

浦安試験結果のまとめ

－N 値への変換に重点を置いて－

N 値 CPT 動的サウンディング スウェーデン式サウンディング

北海道大学大学院 田中洋行

1. はじめに

今回の一斉試験の目的は一戸建て住宅を念頭においた液状化判定のために地盤調査であり，参加した地盤調査法は SPT と比べて簡易でしかもコストが低いものが主体となっている。我が国では，液状化の判定は粒度に基づく N 値による方法が“標準”であり，その適用性も過去の多くの事例から検証されている。したがって，本報告では，個々の地盤調査から得られた値を直接用いて液状化の有無を判定するのではなく，あくまでも各調査試験から得られた値を， N 値とどのように関連づけるかについて述べることにする。

2. 標準貫入試験の特徴

図 1 は SPT を含めた原位置試験の模式図を示したもので，縦軸は原位置試験から測定される値を示しており，SPT であれば N 値，静的コーン貫入試験では貫入抵抗 (q_t)，スウェーデン式サウンディング試験では重り (W_{sw}) あるいは回転数 (N_{sw}) である。有効鉛直応力 (σ_v) (図中 A 点) で原位置試験を行った場合を考える。SPT に限らず動的貫入試験は，衝撃荷重によって先端を地盤に貫入させるため，粒径の大きなレキ質地盤を除いて，貫入時の応力状態は非排水条件と考えられる。緩い砂，あるいは過圧密比 (OCR) の小さな軟弱な粘性土の場合は，貫入によって正の間隙水圧が発生し，有効応力が減少し， τ_2 に相当する N 値が得られる。一方，密な砂，あるいは OCR が大きな過圧密粘土の場合には，その逆で有効応力が増加し， τ_2 より大きな τ_3 に相当する N 値が得られる。すなわち，密な砂地盤に対して N 値が大きくなる理由は， ϕ (図 1 の破壊包絡線の傾き) が大きいこととはもちろん，正のダイランシーによって有効応力が増加するためと考えることができる。一方，CPT の場合には，砂地盤ではコーンの貫入の状況は排水に近いと考えられるので，図 1 に示すと， τ_1 が CPT で得られる q_t に相当する。したがって，両者の比 N 値/ q_t は， τ_2/τ_1 あるいは， τ_3/τ_1 に相当する。

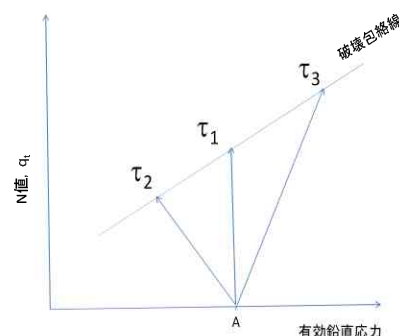


図 1 SPT と CPT の応力経路の概念図

話が若干逸れるが，杭などの静的荷重が作用する多くの基礎構造物の支持力を求める場合には，SPT より CPT の方が適切と考えられる。しかしながら，すでに述べたように SPT があまりにも広く普及しているので，SPT から得られた N 値によって計算されている。一方，液状化現象はまさに非排水状態の挙動であるので，SPT の方が適していると考えられる。事実，田中・田中¹⁾は細粒分の多い地盤に対して，SPT，CPT およびダイラトメーターを用いて改良後の液状化に対するポテンシャルを評価しているが，SPT による調査が改良効果が一番明確に表れたと報告している。

さて話を元に戻すが，排水性の悪い地盤の場合には，SPT はもちろんであるが，CPT においても非排水条件となる。この場合には， N 値/ q_t は， τ_2/τ_2 あるいは， τ_3/τ_3 に相当することになり，排水性の良い地盤と異なることになる。つまり， N 値/ q_t は地盤の排水性に大きく影響されることになる。このことは，スウェーデン式サウンディング試験などの他の原位置試験でも同様なことが言える。また，地盤の設計において，全応力法 ($\phi=0$) あるいは有効応力法のどちらかを採用するかが，重要なポイントとなる。したがって，試験結果の解釈にあたっては，どうしても透水性を示す土の種類の情報が不可欠となる。現在用いられている土の種類を表す指標の多くは，土粒子の粒径に基づくものが多い。すなわち，平均粒径を用いた D_{50} ，74 μm 以下の細粒分含有率 FC，コンシステンシー指数が多く用いられる。しかしながら，これらの指標によって必ずしも地盤の透水性が表現できるわけではないことに注意する必要がある。

