

## コーン貫入試験と室内せん断試験の信頼度分析と盛土設計の最適化

Reliability of the Cone Penetration, Undrained Shear Strength Tests and the Optimum Embankment Design Method

高橋 章 (たかはし あきら)  
東京電力㈱プロフェッショナル 建設部正垣 孝晴 (しょうがき たかはる)  
防衛大学校助教 建設環境工学科桜井 弘紀 (さくらい ひろき)  
防衛大学校#50本科学士 建設環境工学科

## 1. はじめに

盛土設計のための地盤強度決定法は、設計計算法と施工法を加えた連成問題として、設計法全体の調和の中で検討しなければならない。したがって、盛土の安定性に及ぼす地盤調査や土質試験結果の感度を設計法の中で定量化することは一般に困難である。個々の盛土設計に含まれる地盤の不均質性、施工状況、盛土の安定性の状況等を踏襲して、それらの感度を総括する形で把握することが難しいからである。

本稿では施工中に変状した実盛土を対象に、当該地盤で行われたコーン貫入試験と室内せん断試験を採り上げ、性能規定化のために、これらの信頼度を分析する。後者は小型供試体を用いてサクシオン測定を伴う一軸圧縮試験(UCT)と $K_0$ 圧密三軸圧縮試験( $CK_0$ CU)、段階載荷圧密試験(IL)から原位置非排水強度 $q_{u(1)}$ を推定し、一軸圧縮強さ $q_u$ と $q_{u(1)}$ の統計的性質を検討する。盛土の最適設計法が総費用と破壊確率の観点から $q_u$ 、 $q_{u(1)}$ 、コーン貫入試験(CPT)から推定した非排水強度を用いて検討される。

## 2. 室内せん断試験とコーン貫入試験の信頼度分析

検討に用いた供試土<sup>2)</sup>は、茨城県陸域から採取した有機質土( $z=4\sim 6.5$  m,  $I_p=199\sim 370$ )と粘性土( $z=6.5\sim 10$  m,  $I_p=34\sim 63$ )である。簡便法<sup>1)</sup>で推定した原位置非排水強度 $q_{u(1)}$ 、 $CK_0$ CUの原位置の圧密降伏応力下で推定した原位置非排水強度<sup>3)</sup> $2c_{u(1)}$ と $q_u$ を $z$ に対して図-1にプロットした。試料の不均質性に起因してこれらの変動は大きい、 $q_{u(1)}$ の平均値と $2c_{u(1)}$ は同等である。しかし、 $q_u$ の平均値は試料の乱れに起因して、これらの62%程度と小さい。

飽和粘土地盤では、CPTの結果から非排水強度を推定する経験式(1)<sup>4)</sup>が提案されている。

$$q_t - \sigma_{v0} = N_{kt} \times c_u \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $q_t$ :コーン有効面積で補正した先端抵抗(kN/m<sup>2</sup>)、 $\sigma_{v0}$ :鉛直全応力(kN/m<sup>2</sup>)、 $c_u$ :非排水強度(kPa)、 $N_{kt}$ :コーン係数である。

茨城県陸域で行われたCPTと試料採取位置を図-2

に示す。CPTはJGS 1435-2003<sup>4)</sup>に従い4箇所(C1~C4)で行った。乱さない試料は、JGS 1221-2003に従うチューブ内径75 mmのサンプラー(75-mm)<sup>5)</sup>、45-mm/50-mm<sup>6)</sup>、Coneサンプラー<sup>7)</sup>で採取した。採取試料に対しては、サクシオン測定を伴うUCTと $CK_0$ CUを行った。

一例として、C1の $q_t$ と近傍のサンプラー(50-mm/Cone)の $q_u/2$ と $q_{u(1)}/2$ から得た $N_{kt}$ と $z$ の関係を図-3に示す。これより、茨城土の $q_u$ から求めた $N_{kt}$ は、平均値として有機質土で9、粘性土で7と前者が大きい。有機質土と粘性土の $q_u/q_{u(1)}$ がほぼ同等であった<sup>1)</sup>ことから、有機質土の場合は、 $q_t$ を大きく見積もっていることが推察される。

