

液状化調査手法としてのサウンディング技術

4. 静的貫入試験

後藤 政 昭 (ごとう まさあき)

ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 代表取締役

宮坂 享 明 (みやさか たかあき)

㈱地盤総合研究所 代表取締役

岡 信 太郎 (おか しんたろう)

㈱地盤試験所 地質調査部 課長

菊池 喜 昭 (きくち よしあき)

東京理科大学 教授

4.1 はじめに

これまで液状化判定(予測)は、標準貫入試験(以降、SPTと記す)より得られる地盤強度 N 値と採取した試料の室内土質試験結果を用いて行うことが主流とされてきた。しかし、この手法は現場試験及び室内土質試験とも試験期間が比較的長期に渡り、それに伴う高コストがボトルネックとなっている。

このような背景から、SPTより迅速かつ低コストとされるサウンディングによる液状化判定に関する研究がこれまでに数多く行われており、いくつかのサウンディングについては既に液状化調査手法として確立している。これらのうち静的貫入試験の1種である電気式コーン貫入試験(以降、CPTUと記す)は、地盤強度や細粒分含有率(F_c)、土質などを原位置試験のみで把握することが可能であることから、液状化判定を行う研究が欧米諸国や日本国内にて精力的に行われており、その手法はほぼ確立されていると考えられる。即ち、CPTUによる液状化判定は、SPTや室内土質試験結果に基づく判定とほぼ遜色ないのではないかと考えられる。

本講座ではCPTUによる液状化調査手法について、千葉県香取市の利根川河川敷にて実施された一斉試験のうちメーカーの異なる3種類の電気式コーンプローブを用いた液状化判定結果を紹介する。

4.2 CPTUの概要と特徴

4.2.1 計測システムと電気式コーンプローブの概要

CPTUの計測システムは、電気式コーンプローブ、ケーブル、測定器、パソコン、深度計から構成される。計測したデータは、貫入ロッドに通したケーブルを介し、一旦地上の測定器に送信され、別途計測された深度計のデータと合わせて、パソコンに送信される。これらのデータは、パソコンのモニター画面にリアルタイム表示される。計測システムの構成の一例を図-4.1に示す。

CPTUで使用する電気式コーンプローブの外観は、図-4.2に示すように、先端角度 60° 、投影断面積 10 cm^2 のものが一般的である。その内部には貫入時の先端抵抗(q_c)、周面摩擦(f_s)を計測する2種類のロードセル、貫入時にコーン周囲に発生する間隙水圧(u)を計測する圧力センサーが組み込まれている。また、国際規格に

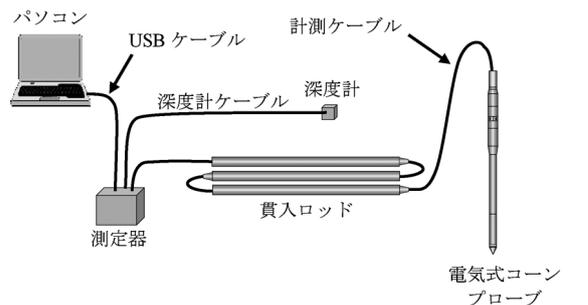


図-4.1 計測システム構成図

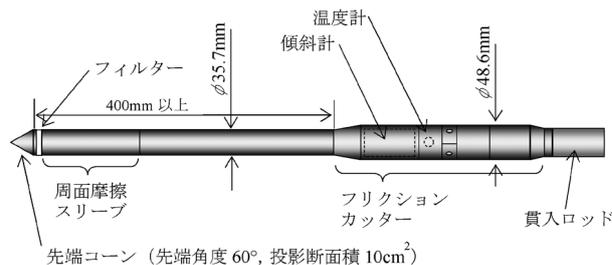


図-4.2 電気式コーンプローブの一例

表-4.1 試験に用いた電気式コーンプローブの主な仕様

メーカー	先端コーン 断面積 A_c (cm^2)	定格容量		
		先端抵抗 q_c (MN/m^2)	周面摩擦 f_s (MN/m^2)	間隙水圧 u (MN/m^2)
米国 V社	10	90	1.30	6.9
オランダ G社	10	100	1.00	2.0
日本 S社	10	30	1.00	1.0

則り、貫入時のプローブの傾斜角度、プローブ内の温度を計測するセンサーも内蔵しており、貫入角度やプローブの温度変化に伴う計測値の補正を行うことができる。

表-4.1に一斉試験で使用した、メーカーの異なる3種類の電気式コーンプローブ(以降、V社、G社、S社と記す)の主な仕様を示す。

4.2.2 CPTUの概要

CPTUは、前項で紹介したコーンプローブを地盤に $2.0 \pm 0.5\text{ cm/s}$ の速度で静的貫入した時の q_c 、 f_s 、 u の3成分を連続的に計測する試験である。

CPTUはSPTのように土質試料を採取することはできないが、計測結果からは F_c 、換算 N 値、粘性土の非排水せん断強さ(S_u)、砂質土の内部摩擦角(ϕ)の算

出や土質分類、地下水位の把握などを行うことが可能である。また、計測を2 cm 毎に行うため、ボーリング調査では見落とし易い薄層や互層を詳細に検出できる。

地盤状況にもよるが貫入長が20 m までの試験であれば、1日当たり3~4地点実施可能なため、ボーリング調査より短期間かつ低コストで、詳細な調査ができる。

4.2.3 貫入装置

これまで電気式コーンプロブの貫入は、ボーリングマシンや汚染土壌のサンプリングを行うためのマシンによる貫入が主流であったが、4.4にて詳述する我が国の地形や地質及び液状化判定の対象となる地盤の成因などを鑑みると、比較的高い貫入力が必要となる。このため、近年高い貫入力を有する専用貫入装置を使用することが多くなりつつある。

専用貫入装置は反力荷重の取得方法により2種類に分類することができる。1つは貫入装置の自重を用いるもの(写真—4.1)と、スクリーアンカーなどを地面に設置して反力荷重を得るもの(写真—4.2)がある。

