

戸建住宅のための高精度な地盤調査法

三成分コーン貫入試験のご紹介

Three-Sensor Corn Penetrometer Test

平成 25 年 3 月 2 日

C P T 技術研究会

目 次

はじめに	2
Q1. 三成分コーン貫入試験って何?	3
Q2. CPT はどうして精度が高いの?	5
Q3. 調査可能な地盤ってどんな地盤?	6
Q4. CPT を実施したらどんなメリットがあるの?	7
Q4. 土質をどうやって判別してるの?	9
Q5. 地下水位をどうやって把握するの?	13
Q6. 圧密特性がどうしてわかるの?	14
Q7. 液状化層がどうしてわかるの?	16
Q8. 地盤定数の推定式について教えてください?	22
Q9. CPT の報告書ってどうやって読むの?	23
Q10. 調査依頼するとき, どうすればいいの?	28
Q11. CPT の調査費・調査工程について教えてください?	29
Q12. CPT の調査計画の仕方は?	30
Q13. CPT に必要な敷地スペースは?	31
Q14. 調査手順について教えてください。	33
Q15. もっと詳しく CPT を勉強したいけど参考文献はありますか?	34

はじめに

この度、『三成分コーン貫入試験のご紹介』と題して、三成分コーン貫入試験に関する“手引き”を作成しました。

本書は、常日頃“三成分コーン貫入試験に関する分かりやすい資料がないか”という声に答えまして、メーカーの方が土の知識のないお施主様に CPT を説明する場合を想定して、最低限知っておきたい CPT の特長や、調査の流れ～報告書の見方について記しています。構成は全て Q&A 形式でまとめています。カタログと共にご活用願います。

CPT 技術研究会
事務局 ㈱設計室ソイル
東京都中央区日本橋 3-3-12 E-1 ビル 4F
Tel. 03 - 3273 - 9876

Q1. 三成分コーン貫入試験って何？

A1.

三成分コーン貫入試験（CPT：Cone Penetration Test）は、数ある地盤調査方法（図 1.1）の一つで、“サウンディング”の分類に該当する調査法です。

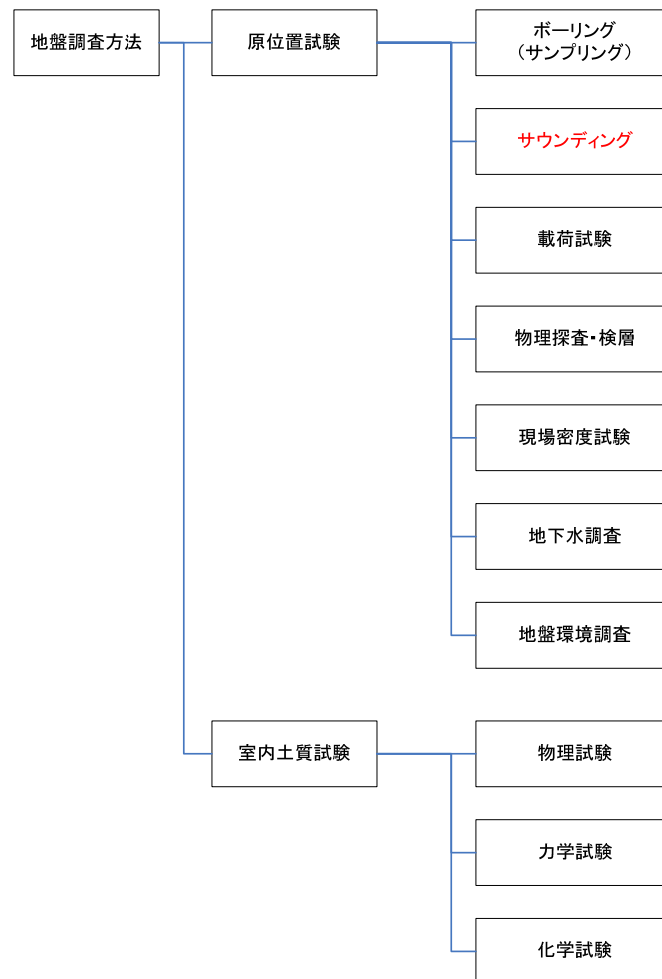


図 1.1 地盤調査方法の分類

地盤に何らかの方法で負荷を与え、その抵抗値から地盤定数を推定する方法を“サウンディング”と言います。このうち、円すい状に先端の尖った棒を地盤に押し込み、地盤の硬さを調べる調査法が古くから存在します。英語で「円すい」のことをコーン（Cone）、コーンを用いる調査法を“コーン貫入試験”と呼びます。一方、スウェーデン式サウンディング（SWS）は、先端が“スクリーポイント（図 1.2）”と呼ばれるネジ形状になっており、コーンとはやや異なります。SWS は、貫入に要し

た荷重の他、ねじり込んだ回転数を貫入抵抗値として測ることが大きな特徴です。

コーン貫入試験は、1960 年代まで“オランダ式二重管コーン貫入試験（ダッチコーン）”に代表されるように、貫入時の押込み力を油圧計などで目視計測する、いわゆる“メカニカルコーン”が主流でした。人力でコーンを押込む“ポータブルコーン貫入試験”も同じ部類で、安価で作業性は“古典的”と言えます。

1980 年代、エレクトロニクス技術の飛躍的な発展に伴って、様々なセンサーを取り付けたコーンが開発されました。センサーの高精度化・小型化が進み、近年では、含水比、密度、傾斜計、温度計など多様な計測センサーも内蔵され、ついには汚染地盤調査にも適用されつつあります。このようなセンサーを取り付けたコーンを総称して“電気式コーン”と呼びます。

“三成分コーン貫入試験”は電気式コーンであり、最も汎用的なセンサーとして“コーンの先端抵抗”、“間隙水圧”、“周面摩擦力”の3つを取り付けたコーンを用いることから、通称“三成分コーン”、“CPT”などと呼ばれています（図 1.3）。CPT は、3つの地盤情報が瞬時にパソコンへ記録されるため調査性もよく、また3つの地盤情報から“土質の判別”、“強度”、“液状化判定”、“圧密評価”などあらゆる解析が可能です。まさに次世代へ向けた“サウンディングの王様”と言えるでしょう。

補足として CPT は海外で最も標準的な地盤調査法です。国内では標準貫入試験（SPT）が主流で、CPT は汎用性の低い調査法です。しかし、時代の変化によってはこの普及率も増加する可能性を秘めています。

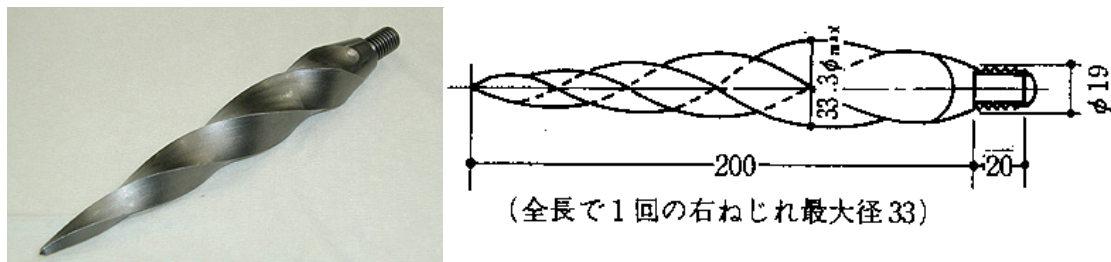


図 1.2 SWS の先端（スクリューポイント）

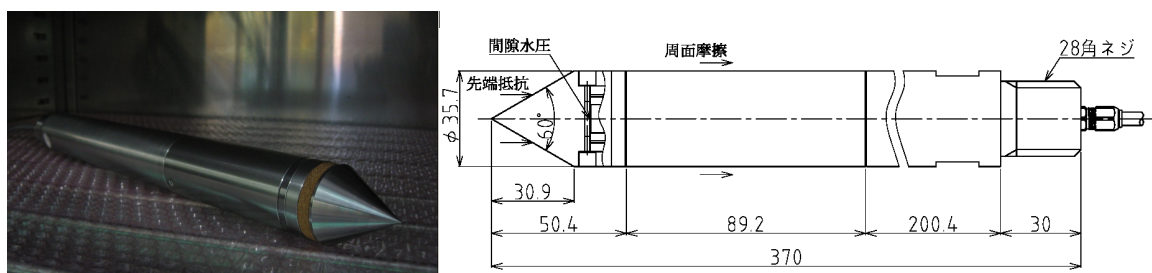


図 1.3 CPT の先端（三成分コーンプローブ）

Q2. CPT はどうして精度が高いの？

A2.

地盤に何らかの方法で負荷を与え、その抵抗値から地盤定数を推定する方法を“サウンディング”と呼びます。CPT の他、SWS や標準貫入試験（SPT）もサウンディングです。では何故、CPT が精度良く測定できると言えるのでしょうか。理由を以下に説明します。

理由 1. CPT は地盤の中で測定している！

CPT は、電気式コーンを用いるため、地中で抵抗値を測定します。一方、SWS や SPT などは地上で抵抗値を測定します。だからどうしたと思うかも知れませんが、実はこの差はとんでもない効果をもたらします。

SWS を例に説明しましょう。SWS は、先端抵抗体（スクリューポイント）が深くなるにつれて、その抵抗体には、かかる重りの他、それより上部に接続された貫入ロッド重量がかかった状態になるわけですが、地上の測定器では、貫入に要した重り分だけが記録されます。例えば深さ 10m で $W_{sw}=0.25\text{kN}$ （ $\div 25\text{kg}$ 自沈）と測定されたとしましょう。10m 分の貫入ロッドの重量は 0.24kN あることから、先端抵抗体には $0.24+0.25\text{kN} \div 0.5\text{kN}$ の荷重がかかって自沈したことになり、実際には $W_{sw}=0.25\text{kN}$ で自沈する土よりも強固だと言えます。だとすれば簡単にロッド重量を考慮してデータ補正したいところですが、貫入ロッドも途中で曲がったり、ロッド周面に摩擦力が上向きにはたらくこともあるので、先端部の実際の荷重を補正して求めるのは容易ではありません。ただ分かるのは地上で $W_{sw}=0.25\text{kN}$ かかったという事実であり、安全側に評価するならこの数値を用いて設計すればよいでしょうが、過剰設計にも繋がりがかねません（状況により危険側になることもある）。このような現象は、SPT にも同じことが言えます。そこそこ深い深度で N 値がゼロだと言って、すぐに地盤補強対象とするのはいかなものかと思います。

CPT は貫入深さが長くなろうとロッドが多少曲がろうとも、地中で測定するため貫入ロッドの影響をキャンセルした抵抗値が得られます。またサウンディングでは地盤貫入時、水圧の影響を受けます。CPT は間げき水圧測定により先端抵抗の補正もできます。この点で精度が高くなるものと考えます。

理由 2. 測定深度が 1cm！

CPT の測定深度は通常、深さ 1cm 毎に記録します。一方、SWS は深さ 25cm、SPT は深さ 1m 毎に記録・整理されます。CPT の方が、薄い土層を見逃さず連続測定ができる点で有利です。一方、原位置で土質試料を採取して室内で土質試験を実施する手法がありますが、これは実測値であり精度が高いのは確かかも知れませんが、しかし、連続的にデータを取得するのが難しく、コスト高かつ工期が長くなるのがネックです。

Q3. 適用可能な地盤ってどんな地盤？

A3.

