

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

Vol.48    No.2    June 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 2 号 (Vol.48, No.2), 2009年6月 (June 2009)

## 目 次 (CONTENTS)

棧橋のライフサイクルマネジメントシステムの構築に関する研究 .....加藤 絵万・岩波 光保・横田 弘 .....3 ( Development of Life Cycle Management System for Open-type Wharf .....Ema KATO・Mitsuyasu IWANAMI・Hiroshi YOKOTA )
潮流と海浜流による砂と凝集性土砂の底質輸送と干潟の地形変化に関する 3次元数値モデルの開発と現地適用 .....鶴崎 賢一・栗山 善昭 .....37 ( Development of the Three-dimensional Numerical Model of Sediment Transports and Topographic Changes of Intertidal Flats due to Sands and Cohesive Sediments Generated by Tidal Currents and Wave-induced Currents and an Application to the Field. .....Ken-ichi UZAKI・Yoshiaki KURIYAMA )
関西国際空港海底粘土の長期圧密挙動に関するアイソタックモデルによる評価 .....渡部要一・田中政典・佐々真志・森川嘉之 .....63 ( Evaluation of Strain Rate Effect with Isotache Model on Long-Term Consolidation of the Clay Deposits at Kansai International Airport .....Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Yoshiyuki MORIKAWA )
分割型圧密試験によって評価した関西国際空港海底粘土の圧密挙動に見られる層厚の影響 .....渡部要一・田中政典・佐々真志・江村 剛 .....83 ( Thickness Effects on Long-Term Consolidation Behavior of Osaka Bay Clays .....Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Tsuyoshi EMURA )
東京国際空港D滑走路の事前海底地盤調査結果に関する一考察 .....渡部要一・田中政典・佐々真志・野口孝俊・宮田正史 ...103 ( A Study of the Geotechnical Investigation Results at the Planning Site of the D-Runway of the Tokyo International Airport Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Takatoshi NOGUCHI・Masafumi MIYATA )
信頼性設計に基づく性能設計実現に向けた新しい地盤定数設定法の提案 .....渡部要一・田中政典・佐々真志・菊池喜昭 ...123 ( New Determination Method of Soil Parameters for Performance Based Design .....Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA・Yoshiaki KIKUCHI )
沿岸域に用いた気泡混合処理土の長期安定性確認調査 .....渡部要一・田中政典・佐々真志 ...145 ( 10-Year Follow-up Study on Long-Term Properties of Air-Foam Treated Lightweight Soil Placed in Coastal Areas .....Yoichi WATABE・Masanori TANAKA・Shinji SASSA )
海上大気中における各種防食塗装による鋼材の防食効果と塗膜の健全性評価手法 .....審良 善和・岩波 光保・山路 徹 ...161 ( Performance of corrosion prevention by painting methods in marine atmosphere and performance evaluation methods for soundness of paint layers .....Yoshikazu AKIRA・Mitsuyasu IWANAMI・Toru YAMAJI )
任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案 .....平山 克也・宮里 一郎 ...199 ( Generation Method of Directional Random Waves with Arbitrary Spectrum .....Katsuya HIRAYAMA・Ichiro MIYAZATO )

# 信頼性設計に基づく性能設計実現に向けた新しい地盤定数 設定法の提案

渡部要一\*・田中政典\*\*・佐々真志\*\*・菊池喜昭\*\*\*

## 要 旨

各種施設の設計基準に、信頼性設計や、それに基づいた性能設計が本格的に導入されつつある。2007年に制定された新しい港湾基準は、性能設計が本格的に導入された我が国初の設計基準であり、その中で、筆者らが提案する新しい地盤定数設定法が採用された。一般に、性能照査に用いる地盤定数は、地盤工学会基準 JGS4001 や欧州規格 Eurocode7 に基づき設定される。特性値は原則として導出値の平均値であるが、単なる導出値の算術平均ではなく、統計的な平均値の推定誤差を勘案しなければならない。しかし、実際には、堆積状況のばらつき、調査・試験法に起因した誤差、限られたデータ個数等を勘案した上で、地盤パラメータに対して統計処理をすることが要求される。新港湾基準に採用された提案方法は、統計的な取り扱いを簡略化することによって実務での使いやすさを追求するとともに、95%信頼水準に対応した値とほぼ同等になることから、JGS4001 や Eurocode7 といった包括的な基準とも整合した、合理的でかつ簡略化された特性値の設定法である。この方法は導出値の平均値あるいは回帰式によってモデル化して深度分布を推定し、変動係数やデータの数量に応じた補正係数を導入して特性値を設定するもので、JGS4001 や Eurocode7 の包括的な基準を実用的な形で具体化することを目指している。従来、データにばらつきがあったり、データの個数が不足したりしているときに、技術者の判断で安全側に地盤定数を設定していた。提案方法では、このような技術者の判断の部分を変動係数に応じた補正というかたちで体系化して置き換えていると考えることができる。変動係数を小さくすることを目的に据えることにより、データの適切な解釈と適切な深度分布のモデル化が導かれるとともに、再圧縮三軸試験のように、ばらつきが小さくなる試験法の導入が進むものと期待できる。

キーワード：地盤定数，特性値，性能設計，信頼性設計，設計基準

---

\* 地盤・構造部地盤研究領域土質研究チームリーダー

\*\* 地盤・構造部地盤研究領域土質研究チーム主任研究官

\*\*\* 地盤・構造部地盤研究領域基礎工研究チームリーダー

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所

電話：046-844-5053 Fax：046-844-4577 e-mail: watabe@ipc.pari.go.jp

## New Determination Method of Soil Parameters for Performance Based Design

**Yoichi WATABE\***  
**Masanori TANAKA\*\***  
**Shinji SASSA\*\***  
**Yoshiaki KIKUCHI\*\*\***

### Synopsis

The Japanese design code for port facilities was revised in April 2007, and a performance-based reliability design method was introduced. Determination methods for soil parameters for reliability design method are generally introduced in Eurocode7 and JGS4001. The characteristic value is generally the expected value of the derived parameters; however, it is not merely an average. The value should be considered the statistical estimation errors. Statistical treatment is strongly required in consideration of the non-uniform sedimentary structure, the investigation errors, the testing errors, the limited number of the data entries, etc. This report introduces a new practical method, which has been adopted in the annex of the design code, to evaluate soil parameters. The new method uses a correction factor corresponding to the coefficient of data variation. In this method, the characteristic value automatically reflects the variation of the derived values in association with the testing method and the reliability of the data interpretation. Compared to the lower limit of 95% confidence interval, which is widely adopted in general design codes such as Eurocode7 and JGS4001, the characteristic value determined by this method is conservative when the number of data entries is larger than 10. This tendency is caused by the concept, in which characteristic value always reflect the data variation, even though the number of data entries are significantly large. Generally, data variation in the depth profile can be reduced when the depth distribution is appropriately modeled. Also, data variation can be reduced by adopting a more reliable soil test such as the recompression triaxial test. Accordingly, any efforts to reduce the variation are awarded in this new design code.

**Key Words:** soil parameter, characteristic value, performance based design, reliability based design, design code

---

\* Head of Group, Soil Mechanics and Geo-environment Research Group, Geotechnical Engineering Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\* Senior Researcher, Soil Mechanics and Geo-environment Research Group, Geotechnical Engineering Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\*\* Head of Group, Foundations Research Group, Geotechnical Engineering Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5053 Fax : +81-46-844-4577 e-mail: watabe@ipc.pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	123
1. はじめに .....	127
2. 地盤定数設定の原則 .....	127
3. 補正係数を導入した特性値推定法の概要 .....	128
3.1 地盤のモデル化 .....	128
3.2 特性値の考え方 .....	129
3.3 補正係数の導入 .....	129
3.4 圧密定数とせん断定数の関係 .....	131
4. 一般化された設計コードとの特性値の比較 .....	131
5. 地盤定数設定への適用 .....	133
5.1 地盤調査結果 .....	133
5.2 非排水せん断強さの設定例 .....	133
5.3 圧密定数の設定例 .....	135
5.4 強度増加率の設定例 .....	136
6. 三軸試験の有効な活用方法 .....	138
6.1 再圧縮三軸試験 .....	138
6.2 一軸圧縮試験と再圧縮三軸試験の比較 .....	139
7. 適用範囲 .....	140
8. まとめ .....	141
参考文献 .....	142

## 1. はじめに

各種施設の設計基準に、信頼性設計や、それに基づいた性能設計が本格的に導入されつつある。本論文で提案する地盤定数（地盤物性値）設定法は、このような動向に対応した実用的な方法として考え出されたものである。信頼設計に基づいた性能設計が本格的に導入された我が国初の設計基準である新港湾基準（日本港湾協会, 2007）には、本論文で記述する地盤定数設定法が採用された。

