

三成分コーン貫入試験による宅地地盤の評価

高田徹 ● (株) 設計室ソイル

はじめに

建設事業におけるすべての地盤調査計画は、その前提条件として対象区域や対象となる構造物の重要度および調査目的を十分に理解したうえで、調査方法や数量を計画し実施されている¹⁾。戸建住宅の場合、低層・軽量構造物なため深さ10mまでの深度が問題となることや、宅盤調査に充てられる安価な予算を考えれば、スウェーデン式サウンディング試験(SWS)はまさに最適な調査法といえる。また、SWS結果で設計可能な地盤補強工法も数多くあり、SWSが定着したのは至極自然のように思われる。

一方、SWSには古くから種々の問題点の指摘がある²⁾。これらの多くは簡便な調査法ゆえの指摘ともれるが、利用者はその指摘をふまえて結果を解釈すべきだと考える。一例

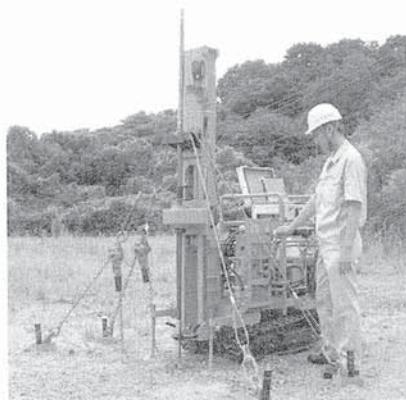
として、2007年7月、新潟県中越沖地震により木造家屋の全壊など数多くの被害が見受けられたが、中にはSWS結果に基づき建設され液状化によって不同沈下した半壊状態の家屋も少なからず存在した。これは一般の設計用地震動よりも大きな地震動が実際に生じていたからともいえる。しかし、冒頭に示した対象区域や調査目的を十分に理解すれば、液状化の恐れのある区域では液状化判定を行い確認する必要がある、通常のSWSでは必要十分な判定はできない。よって設計者はSWS結果や資料調査を解釈し、追加調査の必要性を判断することが重要である。

筆者は、これまでにこのSWSの追加調査として三成分コーン貫入試験(CPT)の導入を検討してきた(図1、写①)^{3), 4)}。CPTに着目した最も大きな理由は、多様な地盤評価(①土質判別、②支持力、③圧密、④液状化)が可能な点にある。CPTは、静

的貫入試験でありN値30以上では貫入不能に陥るが、軟弱な粘性土層や液状化の可能性のある緩い砂層では、高精度で連続データが瞬時に得られるため有効であると考えられる。本稿は、宅盤調査におけるCPTの位置付けや留意点などについて概説するとともに、宅盤でCPTを行った調査事例を報告するものである。

CPT適用のメリット

住宅の基礎設計では、通常、SWS結果で基礎の設計ができないと判断した場合(例えば、自沈層が連続する、液状化判断を要するなど)、その調査目的に応じた精密な調査を追加して設計している。従来は追加調査には、その調査目的にもよるがボーリング調査、標準貫入試験(SPT)により土質や支持層を、室内土質試験により各種地盤定数を求める。これらの手法は、SWSに比べると調査



