくて241ガルぐらい。上流だと135ガルぐらい。ただ、スペクトル特性を見ると、大体同じぐらいかなというところで、振幅は100ガル変わっていますが、スペクトル特性はあまり変わらないというような現場でございます。

設計に対しまして、何が限界状態なのかということを管理者と話しながら設定しました。

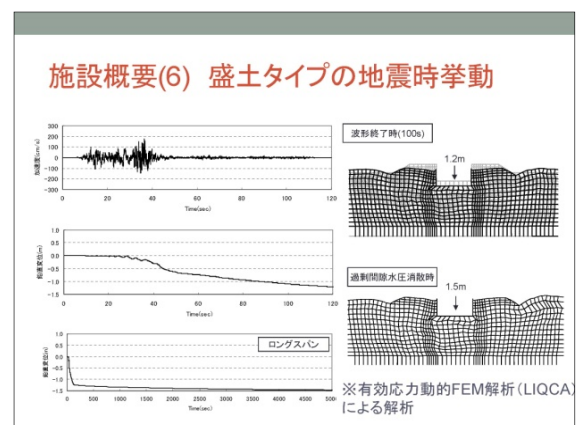
基本的には沈下を非常に気にしていってしまっていました。この水路は自然流下で周辺に水を行き渡らせて田んぼとか上水に使っていますので、沈下をしてしまって水が行き渡らないというのが管理者の一番の懸念でございました。これは側面図、断面ですけれども、水路が大体長さ10メートルピッチでこんな感じで区切られています。それ



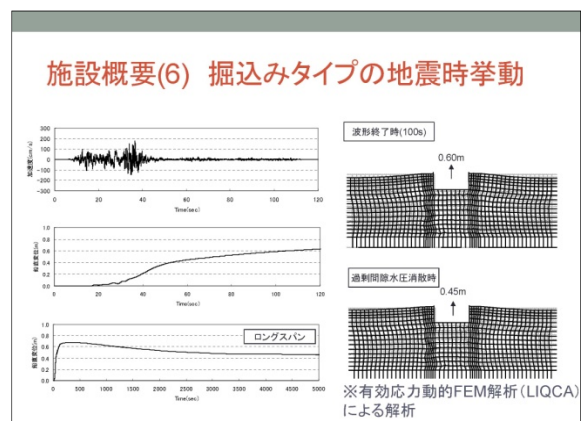
が沈下してしまっはずれてしまうということですか、相対変位で漏水してしまうということが問題になってくるということなので、ここでは制限値60センチを目安にして、それを超える確率というのを求めていこうということを考えました。要は、当初流している満水位から、フリーボードといって余裕を見ているこの量ですね。それから、躯体の板圧の厚さで漏水する限界値ということで、これは偶然一緒になったんですけど、60センチというものが限界値になります。

まず、解析結果をお見せします。岐阜大の八嶋先生にご指導いただきながら、パラメーターフィッティングしながら、LIQCAを使って変形解析しました。

全体の9割ぐらいが盛土タイプで、こういうタイプの水路です。これが解析結果の変形図で、波形が終わった100秒の値と、そこからずっと放置して間隙水圧が消散したところの変形図がこちらになります。これが加速度波形の時刻歴と鉛直変位ですね。こちらがロングスパンで、120秒以後、どこまで沈下するのかということを見ないと、5,000秒ぐらいで沈下がおさまるという結果になりました。大体1.5メートルぐらい沈下が予想されるような水路です。フリーボードは60センチですので、かなり問題になるような沈下だなというところが見えてきました。



こちらがもう1つのタイプの掘込タイプの結果です。浮き上がる構造になってしまいましたが、鉛直変化をみると、100秒ぐらいまで上がって行って、消散に合わせてずっと沈下しているということです。大体45センチぐらい浮き上がります。ですから、盛土タイプと掘込タイプの境目では漏水の可能性が高いんじゃないかなということが、代表断面の解析結果から推測されます。



