

CPTによる塑性指数を考慮した液状化判定（その1）

CPT 液状化判定 塑性指数 地盤試験所 ○北條 豊 中央大学 正会員 齋藤 邦夫
 日揮 正会員 深沢 健 川崎地質 正会員 黛 廣志
 中央開発 正会員 西原 聡 カンゼン・アリンク 正会員 大塚 潤
 千葉エンジニアリング 正会員 若月 洋朗

1. はじめに

現在、CPTを用いた液状化判定方法が広く普及している。「建築基礎構造設計指針」(2001)ではCPTから得られた先端抵抗(q_c)を用いて液状化抵抗比(FL)を求めている。また、「道路橋示方書・同解説」(平成24年)¹⁾は、N値を用いた液状化判定であるが、最近の研究成果により、CPTから求めた換算N値を用いた液状化判定が有効であることが分かっている²⁾。

各種サウンディングに関する一斉試験が表-1のように実施され、その結果は地盤工学研究発表会などで公表されている。本論では、この一斉試験のデータを用い、CPTによる液状化判定の過程において、塑性指数(I_p)と細粒分含有率(FC)を判定条件に加える方法について提案する。

表-1 各種サウンディングに係わる一斉試験

地点	試験場所	試験名	No.	地下水位	ボーリングとの距離
地点1	横浜市市内	コーン貫入一斉試験 2007 ³⁾	No.1	GWL-1.05m	5~6m
地点2	千葉県浦安市市内	浦安市における各種動的サウンディング試験の比較 ⁴⁾	No.1	GWL-1.12m	7.2m
			No.3	GWL-1.12m	6.4m
地点3	滋賀県守山市市内	滋賀県守山市における地盤調査一斉試験 ⁵⁾	No.1	GWL-1.72m	5.0m
			No.2	GWL-1.17m	5.0m
地点4	千葉県香取市内	各種サウンディングの液状化対策手法適用性に関する現地実験	No.2	GWL-0.67m	6.0m

2. CPTから求めた地盤の平均粒径および換算N値

CPT結果から換算N値を求める際には次式⁶⁾に示す土質性状指数(I_c)を用いる。

$$I_c = \left[(3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2 \right]^{0.5} \quad (式1)$$

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

$$F_r = [f_s / (q_t - \sigma'_{vo})] \quad (式3)$$

I_c : 土質性状指数 Q_t : 基準化先端抵抗 F_r : 基準化周面摩擦比 q_t : 先端抵抗(MPa) f_s : 周面摩擦(MPa)
 σ'_{vo} : 総土被り圧(MPa) σ'_{vo} : 有効土被り圧(MPa)

(式1)により算出される I_c は、図-1に示すように円の方程式であり、Robertsonの提案⁶⁾により円の大きさ(I_c の大きさ)で土質性状の判別が行われている。

図-1は Q_t と F_r および I_c の関係を示したものである。同図には一斉試験から得られたデータを平均粒径(D_{50})毎に併せて示している。図より概ね土質分類が可能であることが分かる。

図-2には I_c と D_{50} の関係を示すが、若干のパラッキはみられるものの、相関係数は $R=-0.77$ となり、両者には良い負の相関があると言える。

液状化判定においては、 $D_{50} > 10\text{mm}$ および $D_{10} > 1\text{mm}$ の礫質土はその対象外となるが、図-1,2に示す関係により、大まかにではあるがCPT結果から得られた I_c から土層の D_{50} を推定することができる。