①CPT試験状況

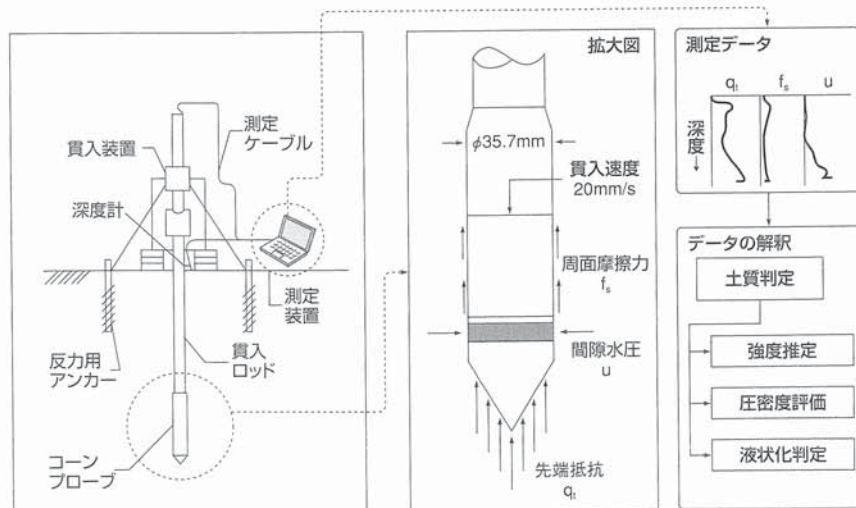


図1 CPT試験装置の構成とデータの評価フロー

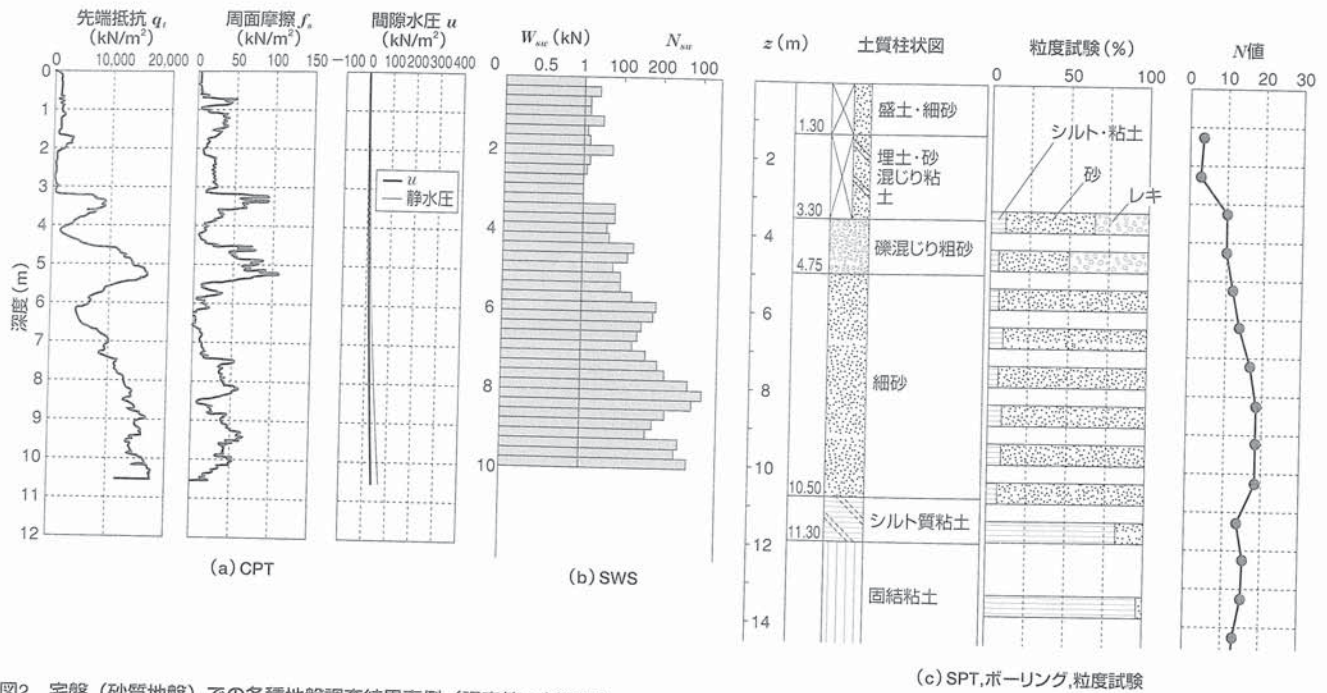


図2 宅盤（砂質地盤）での各種地盤調査結果事例（調査値；新潟県）

費用が大幅に嵩む。加えて室内土質試験を行えば約1週間以上（圧密試験だとさらに長い）を要して試験結果がわかるため、工事全体に及ぼす工期の影響は極めて大きくなる。したがって、この追加調査を行わずにSWS結果の不透明さのまま基礎工法を設計し、結果として沈下事故が生じたり、その逆で施主に過剰な基礎設計を提案するケースも見られる。

