

## 液状化地盤の流動特性に関する実験と、 その耐震性評価への応用

東畑 郁生

東京大学大学院工学系研究科  
社会基盤学専攻 教授



確か3月も急にドタキャンをしてしまいまして、申し訳ございませんでした。その後7月からスイスで4カ月暮らしていきまして、いろいろな会議に不義理をやっていましたら、その間ヨーロッパでかねがね見たかったもの、いろいろなものを見たかったんですね。それを思う存分見てきました。川の堤防もたまたま幾つか、川を渡る機会がございまして、スイスでライン川を渡ってみたり、ロンドンの辺でテムズ川の上流のほうを見てみたり、みんな堤防がえらく低くて、日本の堤防に比べてこんなものでいいのかなと思うわけでございますけれども、確かに降水量が少ないわけです。そうすると、あんなものでいいのかなと思いましたが、



アルプスのほうへ行くと、人が住んでいるその目と鼻の先、全然堤防がなくて、氷河が雪解けでザーッとすごい勢いで流れている。こんなので堤防がなくてよく安心していただけるなど、非常に不思議に思いました。この辺、河川工学の先生方からまた何か感想でもいただければと思います。



今日のお話は、それとは全然違いまして、今、佐々木さんからもいろいろ模型実験の話がございましたけれども、その続きと言ったほうがいいと思うんですが、少し堤防の変形の計算をやるというわけでございます。そのためには、まず物性ですね。液状化したその物性がわからなければ、変形計算もできないわけでございまして、その辺の話題でございます。これ、今年5月にアメリカの学会で講演した話でございます。

最初は、皆様ご存じのもので、飛ばします。

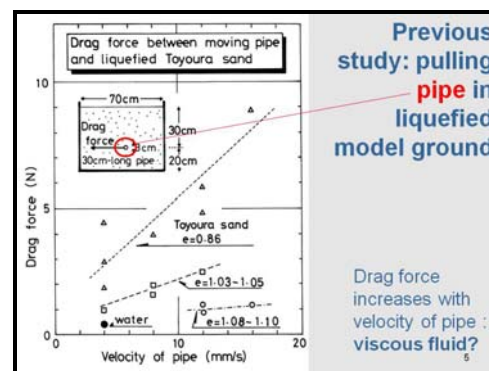
淀川でこう沈むという話ですね。これは、側方流動で、新潟のビルディングの杭も壊れた。横変形の話でございます。



目的は、この液状化した地盤の大変形の予測であるということでございます。これは大昔、もう十五、六年前にやった実験でございますが、パイプを横に引っ張りまして、横に引っ張る力と、パイプの動くスピードですね。この関係をプロットいたしますと、砂の密度に応じて変化がございますが、基本的に右上がりであると。こんなので昔習いました流体力学で、ストークスだとか、何とかの法則と言いついてまして、粘性流体だと、当時水理学の教科書には書いてありました。地盤工学には全然書いていないのですが。それで液状化した砂は、粘性流体みたいなものと当時思ったわけでございます。

**Objectives of this study:**

- Prediction of liquefaction-induced large deformation of subsoil.
- Hence, assessment of seismic performance (residual deformation) and effects of damage mitigation measures.
- Evaluation of force that flow of liquefied subsoil exerts on underground structures.
- Development of performance-based design principle.

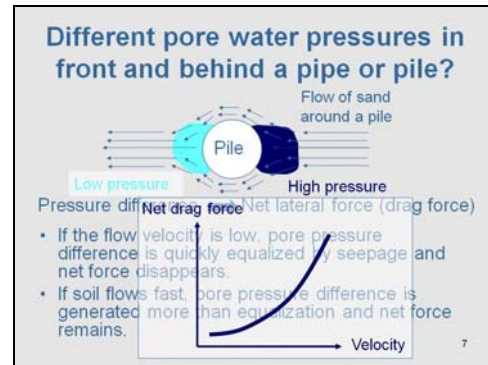
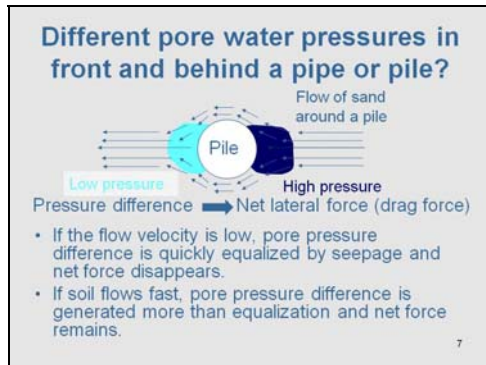


疑問は、何で粘性流体的に見えるんだということがありまして、いろいろと、その後努力をしたわけでございます。私が粘性流体みたいに見えるんだと言っていると、おまえばかかと、外人の方が言われまして、そんなわけはないだろうと、単なる思い過ごしだとか、厳しい意見もございまして、いろいろ学問的な議論があったわけでございます。これ、火花が散っているつもりですが。

**Why viscous? Why rate-dependent?**

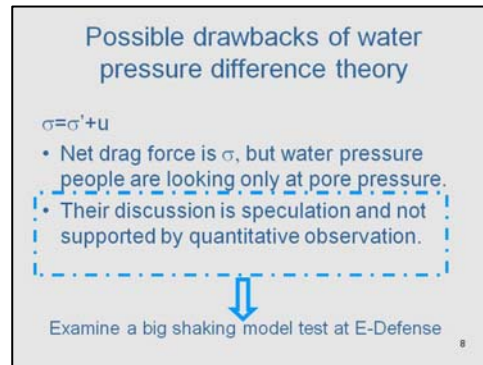
Very difficult to answer, but there are two possibilities:

- Liquefied sand is similar to viscous liquid (Newtonian or Bingham)
- Different pore water pressures in front and behind a moving pipe

