

ピサの斜塔下の粘性土の強度・圧密特性

防衛大学校 学 ○蛭崎 大介 ・ 正 正垣 孝晴
(株)興和 正 中野 義仁 ・ 興亜開発(株) 正 菅野 康範
(財)地域地盤環境研究所 正 北田 奈緒子

1. はじめに

ピサの斜塔(以下、斜塔と略記)下の粘性土の地盤工学的性質は、斜塔の安定化に関係して多くの研究機関や研究者によって検討されてきた¹⁾。しかし、これらの研究は採取試料の品質評価を踏まえた強度・圧密特性の解釈に関するものでないため、地盤挙動の解釈の精度や解析の信頼度はよく分からない。

本稿では、ピサの斜塔下の粘性土の強度・圧密特性に及ぼす試料の乱れの影響がサクシオン測定を伴う一軸圧縮試験 UCT, K_0 圧密非排水三軸圧縮試験 CK_0UC , 圧密試験 IL から検討される。

2. 試料採取と検討方法

斜塔周辺で行われた試料採取と原位置試験の平面図を図-1 に示す。独立行政法人港湾空港技術研究所は、2003 年秋に斜塔の南側約 15m の場所で、JGS1221-2003 に規定するチューブ内径 75-mm の固定ピストン式シンウオールサンプラー(75-mm), イタリアで通常用いられているシェルビータブ(SS) とオスターバーク(OS) サンプラーを用いた試料採取と各種原位置試験を行った²⁾(PARI - 2003 調査)。この時、著者らは小径倍圧型水圧ピストンサンプラー³⁾(試料径によって、45/50-mm サンプラーと略記) を用いた試料採取をお誘い頂き、PARI - 2003 調査と平行して同じオペレータとボーリングマシンによって乱れの少ない土試料を採取した。このサンプリング位置(NDA - 2003 調査) は、図 - 1 に示す PARI - 2003 調査の位置から 4m 程度斜塔側に離れている。UCT と CK_0UC の供試体寸法は直径 $d15mm$, 高さ $h35mm$ (CK_0UC は圧密後の h) であり、IL は $d30mm$, $h10mm$ である。これらの寸法の供試体の強度・圧密特性が標準寸法のそれらと同等であることは別途確認している。

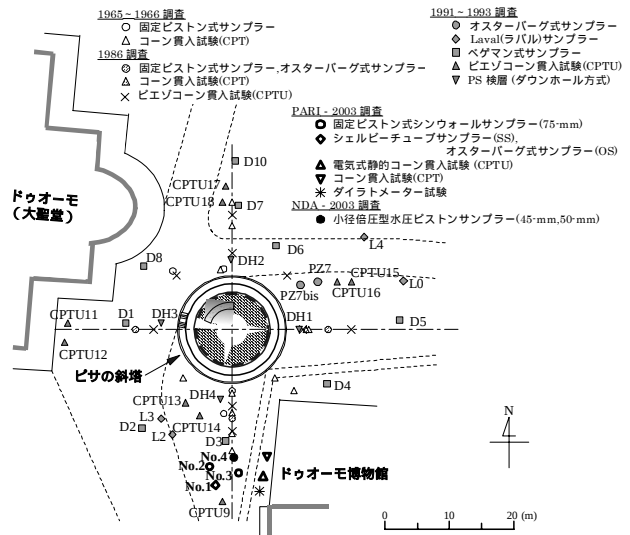


図 - 1 調査位置図

3. ピサ粘土の強度・圧密特性

ピサ粘土の指標的性質と圧密試験結果を図 - 2 に示す。 $z = -(10 \sim 21)m$ が沖積粘土であるが、微化石総合分析の結果から、 $-(19 \sim 21)m$ が陸成、その上部が海成粘土と推察された。また、 $z = -(29 \sim 40)m$ の堆積層は陸成と海成が混在する洪積粘土である。これらの土の土粒子密度は、 $2.67 \sim 2.81$ と高いが、この値は含有する岩石鉱物の土粒子密度のそれを反映している。

75-mm^2 と $45/50\text{-mm}$ サンプラーで採取した試料の圧密降伏応力 σ'_p と圧縮指数 C_c はほぼ同等と判断されるが、SS と OS サンプラーで採取したそれらは小さい。これは乱れによる試料の品質の低下が原因と考えられている²⁾。原位置の圧密降伏応力 $\sigma'_{p(1)}$ は、正垣の方法⁴⁾で推定した。 75-mm^2 と $45\text{-mm}/50\text{-mm}$ サンプラ