図-4に国内外の地盤から得た $N_{kt}$ と $q_u/2$ の関係を示す。佐渡と茨城は著者らの結果であり、門司は吉田

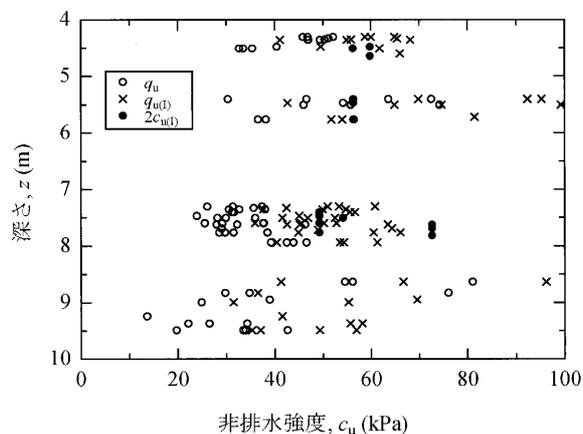


図-1 非排水強度の深度分布

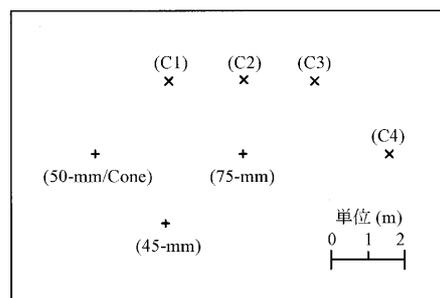


図-2 試料採取とCPT位置

論文

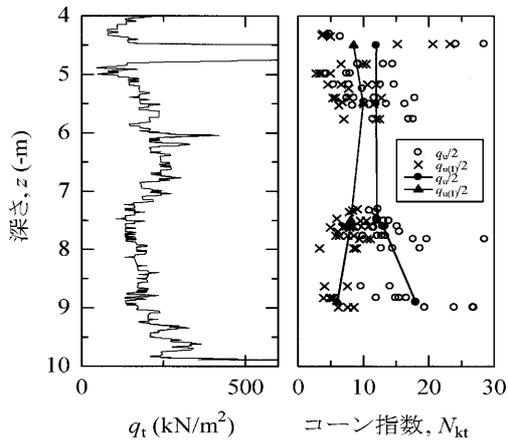


図-3  $q_t$  と  $N_{kt}$  の深度分布 (C1 と 50-mm/Cone)

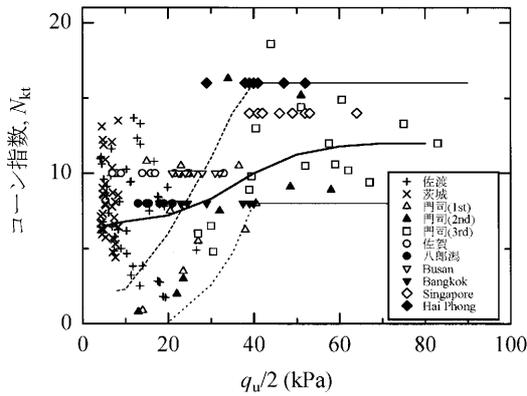


図-4  $N_{kt}$  と  $q_u/2$  の関係

ら<sup>8)</sup>, 他は田中ら<sup>9)</sup>の結果を再整理して示している。圧密が進んでいない門司 (1<sup>st</sup>) は全体的に  $q_u/2$  が小さく、圧密が門司 (2<sup>nd</sup>), 門司 (3<sup>rd</sup>) と進行すると  $q_u/2$  が増加している。門司 (1<sup>st</sup>) から門司 (3<sup>rd</sup>) は、 $q_u/2 < 40$  kPa の領域で  $q_u/2$  の低下により  $N_{kt}$  が小さくなる (2本の破線<sup>8)</sup>で表示)。すべてのプロットを近似する平均値線を実線の曲線で示すが、この曲線は  $q_u/2$  に依存して  $N_{kt} = 6 \sim 12$  の範囲で変動する。すなわち、式(1)を用いて  $c_u$  を算定する場合、推定精度は  $N_{kt}$  の採用値に支配されるが、 $N_{kt}$  は地盤強度や土の状態により変化し、一意的な決定が困難である。