性能設計を実現するための一般化された設計コードとして、Eurocode7（EN 1997-1: 2004）やJGS4001（地盤工学会基準JGS4001-2004）が挙げられ、性能照査に用いる地盤定数設定法が示されている。JGS4001では、特性値（図-1参照）は、原則として導出値（試験結果として得られた物性値）の平均値（期待値）であるが、単なる導出値の算術平均ではなく、統計的な平均値の推定誤差を勘案しなければならないとされる。母集団の標準偏差が既知の場合には正規分布、未知の場合には $t$ -分布に従うとして、信頼水準に応じた特性値の設定法（鈴木, 2002）が示されている。Eurocode7でもほぼ同様の考え方が採用されている。しかし、工場製品の品質指標を扱うような場合とは異なり、堆積状況のばらつき、調査・試験法に起因した誤差、限られたデータ個数等を勘案した上で、地盤パラメータに対してこのような統計処理をすることが要求される。

本論文では、これに応えるために、統計的な取り扱いを簡略化することによって実務での使いやすさを追求しつつ、一般化された設計コードであるEurocode7やJGS4001とも整合した、合理的で、かつ、簡略化された特性値の設定方法を記述する。

非排水せん断強さを設定するとき、拘束圧を作用させない一軸圧縮試験は、結果のばらつきが大きいので信頼性に乏しく、圧密圧力や拘束圧を作用させる各種三軸試験は、結果のばらつきが小さいので信頼性が高いことは広く知られている（土田ら, 1989; Watabe and Tsuchida, 2001b）。しかし、設計で、これらのばらつきの程度を個々に考慮することは難しい。そこで、本論文に記述する方法では、試験法の信頼度に応じた補正を特性値に反映しておくという考え方を採用する。これは、後に記述する部分係数を試験法によらない値として与えることにより、設計法を単純化するための工夫である。しかし、後述のように、推定誤差等を勘案するものの特性値は導出値の平均値であることを原則とする一般化された設計コード類（Eurocode7やJGS4001）の概念とは、データ数が多い場合に若干異なっている。

本稿では、筆者らが提案し、新港湾基準に採用された地盤物性値の設定法（以下、提案方法）を概説した上で、これによって設定される地盤定数の特性値と、Eurocode7やJGS4001といった一般化された設計コードによって設定される特性値とを比較・考察する。

具体的な適用例として、神戸港の地盤調査で得られた一軸圧縮試験結果や段階載荷圧密試験結果を取り上げ、提案方法の適用性を検討した。また、せん断と圧密という相互に関連したパラメータに対して、提案方法を合理的に適用する方法について検討した。加えて、大阪湾粘土の非排水せん断強さに関する一軸圧縮試験結果と三軸試験結果に対して提案方法を適用し、設計における三軸試験の有用性を示した。

## 2. 地盤定数設定の原則

我が国の場合、性能照査に用いる地盤定数の設計値は、地盤工学会基準JGS4001に基づき、図-1に示すフローに従って設定することになる。同図は、学会基準から読み取れる趣旨を反映したかたちで本論文用に若干修正を加えてある。

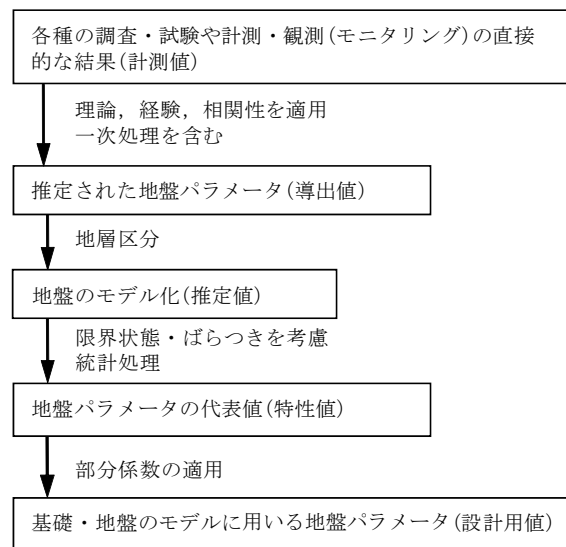


図-1 地盤定数の設定フロー

調査や試験によって計測された値が「計測値」である。計測値と地盤定数との関係を用いて得られる値を「導出値」と呼び、これを求めるには、*i*) 計測値をそのまま導出値とするもの、*ii*) 計測値に一次補正・一次処理を施して導出値とするもの、*iii*) 理論式や相関関係に基づく経験式を用いて計測値を導出値に換算するものの3通りの方法がある。*i*) は地盤定数を直接計測しているのでわかり

やすい。しかしながら、実際にこれに該当する地盤定数は意外に少ない。ii)のうち一次補正については、せん断試験における面積補正や、せん断強さに与えるひずみ速度の影響に関する補正など、係数を乗じる程度の簡単な補正をするものがこれに相当する。また、一次処理については、計測結果を整理して含水比 $w$ 、湿潤密度 $\rho_t$ 、土粒子密度 $\rho_s$ 、粒度などを算出したり、応力～ひずみ関係から求める変形係数 $E$ や、 $e \sim \log p$ 関係から求める圧密降伏応力 $p_c$ など、試験結果に対して簡単な処理をするものがこれに相当する。iii)は、理論式や経験式に基づいて計測結果を求めたい工学量に換算したり、理論に従ってフィッティングパラメータを求めたりする方法である。沈下～時間曲線（圧密曲線）から圧密理論曲線をフィッティングさせて圧密係数 $c_v$ を求めたり、 $N$ 値から経験式を用いてせん断抵抗角 $\phi$ を求めたりする場合などがこれに相当する。

次章で述べるように、地盤定数の導出値の深度分布をモデル化して得た「推定値」に対する導出値のばらつき等を考慮し、当該地盤の物理・力学情報を反映した代表的な値が「特性値」である。特性値は、地盤定数そのものの代表値を追求して求められるものである。その値は、設計で想定している限界状態に対応していなければならない。設計に用いる照査式や予測式にも適用範囲があることから、これらを勘案した地盤定数とするために、特性値に対して部分係数を乗じるといったかたちで補正を施して設計に用いることになる。部分係数については、地盤定数の信頼性や当該地盤定数の照査結果への感度を基に、施設ごとに値が設定されて設計基準等に示されている。このようにして求めた地盤定数の設定値を「設計用値」と呼ぶ。

Eurocode7における特性値も、JGS4001とほぼ同様の考え方が採用されている。工場製品である構造材料であれば、その物性を表す材料定数 $a$ の特性値は5%超過確率を考慮してフラクタイル値を導入し、 $a_k = \mu(a) - 1.645 \sigma(a)$ によって定義される（例えば欧州規格（EN 1990: 2002））。ここで、 $\mu(a)$ は $a$ の平均値、 $\sigma(a)$ は $a$ の標準偏差である。このような特性値の設定は、構造材料には適切であるかも知れないが、地盤材料の場合にはばらつきが大きいために不適切な設定になる。例えば地盤の破壊を考えると、個々の要素の破壊ではなく、地盤全体の破壊を考えなければならないためである。このような背景から、Eurocode7では、個々の試験結果の5%フラクタイル値ではなく、平均強度の95%信頼水準の限界値を特性値とすべきであるとされた（Orr, 2007）。JGS4001でも、Eurocode7とほぼ同様であるが、当該地盤定数の特性によって信頼水準の上下限値のうち安全側をとることが明記された。ただし、信

頼水準95%を特に推奨してはいない。

95%信頼水準の下限値を簡便に求めるため、Ovesen（1995）は $a_k = \mu(a) - 1.645 \sigma(a) / \sqrt{n}$ を提案した。ここで、 $n$ はデータ数である。Schneider（1997）は $n=11$ のときの値を採用し、さらに単純化した式として $a_k = \mu(a) - 0.5 \sigma(a)$ を提案した。Schneiderの式はOvesenの式よりも $n \geq 12$ のとき安全側の設定になる。

本論文では、特性値を推定するための実務的な簡便法を示している。その方法は、後述するようにSchneiderの式とOvesenの式の趣旨を取り入れ、Eurocode7やJGS4001との整合を図ったものである。

地盤調査と構造物の設計は異なる技術者が担うことが多いため、調査・試験法に応じた地盤定数のばらつきを設計者が検討して部分係数を設定することは困難である。ましてや、地域ごとに異なる地盤そのものの不均質性に基づいたばらつきをも考慮しなければならないとなると、個別の部分係数の設定は実質不可能である。地盤調査を担う技術者から設計を担う技術者に地盤情報が引き継がれるとき、地盤定数には常に同程度の信頼水準が保証されていることが理想である。そうすることによって、設計法に示された、一般的なばらつきに基づく部分係数を用いた設計が可能となる。

本論文で取り扱う地盤定数は、安定性照査のための値に限定したのではなく、沈下予測等にも用いる地盤定数一般を取り扱うことを想定している。また、記述する方法は、港湾でよく見られるような、年代効果により見かけ上の過圧密状態にあるものの、応力履歴的には正規圧密状態にある比較的均質な海成粘土地盤を主な適用対象としている。しかしながら、本手法自体は、様々な地盤に対して広く活用できるものと考えている。