地盤調査結果を解釈する上で，もう一つ重要な情報に，図 1 に示すように，ダイランシー特性がある。すなわち，打撃の間隙水圧の出方によって N 値が τ_2 か τ_3 に相当するためである。これは，上で述べた土の種類だけから判断することは不可能である。まとめると， N 値は ϕ とダイランシー特性によって支配され，CPT などの静的な試験から得られた値は，この 2 つの特性に加えて排水性がある。したがって，ある試験から得られた値を N 値に換算する場合には，3 つの情報が必要となる。

3. 試験結果の考察

3.1 SPT と CPT

今回の一斉試験では、3つの機関がCPTを行った。 q_t の結果を図2に示す。3種類のコーンとも同様な結果を示している。すなわち、深さ18mまでは、砂と粘土の互層で、その下は比較的均一な粘性土が堆積しているのがわかる。このように、CPTの測定結果は機種によらず、再現性の高い試験方法と思われる。しかし、粘性土地盤だけに着目すると話が変わる。土被り圧(σ_{vo})の影響を差し引いた($q_t - \sigma_{vo}$)を拡大して図3に示す。AとBが測定した値を比較すると、Aは常に大きな値を示しており、その差は約0.2MPaにもなる。粘性土の場合、 q_t の容量に対して、ここで議論している値は非常に小さいので、技術上これだけの精度を維持することが難しい。しかしながら、コーン係数(N_{kt})を10と仮定すると、0.2MPaの差は非排水せん断強さが20kPaに相当することとなり、実際の設計に対してCPTの適用性が疑問となる。早急に、この原因を追及する必要がある。

N 値と q_t の比較を図4に示す。 N 値はそのまま、 q_t の値はMPaでプロットしているが、 q_t の方が多少低めで、おおよそ $N = 1.3q_t$ (MPa)の関係にある。 N と q_t の比(N 値/ q_t)は、多くの研究者によって D_{50} やFCと関係づけられている。すでに述べたように、 D_{50} やFCは地盤の透水性を表していると考えられる。また、これらの関係はダイレタンシー特性も深く関与している。鈴木²⁾は、これらの要素を取り込むために、Robertson³⁾が提案した次式で定義される I_c を用いて、 q_t と N 値を結びつけた。

$$I_c = \{(3.47 - \log_{10} Q_t)^2 + (\log_{10} F_t + 1.22)^2\}^{0.5} \quad (1)$$

$$Q_t = (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo} \quad (2)$$

$$F_t = f_s / (q_t - \sigma_{vo}) \quad (3)$$

ここに、 f_s は周面摩擦力である。 Q_t は $(q_t - \sigma_{vo})$ を σ'_{vo} で正規化しているので、現在の拘束圧よりどのくらいせん断強度を有しているかを表す指標であり、この値が大きいほど正のダイレタンシーの度合いが強い。 F_t は、地盤の種類に対応した値で、大きいほど粘性土であることを示している。

鈴木²⁾らは、この I_c を用いて、CPTから次式によって N 値(N_c 値)を求めることを提案した。

$$N_c = 0.341 I_c^{1.94} (q_t - 0.2)^{(1.34 - 0.0927 I_c)} \quad (4)$$

ただし、 $q_t < 0.2$ MPaの場合は $N_c = 0$ 。

SPTから求めた N 値と(4)式による N_c 値の比較を図5に示す。 I_c を考慮することによって、全ての深度において図4と比べて N 値と N_c 値は良い一致を示しているのがわかる。

スウェーデン式サウンディング試験に求めた1m貫入に要する回転数 N_{sw} と N 値の関係を、CPTの場合と同様に、 I_c によって解釈してみる。図6に示す例は、地点1で得られた値であり、また N_{sw} は文献4)から、 I_c は文献5)から得られ