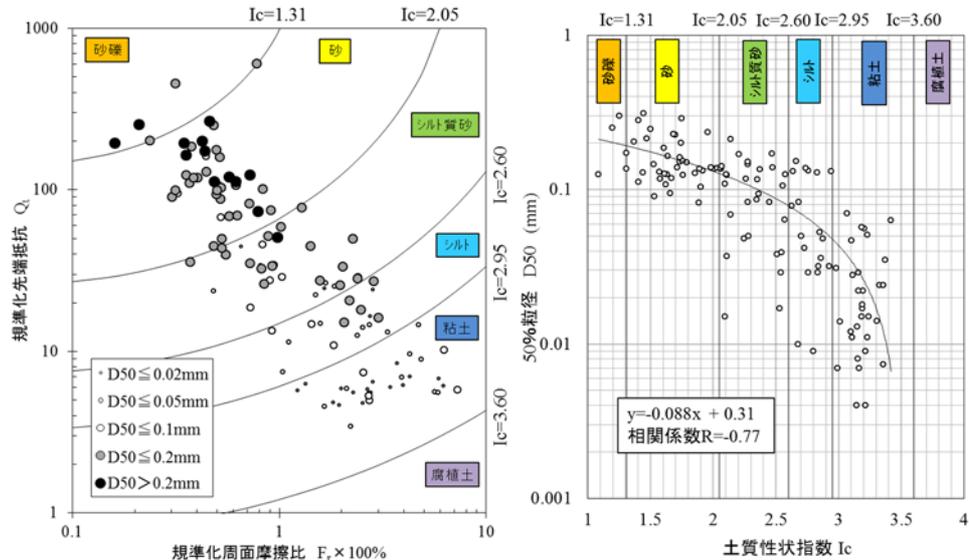


図-1 Q_t と F_r および I_c の関係と D_{50} の分布

図-2 I_c と D_{50} の関係

鈴木ら⁷⁾は換算 N 値(N_c)を求める次式を提案している。

$$\begin{cases} N_c = 0.341 \cdot I_c^{1.94} (q_t - 0.2)^{(1.34 - 0.0927 \cdot I_c)} \\ N_c = 0 (q_t \leq 0.2 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (\text{式 4})$$

N_c : 換算 N 値 q_t : 先端抵抗(MPa) I_c : 土質性状指数

(式 4)の $(0.341 I_c^{1.94})$ は q_t/N が土質の差によって変わる影響を表現し, $(q_t - 0.2)^{(1.34 - 0.0927 \cdot I_c)}$ は土の硬さ, あるいは土の密度によって変わる影響を表現している。

図-3 は鈴木らの提案式から求めた N_c と実測 N 値の対比を示す。なお, CPT データは N 値測定区間の 30cm 区間を平均した値を採用した。 N_c/N 値を集計した結果, 平均値は 1.06, 標準偏差は 0.69, 変動係数は 0.65 となり, 相関係数は 0.81 であった。このことから, CPT 結果から N 値を精度よく推定できることが確認できる。

3. 土質性状指数と細粒含有率の関係

液状化判定においては, 細粒含有率(FC) > 35%かつ塑性指数(I_p) > 15 の土層はその対象外と規定されている。本章では CPT 結果から FC を推定するための既往の研究について検討する。

図-4 は Q_t と F_r および I_c の関係図上に, 一斉試験から得られたデータを FC 毎に示している。図より I_c と FC に概ね相関があることが分かるが, FC を精度よく推定するには至っていない。

図-5 は I_c と FC の関係を示すが, 相関係数は $R=0.82$ となり, 両者には良い相関があると言える。ただし, FC が 30~70% のデータが少なく, かつバラツキも大きい傾向が見られる。

この I_c と FC の関係に着目した換算式は, 多くの研究者らにより提唱されている。鈴木ら⁷⁾は FC を求める次式を提案している。

$$FC = I_c^{4.2} \quad (\text{式 5})$$

図-6 は鈴木らの提案式から求めた推定 FC と実測 FC の対比を示す。なお, CPT データは試料採取範囲から中央深度の値を採用した。推定

FC/実測 FC を集計した結果, 平均値は 1.09, 標準偏差は 0.81, 変動係数は 0.74 であった。このことから, CPT 結果から FC をある程度の精度で推定できることが示唆される。しかし, 実測 $FC \leq 35\%$ であっても推定 $FC > 35\%$ となるものがあるため, 鈴木らの提案式から求める $FC \leq 35\%$ の推定には誤差を生じる可能性があることを否定できない。