最後に施設のまとめです。堤防をやって改めて考えると、今回の施設は、比較的単純な構造物だなと思います。全体で延長12キロ。水路幅も大体一緒、盛土の高さも一緒。

盛土も比較的小さいですし、それから地震時の挙動も、浮き上がるか沈下するかというようにところで、非常に単純かなと思います。

それから非常に大きなこととしては、基礎地盤の堆積環境が一定で地層構成が均一だったということが、解析のしやすさの面でもあったかなと思います。

また、この問題は、局所平均の問題だなと思います。要するに、構造物の挙動を支配しているのは、1点1点のバラツキが問題なんじゃなくて、ある局所的な固まりとしての挙動が支配するという意味で、局所平均の問題だなと。例えば堤防のような、パイピングの問題で局所的に弱くて、そこが問題になっていってしまうという問題とは違って、ある固まりとなって抵抗するような問題ということで、これが信頼性解析のバラツキを議論する上で重要になります。

それからもう1つ重要なのは、自然地盤が相手だということです。先ほどの本城先生が話された場所は、堤体が人工構造物で何が入っているかわからないというような話もあるかと思うんですけど、こちらは自然地盤で堆積環境が一定ということで、モデル化のしやすさが違うというようにところが特徴的かなと思っております。

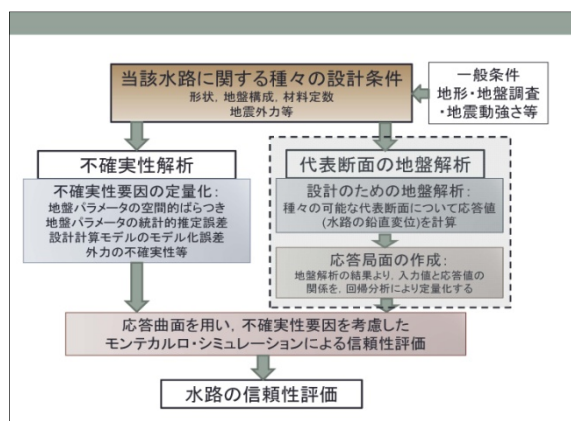
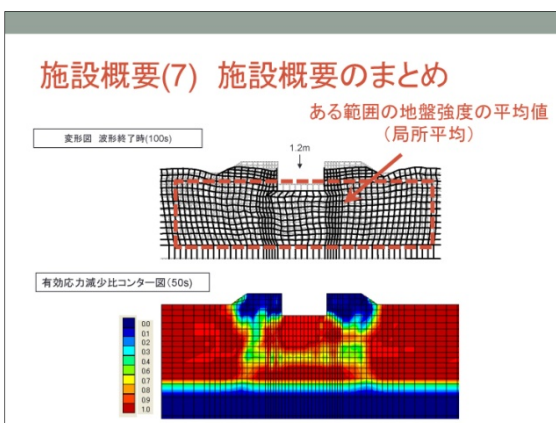
ということで、後は、先ほどの本城先生のお話と同じような流れで説明をさせていただきたいと思います。

まず、地盤解析のところを説明させていただきたいと思います。解析手法は、先ほど申し上げましたLIQCAを使って時刻歴の計算を行って、最終沈下量を残留沈下量と

2012/11/5

施設概要(7) 施設概要のまとめ

- ・比較的单純な構造物
 - 延長12km全体で水路幅、盛土高さ、幅も概ね一定
 - 地震時挙動も比較的单純(水路の浮上、沈下)
- ・基礎地盤の地層構成がほぼ一定
 - 河川に沿って配置されており基礎地盤の堆積環境が同一
- ・基礎地盤の液状化強度の局所平均問題
 - 基礎地盤の比較的大きな範囲の平均的な地盤強度
 - 自然地盤が相手(堤体のような人工構造物ではない)なので、確率場によるモデル化が可能



して評価をしたということです。応答局面を最終的につくって、それを使って信頼性解析をしたいので、パラメトリックに液状化の層厚とか、液状化強度も3カ所強度試験をしますので、それぞれでパラメータフィッティングをしてLIQCAのパラメータを決めて、FEM解析をしました。あとは地震の強度も変えて、幾つかその範囲内で解析をして、どういうふうに最終的な残留変形が変わるのかということをやりました。