3. 地盤調査・試験法の性能規定化の検討

施工中に変状した茨城の実盛土<sup>10)</sup>を対象に、破壊確率  $P_f$  の算出時に生産者危険<sup>11)</sup> (本来は正しい結果であるにもかかわらず、棄却してしまう誤りのこと) を考慮した場合を対象に、使用するサンプラーと地盤強度の採用値に関する性能規定化の検討を行う。

3.1 サンプリング方法の性能規定化に向けた検討

(1) 検討手順

図-5 に示す盛土の最小安全率の円弧<sup>10)</sup>を用いて、以下に示す i) ~ iii) の手順で母集団が既知の場合の、原位置非排水強度の試験数量  $n$  と盛土の  $P_f$  の関係を求め、サンプリング方法の性能規定化へ向けた検討を行う。本節では、盛土設計を非排水強度の平均値で行い、各土層

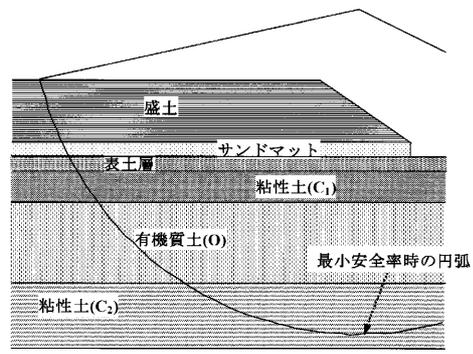


図-5 土層構成と最小安全率を与えるの円弧

の非排水強度はボーリング孔内のばらつきは同じ深度の水平方向のそれと等しいとした。また、有機質土 (O) と粘性土 (C<sub>2</sub>) 以外の土のパラメータと荷重は値を固定した。

i) 最小安全率を与える円弧より、O層とC<sub>2</sub>層以外の層の抵抗力と滑動力を固定値として求める。

ii) 採取した試料のサクシオン測定を伴う一軸圧縮強さ  $q_u$  に対して簡便法<sup>1)</sup>を適用し、原位置非排水強度  $q_{u(1)}$  を推定する。この  $q_{u(1)}$  を用いて円弧上の各層の出現長さ<sup>1)</sup>と盛土単位幅を乗じて抵抗力に変換し、O層とC<sub>2</sub>層の抵抗力の母平均  $\mu$  と母標準偏差  $\sigma$  を求める。

iii) ii) で求めたO層とC<sub>2</sub>層の抵抗力分布を母集団と見なし、 $n$  個の標本を抽出した場合の母平均の信頼区間を求め (分散の加法性<sup>11)</sup>を考慮)、他の固定値と併せて総抵抗力の母平均分布を算出する。そして、図-6 に示すように、この母平均分布が滑動力を下回る部分の確率を計算し、これを  $P_f$  と定義する。