### 3. 補正係数を導入した特性値推定法の概要

#### 3.1 地盤のモデル化

信頼性設計に供する地盤定数の特性値を求めるためには、統計処理するのに十分な個数の試験結果を得ておく必要がある。また、地盤調査・土質試験結果を性能照査に反映させるためには、地盤定数（ここではこれを $a$ と表すことにする）の推定値 $a^*$ の深さ方向の分布を、深さ方向に一様である（ $a^* = c_1$ ）、あるいは深さ方向に直線的に増加する（ $a^* = c_1 z + c_2$ ）などとしてモデル化する必要がある。ここで、 $z$ は深度、 $c_1$ 、 $c_2$ はフィッティングパラメータである。推定値 $a^*$ は、地盤定数の深度分布をモデル化した近似分布上の値を表している。深度方向の分布を慎重に考えることを前提にしたことは、本論文の方法の特徴の一

つでもある。なお、ある深度範囲の分布をモデル化する場合、本来であれば多数のデータが存在することが望ましいが、地盤調査から得られている試験結果の数量には限りがあることから、ある一つの地盤モデルに対して10個以上のデータがあれば統計処理において十分な信頼性が確保できると考えるくらいが現実的である。実際、変動係数は、データ数が10個以上あれば変化は小さくなり、ある程度収束する傾向にある場合が多い。

圧密降伏応力 $p_c$ 、圧密係数 $c_v$ 、体積圧縮係数 $m_v$ など、地盤定数によってはばらつきを対数目盛で考えるほうが合理的なものもある。このような地盤定数を扱う際には、ばらつきを対数目盛で扱うので、対数目盛で深度分布（深度については算術目盛で考える）をモデル化することが理想である。しかしながら、我が国の沿岸部でよく見られるような、軽い構造を有する正規圧密粘土地盤の場合、圧密降伏応力 $p_c$ は、過圧密比と単位体積重量を介して深さに対して一次関数で表される。このようなケースでは、対数目盛で深度分布をモデル化しても、直線分布となっているはずの算術目盛に戻すと、特に浅い深度の範囲で値がかけ離れてしまうことが多い。地盤のモデル化においては、扱うパラメータの種類や当該地盤の特性に応じて慎重に検討すべきである。

### 3.2 特性値の考え方

導出値から特性値を設定する際の基本的な考え方を簡潔に述べておく。図-1に示したように、ひとことで「導出値」と言っても、導出値を求める際に採用したサンプリング方法、試験方法、サウンディング方法、経験式や理論式によって適用範囲や結果のばらつき具合が異なることから、これらの影響が反映された設計値を用いる必要がある。例えば、非排水せん断強さであれば、一軸圧縮試験結果は三軸試験結果に比べてばらつきが大きくなるのが広く知られているが、設計のたびに、これらのばらつきの程度を個々に考慮することは難しい。ましてや部分係数にこれを反映させることは、個々の地盤定数の調査・試験法にまでいつも遡って考えなければならず、設計基準類を複雑にしてしまうだけである。

このような背景から、提案方法では、試験法の信頼度に応じた補正を特性値に反映しておくという考え方を採用する。一軸試験と三軸試験ではばらつき、すなわち変動係数が著しく異なることに着目して、変動係数に応じて補正の程度を変化させれば、試験法に起因するばらつきやデータ解釈の信頼性（ある深度範囲をあるモデル分布で表現したときの信頼性）が特性値に反映される。すなわち、以下に示す特性値の設定方法によれば、試験方

法によらず、いつも同じ部分係数の値が使える仕組みが構築されることになる。

Eurocode7やJGS4001では、データ数が多くなるとたとえデータのばらつきが大きくても、信頼区間が狭くなるので、特性値は平均値と一致する。提案方法では、試験結果のばらつきに応じて特性値が設定されるので、ばらつきを小さくする努力が設計で実を結ぶような設計体系を実現することができる。これについては次章で詳述する。

信頼性設計では、過去の経験を基にした設計定数のばらつきを設定してキャリブレーションを行い、部分係数 $\gamma$ が設定される。しかし、このような方法では「適当なばらつき」が所与の条件とならざるを得ないため、ばらつきを小さくする努力、すなわち、適切な深度分布を考えたり、ばらつきが少ない試験法を採用したり、調査・試験技術を磨いたりといった努力は設計上無視される。結果として、従来と同程度のばらつきが得られるくらいに地盤調査をしていれば良いことになってしまう。提案方法は、このような問題点の改善も目指している。

### 3.3 補正係数の導入

試験結果の分布をモデル化して推定される値を $a^*$ で表し、試験結果 $a$ のばらつきを考えると、 $a/a^*$ の標準偏差( $SD$ )を使うと便利である。ここで、 $a^*$ はモデル化された層内において平均値で一様に分布する、あるいは、最小二乗法等により誤差最小とする近似分布として推定されていなければならない。これは、特性値（図-1参照）は、原則として導出値の平均値（期待値）であることに基いた大前提である。このとき、 $a/a^*$ の標準偏差( $SD$ )は $a$ の変動係数( $COV$ )を表している。

均質な地盤を対象として、乱さない粘土試料に対して各種土質試験を慎重に実施すると、得られる特性値に対する変動係数は0.1以下になることが知られている（渡部、2004）。すなわち、均質な地盤といえども何らかの不均質性があること、土質試験法に起因する誤差が存在することなどによって、この程度の結果のばらつきはやむを得ない。しかし、ばらつきがもっと大きな場合には、地盤の不均質性が高い、サンプリング時の乱れが大きい、土質試験の方法が適切ではない、深さ方向の分布に対するモデル化が適切ではないなどの原因が考えられる。このような場合には、推定値 $a^*$ をそのまま特性値とするのではなく、不確定要因を考慮して安全側に設定することが理想である。

$a/a^*$ の標準偏差( $SD$ )として定義される変動係数( $COV$ )に応じて、推定値を特性値にするための補正係数 $b_1$ を導入



表-1 補正係数の値

変動係数 COV	補正係数 $b_1$	
	耐力側や安全側に 寄与する定数	作用側や危険側に 寄与する定数
0 以上 0.1 未満	1.00	1.00
0.1 以上 0.15 未満	0.95	1.05
0.15 以上 0.25 未満	0.90	1.10
0.25 以上 0.4 未満	0.85	1.15
0.4 以上 0.6 未満	0.75	1.25
0.6 以上	試験結果の解釈や深度分布のモデル化の再検討 あるいは再調査	

し、特性値 $a_k$ を $b_1 \times a^*$ で表すことにする。対象としている地盤定数 $a$ が性能照査において耐力側に寄与する場合（安定解析におけるせん断強さなど）や設計において安全側に寄与する場合（圧密予測における圧密降伏応力や圧密係数など）には補正係数として $b_1=1-(COV/2)$ 、性能照査において作用側に寄与する場合（安定解析における盛土の単位体積重量）や設計において危険側に寄与する場合（圧密予測における圧縮指数など）には補正係数として $b_1=1+(COV/2)$ 程度に設定することにする。これは、累積確率密度が約30%あるいは約70%に相当するフラクティル値を特性値として使うように補正していることになる。簡略化した方法を目指しているため、細かい端数にこだわる必要はなく、表-1の数値を用いることにする。

変動係数が0.6以上のときは、ばらつきが大きすぎて信頼性に乏しく、設計ができないとする。このような場合には、試験結果の解釈をもう一度見直し、必要があれば地盤のモデル化についても再検討する。場合によっては地盤調査そのものをやり直すことになるであろう。

前述したように、Eurocode7やJGS4001では、信頼水準95%等となる信頼区間の上下限界値を特性値とする。本論文の方法によれば、現実的なデータ数 $n=10$ 、かつ、現実的なばらつき（ $COV=0.1$ ）において、信頼水準95%が累積確率密度30%あるいは70%程度のフラクティル値に相当することを利用し、本格的な統計処理をすることなく、簡便な方法でEurocode7やJGS4001との整合が図られている。また、Eurocode7やJGS4001では、データ数 $n$ が非常に大きくなると、たとえばばらつきが大きくても信頼区間が狭くなるために、特性値は平均値と一致する。本論文の方法では、データ数 $n$ が多くても、深度分布の適切なモデル化を考えたり、ばらつきの小さな試験結果を得る努力をし

たりすることが、補正係数 $b_1$ により設計上有利になると強調されている。一方で、 $n \geq 10$ かつ $COV < 0.1$ のときには補正をしないなど、ばらつきが小さい場合には、Eurocode7やJGS4001で平均値そのものが特性値となることとも整合するような工夫もされている。詳細は次章に記述する。