自重により反力荷重を得る貫入装置は、試験地点まで自走し、アウトリガーにて貫入装置を水平にするだけで試験を開始することが可能なため、比較的容易かつ効率よく試験を行うことが可能である。しかしながら、自重にて反力荷重を得るため貫入装置自体が大きく、狭隘な場所の試験には不向きである。スクリーアンカーなどを地盤に設置して反力荷重を得る貫入装置は、自重タイプより小型となるため、狭隘な場所での試験が可能である。ただし、スクリーアンカーなどを設置しなければならないため、自重タイプよりも簡易性や試験効率といった点ではやや劣る。

4.2.4 その他の静的貫入試験

近年、エレクトロニクス技術が発達したことにより、更なるセンサーの高性能化、小型化が進み、様々なセン



写真—4.1 貫入装置の例 (自重タイプ: 自重90 kN)



写真—4.2 貫入装置の例 (アンカータイプ: 自重22 kN)

サーをプローブ内部に組み込むことが可能となった。これらにより、地盤の様々な情報を測定できるコーンプロブの開発、実用化が各方面で行われている¹⁾。

ここでは、先に示したCPTU以外の静的貫入試験としてラジオアイソトープコーン貫入試験²⁾(以降、RI-CPTと記す)について述べる。

RI-CPTは、RI法により地盤の湿潤密度(ρ_t)と含水量(単位体積当たりの間隙水の質量: ρ_m)の深度分布を連続的に計測する静的貫入試験である。通常、RI-CPTはCPTUを実施した同一孔に ρ_t を計測するための2種類のプローブと、 ρ_m を計測するためのプローブの計3種類のプローブを順次静的に貫入する。

ρ_t は、線源コーンに内蔵されているガンマ線源由来のガンマ線強度から算出される。このため、地盤材料から放出される自然放射線(バックグラウンド:BG)はノイズ成分となるため、ガンマ線源を内蔵しないBGコーンを装着した状態でBGを計測し、計測値の補正に使用する。このため、 ρ_t を計測するには2回貫入試験を実施することが必要となる。 ρ_m は、水分計プローブに内蔵された熱中性子検出器で検出される熱中性子強度から算出する。ただし、地下水位が深では、通常間隙は水で飽和しているため、密度計で計測した ρ_t 、設定した土粒子の密度(ρ_s)、飽和条件($S_r=100\%$)から ρ_m を算出して、含水比(w)に換算している。

本一斉試験では表—4.1に示すS社の電気式コーンプロブ貫入孔にてRI-CPTを実施し、得られた ρ_t を4.3に示すCPTUの結果を使用した液状化判定に用いた。

4.3 一斉試験の結果と考察

4.3.1 試験実施場所

一斉試験は、東北地方太平洋沖地震の際に液状化が発生し、噴砂が確認された千葉県香取市の利根川河川敷の自然地盤にて実施した。実施場所を図—4.3に示す。

一斉試験ではCPTU以外にも、動的貫入試験、回転貫入試験などが多数実施されている。図—4.4は、表—4.1に示す3社のコーンプロブを用いて実施したCPTUの地点とSPT及び乱れの少ない試料のサンプリング実施地点を示す。



図—4.3 試験実施場所 (国土地理院地図に加筆)

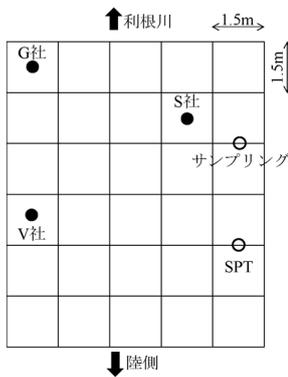


図-4.4 試験地点の配置

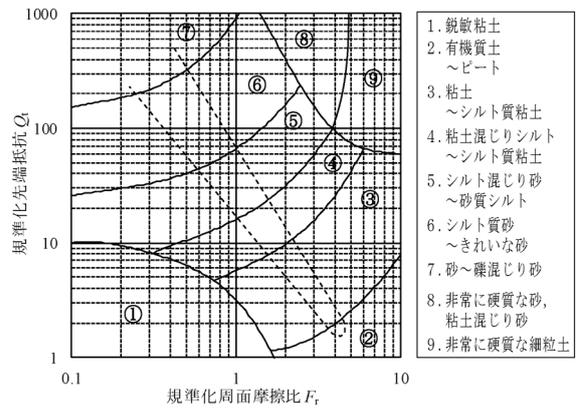


図-4.6 SBT チャート³⁾

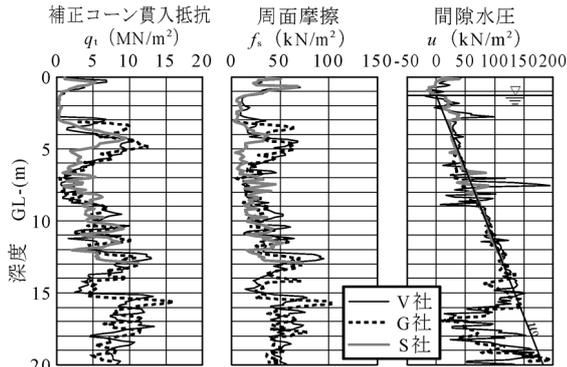


図-4.5 CPTU 結果の比較

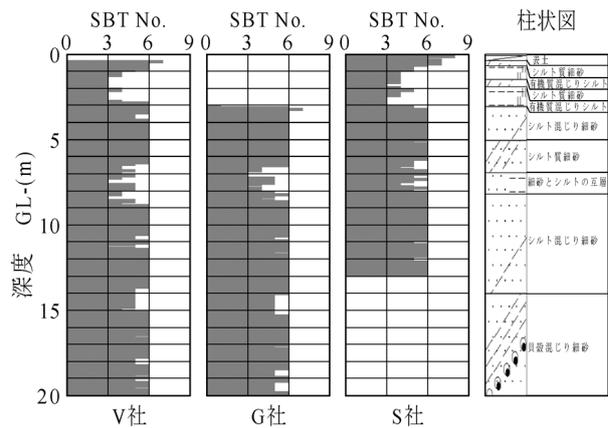


図-4.7 SBT 番号の深度分布と柱状図

4.3.2 CPTU 結果の比較

3社の補正コーン貫入抵抗 (q_t), f_s , u の深度分布図を図-4.5に示す。ここで q_t は、測定された q_c を u の影響について補正した値 ($q_t = q_c + (1-a) \cdot u$, ここで a は、間隙水圧の影響を受ける q_c の部材の断面積と先端コーン断面積の比) である。なお、試験実施時の地下水位は GL-1.3 m であった。