(2) 試料採取方法の性能規定化の検討

先に述べた3種類のサンプラーで得た  $q_{u(1)}$  から求めた  $P_f$  と  $n$  の関係を図-7 に示す。45-mm や 50-mm/Cone の  $P_f$  は同じ  $n$  下で 75-mm のそれより小さい。これは、75-mm の試験個数が 45-mm や 50-mm/Cone の半分程度と少なく、 $q_{u(1)}$  の計算時に現地盤のばらつきが大きく影響したのが理由である。 $P_f \leq 5\%$  を満足する 45-mm, 50-mm/Cone, 75-mm サンプラーの  $n$  は、それぞれ 1, 4, 130 となり、非排水強度が  $P_f$  に及ぼす影響が大きいことがわかる。このことは、採取試料の品質を考慮して、試料採取方法を性能規定できることを意味する。なお、標準寸法供試体を用いる多くの試験は、採取試料と費用の制約が大きいため、小型供試体<sup>12)</sup>が有利である。また、図-7 に示すとおり、どのサンプラーでも  $P_f < 100\%$  となり、実際に変状した現象を再現できていないため、実務上は母集団を既知と見なすことは難しい。

3.2 地盤強度採用値の性能規定化に向けた検討

(1) 検討手順

本節では  $n$  と  $P_f$  を計算するため、式(2)で計算される盛土の総費用  $C_t$  (千円/m) を検討する。試験個数が最も多い 45-mm を対象として、3.1 と同様の考え方で  $q_{u(1)}$  を用いて、 $n$  と  $C_t$  の関係を求め、地盤の非排水強

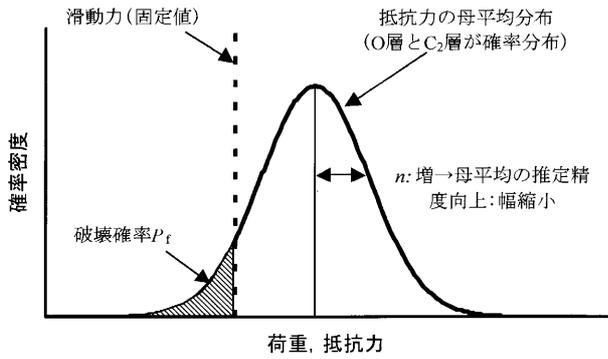


図-6 抵抗力の母平均分布, 滑動力と  $P_f$  の関係

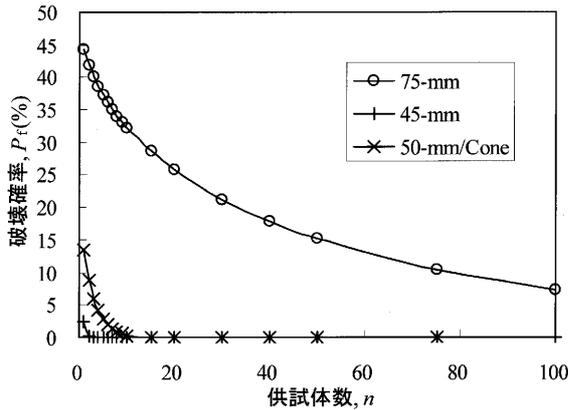


図-7  $n$  と  $P_f$  の関係 ( $q_{u(O)}$  の場合)

度採用値の性能規定化に向けた検討を行う。

$$C_t = C_c' + P_f \times C_f + C_i \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $C_c'$ : 盛土建設費 (千円/m),  $C_f$ : 破壊復旧費 (千円/m),  $C_i$ : 初期調査・試験費 (千円/m) であり、 $n$  の関数は  $P_f$  と  $C_i$  である。これら費用の算出は、当該盛土施工場所で発生した実際の金額を用いた。

本節では地盤データの母集団を未知として、多数のデータが容易に取得できる CPT の活用も検討した。本節の検討で、3.1 と異なる条件を以下に示す。

- i) 調査の段階性として、 $q_t$  から式(1)を用いて  $c_u$  を推定し、 $n$  と  $C_t$  の関係を求める。なお、 $c_u$  の推定には  $N_{kt}$  の設定が影響を及ぼすが、事前に  $q_u$  や図-4 の情報がないのが通常であることから、今回は一般に使用されることの多い  $N_{kt}=10$  を用いる。
- ii) 次に、 $q_{u(O)}$  を対象に、ランダム抽出によって  $n$  を増加させて式(3)と式(4)を勘案した信頼区間を算出し、 $n$  と  $C_t$  の関係を求める。

