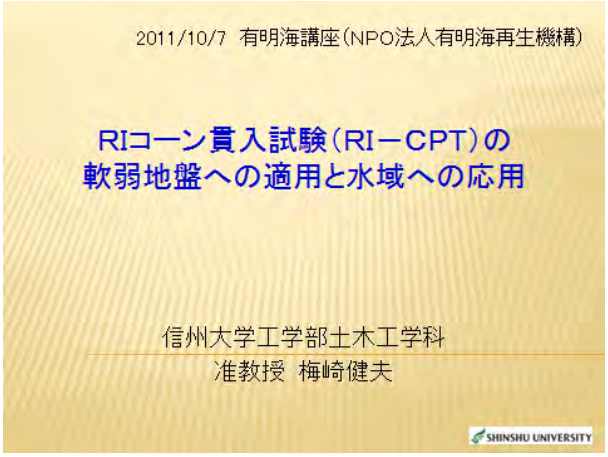
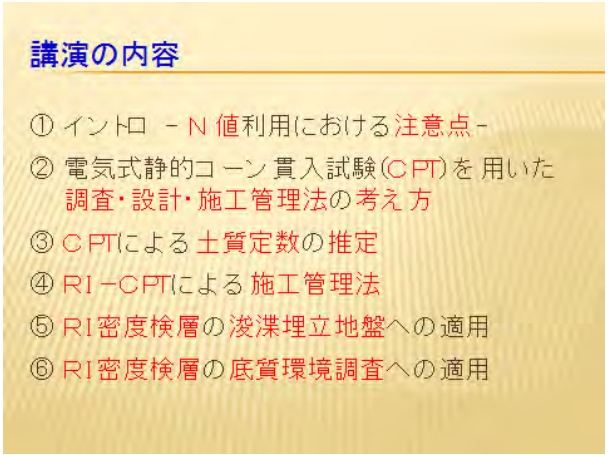
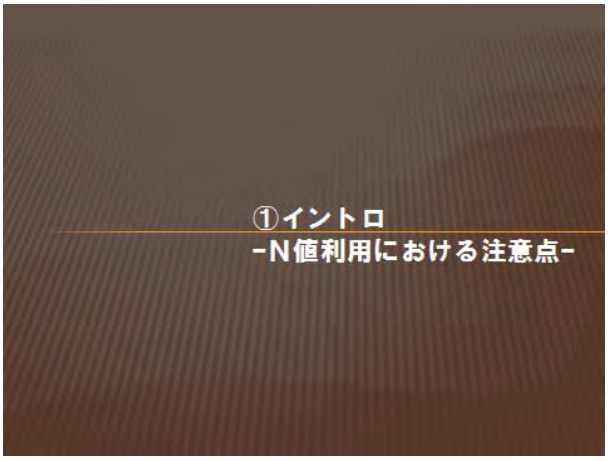
CPDS 認定講習会　有明海講座（第１回）

「RI コーン貫入試験の軟弱地盤への適用と水域への応用」

信州大学工学部 土木工学科 梅崎健夫　准教授







今日の講演は、コーン貫入試験についてです。この試験は、いわゆる何かせん断強度や透水係数などの土質定数をきちっとした力学理論に基づいて求めるものではありません。いわゆるサウンディングというもので、地盤の硬さや貫入抵抗のように力学特性に付随するものを測定するものです。その代表的なものが N 値を測定する標準貫入試験であり、我が国では最も普及しています。この N 値に代わるものが、電気式静的コーン貫入試験、コーンペネトレーションテスト、CPT です。 1980 年代位から世界的に使われるようになってきました。しかし、日本ではご存知のようにあまり普及しておりません。なぜ普及しないのかも踏まえてお話をしたいとおもいます。

最初にイントロという事で、皆さんご存知の事だと思うのですけれども、まず標準貫入試験、スタンダードペネトレーションテスト、SPT についてお話します。標準貫入試験がなぜ日本で最も普及しているのかですが、詳しい経緯は省略しますが、実務的なことからいいますと、日本の地盤が欧米の地盤と違って、軟弱層ばかりとか砂層地盤ばかりとかそういうような均質な地盤ではなく、これら

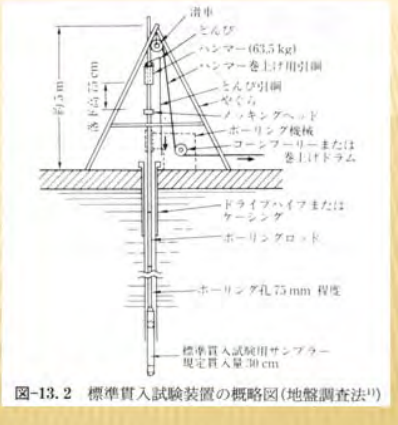


図-13.2　標準貫入試験装置の概略図(地盤調査法より)

の互層地盤であり、頻繁に固い砂礫層を含んでいることにあります。しかし、有明海周辺の佐賀平野とかでは、軟弱な粘土層の間に固い砂礫層が存在することはほとんど無く、有明海沿岸では、コーン貫入試験を積極的に使って頂きたいと思っています。すなわち、日本の地盤のように地盤中に砂礫層が存在すると、一定速度で圧入されるコーン貫入試験は載荷重が不足し貫入出来ないのです。コーン貫入試験では、色々な貫入車が開発されていますが、貫入車の自重以上の貫入力は得られず、コーンの先端が固い砂礫層に達すると貫入車が持ち上がってしまいます。最大貫入力は、5 トンとか 7 トンぐらいです。場合によっては、水とかおもりを貫入車に追加して載せたり、最近ではアウトリガー式のアンカーを打込むような機械もありますが、広く用いるには貫入力が十分ではありません。粘土層や砂層の中間に固い砂礫層が存在しても貫入できる方法としては、動的にロッドを叩き込むことができる標準貫入試験が最適です。ただし、動的に叩き込むという事は、せん断試験とは違って、柔らかいところはすぐ貫入でき、硬い所は何回も叩かないといけないというような感覚的な値を測定しているのです。すなわち、標準貫入試験から得られる N 値に直接的な力学的解釈を与えることは困難です。また試験方法においても問題が指摘されています。 63.5 キロのおもりを 75 センチ自由落下させるのですが、この時のエネルギーの伝わり方が厳密に制御されていません。今はトンビが使われることは少ないようですけれども、トンビを使うと駄目だと言われています。最近は、いわゆる機械式の自動貫入が一般に実施されていますが、この場合もエネルギーの伝わり方を制御できている訳ではありません。このように幾つかの問題が指摘されていますが、どこでも試験ができて一応試験結果が得られるということと、試験機自体が既に普及しているという点で、現在でも、調査はまず標準貫入試験、設計は N 値に基づいて実施するということが慣例化しています。皆さんご存知のように、N 値があると殆どの設計が出来ます。杭の支持力ですとか、液状化の判定とか色々なことができます。

まず、砂地盤ですが、N 値から砂の相対密度を求める関係図があります。ご存知のように、ゆるい砂地盤は液状化しますので、液状化判定の目安にするものです。最近は、P_L 値と F_L 値とに基づいて液状化判定を行い、自治体は液状化のハザードマップを公表しています。このときも一般に N 値が用いられています。ここで、この関係図をよく見てください。様々な異なる

砂地盤における利用例

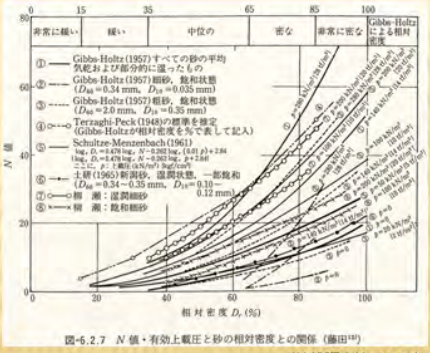


図-6.2.7 N 値・有効上載圧と砂の相対密度との関係（藤田[13]）

（地盤調査法，2004）

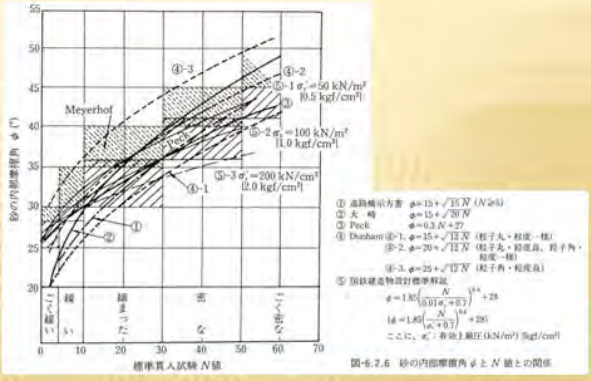


図-6.2.6 砂の内部摩擦角 φ と N 値との関係

（地盤調査法，2004）

式が提案されており、それぞれの大きく異なっています。

次に、砂地盤の内部摩擦角 φ と N 値の関係です。概略、砂の内部摩擦角は 25° から 45° くらいといわれています。50° とかの値が出てきた場合は「ちょっとおかしいな、本当かな」という感覚を持ってください。さて、N 値が分かると内部摩擦角が求められますが、やはり色々な式があって大きく異なっています。皆さんが、設計される時には、大崎の式ですとか、道路橋示方書の式とかを使われていると思いますが、もう一度この図に戻って考えて頂くと、これだけの幅があるところに平均的値として関係線を引いているということです。いわゆる我々土木屋がよくいう「倍半分」というもので、プラスマイナス 50%の誤差を許容しています。ただし、施工性や経済性を検討するための詳細設計においては十分な評価を与えることができません。今後、このあたりを詰めていかないといけないということは、皆さんもご存知のことだと思います。

今度は粘土地盤です。粘土の一軸圧縮強度で、これを半分にすると非排水せん断強度になります。これもやはり N 値がわかると直接その値が分かるということになっています。古くはテルツァギー・ペックの式から、日本の様々な粘土に対する関係式が提案されています。しかし、これらの式も大きくばらついた測定値の平均的な値を示す式です。これらの式によれば、一つの N 値に対して、50 位の値から 200 位の値まで非常に大きな幅の中で設計することになります。そもそも最初にいいましたように、非排水せん断強度ですとか内部摩擦角とかが直接得られる試験ではないのです。それらに関連するものを測定しているだけであるという前提に立って考える必要があります。これがサウンディングということです。