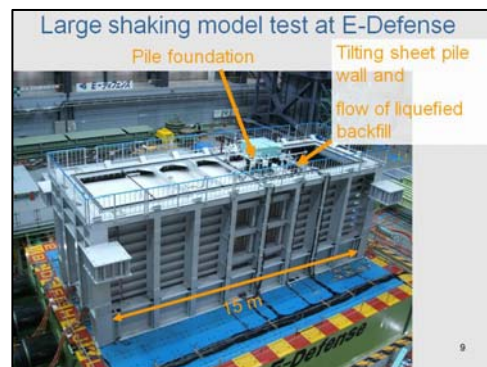


反論のご意見を簡単にまずまとめますと、例えば、昔実験していましたが、パイプでもパイルでもいいんですが、いずれにしてもこういう物体があるわけです。そのまわりを液状化した地盤が横へ流れるわけですが、大体こういうことになると。流体力学なんて偉そうなことを言えないレベルの話ですが、表側はぶつかるから圧力が高まる。裏側は剥離と言いましたっけ？ いろいろありますが、圧力が低くなる。表の高い圧力と、後ろの低い圧力の差で横向きに力が働くんだよと、それが液状化による構造物に働く横抵抗であるということがあるんじゃないのというご意見があるわけです。それで、特にこの圧力差ですね。液状化地盤の流動の場合、この圧力と言っているのは間隙水圧だ、水の圧力であるとおっしゃるわけでございます。それで、地盤の場合は、この圧力差がスピードによって変わってくるんだよというご意見を賜ってきたわけでございます。何でかと申しますと、地盤の場合、透水、圧密現象というのがございまして、間隙水圧、水の圧力、こっちが高い、こっちが低いと、左が低いとなりますと、当然水の流れが生じまして、水圧をイコールにしようという現象が生じます。一方では、地盤が流れていますから、表側は水圧が高まる、後ろが低くなる。つまり差をつくるというメカニズムと透水現象でイコールにするという現象、2つ重なって起こるので、要はどっちが勝つかという話です。例えば、どんどん地盤が流れておりますと、圧力の差をつくらうというほうが勝つ。だから、圧力の差が高まって、右から左へ杭は押すんだと。逆に、遅いと、圧密透水現象のほうが勝ちますので、圧力差が小さくなって、横方向に大して力にならないというわけです。私が以前実験で見ました速度依存性、速ければ速い流れほど、あるいは杭が速く動くほど力が大きいという話は、地盤の液状化した砂の粘性とか云々じゃなくて、単なる実験上の都合だと、圧密透水と圧力の差がどっちが勝つんだと、それに過ぎない。物質の本性には迫っておらんというご意見だったわけでございます。

それで侃々諤々言っても仕方ないので、これはもうきちんと自分の意見を述べようと思って、今年の5月、講演させてもらった訳です。まず、若干手厳しいことも言わなければならないので、これわかっているのかということを使ったわけです。土質力学の根本原則としまして、全応力ですね。いわゆる応力です。プレッシャーは、有効応力と間隙水圧の足し算なんだと。何やかんやおっしゃっている方は、この間隙水圧しか見ておらん、有効応力のことを知っているのかということで、まず土質力学をちゃんと勉強せいということもはっきりと言ひまして、この辺から挑戦的な話題だったんでございますが、そればかり言



ってみてもしょうがないので、定量的な議論をしようというわけで、E-Defence、ここで文部科学省のやっている大型実験でございますが、たまたまこれに関わらせてもらいましたので、このデータから1つものを言おうということが、まずございました。これは、寸法が15メートル、深さが5メートルぐらいある土槽でございまして、揺すって、ここの右のほうに矢板式の護岸が入ってまして、後ろが液状化したします。液状化すると矢板の護岸が倒れまして、地盤が流れまして、杭基礎が2×2の杭ですが、入っています。その杭に横向きに力が働くということです。これは模型ではなくて実物だと言いたいのですが、それから物を言いたいわけです。これもなかなか難しい実験で、物が壊れないといけません

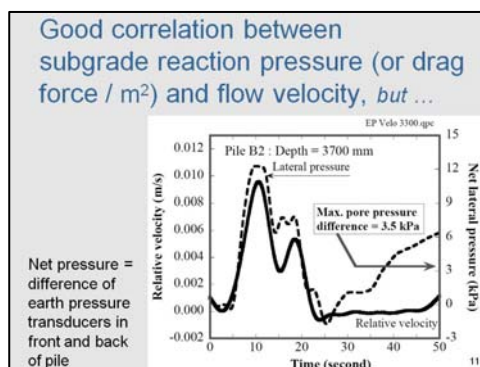


んです。壊れる実験をしないとイケないというのが財務当局からの指令でございまして、ただ、こうやって壊れちゃいますと塑性変形になっちゃうので、今度は解析が非常に難しいということで、壊れるのはいいけれども、学問、技術の進歩のためには壊れないほうがいいんですよ。

予算がついている理由が、壊すからということで、その辺の矛盾に大分苦しみました。とりあえず、最終的には壊れるのは仕方ない。その壊れる前の段階のデータを一生懸命分析いたしまして、何とか結果を出したわけでございます。



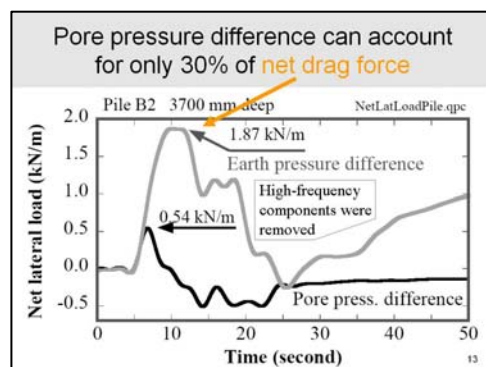
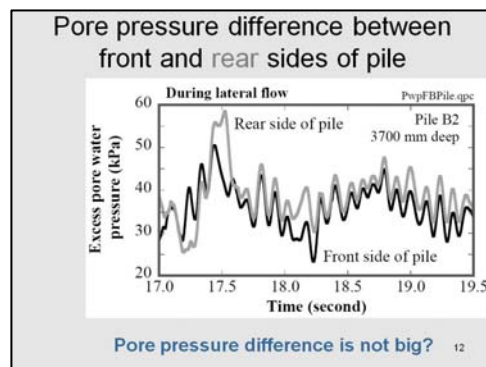
例えば、横軸は時間ですね。縦軸はRelative velocityと書いていまして、杭はほとんど動かないんですね。主に周りの地盤の流れるスピードです。その差を取っています。すると、これが実線で最初がばっと動きまして、終わりのほうは止まっていきます。ゼロになっていきます。もう一つございますのは、横向きのlateral pressureでございます。これは、杭に正味どれぐらい横向きに力が働いていますかというわけでございます、計測上は杭の表と裏に土圧計がありまして、その差をプロットしております。