CPTはコーンを静的にかつ無回転で貫入する調査法です。よって硬質な地盤だと貫入できません。また貫入する機械能力によっては、貫入ロッドの摩擦力が大きくはたらいで深い位置まで貫入できないこともあります。

当研究会では、概ね、

N値 20 以下の粘性土，砂質土

深度 20m以下

の調査実績が多くあります。ただし、N値 20 程度の層が約 2m以上も連続してしまうと高止まりすることもあります。調査深度や地盤の締まり具合に関しては、貫入能力の大きな機械を用いれば上記の限りではありませんが、地盤に持ち込める機械を考えるとこの程度の調査深度が限界かと思います。

また地盤では、浅層部が硬質であったり、礫質土で盛土されたような地盤も多く存在します。この場合にはその硬質層を先行掘りにて緩ませてから調査することもできます（当然ながら先行掘りした深さ部分は測定対象外となります）。

CPTの測定原理からして、軟弱地盤を対象とした調査であることは確かです。よって支持層の硬さや厚みを見極めるような調査には不向きです。すなおい動的貫入試験（標準貫入試験、ラムサウンディングなど）をお勧めします。

Q4. CPTを実施したらどんなメリットがあるの？

A4.

CPT は、原位置で精度よくサウンディングできる調査法であり、一度に 3 つ（先端抵抗 q_t 、周面摩擦 f_s 、間隙水圧 u ）の地盤情報が得られます。この 3 つの情報から“土質の判別”，“強度”，“液化判定”，“圧密評価”などの解析がそこそこの精度で評価できます。

設計時，これらの特徴をもつ CPT を，以下のようなケースで活用したらメリットが得られると考えます。

ケース 1. 表層改良，柱状改良，RES-P など で補強したいが，改良長の下部が圧密しそう….

SWS 結果で設計すると，改良長の下部に自沈層があったりして，改良長や補強工法の選定が適切なのか懸念する場合があります。面倒だから鋼管杭という計画も浮上することもあるかと思います。

こんなとき CPT で改良長下部の圧密状態を調査すれば，より合理的な工法の選定や改良長の設計が可能です。

ケース 2. 柱状改良，RES-P など を SWS 結果で設計したら予想以上に改良長や本数が増えてしまった.

SWS 結果に自沈層があると，その層は軟弱なことは理解できます。しかし SWS の自沈層の測定は，ばらつきも多いことから一般にはその自沈層を安全側に（実際より摩擦を小さく）評価します。よって SWS 結果で設計した補強工法は，安全側（？）なのでしょうが，ややもすれば過剰設計に繋がります（自沈の精度が悪すぎると，危険設計になることだってある！）。

こんなときその軟弱層の部分を CPT で評価して，補強設計に取り入れることで，より適切な改良長・本数で提案できる可能性があります。

ケース 3. 液化化しそう….

液化化危険度マップや微地形などで簡易判定すると，液化化区域に該当した。この場合，メーカーサイドとしては，このまま何の説明もせず建設しても，説明責任を問われかねない。また施主様にとっても自分が長く住む土地だから，液化化について詳しく知りたいのが本音かと。

こんなとき CPT を実施すれば，簡単に液化化判定ができます。液化化層があったとしても，その深度，厚さによっては建物への被害は小さいという結果に繋がることもあります。逆に液化化による建物への被害が大きいとなれば，それに対応した補強策への調査資料として利用できます。

ケース4. 直接基礎（無補強）にて設計しようとしたが、SWS ではやや不安な結果が出たとき.

SWS 結果に僅かですが自沈層があります。周囲の地形・地質や造成履歴を勘案しても直接基礎で対応できると考えたが、根拠にやや乏しい。

こんなとき CPT を行くと安全な地盤であることが分かったりします。後で設計変更になるのも面倒だからそのまま地盤補強して建設してもよいのですが、CPT の調査費用だけで安心を提供することもできます（当然その逆もあり、補強しなければいけないというが分かることもあります）。

以上はほんの一例かも知れませんが、概ね SWS あるいは資料調査などで基礎設計に不安が残る場合、過剰な補強費になりそうな場合に CPT を利用したらと考えます。当然ながら CPT の調査費分、高くなりますが、地盤調査費＋地盤補強費をトータルで考えれば、安価になることも考えられます。

これまで SWS 結果で不安が残るときは、**ボーリング＋室内土質試験**を追加調査で実施することが多かったと思います。しかし調査費や調査報告書の提出時間を考えると、断然 CPT が有利になるのかと思います。

Q4. 土質をどうやって判別してるの？

A4

三成分コーンを地盤に貫入すると、先端抵抗 q_t 、周面摩擦 f_s 、間隙水圧 u が測れるわけですが、土質によって異なる傾向を示します。以下にその特徴を示しましょう。

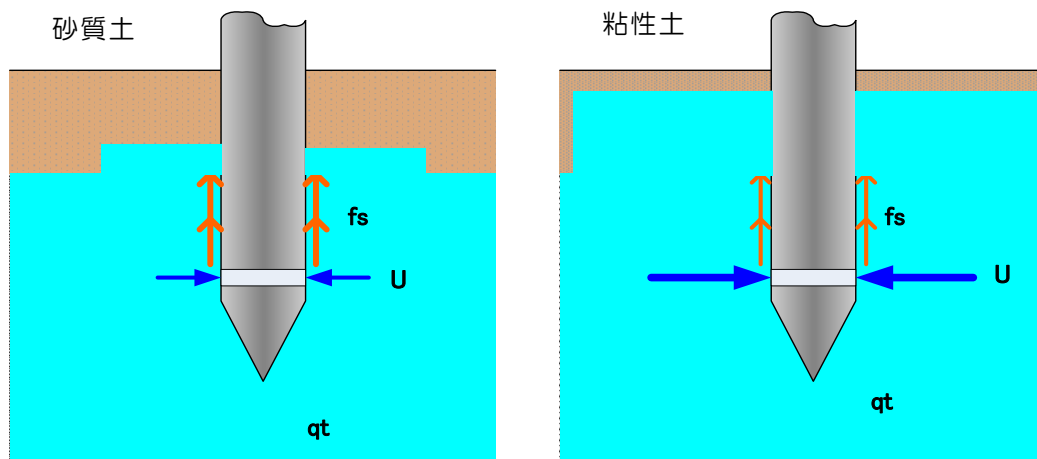


図 4.1 土質による 3 成分測定値の傾向

（先端抵抗，周面摩擦）

一般に、砂質土・礫質土に貫入したときの先端抵抗 q_t は、粘性土を貫入するときの q_t に比べて大きくなる傾向があります（図 4.1）。これは周面摩擦 f_s にも同様な傾向があり、粘性土を貫入するときの f_s に比べて砂質土・礫質土に貫入したときの f_s の方が大きくなる傾向があります。CPT 特有の指標として、 f_s と q_t の比（ f_s/q_t ）でフリクション（摩擦）比という値があります。このフリクション比は、砂質土・礫質土の方が粘性土に比べて小さくなります。

粘性土を手で触ると粘っこく手にくっついりますが、砂質土は手にくっつかずサラサラしています。粘性土のフリクション比が砂質土より大きくなるのは、この“粘り気”が影響していると思います。

（間げき水圧）

地盤は、土粒子と空気、および（間げき）水の 3 相で構成されています。三成分コーンを地盤に貫入すると、もともとあったコーンの体積分の土粒子と間げき水を周囲に押し上げながらコーンが貫入されることになります。よってコーンを貫入することによって、もともと保有していた水圧（静水圧）

よりも大きな（過剰間げき）水圧が作用しようとしします。このとき粘性土だと保水性が高い（透水性が低い）ことから、上昇した間隙水圧をそのまま測定します。一方、砂質土は水はけがよい（透水性が高い）ことから、上昇した間隙水圧がほぼ瞬時に消散されてしまうため、結果的に静水圧と同じ程度の値（或いは静水圧以下の値）が測定されます（図 4.1）。

CPT は土質を直接目視したり土の粒度を測定するわけではないので、SWS 同様、土質は推定で判別するしかありません。しかし上記の土質と抵抗値の特徴を駆使して土質を判別すると、そこそこ精度よく推定できます。

以下は、実際に CPT 測定値から土質判別を行うための専門的な話です。

先に述べた CPT の特徴を図示化したものが図 4.2 です。この図に測定値を直接プロットするとそのプロット位置によって土質が判定できるという仕組みです。

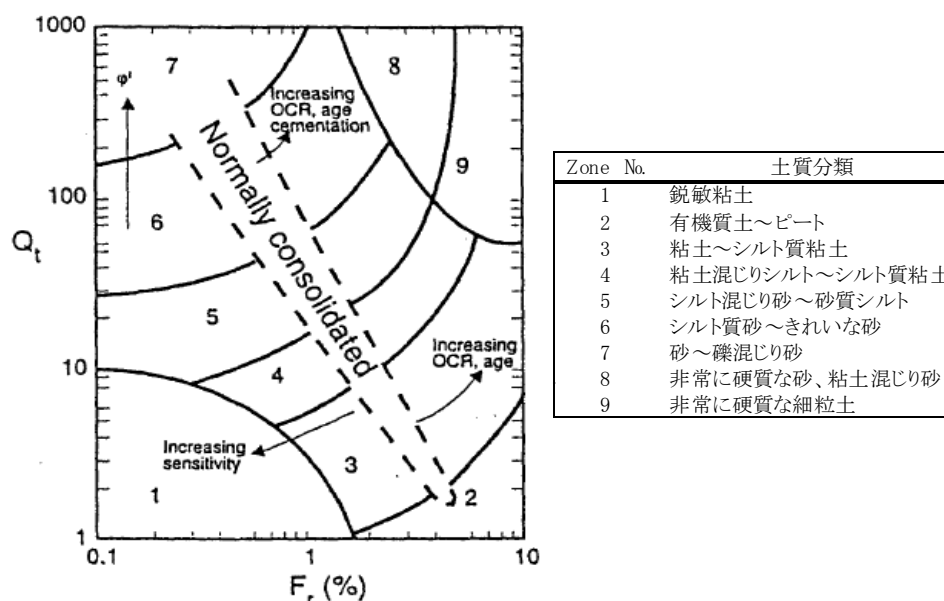


図 4.2 土質分類判別図 (Robertson¹⁾)

1) Robertson, P. K.: Soil classification using the cone penetration test Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 151～158, 1990.