粘土地盤における利用例

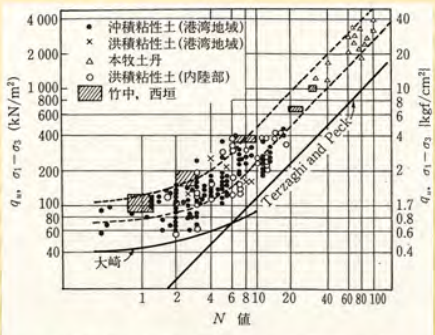
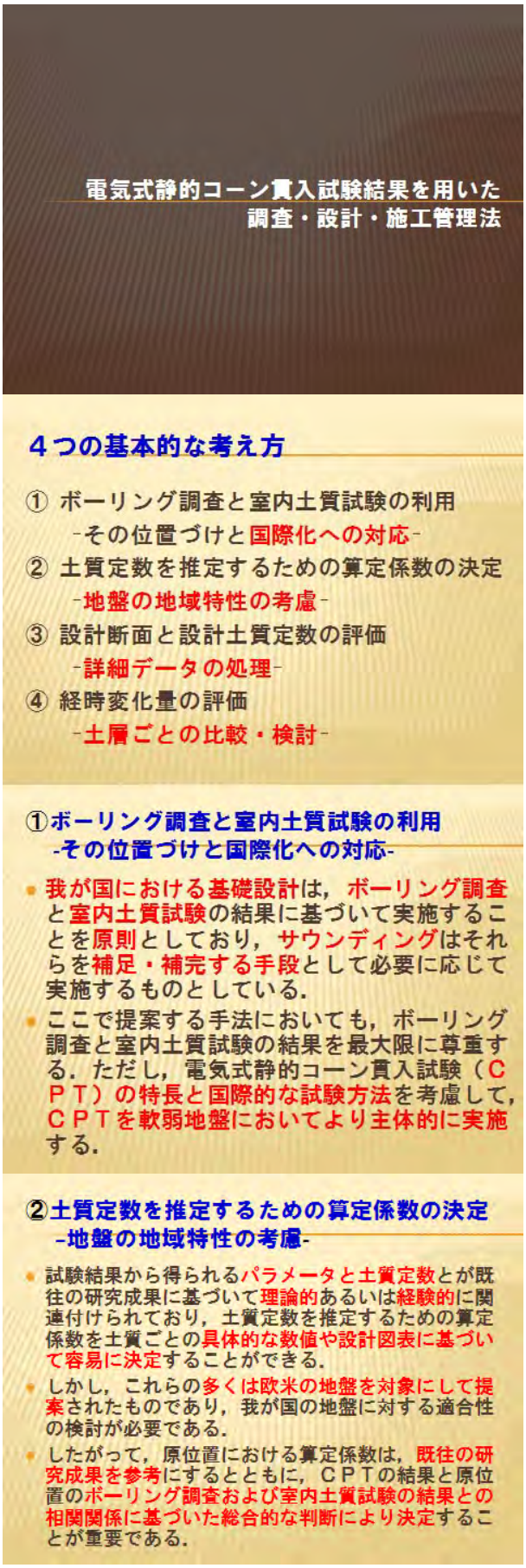


図-6.2.9 q_u と N 値との関係（奥村[16]に加筆修正）



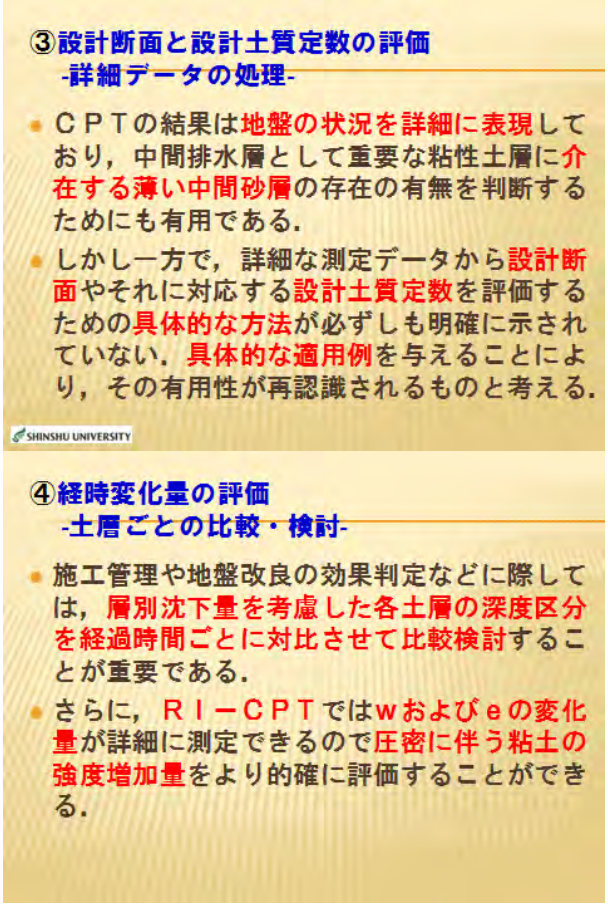
さて、これらのことを踏まえて、電気式静的コーン貫入試験（CPT）ですが、先程説明しましたように、標準貫入試験は動的サウンディングです。動的というのは荷重を衝撃的に与えるということです。一方、コーン貫入試験は一定速度でゆっくりと圧入していくということで、静的サウンディングといわれています。静的サウンディングの方が動的サウンディングよりも力学特性との関連性が明確です。

今回お話したいのはここに示した４つのことです。調査・設計・施工管理に用いるための４つのポイントです。

１つ目は、サウンディングの意味を頭に入れて、最低限の室内土質試験を実施しましょうということです。２つ目は、CPT の測定値に何か定数を掛け算してφにしたり、非排水せん断強度にしたりするのですが、その算定係数をどう設定するかということです。コーン貫入試験から得られる貫入抵抗を N 値に換算することが一般に行われています。これは現在の設計体系が N 値に基づくものであるからですが、せっかく標準貫入試験よりも精度の高い CPT を実施しているにもかかわらず、N 値に換算して土質定数を算定することは本末転倒です。より高度な設計を行うためには、N 値に頼らない設計体系に変更しないといけないのです。ではなぜ変更できないのでしょうか。これは個人的な考えですが、ただただ勇気、決断だけの問題だと思ってい

ます。発注者の決断です。特に港湾関係や低平地の場合には何も問題はないと思います。受注者の情熱、説得力だと思います。先ほどもいいましたように、「どこでも試験できる」ということを優先してしまうと、途中の層に礫が出てきてコーン貫入試験が出来なかったということを恐れて実施しません。実際は、そういう時にはボーリングで礫層を抜いたり、ラムサウンディングを併用して動的貫入により叩いて抜いて、CPT に差し替えて引き続き実施することも可能です。しかし、有明海沿岸の低平地ではそのような心配は殆どありません。また、CPT の普及のためには港湾航空技術研究所や沿岸センターなど CPT を積極的に活用するためのマニュアルを作成して頂くのが一番良いのですが・・・、地元の大学の先生等が工法委員会などで「CPT を積極的に活用しよう」といわれればそれで出来ます。N 値よりも良い精度で出きますし、CPT は連続的なデータを広範囲で測定できますから、地域ごとの地盤特性をちゃんと把握することができます。

3 つ目は、コーン貫入試験からは詳細なデータが得られます。だから N 値では分からないデータが出てくるのですが、「逆に細かすぎてどう設計すればいいか」という疑問にちゃんと説明がなされていないことです。やはりある程度簡単なマニュアル化をしないといけないと思います。深度方向に 1 センチ毎 2 センチ毎のあまりに詳細なデータが得られるので、ではどうすれば良いかということです。工学的な簡略化の問題です。

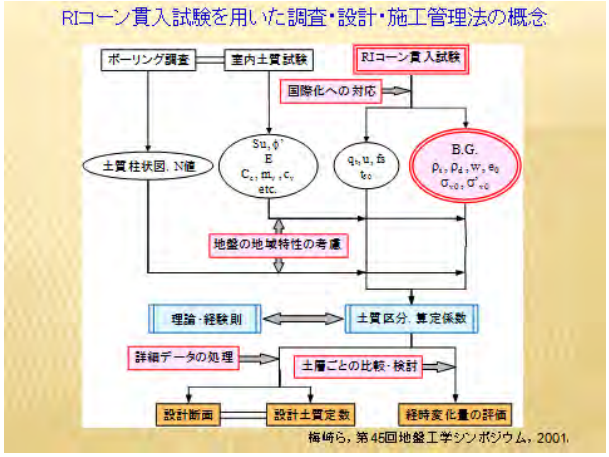


最後に、地盤特性の経時変化です。例えば、地盤改良や盛土の築造の前後での地盤の強度を比較する時には、その前後でどの層がどの層に相当するかを考えて比較しましょうという、しごく当たり前のことです。しかし、実際には、単に同一深度の値を比較している場合が多く見受けられます。

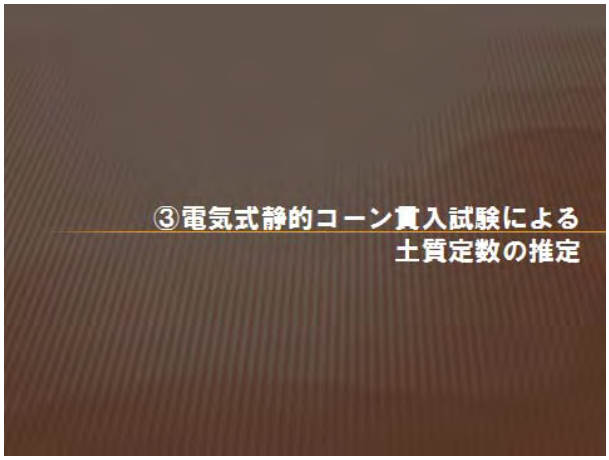
繰り返しになりますが、最初にボーリングを行い、そのデータをちゃんと使いましょうということ。サウンディングは、これまで室内試験を補完したり、予備設計を行うために用いられてきましたが、有明海周辺のような軟弱地盤ではそれなりにちゃんとしたデータ

が得られるのでもっと主体的に使いましょうということ。CPT から得られた値に係数を掛け算して内部摩擦角や非排水せん断強度も算定するのですが、N 値に基づく関係式のようにばらついた平均値を用いることをやめて、現場で得られる地域特性を反映した関係式を直接求めて用いましょうということです。欧米では様々なデータが蓄積されて、そこから様々な土質定数を算定するための係数や関係式が提案されています。それらをそのまま日本で使って良いのでしょうか。やはり、現地で直接求めましょう。有明海で求めた関係式が大阪湾では適用出来ないかもしれませんが、有明海に物を作るのですからそれで良いじゃないですか。それぐらいの割り切りです。CPT からは粘土層内にある薄い中間の砂層など実に細かいデータが得られます。

今日のテーマである RI コーンは、いわゆる三成分コーンに測定項目を付加したものです。RI とはラジオ・アイソトープです。放射性元素から放出される放射線を利用して、地盤内の密度とか含水比とかが測定できます。粘土地盤で一番大事なのは含水比や間隙比です。含水比や間隙比が分かるということは、圧密とか強度増加が評価できるということで、粘土地盤に対しては最も有効な試験です。

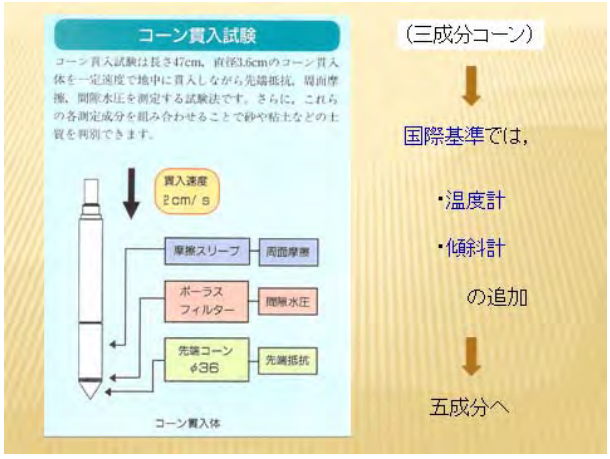


ここまでお話ししたことを図にまとめました。コーン貫入試験のようなサウンディングの一番の利点は、連続的なデータが広範囲に簡単に得られることです。それを利用するというのが一番です。但し、やっていることはサウンディングですから「最低一カ所はボーリングと室内試験を実施しましょう」「地盤の地域特性を考慮した関係式を用いましょう」同様のことを、亡くなられた東亜建設工業の半澤さんがアクセス法としてまとめられています。