盛土タイプ、掘込タイプをそれぞれ11ケースずつやって、応答局面の作成に取り組みました。

応答局面ですけど、先ほどの例ですと盛土の堤防の高さとか基礎地盤の深さとかいろいろなパラメータがありましたけれども、ここでは少し工夫をして1つのパラメータに集約して整理ができるんじゃないかなと思って導入したのが S_n 値というものになっています。やや複雑な式のように見えますけれども、基本的にはN値の重み付け平均値ということで、深度12メートルのなかのN値の大きさと、表層ほど重みを大きくして重み付け平均を全部足し合わせた値みたいな、総合的な指標になります。

これがイメージですけども、N値があって、それをちょっと反転したものが S_n 値です。N値の情報と、表層ほど重みを大きくして掛け算して足し合わせるだけという、シンプルな値です。よく、地震のとき使われるようなPL値とか、同じようなアイデアかと思います。N値が小さいほど、もちろん層厚が大きいほど大きくなって、浅い所に弱い層厚があるほど大きい値になるということで、軟弱地盤の厚さをあらわす指

代表断面の地盤解析

- ・地盤解析:有効応力動的FEM解析(LIQCA)
- ・パラメータ:液状化懸念層の層厚, 液状化強度, 地震動強度
- ・解析ケース:盛土タイプ, 掘込みタイプ, それぞれ11ケース

Case	層厚 (m)	R_{L10}	S_n 値	Acc (gal)	τ_v (kN/m ²)	盛土	掘込
1	12	0.25	-0.25	175	16.0	-76	47
2	12	0.29	-0.51	175	16.0	-31	29
3	12	0.21	-0.14	175	16.0	-115	49
4	10	0.25	-0.40	175	16.0	-57	37
5	10	0.29	-0.58	175	16.0	-20	27
6	10	0.21	-0.47	175	16.0	-40	26
7	12	0.25	-0.25	135	12.0	-20	30
8	12	0.25	-0.25	150	14.0	-47	32
9	12	0.25	-0.25	200	16.5	-101	42
10	12	0.25	-0.25	220	17.0	-106	46
11	12	0.25	-0.25	241	17.2	-110	57

2012/11/5 応答局面に用いる地盤パラメータ

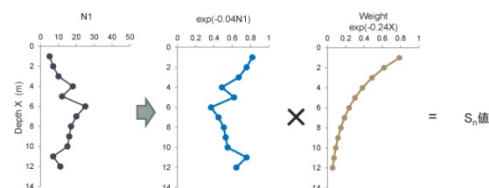
$$S_n = 0.264 \sum_{x=1.0}^{20} \frac{N_i(x)}{x} \exp(-0.04N_i(x)) \exp(-0.24x) = 0.885$$

$N_1(x)$: $\sigma'_v = 100 \text{ kN/m}^2$ 相当に換算したN値
x: 深度(m)

- ・ N_1 値の深度方向の重み付け積分値(N値のみで決定)
- ・表層部分(20m以上浅)の軟弱さを表す指標
- ・N値, 層厚, 深度を考慮
⇒N値が小さいほど, 層厚が厚いほど, 浅い位置のほど大きい重み(値)を示す

2012/11/5 応答局面に用いる地盤パラメータ

$$S_n = 0.264 \sum_{x=1.0}^{20} \frac{N_i(x)}{x} \exp(-0.04N_i(x)) \exp(-0.24x) = 0.885$$

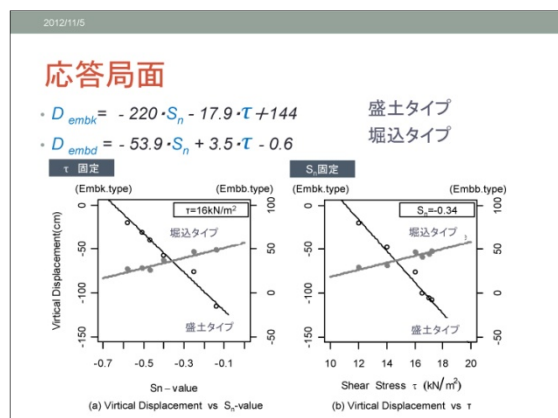


- ・N値, 層厚, 深度(重み)を考慮した表層地盤の軟弱さ指標(N値のみで算定)
⇒N値が小さいほど, 層厚が厚いほど, 浅い位置のほど大きい重み(値)を示す(表層地盤の軟弱さ指標)