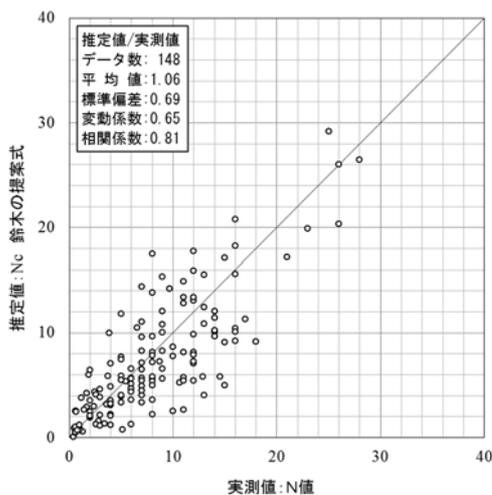


図-3 実測 N 値と推定 N_c の対比

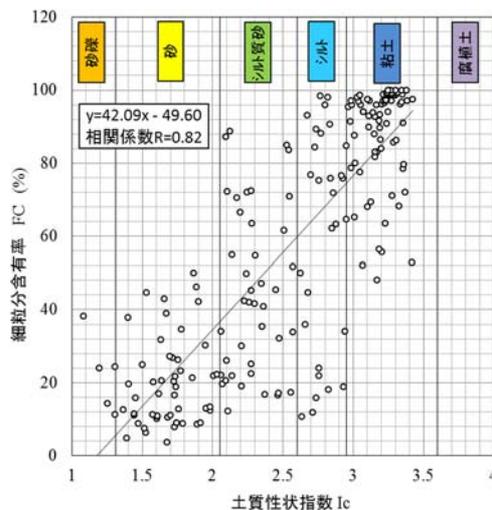


図-5 I_c と FC の関係

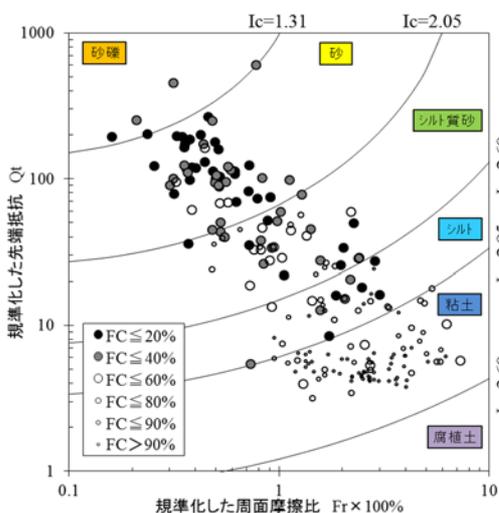


図-4 FC の分布

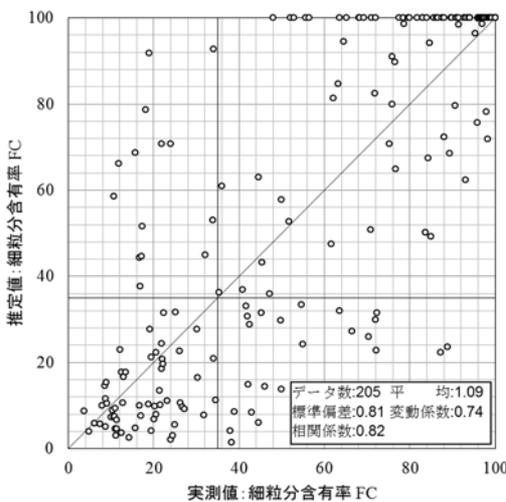


図-6 実測 FC と推定 FC の対比

4. 塑性指数と細粒分含有率の新たな推定法

先に記したように、液状化判定における I_p と FC の推定は重要な意味を持つ。本章では、CPT 結果から I_p と FC を推定するための新たな手法を提案する。

図-7 に CPT の測定データと I_p および粒度試験結果 (例として浦安 3) を示す。 $I_p \leq 15$ となる粘性土は、厚く堆積した粘性土ではなく砂泥互層で多く見られる。また、粘土分含有率は 20% 未満と低く、砂分含有率は高い。特に $I_p \leq 10$ となる粘性土は砂分が 40% 以上占める。これらを勘案すると、 $I_p \leq 15$ となる粘性土は、粘土分含有率が低く砂分含有率が多い中間土層と言える。