①母平均  $\mu$  の信頼区間:

$$\bar{X} - t_{0.05} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{0.05} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $\bar{X}$ : 標本平均,  $t_{0.05}$ : 両側有意水準 5% の  $t$  値,  $s$ : 標本の標準偏差である。

②母標準偏差  $\sigma$  の信頼区間:

$$\sqrt{\{(n-1)s^2/\chi_{0.025}^2(n-1)\}} \leq \sigma \leq \sqrt{\{(n-1)s^2/\chi_{0.975}^2(n-1)\}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\chi_{0.025}^2(n-1)$ : 下側有意水準 2.5% の  $\chi^2$  値,  
 $\chi_{0.975}^2(n-1)$ : 上側有意水準 2.5% の  $\chi^2$  値である。

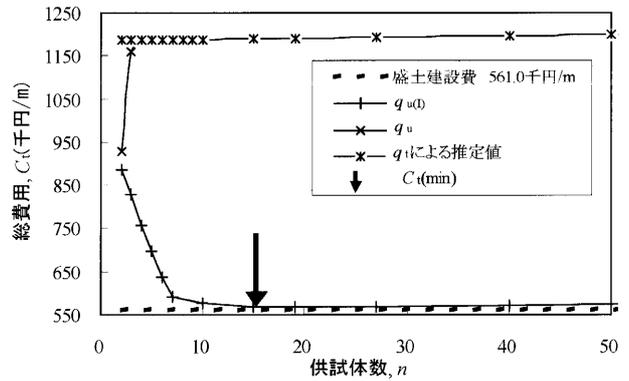


図-8  $n$  と総費用  $C_t$  (45-mm サンプラーの場合)

表-1 総費用最小値 (45-mm サンプラーの場合)

非排水強度	$n$	$C_t$ (min) (千円/m)	$P_f$ (%)
$c_u$ (CPT)	—	1185 以上	100
$q_u/2$	—	1185 以上	100
$q_{u(O)}/2$	15	567	0.3

(2) 地盤強度採用値の性能規定化の検討

$N_{kt}=10$  と  $q_t$  より推定した  $c_u$ , 45-mm の  $q_u$  と  $q_{u(O)}$  から求めた  $C_t$  と  $n$  の関係を図-8 に示す。また、 $C_t$  が最小となる  $n$ ,  $C_t$ ,  $P_f$  を表-1 にまとめた。

本研究では実際に変状した盛土を対象としているため、本来であればどの非排水強度を用いても  $P_f=100\%$  となるはずである。表-1 より、 $q_{u(O)}$  の場合のみ  $P_f=0.3\%$  と、変状した実現象との乖離があるが、これは最小安全率の算定時に円弧の大きさと位置を指定したことが原因である。円弧を指定しないで  $q_u$  と  $q_{u(O)}$  を用いた計算を行うと、最小安全率はそれぞれ 0.82 と 1.08 であった。また、後者の円弧の形状は盛土法尻部周辺の地盤の盛り上がりと盛土部のクラック位置の実態をほぼ説明できた。

円弧の形状を指定したことの影響の課題を踏まえた上で相対的な検討を行う。 $q_t$  は深度方向に 1 cm 毎にデータが取得できるが、 $n$  が増加しても  $C_t$  が低下しない。これは、 $N_{kt}=10$  から得た  $c_u$  が実盛土の変状を説明する非排水強度と大きく異なり、小さいからである。さらに、 $q_u$  も非排水強度が滑動力より小さいため、 $q_t$  から推定した  $c_u$  と同様に  $C_t$  が最小となる  $n$  が求まらない。しかし、非排水強度が滑動力と同等の  $q_{u(O)}$  を用いた場合は、 $n$  の増加に伴う  $C_t$  の低下が著しい。すなわち、 $q_{u(O)}$  を用いた場合は信頼度の向上とコスト削減の効果が大きいことがわかる。このことは、本手順による  $P_f$  の検討で、地盤強度採用値の性能規定化が定量的にできることを意味する。