先に述べたように、地盤定数の中には、圧密降伏応力 $p_c$ 、圧密係数 $c_v$ 、体積圧縮係数 $m_v$ など、対数分布として結果を整理するものもある。これらのパラメータは対数目盛で算出されていることが多いので、対数目盛で正規分布（これを対数正規分布という）になると考えてデータのばらつきを評価することが合理的である。すなわち、地盤定数 $a$ に対して $(\log a)/(\log a^*)$ の標準偏差（SD）は $\log a$ の変動係数（COV）を表す。これを用いると、対数目盛での補正係数 $b'_1$ として表-1の値をそのまま使うことができる。このとき、 $\log a_k = b'_1 \log a^* = \log a^{*b'_1}$ の関係があるので $a_k = a^{*b'_1}$ となり、補正係数は算術目盛での指数として表されることになる。

このほか、せん断抵抗角 $\phi$ については、 $\phi$ そのもののばらつきを考えるのではなく、摩擦抵抗として設計に導入される $\tan \phi$ のばらつきで考える。その一方で、港湾の設計基準（日本港湾協会、2007）等に示されている式等を用いて $N$ 値からせん断抵抗角 $\phi$ を推定する場合など、設計に用いるべき値が経験を基に設定されているような場合には、補正係数を導入する必要はないと考えるのが自然である（田中、2003；福井ら、2002）。これについては第7章にも後述する。

上述した内容は、統計処理をするのに十分な個数のデータがあることが前提であったが、データ個数が統計処理をするのに不足している場合には、次のように補正係数 $b_2$ を導入して、補正係数 $b_1$ に対する補正を行う。すなわち、データ数 $n$ が10個程度が、前述のように現実的な地盤調査のデータ数であり、それ以上のデータ数があれば変動係数の算出にも十分な信頼性が出てくるものと考え、それより数が不足するとき、当該地盤定数が性能照査上耐力側に寄与する場合や設計で安全側に寄与する場合には $b_2 = \{1 - (0.5/n)\}$ を、性能照査上作用側に寄与する場合や設計で危険側に寄与する場合には $b_2 = \{1 + (0.5/n)\}$ を補正係数 $b_1$ に乘じるものとする。ここでは、データ数 $n$ が1個しかない場合にはパラメータを50%増減するように補正係数 $b_2$ を設定し、データ数が増えると飛躍的に信頼性が高まることを反映させた。ただし、データ数 $n$ が1個のときには変動係数 $COV$ が得られないので、そもそも補正係数 $b_1$ を設定することができない。最低でもデータは2個以上必要である。提案方法ではデータ数 $n$ が10個に満たないときに補正係数 $b_2$ を導入したが、 $b_2$ 導入の判断基準となるデ

一タ数 $n$ については例えば20個とするなど、設計基準類において個別に定めることが可能である。

以上をまとめると、提案方法では、特性値 $a_k$ は推定値 $a^*$ に補正係数 $b_1$ と $b_2$ を乗じて次式で決定される。

$$a_k = b_1 \cdot b_2 \cdot a^* = \left(1 \pm \frac{COV}{2}\right) \cdot \left(1 \pm \frac{0.5}{n}\right) \cdot a^* \quad (1)$$

なお、安定解析における平地盤の単位体積重量の取り扱いなど、作用側と耐力側とが本質的にバランスしていると思わせる量については、安全側と危険側のどちらにも寄与しないことから、補正係数 $b_1=1$ 、 $b_2=1$ として取り扱うことができる。

### 3.4 圧密定数とせん断定数の関係

粘土地盤の載荷に伴う安定性の検討、すなわち、非排水せん断強さに期待するいわゆる短期安定問題においては、非排水せん断強さ $c_u$ のみを考え、せん断抵抗角 $\phi_u$ をゼロと考える「 $\phi_u=0$ 法」に基づく安定解析が行われる(Nakase, 1967)。このとき用いられる非排水せん断強さ $c_u$ は、一軸圧縮試験、三軸試験、一面せん断試験等により推定される。一方、載荷に伴う圧密沈下の予測については、圧密試験から設定される圧密定数を用いて行われる。せん断強さと圧密定数は、別々の試験から得られる地盤定数であるが、非排水せん断強さは圧密を伴う応力履歴の影響を強く受けることから、相互に関連していることを考慮して設定されるべきである。

圧密が進行すれば強度増加を安定性評価の上で期待できるなど、圧密に関する地盤定数はせん断に関する地盤定数とも密接に関連している。すなわち、圧密に関する地盤定数とせん断に関する地盤定数は互いに独立したものではない。したがって、導出値から特性値を求める過程において、試験結果の分布をモデル化して推定値を導く際に、各地盤定数を相互に関連付けたモデル化を図る必要があるといえる。

ここで、有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$ 、圧密降伏応力 $p_c$ 、非排水せん断強さ $c_u$ の関係を考える。年代効果による見かけの過圧密になっていない、真の意味での正規圧密状態( $OCR=1$ )にある粘土に対して、強度増加率 $m$ が地盤定数として $m=c_u/\sigma'_v$ で定義される。ここで、 $\sigma'_v$ は鉛直有効応力である。 $\sigma'_v$ が減少して力学的な過圧密状態になると、 $c_u/\sigma'_v$ は過圧密比 $OCR$ に対して、両対数軸上で直線的に増加することが経験的に知られており、その関係は $c_u/\sigma'_v=m \times OCR^A$ で表される(地盤工学会, 2000)。定数 $A$ は、除荷に伴う強度減少が無ければ $A=1$ 、減少があれば $A<1$ となるものの、既往の研究によれば $A=0.85$ 程度(Mitachi and Kitago, 1976)、あるいは1.0程度(Terzaghi et al., 1996)と報告さ

れている。

本論文では、日本の港湾域に広く分布するような、軽度に見かけの過圧密状態( $OCR=1.5$ 程度)にある正規圧密粘土地盤を主な対象としているので、 $A=1$ として扱っても誤差は少ない。まして、除荷・膨張による過圧密ではなく、年代効果による見かけの過圧密(これを疑似過圧密という)を対象とすることが多い我が国の港湾地域では、膨張による $c_u$ の減少を考慮する必要はない。むしろ、通常の土質試験の結果として得られる地盤定数を用いて、実用的な強度増加率 $m$ を設定することに意義がある。

そこで、見かけの過圧密の場合には $A=1$ を仮定し、強度増加率を $m=c_u/p_c$ と定義することにより、過圧密比 $OCR=p_c/\sigma'_{v0}$ を用いて、 $c_u=m \times OCR \times \sigma'_{v0}$ なる関係があることを考慮して地盤定数を推定し、ばらつきについて考慮した特性値を設定することとした。

## 4. 一般化された設計コードの特性値との比較

Eurocode7やJGS4001のような一般化された設計コードでは、地盤定数の特性値をある信頼区間の上下限値のうち設計上の安全側の値に設定すべきであるとしている。Eurocode7で採用されているように、多くの場合95%信頼水準が採用される。地盤調査結果では母集団の標準偏差が未知であるから、試験結果は $t$ -分布に従うものとして次式によって95%信頼区間の限界値を特性値に設定する(地盤工学会基準JGS4001-2004; 鈴木, 2002)。

$$a_k = a^* \pm k_s \cdot SD = a^* \pm \frac{t_{0.1;n-1}}{\sqrt{n}} \cdot SD \quad (2)$$

ここで、 $n$ 個の導出値に対して、 $a^*$ は上述の推定値、 $SD$ は標準偏差、 $k_s$ は信頼区間に応じて決まる係数である。また、 $t_{0.1;n-1}$ は95%信頼区間に対応した自由度 $n-1$ の $t$ -分布の逆関数である。深度分布をモデル化して考えるとき、当該パラメータの導出値 $a$ を推定値 $a^*$ で除して正規化し、次のように変形して取り扱うと便利である。

$$\frac{a_k}{a^*} = 1 \pm k_s \cdot \frac{SD}{a^*} = 1 \pm \frac{t_{0.1;n-1}}{\sqrt{n}} \cdot COV \quad (3)$$

(2)式と(3)式における複号のとり方は、(1)式の特性値の補正係数の場合と同様である。

提案方法によって設定される特性値が、95%信頼水準に対応して設定される値とどのような関係にあるかを以下に示し考察する。データの絶対値のばらつきを表す標準偏差 $SD$ ではなく、深度分布を考えた上でばらつきを正規化した変動係数 $COV$ を用いて評価することは、提案方法の特徴の一つである。(1)式の提案方法と(3)式の95%信頼水準に対応させる方法によってそれぞれ設定される特性値を