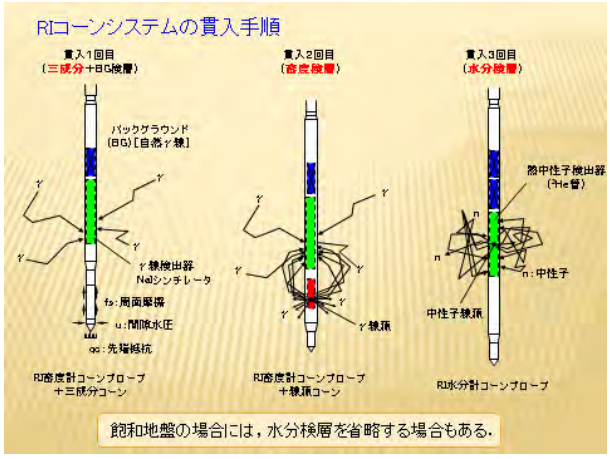


この方法は、コーン貫入試験と一面せん断試験を併用するものですが、一面せん断試験に限らずその他の試験でも良いのです。一軸圧縮試験でも圧密試験でも良いです。

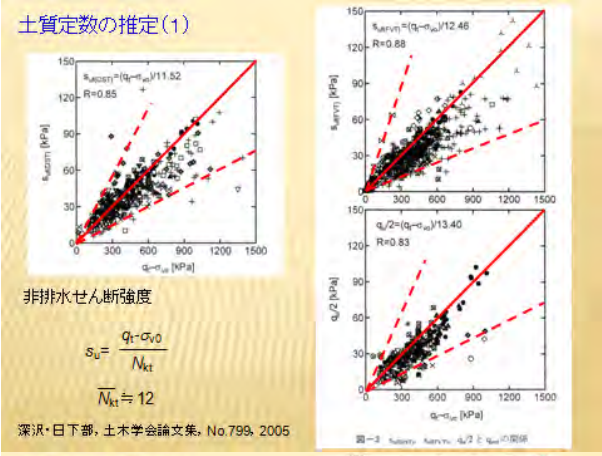
さて、ここから具体的な事例に基づいたお話をしていきます。話が色々と変わりますので、もし良かったら途中で質問等して頂いても結構です。

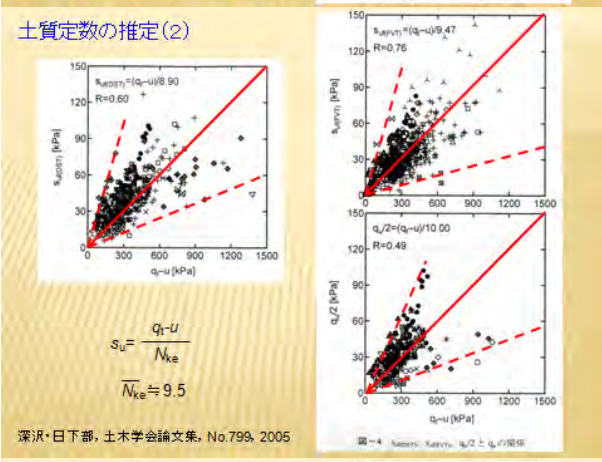


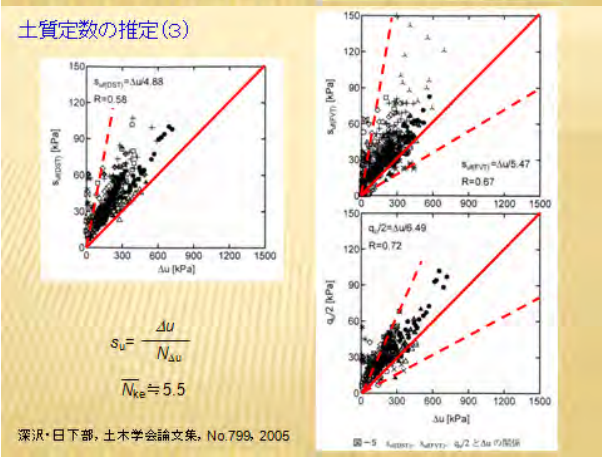
さて、コーン貫入試験ですけれども、一般的には直径 3.6 センチ、いわゆる 10 平方センチメートルの断面です。それを大体 1 秒間に 2 センチ位ずつゆっくり押し込んでいきます。いわゆる三成分コーンというのは、まず、先端抵抗を測定します。そして、ここに水圧計があって間隙水圧も測定できます。ただし、この間隙水圧は、コーンを押し込んでいく時に破壊される地盤を内の水圧を測定しています。さらにもう 1 つ、ロッドの周面の摩擦が測定できます。「周面摩擦・間隙水圧・先端抵抗」というのが「三成分」コーンです。ただし、最近、国際基準では、詳細設計に用いるためには傾斜計を追加することになりました。私見ですが、傾斜計が必要なのは、海外のオペレーターの技能にも依るのでは無いかとも思われますが、傾いても貫入していくと、先端抵抗や周面摩擦の精度が低下します。国際基準としては、傾斜計を備えた四成分コーンは、詳細設計に用いることもできます。実は、傾斜計が付いている日本のコーン貫入試験機は少ないです。というよりもコーン貫入試験機自体がどんどん減っています。実際に持たれていたコンサルタントでも廃棄されていて使われていないような現状なのです。作製する国内のメーカーも減って、外国のメーカーが入ってきています。傾斜計はあるに越した事はないのですが、後でデータでお見せしますが大きな支障はないように思います。日本では現状でちゃんとやれていると思います。しかし、最近、京都大学の三村先生たちの知見では、温度計の重要性が指摘されています。三成分コーンでは、荷重計や水圧計は、いずれもひずみゲージにより金属の微少なひずみを電気的に計測しているわけです。そのため、温度変化によってひずみ量が変化するのです。例えば、夏の炎天下ですと金属が 40 度以上にも過熱され、真冬にはマイナスの値になる訳です。そうすると、測定前のゼロ点がシフトするわけです。測定精度を保つためには温度補償がすごく重要であることが分かりました。ただし、厳密には、五成分、四成分が必要になりますが、これもある程度割り切って考えれば、少なくとも炎天下にさらさないとか。例えば、試験前には水中に浸けておくとかの作業をマニュアル化するだけでも結構だと思います。要は、測定値には温度変化が関係するということを知っておくことが重要です。この度新しく改訂される「地盤調査法」では、傾斜計や温度計の話が入ると思われますが、個人的にはそこまでやらなくても注意して使えばいいと思っています。



さて、さらに RI コーンなのですが先ほどの三成分に加えてロッド内に RI（ラジオアイソープ）の放射線源が封入されています。密度計にはセシウム 135 でしたか、今、福島第一原発で問題になっている放射性セシウムです。ただし、その線量は十分安全なように低く押さえられています。放射性セシウムからはガンマ線が出てきます。ガンマ線は土粒子や水などに当たると弱められます。その度合いは密度の大きいものほど大きくなります。その弱められたガンマ線の値をロッド内にあるカウンターによって計測します。ロッド内の線源とカウンターは鉛で遮蔽されていて、地盤内を回り込んできたガンマ線の値をカウントすることにより、地盤の密度が測定できます。この値は絶対値であり地盤ごとに校正値を求める必要はありません。サウンディングのところでお話しした算定係数は要らないのです。ただし、自然界にはガンマ線を出す物質があります。岩石の鉱物もその１つです。放射性ウランとかでなくても地盤を構成する土粒子からも微量なガンマ線が放出されています。したがって、それをまず測っておく必要があります。最初にロッド内に線源がなくてカウンターだけのコーンを貫入してバックグラウンド値を計測します。そして次に、同じ場所に線源の入った密度計を貫入してガンマ線の値を計測しバックグラウンド値を差し引くことにより地盤内の密度が測定されます。もう１つ RI コーンには水分計というものがありまして、地盤内の水分、含水比を測定することができます。水分計では中性子線を利用しています。例えばカルフォルニウムのような中性子を出す放射性物質を線源に用います。この場合には、水素原子そのものの量を測っています。ただし、有明海粘土のように飽和状態の粘土では、飽和度 100%と仮定すれば、密度計だけの計測で含水比も間隙比も算定できます。ただし、締固められた盛土などでは、両方を実施すれば、密度と水分を別々に測定できるので飽和度を算定することも可能です。



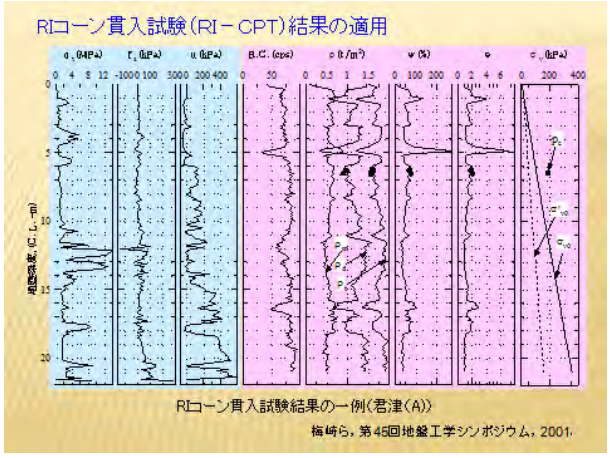




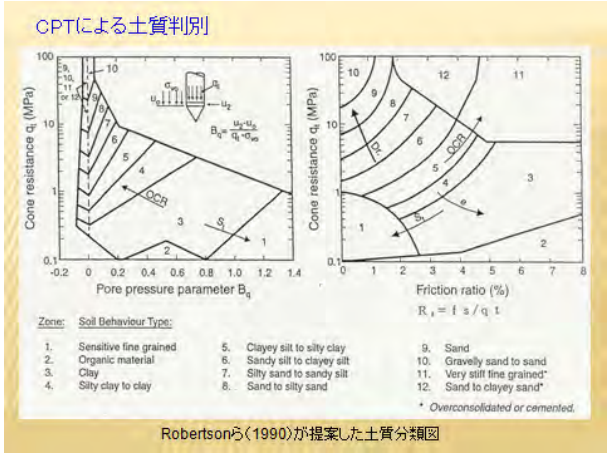
さて、まず、三成分コーン貫入試験の結果です。これは、深沢さんが東亜建設工業にいらっしゃった時に、日本や中東などの多くのデータを整理されたものです。q_tは先端抵抗です。別途実施された一面せん断試験や一軸圧縮試験のデータと直接比較されています。ただし、理論的背景がありまして、コーンを貫入していくと地盤に穴が開くわけですから、この穴の分の土の重さ以上の荷重を加えないとさらに貫入できません。穴が開いたままの状態では地盤がリバウンドしてしまいます。したがって、q_tからその土の重さに相当する土被り圧を引き算した値が本当の貫入抵抗になります。なお、前述したように、N 値と幾つかの土質定数の関係では土被り圧が全く考慮されていません。また、N 値は打撃回数であり、回数から圧力を引き算するというのも合理的ではありません。さて、この図の関係ですが、このようなプロットをするとばらついた正の相関が得られます。概略平均すると、この直線の傾きの逆数である算定係数が 10～13 程度になっています。このことは以前から知られており、「この式を用いる場合には係数を 12 とすれば良いよ」ということなのですが、これを使ってしまうと先ほどの N 値の場合の関係式と同じことをやっていることになります。また、これらのデータには、様々な種類の粘性土のデータが含まれています。やはり高塑性の粘土なのかシルトっぽい粘土なのか海成粘土なのか陸成粘土なのかという土質の種類や地域の違いくらいは区別して評価すべきだと考えますよね。そうすることで、データのばらつきは小さくなると思いますし、例えば「有明粘土のデータはこの線です」というのが得られるはずです。深沢さんに実務で係数を 12 として用いるのですかとお聞きしたら、「いや、使わないでしょう」といわれました。できるだけ良い設