ここに、

Q_t : 基準化先端抵抗 $\{= (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma_{vo}'\}$

F_r : 基準化フリクション比 $\{= f_s / (q_t - \sigma_{vo}) \times 100 (\%) \}$

σ_{vo} : 当該深さの鉛直全応力

σ_{vo}' : 当該深さの鉛直有効応力

また図を用いた判別だけでなく，CPT 測定値から土質分類指数 I_c を求め， I_c 値から表 4.1 の分類で土質判別することもできます。

$$I_c = \left\{ (3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2 \right\}^{0.5} \dots\dots\dots (4.1)$$

表 4.1 I_c による土質分類²⁾

I_c	土質分類
1.31 以下	礫質土
1.31～2.05	砂 ～ シルト質砂
2.05～2.60	シルト質砂 ～ 砂質シルト
2.60～2.95	砂質シルト ～ シルト質粘土
2.95～3.60	シルト質粘土 ～ 粘土
3.60 以上	有機質土

2) Jefferies, M. G. and Davies, M. P.: Use of CPTu to estimate equivalent SPT N60., ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 16, No. 4, pp. 458～467, 1993.

この I_c 値および図による判別のどちらを用いても類似した土質判別ができますが， I_c 値で求める方が簡単です。しかしいずれの手法も，全応力 σ_{vo} ，有効応力 σ'_{vo} がないと利用できません。旧来は，この全応力，有効応力を考慮せず，測定値のみで判別する図（図 4.3）もありましたが， σ_{vo} ， σ'_{vo} を考慮することで，より土質判別の精度が高まったと言われています。しかし土の全応力を求めるには土の密度を知る必要があり，有効応力を求めるには，地下水位も必要になります。地下水位は CPT で測定できるため問題ありませんが，土の密度については土質試験結果があればそれを利用し，なければ一般設計で利用する工学的数値を用いて評価することになります。

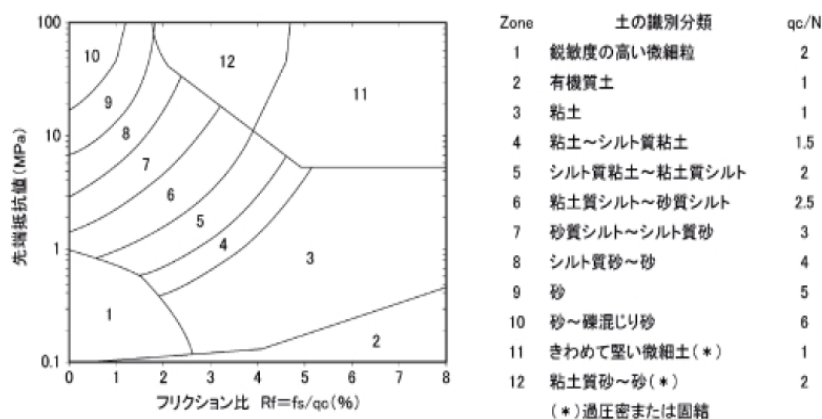


図 4.3 CPT 測定値を用いた土質判別図 (Robertson³⁾)

3) Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D and Grieg, J.: Use of Piezometer Cone Data, Proc. of Insitu' 86, ASCE, Speciality Conference, Blacksburg, Virginia, 1986.

参考までに、過去、CPT とボーリングを同時に実施した 17 宅地の土質分類の比較結果を図 4.4 に示します。図中の青枠に囲まれた箇所にプロットされていれば、CPT の土質判別がボーリングによる目視結果と合致することを意味します。有機質土が CPT だとやや粘性土の評価になる傾向がありますが、概ね枠内にプロットされています。

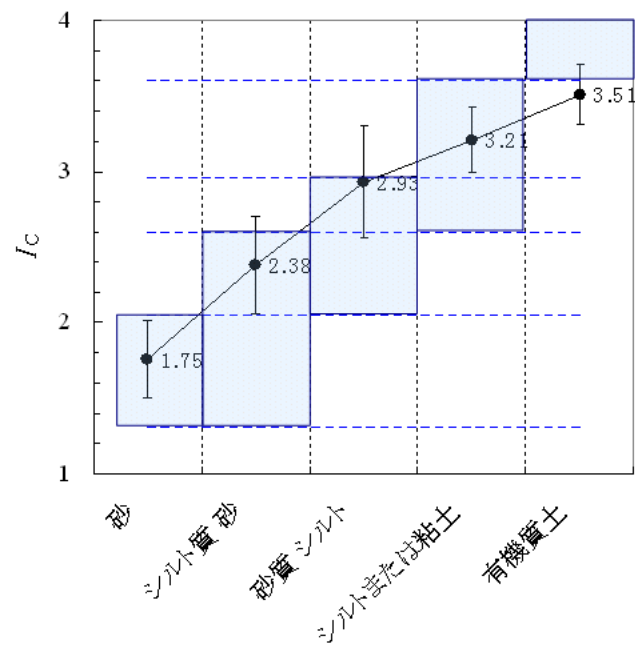


図 4.4 I_c とボーリングによる土質分類の比較

Q5. 地下水位はどうやって測定できるの？

A5.

三成分コーンには間げき水圧計が付属しています。一般には、間げき水圧が変化しようとする深さを地下水位の位置と判断することができます（図 5.1 参照）。しかしながら、地盤によっては地下水位でなく、**宙水**、雨水等の浸潤水でも間げき水圧が反応することがあるため、間げき水圧が変化しようとする深さを地下水位と呼びにくいこともあります。

この場合、コーン貫入を一旦止めて間げき水圧の消散試験を実施する、すなわち静水圧を測ることで地下水位が分かたりします。例えば、深度 10 m で貫入を止めて、間げき水圧の安定した値が 80 kN/m^2 になったとしましょう。深度 10 m で 8 m 分の水頭圧（ 80 kN/m^2 ）が働いたことになるため、10 - 8 m で地下水位は 2 m と判断できます。さらには調査後、貫入孔を利用して水位計、巻尺などを挿入して地下水位を測定することもできます。当研究会ではこれら全てで総合的に判断します。

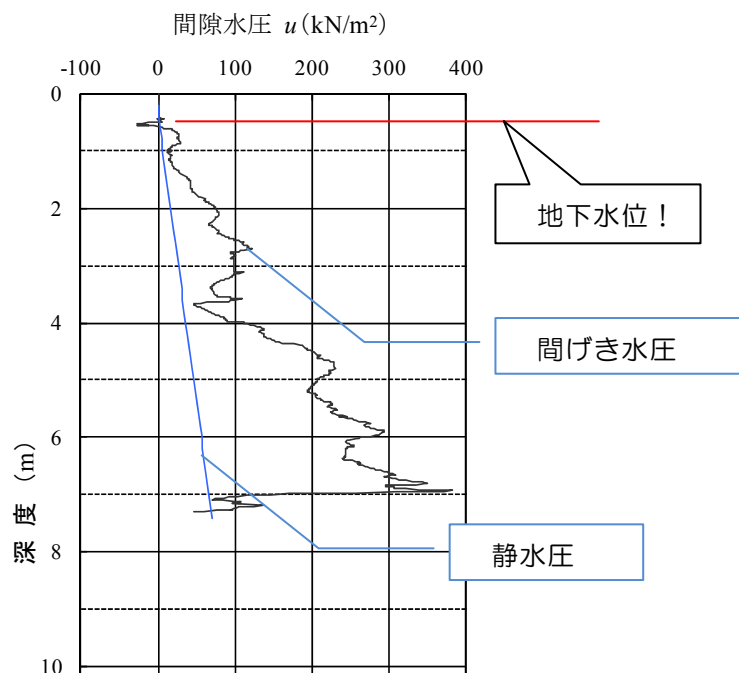


図 5.1 間げき水圧の深度分布例

宙水（ちゅうすい）：局部的に介在する難透水層の上に滞留する地下水。ローム層におおわれた関東地方の台地でよく見られる。

Q6. 圧密特性がどうしてわかるの？

A6.

圧密とは、土や地盤に圧力が加わって長期的に体積が減少することを言い、主に粘性土地盤で用いる用語です。宅盤の場合、その地盤が圧密するかしないかが重要で、その指標として圧密降伏応力 P_c が分かると効果的です。圧密降伏応力とは圧密現象によって降伏しようとする荷重値です。すなわちその P_c が大きければ圧密しにくい土、小さければ圧密しやすい土だと言えます。よってその土に負荷されている荷重（鉛直有効応力 σ_{vo}' ）と P_c を比較すれば式 6.1 のように圧密の進行状態を把握できます。

$$\begin{cases} P_c < \sigma_{vo}' & \dots\dots\dots \text{圧密未了} \\ P_c = \sigma_{vo}' & \dots\dots\dots \text{正規圧密} \\ P_c > \sigma_{vo}' & \dots\dots\dots \text{過圧密} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

例えば、 P_c 値より σ_{vo}' が大きい状態とは、すでに圧密降伏している、圧密進行中の地盤だと言えます。また P_c 値と σ_{vo}' が等しければ、圧密は終息して安定した状態と言えます。ただし、新規に盛土・建物荷重などが加わればその荷重値に応じて圧密します。さらに P_c 値が σ_{vo}' に対して大きくなる場合がありますが、これを過圧密状態と言います。 P_c 値は過去に受けた先行荷重とも密接な関係があり、土はその先行荷重を記憶する性質があります。一般に盛土地盤より切土地盤の方が安定した地盤ですが、これは過去に受けていた荷重が大きくて P_c 値が大きくなったからであり、こういった原理が関係しています。

CPT 結果から P_c を推定する式には、深沢¹⁾ により下式が提案されています。

$$P_c = (q_t - \sigma_{vo}) / 3.44 \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

q_t ：先端抵抗

σ_{vo} ：当該深さの全応力

1) 深沢健：粘性土地盤におけるコーン貫入試験の適用性に関する実証的研究，東京工業大学学位論文，2004.