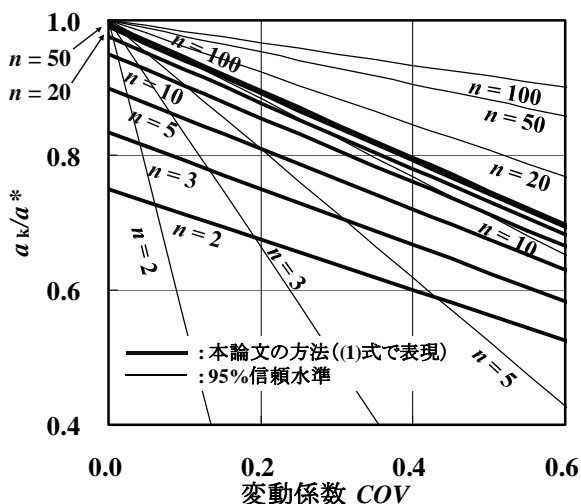


図-2 提案方法（本論文の方法で式(1)をそのまま適用）と一般化された設計コードの方法（95%信頼水準）で設定される特性値の比較

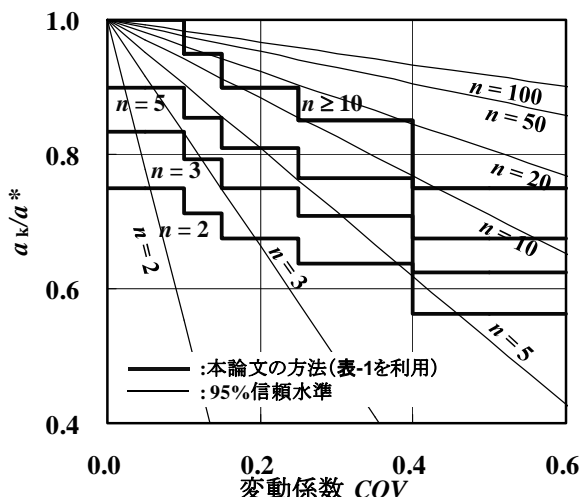


図-3 提案方法（本論文の方法で表-1を利用、 $n < 10$ の場合のみ $b_2$ も導入）と一般化された設計コードの方法（95%信頼水準）で設定される特性値の比較

比較し、図-2に示す。ここではデータ数 $n$ が2, 3, 5, 10, 20, 50, 100の場合を示している。また、紙面の制約により、当該地盤定数が耐力側や安全側に寄与する場合（上述の(1)式～(3)式の複号がいずれも負号をとる場合）のみを示している。 $n=10$ の場合、提案方法と95%信頼水準による値は変動係数に依らずほぼ一致している。これは累積確率密度が約30%あるいは約70%に対応するフラクティル値を採用した根拠となるケースでもある。提案方法では、 $n > 10$ の場合に設定される特性値は $n$ の増加に対してほとんど変化しない。一方、 $n < 5$ の場合、95%信頼水準の値は変動係数の増加に対して急激に減少しており、変動係数が大きい場合には設計ができない恐れがある。提案方法は、変動係数が小さいと95%信頼水準に対応した値より安全側である

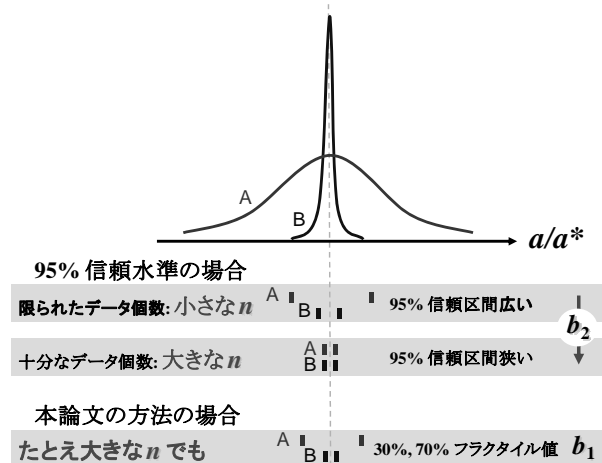


図-4 変動係数が大きな分布Aと変動係数が小さな分布Bの場合に設定される特性値と補正係数 $b_1$ と $b_2$ の役割

が、変動係数がある程度大きくなると逆転し、95%信頼水準に対応した値よりも危険側の設定になる。

実際の地盤調査では、データ個数は10程度であることが多いことから、提案方法により設定される特性値は95%信頼水準にはほぼ対応している。しかし、データ個数が2～3個というケースにもしばしば遭遇する。特に、地層構成が複雑な場合、深度分布を考えている層が薄いとデータ個数は限られてしまう。このような場合、95%信頼水準にこだわることは非現実的であると言え、むしろ、提案方法のほうが現実的であろう。一方、データ数が著しく増加しても、変動係数が大きい場合には特性値を小さく設定しなければならないこと提案方法の特徴である。試験結果のばらつきが著しい場合には、たとえデータがたくさんあったとしてもデータをよく見直して、適切な深度分布を考えることを促している。また、データのばらつきの原因が試験法にあるのであれば、ばらつきを小さくするような信頼性の高い試験法を採用することを促している。

提案方法では、式で表された補正係数 $b_1$ を直接使うのではなく、端数を丸めた表-1の値を使うようになっている。これは、新港湾基準でも同様である。また、データ数 $n$ が10未満の場合のみ、補正係数 $b_2$ を乗じる。このことを反映してプロットしたものが図-3である。提案方法では $COV < 0.1$ で $n \geq 10$ の場合、特性値 $a_k$ は推定値 $a^*$ と一致するようになっている。 $n=10$ 程度の場合には、提案方法と信頼水準95%の特性値はほぼ一致し、 $n < 10$ の場合にも両者は実用的に著しく異なるものではない。

補正係数 $b_1$ と $b_2$ の役割について、図-4に概念図を示す。当該物性値が耐力側に寄与する場合（安定解析におけるせん断強さなど）や安全側に寄与する場合（圧密予測における圧密降伏応力や圧密係数など）には図示した範囲の下限値側、作用側に寄与する場合（安定解析における

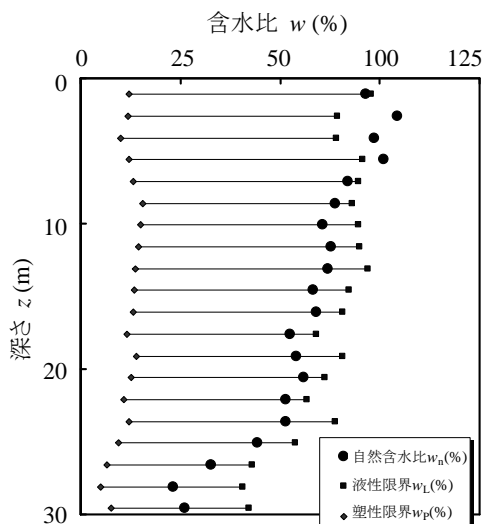


図-5 コンシステンシー特性の深度分布

盛土の単位体積重量)や危険側に寄与する場合(圧密予測における圧縮指数など)には図示した範囲の上限値側をとる。データ数 $n$ が小さい場合には95%信頼区間は広く、 $n$ が大きくなると95%信頼区間は狭くなる。このことと対応したのが補正係数 $b_2$ である。試験結果から得られたデータが広い分布(A)の場合と狭い分布(B)の場合とを比較すると、本論文の提案方法では、たとえデータ数 $n$ が増えても、そもそもデータのばらつきが大きい(A)の分布の場合には $b_1$ によって累積確率密度30%に相当するフラクタル値を用いるように補正されることがわかる。

## 5. 地盤定数設定への適用

### 5.1 地盤調査結果

本章では、本論文の地盤定数設定法について、実際の地盤調査結果に対して適用を試み、設計への適用性について検討する。港湾の土質データベース(石井(1985))によって開発されたものに管理されている地盤情報の中から、神戸港において1998年3月に実施された海底粘土地盤の調査結果を検討対象として取り上げることとした。当該調査地点の水深は16.5mで、地盤は粘性土を主体とする堆積層で構成されている。液性限界 $w_L$ 、塑性限界 $w_p$ 、自然含水比 $w_n$ の深度分布を図-5に示す。表層から深度7m程度までは自然含水比 $w_n$ が液性限界 $w_L$ より大きく、液性指数 $I_L=(w_n-w_p)/(w_L-w_p)$ が1より大きい。また、深度28m以深では、自然含水比 $w_n$ が著しく減少する。液性限界 $w_L$ も減少しているが、液性指数 $I_L$ についても0.8程度であったものが0.5程度まで急激に減少しており、この深度において堆積層が著しく変化していることがわかる。

### 5.2 非排水せん断強さの設定例

当該地盤の一軸圧縮試験結果(導出値)に対して提案方法を適用し、非排水せん断強さの特性値の深度分布を設定した。特性値設定の過程をとりまとめたものを表-2に示す。まず、全層にわたって一律な深度分布を考えた場合、平均値 $c_u=23.0$ (kN/m<sup>2</sup>)で一定であるとして深度分布をモデル化できる(図-6(a)の推定値 $c_u^*$ )。このとき、変動