これを見ていただくと、スピードが速いときほど横向きの圧力も大きいというような結果となっております。昔、私が小さな小さな模型実験で見たのと、これは直径杭15センチですが、それと話は整合しております。

後ろのほうですね。これが中で止まっているのに横向き圧力がどんどん増えている。これは何だと言いますと、この辺でもう杭が座屈して、折れて倒れてきていまして、それで倒れる方向はこうなっています、あ、違ったかな、こうかな。いずれにしても、もう上から重力で圧力がかかっていますので、正味、地盤に押されてほとんど杭が倒れているというところがございます。こういうことがありますので、解析が非常に難しいんですね。

さらにこれらはまた時間変化でございますが、縦軸が過剰間隙水圧、これは間隙水圧云々かんぬんとおっしゃるので、これも表、フロントですね、裏とプロットしました。正味この差が杭を押しているんだということをおっしゃるのですが、実際プロットすると実はあまり差がなくて、みんな表も裏も一緒に動くんです。その差を実際計算して、黒線ですね——杭の直径倍しまして、正味の力に直したんですね。それから今度は、杭に働く横向きの土圧、これも先ほどのように計っておりますので、これもプロットしました。見てやると、これは全然関連しない。大きさから言っても3倍以上、正味土圧のほう



が大きゅうございますし、この変化の形を見ましても違うということで、もう間隙水圧などとのに足らずということが定量的に言えますよということを主張いたしました。

さて、いろいろ研究書がございますけれども、私としては液状化した砂は有効応力が非常に小さくて、粘性流体みたいなものだと言いたいわけですが、それをはっきりと立証するにはどうしたらいいかということが長年の悩みでありまして、例えば模型実験ですね。E-Defenseもそうですし、私どももやっていますし、いろいろとやられている模型実験、もちろんいいところ、悪いところがあるわけです。

Advantage and limitation of model tests

- High pore water pressure develops and effective stress is reduced to zero: complete liquefaction is reproduced.
- Stress and strain in liquefied sand cannot be determined precisely.
- As will be shown later, viscous nature of sand varies with strain rate, which is not uniform in the model subsoil.


15

いいところは何かと言うと、やはり高い過剰間隙水圧の状態をこしらえることができ、液状化状態をつくることができます。実現象と似ているというか、再現しているということが出来るわけですね。これはすばらしい。ところが一方、定量的な話、物性ですね。ヤング率とかもそうですけれども、Stress and Strainというようなことを考えたいとなりますと、途端に困難に遭遇いたしまして、わからんわけです。液状化してしまうと、応力ひずみを計っていない、計れないんです。それが困る問題です。

しかも模型実験ですと、例えば杭とか、埋設管とか、そういう模型の周辺ではひずみは非常にでかく、遠くへ行くとあまりひずみがない、不均質なんです。土の場合、ひずみが大きい、小さいなんていうことで、物性がまた違ってしまいうんです。非線形性、それを外から見たデータだけから内部の応力ひずみ、あるいは物性まで推定するのはほぼ困難であるというわけです。これが水ですと物性が均質なので、いろいろ考えられるわけですが、地盤の場合はそれができないというのが問題でした。

ではというので、よくある例えば三軸圧縮試験というものです。これは応力ひずみが得意なはずなのですが、これは長所なんです。ところが、液状化してしまいますと、それこそもう水の部分と砂の部分が分離してしまって、幾ら繰り返しても、液状化後は実験が続けられないとかいう問題もありますし、液状化してしまって、例えば強度をゼロとしますと、そもそもサンプルとして立ってられないはずなんです。

Unstable sand sample after 100% liquefaction



To measure stress-strain and viscous (creep) behaviors after liquefaction,

TWO PROBLEMS:

A sand sample collapses under its own weight : unstable behavior.

17

そんなことで液状化後の物性を研究するには、やはり困難が多いというか、ほとんど不可能なんです。例えば応力の値を考えますと、仮にこれは三軸サンプルですけども、上のほうで、横向きですが有効応力はゼロになっています。下もゼロかといいますと、やはり砂の重さがありまして、下のほうが有効応力は高いんです。つまり不均質という意味です。こんなたった10センチ、20センチのサンプルの中の上と下の応力の違いなんて、普段は全然問題にならない。ところが、有効応力がゼロなんてことを言い出して、液状化なんてことを言い出しますと、上がゼロで下が1 kPaにしても、ゼロ対1で全然違うわけです。そんなことが非常に問題になって、上と下で変形特性が違うということで、実は結局何しているかわからないという問題にもなりますし、そもそもこれ全体が重力でペしゃっつぶれてしまうわけです。

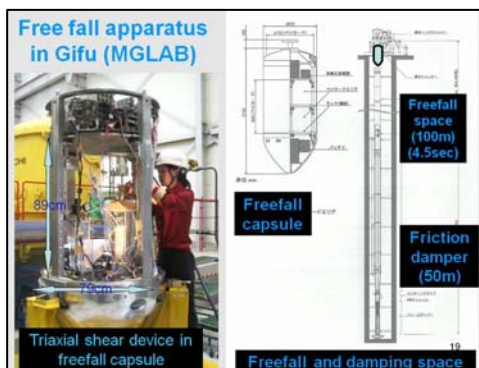
そういう問題がありまして、これをどうやって克服しようかということを経年考えていました。要するに粒の重さを消したいわけです。砂粒の重さを消したい。一時考えたのは、三軸圧縮試験のサンプルの中に水が入っているわけですね。地下水という意味で。これは水でなくて、もっと重たい、比重2.7ぐらいの液体で三軸圧縮試験をやれば、これは浮力でちょうど粒の重さが消えるのでいいのではないかと思ったわけですが、

**How to erase the weight of sand grains?**

1. Use of heavy pore liquid: weight of grain = buoyancy force. No relevant liquid was found.
2. Run triaxial tests under zero-gravity field: in the space or in a free-fall facility.