過去、当研究会では、CPT、SWS 結果によって推定した P_c と土質試料採取による圧密試験結果による P_c （実測値）を比較したことがあります。その比較図が図 6.2 ですが、CPT の方が実測値との整合が高いことが分かるかと思います。

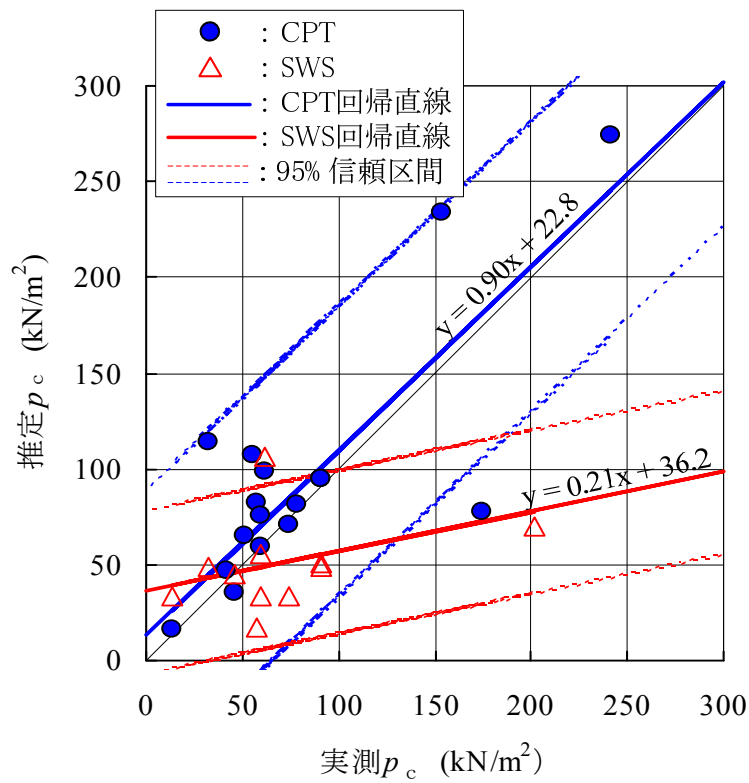


図 6.2 P_c の実測値(圧密試験)と推定値の比較

圧密特性には、 P_c だけでなく、**圧密係数 C_v (cm^2/sec)** も重要です。この C_v が分かると、圧密するのに要する時間が推定できるので、例えば盛土した地盤の圧密に必要な養生期間を設定するのに役立ちます。当研究会でも、 C_v の推定にトライしたことがあります但精度が今一つです。今後の開発が望まれますが、現状、 C_v が必要なときには圧密試験を推奨します。

Q7. 液状化層がどうしてわかるの？

A7.

液状化判定法を説明する前に、まず液状化しやすい土層について説明する必要があります。液状化する土層とは、概ね、

“**地下水位より下部の、ゆるく堆積した砂質土層**”

が該当します。ただしこのような土質の地盤でも、地震動を与えない限り液状化はしません。そしてその与える**地震動の大きさ**によっても液状化層は変化します。御存知のように東日本大震災では関東地区で過去に類を見ないほど多くの液状化区域が発見されました。しかし過去にも中小クラスの地震が発生していたり、東日本大震災後も月単位で余震が続いたことを覚えていると思いますが、そのときはほとんど液状化していません。これより**地震動の大きさも液状化の判定に必要な**ことがイメージできるかと思います。

CPT 結果に基づく液状化判定手法は、『建築基礎構造設計指針/日本建築学会』で指針化されております。この指針では、 F_L 値を用いた判定法になっており、当研究会でもこれに準じて判定しています。 F_L 値に必要な地盤定数として、

- ①地下水位
- ②砂の締まり具合（： N 値 or コーン先端抵抗 q_c ）
- ③土の粒度（：細粒分含有率（ F_c ））

が必要です。CPTでは、 q_c はもちろんのこと、土質や地下水位が推定できるため、液状化判定にも利用できるわけです。

【 F_L 値の求め方】

液状化抵抗率 F_L 値とは、液状化に対する安全率のようなもので、すなわち $F_L > 1$ の土層は、液状化発生の可能性はなく、1 以下となる場合はその可能性があり、値が小さくなればなるほど液状化発生の危険度がさらに高くなると見ることができます。

F_L 値は、式 7.1 で示されるように、**地盤の液状化抵抗比 R と地震によって地盤内に生じるせん断応力比 L との比**で定義されます。専門用語で分かりにくいですが、 **R は地盤の地震に対する強さ、 L は地盤に与える地震の大きさ**だと思ってください。上述したように、地震動の大きさによって判定が変わるのは、この L が F_L 値に含まれるからです。

$$F_L = \frac{R}{L} \dots\dots\dots (7.1)$$

①液状化抵抗比 R

液状化抵抗比 R を求めるには、まず、式 7.2 に示す補正コーン貫入抵抗値 q_{cl} を求める必要があります。

$$q_{cl} = F(I_c) \cdot q_c \cdot C_N \quad \dots\dots\dots (7.2)$$

$$I_c = \left\{ (3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_R + 1.22)^2 \right\}^{0.5} \quad \dots\dots\dots (7.3)$$

$$Q_t = (q_c - \sigma_z) / \sigma'_z \quad \dots\dots\dots (7.4)$$

$$F_R = f_s / (q_c - \sigma_z) \times 100 \quad \dots\dots\dots (7.5)$$

ここに、

$F(I_c)$: 図 7.1 より求まる粒度（土の挙動特性）に関する補正係数

q_c : 原位置で測定されたコーン貫入抵抗値

I_c : 土質分類指数

f_s : 摩擦抵抗

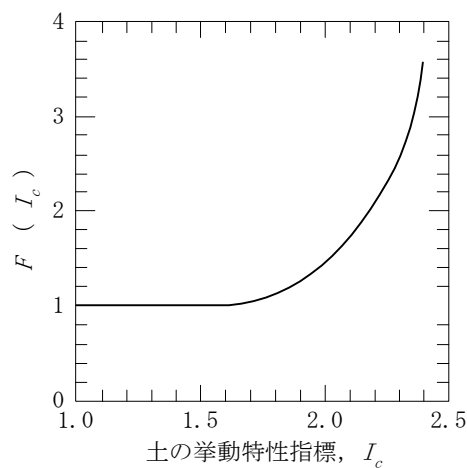


図 7.1 I_c と $F(I_c)$ の関係

$$C_N = \sqrt{\frac{98}{\sigma_{vo}'}} \quad \dots\dots\dots (7.6)$$

ここに、 C_N : 拘束圧に関する換算係数

σ_{vo}' : 鉛直有効応力 (kN/m²)

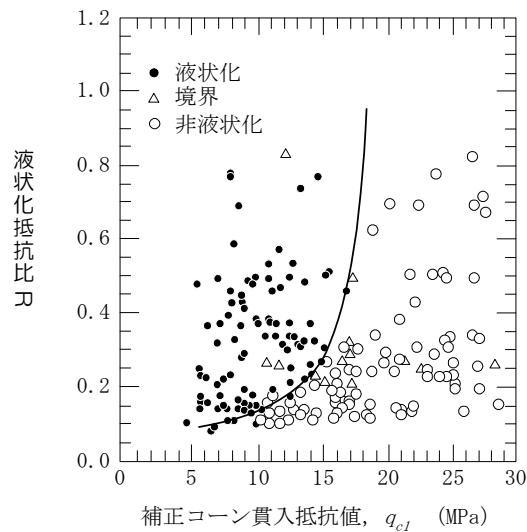


図 7.2 補正コーン貫入抵抗値と液状化抵抗比の関係

式 (7.2) で定義される補正コーン貫入抵抗値 q_{cl} を、図 7.2 中の曲線に対応させることで、液状化抵抗比 R が推定できます。図中の曲線は、液状化と非液状化の境界を示すラインで、せん断ひずみ振幅 5% に相当します。

以上、液状化抵抗比 R を求めるには、貫入抵抗値 q_c を補正して q_{cl} を算出し、図 7.2 により推定しています。では何故こんな面倒くさいことをするのでしょうか。それは、液状化は土の物性や拘束圧なども関与するからです。すなわち、同じ q_c でも、粘土であれば砂よりも液状化しにくいし、深い位置では拘束圧が高くなるため液状化しにくくなり、これらを補正してあげないと、粘土でも液状化するといったおかしいことにもなりかねません。一概に q_c で直接 R を求めないのはそういった事情があるからです。

②繰返しせん断応力比 L

繰返しせん断応力比 L は式 7.7 より算定できます。

$$L = r_n \frac{\alpha_{\max}}{g} \frac{\sigma_z}{\sigma'_z} r_d \quad \dots\dots\dots (7.7)$$

ここに、 r_n : 等価な繰返し回数に関する補正係数で $= 0.1(M - 1)$: M ; マグニチュード

$\alpha_{\max}$: 地表面最大加速度 (cm/s^2) ; 中地震 $150 \sim 200 \text{ cm/s}^2$, 大地震 350 cm/s^2

g : 重力加速度 $980 \text{ (cm/s}^2\text{)}$

σ_z : 全土被り圧 (kN/m^2)

r_d : 地盤が剛体でないことによる低減係数 ($= 1 - 0.015z$) : z ; 深度 (m)

繰返しせん断応力比 L は、解析に用いる入力地震動の大きさになるわけですが、式 7.7 では、 M （マグニチュード）と地表面最大加速度 α_{max} が設定用の地震動のファクターに相当します。マグニチュードとは、地震のエネルギーを測る尺度です。マグニチュードは 1 大きくなるとエネルギーは約 32 倍、2 大きくなるとエネルギーは約 1000 倍大きくなると考えられています。