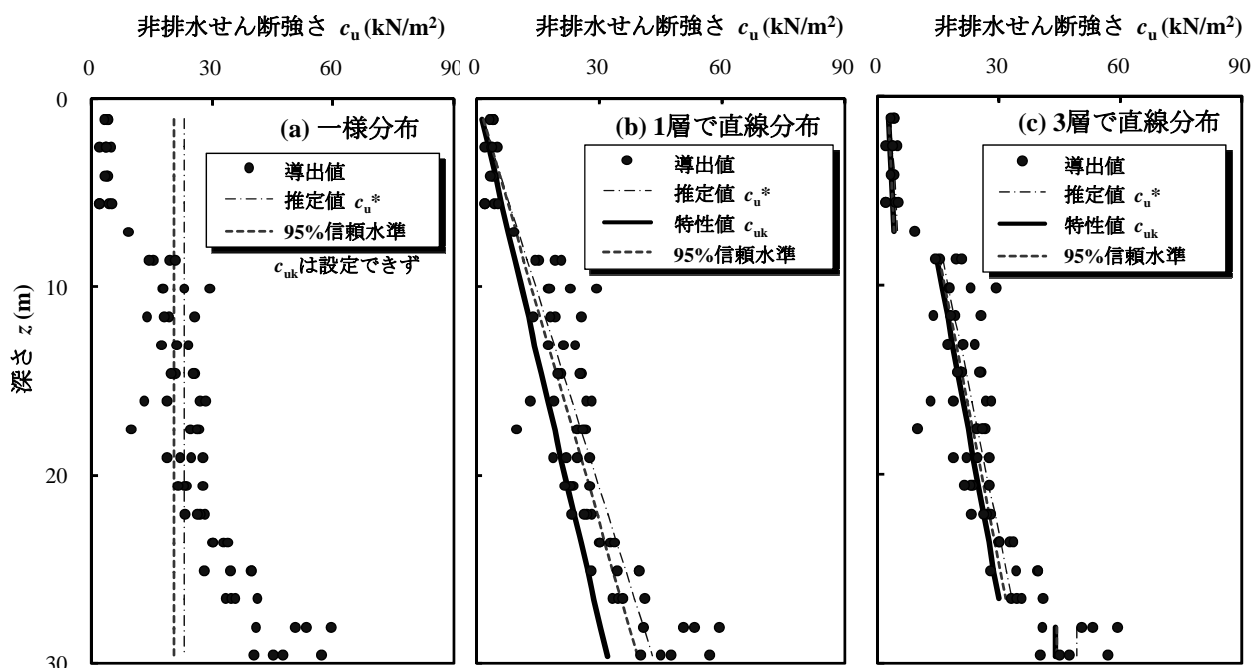


図-6 一軸圧縮試験結果の導出値 $c_u$ 、モデル化した推定値 $c_u^*$ 、特性値 $c_{uk}$ 、および95%信頼水準の下限値：(a) 深さ方向に一律に分布するとしてモデル化、(b) 1層で直線分布としてモデル化、(c) 3層で直線分布としてモデル化

表-2 一軸圧縮試験結果の導出値から深度分布をモデル化して求められる特性値

深度 z(m)	導出値 $c_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	一様分布			1層で直線分布				3層で直線分布				
		推定値 $c_u^*$ (kN/m <sup>2</sup> )	変動 係数 COV	補正 係数 $b_1 \times b_2$	特性値 $c_{uk}$ (kN/m <sup>2</sup> )	推定値 $c_u^*$ (kN/m <sup>2</sup> )	変動 係数 COV	補正 係数 $b_1 \times b_2$	特性値 $c_{uk}$ (kN/m <sup>2</sup> )	推定値 $c_u^*$ (kN/m <sup>2</sup> )	変動 係数 COV	補正 係数 $b_1 \times b_2$	特性値 $c_{uk}$ (kN/m <sup>2</sup> )
1.1	3.9	23.0	0.601	再検討 × 1.00	再検討	1.8	0.407	0.75 × 1.00	1.3	3.4	0.349	0.85 × 1.00	2.9
1.1	4.3	23.0				1.8			1.3	3.4			2.9
1.1	4.2	23.0				1.8			1.3	3.4			2.9
1.1	3.3	23.0				1.8			1.3	3.4			2.9
2.6	2.1	23.0				3.9			3.0	3.8			3.2
2.6	5.0	23.0				3.9			3.0	3.8			3.2
2.6	3.6	23.0				3.9			3.0	3.8			3.2
2.6	3.9	23.0				3.9			3.0	3.8			3.2
4.1	3.9	23.0				6.1			4.6	4.2			3.6
4.1	4.1	23.0				6.1			4.6	4.2			3.6
4.1	3.3	23.0				6.1			4.6	4.2			3.6
5.6	4.4	23.0				8.3			6.2	4.6			3.9
5.6	2.0	23.0				8.3			6.2	4.6			3.9
5.6	5.3	23.0				8.3			6.2	4.6			3.9
5.6	2.1	23.0				8.3			6.2	4.6			3.9
7.1	9.1	23.0				10.4			7.8	5.0	4.2		
8.6	19.4	23.0				12.6			9.5	16.2	14.6		
8.6	20.8	23.0				12.6			9.5	16.2	14.6		
8.6	15.3	23.0				12.6			9.5	16.2	14.6		
8.6	14.3	23.0				12.6			9.5	16.2	14.6		
10.1	29.4	23.0				14.8			11.1	17.6	15.9		
略*	略*	略*				略*			略*	略*	略*		
25.1	39.8	23.0				36.4			27.3	31.8	28.7		
26.6	33.3	23.0				38.6			28.9	33.3	29.9		
26.6	41.1	23.0				38.6			28.9	33.3	29.9		
26.6	34.6	23.0				38.6			28.9	33.3	29.9		
26.6	35.7	23.0				38.6			28.9	33.3	29.9		
28.1	40.8	23.0				40.7			30.6	49.3	44.0		
28.1	53.4	23.0				40.7			30.6	49.3	44.0		
28.1	59.5	23.0				40.7			30.6	49.3	44.0		
28.1	50.6	23.0				40.7			30.6	49.3	44.0		
29.6	40.2	23.0				42.9			32.2	49.3	44.0		
29.6	57.0	23.0				42.9			32.2	49.3	44.0		
29.6	45.1	23.0				42.9			32.2	49.3	44.0		
29.6	47.5	23.0				42.9			32.2	49.3	44.0		

略\*：42個のデータ表示を省略

係数COVは0.60となるが、表-1によれば「結果の解釈やモデル化の再検討あるいは再調査」ということになり、このままでは特性値を求めることができない。

導出値の分布には深度方向に相関があるように見えるので、「一様な深度分布」とモデル化したことが適切ではなかったことが原因であると考えられる。そもそも、安定解析に用いる非排水せん断強さの深度をモデル化する際に、表面付近のせん断強さを過大に評価するモデルは、安定解析上、極めて危険な設計になるので用いるべきではない。なお、データ数が豊富なため、ばらつきは大きいくとも95%信頼水準の下限値は推定値(平均値)より若干小さいところに設定されている。

次に、深度分布を1本の直線分布で最小二乗法により近似すると、 $c_u^* = 1.4z - 0.5$  (kN/m<sup>2</sup>) でモデル化できる (図

-6(b)の推定値 $c_u^*$ )。このとき、変動係数COVは0.41となり、表-1より補正係数 $b_1 = 0.75$ が得られる。十分な個数(10個以上)のデータがあるので補正係数 $b_2 = 1.0$ と考えて良い。したがって、特性値 $c_{uk}$ は $b_1 \times b_2 \times c_u^* = 0.75c_u^*$ によって得られる。一方、95%信頼水準の下限値は、データ数が豊富なため推定値より若干小さい値になっている。提案方法で得られた特性値の分布は、最小二乗法で得られた近似分布(推定値)より25%も小さく、また、95%信頼水準の値よりも20%ほど安全側の設定になっている。これは、モデル化が最適ではないことに起因していると考えられ、次に示すように、より適切にモデル化することで、これを解決することができる。