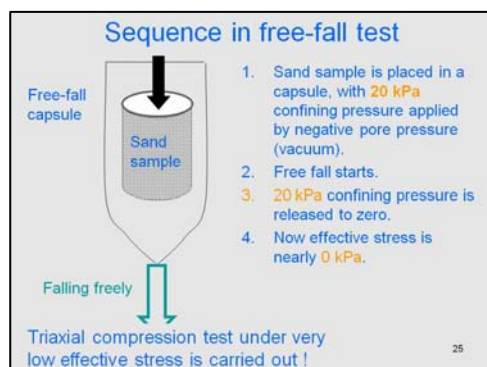
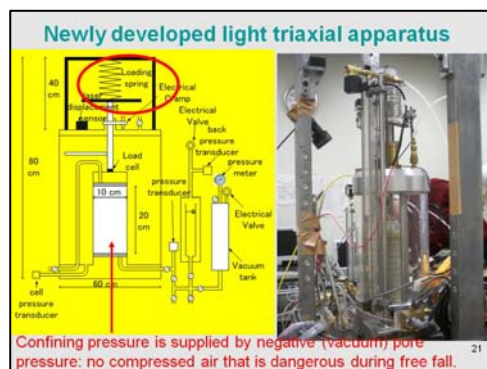
18

ちょっと調べたら有毒であるとか、何かそんな言葉がちょろちょろ出まして、水銀だと逆に重過ぎて砂粒がみんな上に浮くので、これもよろしくないということで、断念したわけです。かわりに重力を消そうということで、フリーフォール、自由落下ですね。これを思いついたわけです。実は、無重力実験というのは一つだけ過去に地盤のほうでも例がございまして、90年代にNASAのスペースシャトルの中で三軸圧縮試験をしたアメリカの先生がいます。それはすばらしいのですが、どのくらいかかるかなと計算すると、けたが多過ぎて、電卓では足りないということもあり断念したわけがございまして、そもそも打ち上げのときにすごくGがかかるわけで、その辺で何が起こっているかさっぱりわかりません。多分、過圧密になってみたり、むちゃくちゃだろうとも思いました。



なので、かわりに自由落下実験、これは何かといいますと、カプセルなんです。これが無重力で落下します。その中に三軸圧縮試験装置を入れまして、その中に砂のサンプルが入っていて、ちょっとした力で変形させようというわけです。いろいろな衝撃もあるので、これを見ていただけますか。これが岐阜県にありました施設なんです。景気が悪くて閉鎖してしまって、今はないんですよ。当時、上からまずカプセルをセットしますね。元鉱山の縦坑なんです。100メートルは自由落下します。その後、下50メートルはダンパーでとりあえず止める、こう来て最後に止まるわけです。だから、この止まるところで結構衝撃があります。なので、変な衝撃で壊れると困るので、使い回しをしたいものですから、いろいろなものを全部軽い装置としています。載荷装置もばねでいろいろやっています。

これは制御室で、記録が全部ここでとれて、載荷しろとか何から全部ここで制御ができます。これはカプセルですね。装置に入っていて、縦坑に入れまして、真空にして自由落下させるというところ。この辺は装置の話ですから飛ばしますが、いろいろ大騒ぎしたわけです。これも空気圧で載荷します。下手して爆発したらえらいことになりますので、全部ばねにして、万一壊れてもいいように、簡単な模型です。これは実験後ですけども、三軸サンプルを学生がつくって、一応、低圧で圧密して準備して、それでカプセルに乗せて自由落下するわけですが、自由落下の直前に有効応力を全部ばつと解放して、それで落とすというわけです。落ちていって、それで圧縮するというをやっています。

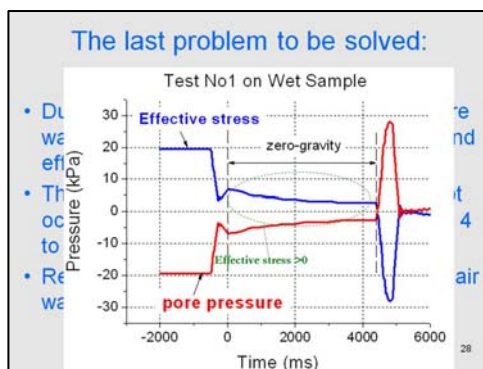




動画がありますが、最初、実は失敗したんですよ。やってみたんですけども、これは縦軸がサンプルの変形です。自由落下しています。横軸が時間ですが、何と全然変形しないんです。愕然としまして、これはもう失敗だったのですが、後ろのほうは気にしないでください。最後着地するときの衝撃でばしゃつと壊れているところですから、これは意味がないです。この部分です。自由落下して、ゼログラビティーなのに全然変形しないんですね。



どうしたことかと、結果のデータを見ますと、横軸が時間、縦軸の有効応力は最初は20kPa、間隙水圧がマイナス20kPa、正味全応力はゼロです。ここで間隙水圧をゼロに戻して、有効応力ゼロとなったはずが、戻らないんです。何で戻らないかといいますと、これは土質力学なんですけれども、緩い砂でも圧力が低いと、せん断のときに膨張する



んです。膨張しようとして、装置の中で外から水を吸い込もうとしているのですが、水を吸い込むスピードが間に合わない。これは2,000ミリ秒だから2秒とかそういう話なんです。間に合わない、間に合わないからとりあえず間隙水圧がマイナスになってしまっ、有効応力がプラスになってしまっ、それで頑張ってしまうんですよ。で、壊れない、ほとんど変形しない、そういう問題があったんです。

「うーん、困ったな」と電話で岐阜の山奥から私に言うてくるものですから、うーんということで、一方で装置を予約しているものですから、早急にこの問題を解決しないといけないと思ひまして、もう水で飽和したサンプルは諦めようと、ドライ、乾燥した砂にしると。水よりも空気のほうが装置への出入りがずっと早いですから、それで何とか行くのと違うかと言ったわけです。

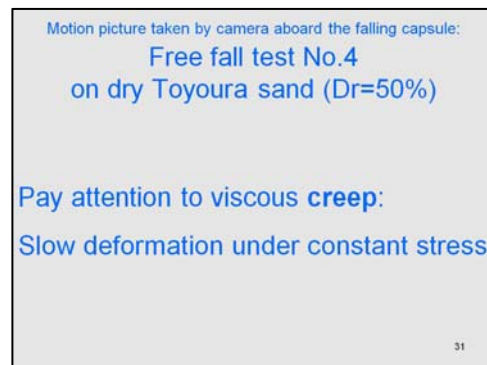
**The last problem to be solved:**

- During free fall and sample deformation, pore water pressure was held negative in sand and effective stress remained.
- This was because swelling of sand could not occur quickly during the short free-fall time : 4 to 5 seconds only for 100 meter fall.
- Remaining tests were run on dry samples: air was quickly absorbed by swelling samples.

