

# ピサの斜塔下の粘性土の地盤工学的性質

Geotechnical Characteristics of Pisa Clays

正 垣 孝 晴 (しょうがき たかはる)

防衛大学校 システム工学群建設環境工学科

蛭 崎 大 介 (えびすざき だいすけ)

防衛大学校 本科#49学生

菅 野 康 範 (かんの やすのり)

興亜開発商事本部 技術営業推進部

中 野 義 仁 (なかの よしひと)

㈱興和 調査部

北 田 奈緒子 (きただ なおこ)

財地地域地盤環境研究所

## 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<sup>1)~3)</sup>。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良く分からない。

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  $CK_0$ UC, 圧密試験 IL から検討される。また、微化石総合分析や X 線回折等の堆積環境学的調査からそれらの結果の解釈が補強される。

## 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位置を図-1に示す。これらの調査は1965年以降継続的に行われてきたが、舩港湾空港技術研究所は、2003年秋斜塔の南側約15 m の場所で JGS 1221-2003に規定するチューブ内径75 mm の固定ピストン式シンウォールサンプラー (75 mm), イタリアで通常用いられているシェルビッチューブ (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<sup>4)</sup> (PARI-2003調査)。この時、著者らは時間的な制約下の洪積粘土の試料採取に、小径倍圧型水圧ピストンサンプラー<sup>5)</sup> (試料径によって、45 mm, 50 mm サンプラーと略記) を用いた試料採取をお誘いいただき、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 (口絵写真-21, 22)。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4 m 程度斜塔側に離れている。

UCT と  $CK_0$ UC の供試体寸法は直径  $d$ 15 mm, 高さ  $h$ 35 mm ( $CK_0$ UC は圧密後の  $h$ ) であり, IL は  $d$ 30 mm,  $h$ 10 mm である。

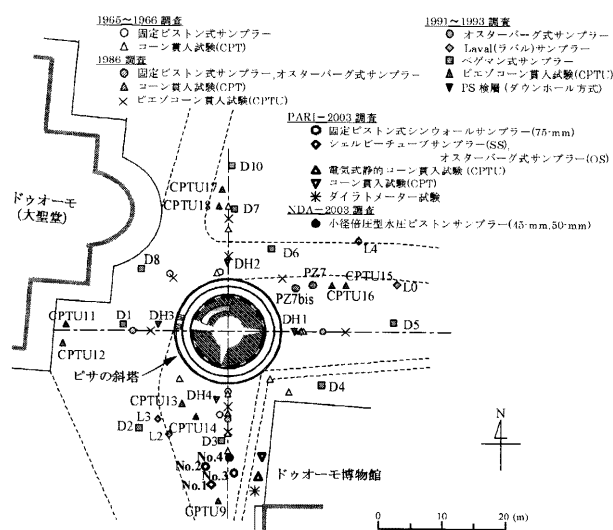


図-1 調査位置

## 3. ピサ粘土の圧密特性

ピサ粘土の指標的性質と圧密試験結果を図-2に示す。前者は45 mm と50 mm サンプラーを用いて、一つのボーリング孔で深度  $z$  方向に交互に採取した試料から得た。 $z = -(10 \sim 21)$  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。沖・洪積粘土ともに珪藻はほとんど含まれていなかった。粘土分含有量が沖積で (61~83)%, 洪積で (46~64)%であることを反映して塑性指数  $I_p$  も、それぞれ (35~71), (19~50) と高い。しかし、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。このことは走査型電子顕微鏡による微視状態の観察でも確認している (口絵写真-23)。これらの土の土粒子密度は、 $2.67 \sim 2.81 \text{ g/cm}^3$  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。また、このような鉱物を主成分とする粘土であることが、後述する活性度  $A_c$  や鋭敏比  $S_t$ , 強度増加率  $c_u/p$  の特性にも粘土鉱物

## 論 文

を主体とする粘土とは異なる特徴を示すことになる。

PARI-2003調査の試料採取は沖積粘土を対象とした。したがって、2003年調査では洪積粘土の試料採取は45 mmと50 mm サンプラーのみで行われた。75 mm<sup>4)</sup>と45 mm/50 mm サンプラーで採取した試料の圧密降伏応力  $\sigma'_p$  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<sup>4)</sup>。原位置の圧密降伏応力  $\sigma'_{p(l)}$  は、正垣の方法<sup>6)</sup>で推定した。75 mm<sup>4)</sup>と45 mm/50 mm サンプラーから得た過圧密比  $OCR(=\sigma'_p/\sigma'_{vo})$  は、1.2~2.8であるが、 $\sigma'_{p(l)}$  から得たそれらは沖積で2.1~2.4、洪積で2.9~3.1である。ここに、 $\sigma'_{vo}$  は有効土被り圧である。