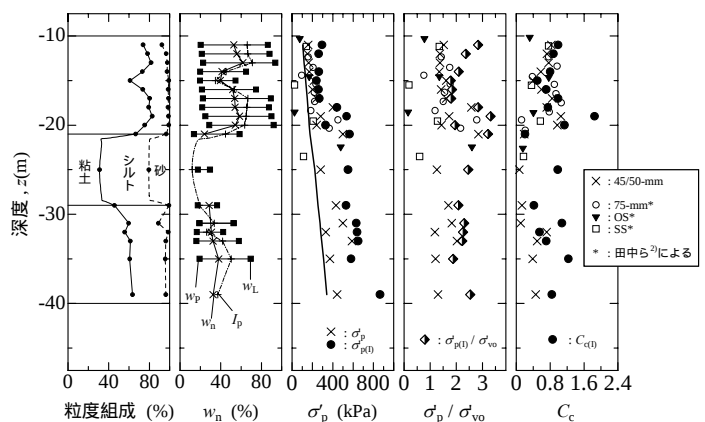


図 - 2 ピサ粘土の指標的性質と圧密試験結果

キーワード ピサ粘土 / 試料の乱れ / 一軸圧縮試験 / 三軸圧縮試験 / 三軸試験

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校建設環境工学科 TEL 046-841-3810 E-mail : shogaki@nda.ac.jp

ーから得た過圧密比 $OCR (= \sigma'_p / \sigma'_{vo})$ は、1.2～2.8 であるが、 $\sigma'_{p(I)}$ から得たそれらは沖積で 1.8～3.3、洪積で 1.9～2.5 である。ここに、 σ'_{vo} は有効土被り圧である。

UCT, CK₀UC の結果を図 - 3 に示す。 $z = (10 \sim 21)\text{m}$ の沖積粘土の自然含水比 w_n を見ると、75-mm²⁾ と 45-mm/50-mm サンプラーのそれに有意差は見られない。しかし、供試体のサクシオン S_0 は 30kPa 程度後者が大きい。非排水強度 ($c_u = q_u/2$) の結果には、UCT による $q_u/2$ に加え、CK₀UC で得た σ'_{vo} 下の $c_u (= c_u(\sigma'_{vo}))$ と $\sigma'_{p(I)}$ 下の $c_u (= c_u(I))$ を併せてプロットしている。 $q_u/2$ と $c_u(\sigma'_{vo})$ が $c_u(I)$ より小さいのは、サンプリングから供試体作成に至る試料の乱れと応力開放

が主因と推察している。この傾向は砂やシルトの含有量が多い中間砂層($z = -25\text{m}$)や洪積粘土で特に著しい。

図 - 3 には繰り返し土の $q_u (= q_{u(r)})$ に対する q_u と $2c_{u(I)}$ で求めた鋭敏比 S_t もプロットしている。 q_u で定義した S_t は沖・洪積粘土に関係なく、0.9～6.4 の値を示し、大阪の沖積(Ma13)や洪積粘土(Ma12)の 10～20 の値⁵⁾と比較しても、 I_p の大きな自然堆積粘土としては極端に小さい。中間砂層の $z = -25\text{m}$ と -29m において q_u で定義した S_t と $2c_{u(I)}$ で定義した S_t の差が大きくなっているが、これは上述の q_u の低下と同じ理由である。

Mesri ら⁶⁾ は $z = 13\text{m}$ のピサ粘土の粘土鉱物は 73%であることを報告している。そして、その構成はイライト(60%)、クロライト(16%)、イライト - スメクタイト(17%)、クロライト/スメクタイト(7%)とした。著者らも同じ深度から採取した試料に対して X 線回折を行った。その結果、石英・斜長石・緑泥岩・雲母鉱物・石膏・赤鉄鉱等の造岩鉱物を主体とし、粘土鉱物の含有はほとんどなかった。両試料は、含有鉱物や微視構造^{7),8)}のあらゆる点で異なっている。Mesri ら^{6),7)}の供試体は、1991～1993 年調査の Laval サンプラー()で得た試料であるが、図 - 1 に示す L0～L4 のどの位置から採取した試料であるのかは分からない。