ついでに申しますと、NASAのスペースシャトルと比べますと、この装置での実験が1回90万円です。結構高いと思っていられるかもしれませんが、アカデミックディスカウントがありまして9割引きなんです。1回9万円。そのかわり学生を連れてきて現地でセミナーをしるかという条件がつくのですが、それはいいですよというわけで、9万円の实验です。現在はこの施設が閉鎖されてしましまして、愕然としています。

そんなわけで、ドライサンプルで2回成功したんです。これは1回目です。そのうち動くはずなのですが、相対密度50%の豊浦砂ですね。動くはずなんです。さっき動いたので、動くと思うのですが、ちょっと機嫌が悪いです。間もなく自由落下が始まりまして、そのうち今度はちょっと载荷します。その後じわっと行きます。何かあったら、動画ファイルに行きますが、じゃ、これを一遍止めて動画ファイル……3ですね。今、载荷しましたね。そこからじわっと行くわけです。最後に壊れるのはどうでもいいんですけども、途中じわっと行くところがポイントでありまして、つまり軸力が荷重一定なんです。軸力一定でじわっと変形するところがクリープといいますか、粘性的挙動であると言っているわけです。

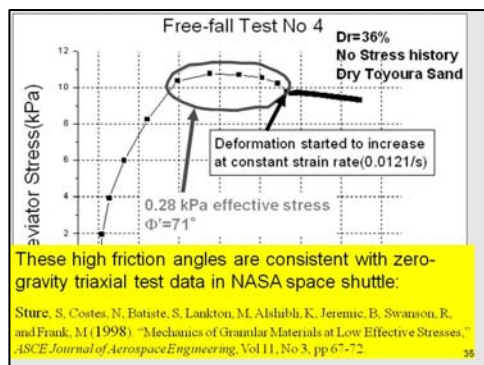
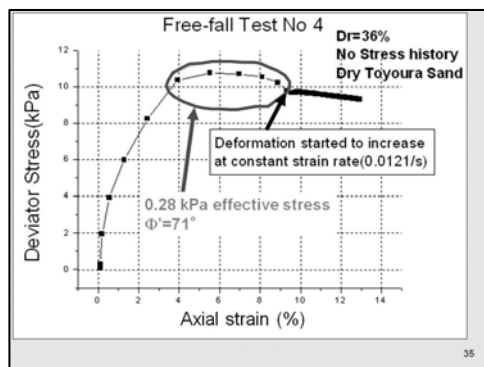
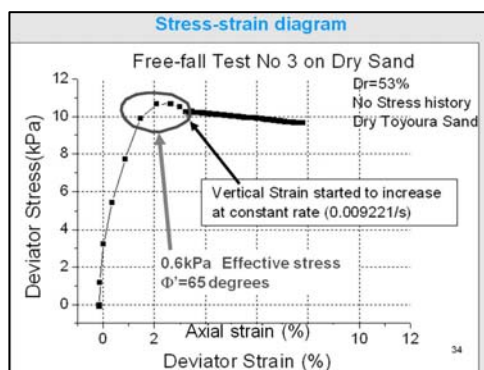
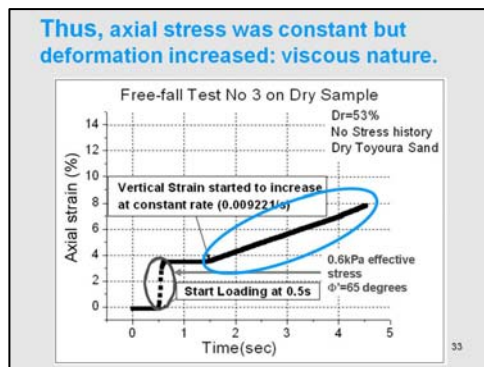
1回だけではありませんで、もう一回こっちもありまして、これも最初なかなか動かないんです。落下するカプセルの中にカメラがありまして、録画できます。今落下を始めて载荷して、ここですね。このようになりまして、荷重一定だけれども、変形は一定速度で進んでいると、そういう挙動がわかったわけでございます。



やっときさ、まあ、よかったよかったというわけですが、それでプロットしますと、変形、ひずみの時間経過ですね。最初ぼかんと変形した後、じわっとこうですね。ひずみ速度は一定で変形だけが進んでいくというわけです。ついでにぼかっと変形したあたりで、応力も上がっていますから、一応、内部の応力も計算したんです。有効応力は0.6 kPaで、水をヘッドにして6センチですか、やはりこれぐらいの力があります。縦に力をかけていますし、横をゴムのメンブレで包んでいますから、その張力で少し圧力が残っています。0.6 kPa、 $\Phi$ は65度という、途方もない値に見えますけれども、スペースシャトルの実験も70度とか言っています、一応いいかなと感じています。

ここですね。応力ひずみでピーク、この辺から計算しますと65度になります。これはあまり重要なデータではありません。むしろ大事なのは、この後のプロセスで押しつぶしますから断面積が増えていきますので、ちょっと平均的な応力が減りますけれども、これでひずみのスピードが0.00921毎秒、つまり1秒間に1%ぐらいのスピードで変形しています。

