

砂～中間土地盤に対する電気式コーン貫入試験結果の解釈（その2 解析結果）

コーン貫入試験 土質分類 中間土

(株)地盤試験所 正会員 ○北條 豊 正会員 高橋 千代丸
正会員 金道 繁紀 正会員 山本 伊作
（株）タカラエンジニアリング 正会員 大塚 潤
千葉エンジニアリング(株) 正会員 若月 洋朗
（株）ダイエーコンサルタンツ 非会員 久下 信明
中央大学 国際会員 齋藤 邦夫

1. はじめに

通常、地盤に関する設計では、砂か粘土に分けて行われる。これは、砂と粘土で透水性が大きく異なるため、砂を排水層、粘土は非排水層として取り扱われる。したがって、地盤の土質区分が合理的に評価できれば、有用な設計情報となり得る。そこで本稿では、砂～中間土に遷移する霞ヶ浦付近の地盤について、前報¹⁾で紹介した各種試験結果を背景に、電気式コーン貫入試験（CPTU）の解析手法として提案されているファジー法に着目し、同法より得られる土質分類の妥当性を検討することを試みた。

2. 中間土に関する既往の研究

砂か粘土か判断が難しい土は中間土と呼ばれる。3者の区分については多くの実務者や研究者によって幅広い検討が行われており、粒度分析、コンシステンシー、各種力学特性を基に表-1 のように取りまとめられている²⁾。なお、本文では主として、砂分含有量と塑性指数に着目し、土質の区分判定を行うものとする。

表-1 砂・中間土・粘土の判定基準

	砂含有量 (%)	塑性指数 I_p (%)	透水係数 k (m/s)	圧密係数 c_v (m ² /min)
砂	80以上	NP	10 ⁻⁶ 以上	10 ¹ 以上
中間土	50～80	NP～25	10 ⁻⁹ ～10 ⁻⁶	10 ⁻¹ ～10 ¹
粘土	50以下	25以上	10 ⁻⁹ 以下	10 ⁻¹ 以下

3. ファジー法による粒度組成分量の推定と土質分類

3.1. ファジー法における基本式

ファジー法は、補正先端抵抗 q_t と周面摩擦 f_s から求める周面摩擦比 R_f [$=f_s/q_t \times 100(\%)$] から土質性状インデックス (U) を求め、各粒度（砂、シルト、粘土）の組成分量を推定する方法である。Tumay ら³⁾による算定式を以下に示す。

$$x = 0.1539R_f + 0.8870 \log(q_t) - 3.35$$
 … (式1)

$$y = -0.2957R_f + 0.4617 \log(q_t) - 0.37$$
 … (式2)

$$U = \frac{(a_1x - a_2y + b_1)(c_1x - c_2y + d_1)}{(c_1x - c_2y + d_1)^2 + (c_2x + c_1y + d_2)^2} - \frac{(a_2x + a_1y + b_2)(c_2x + c_1y + d_2)}{(c_1x - c_2y + d_1)^2 + (c_2x + c_1y + d_2)^2}$$
 … (式3)

$$\mu_c(U) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{U + 0.1775}{0.86332}\right)^2\right) & [U \geq -0.1775] \\ 1.0 & [U < -0.1775] \end{cases}$$
 … (式4)

$$\mu_m(U) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{U - 1.35}{0.724307}\right)^2\right) [-\infty < U < \infty]$$
 … (式5)

$$\mu_s(U) = \begin{cases} 1.0 & [U > 2.6575] \\ \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{U - 2.6575}{0.834586}\right)^2\right) & [U \leq 2.6575] \end{cases}$$
 … (式6)