4. 性能規定化を踏まえた盛土設計の最適化

4.1 消費者危険率  $\beta$  の導入

$q_{u(O)}$  は  $P_f$  と  $C_t$  の両者に対して有利なことが 2. と 3. より、明らかとなったが、 $q_{u(O)}$  を直ちに実設計に導入することには不安が残る。本章では構造物の所有者と使用者双方の安心度を高めるために、設計に消費者危険<sup>11)</sup> (本来は誤った結果であるにもかかわらず、採用

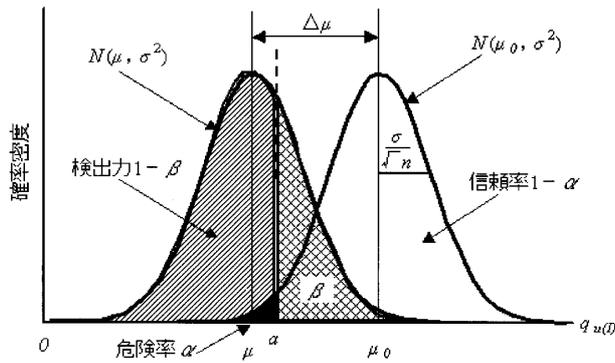


図-9 消費者危険率  $\beta$  の定義

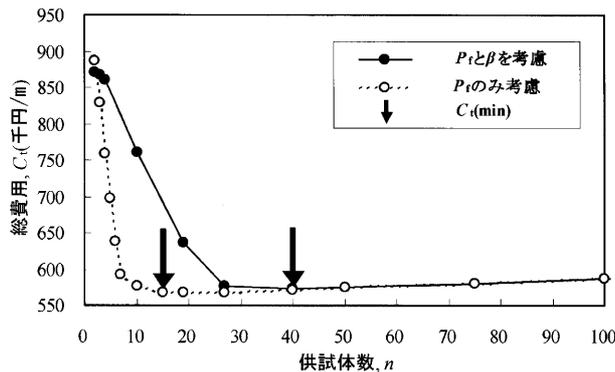


図-10  $n$  と  $C_t$  の関係 (45-mm サンプラーの  $q_{u(1)}$  の場合)

してしまう誤りのこと) を考慮して  $q_{u(1)}$  を用いる盛土設計の最適化法を検討する。

消費者危険率  $\beta$  の定義を図-9 に示す。  $N(\mu_0, \sigma^2)$  は簡便法より求まる  $q_{u(1)}$  の母平均  $\mu_0$  の分布、  $N(\mu, \sigma^2)$  は平均が  $\Delta\mu$  だけ低い仮定の  $q_{u(1)}$  の母平均  $\mu$  の分布、  $a$  は  $N(\mu_0, \sigma^2)$  の下側95%限界値である。  $\mu = \mu_0$  の検定時には、  $a$  より左側 (黒部) は危険率  $\alpha (=5\%)$  で棄却されるが、  $a$  より右側 (信頼率  $1 - \alpha$ ) はすべて  $\mu = \mu_0$  が採択される。すなわち、  $\Delta\mu$  だけ低品質な  $q_{u(1)}$  であっても、  $\beta$  部分を正しいとして採用する危険がある。実務では、調査初期にたまたま設計値を満足する値が出た時に、それを強度の代表値として採用する場合がこれに該当し、構造物の安全性を損なう要因となる。

$\beta$  を低下させるには式(5)で示される検出率  $1 - \beta$  を高める必要がある。具体的には  $\Delta\mu$  と  $n$  を大きく、  $\sigma$  を小さくするが、人為的な調整ができるのは  $n$  であり、他は地盤状態に依存する。

$$1 - \beta = \text{Probability}\{q_{u(1)} \geq 1.65 - \Delta\mu / (\sigma / \sqrt{n})\} \dots (5)$$