G社の地点は、地表面付近にコンクリート片などが混入していたため GL-3.0 m まで先行掘り後、試験を実施した。そのためG社のデータは GL-3.0 m からとなる。

S社の地点は、GL-13.0 m まで貫入した時点で、貫入装置で設置したスクリーアンカーからの反力が得られなくなった。このため、GL-13.0 m で試験を終了した。他の2社は GL-20.0 m まで実施した。

q_t と f_s の分布を見ると、GL-4.0 ~ -6.5 m の区間でS社の値が他の2社と比較して小さくなっている。しかしながら、図-4.5に示すCPTU結果は3社とも良く類似しており、地層構造の違いではなく、試験地点の違いによる差 (N 値や粒度分布などの差) と考えられる。また、 u の分布は、3社とも良く一致している。

次に、CPTUの結果から土質性状分類 (Soil Behavior Type, 以降、SBTと記す) を行いSPTの柱状図との比較を行った。SBTは、図-4.6に示すRobertsonのSBTチャート³⁾上にプロットして行う。図中の規準化先端抵抗 (Q_t) と規準化周面摩擦比 (F_t) は以下の式で算出する³⁾。各社のCPTU結果を用いたSBT番号の深度分布とSPT試料による柱状図を図-4.7に示す。

なお、SBTを含めたCPTUの結果の解析は10 cm 毎

に平均した値で行った。

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma_{v0}' \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

$$F_t = f_s / (q_t - \sigma_{v0}) \times 100(\%) \quad \dots \dots \dots (4.2)$$

ここで、 Q_t : 規準化先端抵抗, F_t : 規準化周面摩擦比
 σ_{v0} : 鉛直全応力, σ_{v0}' : 鉛直有効応力

3社ともSPTによる柱状図とよく一致しており、特にSPTによる柱状図でGL-6.9 ~ -8.15 mの細砂とシルトの互層と区別されている区間は、出現深度と層厚がやや異なるもののCPTUの土質分類も粘土 ~ 砂質シルト (SBT No. 3 ~ 5) の互層となっており、柱状図と良く一致している。ただし、この区間のS社の結果は、他の2社と比較してやや粗粒な土質 (SBT No. 4 ~ 5) に分類されている。

4.3.3 液状化の判定方法

SPTより得られる N 値と採取した試料の室内土質試験結果を用いて行う液状化の判定は、様々な方法が提案されている。これらの判定方法のうち建築基礎構造設計指針 (2001) では、 F_c が比較的高く、 N 値の信頼性が低いと考えられる土に対しては N 値を用いた判定方法に頼らず、CPTUの結果を用いた判定方法を用いることが推奨されている。本講座では、液状化判定方法として一般によく用いられている道路橋示方書・同解説 (2017) 及び建築基礎構造設計指針 (2001) の両方法について、一斉試験のCPTUの結果とSPT及び土質試験の結果を用いてそれぞれを比較した。

CPTUの結果を用いた両方法に基づく液状化判定の

フローを図-4.8に示す。また、道路橋示方書・同解説(2017)の地震動特性による補正係数 c_w の区分を表-4.2に示す。図-4.8に示すように、どちらの方法もGL-20.0mまでの飽和土層を液状化判定の対象とし、 N 値以外に、 F_c 、 σ_{v0} 、 σ_{v0}' と地震の揺れの大きさを示す設計水平震度(k_{hgL}) (道路橋示方書・同解説)若しくは、地表面最大加速度(α)、マグニチュード(M) (建築基礎構造設計指針)から液状化安全率(F_L)を算出する。 F_L は、式(4.3)に示すように繰り返しせん断応力比(L)に対する液状化抵抗比(R)の比で、 F_L が1より小さい場合、対象となる土層は液状化すると判断する。ただし、地下水位より上の土層と、 $F_c > 35\%$ の土層に対しては液状化しないと便宜上 $F_L=1$ とする。

