

三成分コーン貫入試験

高田 徹*

* TAKATA Toru、(株)設計室ソイル 技術部長 東京都中央区日本橋 3-3-12-4F

1. はじめに

戸建住宅の地盤調査は、標準貫入試験（SPT）や土質試験よりも、簡便性や経済性を重視してスウェーデン式サウンディング（SWS）が用いられる。このSWS主体の調査の流れは、今後もしばらくは続くと思われる。

一方、三成分コーン貫入試験（Cone Penetration Test：CPT）は調査精度と経済性を兼ね備えた調査法として、海外で有名な調査法である。しかし国内での利用は極めて少なく、その存在すら知らない技術者も多いと思われるが、利用価値は比較的高い。その理由として、SPTや土質試験はボーリングを併用するため時間と費用が多くかかるが、CPTは貫入ロッドに取り付けたコーンを圧入するだけで地盤性状が把握できるからである。またSPTやSWSは地上で貫入抵抗値を測定するのに対し、CPTはコーンに内蔵されたセンサーで、直接貫入抵抗値を測定する。CPTは、貫入ロッドの重量や周面摩擦の影響を受けない唯一のサウンディング手法だと言える。

CPTが普及しない要因は、SPTやSWSにはその測定値から構造物の基礎設計が可能な基準や指針類が豊富にあるのに対して、CPTにはそのような資料が少なく、実務で使用し難いことや、住宅地など狭小地向けの小型機を所有している調査会社が少ないことも一因である。

上記の背景を踏まえ、本稿では、CPTの試験方法とその留意点について概説する。

2. 試験方法

【概要】

コーン貫入抵抗、周面摩擦抵抗、間隙水圧を電氣的に測定可能なコーン（写真-1、図-1）を地盤に貫入させ、それら3つの成分を測定する調査法。貫入速度は 20 ± 5 mm/sとし、3つの成分は深度計により、深度1 cm毎のデータが得られる。貫入装置の貫入反力は、装置の実荷重方式、またはアンカー方式（写真-2）があり、狭小地だと後者が主体である。

本稿では、三成分コーン貫入試験と呼んでいるが、近年のエレクトロニクス技術の発達により様々なセンサーを内蔵したコーンも開発されていることから、総じて“電気式コーン貫入試験”とも呼ばれている。

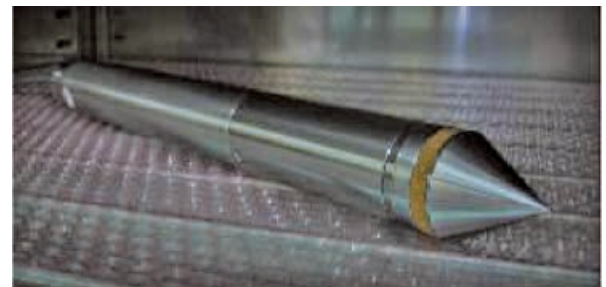


写真-1 電気式コーン外観

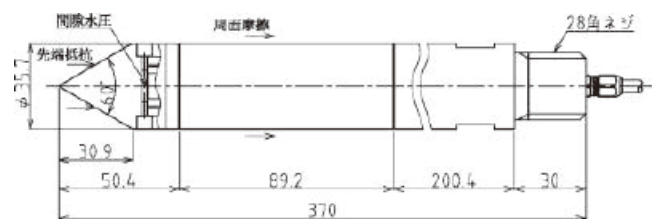


図-1 電気式コーン形状



写真-2 CPTの試験状況

【規格・基準】

JGS1435-2012 「電気式コーン貫入試験方法」

【分類】

静的貫入試験（国告示1113号：地盤調査方法に該当）

【適用範囲】

コーン仕様や貫入装置の貫入力によるが、概ね、岩盤

を除く未固結土を対象とする。

【得られる地盤情報】

- ・コーン貫入抵抗 (q_t)
- ・周面摩擦抵抗 (f_s)
- ・間隙水圧 (u)