一方、“震度” といった地震を測る指標もあります。震度は地表の揺れや周辺の被害状況の程度を表す指標で、震源地に近いほど震度は大きくなりますが、震源地からの距離が同じでもその場所の地層の軟らかさやその厚さによっては震度が異なります。こういったことから、地表面の揺れの指標には震度は用いず、直接、地表面最大加速度 α_{max} を用いて算出します。

以上、 F_L 値を深度方向にプロットすれば、その地震動における液状化層が判別できます（図 7.3）。

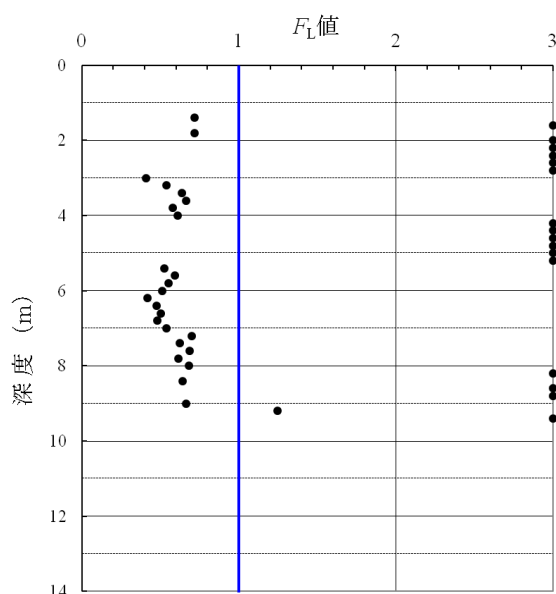


図 7.3 F_L 値の深度分布の一例（浦安市）

【建物（地表面）への液状化による被害程度の評価の仕方】

液状化層（ $F_L < 1$ ）があっても建物（地表面）に被害が出るかどうかは、 F_L 値の深度分布（図 7.3）を眺めていてもよく分かりません。建物（地表面）への液状化による被害程度を別に評価しなければいけません。その評価手法として 2 つ示します。

①液状化層厚（ H_2 ）と非液状化層厚（ H_1 ）の比

この手法は小規模建築物基礎設計指針（日本建築学会）で示されている手法で、図 7.4 に示す判別図で影響度合を評価しています。具体的には、液状化層厚（ H_2 ）と非液状化層厚（ H_1 ）の比を用いる

わけですが、例えば $H_1 = 3\text{m}$ で、 $H_2 = 2\text{m}$ であれば、その位置を図 7.4 にプロットすれば、影響は“小”と判断できます。

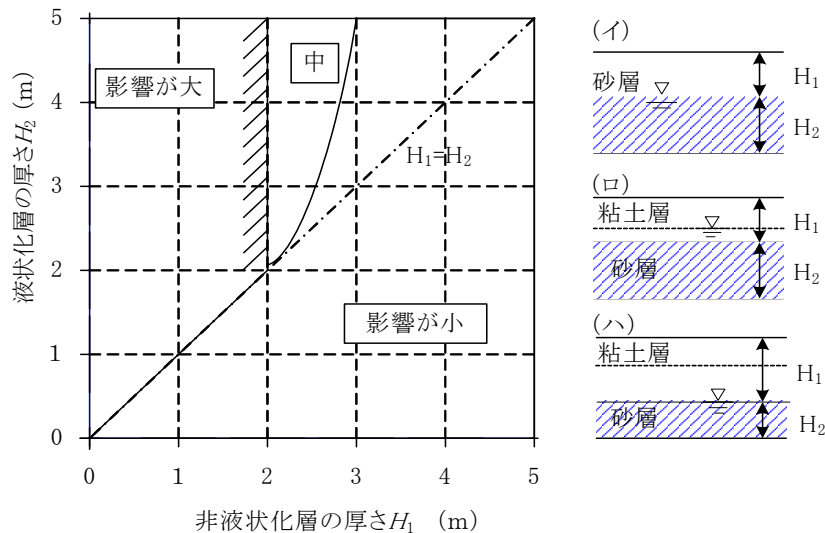


図 7.4 液状化の影響が地表面に及ぶ程度の判定
(地表面水平加速度値 200 cm/s^2 に相当)

②最大水平変位 D_{cy}

この手法は建築基礎構造設計指針（日本建築学会）で示されている手法です。最大水平変位 D_{cy} は、繰返しせん断応力比 $L (= \tau_d / \tau_z')$ と補正 N 値から各層のせん断ひずみ γ_{cy} を図 7.5 で推定し、鉛直方向に積分することで求めることができます。分かり易く言うと、この図は対象とする土の強さ（補正 N 値）に地震動が加わったときの地盤のひずみ量を把握するものです。例えば、深度 2～3.5m までは補正 N 値 = 20 で $L = 0.3$ だとすると、図より γ_{cy} は 1% 程度となります。これを、深さ方向に積分すると、 $150\text{ cm} \times 1\% = 1.5$ となります。このようにして、対象深度全層の和が D_{cy} になります。

この D_{cy} から表 7.1 を用いて液状化による建物被害程度を予測することができます。なおこの D_{cy} は、cm の単位で評価しており、鉛直方向の変位として置き換えることもできるので、地震後に生じるめりこみ沈下量にも相当すると言われております。

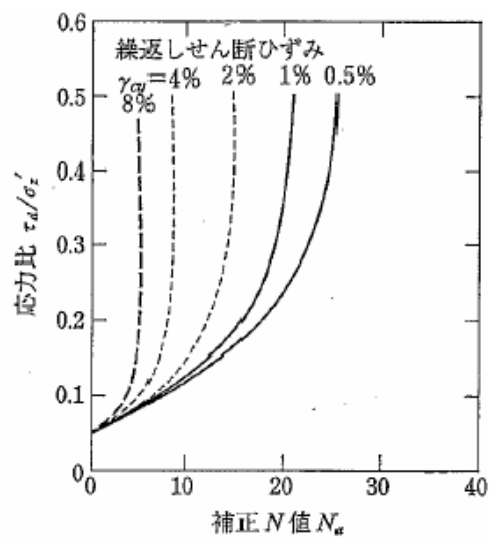


図 7.5 補正 N 値と繰返しせん断ひずみの関係

表 7.1 D_{cy} と液状化の程度の関係

区分	D_{cy}	液状化の影響の程度
A	0	なし
B	5 以下	軽微
C	5～10	小
D	10～20	中
E	20～40	大
F	40 以上	甚大

Q8. 地盤定数の推定式について教えてください？

A8.

表 8.1 に CPT 結果より地盤の諸定数を推定する式を示します。なおこれらの相関式には、相関係数が示されており、実測値との相関性の高いものもあればそうでないものもあります。これらを駆使すれば、表層改良、柱状改良体、細径・極細径鋼管の軸力や浅い基礎の支持力の評価も可能です。

表 8.1 CPT 結果より地盤の諸定数を推定するための関係

地盤定数	記号	単位	相関式	相関係数	引用文献
一軸圧縮強度	q_u	kN/m ²	$2 \cdot (q_t - \sigma_{vo}) / 13.40$	0.83	①
圧密降伏応力	σ'_y	kN/m ²	$(q_t - \sigma_{vo}) / 3.44$	0.86	①
変形係数	E_{50}	kN/m ²	$33.03 \cdot (q_t - \sigma_{vo})^{0.788}$	0.65	①
せん断剛性率	G_{50}	kN/m ²	$21.64 \cdot (q_t - \sigma_{vo})^{0.753}$	0.48	①
粘性土の間隙比	e_0		$15.51 \cdot (q_t - \sigma_{vo})^{-0.356}$	0.49	①
粘性土の自然含水比	w_n	%	$242.48 \cdot (q_t - \sigma_{vo})^{-0.217}$	0.44	①
粘性土の体積圧縮係数	$m_{v(oc)}$	m ² /kN	$0.074 \cdot (q_t - \sigma_{vo})^{-0.864}$	0.67	①
	$m_{v(\sigma'_y)}$	m ² /kN	$2.415 \cdot (q_t - \sigma_{vo})^{-1.275}$	0.8	①
	m	m ² /kN	$0.031 \cdot (q_t - \sigma_{vo})^{-0.160}$	0.37	①
圧密係数	c_v	cm ² /day	$10000 \cdot \Delta u - 1$	—	①
N値	N		$0.3411c^{1.94} \times (q_t - 200)^{(1.34 - 0.09271c)}$ ($q_t > 200 \text{ kN/m}^2$) 0 ($q_t \leq 200 \text{ kN/m}^2$)	—	②