3.2. ファジー法による粒度組成区分結果

霞ヶ浦付近の CPTU 試験結果に基づき、ファジー法の（式4）～（式6）を用いて同地盤の深さに対する粒度組成の変化を計算した結果が図-1(d)である。同図には比較のため、粒度試験により求めた柱状図（図-1(a)）も併せて示す。前報によると、深さ $z < 5\text{m}$ では礫混り砂であり、ファジー法と良い相関が認められる。しかし、 $z > 5\text{m}$ では、粒度試験結果に較べ、ファジー法は砂分含有量をやや過少に評価するが、その一方、シルト分を過大に評価する傾向が窺える。また、図-1(b)、図-1(c)に示す Robertson の $Q_t \sim F_r$ 関係ならびに $Q_t \sim B_q$ 関係より評価した土質性状分類結果との対応を観察すると、規準化周面摩擦比 F_r [$=f_s/(q_t - \sigma_{vo}) \times 100(\%)$] を用いた分類法との整合性が指摘できる。つまり、粒度試験、2つの Robertson 分類法ならびにファジー法の3者の対応性を模式的に表すならば

粒度試験 $\asymp Q_t \sim B_q$ 法 ファジー法 $\asymp Q_t \sim F_r$ 法
になる。

さらに、本検討において留意すべきは、 $z > 24\text{m}$ に堆積する土層の判定である。図-1(d)で明らかなように、粒度試験によると砂分量が50%を超えており、他の成分と併せて土質分類上、シルト質砂に相当する判定が与えられる。しかしな

Interpretation of CPT results for sand to intermediate ground (Part 2 Analysis Results)

Yutaka Hojo (Jibanshikenjo Co., Ltd.), Chiyomaru Takahashi (Jibanshikenjo Co., Ltd.), Shigeki Kondo (Jibanshikenjo Co., Ltd.), Isaku Yamamoto (Jibanshikenjo Co., Ltd.) Jyun Otsuka (Takara Engineering Co., Ltd.), Hiroaki Wakatsuki, (Chiba Engineering Co., Ltd.), Nobuaki Kuge (Daiei Consultant Co., Ltd.), Kunio Saito (Chuo University)

がら、CPTU データによる土質分類方法では、これがシルト質粘土～シルトに区分され、判定が相違する結果となっている。

この点について、当該地盤の深さに対する塑性指数 I_p (図-1(e)) とコーン貫入に伴う間隙水圧分布 (図-2(b)) を対比させると、NP に相当する部分 ($0 \leq z \leq 21\text{m}$) では常に静水圧、つまり透水性の良好な砂に典型的に認められる特性が捉えられている。

一方、 $z > 21\text{m}$ の地盤では静水圧を超える間隙水圧が測定されている。これはコーン貫入に伴う地盤のせん断破壊が非排水条件であることを意味している。図-1(e)に示すように $z > 24\text{m}$ に堆積する土層は塑性指数 $I_p \approx 12 \sim 13$ であり、相当量の粘土、シルト分が混在していることは明らかである。これが過剰間隙水圧発生の原因となっているものと判断される。CPTU の特徴として他のサウンディング法に比べて収集し得る情報量が多いといわれているが、まさに今回の結果がこれを裏付けている。また、図-2(b)は、地盤の粒度特性について、通過粒径をパラメータにして表している。これより、シルト質砂に分類される土層には、粘土に相当する微小粒子がおおよそ 10% 存在することが認められる。

図-3 は、ファジー法の粒度分析法の特性を粒度試験の場合と比較した結果である。今回の結果より判断する限り、ファジー法は粘土分量に対する判定には比較的良好な対応が認められた。しかしながら、砂分あるいはシルト分量については、やや乖離の大きい評価となった。

4. まとめ

霞ヶ浦付近の地盤を対象とした CPTU、室内土質試験より、土質分類に関し次のような成果が得られた。

- (1) ファジー法による土質分類は、定性的に地盤の粒度特性を把握できる方法である。ただし、特定の粒度成分を過大あるいは過小に評価する場合もある。そこで、日本での実績を積み重ねて日本の土にも適用できる基準を作成していくことが必要と考える。
- (2) CPTU の間隙水圧測定は有用な地盤情報を捉えており、中間土の判定に有効である。
- (3) 中間土を判定する場合、粒度とコンシステンシーの両者を考慮する必要がある。