非排水せん断強さの導出値の深度分布のみならず、図-5のコンシステンシー特性の分布も参考にして、深度分布

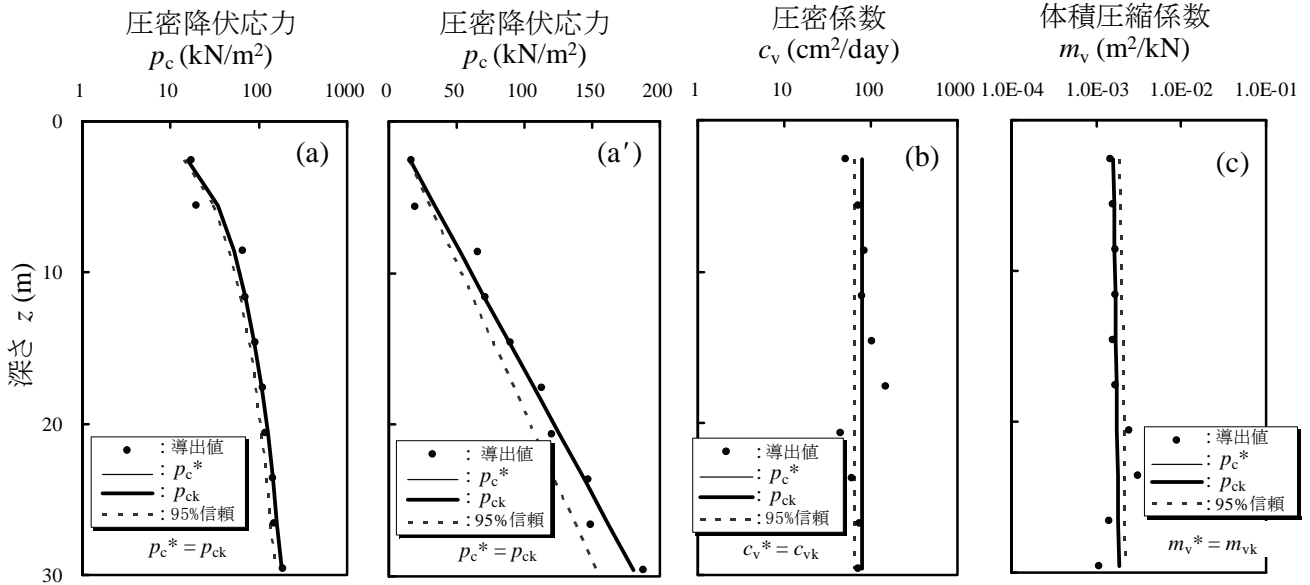


図-7 圧密試験結果の導出値，モデル化した推定値，特性値：(a)圧密降伏応力 $p_c$ ，(a')圧密降伏応力 $p_c$ ，(b)正規圧密領域での圧密係数 $c_v$ ，(c)圧密圧力100kPa時の体積圧縮係数 $m_v$

を3本の直線分布として近似するモデルも考えられる．このとき，3本の直線分布は $c_u^* = 0.27z + 3.1$  (kN/m<sup>2</sup>) ( $0 < z < 7.5$  mの回帰直線)， $c_u^* = 0.95z + 8.1$  (kN/m<sup>2</sup>) ( $7.5 < z < 27.5$  mの回帰直線)， $c_u^* = 49.3$  (kN/m<sup>2</sup>) ( $z > 27.5$  mの平均値．対象とする層が薄いので回帰直線ではなく平均値を採用した)でモデル化できる(図-6(c)の推定値 $c_u^*$ )．3直線近似でモデル化した場合，第1層，第2層，第3層の変動係数COVはそれぞれ0.35，0.21，0.14であり，表-1より補正係数 $b_1$ はそれぞれ0.85，0.90，0.95が得られる．データの個数は，第1層，第2層はそれぞれ10個以上あるので $b_2 = 1.0$ と考えて良いが，第3層はデータが8個しかないので， $b_2 = 1 - (0.5/n) = 1 - (0.5/8) = 0.94$ となる．この深度分布のモデル化では，提案方法による特性値と95%信頼水準に対応した特性値とにほとんど差は認められない．

一般に，一軸圧縮試験の結果は，同一深度に対して得られた複数個(3~4個)の試験結果を一つのデータとして報告するが，ここでいう試験の個数とは，同一深度のものも含め，実施した試験の数量全てを数えてよいものと考えた．ただし，異常値と疑われるデータについては，試験時の供試体の状況等に関する記述に着目し，異物が介在していたり，クラックが入っていたり，トリミング中に試料が欠けてしまったりと，結果に悪影響(Watabe and Tsuchida, 2001a)を与える要因が説明できるものを除外した．

図-6に示した事例では，(a)，(b)，(c)の順に変動係数が小さくなっており，導出値をしっかり検討することによって深度分布の適切なモデル化が誘導されていることがわかる．なお，(a)ではばらつきが大きすぎて特性値は

得られなかった．また，(a)のようにモデル化がずさんな場合には，自動的にデータの解釈・モデル化をやり直さざるを得ないような仕組みができていともいえる．

### 5.3 圧密定数の設定例

当該地盤の圧密試験結果に対して提案方法を適用し，圧密定数の特性値の深度分布の設定を試みる．表-3は，圧密試験結果として，(a)(a')圧密降伏応力 $p_c$ ，(b)圧密係数 $c_v$ ，(c)体積圧縮係数 $m_v$ をまとめたものである．ここで， $c_v$ は正規圧密領域での値， $m_v$ は一例として圧密圧力 $p = 100$ kPaでの値とした．まず，算術目盛でこれらの圧密定数を表したときに，深度方向に直線分布になるとして深度分布をモデル化した．先に述べたように，正規圧密地盤の $p_c$ は深さ方向に直線的に増加する分布であるため，(a')のように算術目盛で直線分布とすることに合理性がある．一方， $c_v$ と $m_v$ については，対数目盛で分布を考えることもできるが，今回の事例では，導出値に深度方向の変化がほとんど見られず，算術目盛での分布モデルと対数目盛での分布モデルは実質的に同等であることから，ここでは $p_c$ の深度分布と同様に算術軸上で直線分布として取り扱った．これらの圧密定数は，対数目盛でプロットされることが多く，データのばらつきは対数正規分布に従うものと考えられる．そこで，図-7(a)，(b)，(c)のように対数目盛にプロットしてばらつきを考えると，変動係数はいずれも0.1以下となり，表-1より補正係数 $b'_1 = 1.0$ が得られる．また，この事例では，データの個数は10個なので十分な個数と考えられ， $b'_2 = 1.0$ となる．参考として，図-7には，95%信頼水準に対応した値も示してある．

表-3 圧密試験結果の導出値から深度分布をモデル化して求められる特性値

(a) 圧密降伏応力 $p_c$							
深度 $z$ (m)	導出値 $p_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	推定値 $p_c^*$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\log p_c$	$\log p_c^*$	対数上の 変動係数 $COV$	補正係数 $b'_1 \times b'_2$	特性値 $p_{ck}$ (kN/m <sup>2</sup> )
2.6	17.1	15.7	1.232	1.197	0.056	1.00 × 1.00	15.7
5.6	19.6	34.1	1.293	1.532			34.1
8.6	65.7	52.4	1.818	1.719			52.4
11.6	71.6	70.7	1.855	1.850			70.7
14.6	90.2	89.0	1.955	1.950			89.0
17.6	112.8	107.4	2.052	2.031			107.4
20.6	120.6	125.7	2.081	2.099			125.7
23.6	147.1	144.0	2.168	2.158			144.0
26.6	149.1	162.3	2.173	2.210			162.3
29.6	188.3	180.7	2.275	2.257			180.7
(b) 圧密係数 $c_v$							
深度 $z$ (m)	導出値 $c_v$ (cm <sup>2</sup> /day)	推定値 $c_v^*$ (cm <sup>2</sup> /day)	$\log c_v$	$\log c_v^*$	対数上の 変動係数 $COV$	補正係数 $b'_1 \times b'_2$	特性値 $c_{vk}$ (cm <sup>2</sup> /day)
2.6	52.1	78.6	1.717	1.896	0.079	1.00 × 1.00	78.6
5.6	72.4	78.7	1.860	1.896			78.7
8.6	83.6	78.9	1.922	1.897			78.9
11.6	78.8	79.0	1.897	1.898			79.0
14.6	103.0	79.1	2.013	1.898			79.1
17.6	151.0	79.2	2.179	1.899			79.2
20.6	44.3	79.4	1.646	1.900			79.4
23.6	60.5	79.5	1.782	1.900			79.5
26.6	73.5	79.6	1.866	1.901			79.6
29.6	72.5	79.7	1.860	1.902			79.7
(c) 体積圧縮係数 $m_v$							
深度 $z$ (m)	導出値 $m_v$ (m <sup>2</sup> /kN)	推定値 $m_v^*$ (m <sup>2</sup> /kN)	$\log m_v$	$\log m_v^*$	対数上の 変動係数 $COV$	補正係数 $b'_1 \times b'_2$	特性値 $m_{vk}$ (m <sup>2</sup> /kN)
2.6	0.00147	0.00159	-2.833	-2.798	0.047	1.00 × 1.00	0.00159
5.6	0.00155	0.00162	-2.810	-2.790			0.00162
8.6	0.00166	0.00165	-2.779	-2.782			0.00165
11.6	0.00167	0.00168	-2.777	-2.774			0.00168
14.6	0.00158	0.00171	-2.801	-2.767			0.00171
17.6	0.00170	0.00174	-2.769	-2.759			0.00174
20.6	0.00245	0.00177	-2.611	-2.752			0.00177
23.6	0.00311	0.00180	-2.507	-2.745			0.00180
26.6	0.00143	0.00183	-2.845	-2.737			0.00183
29.6	0.00107	0.00186	-2.970	-2.730			0.00186