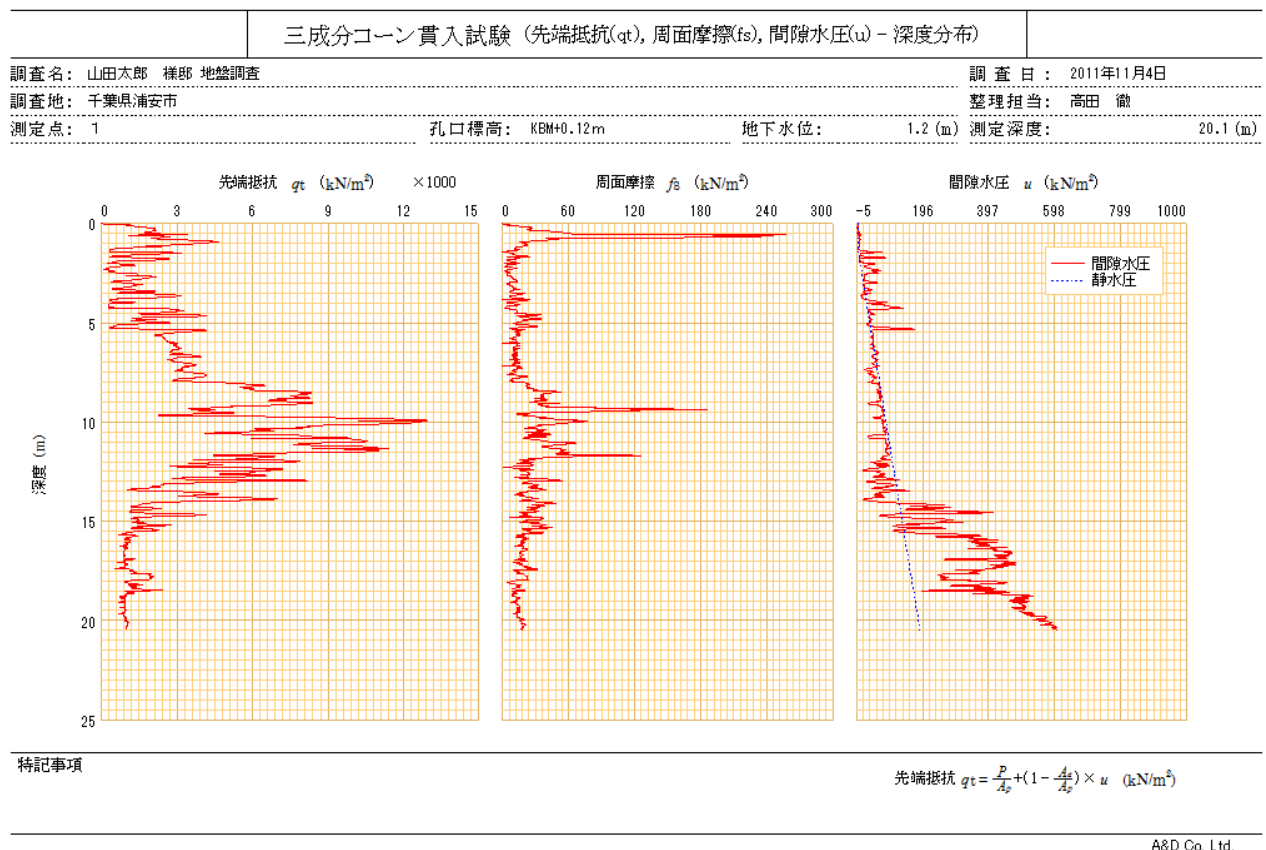
① 深沢：粘性土地盤におけるコーン貫入試験の適用正に関する実験的研究；東亜建設工業 技報（2004. 3）

② 實松・鈴木：コーン貫入試験結果と地盤物性の関係—その1 土質判別と標準貫入試験のN値の評価—；第40回地盤工学研究発表会

Q9. CPTの報告書ってどうやって読むの？

A9.

調査データの見方を以下に示します。

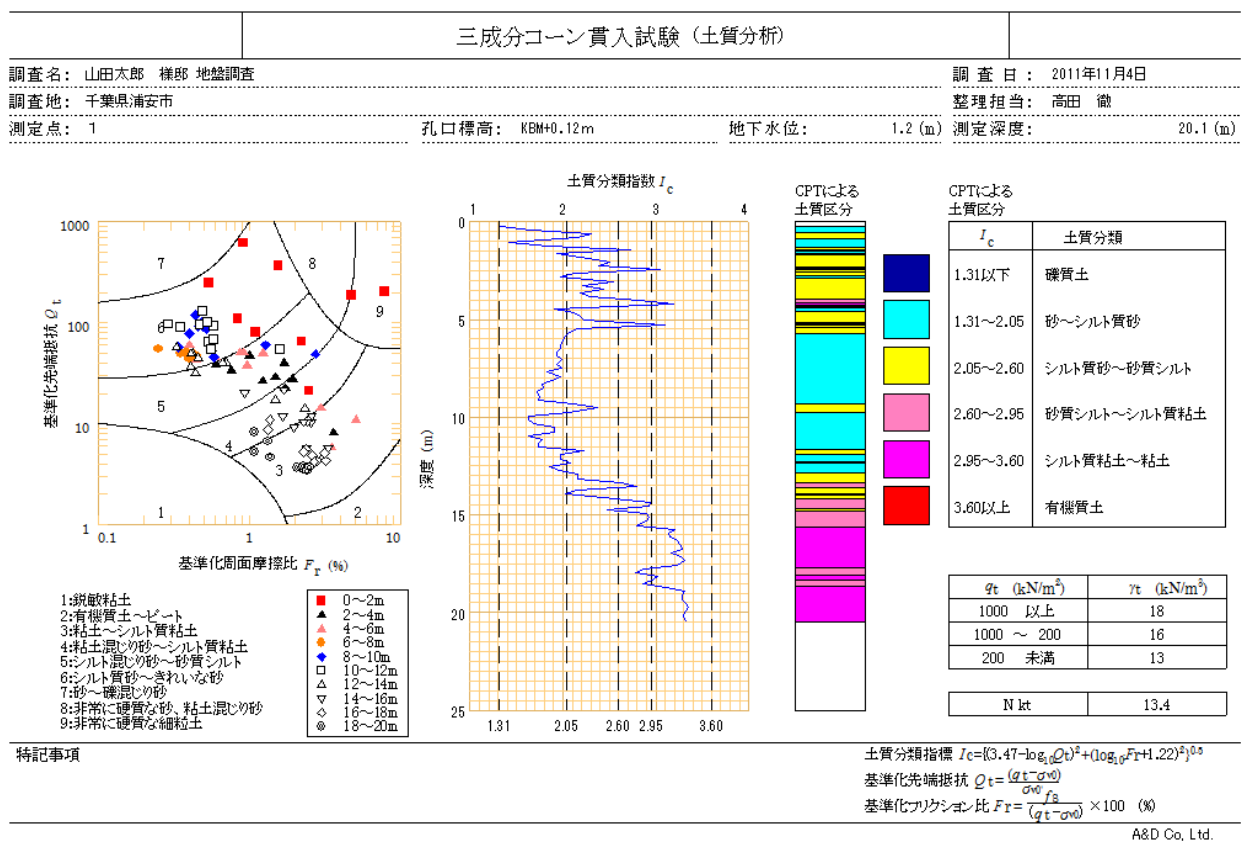


上図は、三成分コーンの生データで、先端抵抗 q_t 、周面摩擦 f_s 、間隙水圧 u の深度分布を示すものです。このデータだけを眺めていても、一般の地盤定数は分からないのですが、概ね以下の傾向があります。

先端抵抗 q_t : q_t が大きいほど硬質。小さいほど軟弱（土の締まり具合が弱い）である。

周面摩擦 f_s : ほぼ先端抵抗と類似した挙動を示す。解析上、 f_s/q_t が重要。

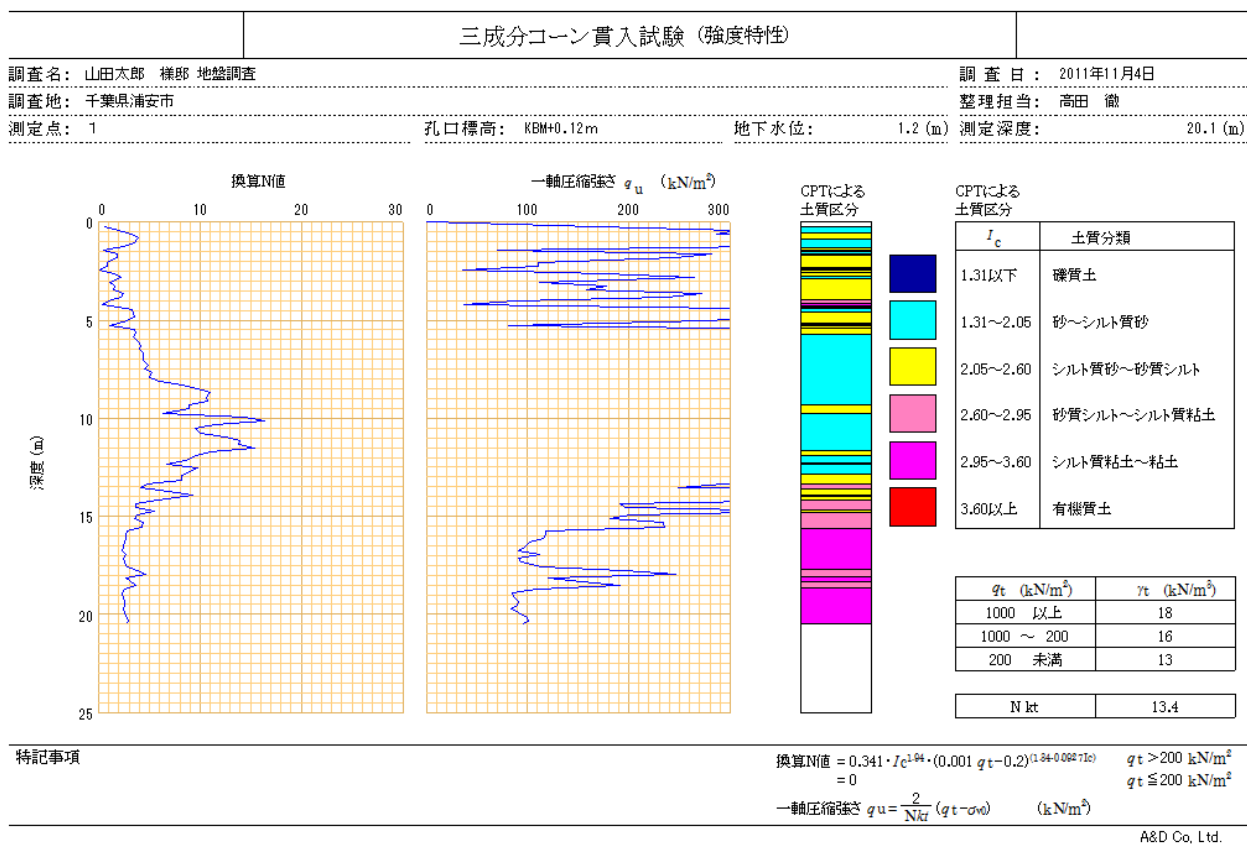
間隙水圧 u : 静水圧より u の方が大きければ粘性土、小さければ砂質土の傾向を示す。



上図は、CPT データによる土質分類結果です。

2つの手法で判別しております。

1つは、**土質分類判別図**（ Q_t - F_r 図：図中の左）にデータをプロットしたもの、1つは**土質分類指数 I_c の深度分布**（図中の中央）を示します。どちらも類似した解析で大幅な違いはありません。見方を変えて整理しただけです。最も分かりやすいのは、その結果を整理して **CPT による土質区分**（柱状図：図中の右）です。色柱状図で示してありますので、その色に当てはまる土質分類になったと見てください。