IL 試験を行った際の初期間隙比  $e_0$  に対する  $\sigma'_{vo}$  下の間隙比の変化量  $\Delta e$  の比  $Re$  は、採取試料の品質が評価できる指標の一つとされ、Lunne ら<sup>7)</sup>は0.04以下(優秀)、0.04~0.07(良好~適正)、0.07~0.14(貧弱)、0.14以上(極めて貧弱)を与えている。Laval (ラバル) サンプラーは品質の良好な試料が採取できるサンプラーとして世界で広く認められているが、このサンプラーで採取したピサ粘土の  $Re$  は0.02~0.1の範囲であり、平均値は0.05であった<sup>3)</sup>。一方、45 mm/50 mm サンプラーの  $Re$  は0.04~0.07であり、平均値は0.06であった。すなわち、45 mm/50 mm サンプラーで得た試料の品質は“優秀~適正”に区分される。これらは45 mm/50 mm サンプラーが Laval サンプラーと同等以上の品質の試料が採取できることを意味する。

#### 4. ピサ粘土の強度特性

UCT,  $CK_0UC$  の結果を図-3に示す。 $z = -(10 \sim 21)$  m の沖積粘土の自然含水比  $w_n$  を見ると、75 mm<sup>4)</sup>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30 kPa 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、 $CK_0UC$  で得た  $\sigma'_{vo}$  下の  $c_u (=c_u(\sigma'_{vo}))$  と  $\sigma'_{p(l)}$  下の  $c_u (=c_{u(l)})$  を併せてプロットしている。 $\sigma'_{p(l)}$  と  $c_{u(l)}$  は  $K_0$  圧密時の  $K_0$  の挙動や UCT と  $CK_0UC$  試験の有効応力から、原位置の応力状態の  $\sigma'_p$  とその  $c_u$  として妥当と考えている<sup>8)</sup>。沖・洪積粘土の  $q_u/2$  (図-3の×) は、 $z$  に関係なくほぼ同等の値であるが、 $c_{u(l)}$  は  $z$  に対して大きくなる。 $q_u/2$  は沖積粘土の  $c_{u(l)}$  の(58~81)%, 洪積粘土では(22~53)%小さい。 $c_u(\sigma'_{vo})$  はすべての  $z$  で  $q_u/2$  より大きい、 $c_{u(l)}$  の(61~86)%である。 $q_u/2$  と  $c_u(\sigma'_{vo})$  が  $c_{u(l)}$  より小さいのは、サンプリングから供試体成型に至る試料の乱れと応力開放が主因と推察している。この傾向はシルトの含有量が多く、深度が大きい洪積粘土で特に著しい。

図-3には練返し土の  $q_u (=q_{u(r)})$  に対する  $q_u$  と  $2c_{u(l)}$  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、 $I_p$  の大きな自然堆積粘土としては極端に小さい。例えば、大阪の沖積粘土 (Ma13) や洪積粘土 (Ma12) のそれ