宅盤調査にCPTを適用する利点は、液状化から圧密、支持力問題で必要な地盤情報を高精度かつ迅速に取得できることである。CPTデータはすべて電子データであり、現場から事務所へデータ転送すれば、調査した日に基礎設計まで可能となり、業務全体の簡略化・省力化にもつながる。また、調査費用においても、例えば液状化判定を目的として標準貫入試験や粒度分布を行えば1か所約30万円はかかるが⁵⁾、CPTであればその半額程度と廉価に行える。以上、宅盤の追加調査法には、短時間に有用な地盤情報が得られかつ経済的な手法が望まれているが、CPTはその手法の一つとして有効であると考える。

CPT結果の解釈と適用例

液状化判定

液状化の判定方法は、一般に地盤調査・土質試験から液状化抵抗比 R を、設定した地震力からせん断応力比 L を求め、これらより液状化安全率 $F_L (=R/L)$ によって判定する簡易法がよく利用される。地盤中の任意の深さにおける液状化抵抗比 R を求めるには各種の方法があるが、日本建築学会発行の『建築基礎構造設計指針』（基礎指針）⁶⁾では、信頼性の高い方法として以下の2種類を示している。

- ① SPTによる N 値と粒度試験による細粒分含有率 (f_c) から液状化抵抗比 R を推定する方法
- ② CPTによる貫入抵抗 q_t 、周面摩擦力 f_s 、間隙水圧 u から液状化抵抗比 R を推定する方法

また、SWS結果に基づいた簡便な液状化判定法も提唱されている⁷⁾。ただし、土質（粒度）の調査は、別途、試験孔に簡易サンプラーを挿入し土質試料を採取して粒度試験を行うが、このサンプラーは通常のSWS

では実施しない。加えて粒度試験を要するため迅速には判定できない。

図2に、砂質地盤の宅盤（新潟県）で行ったCPT調査事例を示す。なおここではCPTの適用性を評価するために離隔8mの位置でボーリング調査と標準貫入試験（SPT）、粒度試験を実施した。

図3に、当敷地のSPTと粒度試験結果、およびCPT結果に基づく液状化判定の比較を示す。これらの判定法はいずれも基礎指針に準じている。図3より両調査結果に基づく F_L 値はほぼ類似した分布傾向を示し、損傷限界検討に用いた地震力では細砂層（GL-4.75m～-10.5m）の F_L 値はおおむね1以上となるが、終局限界時の F_L 値は両調査とも1を下まわり液状化の可能性のある地層と判定される。また、建物全体に及ぼす液状化程度を評価する手法として、 P_L ¹⁾や D_{cy} ⁸⁾を用いる指標があるが、基礎指針では D_{cy} を提唱している。両調査法で用いる D_{cy} （図3中の表）は1cm程度の差はあるものの、液状化の程度は両者で一致し、大差なく評価できている。

液状化の判定に必要な主な調査項

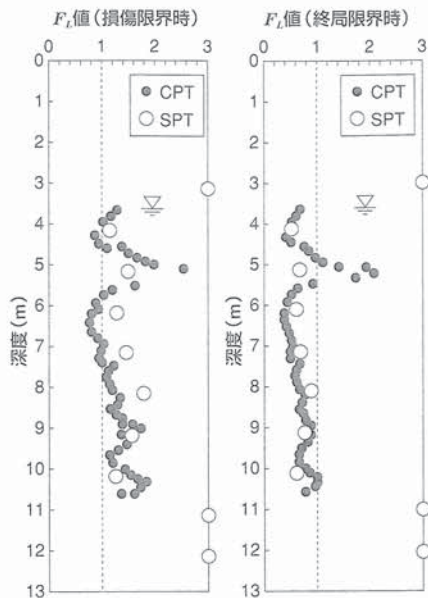


図3 液状化判定結果
(入力条件：マグニチュード6.8，地表面水平加速度：(損傷) 200cm/s²，(終局) 350cm/s²)

P_c と D_{cy}

判断指標	P_c		D_{cy} (cm)	
調査方法	SPT	CPT	SPT	CPT
損傷限界	0.0	1.2	0.0	1.0
終局限界	10.0	13.2	8.0	9.2