図-8 に一斉試験から得られた I_p と粒度分布の関係を示す。 I_p と粘土分含有率の相関係数は $R=0.88$ となり、良好な相関がみられる。

田中ら⁸⁾は各サイトのデータを分析し、(式 6)にて算出される基準化間隙水圧比(B_q)と I_p の関係を図-9 に示し、 B_q は I_p によって変化すると結論付けている。ただし、これらのデータは主に粘性土のものであることに留意されたい。

$$B_q = (u_2 - u_0) / (q_t - \sigma_{vo}) \quad (式 6)$$

B_q : 基準化間隙水圧比 u_2 : 間隙水圧(MPa) u_0 : 静水圧(MPa) q_t : 先端抵抗(MPa) σ_{vo} : 総土被り圧(MPa)

(式 6)からも明らかなように、 B_q が大きければ透水性の低い粘性土層であり、 B_q が小さければ透水性の高い砂質土層と判断することができる。

図-10 は一斉試験から得られたデータの Q_t と F_r の関係を示したものである。図中、 I_p が 15 以下のデータを赤丸にて、それ以外を青丸にて示しているが、この図からは両者の識別が困難であることが分かる。

図-11 は、同データを図-9 に準じて B_q と I_p の関係として示したものである。同図から、 $I_p \leq 15$ の粘性土は $B_q \leq 0.1$ の範囲に分布していることが分かる。通常、粘性土はコーンの貫入により過剰間隙水圧が発生し、間隙水圧 u_2 は静水圧 u_0 よりかなり大きな値を示す。つまり、 $I_p \leq 15$ の粘性土は、過剰間隙水圧があまり発生しない特性を持つ粘性土と判断することができる。

図-12 は、Robertson の土質性状分類チャート ($Q_t - B_q$)⁹⁾ に一斉試験のデータを $I_p=15$ を境に色分けしてプロットした結果である。このチャートは我が国の粘性土に対する適用性が実証されている¹⁰⁾のものである。同図から、 $I_p \leq 15$ の粘性土は土質分類 3 (粘土～シルト混じり粘土) に分布せず、土質分類 4～6 (シルト質粘土～砂) に分布している。また、 Q_t に着目すると、 $I_p \leq 15$ の粘性土は $Q_t \geq 7$ に分布している。

以上の結果より、 $I_p \leq 15$ の粘性土は、 $Q_t \geq 7$ および $B_q \leq 0.1$ に分布すると言える。

図-13 は、土質性状分類チャート ($Q_t - B_q$) に一斉試験データを $FC=35\%$ を境に色分けしてプロットした結果である。同図から、 $FC \leq 35\%$ の砂質土は、 $I_p \leq 15$ となる粘性土の判断基準とした $Q_t \geq 7$ および $B_q \leq 0.1$ と一致する結果となった。

この結果より、($Q_t - B_q$) チャート上で $Q_t \geq 7$ および $B_q \leq 0.1$ の範囲に分布する土層は、 $FC \leq 35\%$ かつ $I_p \leq 15$ の土層となる。3 章に記した細粒分含有率の提案式では $FC \leq 35\%$ の判定に誤差を生じる可能性があるため、本チャート上で $Q_t \geq 7$ および $B_q \leq 0.1$ の範囲に分布する土層を液状化の可能性のある土層として取り扱うことを提案する。