上記3つの深度分布が得られる。以下にCPT結果から推定できる主な地盤定数を示す。

・ N 値

$$N = \begin{cases} 0.341 I_c^{1.94} (0.001 q_t - 0.2)^{(1.34 - 0.0927 I_c)} & \text{for } q_t > 200 \text{ kN/m}^2 \\ 0 & \text{for } q_t \leq 200 \text{ kN/m}^2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

I_c : 土質分類指数 (詳細は3章参照)

・ q_u : 一軸圧縮強さ

$$q_u = 2 \cdot (q_t - \sigma_{vo}) / N_{kt} \quad \dots\dots\dots (2)$$

σ_{vo} : 鉛直全応力

N_{kt} : コーン係数 (8~16)

・ c : 土の粘着力

$$c = q_u / 2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

・ F_c : 細粒分含有率

$$F_c = I_c^{4.2} \quad \dots\dots\dots (4)^{1)}$$

・ p_c : 圧密降伏応力

$$p_c = (q_t - \sigma_{vo}) / 3.44 \quad \dots\dots\dots (5)^{2)}$$

3. 試験の特徴と留意点

表-1にCPTの主な長所と短所を示す。CPTは、高精度かつ得られる地盤情報が多いサウンディング試験として有名だが、その理由として、①地中で抵抗値を測定している点と、②コーン貫入抵抗だけでなく周面摩擦抵抗、間隙水圧を測定することで土質分類に優れている点が挙げられる。

式6は、土質分類指数 I_c で、この I_c 値から表-2に示すような土質分類ができる。その他、図-2に示すような土質分類判別図なども提案されている。

一般に熟練した調査者であれば、 N 値や N_{sw} など貫入抵抗値だけでも概ね土質がイメージできたりするが、確実性に欠けることも多々ある。CPTが土質分類に優れるのは、貫入抵抗値に加えて、特にコーン貫入時の間隙水圧を測定する点であろう。具体的には、土の粒度と透水の高い相関性を用い、粘性土は透水性が低いことからコーン貫入

表-1 CPTの長所と短所

長所	①深度1cm毎と細かく連続的に測定できるので、地盤の硬軟度合の細かな変化が分かる。 ②コーン貫入抵抗値は、貫入ロッドの重量や周面摩擦の影響を受けない。 ③土質分類、地下水位の推定ができることから、地盤の硬軟だけでなく、液状化や圧密など多様な地盤評価ができる。
短所	①センサーを扱うのでセンサーのキャリブレーションが重要となる。調査者の熟練が必要。 ②電気式コーンは比較的高額でかつ消耗度合も高いので、他調査に比べ、機資材損料が高くなる。

時の間隙水圧は静水圧よりも高くなる。一方、砂質土では、透水性が高いため過剰間隙水圧が働いても瞬時に消散されるため、ほぼ静水圧に近い挙動を示す。こういった水圧の挙動も土質分類に利用できる。

また、ボーリング調査の土質分類の多くがコア鑑定者の目視観察に委ねるのに対して、CPTは電気式かつ1cm毎に測定することから、数値として土質が判別でき、かつ細かな土層の変化も見逃さないといった特徴もある(図-3参照)。

さらには、間隙水圧の挙動や消散試験を行うことで静水圧が把握できることから、地下水位が求められる。このように、CPTだけで土質分類(細粒分含有率)や地下水位が推定できることから、液状化判定にも有効となる。

CPTの留意すべき点としては、センサーが正常であることを確認して測定することが何よりも重要である。これは電気式に測定する調査法全てに言えることだが、センサーのキャリブレーションが適切でなければ、折角の高精度な調査も意味がない。調査者はその数値が直接地盤評価に繋がることを踏まえて十分注意して調査する必要がある。

$$I_c = \{ (3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2 \}^{0.5} \quad \dots\dots\dots (6)$$

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} : 鉛直有効応力

表-2 I_c による土質分類の方法³⁾

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

4. 試験結果の評価

CPTのアウトプットは、図-3に示すような三つの成分(q_t , f_s , u)の深度分布である。この深度分布を元に、式1~式6で示される推定式により、地盤強度、圧密、液状化などが評価できる。