計をしたいですよね。さらに、重要なことは、コーン貫入試験を実施しただけでは、土被り圧σv0が得られないということです。一般には、ボーリングをして土を採取し、その密度を深さ方向に積算して土被り圧を算定する必要があります。結局、コーン貫入試験だけでは非排水せん断強度は求められないのです。しかし、RI コーン貫入試験では、貫入抵抗とともに密度も測定されます。この式がそのまま使えるのは実は RI コーン貫入試験だけなのです。

土被り圧を必要としない関係式として次の２つの式があります。いずれも似たようなものです。特に理論的な背景がある訳ではないので、係数の値が変わるくらいです。極端な事をいうと、どんなデータでも何らか関係が出てくるのです。重要なことはデータの再現性です。理論的背景が明確でなくても、何回やっても同程度のデータ得られるのであれば、経験式として実務に用いても良いと考えます。



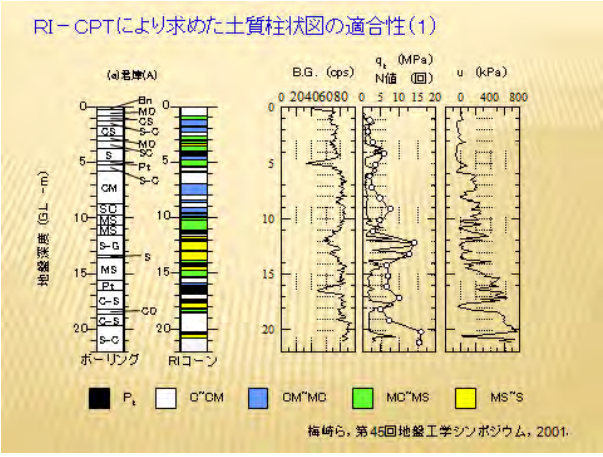
さて、これが RI コーン貫入試験の生データです。これは、私が旧道路公団との共同研究として実施したものです。千葉県君津市の高速道路の建設予定地で実施しました。この青色の部分がいわゆる三成分コーンのデータで、普通はこれだけです。さらに RI コーンでは、三成分のデータに加えて、まず、バックグラウンド値が得られます。このように地盤内でも放射線量が測定されます。値の違いは土質の違いの目安でもあります。その値を引き算して、これらの密度分布が得られます。これが湿潤密度ρ_t、これが乾燥密度ρ_dです。これらから飽和度 100%を仮定して、含水比や間隙比もこのように得られます。さらに、湿潤密度ρ_t、深度方向に積算して土被り圧の分布も得られます。このとき必ず地下水位のデータは入れて下さい。地下水位のデータは非常に大事なデータです。静水圧状態であれば、それを引き算することで有効土被り圧の分布も得られます。圧密試験から得られる圧密降伏応力をプロットすることで、正規圧密状態か過圧密状態かを評価することができます。



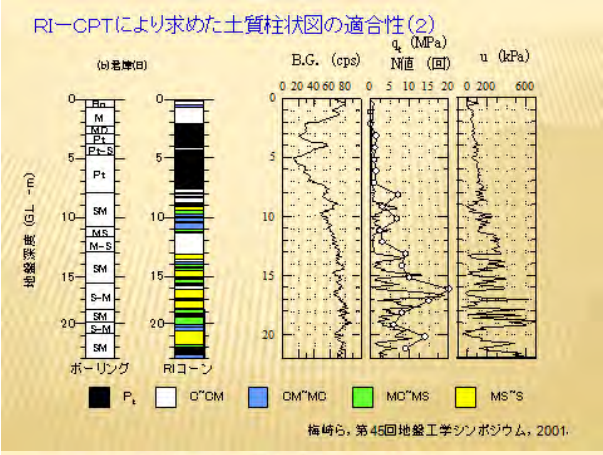
さて、三成分コーンを是非使って頂きた

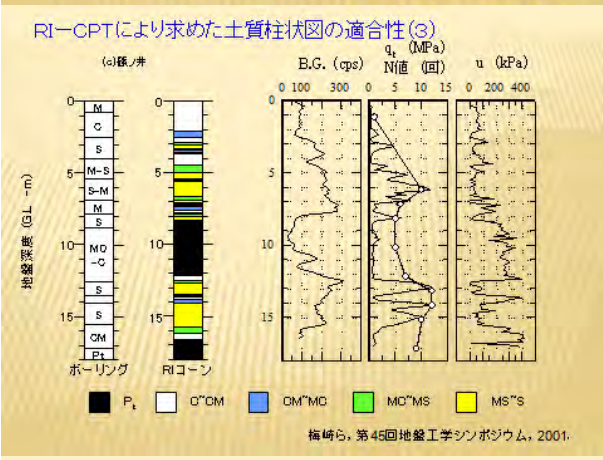
い理由に、詳細な土質分類ができるということがあります。標準貫入試験が数多く実施される理由に、ボーリングによる地盤の柱状図が得られることと、サンプラー内に採取された土を実際に確認できるという利点が挙げられます。実は、コーン貫入試験のデータからも土質判別した柱状図を描くことができます。これらの図はロバートソンが提唱しているもので、図に示されたプロットの領域から土質判別ができます。貫入抵抗と間隙水圧もしくは周面摩擦の値から推定します。すごく簡単にいいますと、砂は硬くて水圧が生じないが、粘土は柔らかくって大きな間隙水圧が生じるという性質を利用しています。すなわち、貫入抵抗の値が大きいのは砂礫層で、砂礫層はコーンの貫入時に地盤を破壊しても排水せん断なのでほとんど水圧が生じません。一方、粘性土層は貫入抵抗の値が小さく、貫入時に非排水せん断されるので大きな水圧が生じます。 右の図は、周面摩擦を用いたものです。砂礫では周面摩擦が非常に大きく、粘性土では小さくなります。日本では間隙水圧を用いた左の図が多く用いられます。周面摩擦の値があまり信用されないためです。この理由は、コーンプローブ内に設置されている荷重計の機構の問題やその隙間に砂など噛み込まれる問題、プローブ表面の粗度の問題が挙げられます。砂質土地盤への貫入時にはプローブが砂によってピカピカに削られることが生じます。複数の業者が参加した統一試験おいて、先端抵抗と間隙水圧の値は比較的一致しましたが、周面摩擦の値には大きな差が見られました。しかし、個人的には、業者ごとの試験結果にそれぞれ再現性があるならば、土質試験と整合性を取ることでもっと積極的に使っていいと考えています。これらの図は、多くの種類の土のデータをプロットして、実測値から土質ごとの領域を区分したとものです。例えば 3 番の領域にあるものは粘土で、9 番の領域あるものは砂に分類されます。シルト質粘土や砂混じりシルトなどかなり細かい分類がなされています。ただし、これらは欧米のデータなので、日本の地盤においても適用できるかどうかを検証する必要があります。

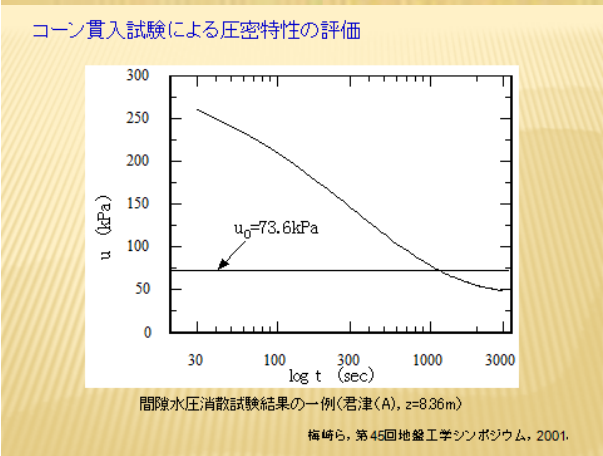
これが君津市での実際のデータです。

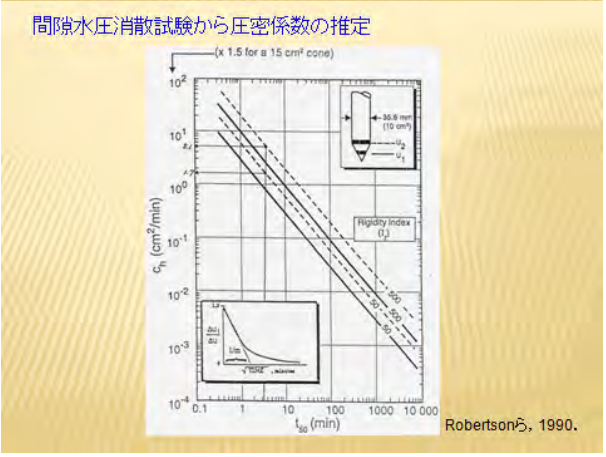


さて、先に述べたロバートソンの土質分類を少し修正して用い、土質柱状図を作成したものがこの色分けをしたものです。これがピート、泥炭です。これが粘土です、これがシルトです、これが粘土混じりのシルトです。粘土、シルト、砂、サンドです。その左の図がボーリングから得られた実際の土質柱状図です。少し離れた地点で以前に実施されたも









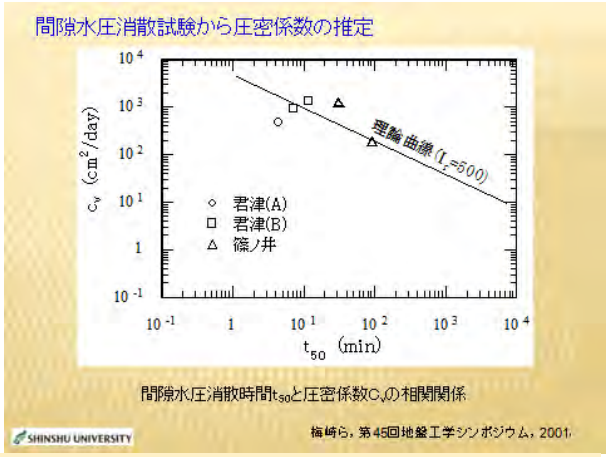
のですが、良く一致しています。特にこの部分の泥炭層は良く表現されています。またここで、重要な点は土層の間に挟まれた薄い砂層(サンドシーム)が表現されている点です。粘土地盤の圧密計算において、沈下量は実測値と合っていても圧密速度が合わないということがあります。これにはサンドシームの評価が適切でない場合が考えられます。ボーリングデータからは判別し難いサンドシームも三成分コーンからは判別可能です。

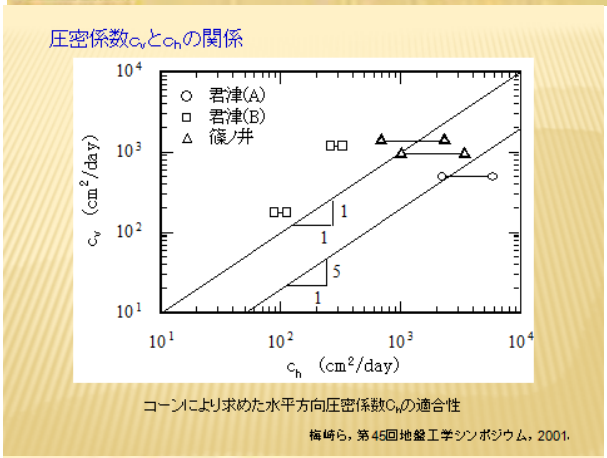
是非、RI コーンでなくてもいいですから、三成分コーンを実施して土質分類をまで整理してみてください。君津市（B)、長野市篠ノ井の結果も良く一致しています。また、貫入抵抗のデータを見て下さい。N 値と理論的な整合性はありませんが、深度分布の形状概ね一致しています。貫入抵抗と N 値には何らかの関係がありそうです。そのため、貫入抵抗から直接的に換算 N 値を求めて、この換算 N 値によって設計することが行われています。しかし、ここではこのような手法はあまり推奨しません。前述したように N 値には多くの問題点を含んでおり、本来、N 値よりも精度の高い三成分コーンの測定値を N 値に換算することは安易な手法のように思います。