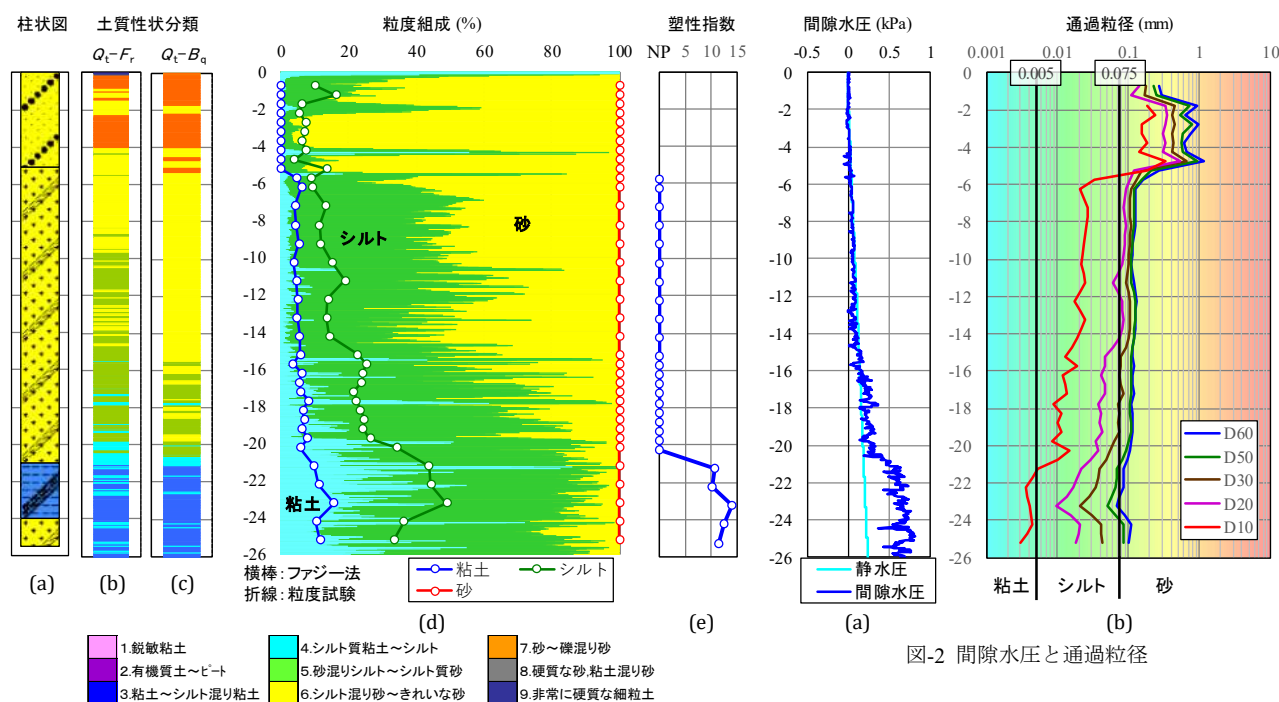


図-1 ファジー法の解析結果と室内土質試験の結果

【参考文献】

- 1) 堺田, 他, 砂～中間土地盤に対する電気式コーン貫入試験結果の解釈 (その1 調査結果), 第55回地盤工学研究発表会, 2020.
- 2) 地盤工学会, 中間土 砂か粘土か, ジオテクノート, 1994.
- 3) Tumay, M.T., Abufarsakh, M.Y., Zhang, Z., From Theory to Implementation of a CPT-Based Probabilistic and Fuzzy Soil Classification. ASCE GSP180, pp. 259 – 276, 2008.

図-2 間隙水圧と通過粒径

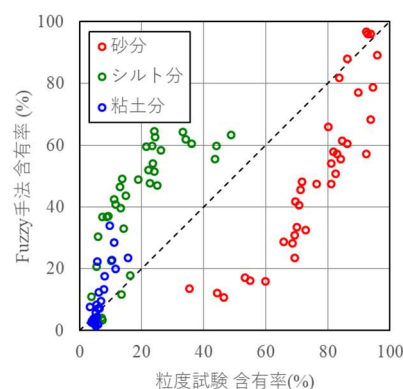


図-3 ファジー法と粒度試験結果の対比