・土の強度特性

図-4にCPT、SWSデータから推定した N 値の深度分布の2例を、図-5に一軸圧縮強さ q_u の深度分布の2例を実測値と共に示す。なおSWS結果の推定は、いずれも稲田式を用いた。各調査ポイントは約2mの離隔がある。

図-4よりCPT、SWSデータから推定した N 値の深度分布は、実測結果と類似しているが、CPT結果の方がSWS結果よりも実測値とよく一致している。ただし、図-4(a)の深度6~14mで、実測値(SPT)が $N=0$ と一様にモンケン自沈しているが、CPT、SWS結果では $N=0$ になって

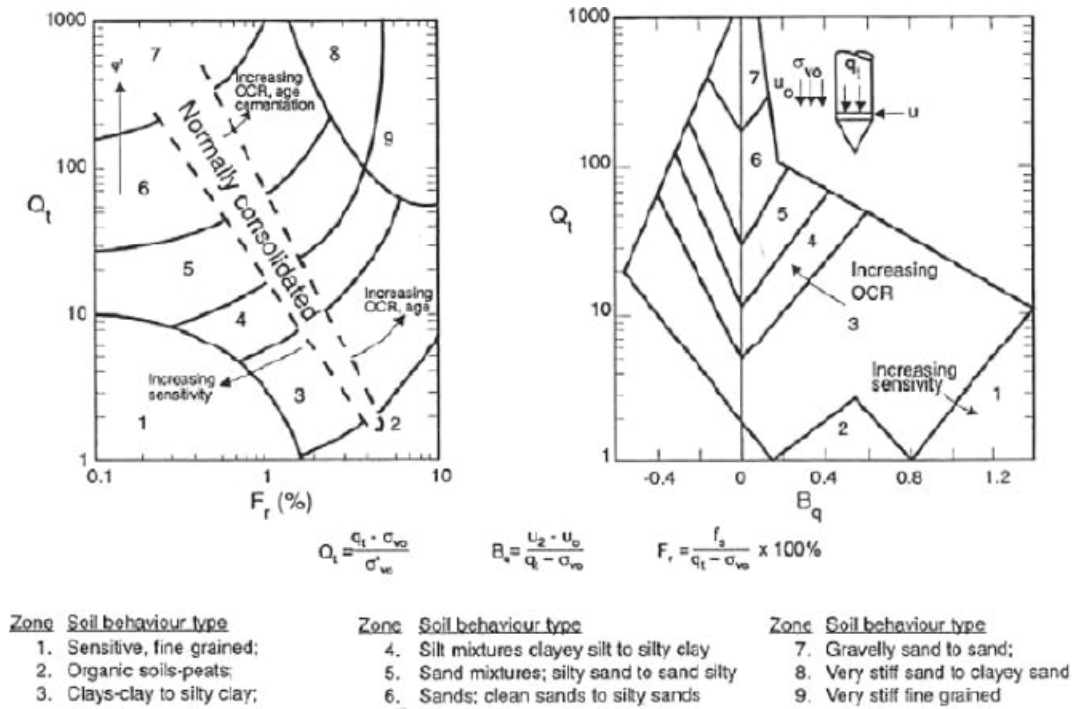


図-2 土質分類判別図 (左: $Q_t - F_r$ 、右: $Q_t - B_q$)⁴⁾

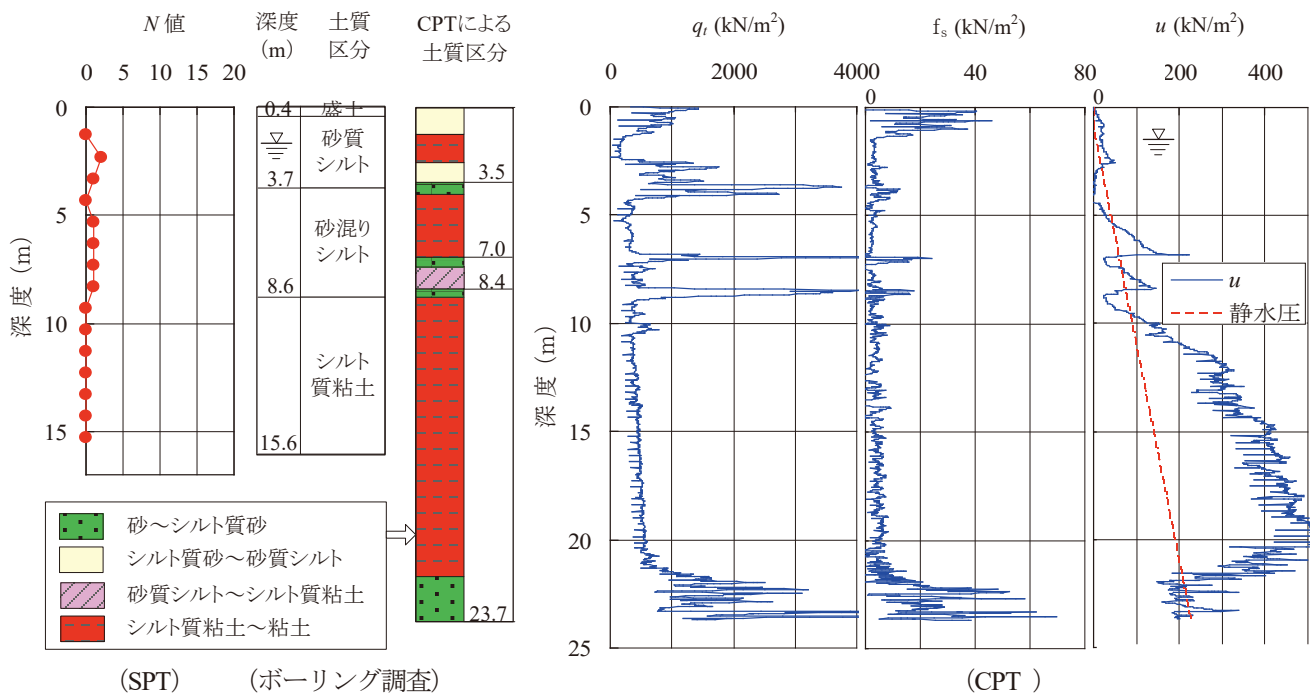


図-3 CPT 結果の一例 (SPT、ボーリング調査含む)

いない。これは深さが増すごとにロッド自重の影響が実測値 (SPT) に含まれるからである。またSWS結果では、深度6～12m (図-4 (a)) で一定値 ($N=1.5$) を示している。これはSWS結果も実測値 (SPT) と同様にロッド自重の影響を受けるからである。一方、CPTはロッド自重の影響を受けずに貫入抵抗値を直接測定している。

図-5に示す q_u の深度分布では、実測値 (一軸圧縮試験) が4測点と少ないが、CPT結果の方がSWS結果よりも実測値とよく一致しているのが分かる。

・圧密降伏応力の評価

図-6に、CPT、SWSデータから推定した圧密降伏応力 p_c と鉛直有効応力 σ_{v0}' の深度分布を、圧密試験で求めた p_c と併せて示す。図-6 (a) は、佐賀県有明海近傍の水田跡地を調査の半年前に約1.6m盛土した宅盤で、図-6 (b) は、埼玉県越谷市の住宅地で調査の半年前に建替えに伴い0.4mの盛土を施した地盤である。

SWSでは、図-6 (a) で深度1.75m以深、図-6 (b) で深度8.75m以深がSWSでの自沈層に相当する。この自沈層では、SWSデータから推定した p_c は深度方向に一定