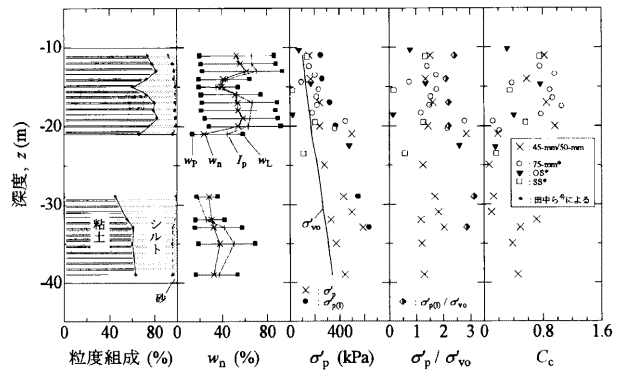


図-2 ピサ粘土の指標的性質と圧密試験結果

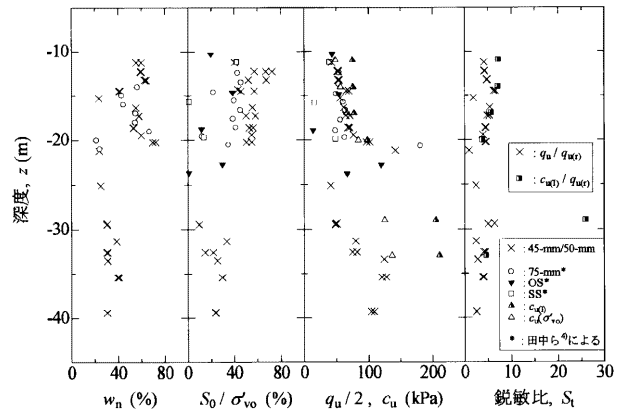


図-3 強度試験結果

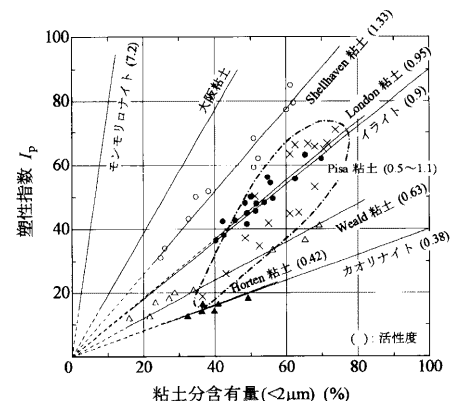


図-4  $I_p$  と粘土分含有量 (<2  $\mu$ m) の関係

は10~20の値であることが知られている<sup>9)</sup>。

図-4は  $I_p$  と2  $\mu$ m 以下の粘土分含有量の関係である。Skempton<sup>10)</sup>が示したShellhaven (シェルハーベン), London (ロンドン), Weald (ウィールド), Horden (ホーテン) 粘土と代表的な粘土鉱物の関係も併せて示している。ピサ粘土はロンドン粘土からウィールド粘土のプロットの範囲に位置し、活性度  $A_c$  もこれらの範囲内にある。ピサ粘土がイライト鉱物の関係線の近傍に近いのは雲母鉱物に属する結晶度の高いイライトを反映している。 $A_c$  が小さく造岩鉱物を主体とした低位な構造であることが  $S_t$  が小さい理由である。これらの点が我が国の大阪粘土と大きく異なっている。

図-5は  $CK_0UC$  で得た  $c_u/p$  を  $I_p$  に対してプロットしている。土田<sup>11)</sup>, 澁谷<sup>12)</sup>の結果も併せて示している。ピサ粘土の  $c_u/p$  は0.23~0.32の範囲にあり、

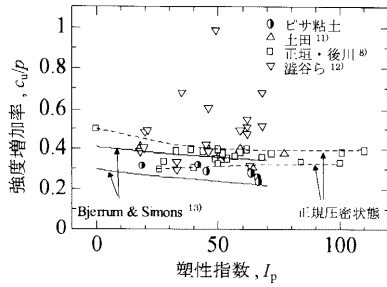


図-5  $c_u/p$  と  $I_p$  の関係

Bjerrum & Simons<sup>13)</sup> (ビエラムとサイモン) が示した範囲にある。しかし、ピサ粘土の  $c_u/p$  は  $I_p$  が大きくなると小さくなる傾向にあり、国内外の他の粘土のそれらより幾分小さい。 $c_u/p$  が小さいのは、やはり造岩鉱物と低位構造に起因して、圧密圧力の増加に伴う  $c_u$  の増加が大きくないことに起因していると推察している。

Mesri ら<sup>14)</sup> は  $z \approx 13$  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。Terzaghi ら<sup>15)</sup> は、このような構成の特徴を良く表す高位構造が読み取れる優れた走査型電子顕微鏡 SEM 写真を示している。この SEM 写真は同じく  $z = 13$  m の粘土に対する SEM 写真 (口絵写真-23) とは鉱物組成や微視構造等のあらゆる点で異なっている。Mesri ら<sup>14)</sup> 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・壁の傾きは、やはり一見して目立つ程大きい (口絵写真-24)。これらの建物の傾斜や不同沈下の大きさを眼の辺りにすると、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。

## 5. おわりに

主要な結論は以下のように要約される。

- 1) 標準圧密試験の有効土被り圧下のひずみ量から検討すると、45 mm/50 mm サンプラーで採取した試料の品質は、Laval サンプラーのそれと同等以上であった。
- 2) 一軸圧縮強さは推定した原位置非排水強度の (22～81)% であった。また、沖・洪積粘土の鋭敏

比、活性度、強度増加率は、それぞれ0.9～6.4、0.5～1.1、0.23～0.32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同沈下の一因と推察された。