#### 4.2 $n$ と $C_t$ に及ぼす $\beta$ の影響

45-mm サンプラーからの  $q_{u(1)}$  を対象として、  $n$  と  $C_t$  の関係に及ぼす  $\beta$  の影響を図-10 に示す。  $\beta$  を考慮しない場合は、  $n$  の増加に対して  $C_t$  が直ちに低下する。一方、  $\beta$  を考慮した場合は  $\beta \leq 5\%$  となる  $n$  は考慮しない場合の15から40に増加し、  $C_t$  も567から572 (千円/m) に増す。しかし、  $\beta$  は20%から0.1%と劇的に小さくなり、僅かなコスト増に対して潜在危険を回避できるメリットは極めて大きい。すなわち、  $\beta$  を考慮することで性

能規定化につながり、  $q_{u(1)}$  を用いた設計法が導入できることを示している。

#### 5. おわりに

主要な結論は以下のように要約される。

- 1)  $q_{u(1)}/2$  の平均値と  $c_{u(1)}$  は同等であったが、  $q_u/2$  の平均値は、これらの62%程度と小さい。
- 2) CPT の  $q_t$  から  $c_u$  を推定する場合、その推定精度は  $N_{kt}$  の採用値に支配され、事前に適正な  $N_{kt}$  を採用することは一般に困難である。
- 3) サンプラー種類によって原位置の非排水強度は異なり、非排水強度が  $P_t$  に及ぼす影響は大きい。所要の信頼度で実盛土の安全性・総費用の検討を行い、サンプリング方法の性能規定化を提案した。また、地盤の非排水強度の採用値についても、所要の安全率を考慮した性能規定化の方法を提案した。
- 4) 設計時に  $\beta$  を導入して、  $q_{u(1)}$  を活用する盛土設計法を示した。

#### 参考文献

- 1) Shogaki, T.: An improved method for estimating in-situ undrained shear strength of natural deposits, *Soils and Foundations*, 46(2), pp.109~121, 2006.
- 2) Shogaki, T., Sakamoto, R., Kanno, Y., Kobayashi, H. and Momose, S.: Standard penetration test sample quality, IS-Osaka, pp. 159~164, 2004.
- 3) 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*, 45(2), pp. 41~52, 2004.
- 4) 地盤工学会：電気式静的コーン貫入試験方法 (JGS 1435-2003), pp. 301~309, 2003.
- 5) 地盤工学会：固定ピストン式シンウォールチューブサンプラーによる土の乱さない試料の採取方法 (JGS 1221-1995), 地盤調査法, pp. 152~156, 1995.
- 6) 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*, 44(1), pp. 113~124, 2004.
- 7) Shogaki, T., Sakamoto, R., Kondo, E. and Tachibana, H.: Small diameter cone sampler and its applicability for Pleistocene Osaka Ma12 clay, *Soils and Foundations*, 44(4), pp. 119~126, 2004.
- 8) 吉田ほか：低応力下の粘土地盤の  $N_{kt}$  と物理・力学特性の関係、最近の地盤調査・試験法と設計・施工への適用性に関するシンポジウム論文集, pp. 43~48, 2006.
- 9) Tanaka, M., Tanaka, H.: An examination of the engineering properties and the cone factor of soils from East Asia, *Proceeding ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, Viana da Fonseca & Mayne (eds.), pp. 1019~1024, 2004.
- 10) 高橋・正垣：性能規定化を踏まえた調査位置・数量及び調査の段階性に関する一考察、最近の地盤調査・試験法と設計施工への適用に関するシンポジウム論文集, pp. 95~98, 2006.
- 11) 例えば、石川 馨：品質管理入門, 日科技連出版社, p. 361, 1990.
- 12) 正垣・佐藤：小型供試体を用いた自然堆積土の非排水強度の評価、土と基礎, Vol. 54, No. 8, pp. 14~16, 2006. (原稿受理 2006.4.3)