ピサ市は Arno (アルノ) 川の河口域にあり、上流や周辺は変成岩 (炭酸カルシウム系頁岩、砂岩)、頁岩と砂岩の互層を呈する Flysch (フリッシュ) が母岩である。これらの風化碎屑物が著者らの試料の造岩鉱物の起源であるが、斜塔を含む周辺の堆積場の地形は、現在平坦で起伏が無い。限られた斜塔の敷地内で平面位置の違いによる沖・洪積粘土の構成鉱物の違いを説明する土質や堆積学的な情報を著者らは有していない。しかし、斜塔と同じ敷地内に建設された Cattedrale (大聖堂) や Battistero (礼拝堂) の柱・壁の大きな傾斜や不等沈下を目の当たりにすると、これらがアルノ川に起因した複雑な堆積環境を反映して、位置的な地盤の不均質性も大いに関係していることは容易に推察できる。

4. おわりに

一軸圧縮強度は推定した原位置非排水強度の(22～81)%であった。著者らの採取した試料に対する X 線回折の結果では、石英・斜長石・緑泥岩・雲母鉱物・石膏・赤鉄鉱等の造岩鉱物を主体とし、粘土鉱物の含有はほとんどなかった。Mesri ら⁶⁾の採取した試料とは含有鉱物や微視構造のあらゆる点で異なっていた。沖・洪積粘土の鋭敏比は 0.9～6.4 であり、高塑性の粘土としては小さい。造岩鉱物が主体で低位な構造であることがこの主因と推察された。ピサの斜塔の敷地内の粘土の性質の変化 (地盤の不均質性) が斜塔・大聖堂・礼拝堂等の建物の不等沈下の一因と推察された。

参考文献

- 1) Burland, J. B., Jamiolrowski, M. and Viggiani, C.: The stabilization of the leaning tower of Pisa, *Soils and Foundations*, Vol.43, No.5, pp.63-80, 2003.
- 2) 田中・渡部・椎名・白石・村上: ピサにおける地盤調査 (その 2), 第 39 回地盤工学研究発表会. pp. 151-152, 2004.
- 3) Shogaki, T. and Sakamoto, R.: The applicability of a small diameter sampler with a two-chambered hydraulic piston for Japanese clay deposits, *Soils and Foundations*, Vol.44, No.1, pp.113-124, 2004.
- 4) Shogaki, T.: A method for correcting consolidation parameters for sample disturbance using volumetric strain, *Soils and Foundations*, Vol. 36, No.3, pp.123-131, 1997.
- 5) Shogaki, T.: Effects of sample disturbance on strength and consolidation parameters of soft clay, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.4, pp.134-136, 1995.
- 6) Mesri, G., Shahien, M. & Hedien, J. E., Geotechnical characteristics and compression of Pisa clay, Proc. XIV ICSMFE, Hamburg, pp.373-376, 1997.
- 7) Terzaghi, K., Peck R. and Mesri, G., Soil mechanics in engineering practice, Third edition, Jone Wiley & Sons, pp.12-16, 1996.
- 8) 正垣・蛭崎・菅野・中野・北田: ピサの斜塔下の粘性土の地盤工学的性質, 土と基礎, Vol.53, No.3, 2005.

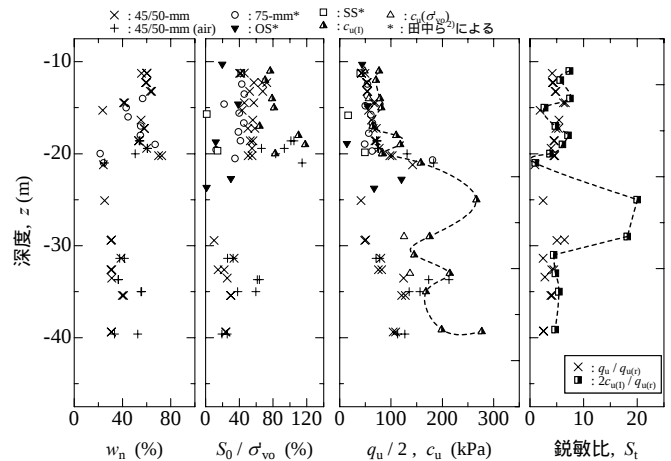


図 - 3 強度試験結果