標としていいだろうと。深さの効果も入っていますしN値の効果も入っているということで、これを含めて強度のパラメータとして1つで整理できるんじゃないかということをやってみました。

これは照査に使う変形量の応答局面で、今申し上げた、N値から決まる地盤のマスとしての強さですね、 S_n 値。 τ というのは外力の項です。基礎地盤で波形が決まっているので、Shakeで液状化懸念層のところまで計算してあげて、そこへ入れてみようということです。

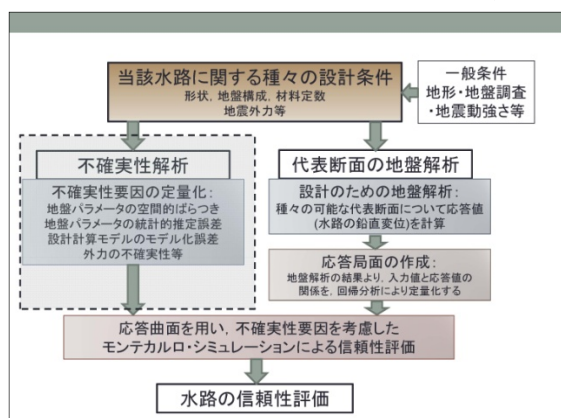
どれぐらいのフィッティングがあるのかというのがこちらの図です。横軸に S_n 値をとって縦軸に沈下量を取ったものです。



こちらが盛土タイプの沈下量をあらわしていて、こちらが掘込タイプの浮上量をあらわしています。白のプロットが盛土タイプの結果、FEMの結果です。黒い色のポイントが掘込タイプの結果です。それに対して、線形の関数がこういうふうに非常によく説明しているということがわかります。右図が S_n 値を固定して、 τ に対する変化量を表しています。両方が非常によく合っています。

この方法で非常に複雑な液状化の問題、すべての問題でいけるとは思いませんが、この範囲でこの構造物に対してこの区間に限定していけば、この関数でも信頼性解析が十分に行われるんじゃないかと判断して、非常にシンプルな関数ですけど、これを使って信頼性解析を進めようと思いました。

次に、 S_n 値の空間的なバラツキ、統計的な推定誤差とか、FEMの誤差とか、そういったことを定量化して組み合わせてみようということです。こちら、先ほどの本城先生のパワーポイントに合わせて同じように書いていまして、空間的なバラツキに関しては、今申し上げたように S_n 値のバラツキを議論していく。N値の1個1個のバラツキというものではなくて、ある固まりのバラツキを議論していこうということです。



それから、統計的推定誤差ですけど、今日はあまり詳しく説明できませんけど、一般推定、局所推定と呼んでいて、後ほど絵があるのでそれが一番いいと思いますけど、調査位置がどこにあるのかという情報を考慮するかしないか。もちろん、調査したところは確実に強度がわかっていますし、逆に、非常に離れたところで調査をしていた

ら、その信頼性は全然乏しくなると思います。そういった効果を考慮した場合と、考慮しない場合をやってみました。後ほど絵を見ながらご説明したいと思います。

設計計算自体のモデル化誤差というのはこちらになっていまして、先ほどは円弧すべりの話でしたけど、今回は国土センターが2009年にやられた地震時変形解析、ブラインド解析試験を持ってきて、さらに幾つか資料を増やしました。このときは非常にシンプルな盛土の室内試験をされていて、その試験をする前に解析をして、実験結果でどうなんだ、信頼度はどうなんだというようなことを議論された資料があったので、そのデータを踏まえてモデル化誤差の定量化をしました。

最後の外力については、今回は確定値として取り扱っています。

まず S_n 値の話をしていきたいと思います。これに当たって、 S_n 値はN値でモデル化ができますのでN値の確率場のモデル化をしようということでやりました。こちらのデータは何かといいますと、深度方向に延長12キロのN値のデータを全部プロットしたも