$$F_L = R/L \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

この F_L は、ある深度における液状化判定であるため、

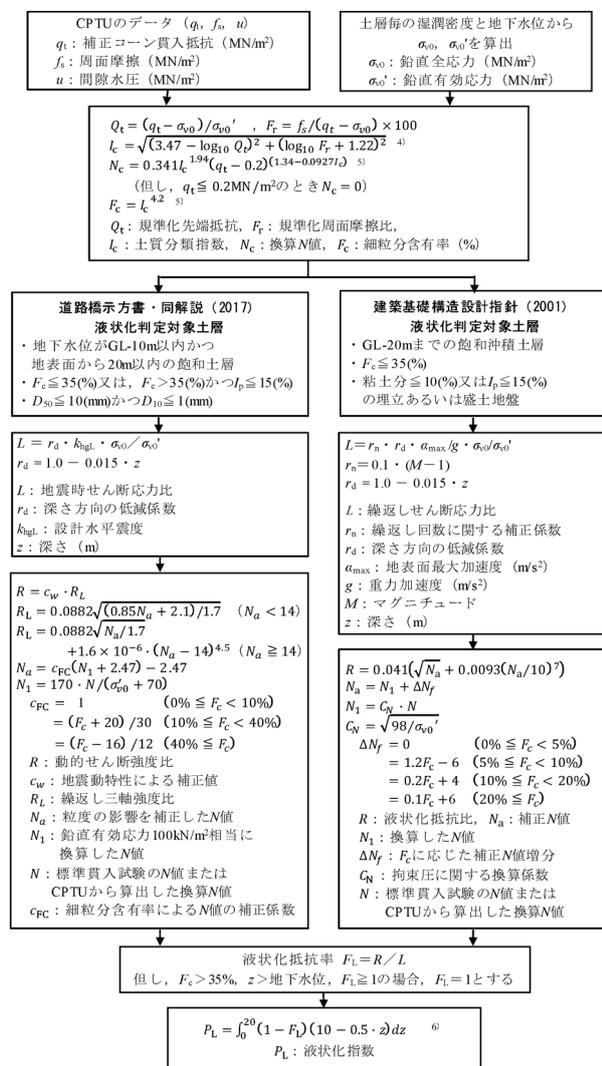


図-4.8 液状化判定フローを修正

表-4.2 地震動特性による補正係数 c_w

地震動		c_w
レベル1	タイプI	1.0
	レベル2	1.0 ($R_L \leq 0.1$)
		3.3 $R_L + 0.67$ ($0.1 < R_L \leq 0.4$)
	2.0 ($0.4 < R_L$)	

その地点の構造物に被害を与える地盤災害としての液状化危険度を評価するには、式(4.4)に示す深度毎の F_L を深さ(z)方向に重みをつけて積分した液状化指数(P_L)で行う(深度0~20mの範囲)。液状化危険度は、岩崎ら⁶⁾による表-4.3に示す関係により判定できる。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5z) dz \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

4.3.4 細粒分含有率(F_c)と換算 N 値の分布

CPTUの結果から算出した F_c と採取した試料の粒度試験から得られた F_c の分布を図-4.9に、 N 値と換算 N 値の分布を図-4.10に示す。 F_c と換算 N 値の算出には、鈴木・時松・實松による式(4.5)と式(4.6)を適用した⁵⁾。

$$F_c = I_c^{4.2} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

$$N_c = 0.341 \cdot I_c^{1.94} (q_t - 0.2)^{(1.34 - 0.0927I_c)} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

($q_t \leq 0.2 \text{ MN/m}^2$ のとき、 $N_c = 0$)

ここで、 N_c : 換算 N 値、 I_c : 土質分類指数

なお、SPTは通常1m毎に実施するが、本一斉試験では0.5m毎に実施した。

F_c の分布は、柱状図で砂質土と粘性土の互層とされるGL-6.5~-8.8mの区間で、SPT採取試料による F_c

表-4.3 液状化指数による液状化危険度判定区分⁶⁾

	$P_L=0$	$P_L \leq 5$	$5 < P_L \leq 15$	$15 < P_L$
P_L 値による液状化危険度判定区分	液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は不要。	液状化危険度は低い。特に重要な構造物に対してはより詳細な調査が必要。	液状化危険度が高い。重要な構造物に対してはより詳細な調査と液状化対策が一般に必要。	液状化危険度が高いため、液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避。

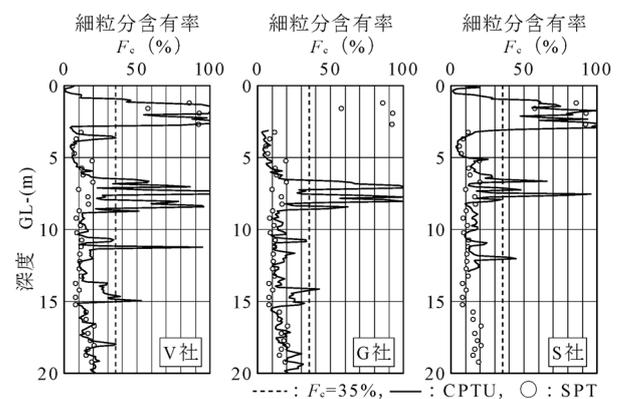


図-4.9 細粒分含有率の深度分布

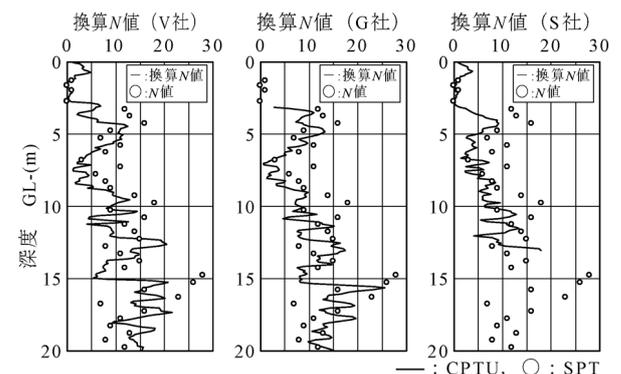


図-4.10 換算 N 値と N 値の深度分布

とCPTUから算出した F_c に差が認められる。これは本一斉試験ではCPTUが10 cm間隔で F_c を算出しているのに対し、SPT採取試料は50 cm間隔であることに加え、SPT実施地点と3社のCPTU実施地点が4.3.1の図4.4に示すように4~7 m程度離れていることによる地層の変化(互層状の堆積環境)の差によるものと考えられる。なお、本来であれば $F_c > 35\%$ となる飽和土層でも塑性指数 $I_p \leq 15\%$ となる場合、液状化判定を行う必要があるが、本一斉試験で採取した土質試料には該当する土層は存在しなかった。

換算 N 値は、3社ともその分布形状はよく類似しているが、GL-3.0~6.0 mのS社の値が他の2社よりやや小さい傾向を示している。ばらつきはあるものの3社のCPTUの結果を用いて算出した換算 N 値は、SPTによる N 値よりも全体的に小さい傾向が窺える。

4.3.5 道路橋示方書・同解説による液状化判定

道路橋示方書・同解説(2017)による液状化判定を行うにあたり、 k_{hgL} は地域別補正係数の地域区分A2、地盤種別Ⅲ種の条件で行った。本液状化判定に適用した設計水平震度を表4.4に示す。

図4.11~図4.13に3社のCPTUによる F_L とSPTによる F_L の深度分布を示す。また、CPTUの結果から算出した $F_c > 35\%$ となる区間($F_L = 1$, 非液状化区間)の背景を灰色で塗り潰している。この塗り潰しは、以降全ての F_L と1 m当たりの液状化指数の増分(ΔP_L)の深度分布(図4.14~図4.16)に対しても行った。