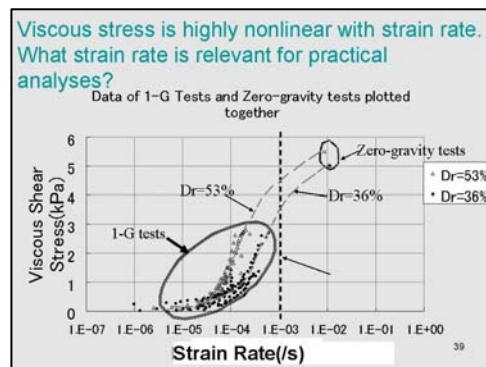
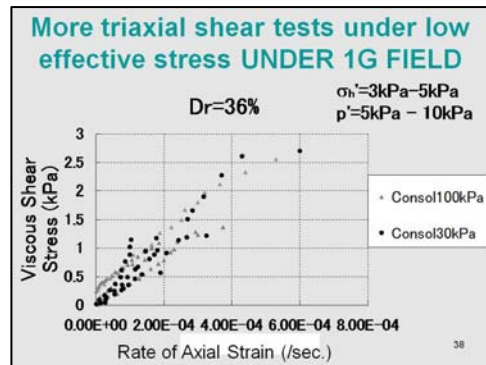
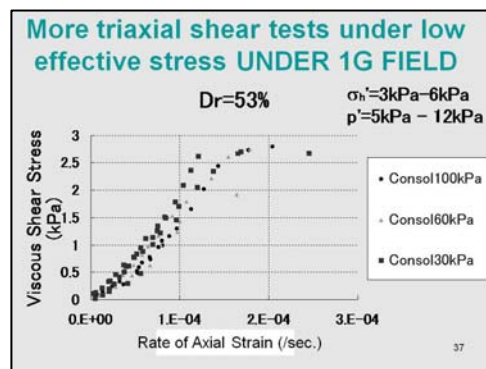
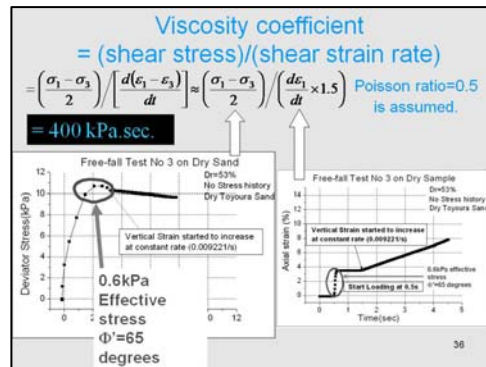
それでもう一遍、2回目の実験をしたのがこっちです。1.2%毎秒で変形するわけです。こちらは71度の内部摩擦角でした。



それから、粘性係数を計算しようというわけです。せん断変形を考えていますので、せん断応力割るせん断ひずみのスピードということでやっています。計算しますと、400 kPa・secとなります。水が概ね、0.001 Pa・secだったかな、水は非常に小さいんです。それに比べて遥かに大きいと、遥かに大きいから液状化地盤の流動は遅いわけですが、そういう数字になります。

実験に2回成功したんですけども、修士論文の研究なので、2つのデータでは寂しいということで、後は1Gの大学の実験室で同じ装置を使いまして、もう少し有効応力が高いのですが、数だけふやせというようなことで実験しました。縦軸が粘性応力で、横軸がひずみひずみのスピードです。先ほどの無重力実験は1%毎秒ぐらいの辺ですから、もっと向こうのほうにあります。

やりまして、こんな感じなんです。粘性応力対ひずみのスピードで、ログでプロットしますと、無重力実験は右のほうの丸のところ。学生が自慢して言うには、この辺に同じ相対密度でつないでいくと、ちょうど延長線のように見えるとか言うわけですが、わかったということにして、こう見ますと、問題は横軸、ひずみのスピードに対して、かなり物性が違うわけです。実現象を分析するには、一体どれぐらいの状況を考えてらいいのかというのが問題になるわけです。ゆっくりだったら、多分、非常に粘性係数は小さいんです。速い現象だから無重力実験のほうは粘性係数が大きく出るのか。ただ、横軸は対数ですから、逆ですね。比例係数をとると、こっちのほうが硬く見えるのかな。

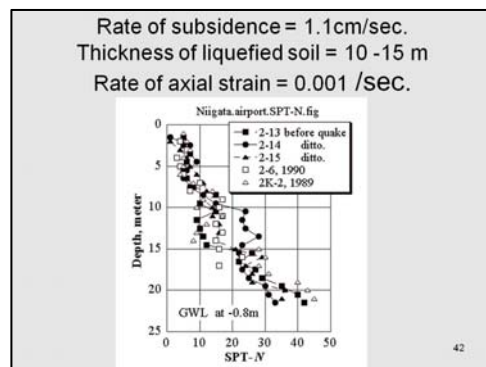


そんなわけで、ひずみ速度が実際にふさわしいのは一体どこだというわけですが、結論はこの辺が一つの目安だと。0.1%毎秒、これは何でかといいますと、全然ロジックはないんですけど、この新潟地震での新潟空港の空港ビルディングの沈下の動画がございまして、これも動くかな。

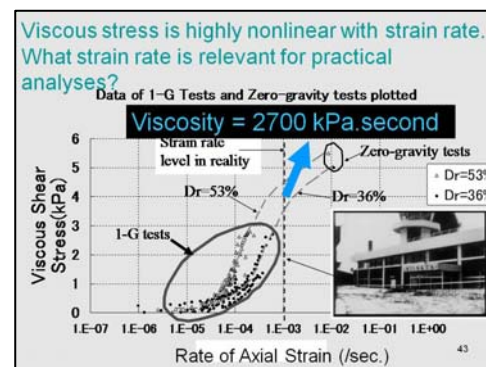


これもかなり苦しかったのですが、空港のビルディングは一体どれぐらいのスピードで沈んでいくんだろうかということ、何とかこれから読みとろうとしたんです。かなり強引ですけども、液状化した砂の水の噴き出した水面があまり変わらないと、多分ちょっと変動しているのですが、それに対してビルディングの窓枠とかの距離がどれくらい縮んでいくかを一生懸命読み取ろうとしたんです。これは当時の設計図もいただきまして、もとの寸法がわかっていて、かなり苦しいんですけども、何とかやったんですね。すると、大体1.1センチメートル毎秒、これはかなり乱暴な数字だとお考えください。

それに対して液状化層厚はいくらだということ、これはN値のボーリングデータです。一体深さ何メートルまで液状化したかというのが、わからないんですけども、N値15とか20に来るのが一つの深さ10メートルぐらいですか。この辺のデータは15メートルぐらいで固くなると、大ざっぱに言って、大体深さ10から15メートル付近の辺が液状化層厚の底であろうと考えますと、厚さが10ないし15メートルが毎秒1センチぐらい縮んでいくということで、ひずみのスピードから申しますと、大体0.1%毎秒と、そうなるわけです。