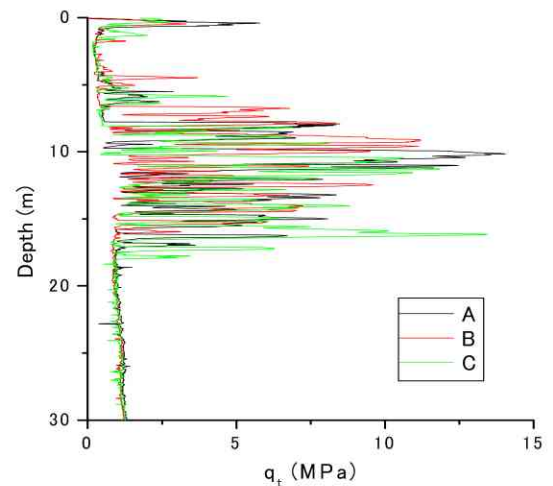


図2 CPTの結果の比較(地点1)

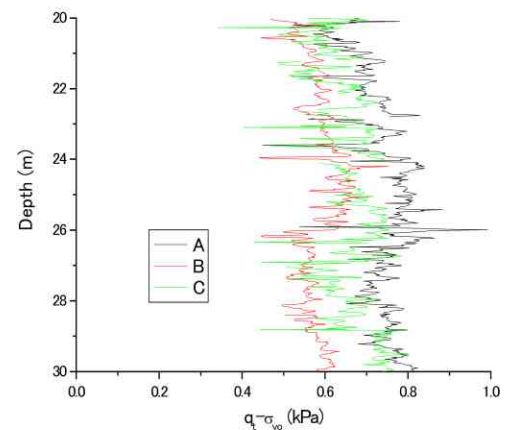


図3 粘性土地盤におけるCPTの比較(地点1)

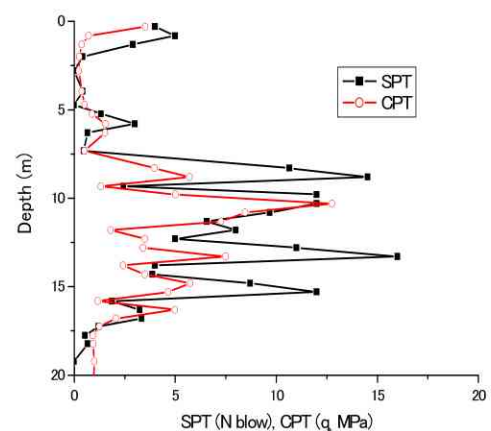


図4 N値とCPTから測定された先端抵抗の比較(地点1)

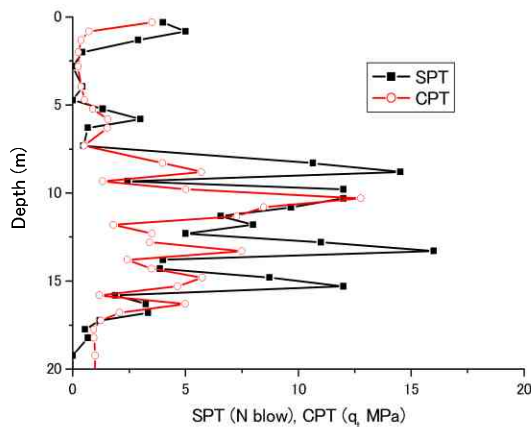


図5 鈴木ら³⁾の提案した方法による N 値の比較 (地点1)

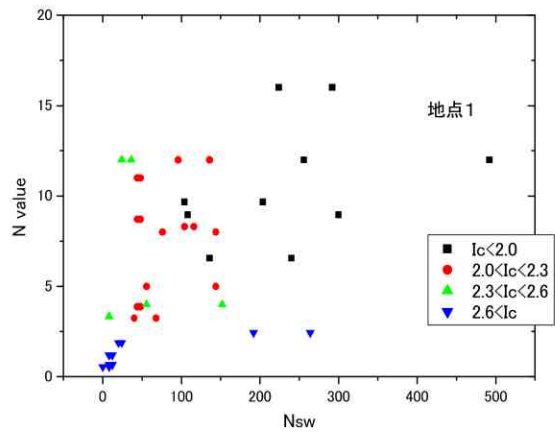


図6 I_c によって分類した N 値と N_{sw} の比較

た値を用いた。文献4)にも示されているように、粘性土は砂質土に比べて下方に位置する傾向がある。今回整理した関係においても、 I_c が大きくなると (粘土の傾向が強くなる)、同じ N_{sw} において N 値が小さな傾向にある。これは、すでに述べた CPT の場合と同様に説明できる。