F_L の分布は、SPTとCPTUいずれもレベル1地震動では、 $F_c \leq 35\%$ でも液状化しない($F_L \geq 1$)と判定される区間が存在する。レベル2地震動ではタイプI、タイプIIどちらも、 $F_c \leq 35\%$ となる区間すべてが液状化する($F_L < 1$)判定結果となった。

図4.14~図4.16に ΔP_L の深度分布を示す。

3社の調査地点でGL-6.5~8.8 mの区間の $F_c > 35\%$ となる範囲が少しずつ異なるため、 $\Delta P_L = 0$ となる区間

表4.4 使用した設計水平震度

地域区分:A2 (C_c, C_{1z}, C_{1z})=1.0 Ⅲ種地盤 k_{ghL}	レベル1 地震動	レベル2地震動	
	0.18	タイプI	タイプII

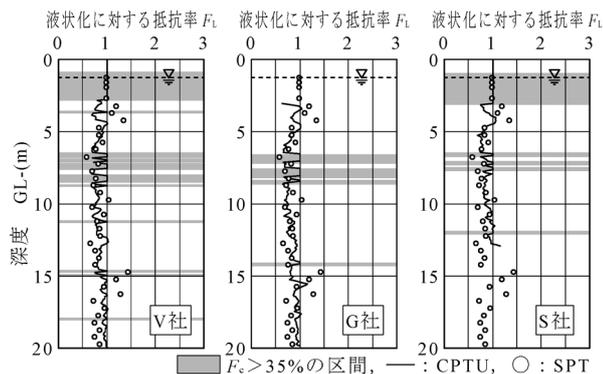


図4.11 F_L の深度分布(レベル1地震動)

の割合に差が認められる。

表4.5に P_L の一覧を示す。なお、表中の()内の値は、S社の試験終了深度であるGL-13.0 mまでの P_L である。表4.5のレベル1地震動の P_L を見ると、GL-13.0 mまでの値ではあるが、S社の値が他の結果より大きくなっている。GL-3.0~6.5 mの F_L 値が他より小さいことと、GL-6.5~8.8 mの $F_c > 35\%$ となる区間が他より少ないことが原因と考えられる。レベル2地震動についても、両タイプともレベル1地震動と比べると相互の違いは少なくなってきたことが分かる。以上の結果から分かるように、どの社の調査結果でも両地震レベルにおいて、SPTとCPTUの結果を用いた判定結果に大差はないと考えられる。

4.3.6 建築基礎構造設計指針(2001)

建築基礎構造設計指針による液状化判定を行うにあたり、地震動の大きさとしてマグニチュード(M)7.5、地表面最大加速度(α)は2.00 m/s²と3.50 m/s²の2種類に設定した。なお、 $\alpha = 2.00$ m/s²は損傷限界検討に相当し、 $\alpha = 3.50$ m/s²は終局限界検討に相当する。

図4.17~図4.18にCPTUとSPTの F_L の分布を示す。CPTUの F_L の分布は、いずれのケースもGL-3.0 mまで $F_c > 35\%$ となるため $F_c = 1$ となるが、それ以深は $F_c > 35\%$ となる区間は少なく、 α と試験地点の違いによる F_L の差が認められる。特にSPTはGL-4.5 mまで3.5 m/s²のケースでも $F_L \geq 1$ であるのに対し、CPTUではいずれのケースも $F_L < 1$ となり、液状化する結果となった。

図4.19~図4.20に ΔP_L の深度分布を示す。

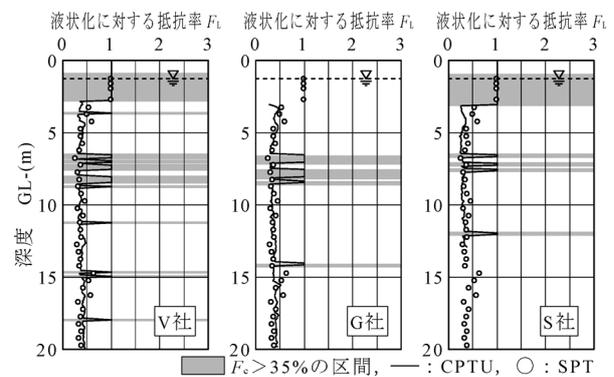


図4.12 F_L の分布(レベル2タイプI地震動)

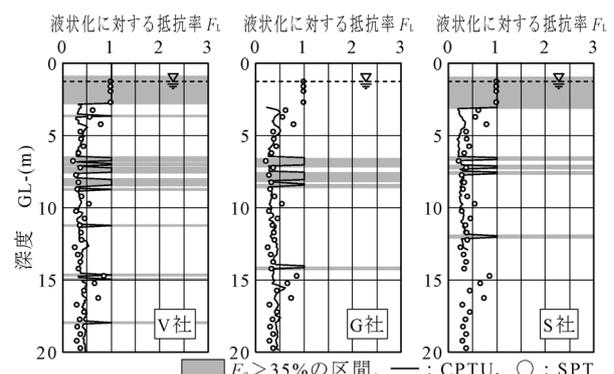


図4.13 F_L の深度分布(レベル2タイプII地震動)

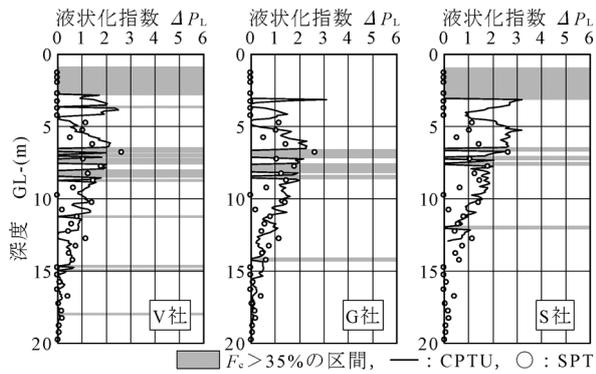


図-4.14 液状化指数の分布 (レベル1地震動)