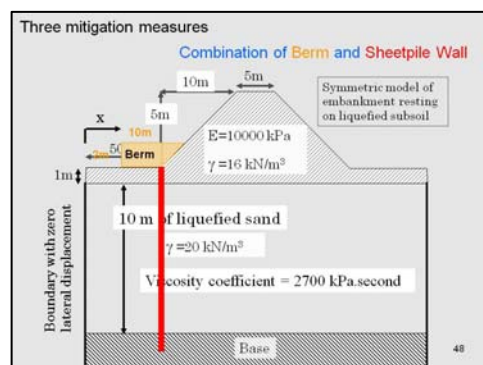
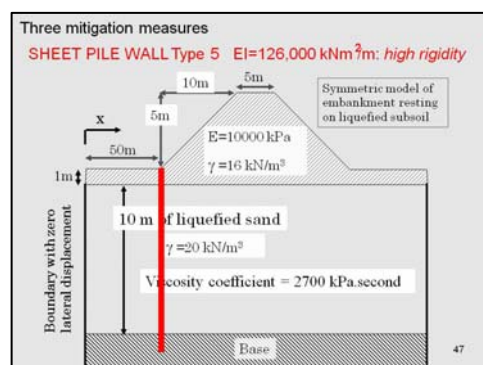
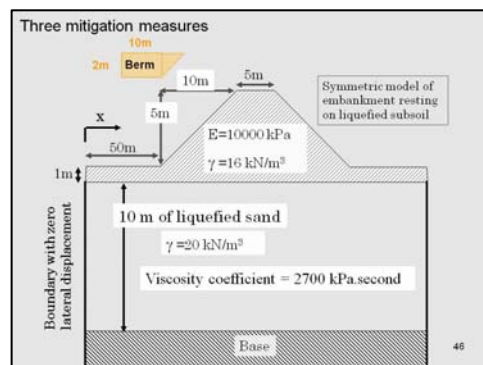
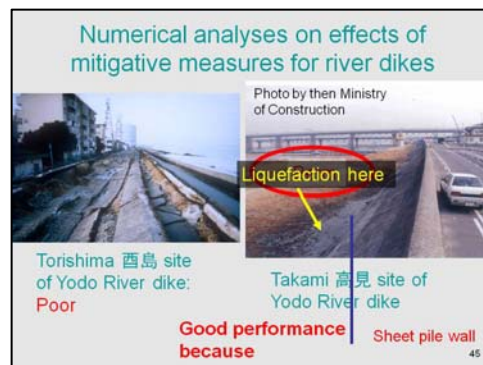
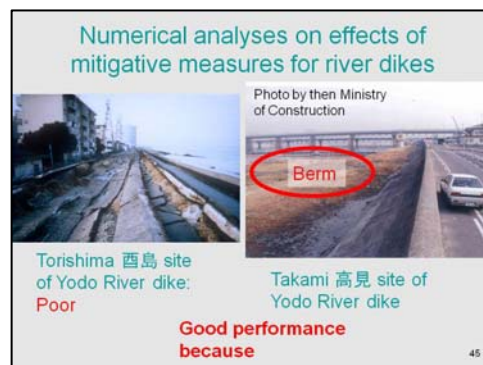


そんなことから、先ほどのひずみのスピードと粘性応力の関係でございまして、0.001ですね、0.1%毎秒。大体この辺の粘性応力が一つ物性としてよろしかろうというふうになりました。計算いたしますと、大体2,700 kPa・sec、また数値が増えました。

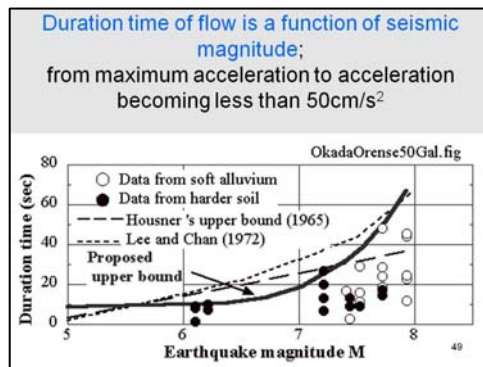


あとは付録的でございますけれども、それを使って粘性流体説で計算しようと、変形計算をしようというわけですが、これはご存じの淀川西島地点で、これはその上流の高見地点というところでございます。どちらも液状化しておるわけですが、液状化程度は高見地点のほうが小さいですね。ちょっと砂を噴いたぐらいですが、被害という意味では、けたがもう全然違うわけでございます。何でけた違いなのかということで、1つは液状化程度も違うんでしょうけれども、対策という意味では押え盛土的な効果が河川敷にあるということで、西島のほうは河川敷がないわけです。地滑りとか斜面安定の見地から申しますと、押え盛土があったほうが安定しております。