D_{cy} と液状化の程度の関係

D_{cy} (cm)	液状化の程度
0	なし
5	細微
5~10	小
10~20	中
20~40	大
40	最大

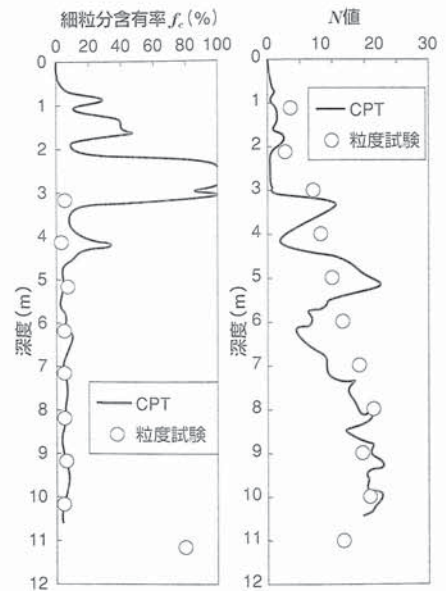


図4 N値，細粒分含有率の深度分布

目には，地盤の締めり方の程度と土の粒度特性が必要になる。図4に，N値および細粒分含有率の深度分布をCPTによる推定値とともに示す(換算式は文献⁹⁾参照)。当敷地の細砂層(GL-4.75m~10.5m)は，粒度試験結果より $f_c=10\%$ 程度で深度方向にもほぼ均一であったが，CPTにおいても類似した傾向を示している。一方，その細砂層のN値は，CPTで見ると深度方向に強弱が強く表れGL-4.5m~5.5mで一旦大きくなるが，SPTではその強弱が見られない。この違いは図3の F_L 値にも影響しており，CPTでは終局限界時においてもGL-4.5m~5.5m区間を液状化の可能性の少ない層と判別しているが，SPTではその層境は確認できず液状化層としてほぼ均一な連続層となる。この要因は，両区間での強度ばらつきや両調査法の測定精度によると考えている。

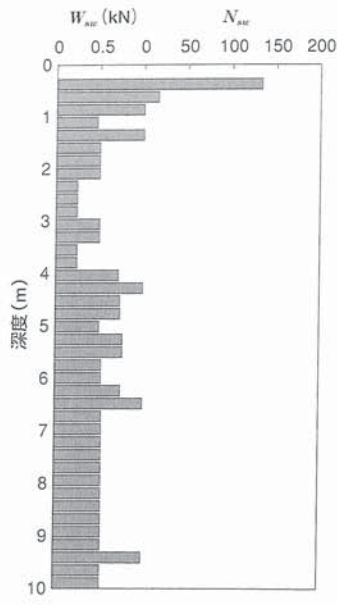
本調査は，新潟県中越沖地震で液状化によって不同沈下した宅地で，事後調査として行ったものである。建物は3.5mの柱状改良にて地盤補強後に建設されたが，実際にはその柱状体の下部で液状化が発生したこ