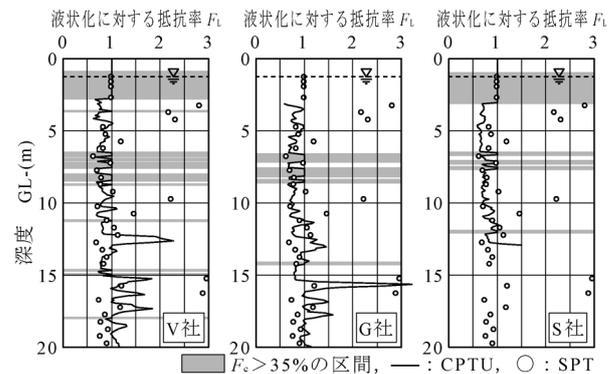


図-4.17 FLの深度分布 (M=7.5, α=2.00 m/s²)

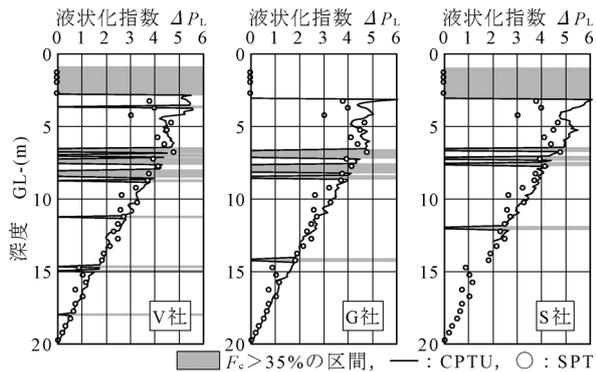


図-4.15 液状化指数の分布 (レベル2タイプI地震動)

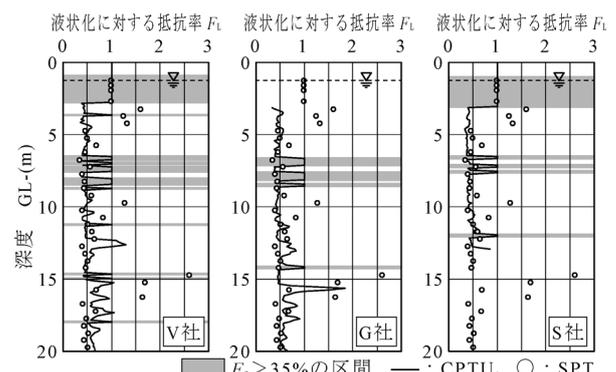


図-4.18 FLの深度分布 (M=7.5, α=3.50 m/s²)

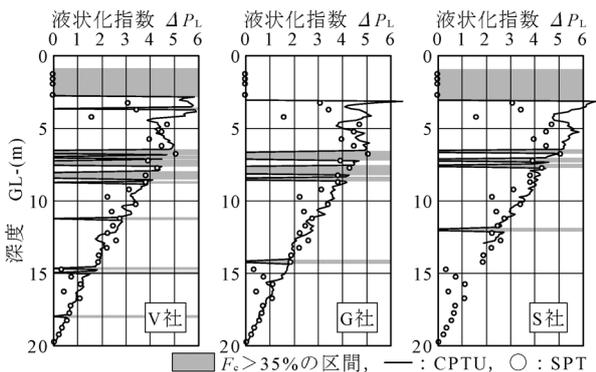


図-4.16 液状化指数の分布 (レベル2タイプII地震動)

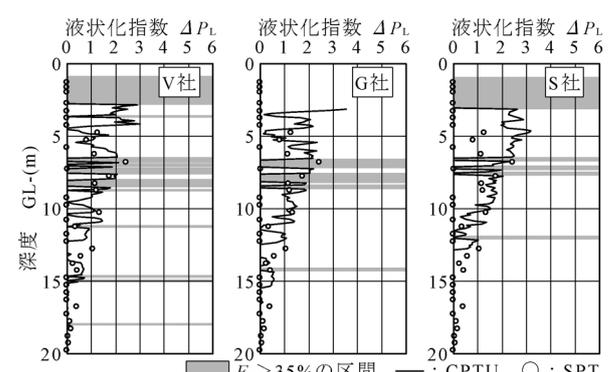


図-4.19 液状化指数の分布 (M=7.5, α=2.00 m/s²)

表-4.5 PL一覧 (道路橋示方書・同解説2017)

地点	レベル1	レベル2	
		タイプ I	タイプ II
V社	11.04 (9.75)	39.47 (32.49)	39.73 (32.87)
G社	10.94 (9.68)	39.00 (32.05)	39.15 (32.36)
S社	(14.89)	(36.67)	(37.95)
SPT	10.47 (8.96)	42.58 (35.76)	40.61 (34.33)

()内はGL-13.0mまでのPL値

CPTUの ΔP_L の分布は、3社とも良く似ているが、S社のGL-3~6.5mの区間は他の2社と比較して大きくなっている。また、 $\alpha=2.0\text{ m/s}^2$, $\alpha=3.5\text{ m/s}^2$ どちらのケースもSPTのGLからGL-4.5mまでの ΔP_L は0となり、液状化しない結果となっている。