ここで問題となるのは CPT で測定される f_s 値である。CPT の最初の JGS の基準では、周面摩擦に対する基準を設けなかった。その理由は文献6)で示したように、基準の作成の際に行った8種類のCPTを用いた一斉試験の結果、あまりにも f_s の測定誤差が大きかったことによる。結果は省略するが、 q_t や間隙水圧(u)と比べて、今回の試験においても測定された f_s 値にはかなり機関によって差が生じた。しかしながら、 I_c 値に変換すると図7に示すように、それほど大きな差は生じていない。

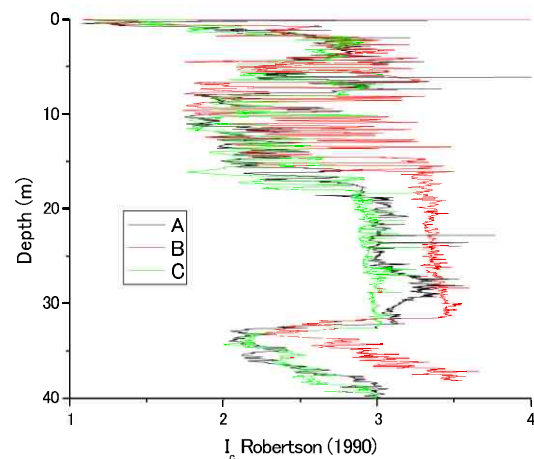


図7 機関の違いによる I_c の比較

3.2 周面摩擦の影響

SPT 以外の原位置試験では、試料が採取できないので、原位置試験を解釈する上で重要な排水条件を考慮できないことが最大の弱点である。CPT の場合は、先端抵抗(q_t)の他に間隙水圧(u)および周面摩擦力(f_s)を測定し、土の種類、すなわち地盤の排水性を判断している。この典型的な例がすでに示した I_c である。他の動的貫入試験や、スウェーデン式サウンディングでは、これに代わるものとして、貫入時の音や、今回の一斉試験でも行われているように試料を採取することによって、この弱点を克服しようとしている。

SPT, CPT を除く原位置試験のもう一つの弱点は、ロッドと地盤の摩擦である。動的コーン貫入試験では、ボーリング孔がないので、地表面の与えられた打撃エネルギーはロッドと地盤の摩擦によって減衰し、先端にはかなり小さなエネルギーしか伝達しない。スウェーデン式サウンディング試験でも同様で、重りの荷重あるいは回転力は周面摩擦によってかなり減少する。そして、これらの減少割合は測定深度が増すにつれ増大する。動的コーン貫入試験の場合は、トルクレンチでロッドと地盤の摩擦を測定し、この値を用いて打撃回数を補正している。しかし、今回の調査結果でも、SPT で測定された N 値より、動的コーンの補正した N 値を比較すると、後者が大きく、特に粘性土の場合には、その差が著しくなる。また打撃エネルギーが小さいほど、また先端がスクリーで回転しながら貫入する場合 (DTPT) は、 N 値が大きく測定される傾向にある。

トルクレンチで測定された値と、CPT によって測定された f_s との関係を見るために、以下の式によってロッドに働く平均摩擦力(f_{vm})を計算した。

$$M_v = (D\pi) \times (D/2) \times L \times f_{vm} \quad (5)$$

ここに、 M_v : トルクレンチで計測されるモーメント、 D : ロッドの直径、 L : 深さ

また、CPT からは以下の式によって平均的な f_s (f_{sm}) を求めた。

$$f_{sm} = \Sigma(f_{si} \Delta L_i) / L \quad (6)$$

ここに、 f_{si} : 深さ i で測定された f_s , ΔL_i : 測定間隔

各動的貫入試験から求められた f_m と CPT から測定された f_{sm} との比較を図 8 に示す。 f_m がかなり小さいのがわかる。この原因としてロッドの径 (D) と比べて貫入先端の径 (D_i) が大きいことが挙げられる。この比は動的コーンの種類によって異なっており、もし上記の推察が正しければ、 D_i/D が大きいほど、 f_m が小さくなると思われる。これを見るために、動的コーンの結果だけを取り出して、スケールを拡大して図 9 に示す。かなり大きなバラツキが見られるが、 D_i/D の違いによる f_m の有為な差は認められない。