ととなる。柱状改良の効果が示されたかは定かではないが，建物計画前にこのような検証を行い補強工法や改良長が決定できれば，宅盤調査の高精度化につながると考える。

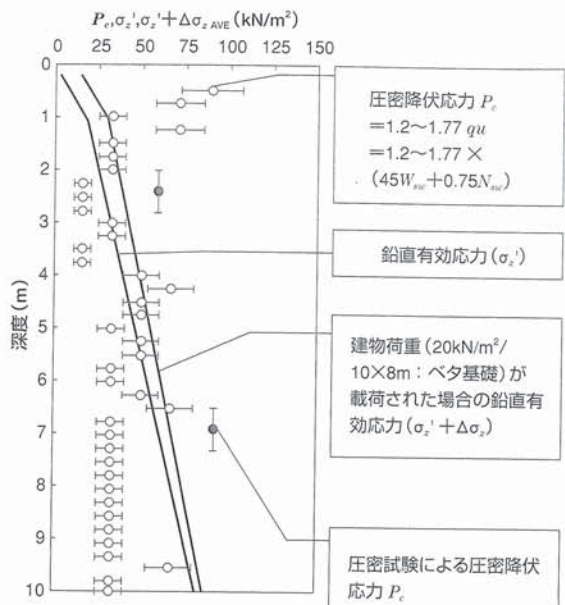
圧密特性の評価

住宅建設における圧密沈下の検討を行う場合， W_{sw} 自沈層の有無や層厚から経験実績からあるいは圧密降伏応力 P_c を推定し圧密層を評価して対応する手法¹⁰⁾や，体積圧縮係数 m_v を推定して沈下量を算定する手法がある。後者の沈下量の算定法は，SWS結果から m_v を換算する精度や基礎剛性にも影響するためその数値の算出法および取扱いは比較的難しい。むしろ，前者の自沈層や圧密層を評価して深度方向で硬軟を求める手法が，地盤補強の有無や改良層厚を見極めるには判別しやすい。しかしながら，図5に示すような軟弱な粘性土層が厚く堆積する地盤でこの手法を用いると， P_c と鉛直有効応力 σ'_z の関係によれば未圧密と思われる層($P_c < \sigma'_z$)が深さ5m以深で厚く堆積していると判別される。また深度2~4m付近にも未圧密層が見られる。この判定手法は W_{sw} 自沈層の

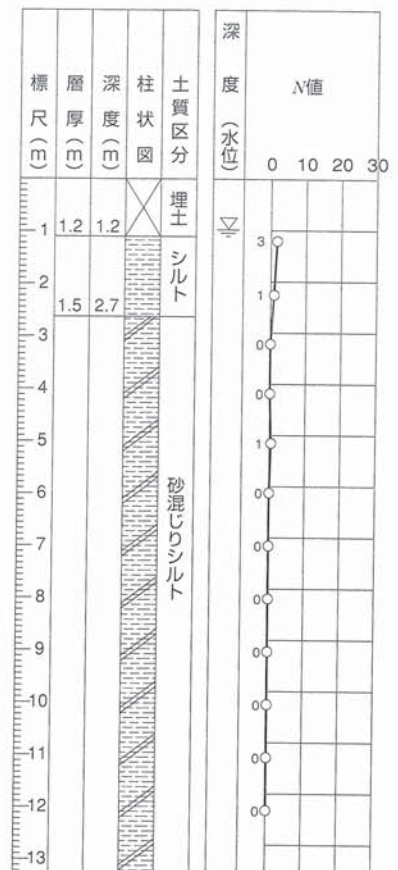
測定精度や P_c への換算精度，あるいは鉛直有効応力の精度が評価時の課題としてあるが，このSWS結果から考えられる地盤補強は，鋼管・PC杭など挙げられるが，杭数量からして経済的負担が多くなることが予想される。一般には，追加調査(ボーリングおよびその軟弱層の深さで土質試料を採取して圧密試験)を行い，基礎補強選定につなげたりする。当現場においてもこの調査を実施しており，図5b，図5cにその結果を示す。この図5cより，土質区分は埋土以下，シルト，砂混じりシルトであり，腐植土は確認されていない。また，図5bより，圧密試験で得られた圧密降伏応力は2測点とも，建物荷重が載荷されたときの鉛直有効応力より大きな数値を示しており基礎に有害な沈下は発生しないと判断され，直接基礎でも対応が可能となる。このボーリング調査は土質を目視確認し，かつ室内試験値も信頼性の高い結果が得られるので有効であるが，先述した調査費，工期に与える影響のほか，試験結果が離散的であり，試料の採取深度や試験個数を十分考慮する必要がある。