表-4.6に得られた P_L の一覧を示す。なお、表中の()内の数値は、GL-13.0mまでの P_L である。

表-4.6をみると、CPTUの結果による P_L がSPTよ

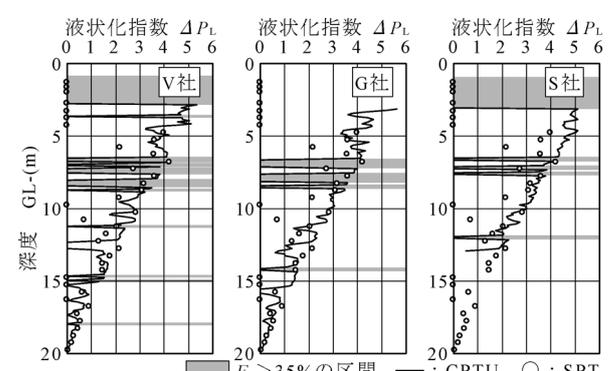


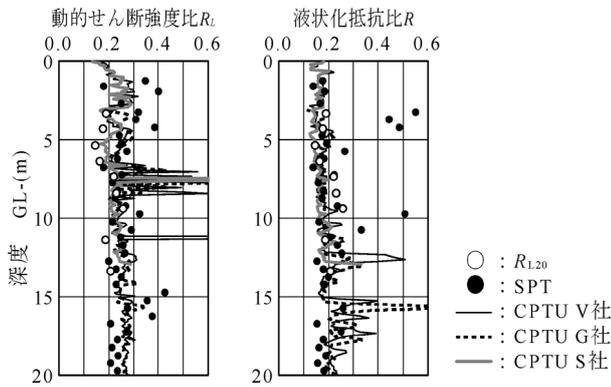
図-4.20 液状化指数の分布 (M=7.5, α=3.50 m/s²)

り大きくなっていることが分かる。またCPTUの結果の中でも、S社の P_L が他の2社より大きくなっている。これは建築基礎構造設計指針では、SPTのN値やCPTUの換算N値の違い(図-4.10)が F_L 値の計算結果に及ぼす影響が大きいことが原因と考えられる。

表—4.6 液状化指数一覧（建築基礎構造設計指針2001）

地点	M=7.5	
	$\alpha=2.00\text{m/s}^2$	$\alpha=3.50\text{m/s}^2$
V社	10.63 (9.82)	31.08 (26.53)
G社	10.85 (10.12)	31.51 (27.04)
S社	(14.87)	(31.72)
SPT	7.45 (6.39)	25.72 (21.60)

()内はGL-13.0mまでの P_L 値



図—4.21 R_{L20} と $R(R_L)$ の深度分布

4.3.7 室内土質試験結果との比較

乱れの少ない試料による繰返し振動三軸強度比 (R_{L20}) と、両方法に基づく $R(R_L)$ との比較を図—4.21に示す。

CPTU の $R(R_L)$ と乱れの少ない試料による R_{L20} の分布は細かく見ると食い違うところもあるが、全体としては、よく一致している。それに対し、SPT より求めた $R(R_L)$ の分布形状は R_{L20} と全体的には一致しているものの、建築基礎構造設計指針では極端に大きくなるところが散見される。

4.4 静的貫入試験の最近の動向

静的貫入試験（主に CPTU）は、欧米諸国では基礎の設計などに用いる地盤情報を得るための試験として広く用いられているが、我が国ではそれほど多用されていないのが現状である。この理由としては、我が国では SPT より得られる N 値が広く普及していること、欧米諸国と異なる我が国の地盤条件などが挙げられる。欧米諸国は、広大で平坦な国土に大河がゆっくりと山地から海岸へ向かって流下する。このため河川流域に形成される軟弱地盤は、礫や玉石の少ない様な地盤である。一方、我が国の国土は狭隘であり、急峻な山地から海岸へ向かって一気に河川が流下する。このような状況下にて形成された河川流域の軟弱地盤内には、比較的多くの礫や玉石が存在している。また、平野部の低平地地盤は海進、海退の繰返しにより形成されたため、砂や粘土などの互層構造となっている。このような地盤条件下では、試験中（貫入中）に突如堅固な層に当たり貫入力不足より試験（貫入）不可となるケースが度々発生していた。また、静的貫入試験に使用する貫入装置は、これまでも一部では自走式の専用貫入装置を使用していたが、貫入

力が不足していた。しかし近年は、4.2.3の写真—4.2に示すような海外メーカーの自走式専用貫入装置を使用し試験を行うことが主流となりつつある。この自走式専用貫入装置は高貫入力に加え、回転や打撃といった機能も有することから、上記に示すような我が国の静的貫入試験の弱点を克服できるようになった。また、これまでに以上に迅速かつ低コストの試験も可能となった。

近年では、この自走式専用貫入装置を用いた CPTU と SPT を組み合わせた試験方法（通称、ダブルサウンディングと呼ぶ）が開発、実用化されている⁸⁾。この試験方法は、軟弱部では静的貫入試験（CPTU）、硬質部では動的貫入試験（SPT）にて地盤情報を得るものであり、我が国の地盤条件に非常に見合っている。加えてボーリング調査と変わらない深度までの調査が可能である上、迅速、低コスト、高精度である。

また、この自走式専用貫入装置を用いた静的貫入試験（特に CPTU と RI-CPT）は、斜め下方に貫入する試みが行われており、通常の鉛直下方貫入結果や室内土質試験結果との比較、検証結果などが近年報告されている⁹⁾。この斜め下方貫入での静的貫入試験が今後実施可能となれば、動的貫入試験や回転貫入試験では不可能とされてきた斜め方向の調査での地盤強度や物理、力学特性を現地にて迅速かつ高精度に得ることができ、その活用シーン（既存ストックの維持管理分野での利用）は格段に広がることを期待できる。その活用シーンと期待できる効果として、次のような調査ケースが想定される。

(1) 河川堤防や道路、鉄道盛土などの土構造物の調査

既存河川堤防は、大雨などが原因で河川が増水や氾濫する度に改修、補強が行われており、築堤履歴（盛土構成）は非常に複雑となっている。また、供用中の道路や鉄道盛土を地盤調査する際は、交通規制や交通量の少ない夜間作業となり調査可能な期間や時間帯が制限される。しかし、斜め下方貫入による静的貫入試験は盛土小段や道路路肩などからの試験が可能であるため、調査を実施する上での制限が緩和されるとともに、複雑な盛土構成の詳細な把握などが期待できる（図—4.22）。