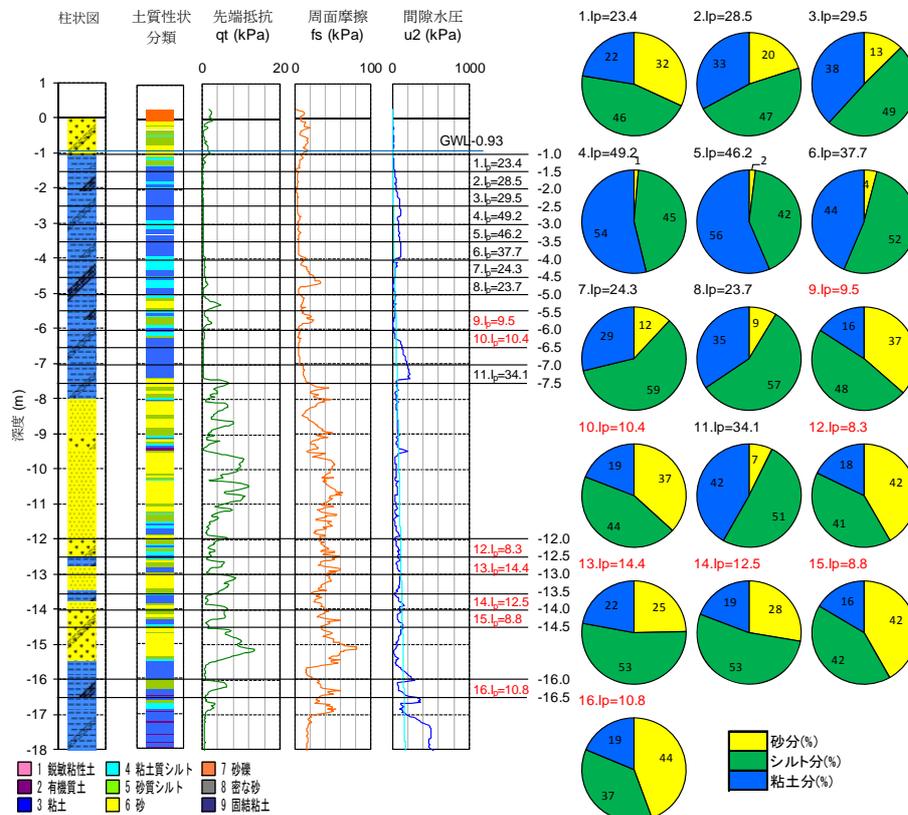


図-7 CPT 測定結果と粒度試験結果の対比の例 (浦安 3)