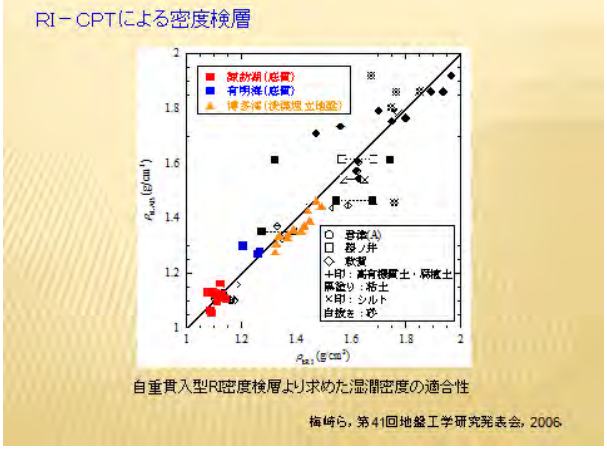
さて、時間がないので少し急ぎますが、三成分コーン貫入試験で圧密定数を算定することも行われています。コーン貫入には水圧計が付いています。貫入時に地盤が破壊する時の間隙水圧が測定される説明しました。この

時貫入を一時停止すると、発生した間隙水圧が消散していきます。そうすると、あたかも圧密が進行して終了したような間隙水圧の消散曲線が得られます。しかし、どこに消散しているのかは実は分かりません。ただし、圧密係数 c_v が小さな粘土層では間隙水圧が消散しにくく、c_v が大きなシルト層では消散が速いので、この曲線における圧密度 50%の時間 t_{50} を読み取ることで圧密係数を算定することが提案されています。

この図の t_{50} から圧密係数が求められます。ただし、c_v ではなくて、水が横方向に抜けるものとして、水平方向の圧密係数 c_h です。





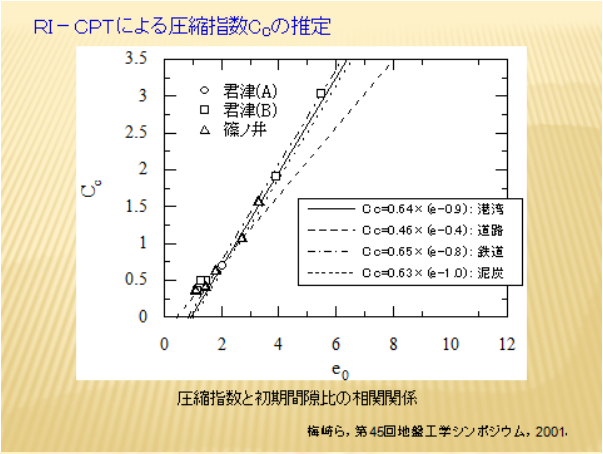


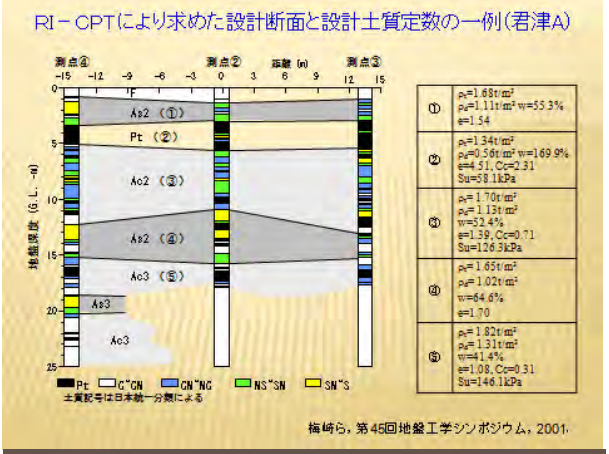
次の図のように、t_{50} から c_v を求める図もあります。図中には、別途実施された圧密試験から求めた c_v をコーン貫入時の間隙水圧の消散試験から求めた t_{50} に対してプロットしたものも示しています。データは理論曲線の近傍にあり、圧密試験を実施しなくても c_v の概略値を推定できそうです。

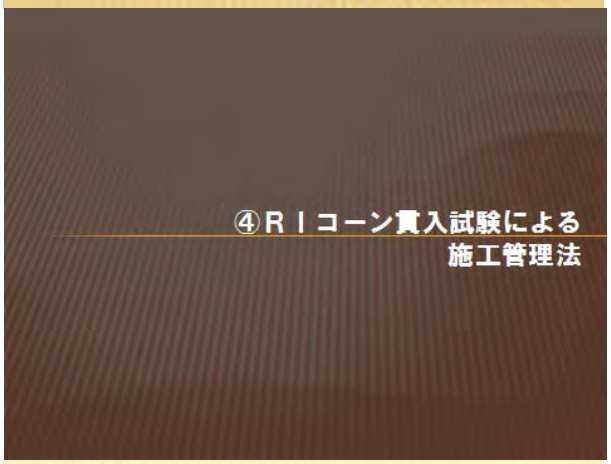
この図は、実測の c_v と推定した c_h とを直接比較したものです。一般に、c_h の方が c_v よりも 5 倍～10 倍程度大きいといわれています。要するに、地盤内では水平方向の方が鉛直方向よりも水が抜けやすいということです。この図からも推定した c_h の適合性は比較的良いように思われます。

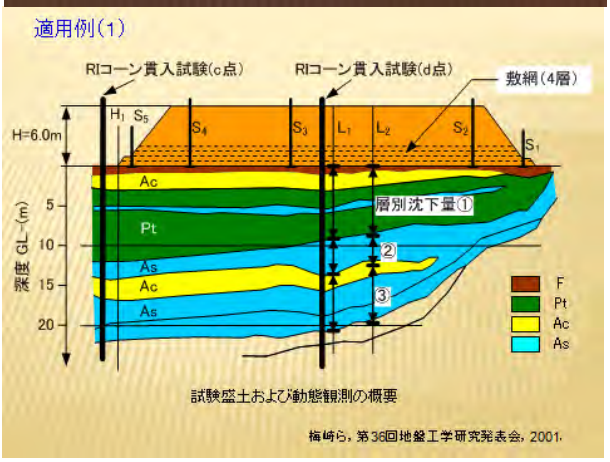
それでは、RI コーンより求めた湿潤密度の適合性を示しましょう。君津、篠ノ井、敦賀の沖積粘土地盤と諏訪湖、有明海の底質および博多湾での埋立中の地盤です。少しばらつきも見られますが、概ね実測値との適合性は良いようです。底質や埋立中の地盤では RI コーンのデータよりもサンプリングのデータの方が精度が悪い可能性もあります。

湿潤密度が正確に算定できれば、間隙比も





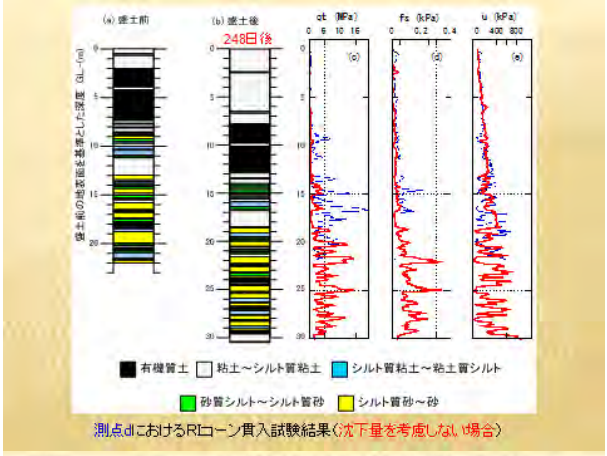




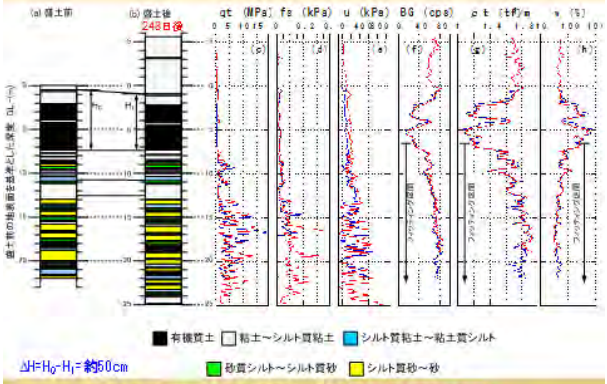
正確に求めることができます。この図は、別途、圧密試験から求めた圧縮指数 Cc と間隙比 e の関係を示したものです。既に佐賀大学の先生たちが有明粘土における両者の関係を提案されており、それらの関係式に RI コーンより求めた間隙比を代入するだけで、圧縮指数を算定することが可能です。これで圧密沈下の計算はできます。ただし、地盤の地域特性もありますから、RI コーン貫入試験と同時に最低限の圧密試験を実施する方が良いと思います。

さて、詳細な連続データの処理についてです。実際の実務では全部のデータを使うかというと使わないですね。工学的判断に基づく設計断面を作成する必要があります。この図は私が適当に作成したものですが、沖積砂層とか泥炭、沖積粘土層とかに大別されています。重要なことはこれらのデータをどのように平均するかということです。ここが技術者としての腕の見せ所です。単純に平均するのではなくて、それぞれの層ごとの詳細な土質分類を考慮しながら算定する必要があるでしょう。ある意味で、設計定数はいじれます。いじれるという言い方は良くないですが、設計思想に応じた主観的な設定をすべきではないでしょうか。また、簡略した地層区分の中にもこのようなサンドシームが存在するというような情報を示すことが重要だと思います。

さて、次は RI コーンのデータの新しい使い方の話です。土質分類が出来ると地盤中の

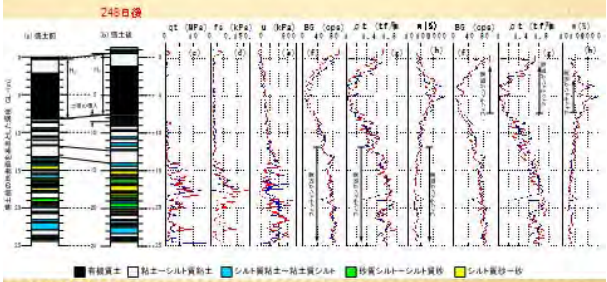


測点dにおけるRIコーン貫入試験結果(沈下量を考慮しない場合)



測点dにおけるRIコーン貫入試験結果(沈下量を考慮した場合)

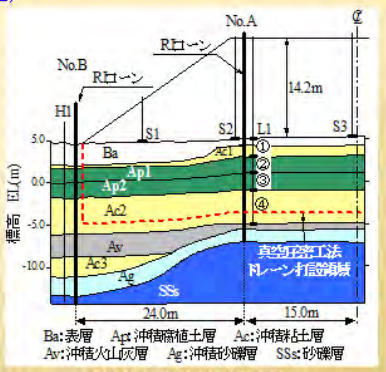
梅崎ら，第36回地盤工学研究発表会，2001.



測点cにおけるRIコーン貫入試験結果(沈下量を考慮した場合)

梅崎ら，第36回地盤工学研究発表会，2001.