のになっています。ここに実線で書いたのがその骨格になるトレンド関数になっていまして、その平均的な挙動は2次関数でモデル化しました。

そのバラツキというのはこの残差でして、こちらです。このトレンドに対する残差。これがランダムというふうにして、これをモデル化することになります。

いわゆる統計的推定誤差とは何かというと、この問題でいけば、今このデータから決めたこの骨格がほんとうに正しいものであるか。ここにはかなり、200、300と多くの

不確実性分析

・地盤パラメータの空間的ばらつき

- 地盤調査データより設定、水路全体で計測されているN値に基づいて「 S_n 値のばらつき」をモデル化する。

・地盤パラメータの統計的推定誤差

- 地盤調査データにより設定、一般推定 (General) と局所推定 (Local) でモデル化

①一般推定: 地盤調査位置を考慮しない S_n 値推定問題

②局所推定: 地盤調査位置を考慮した S_n 値推定問題 (Kriging)

・設計計算モデルのモデル化誤差

- 既往の模型実験ブラインド解析からモデル化

(河川堤防の地震時変形量の解析資料、JICE資料、2009 など)

・外力の不確実性

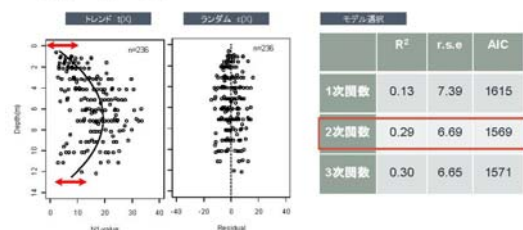
- 今回の解析では、地震動強さ(波形特性)は確定値。

S_n 値の一般推定(1): 調査位置を考慮しない

空間的バラツキのモデル化 (確率場) $\Rightarrow$ MCSにより S_n 値推定

・ N_1 値の空間的バラツキのモデル化

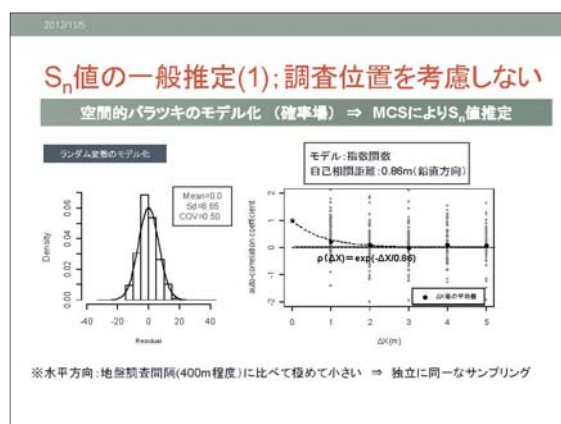
$$y(X) = t(X) + \varepsilon(X)$$



データがありますけど、現場によっては非常に乏しいデータで決めなきゃいけないというときは、このトレンド関数自体も怪しいというようなところの問題が、統計的推定誤差になります。

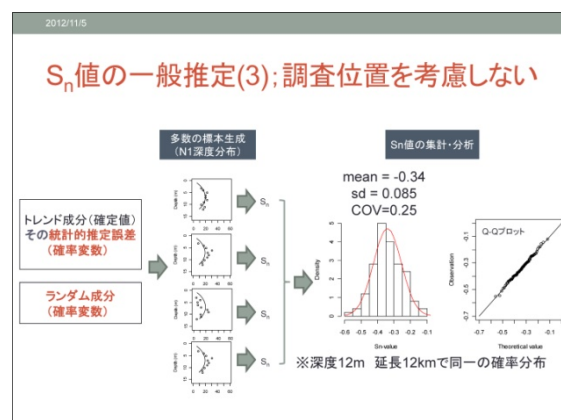
先ほどのランダム変数をヒストグラムにしたのがこちらになります。標準偏差で6.65。

この液状化懸念層が大体12から13ぐらいの平均N値がありますので、いわゆる変動係数でいくと0.5と、非常に大きな、一見、バラツキがあるような現場になっています。こちらは自己相関を議論したものです。横軸が距離——深度方向の問題ですけど、どれぐらい距離が離れるとN値の相関がなくなっていくのかと。もちろん、同じ



ところであれば非常に相関が高いんですけど、徐々に徐々に落ちていきます。この場合ですと鉛直方向の自己相関距離が0.86ですから、1メートルぐらい離れてしまうとほぼ相関がなくなるような現場のモデル化です。だから、平均と分散と自己相関がわかれば、確率場のモデル化はできます。