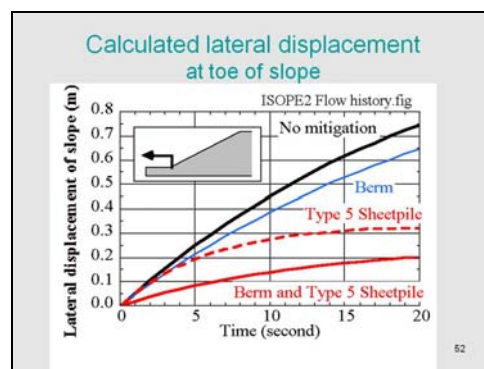
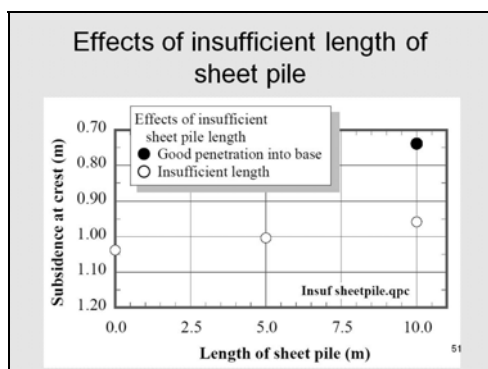
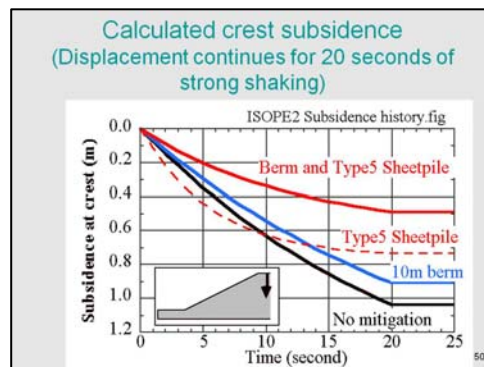
あるいは、これは佐々木さんのお話にもありましたけれども、止水矢板が深いと。つまり支持層と言っていいのか、ここは硬い地層まで届いていたと伺っております。西島地点は矢板はあったけれども、5メートルぐらいしかなくて、硬い地層は深さ10メートルですか、半分ぐらいしかなかったと聞いていまして、その辺が違うのではないかとということです。それをヒントに、性能・評価という意味で、架空の堤防模型であります。架空の液状化層厚は10メートルです。いろいろ寸法も適当に設定いたしまして、ここに例えばぽんと押え盛土が幅10メートル乗っかったらどうなるか、あるいは5号の矢板が入ったらどうなるか、あるいは両方組み合わせたらどうなるかと。で、具体策の場合と比較したわけです。全部計算上です。



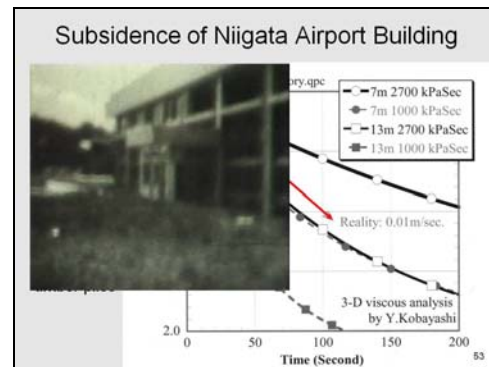
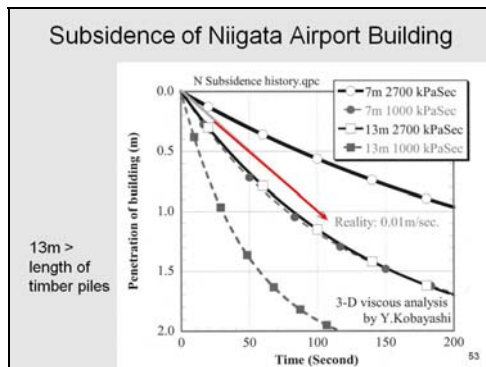
何秒間地盤流動するのかということもいろいろやっていたんですけども、とりあえず強く揺れている間だけだと考えていました。現実はなかなか難しいのですが、大体5.0以上で揺れている時間は何秒だということを、観測記録よりプロットいたしますと、マグニチュード等いろいろありますが、これは震源からの距離もさまざまですから、ばらばらですけれども、最悪という意味で大体この線かなと。マグニチュード7だったら20秒ぐらい、8だったら6、70秒と、それぐらいを考えていまして、その間に粘性流体はどれぐらい流れるのかと、これは20秒、マグニチュード7ぐらいを考えています。



これは天端の沈下量です。何もしないと最終的に、高さ5メートルが1メートルぐらい沈下するという計算です。河川敷がございまして、これは8割5分ぐらいにしかならない。矢板があると7割ちょいかな、両方あると半分ぐらいになるという結果です。これはのり尻の水平変位ですけども、これも何もしない場合に比べて、河川敷だけだとちょっと弱くて、矢板が入るとこれは大分減りました。やはり矢板が剛性で曲げて大分抵抗していますね。両方組み合わせると、これは4分の1ぐらいに減るというような結果でございまして。



さらに、この新潟空港ビルの沈下も何とかやろうというわけですが、縦軸が沈下、横軸が時間です。これはえらく長い時間やっています。このビルは1メートル30か40沈下したんですね。そこまで行かせるにはかなり大変でありまして、いろいろな計算をしておりますが、これでわからないのは、液状化層厚なんですね。7メートルぐらいとか10メートルなのか、13メートルなのか、15メートルなのかよくわからないので、ここでは7と13でやっています。



それから粘性流体、粘性係数も  $2,700 \text{ kPa} \cdot \text{sec}$  もありますけれども、ちょっと小さくして  $1,000$  というのもございます。まあ、いろいろやりまして、赤い矢印が毎秒1センチ沈んでいったというのですから、現実かなという線ですが、この赤い矢印に来るためには、白丸と白四角の間ぐらいで、液状化層が10メートルぐらいなのか、あるいは灰色の丸と四角の間ではだめなんだな……。  $1,000 \text{ kPa}$  ぐらいではもう沈み過ぎてだめで、またもう少し大きくしないといけないとか、そういうのでこれは真実を証明しているのではなくて、単なる比較の意味でしかないんですけども、そうになりました。だから、今何か言えとおっしゃると、多分、  $2,700 \text{ kPa} \cdot \text{sec}$  で計算したかったら、液状化層厚は10メートルぐらいにしろよということかと思えます。

というわけで、結論でございますが、とにかく自由落下実験を初めて、だれもしていないことができた、2回成功してよかったと、この辺で終わってしまったのが残念でして、何かこう産業界からの需要が出て、自由落下施設が再開してくれたらまたやりたいなと思っております。結局、9万円なんていう超安、ダンピングをやるものだからつぶれてしまうんですね。もうちょっと高く請求してくれてもよかったかもしれません。

**Conclusions**

- Free fall test is a new and good tool to study soil behavior under very low effective stress.
- Sand under very low effective stress is viscous.
- Frictional angle at low effective stress is very high.
- Deformation caused by liquefaction was numerically calculated.
- Performance-based design is possible.

ACKNOWLEDGMENT to MEXT Research Grant, E-Defense, and MicroGravity Laboratory.

それから、実験的に粘性流体と言っていいのではないかというわけです。文科省科研費とマイクログラビティー社に、感謝を申し上げます。以上です。