適用例(2)



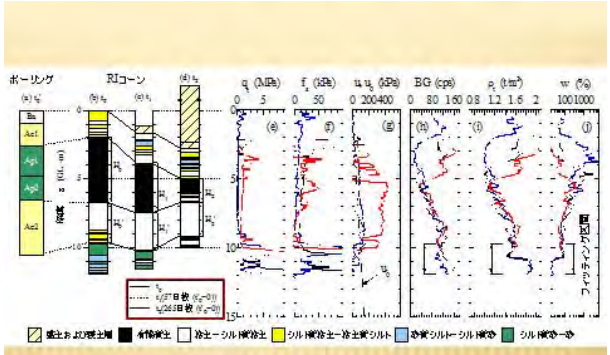
原位置および動態観測の概要

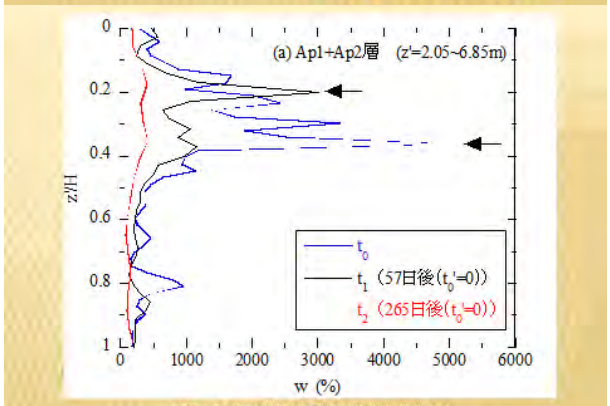
梅崎ら，第37回地盤工学研究発表会，2002.

土層が特定できます。土層が特定できるということは、それぞれの層別沈下が分かるということなのです。これは旧道路公団での敷網を用いた盛土工の現場です。盛土の中央と法尻で RI コーン貫入試験を実施しています。盛土前と盛土施工約 250 日後のデータにこれだけの差が生じています。しかし、これはその時の地表面からの深度を合わせて比較したものであり、実際は大きな沈下が生じているのです。実際には、この部分の土層はこの部分に対応します。この部分が同じ土層ですから、盛土や地盤改良の前後で地表面からの深度を合わせて両者を比較することはあまり意味がありません。例え、前後でのボーリングデータがなくても、三成分コーンによる土質柱状図得られていれば、キーとなる層を見つけることができます。

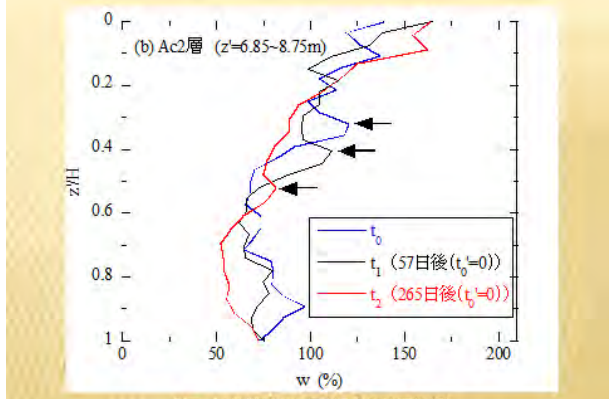
この図は、盛土前後の沈下量を考慮して両者を比較したものです。この時、RI コーンから得られたガンマ線のバックグラウンド値、湿潤密度や含水比の値を参考にしています。すなわち、これらの値が盛土の前後で一致する部分をフィッティングさせるように盛土後のデータを深度方向に移動さています。盛土の影響のない深い部分の層の深度を一致させました。このことにより盛土が約 50cm 沈下していることが評価できます。このことで土層ごとの沈下量や強度増加も比較できます。

この図は、法尻付近のデータを同様に整理したものです。この工事では法尻で地盤の隆

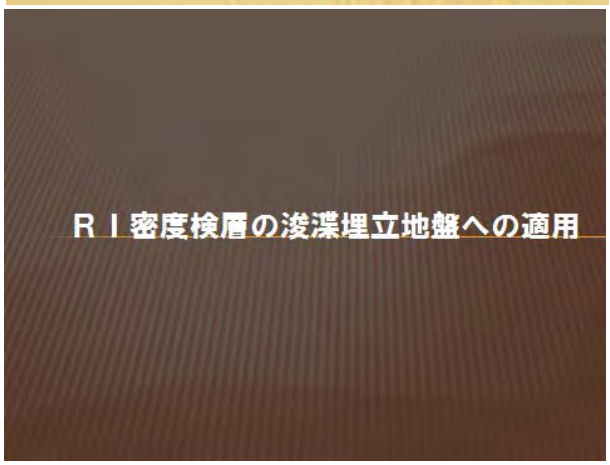




RIコーンより得られた層別の含水比変化(1)
梅崎ら，第37回地盤工学研究発表会，2002



RIコーンより得られた層別の含水比変化(2)
梅崎ら，第37回地盤工学研究発表会，2002



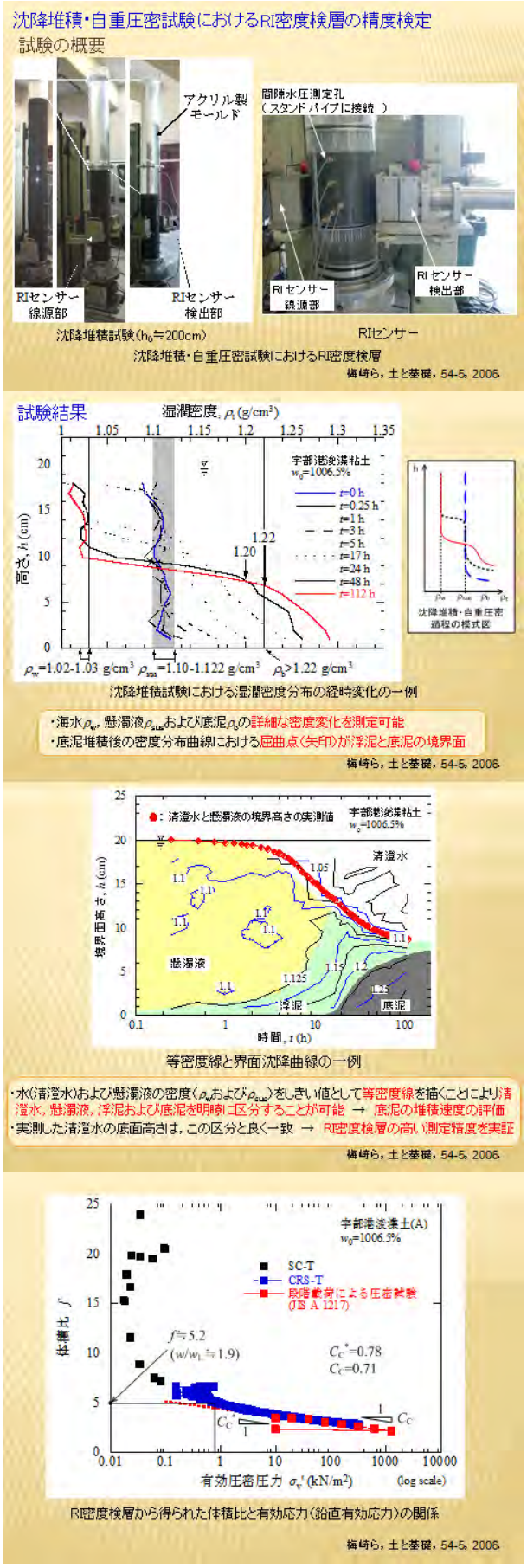
起が生じており、盛土前後の土質柱状図から約 40cm の隆起量が算定されています。このようなデータのフィッテイングを、三成分コーンのデータを用いて、精度良く行うことは困難です。

もう１つ、真空圧密の話をしましょう。実は、真空圧密が道路公団で使われるようになったきっかけの研究をさせて頂きました。ここでも、盛土の事例と同様に、地盤改良の前後データをフィッティングさせると、真空圧密によって層別の沈下量がどれくらい生じたかを評価することができます。

また、特定の粘土層の含水比がどれだけ低下し､圧密がどれくらい進行しているか、を定量的に評価することも可能です。次の２つの図は、それぞれ、泥炭層と粘土層に着目して整理したものです。縦軸は深度を層厚で正規化したものです。このように、経過時間ごとの含水比の低下と圧密進行の程度が詳細に分かります。

時間が少なくなってきましたが、埋立て地盤の話をします。ほとんど水のような状態の密度が RI により測定可能であるかを室内試験により検討しました。

RI コーンでは､線源とカウンターをロッド内に縦に並べて設置してあり、コーンを鉛直に貫入して地盤中の密度を測定しましたが、この図に示す装置では、線源とカウンターをアクリル円筒内の試料を挟み込むように設置し密度を測定するものです。こ



の装置は、通常、コンクリートのテストピースやサンプリングチューブ内の土質試料をチューブから抜出すことなく密度を測定するために用いられるものです。泥水状の浚渫土をアクリル円筒内に投入し、沈降堆積と自重圧密が生じる時の密度分布を測定しました。初期密度が 1.1g/cm³ 程度の泥水が徐々に沈降し、上方から清澄水へと移行し、海水の密度 1.03g/cm³ 程度へと変化していきます。そして、土粒子の体積と自重圧密により底部から密度増加が生じています。このような微小な密度の変化も RI により測定できることが分かりました。

この図は、等密度線と界面沈降曲線を描いたものです。清澄水、懸濁液、堆積土の密度をしきい値として色分けすることにより、浮泥や底泥の状態を区分することが可能です。

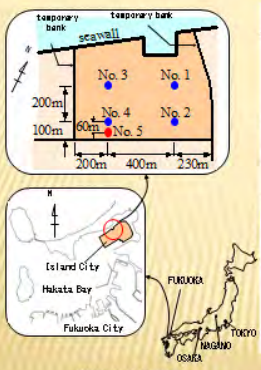
さらに、浚渫埋立地盤では自重圧密が生じます。湿潤密度を深度方向に積算すると土被り圧が算定され、この値からスタンドパイプにより測定された間隙水圧を差し引くと深度毎の圧密有効応力が算定されます。これら深度毎の有効応力と間隙比の関係をプロットしたのがこの図です。自重圧密過程に引き続き実施した載荷圧密過程の試験において RI により測定した間隙比と有効応力の関係は、別途実施した圧密試験の結果と良く一致しています。なお、縦軸の体積比は f＝1+e の値です。

この写真は博多湾の埋立地で実施した RI コーン貫入試験です。今は宅地になっていま

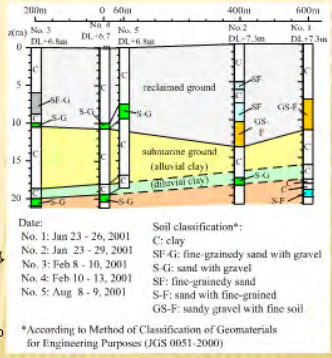
RI密度検層を用いた原位置調査

原位置調査の概要

原位置およびRIコーン貫入試験の状況(博多湾)



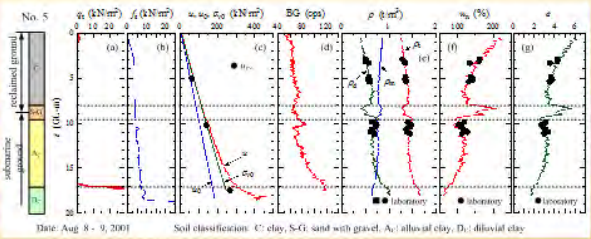
調査地点の概要



調査地点の地盤断面図

梅崎ら, 国際地盤工学会第12回アジア地域会議, 2003

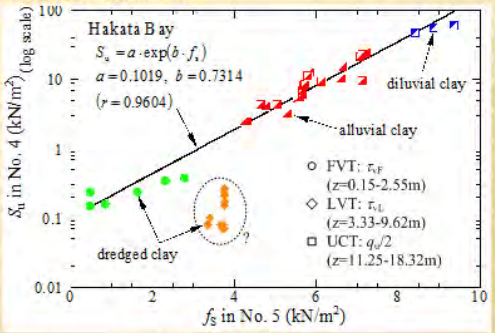
調査結果



RIコーン貫入試験結果(No.5)