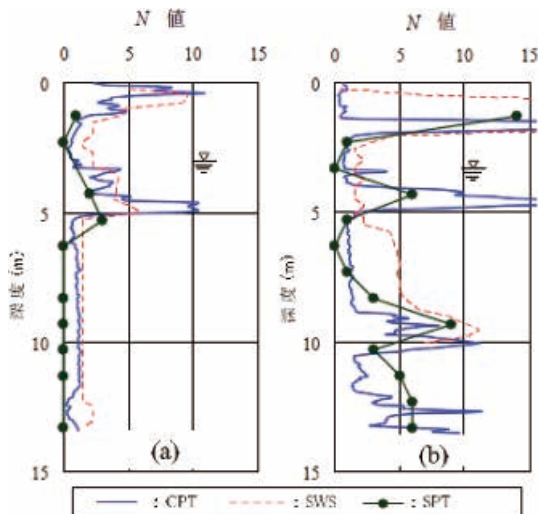


図-4 N値の深度分布の比較
【調査地：(a) 千葉県流山市、(b) 山形県酒田市】

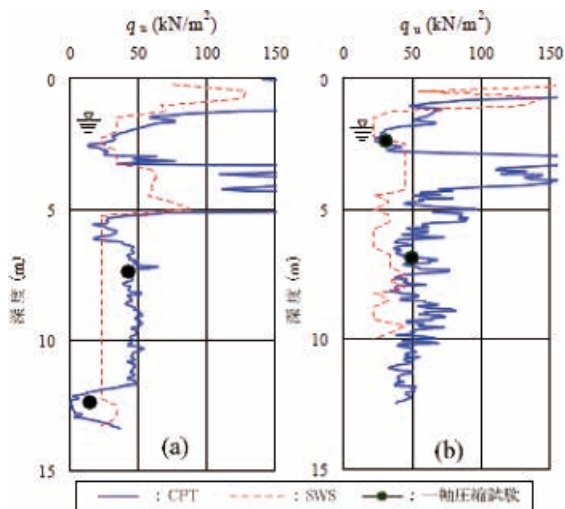


図-5 q_u の深度分布の比較
【調査地：(a) 千葉県流山市、(b) 埼玉県草加市】

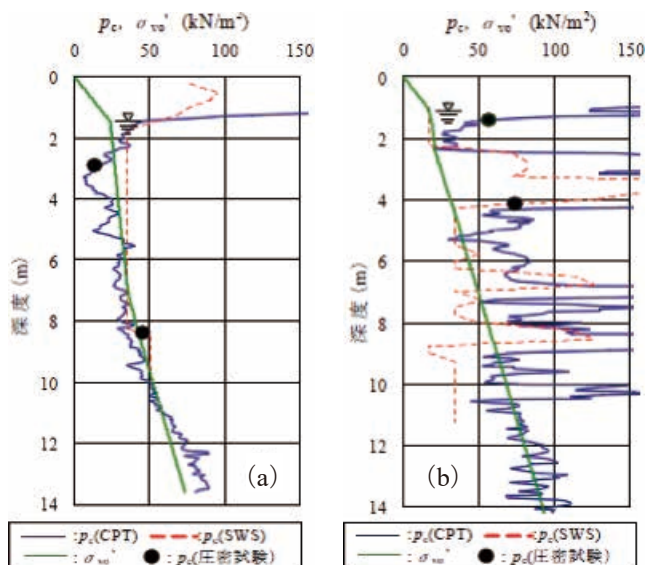


図-6 p_c の深度分布の比較
【調査地：(a) 佐賀県杵島郡、(b) 埼玉県越谷市】

値になっている。計4点での実測値ではあるが、CPTによる p_c は、SWSによる推定結果よりも、実測結果に近いと言える。

・液状化判定

建築基礎構造設計指針⁵⁾では、ボーリング結果（SPT+粒度試験）から液状化発生に対する安全率 F_L 値を求める場合、補正N値から土の液状化強度 R を求める手法が示されているが、同じようにCPT結果から直接 R を求める手法も示されている。具体的には、まずCPT結果から、式7に示す補正コーン貫入抵抗値 q_{cl} を求め、図-7中の曲線に対応させることで R が推定できる。

$$q_{cl} = F(I_c) \cdot q_t \cdot C_N \quad \dots\dots\dots (7)$$

$F(I_c)$ ：図-8より求まる粒度（土の挙動特性）に関する補正係数

C_N ：拘束圧に関する換算係数 $(= (98 / \sigma'_{vc})^{0.5})$

図-9は、液状化した同宅地内で実施したCPT、SWS、ボーリング調査（SPT+粒度試験）の結果である。図中の土質柱状図によると、地下水位は深度3.3mで、深度3.3mまで $N=4$ 程度の盛土・埋土を有し、深度3.3～10.5mまで $N=10\sim20$ 程度の礫混り粗砂・細砂で、深度10.5m以深はシルト質粘土、固結粘土であった。