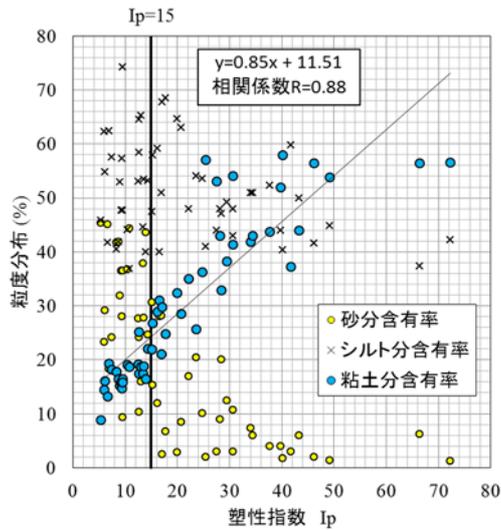


図-8 I_p と粒度分布の関係

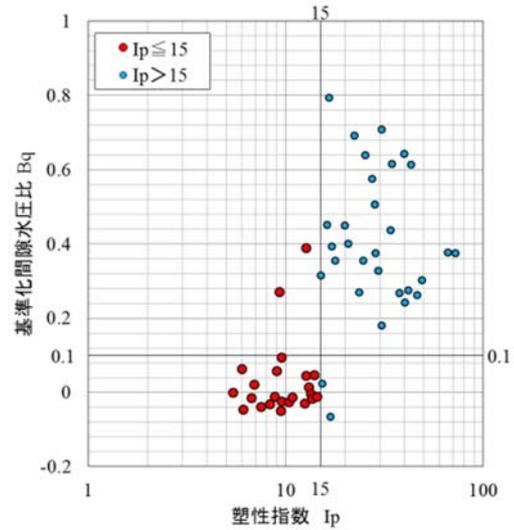


図-11 B_q と I_p の関係

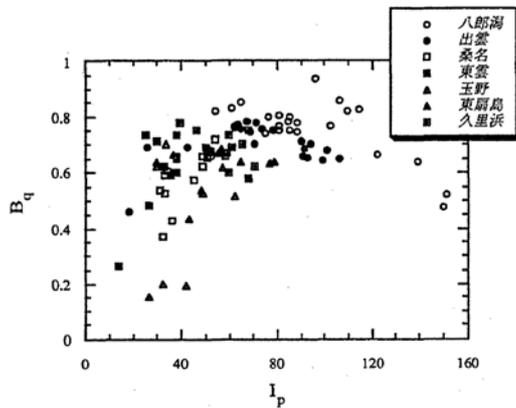


図-9 基準化間隙水圧と塑性指数の関係

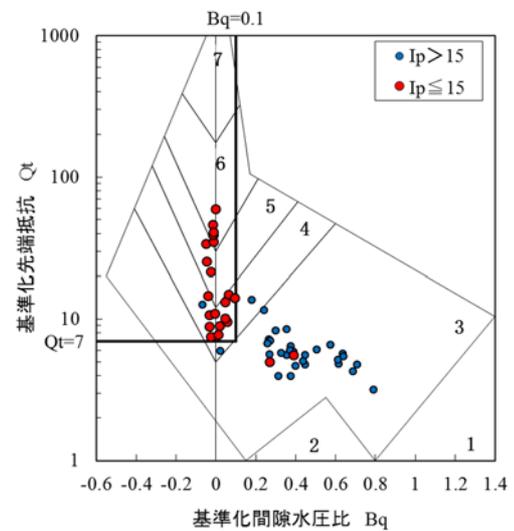


図-12 I_p の分布($Q_t \sim B_q$)

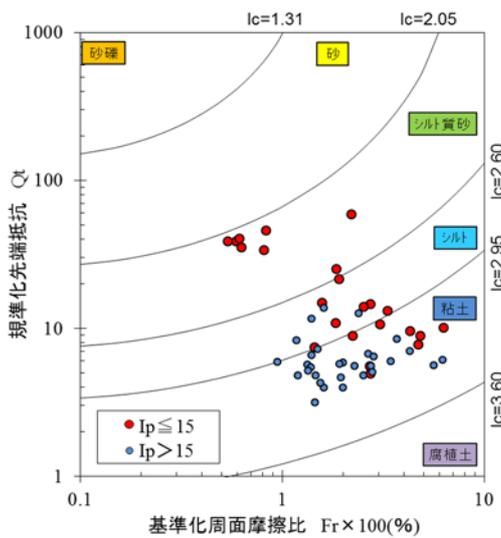


図-10 I_p の分布($Q_t \sim F_r$)

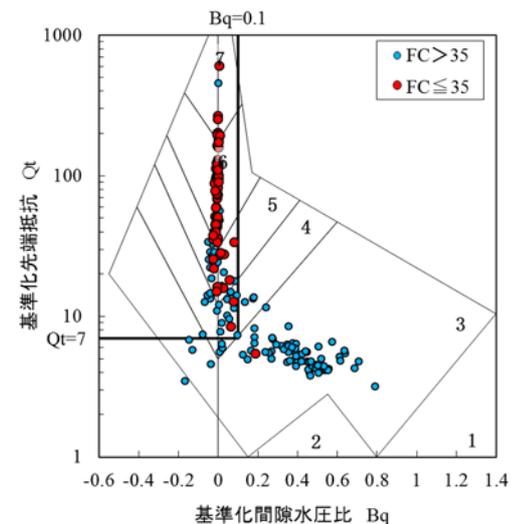


図-13 FC の分布($Q_t \sim B_q$)

土質性状分類($Q_t \sim B_q$)
 1. 鋭敏粘土 2. 有機質土～PEAT 3. 粘土～シルト質粘土 4. 粘土混じりシルト～シルト質粘土
 5. シルト混じり砂～砂質シルト 6. シルト質砂～きれいな砂 7. 砂～礫混り砂