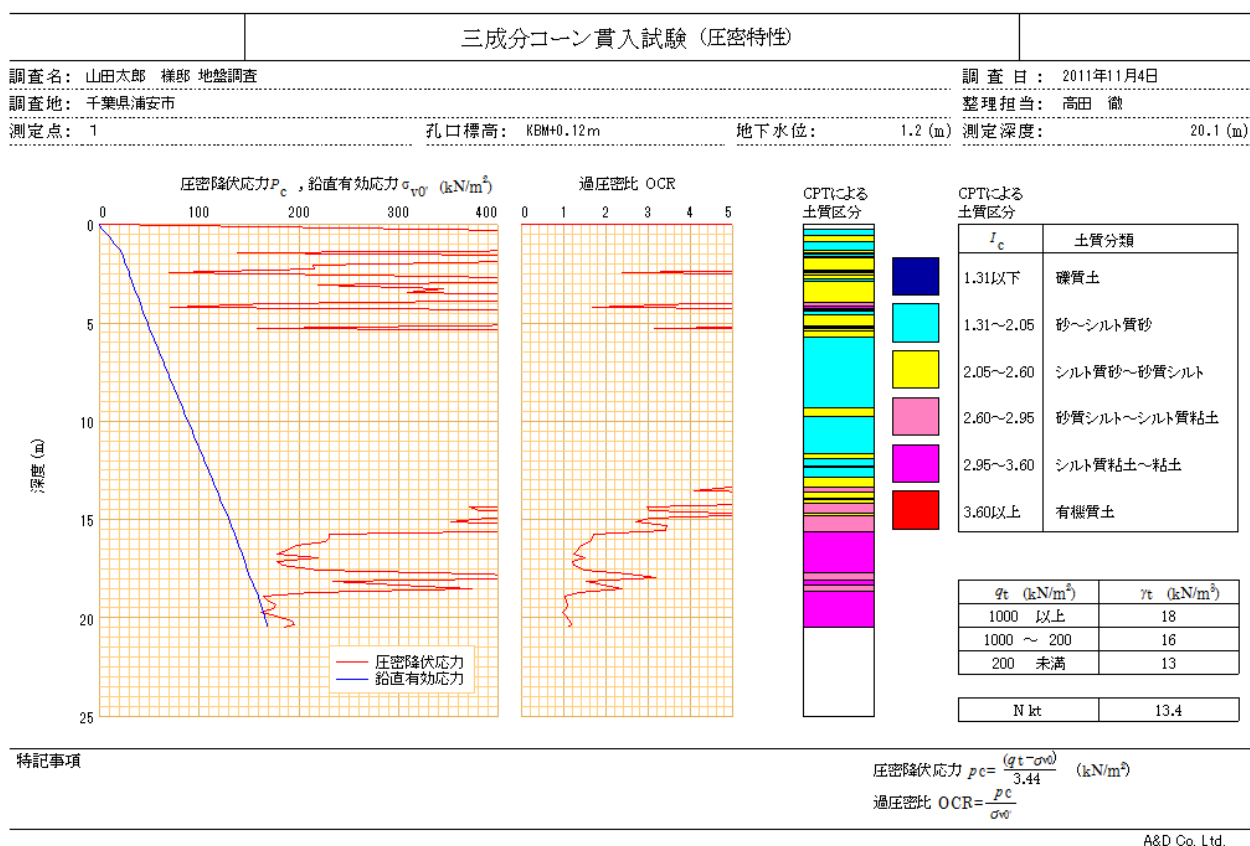
上図は、CPT データによる強度特性です。ここでは土の強度特性として、 N 値および一軸圧縮強さの深度分布で示しております。

N 値

『標準貫入試験にて求められる地盤定数。質量 $63.5 \pm 0.5\text{kg}$ のモンケン（重り）を $76 \pm 1\text{cm}$ の高さから自由落下させて、ボーリングロッド頭部に取り付けたノッキングブロックを打撃し、ボーリングロッド先端に取り付けた標準貫入試験用サンプラーを地盤に 30cm 打ち込むのに要する打撃回数を N 値と言う。よって N 値が大きいほどよく締まった地盤と言える。』

一軸圧縮強さ (q_u)

『土の一軸圧縮試験（室内土質試験の一種）にて求められる土の強さを表す指標の一つ。土に拘束圧を作用させない状態で圧縮させたときの圧縮強度。実際の土は拘束圧を受けた状態で強度を発揮する。特に砂質土は拘束圧の影響を強く受ける。一方、粘性土だと拘束圧が強度に及ぼす影響は少ないので、粘性土の強度を示す上で q_u は有効であり、 q_u が大きくなるほど、良質な粘性土と言える。』

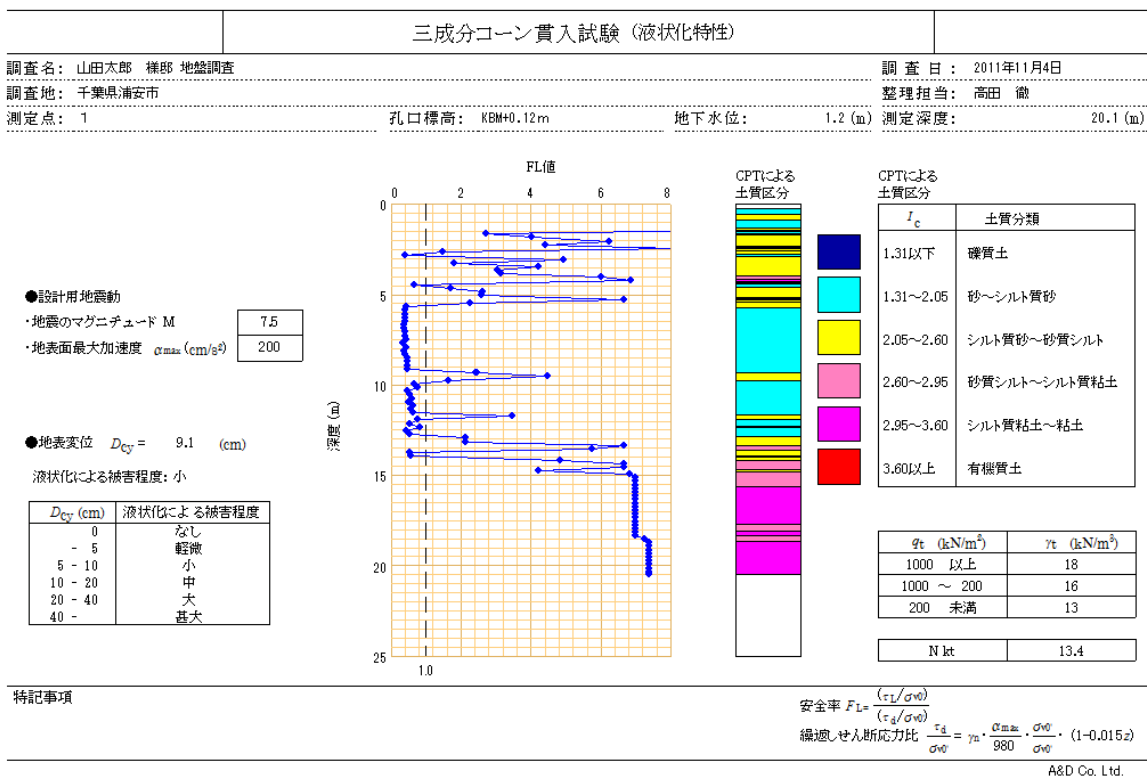


上図は、CPT データによる圧密特性です。ここでは土の圧密特性として、圧密降伏応力（左側のグラフ）、過圧密比（右側のグラフ）の深度分布で示しております。

土（主に粘性土）が圧縮（圧密）されると、ある荷重を境に圧縮量が急激に大きくなります。この応力を圧密降伏応力 P_c と言います。また現在、土にかかっている荷重を鉛直有効応力 σ_{v0} （図中の青線）と言います。

土は過去に受けた荷重を記憶します。よって切土や浸食など、地表部の土が一部取り除かれた後、その上に構造物が載るような場合、圧密降伏応力に達するまでは比較的圧縮量が小さく、反対に過去に一度も荷重を受けていない土に構造物が載れば、その荷重なりに圧縮量が大きく出ます。また乾燥収縮を繰り返すことでも P_c は大きくなるため、一般に浅層部は σ_{v0} より大きな値を有します。

圧密降伏応力（図中の赤線）は圧密するしないを見る上で重要な指標です。 P_c / σ_{v0} を過圧密比と呼び、この数字が大きいほど圧縮性の小さな土と言えます。また $P_c < \sigma_{v0}$ の土は、現段階で既に圧密降伏している（圧密中）土を意味します。この状態を“圧密未了”と言いますが、建物建設においては注意する必要があります。



上図は、CPT データによる液状化判定です。ここでは液状化判定として、 F_L 値の深度分布（右側のグラフ）および、地表変位 D_{cy} の数値（図中左側）で示しております。

F_L 値は、液状化に対する安全率のようなもので、 $F_L \leq 1$ の層が液状化層、 $F_L > 1$ の層が非液状化層となります。

液状化層は、解析時に用いた地震動の大きさによっても変化します。解析には、地震のマグニチュードおよび地表面最大加速度が必要です（図中の左に明記）。液状化層が僅かにあったとしても、それが建物に直接影響するわけではありません。液状化層の厚さや深さ、強度などが起因して、建物への影響度が決まります。それを表す指標として地表変位 D_{cy} を示しており、この数値により被害程度が評価できます。 $D_{cy}=5$ 以下であれば被害程度が“軽微”、 $D_{cy} = 5-10$ で“小”、 $D_{cy} = 10$ 以上で“中～大～甚大”とあらわされます。 $D_{cy} = 5$ 以下であれば、液状化対策を施す必要のない地盤と言えますが、 $D_{cy} = 10$ 以上であれば、液状化による補強を推奨します。なお $D_{cy} = 5-10$ は、液状化対策を要するボーダー領域と言え、資料調査も含めて総合的に判断するなど追加協議が必要な数値だと判断します。

Q10. 調査依頼するとき、どうすればいいの？

A10.