先ほどの統計的推定誤差を踏まえまして、まず S_n 値の一般推定というのをしました。それは何かといいますと、今のモデル化で多数のサンプル、N値のサンプルを出して、N値がわかれば S_n 値がわかりますので、それを全部集約していこうということにします。 S_n 値の集約した結果がこちらになっていまして、COVでいくと0.25です



から、先ほどのN値の1点1点が0.5に対して、変動係数で半分ぐらいに非常に小さくなっているというようなことです。

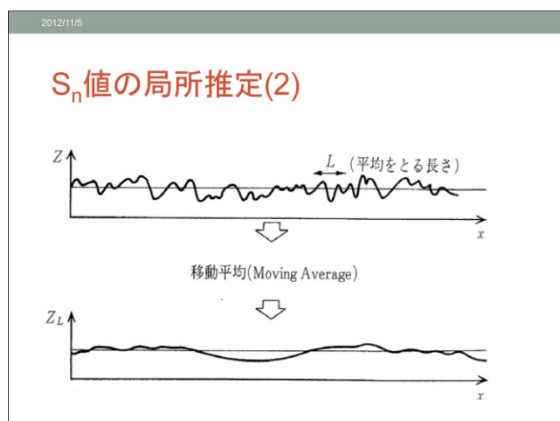
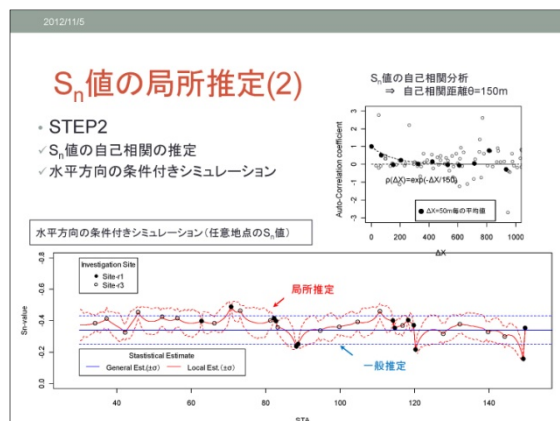
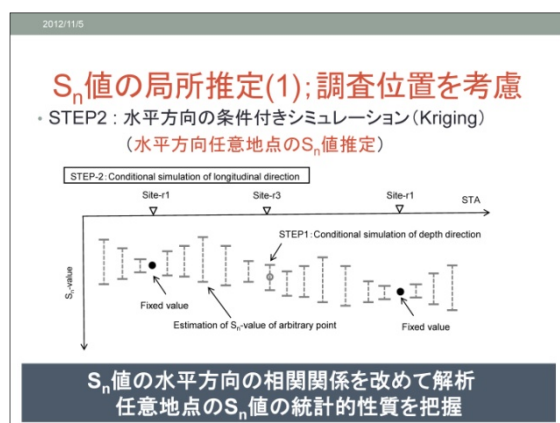
これは一般推定と呼んでいて、何かというと、延長上12キロはずっと全部同じこの確率変数、強度はこの確率変数を持っているよということになります。

もうひとつの推定方法として局所推定というものを提案しており、そのイメージがこちらです。これは延長方向のイメージで、下が S_n 値です。調査地点がここに書いてあります。もちろん、調査したところでは N 値の情報がわかっているので、 S_n 値はすぐ計算できますので、確定値だというふうにわかります。

一番最初、非常に乏しい N 値があったと思いますけれども、ああいうところでは、まあ大体わかっているけど、幅はちょっと怪しいなというところでこういうふうに情報がある中で、その周辺から離れるに従って不確実性があるということで、ある条件付きで不確実性がどのように変化するかと考えるのが局所推定です。

最終的な結果がこちらになっていまして、これが一番重要な図だと思います。こちら、横軸が延長12キロの距離になっていまして、縦軸が S_n 値になります。一般推定とは何かといいますと、全体のデータを使ってモデル化をして S_n 値のモデル化をしていますから、平均値が青のラインです。ずっと同じ平均値。分散も同じ。だから、どこの断面でも強度も一緒だよということになります。それに対して局所推定というのは、この丸の部分が調査したところになっていますけれども、調査したところでは間違いなく S_n 値はわかっているわけですから、こういうふうにわかっていると。離れるに従って徐々に青の平均に近づくような傾向があるかなと思います。分散も大きくなってくるといようなこと。これがいわゆる統計的な推定誤差の効果になります。