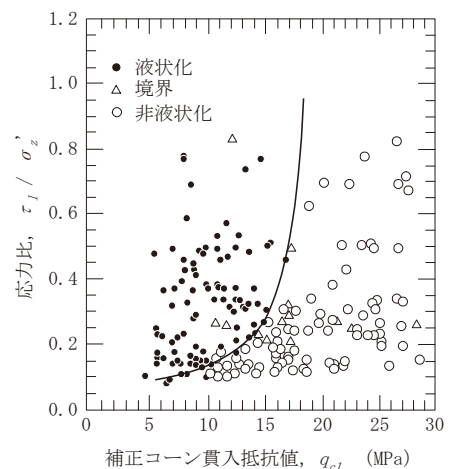


図-7 q_{cl} と液状化抵抗比の関係⁵⁾

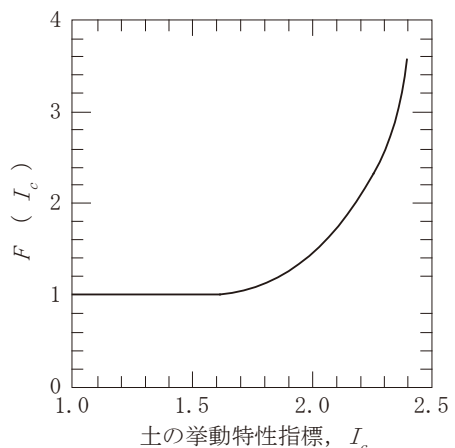


図-8 I_c と $F(I_c)$ の関係⁵⁾

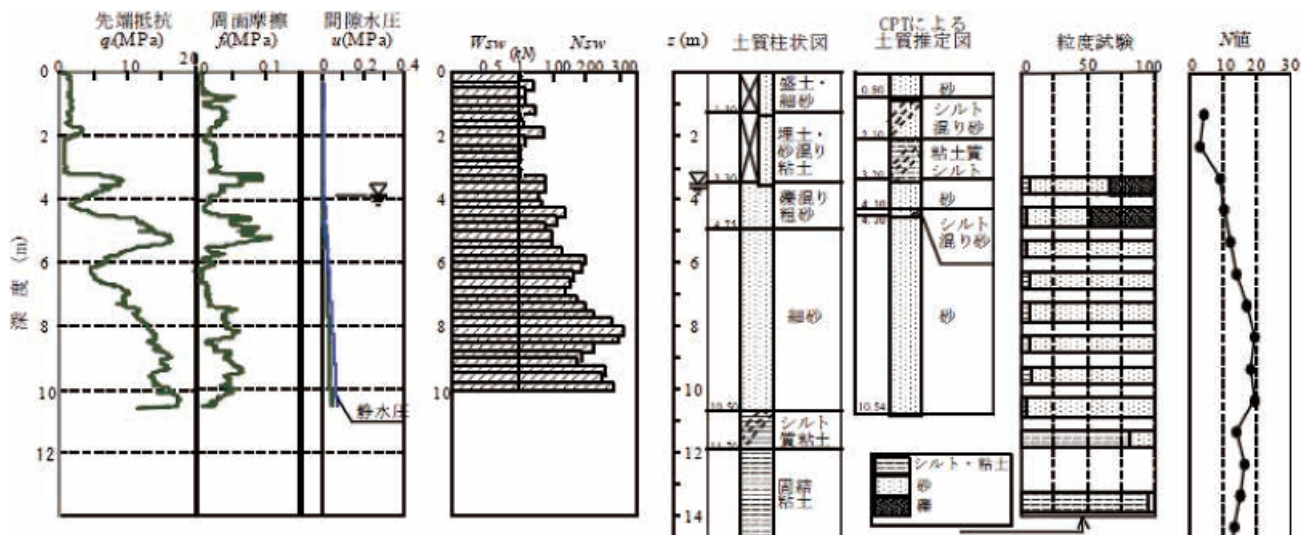


図-9 液状化地盤における CPT、SWS、ボーリング調査（SPT + 粒度試験）結果（調査地：新潟県柏崎市）

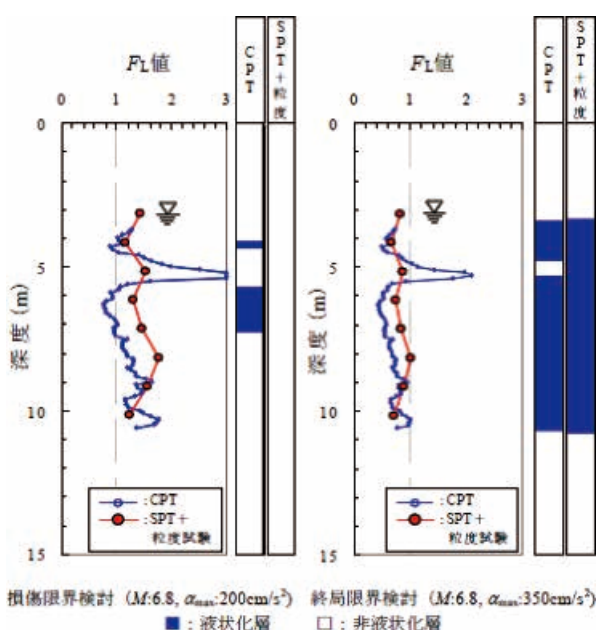


図-10 液状化判定結果（調査地：新潟県柏崎市）

図-10に N 値（SPT）と粒度試験結果から求めた F_L 値とCPT結果から求めた F_L 値の深度分布を示す。図から分かるように、CPT結果から求めた F_L 値は、 N 値と粒度試験結果から求めた F_L 値に比べて、全体的にやや小さくなる傾向がある。またCPT結果から求めた F_L 値は、深度4.5～5.8mで急激に大きな値を示している。これらの違いは、両調査ポイントの地盤強度の不均一性や、両調査法の測定精度の違いによるものと考えられる。具体的には、SPT（ N 値）は深度1m毎に調査し、また深度0.3m区間で N 値を評価するため、薄い地層の変化を見逃すおそれがある。一方、CPTはその深さの貫入抵抗値を深度1cm毎に連続的に測定するため、薄い地層の変化にも対応できると言える。

図-10より両調査結果で求めた液状化層は、先に述べた理由により、細部で異なる判定となっている。しかし大局的に見れば両調査結果ともほぼ類似した傾向を示しており、地下水位以下の砂質土層は、損傷限界検討用の地震力

だと液状化せず、終局限界検討用の地震力では液状化すると判定できる。

5. おわりに

本稿では、CPTの試験方法とその留意点、ならびに試験結果の比較について述べた。

CPTは静的貫入試験であり、貫入能力は動的貫入試験に比べれば劣るものの、得られる地盤情報は比較的多い。SWS結果で基礎設計が困難な場合の追加調査法の一つとして、知っておいて損はない。

参考文献

- 1) 實松俊明, 鈴木康嗣: コーン貫入試験結果と地盤物性との関係（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講演集, pp. 59-60, 2005.
- 2) 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.
- 3) Jefferies, M. G. and Davies, M. P.: Use of CPTu to estimate equivalent SPT N_{60} , ASTM, Geotechnical Testing Journal, Vol. 16, No. 4, pp. 458～467, 1993.
- 4) Robertson, P.K.: Soil Classification Using the Cone Penetration Test, Canadian Geotechnical Journal, Vol.27, No.1, pp. 151～158, 1990.
- 5) (社) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001.