梅崎ら, 国際地盤工学会第12回アジア地域会議, 2003

非排水せん断強度の予測



非排水せん断強度と周面摩擦の関係

梅崎ら, 国際地盤工学会第12回アジア地域会議, 2003

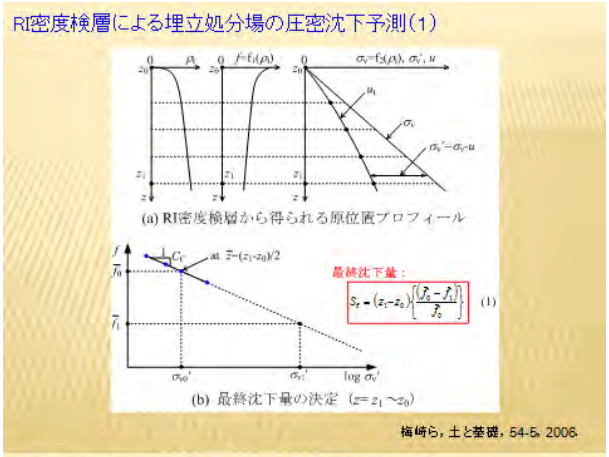
すが、当時は埋立直後で、投げた小石がチャポンと沈むような状況でした。フロートの上のボーリングマシーンに RI コーンをセットしましたが、自重貫入するコーンをボーリングマシーンで掴みながら一定速度で貫入させました。

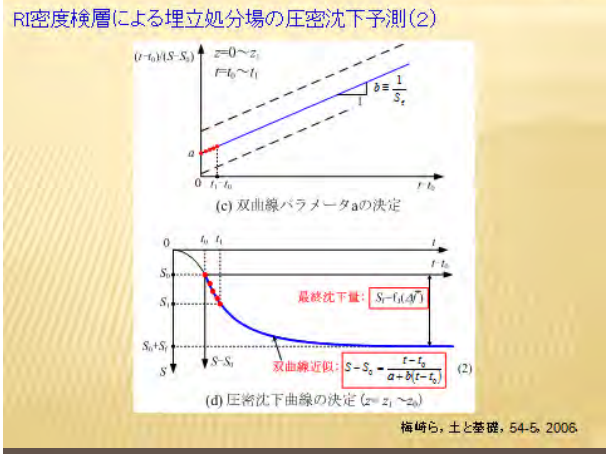
この図は調査位置と別途実施されたボーリング柱状図です。ここまでが埋立地盤で、ここからが海底地盤と推測されます。

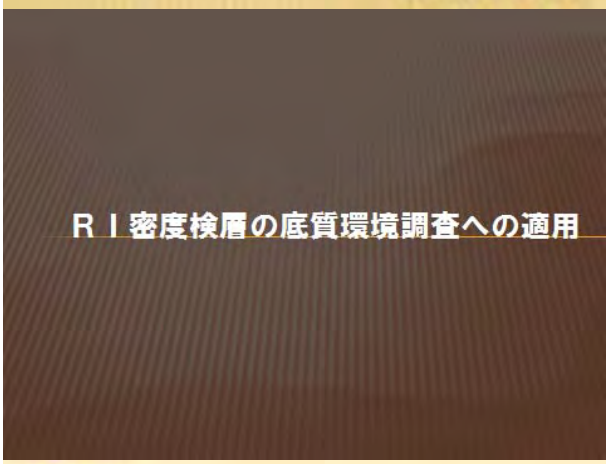
調査結果の一覧を示します。埋立地盤の先端抵抗はほぼゼロです。一方、周面摩擦は深度とともに増加しています。密度や含水比や間隙比の深度分布もこのように得られています。それらの値は、ボーリングにより採取された試料から求めた実測値と良く一致しています。

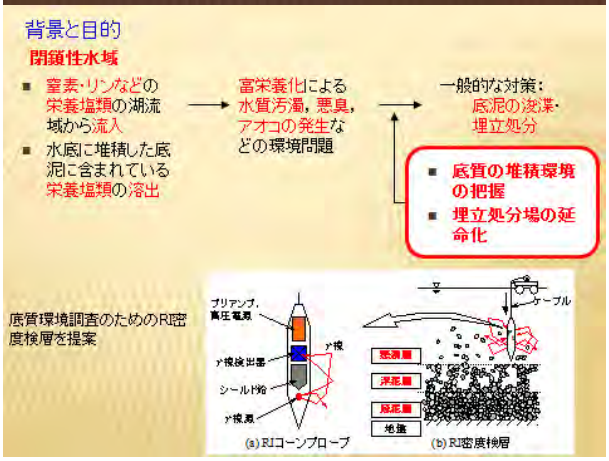
この図は、周面摩擦の値と別途実施された現場ベーンせん断試験や一軸圧縮試験より求めた非排水せん断強度の値とを比較したものです。両者の間の相関係数は 0.96 と非常に高く、有用な関係式です。粘土と鋼材の周面摩擦においては、鋼材表面がピカピカに磨かれている場合を除いて、鋼材表面でのすべりは生じず、粘土内部でせん断破壊が生じます。粘土地盤においては周面摩擦のデータの活用が期待されます。しかし、この関係式はこの現場でしか用いることはできないでしょう。

この図は、RI 密度検層から埋立地の自重圧密による沈下量を予測する手法を示したものです。前述したように、RI コーンにより間隙









比や土被り圧は分かります。地盤内の間隙水圧を別途測定することができれば、f-logp 曲線に基づいて最終沈下量を計算することもできます。

ただし、これだけでは圧密沈下の経時変化がわかりません。そこで、現地の沈下曲線が双曲線近似できるものと仮定すれば、最終沈下量より１つのパラメータ b は既知であるので、もう一つのパラメータ a は傾き b の直線と実測データをフィッテイングさせることで決定できます。

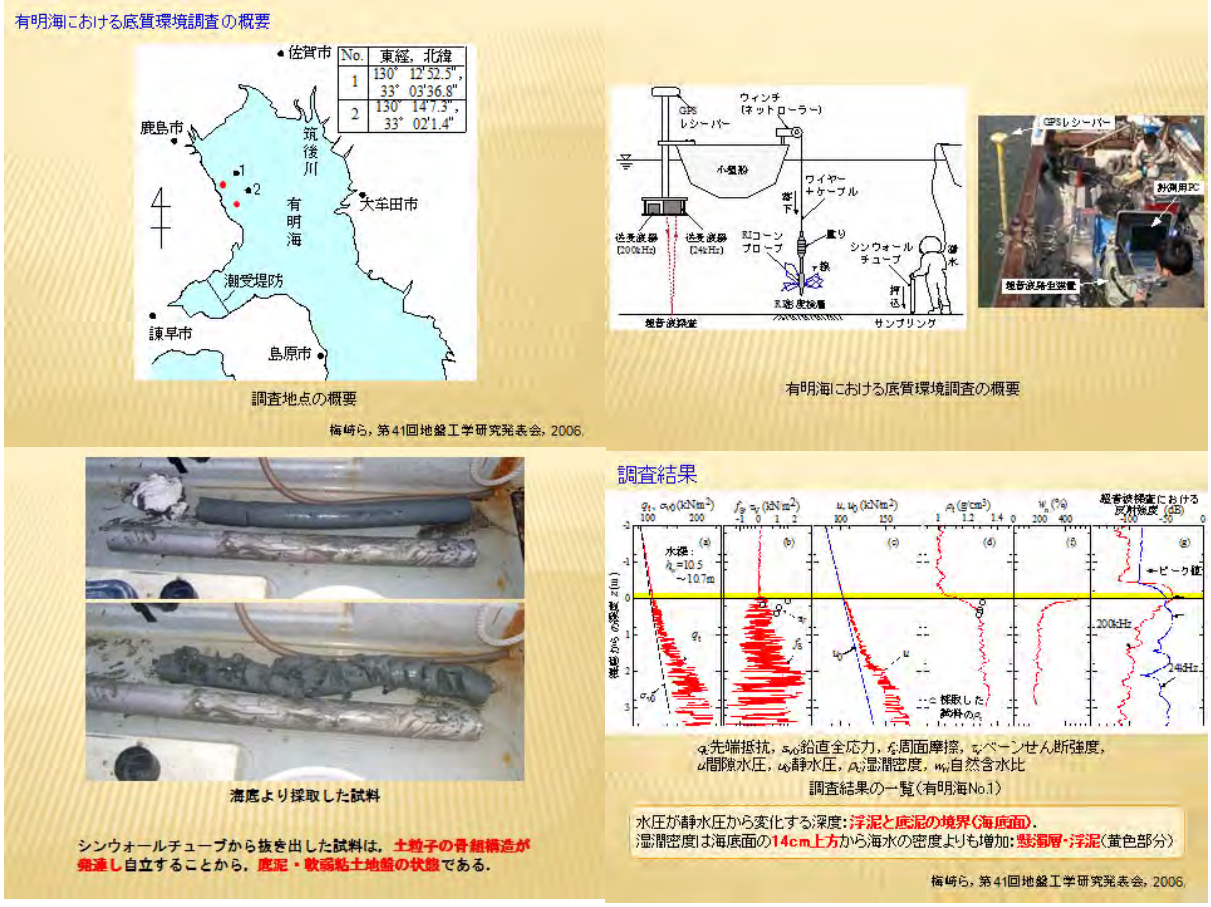
さて最後に、有明海において船上から自重貫入型の RI 密度検層を実施した結果を示します。懸濁層、浮泥、底泥の堆積状況を明らかにするものです。これは佐賀大学の日野先生と一緒にやりました。

測定地点は図示した鹿島沖の２地点です。

同時に、超音波発信器による深浅測量も合わせて実施し、潜水士さんに潜ってもらって海底の試料も採取しました。

採取された粘土は写真のように比較的しっかりした状態でした。

水中での先端抵抗は静水圧と同じ値です。海底に貫入後はそれよりも大きな値になりますが、船の揺れに対応して、測定値が激しく揺動しています。周面摩擦の値は水中ではゼロ海底に貫入後は値が激しく揺動しています。間隙水圧は、水中では静水圧の値を示し、貫入後は比較的大きな値が計測されています。