5. まとめ

- ① 鈴木 の提案式から求めた換算 N 値 N_c と実測 N 値の対比を図-3 に示した。 N_c/N 値を集計した結果、平均値は 1.06、標準偏差は 0.69、変動係数は 0.65 となり、相関係数は 0.81 であった。このことから、CPT 結果から N 値を精度よく推定できることができる。
- ② 鈴木 の提案式から求めた推定 FC と実測 FC の対比を図-6 に示した。推定 FC/実測 FC を集計した結果、平均値は 1.09、標準偏差は 0.81、変動係数は 0.74 となり、相関係数は 0.82 であった。このことから、CPT 結果から FC をある程度精度よく推定できる。ただし、 $FC \leq 35\%$ の判定には誤差を生じる可能性がある。
- ③ 図-7 には浦安 3 の CPT データと粒度試験を示した。 $I_p \leq 15$ の粘性土は粘土分含有率が 20%未満であり、砂分含有率が高い。特に、 $I_p \leq 10$ となる粘性土層は、砂分が 40%以上を占める中間土である。
- ④ 図-8 には I_p と粒度分布の関係を示した。 I_p と粘土分含有率の相関係数は $R=0.88$ となり良好な相関がみられた。
- ⑤ 図-12 には Robertson の土質性状分類チャート ($Q_t \sim B_q$) に I_p を示した。 $I_p \leq 15$ の粘性土は土質分類 3 (粘土) には分布せず、土質分類 4~6 (シルト質粘土~砂) に分布し、 $Q_t \geq 7$ および $B_q \leq 0.1$ の範囲に分布する。
- ⑥ 図-13 には Robertson の土質性状分類チャート ($Q_t \sim B_q$) に FC を示した。 $FC \leq 35$ の砂質土は I_p と同様に、 $Q_t \geq 7$ および $B_q \leq 0.1$ の範囲に分布する。
- ⑦ $Q_t \geq 7$ および $B_q \leq 0.1$ にプロットされる土層は、 $FC \leq 35\%$ かつ $I_p \leq 15$ の土層となる。既往の FC 提案式では $FC \leq 35\%$ の判定に誤差を生じる可能性があるため、Robertson の土質分類チャート ($Q_t \sim B_q$) 上の $Q_t \geq 7$ および $B_q \leq 0.1$ に分布する土層を液状化の可能性がある土層として取り扱うことを提案する。

6. おわりに

I_p と FC は液状化判定の Key となるファクターであるが、両者を同時に判定できる $Q_t \sim B_q$ チャートは実務上有益である。特に、低塑性土においては I_p を室内試験から求めることができないこともあるため、液状化判定に支障をきたすこともある。これらの具体例について次報にて詳細に報告する予定である。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, pp.132~149, 2012.
- 2) 岡 信太郎・他, 「SPT と CPT による液状化予測の比較」, GeoKanto2013, 防災 4-1, 2013.
- 3) 末政直晃・他, 「コーン貫入一斉試験 2007」, 地盤工学会誌, Vol.57, No.8, 2009.
- 4) 大島昭彦・他, 「浦安市における各種動的サウンディング試験の比較 (その 1 : 調査概要)」第 47 回地盤工学会研究発表会, pp.131~132, 2012.
- 5) 峰翔太郎・他: 「滋賀県守山市におけるサンプリング・サウンディング試験と沖積粘土層の性状」, 第 48 回地盤工学会研究発表会, pp.343~345, 2013.
- 6) Robertson, P.K. and Wride, C.E. Evaluating Cyclic Liquefaction Potential using the CPT, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, No. 3. 1998.
- 7) 鈴木康嗣, 時松孝次, 賓松俊明, 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, 73-80, 2003.
- 8) 田中洋行・他, コーン貫入試験における間隙水圧の挙動について, 第 27 回土質工学研究発表会, 163-166, 1992.
- 9) Robertson, P.K. Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 27(1), 151-8. 1990.
- 10) 深沢健・日下部治, 粘性土地盤におけるコーン貫入試験の適用性, 土木学会論文集 No.799/III-72, 153-170, 2005.