- ・調査地の案内図，敷地配置図などを用意され，表 10.1 に示す CPT 可能な調査会社にご連絡願
い，担当者の指示に従ってください。
- ・このとき調査目的を明確に伝え，かつ事前にスウェーデン式サウンディング等の地盤調査結果
があればそれをご用意ください。場合によっては，CPT に不向きな地盤または調査地であると
して調査をお断りすることもありますのでご了解ください。

表 10.1 指定調査会社一覧

No.	会社名	TEL	担当者
1	ジオソリューション (アースリレーションズ)	03-5826-5560	須々田
2	システムプランニング東京 (関東)	042-670-3115	小池
3	エイチ・ジー・サービス (関東)	043-290-0112	菅澤，吉種
4	アキュテック (関東)	048-723-7800	加藤
5	システムプランニング (東北)	022-374-9808	妹尾
6	報国エンジニアリング (九州)	092-583-4325	森
7	トラバース (関東)	047-359-1191	渡邊

Q11. CPT の調査費・調査工程について教えてください？

A11.

（調査費）

- ・調査費は調査場所や調査本数等によって異なります。
- ・また調査単価は研究会で統一しておりませんので，調査会社（表 11.1 参照）にお問い合わせ下さい。

表 11.1 指定調査会社一覧（再掲）

No.	会社名	TEL	担当者
1	ジオソリューション (アースリレーションズ)	03-5826-5560	須々田
2	システムプランニング東京 (関東)	042-670-3115	小池
3	エイチ・ジー・サービス (関東)	043-290-0112	菅澤，吉種
4	アキュテック (関東)	048-723-7800	加藤
5	システムプランニング (東北)	022-374-9808	妹尾
6	報国エンジニアリング (九州)	092-583-4325	森
7	トラバース (関東)	047-359-1191	渡邊

（調査工程）

- ・敷地（または同一造成区域）内で調査本数2本までであれば1日で調査可能です。
- ・調査1～2日後を目安に調査結果報告書の提出が可能です。

Q12. CPT の調査計画の仕方は？

A12.

CPT は、SWS に比べると高額です。よって SWS と同様な考えで、**計画建物位置の4隅中央の5ヶ所で CPT を実施することは不経済**です。CPT の調査精度を考慮すれば、建物敷地内で1～2本の調査でよいと考えます。ただし CPT 1 本のみでの調査結果で基礎設計することはできません。何故なら1本の調査では、水平方向に対して均一地盤であることが前提条件になるからです。地形的にも均一だという可能性が高くても、今、**対象としているのは海洋ではなく宅地**です。人為的に改変された可能性が高いと見て水平方向の調査を含めて判断することが必要となります。当研究会では**水平方向の調査を SWS で見る**ことを推奨しております。

よって調査計画には、以下の2パターンが考えられます。

(パターン1)

SWS が既に実施してあって、その SWS 結果では補強選定が難しく、**追加調査として CPT を実施する場合**。

(パターン2)

資料調査などで SWS だけでは補強選定が難しいことが予想され、**SWS と CPT を同時に調査する場合**。

当研究会の CPT 指定調査会社の多くは、SWS も調査できます。パターン2のように、SWS と同時に CPT も行えば、工程やコストの短縮にも繋がる可能性がありますので是非ご検討ください。

Q13. CPT に必要な敷地スペースは？

A13.

当研究会で開発した CPT の貫入機は、表 13.1 に示す 2 タイプの貫入機があります。1 号機は、2t ユニック車、2 号機は 1 ボックス車（写真 13.1）にて搬入します。対象宅地が 2t 車の通行さえ困難な道路状況であれば 2 号機を推奨します。2 号機は CPT 専用機で、1 号機はボーリング機能も併用しております。表層部が硬かったり、中間の硬質層をボーリングで貫入して調査したいとなれば、1 号機が望まれます。また両貫入機は貫入能力を高めるために、地盤に反力用アンカーを打設します（写真 13.2）。そのアンカーからワイヤーを介して貫入機を抑え付けてから貫入します。よってこのアンカーを打設するためのスペースも必要となります（表中の装置図参照）。

以上を踏まえ、この貫入機が調査したい位置に設置できるスペース（**3m×3m 以上**）が確保できれば調査可能です。

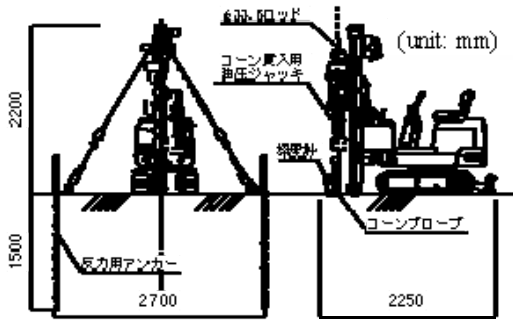
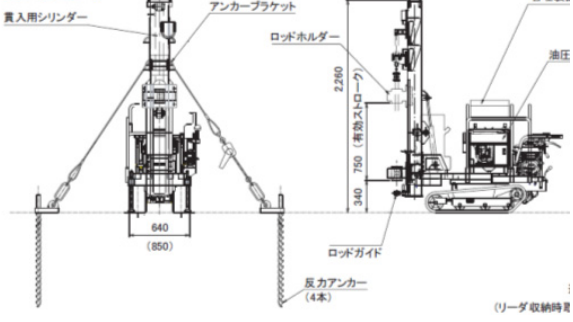


写真 13.1 車両搭載状況（2号機）



写真 13.2 反力用アンカーの打設状況（左:1号機, 右:2号機）

表 13.1 CPT 貫入機の仕様

	1 号機	2 号機
外形写真		
装置図		
仕様	【本体】 寸法：L 2140 mm × W 790 mm × H 2450 mm 質量：1000 kg 【油圧ユニット】 圧力：17.2 MPa，油量：9.3 L/min，フィード力：50 kN，ストローク長：300 mm 【反力用アンカー】 名称：スパイラルアンカー 寸法：φ 50 mm × L 1500 mm	【本体】 寸法：L 1870 mm × W 810 mm × H 1150 mm (運搬時) 質量：490 kg 【油圧ユニット】 圧力：17.2 MPa，油量：9.3 L/min，フィード力：50 kN，ストローク長：750 mm 【反力用アンカー】 名称：スパイラルアンカー 寸法：φ 50 mm × L 1000 mm

Q14. 調査手順について教えてください。

A14.

図 14.1 に CPT 調査のフローを示します。

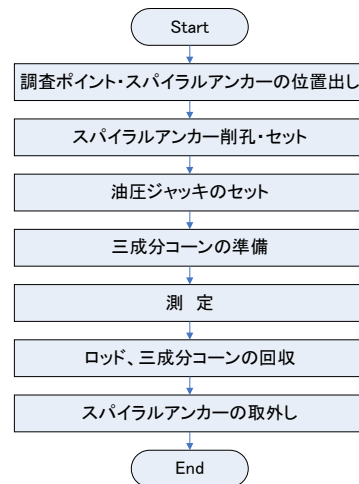


図 14.1 CPT 調査フロー

- ①調査ポイントとアンカーポイントをマーキングします。
- ②CPT 貫入機を操作して、アンカーポイントにスパイラルアンカーを打設します。スパイラルアンカーは調査 1 ポイント当たり 2～4 本打設します。
- ③スパイラルアンカーと CPT 貫入機をワイヤーで固定します。
- ④ロッドの先端に三成分コーンを取付け、予め所定深度分のロッド全てに測定ケーブルを挿入しておきます。センサー調整を確認した後、油圧ジャッキ内に三成分コーンを挿入し、地面に垂直に突き立てます。エンコーダ（深度計）をロッドに取り付けます。
- ⑤油圧を調整しながら、所定速度（2cm/s）でコーンを貫入します。油圧シリンダの伸縮、ロッドの継足しを行いながら速やかに貫入します。また任意の深度で消散試験を実施します。
- ⑥所定深度後、測定を終了しロッドを引抜きます。ロッドを引抜いた後の測定孔を利用して地下水位を計測します（地下水位は間隙水圧計により推定可能で、あくまで再確認のためです）。
- ⑦スパイラルアンカーを引抜き、現地の清掃・養生を行って機資材を搬出します。

調査に要する時間は、1 本当たり半日程度かかります。

Q15. もっと詳しく CPT を勉強したいけど参考文献はありますか？

A15.

CPT に関する参考文献リストの一部を示します。ご参照ください。

1. 最近の CPT テクノロジーとその設計・環境・防災に関する研究委員会：最近のサウンディング技術と地盤評価シンポジウム発表論文集，地盤工学会，2009.10.
2. 日本建築学会編：建築基礎構造設計指針，日本建築学会，pp. 61～72，1988.
3. 深沢健：粘性土地盤におけるコーン貫入試験の適用性に関する実証的研究，東京工業大学学位論文，2004.
4. 鈴木康嗣，時松孝次，實松俊明：コーン貫入試験結果と標準貫入試験から得られた地盤特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 566 号，pp.73-80，2003.
5. 實松俊明，鈴木康嗣，時松孝次：コーン貫入試験と標準貫入試験の比較，第 32 回土質工学研究発表会講演集，PP.181-182，1997.
6. 武居幸次郎，伊佐野建：粘性土の非排水せん断強度とコーン先端抵抗の関係，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp. 613-614，1998.
7. 高田徹，関平和，松本樹典，藤井衛，松下克也，佐藤隆：三成分コーン貫入試験による地盤の評価手法に関する考察，地盤工学ジャーナル，Vol. 4, No. 2, pp.157-170, 2009.
8. Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D. and Grieg, J.: Use of piezometer cone data, Proceedings of the ASCE Specialty Conference, In-situ'86, Use of In Situ tests in Geotechnical Engineering, pp. 1263～1280, 1986.
9. Robertson, P. K.: Soil classification using the cone penetration test Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 151～158, 1990.
10. 田中洋行，榊原基生，後藤健二，鈴木耕二，深沢健：我が国の正規圧密された海成粘性土のコーン貫入試験から得られる特性，港湾技術研究所報告，Vol. 31, No. 4, pp. 61～92, 1992.
11. 三村衛，吉村貢：多機能型 RI 密度コーン貫入試験機の開発と測定精度向上に関する研究，土木学会論文報告集 C, Vol.63, No.2, pp. 649～661, 2007.
12. Lunne, T., Eidsmoen, T., Gillespie, D. and Howland, J.D.: Laboratory and field evaluation of cone penetrometers, Proc. of the ASCE Specialty Conference, In-situ'86, Use of In Situ tests in Geotechnical Engineering, pp. 714～729, 1986.
13. 山根信幸，深沢健，土田孝，田端竹千穂：擬似過圧密海成粘性土の強度のばらつきに関する研究，地盤工学ジャーナル，Vol. 2, No. 3, pp. 168～191, 2007.