ですから、黒の丸で示したような確実に弱いところがあったり、確実に強いところとか、



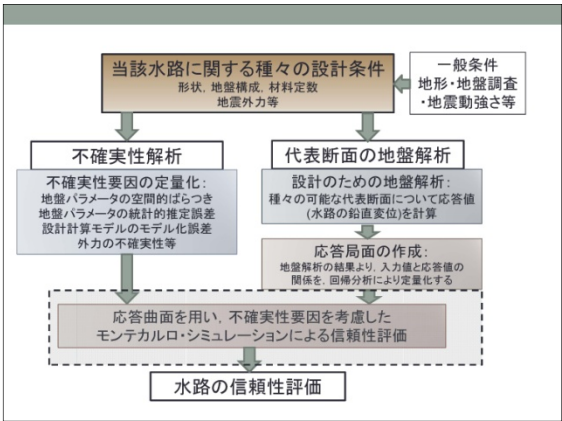
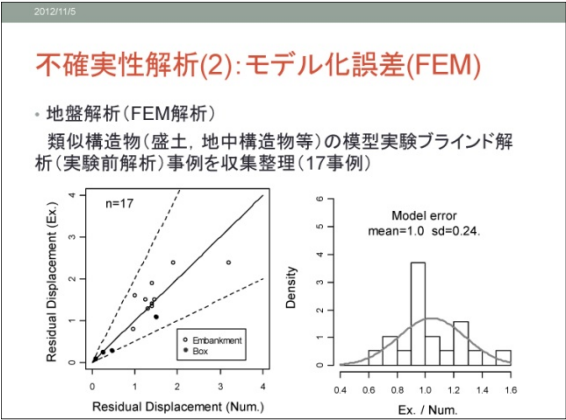
そういったところが評価されて信頼性解析にアウトプットされるので、ここが最後の結果として非常におもしろい結果になります。

今までの地盤パラメータですが、最後に解析誤差ということで、先ほど申し上げたようにブラインド解析の事例を整理しました。

こちらが計算結果で、こちらが実験結果の散布図になっていまして、最終的には17事例集めて散布図を使って、それを比を取ってグラフ化したのがこちらになります。変動係数は0.24ぐらい。この不確実性の大きさは実はかなり小さいと思います。例えば、橋梁の浅い基礎のモデル化誤差とか

そういったものと比べても、変形量を予測するにもかわらず、かなり精度が高いなと思いました。これぐらいの精度の問題として信頼性解析してみようということです。

ということで、両方終わりましたので、最後、これを使って信頼性解析をしてみようということです。



こちらが結果になります。こちらは模式図で示しました。これは変形量の平均値を示していきまして、上が一般推定、下が局所推定のイメージです。これは何を書いているかといいますと、対象水路が10メートルで区切られているので、そこに縦ラインが入っていると。ですから、それぞれが自分のところの強度に応じて変形するというような問題として絵を書きました。

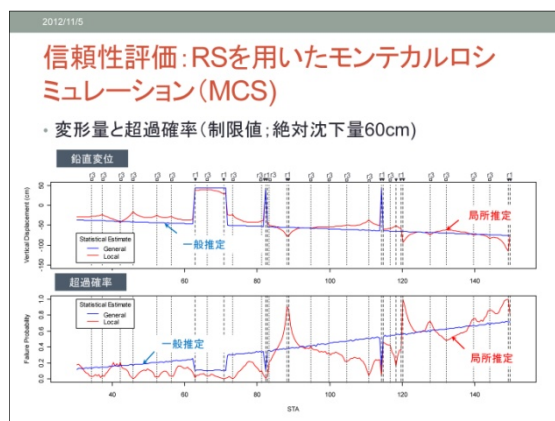
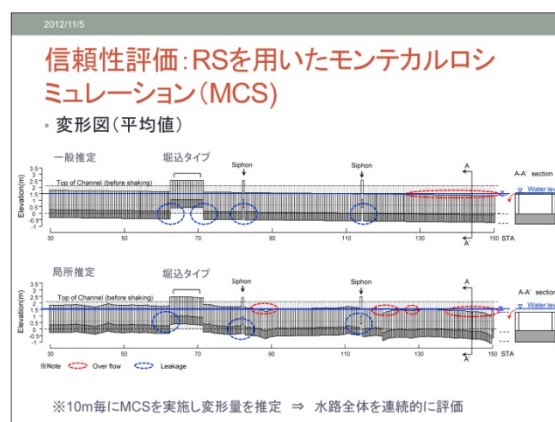
こちらは断面図のイメージで、色をつけたのが底盤です。盛土タイプは沈下する傾向ですけど、掘込タイプは浮き上がるので、それぞれの構造変化点では漏水の可能性が高いとかですね。あとは、下流側ほど地震が強いので漏水の可能性が高いということがみえてきます。全般的な傾向は、何となく一般推定でも見えます。