4. まとめ

一戸建て住宅を対象とする地盤調査は、通常の土木構造物のように、費用をかけることができないので簡易な地盤調査を行っている。現行の調査法で問題となるのは、①ロッドの摩擦と、この補正方法、②地盤の透水性の評価である。

ボーリング孔を必要としない動的貫入試験では、試験中にトルクレンチによってロッドを回転させ、回転力によって測定値を補正している。しかし、補正後の N 値は、ボーリング孔を有する SPT から測定された N 値より、かなり大きい。特に対象が粘性土の場合には、かなり大きな差が生じている。まずは、種々の地盤に対してロッドに働く摩擦力やエネルギー伝達率を測定し、これをもとに信頼性のある補正方法を確立する必要がある。

現在の設計体系は N 値をもとにしている。したがって、各試験によって得られた値は、 N 値に変換する必要がある。この変換にはどうしても地盤の種別の情報が必要である。しかしながら、簡易な試験では試料を採取することができないので、これに代わる方法を見つける必要がある。

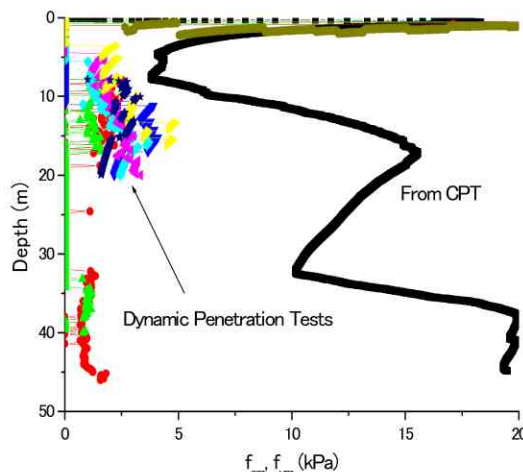


図 8 CPT で測定された周面摩擦とトルクレンチで測定したロッドの摩擦の比較

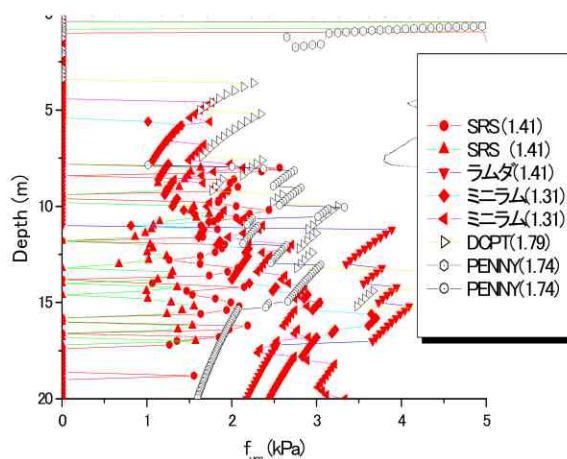


図 9 各動的貫入試験におけるロッドの摩擦 () 内の数字は D_i/D

参考文献

- 1) 田中政典・田中洋行：SPT, CPT, DMTを用いた細粒分を多く含む改良地盤の液状化判定，土木学会論文集，No.701/III-58, pp.433～444，2002.
- 2) 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.
- 3) Robertson, P. K. : Soil classification using the cone penetration test, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No. 1, pp. 151～158, 1990.
- 4) 平田茂良・山本明弘・市村仁志・大島昭彦・下平裕司・深井公・金哲鎬：浦安市における各種サウンディング試験の比較（その 4:SWS），第 47 回地盤工学研究発表会講演集，pp.155～156，2012.
- 5) 三村衛・浅尾一巳・吉村貢・寺尾廣孝：浦安市における各種サウンディング試験の比較（その 1:RI-CPT），第 47 回地盤工学研究発表会講演集，pp.149～150，2012.
- 6) 電気式静的コーン貫入試験ワーキンググループ：電気式静的コーン試験の基準案と一斉試験の結果，第 28 回地盤工学研究発表会講演集，pp.289～292，1993.