(a) 代表SWS結果

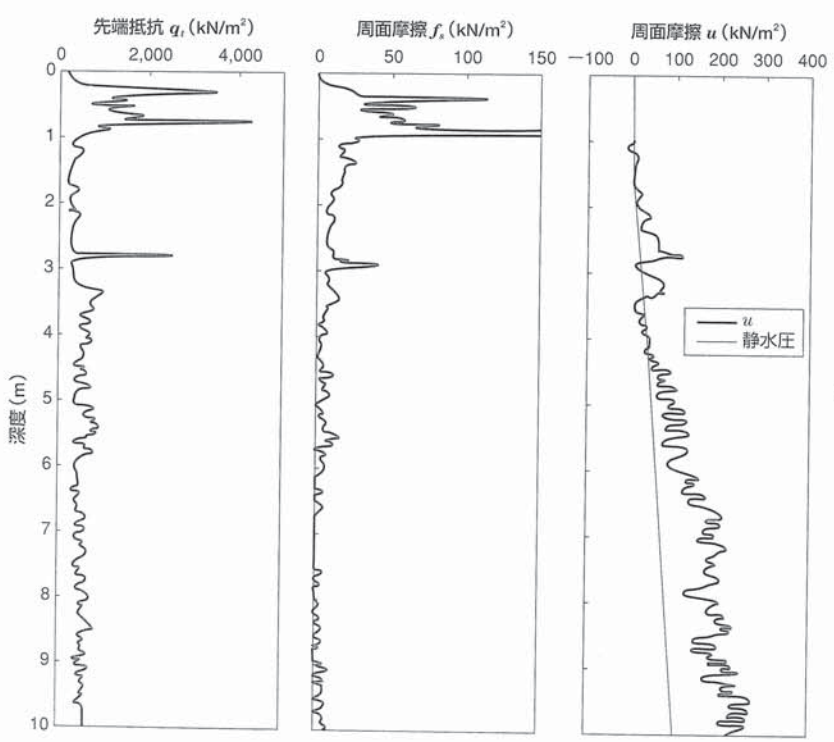


(b) 圧密特性

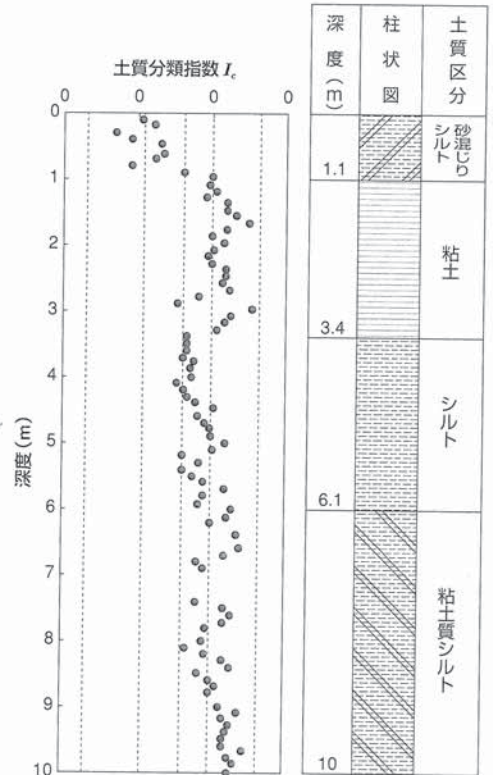


(c) ボーリング, SPT

図5 宅盤（粘性土地盤）でのSWS, SPT結果と圧密特性の評価（調査地：埼玉県）



(a) 三成分データ



(b) CPTから推定した土質分類

図6 宅盤（粘性土地盤）でのCPT結果（調査地：埼玉県，図5と同じ敷地）

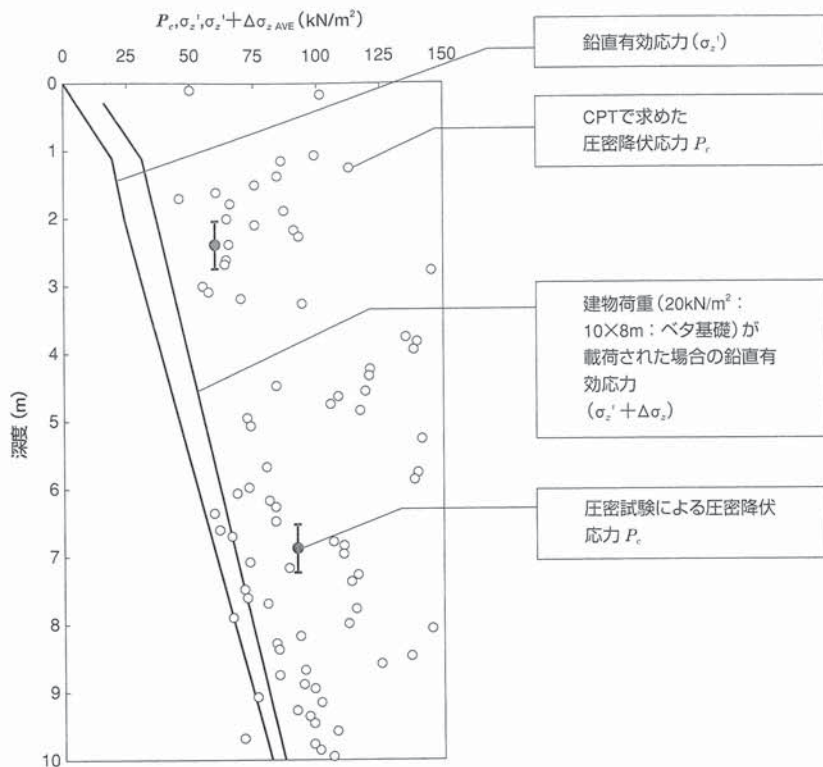


図7 CPTによる圧密降伏応力の深度分布（図6に示した結果を利用）

そこで、当現場で試験的にCPTを実施したので、そのCPT結果を図6に示す。なお、CPT、SWS、ボーリング位置は各々2m程度の離隔位置で実施した。

図6bに、三成分のデータより土質分類した結果を示す。土質分類については、ロバートソン¹⁴⁾が提唱する土質分類指数 I_c に準じて分類した。表層の人工的な埋土以下は、粘土～シルトという分類であり、ボーリング柱状図とも細かな違いはあるものの大きな違いは見られない。

図7に、 σ_z' とCPT結果より推定した P_c ¹⁵⁾の深度分布を示す。CPT結果は深度方向に連続データであり、薄い層で強度差が見られるのが特徴である。この結果からすると、深さ6m以深、 $\sigma_z' \approx P_c$ となる点が見つかるが、全体的には過圧密地盤と判断できる。図7には圧密試験で求めた P_c も併記したが、CPTにより推定された P_c と良好な一致が見られる。

おわりに

国内におけるCPTの位置付けは、ボーリング試験（SPT含む）の補間調査的な取扱いがなされており、CPT結果を直接利用した基礎設計は少なく、SPTを行わずにCPTだけで設計したとなればほぼ皆無といつてよい。この現象は、CPTの精度がSPT（ N 値）に劣るからではなく、 N 値による設計体系が確立していることや、CPTでは硬質な砂礫層含めオールマイティな地質に対応できないことが理由であろう。一方、戸建住宅の分野では、SWS結果で設計し、ボーリング調査はコスト面での制約が大きくあまり普及していない。安価なCPTの精度がある程度実証されれば、SWSの追加調査法として、CPTが有効であると考えられる。