謝辞：調査のための資材の運送や現地調査の実施、またそれらの調整等で強力なご支援とお骨折をいただいた港湾航空技術研究所土質研究室と神戸大学の澁谷 啓先生に深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Jamiolkowski, M.: The leaning tower of Pisa: end of an Odyssey, Terzaghi Oration, Proc. 15<sup>th</sup> ICSMGE, Vol. 5, pp. 2979～2996, 2001.
- 2) Burland, J. B., Jamiolkowski, M. and Viggiani, C.: The stabilization of the leaning tower of Pisa, Soils and Foundations, Vol. 43, No. 5, pp. 63～80, 2003.
- 3) Lo Presti, D. C. F., Jamiolkowski, M. and Pepe, M.: Geotechnical characterization of the subsoil in Pisa, Characterization and Engineering Properties of Natural Soils-Tan et al. (eds.), Vol. 1, pp. 909～949, 2003.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Lunne, T., Berre, T. and Strandvik, S.: Sample disturbance in soft low plastic Norvengian clay, Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Almeida (ed.), pp. 81～102, Rotterdam, 1997.
- 8) Shogaki, T. and Nochikawa, Y.: Triaxial strength properties of natural deposits at  $K_0$  consolidation state using a precision triaxial apparatus with small size specimens, Soils and Foundations, Vol. 44, No. 2, pp. 41～52, 2004.
- 9) 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.
- 10) Skempton, A. W.: The colloidal activity of clays, Proc. of 3<sup>rd</sup> ICSMFE, Switzerland, Vol. 1, p. 57, 1953.
- 11) 上田：三軸試験による自然粘性土地盤の強度決定法に関する研究, 港湾技術資料, No. 688, pp. 155～159, 1990.
- 12) 澁谷・天満・三田地：世界の自然堆積粘性土の力学的諸性質とコンシステンシー限界の関連, 第36回地盤工学研究発表会概要集, pp. 271～272, 2001.
- 13) Bjerrum, L. and Simons, N. E.: Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays, Proc. ASCE Reserch Conf. On Shear Strength of Cohesive Soils, pp. 711～726, 1960.
- 14) Mesri, G., Shahien, M. & Hedien, J. E.: Geotechnical characteristics and compression of Pisa clay, Proc. XIV ICSMFE, Hamburg, pp. 373～376, 1997.
- 15) Terzaghi, K., Peck R. and Mesri, G.: Soil mechanics in engineering practice, Third edition, Jone Wiley & Sons, pp. 12～16, 1996.

(原稿受理 2004.9.30)

sure is considered to cause severe damage to the brick. In order to develop the protective measures, it is quite important to know, the water flow in brick buildings and monuments. National research institute of cultural properties, Tokyo is doing cooperative research on the conservation of brick building and monuments in Thailand with Fine Art Department of Thailand. This paper reports results of our joint research at Ayutthaya and Sukhothai.

### **Preservation of Excavated Sites**

**Shigeo Aoki**

One of the most common methods for preserving excavated archaeological sites and remains consisted of soil is re-burial. However, important sites are often exhibited *in-situ* as they were excavated. Since those are consisted of earthen materials, they tend to be deteriorated due to natural causes such as rain, wind and drying process of the earthen structure.

In order to protect the earthen sites from such natural causes, external covering structures could be installed. The structures help maintaining stabilized microenvironment, mostly relative humidity and temperature. However, they are not enough to keep moisture content of soil, which results in creating cracks and severe biological growth. We have developed a new type of synthetic resin, hydrophilic Silicon, which prevents evaporation of moisture contents of the soil. This resin gave a successful result at Kasori Shellmound Site Museum, Chiba.

### **Geotechnical Characteristics of Pisa Clays**

**Takaharu Shogaki, Daisuke Ebisuzaki,  
Yasunori Kanno, Yoshihito Nakano  
and Naoko Kitada**

The geotechnical characteristics of Pisa clays are examined through  $K_0$  consolidated-undrained triaxial compression tests, incremental loading oedometer tests and unconfined compression tests UCT with suction measurement using small size specimens. The unconfined compressive strength measured by UCT were (22~81)% of the estimated *in-situ* undrained shear strength caused by sample disturbance and stress release. The sensitive ratio, activity and strength increase were 0.9~6.4, 0.5~1.1 and 0.23~0.32, respectively and smaller than those of other highly plasticity clays caused by "lower stricture" and rock minerals.

### **Historical Connection of Castle's Masonry Walls and their Present States in Japan and China**

**Kunihiro Tanaka and Yoji Niitani**

The almost of Japan's Castle's Masonry Walls (M.W.) were constructed around 1600. They were constructed by laying stones with a peculiar curve and there was nobonding agent at stone's interface. It is obvious that these high techniques have these originate in the Mountain castles in Gaogouli which developed in north-east China before and after the Christ. However they are exposed to collapse due to aging. For restoration and preservation of these Masonry Wall, to make clear the traditional techniques and to develop the techniques of judging the stability of M.W. are required.