こちらは局所推定で、局所的なボーリング調査の情報を考慮した解析結果になります。そうすると、例えばここではわからなかったこういう局所的に弱いところでも漏水しそうだなどというところが見えてきます。

こんなことで、局所推定の重要性がわかっていただけるかなと思います。

これをグラフ化したのがこちらでございまして、上が鉛直変位で、下が超過確率です。先ほどは β ですけど、今度は直接、何%超えるかというところで表現しています。鉛直変位でみますと、青が一般推定の結果、赤が局所推定の結果。もちろん弱いところで非常に平均値が下がっている。これは先ほどの絵に反映されていますけど、そうすると超過確率で見ると、やっぱりこういうところは非常に超過確率が高い。これが1ですから、ほぼ100%に近いところで漏水しますよというところが見えてきます。一般推定では見えないですが、局所推定で見えてきます。

この水路でもそうなんですけれども、堤防でもそうだと思うんですけど、照査がアウトになるというか、危ないと判断される区間が多いと思うんです。そうしたときに、どうい

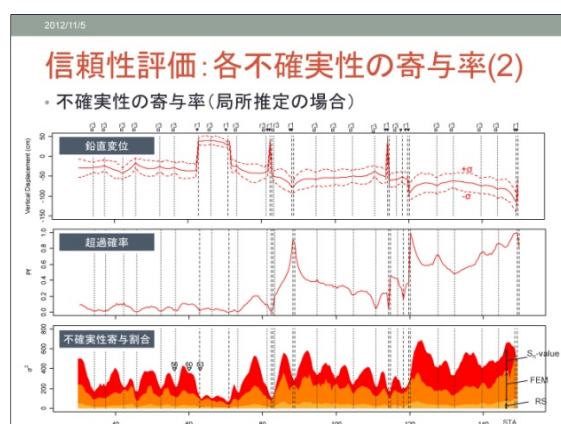


う順番で対策をしなきゃいけないんだというときには、やっぱりこういう情報が非常に重要かと思います。ですから、局所推定ということの重要性が言えるかなと思います。

申しおくれましたけれど、ここの縦のラインが調査したところになります。もちろん、調査して非常に弱いとわかったので、超過確率が高いということになります。

最後の図ですけれども、これは局所推定のことだけを見て鉛直変位、超過確率、そしてこちらが、その超過確率は何の不確実性に寄与しているんだというところを色分けしています。

これをみますと、 S_n と書いているのが S_n 値の推定の空間的なバラツキ統計的推定誤差。ここでは主として統計的推定誤差が支配していると思います。それから、FEMと書いてあるのがモデル化誤差です。LIQCA自体の誤差。それから、ここは回帰誤差です。回帰誤差は非常に小さいということと、パラメータのバラツキとFEMの誤差は、おおむね同じくらいの結果です。地盤調査したところではもちろん S_n 値の推定誤差というのは非常に小さいということがわかるかと思います。



ですから、先ほどのように対象優先順位がわかるということですか、あとは例えばこういう超過確率が上がっているところというのは、調査をしてないから上がっているということはこの色からもいえます。こういったところでは対策をするんじゃなくて、まずは調査してみましようとか、今後の管理者にとっての有用な情報が、信頼性解析をすることによって得られるんじゃないかなと、この結果を見て思いました。