(2) 既設構造物直下や既設杭基礎の地盤調査

既設の橋りょう、石油タンク、戸建住宅などの直下の基礎地盤や既設杭基礎の杭間の地盤調査は、構造物全体若しくは一部を撤去、解体しなければ実施することは困難である。しかし、斜め下方貫入における静的貫入試験は、既設構造物近傍や既設杭を避けて試験を実施することが可能であり、比較的容易かつ低コストにて地盤情報を得ることが期待できる（図—4.23、図—4.24）。

次に海底地盤の地盤調査において、近年、CPTU は、洋上風力発電設備建設における基礎地盤調査手法として脚光を浴びつつある。洋上風力発電設備の建設予定場所は、環境問題などから沖合の大水深の場所に建設されることが多く、このような場所での海上からのボーリング調査では海象条件から調査可能時期が限定されることや、大水深に対応した水上足場が必要となる。このような背景から近年は高貫入力を有し、船上より制御可能な海底

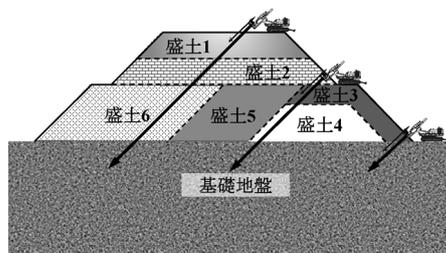


図4.22 斜め下方CPTUの活用例(その1)

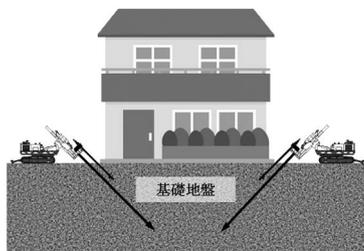


図4.23 斜め下方CPTUの活用例(その2)

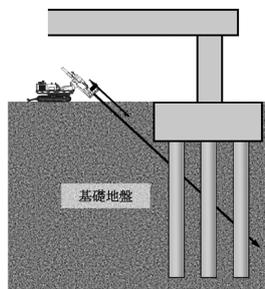


図4.24 斜め下方CPTUの活用例(その3)

着座型のCPTUによる地盤調査技術が注目されている。

4.5 まとめと今後の課題

4.3より、CPTUによる液状化判定は、SPTより得られる地盤強度 N 値と採取した試料の室内土質試験結果を用いて行う判定と概ね一致する結果が得られることを確認した。CPTUの特徴である深度方向に連続データが得られる点、試験時間が比較的短時間である点、室内土質試験を行わず地盤の物理、力学特性を把握することができる点などを考慮すると、CPTUは液状化判定のための試験方法として有望であると考えられる。

CPTUは、4.4でも述べたが、欧米諸国では軟弱粘性土地盤や緩い砂質土地盤、更には比較的硬質な地盤でも一般的な試験方法として広く普及している。一方、我が国では研究は多方面で行われているものの、実用化という点ではあまり普及していないのが現実である。今後、CPTUを液状化判定も含めた一般的な試験方法として広く普及させる上での検討、研究課題を以下にまとめる。

- ① CPTUの計測結果から算出される地盤情報、土質区分などは、欧米諸国の地盤での研究成果を我が国の地盤に適用しているのが現状である。このため、我が国の地盤における適用性に関して、さらに多くの事例を積み重ね、我が国に見合う地盤情報の推定方法や土質区分方法などを研究していく必要がある。
- ② 我が国の土木、建築における地盤設計法は、SPT

により得られる N 値を主体に構成、確立されている。今後我が国でCPTUを広く普及させるためには、CPTUを用いた地盤設計法においても N 値を用いたそれと遜色ない成果が得られるという実績を数多く積み重ねていく必要がある。また、CPTUの地盤工学会基準のJIS化なども今後必要でないかと考える。

- ③ 建築分野では、住宅性能表示制度の見直しに伴い液状化に関する情報提供が必要となった。今後は、CPTUを土木分野だけでなく、建築分野にも普及させる必要がある。
- ④ CPTUを実施するには、比較的大きな貫入力が必要となり、この大きな貫入力をより容易に得ることができればCPTUはより容易に実施できるものと考えられる。そのためには、試験対象構造物に合わせたCPTUの研究、開発が必要である。例えば、戸建て住宅が対象になる場合には小型のコーンプローブの研究、開発が必要となるなどである。

謝辞

本講座に使用したCPTU、SPT、室内試験のデータは、国交省研究助成(研究開発課題名:動的貫入試験による経済的で高精度な液状化調査法の研究開発、研究代表者:規矩大義 関東学院大学)によって実施したものである。また、本講座の執筆に関してソイルアンドロックエンジニアリング(株)の石井正紀氏と重富正幸氏にご助力頂いた。ここに記して、関係者各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 地盤工学会:地盤調査の方法と解説, pp. 394~396, 2013.
- 2) 三村 衛・Abhay K. Shrivastava・柴田 徹・延山政之:RIコーンによる砂質地盤の原位置含水比・湿潤密度検層とその精度評価について, 土木学会論文集, No. 638 III-49, pp. 227~239, 1999.
- 3) P. K. Robertson: Soil classification using the cone penetration test, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 151-158, 1990.
- 4) Peter K. Robertson and Catherine E. Fear: Liquefaction of sands and its evaluation, Proceedings of the first International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, IS TOKYO'95, pp. 1253-1289, 1995.
- 5) 鈴木康嗣・時松考次・實松俊明:コーン貫入試験結果と標準貫入試験結果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, No. 566, pp. 73~80, 2003.
- 6) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田 進:地震時地盤液状化の程度予測について, 土と基礎, Vol. 28, No. 4, pp. 23~29, 1980.
- 7) 三村 衛・吉村 貢:室内試験・原位置試験の設計への反映6.原位置試験による液状化評価, 地盤工学会誌 Vol. 61, No. 8, pp. 65~72, 2013.
- 8) 坂田佳人・佐藤壽則・石川恵司・北條 豊・岡信太郎:CPTとSPTを併用したダブルサウンディングの実施事例, 全地連「技術フォーラム2017」旭川, 2017.
- 9) 後藤政昭・金道繁紀・黛 廣志・西原 聡ら:電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究(その1~8), 第53回地盤工学研究発表会, 2018.