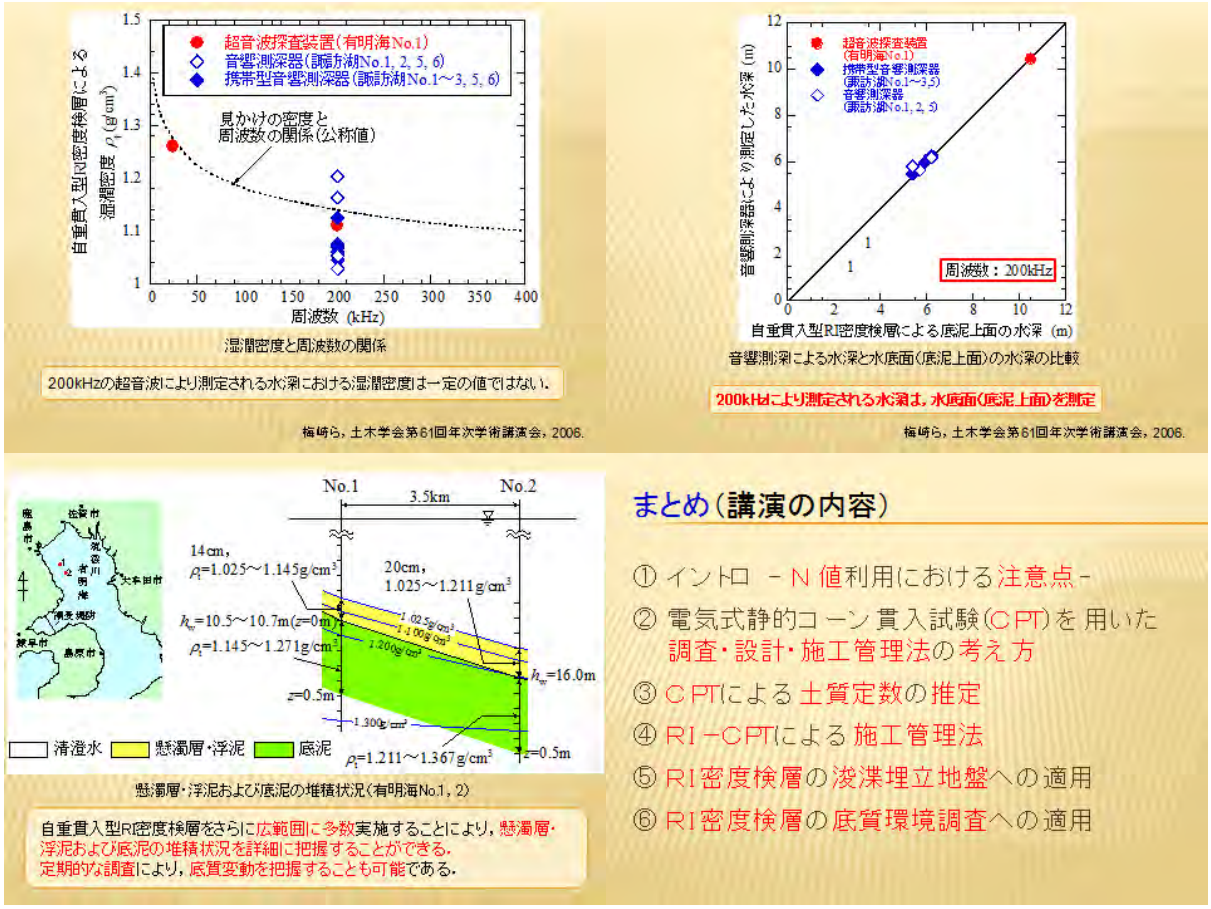


ここで、間隙水圧が静水圧よりも大きな値を示した地点より深い部分が底質と定義しました。土粒子の骨格が形成している部分であると推測されます。湿潤密度の値は、水中では湖水の密度を示しますが、底質の上面と定義した地点よりも 14cm 上方から急激に増加しその後緩やかな増加を示します。底質の上面の黄色の帯で図示した部分は浮泥と推定されます。有明海でもこの浮泥部分の変動が生態系に大きく影響していると考えています。

この図の点線は、超音波発信器における超音波の周波数と密度の関係を示した公称値です。超音波はその周波数に固有の密度で反射することを表しています。しかし、超音波発信器により測定された深度における RI 密度検層により得られた密度の値は大きく異なり、実際には密度と周波数の間には固有の関係はありません。

次の図は、200kHz の周波数における水深と RI コーンの水圧変化から算定した水底面（底泥の上面）の深度を比較したものです。両者の間には固有の関係がありそうです。たぶん、密度ではなく硬さに反応しているものと推測されます。

今回は 2 地点での計測でしたが、密度検層を広範囲に実施すれば、図に示すような浮泥層や底泥の堆積状況を詳細に把握することができ、定期的な調査によりそれらの変動を捉えることができると考えます。



丁度時間になりました。今日、講演しました内容はここに示したとおりです。どうもご静聴有り難うございました。

【司会者】

梅崎先生どうも有難うございました。会場の方から何か質問がある方、宜しければ挙手をお願いします。

【 質問者 】

CPT による間隙水圧から、圧密関係の諸係数が出るという事を教えて頂き有難うございました。それで、ちょっとお粗末な質問かも知れませんけれども、CPTU から求められる間隙水圧から含水比とか湿潤密度の値が推定出来るかどうか、もしくはその試みが行われているか教えて頂けませんでしょうか。

【 発表者：信州大学 梅崎健夫准教授 】

私自身はやっていません。メカニズム的にいいますと、測定される間隙水圧は、先程もいい

ましたように、貫入時に地盤が破壊された時に生じている水圧なのです。ということは、例えば、三軸圧縮試験でせん断している時の水圧のようなものです。したがって、その値と含水比や密度と直接関係があるということはないと思います。但し、N 値でも説明しましたように、様々なデータをどんどん蓄積されれば良いと思っています。プロットしてみて、良い相関と再現性があれば積極的に使われれば良いのではないでしょうか。但し、例えば蓮池と川副のように場所が変われば適用できない可能性が高いと思います。コーン貫入をやられているのであれば、土質分類も合わせてやられるのが一番良いかと思います。

【 質問者 】

試みられた論文とか、先生方いらっしゃいますか。

【 発表者：信州大学 梅崎健夫准教授 】

もしかすると、佐賀大学の農学部の甲本先生がやられているかもしれません。以前から様々なデータの相関を取られていたみたいです。直接、論文の中で間隙水圧と含水比や密度の関係を考察されたものを見たことはないです。議論的背景がないからだと思います。

【 司会者 】

他どなたかございませんか。

【 質問者：佐賀大学　日野 】

佐賀大学の日野です。今日は貴重なご講演を頂きまして誠に有難うございました。先生が、ご講演のスライドの 9 番目の時におっしゃられたと思うのですけれども、4 つの基本的な考え方を私たちにお示し頂きまして、コーン貫入試験を実施するかどうかは、「これから先はまさに我々の勇気の問題だ」ということに非常に共感する所でございまして、私自身も今地盤調査絡みでこの有明海沿岸低平地域の地盤調査に関わらせて頂いていますけれども、非常に勇気付けられた思いが致します。有難うございます。

それで、この勇気も確かにその通りだと思うのですけれども、我々もこの RI コーンは非常に優れた地盤調査だと信じているのですが、それじゃあ実際に使う決断は発注者が行いますから、そうするとあとは発注者を更に勇気付ける何かのバックアップを立てないと、相変わらず普及しないのかなという忸怩たる思いがあるのですけれども、何かそこら辺の対策があれば先

生に教えて頂きたいのですが。

【 発表者：信州大学 梅崎健夫准教授 】

多分精神的なものです。要するに、発注者の方に勇気を持って頂きたいということを、逆に日野先生もそうおっしゃられているのですから、我々いわゆる学者というか研究者が確信を持って発言することだと思っています。それことを、データを示しながら説得をし、論理的な考え方の組立てをちゃんとしてあげる。あとは、それを見て発注者の方が決断されることだと思うのです。そこで１つお見せしたのが、先程の周面摩擦とせん断強度の関係なのです。あれは学会に発表してもあれだけでは多分論文にはなりません。理論的背景がないので。ただし、使い方に依ればかなり有用です。あれだけきっちり合っていれば。ベーンせん断なんかやらなくていい。非常に柔らかいところでは、ベーンせん断試験でもかなり誤差も出ますし、様々な問題が生じます。例えば、先ほど言ったように、粘土と鋼材の周面摩擦では殆どの場合粘土の内部で壊れますというような、ちょっとした理論的背景を組立ててやれば良いと思っています。例えば、下駄を投げて明日の天気を調べているわけではありません。少なくとも、夕焼けを見て明日の天気を予測していますと、実際はもう少し根拠があって判断していることのように思います。いうことをちゃんと説明し背景を付けてやられれば良いのだと思います。

【 質問者：佐賀大学　日野 】

それと、個人的な思いがあるのは、あえて壊す施工をしてみて、そこで、例えば RI コーン試験を平行して実施できればと。要するに成功事例と失敗事例をあえて作り出してやれば、地盤調査をされると皆さんの勇気に繋がるのではないかなと思っているのですけれども、過去にそういった事例とかいうものはないのでしょうか。例えば、盛土もあえて壊すように盛ってみるとか。

【 発表者：信州大学 梅崎健夫准教授 】

いくつかあると思います。地盤工学学会の会長であった太田先生は補強盛土を壊す実験をされています。しかし、科学研究費など大きな助成みたいなものがつかないと試験施行は出来ないですよね。ただ、時々現場では失敗するんですよね。先程の盛土のデータもそうなのですが、失敗とはいわないまでも壊れかかっているようなデータもあります。でも中々公には出てこないのですね。ただ、内部データとしてお持ちだと思うのです。やはり大事なことはデータ蓄積

することなのです。特に、コーン貫入試験は数多く実施すればするほどメリットが出ます。一箇所しかやらないとボーリングと変わりませんので、調査費も結局高くなります。要するに機動性があり、連続したデータが得られることを活用しないといけないのです。但し、コーン貫入試験だけではなく、最低 1 箇所はボーリングして土質試験をしょうというのが今日の講演のポイントなのです。関係式も現場のデータから作りましょうといいたいのです。

【 質問者：佐賀大学　日野 】

そうすると特にこの三成分コーンだけの場合、実は私も有明海沿岸プロジェクトが始まった当初、随分とこの RI コーンの有用性を主張させて頂いて取り入れて頂けないかと言うお願いはやったのですけれども、そのときに立ちふさがった壁は前例がないということとで、やはり前例が多い試験法とか調査法が、冒頭の N 値のお話もそうなのですが、どうしても採用されてしまうということでちょっとしんどい思いをしました。それでも今の有明海沿岸道路の関係者の皆さんはまだ非常にご理解を示して下さる素晴らしい方々ばかりなので、三成分コーンはずいぶん対応して下さっております。問題はまさにその結果を、これから先の調査に結びつけることが出来るかどうかというのが鍵で、まさにそこにこそこれから先の我々の仕事があるのだろうと考えている訳です。RI コーンの場合は、密度が取れる。しかも有効土被り圧が連続して取れるというところに僕自身も非常に魅力を感じているのですが、三成分コーンの場合には先生がおっしゃるように､有効土被り圧はやはり土質試験で求めなければいけないのだとすると、三成分コーンの式で S_u を判定するスライドの 18 番目に先生がお書きなのですけれども、ここの有効土被り圧ですが、結構センシティブなパラメーターなのではないかなと思います。 RI コーンのように連続的に得られれば良いのですけれども、三成分コーンの先端抵抗は連続的ですが、しかし、サンプリングした試料の土質試験のデータでは極端に言うと上中下位の値しか測定されないとすると、それから得られる有効土被り圧の値が果たしてどこまで精度良く求められているのかというのが気になるところです。

【 発表者：信州大学 梅崎健夫准教授 】

多分そのとおりだと思います。ただし、有明粘土の場合、湿潤密度のデータの蓄積があるのではないでしょうか。含水比が分かると湿潤密度も分りますし。密度分布も新しい見方をして今までのデータを再整理して頂くと良いと思います。そうすれば誤差の幅も縮みますよね。湿潤密度も何かの値と関係をつけて求めてみれば良いと思います。

【 質問者：佐賀大学　日野 】

分かりました。どうも有難うございました。

【司会者】

他にございませんでしょうか。質問がないようですので、これで信州大学梅崎先生の有明海講座の方を終了したいと思います。先生今日は本当にどうも有難うございました。