今回示した調査事例は、筆者らが行った250のCPT調査のうちの一例である。今後は、CPTデータを蓄積しCPT結果と他試験データとのばら

つきや精度、各種地盤定数への換算精度などを見極め、さらなるCPT適用性の検討が必要と考える。

おわりに、本報告をまとめるにあたって調査・解析にご協力いただいたSoil-i技術研究会ならびに関係者の皆様方に深く感謝致します。

（たかた とおる）

【参考文献】

- 1) 地盤工学会地盤調査法改訂編集委員会編：地盤調査の方法と解説，地盤工学会，2004年
- 2) 安川郁夫：調査・診断の現状（問題点）と解決方法＝スウェーデン式サウンディング（SWS）試験＝，建築技術，No.678，pp.102～105，2006年
- 3) 高田徹，佐藤隆，田村昌仁：小型三成分コーン貫入試験機の開発と住宅地盤調査への適用性の検証（その1，2），第41回地盤工学研究発表講演集，pp.151～152，2006年
- 4) 若命善雄，高田徹，藤井衛：戸建住宅向け三成分コーン貫入試験機の開発と適用例，基礎工，Vol.34，No.9，pp.69～72，2006年
- 5) 田村昌仁ほか3名：戸建て住宅を対象としたスウェーデン式サウンディングの地盤評価，基礎工，Vol.34，No.8，pp.53～60，2006年
- 6) 日本建築学会：建築基礎構造設計基礎指針，2003年
- 7) 小規模建築物のための液状化マップと対策工法，ぎょうせい
- 8) 岩崎敏男ほか3名：地震時地盤液状化程度の予測について，土と基礎，Vol.28，No.4，pp.23-18，1980年
- 9) 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年
- 10) 若命善雄，妹尾博明：戸建住宅の基礎地盤の支持力と沈下判定法の提案，基礎工，Vol.25，No.11，pp.56～60，1997年
- 14) Robertson, P. K. et al : Liquefaction of sands and its evaluation, Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, IS TOKYO'95, Vol. 3, pp. 1253-1289, 1995.
- 15) 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年