過圧密比OCRの深度分布を図-8(a)に示す。一般に、有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$ は直接計測することができないので、単位体積重量 $\rho_t g$ （水中については有効単位体積重量 $(\rho_{sat} - \rho_w) \times g$ ）を深さ方向に積分することにより推定される。過圧密比 $OCR = p_c / \sigma'_{v0}$ は、圧密試験から導出値として得られた各深度の $p_c$ と算出された有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$ を用いて計算される。これは、計測値に対して一次処理したことに相当するので、過圧密比の導出値として位置づけられる。したがって、得られた値に対しては、深度分布をモデル化し、ばらつきやデータの個数を考慮して補正をしなければならない。一方、特性値としてモデル化された $p_c$ の深度

分布を使ってOCRを計算することもできる。この場合のOCRは、特性値を使って計算された値であり、過圧密比の特性値として位置づけられる。図-8(a)に示した実線は、後者の特性値を表している。

#### 5.4 強度増加率の設定例

強度増加率 $m$ の深度分布を図-8(b)に示す。非排水せん断強さ $c_u$ と圧密降伏応力 $p_c$ は、せん断試験と圧密試験から導出値がそれぞれ得られているので、これらを用いると強度増加率 $m = c_u / p_c$ を計算することができる。このようにして求めた強度増加率 $m$ は、二つの異なる試験結果を利用し

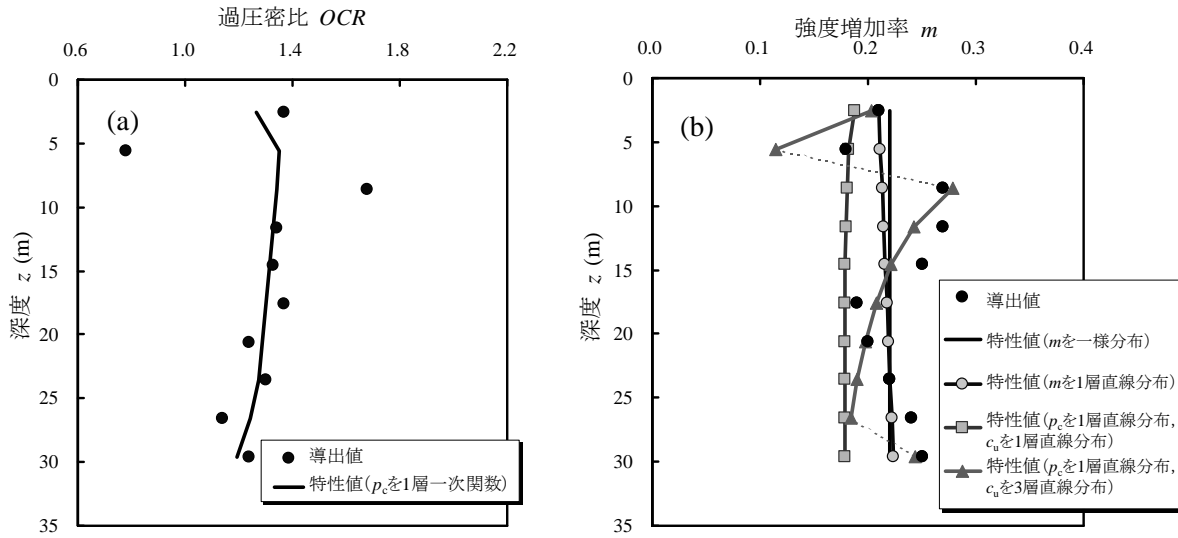


図-8 (a)過圧密比OCR ( $= p_c/\sigma'_{v0}$ ) と(b)強度増加率 $m (= c_u/p_c)$ の深度分布の導出値と特性値 (黒の丸印は導出値. 実線は導出値が深さ方向に一樣に分布するとしてモデル化した特性値. 丸印は導出値を1層直線分布としてモデル化した特性値. 四角印は $p_c$ を1層直線分布とした特性値と $c_u$ を1層直線分布とした特性値から算出した特性値. 三角印は $p_c$ を1層直線分布とした特性値と $c_u$ を3層直線分布とした特性値から算出した特性値.)

て一次処理したもので、得られた値も導出値 (黒の丸印) であると考えられる. したがって、得られた値に対しては、深さ方向の分布をモデル化し、ばらつきやデータの個数を考慮して補正をしなければならない. ここでは、深度方向に一樣に分布すると想定した場合 (マーカー無しの実線) と、直線分布と想定した場合 (灰色の丸印) でそれぞれモデル化し、特性値を推定した.

一方、非排水せん断強さ $c_u$ の特性値と圧密降伏応力 $p_c$ の特性値を用いて強度増加率 $m$ を求めることもできる. ここでは、 $p_c$ を1層直線分布とした特性値と $c_u$ を1層直線分布とした特性値の組合せから算出した特性値 (四角印) と $p_c$ を1層直線分布とした特性値と $c_u$ を3層直線分布とした特性値の組合せから算出した特性値 (三角印) を示している. これらの場合、二つの異なる特性値から推定した値であることから、得られた値も特性値であると考えられる.

導出値をモデル化して得られた特性値 (マーカー無しの実線と灰色の丸印) は、非排水せん断強さ $c_u$ と圧密降伏応力 $p_c$ が相互に関連していることを考慮せずに設定しているので、強度増加率 $m=c_u/p_c$ と過圧密比 $OCR=p_c/\sigma'_{v0}$ を用いた $m=c_u/(OCR \times \sigma'_{v0})$ なる関係が成立せず、不整合が生じる. 一方、非排水せん断強さ $c_u$ の特性値と圧密降伏応力 $p_c$ の特性値から推定した強度増加率 $m$ の特性値を使う場合 (四角印と三角印) は、相互の関係を考慮しているので、合理的な設計が可能となる. しかし、導出値をモデル化して得られた特性値が深度方向に一樣な分布、直線分布ともに0.22程度であるのに対し、非排水せん断強さ $c_u$ の特性値

と圧密降伏応力 $p_c$ の特性値から推定した強度増加率 $m$ の特性値は、0.18程度と小さな値になっている. 一般に強度増加率 $m$ の値が0.25前後の値である (Mesri, 1975; Watabe et al., 2003b) ことを勘案すると、前者は妥当な値であるといえるが、後者は明らかに過小な値である. これは一軸圧縮試験の結果のばらつきが大きいため、後者の特性値を推定するのに用いている非排水せん断強さ $c_u$ が、補正係数 $b_1$ により補正されてしまった (割引かれてしまった) ためである.

ところが、上述のように前者は一見妥当な値であるものの、圧密とせん断との関係に不整合な点があり、設計では後者の小さな値を使うべきであろう. すなわち、せん断試験からはせん断に関する地盤定数の特性値を設定し、圧密試験からは圧密に関する地盤定数の特性値を設定することが合理的であり、両者を仲介する強度増加率 $m$ のようなパラメータについては、これを単独で使う場合を除き、導出値から特性値を設定することは設計上の矛盾を生じることになるので避けるべきである.

このことは、一軸圧縮試験のように、得られる結果にばらつきが見られる試験方法により非排水せん断強さ $c_u$ を求め、さらにモデル化が不適切である場合には、ばらつきが大きい分だけ補正係数 $b_1$ による割引が大きくなり、不経済な設計になる可能性があることを示唆している. このような問題を解決するためには、深さ方向の分布を適切にモデル化する必要があるほか、次章に示す再圧縮三軸試験が、試験結果のばらつきが小さく有効な方法となる.



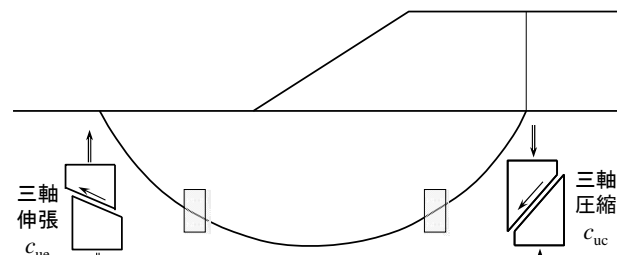
上述のように、非排水せん断強さ $c_u$ については、全体を1層と考える場合と、物理特性も参考にして3層に分けて考える場合を想定し、それぞれの層で直線分布になっているとして、**図-6**のようなモデル化をした。一方、圧密降伏応力 $p_c$ については、全体を1層と考えると、一本の直線分布になるとして**図-7(a)**のようにモデル化した。非排水せん断強さ $c_u$ と圧密降伏応力 $p_c$ がともに1層で直線分布になっているとした場合、強度増加率 $m$ の分布は連続した自然なものになるが、一方が1層、他方は3層でモデル化すると、各層の端部で不連続な分布となり、不自然になるので注意が必要である。しかしながら、この場合に圧密に関する地盤定数の特性値とせん断に関する地盤定数の特性値の関係に矛盾はなく、不自然に見える強度増加率 $m$ の分布を設計に用いることもできる。事実、**図-8(b)**の分布(三角印)は、導出値(黒の丸印)の分布傾向を捉えている。

## 6. 三軸試験の有効な活用方法

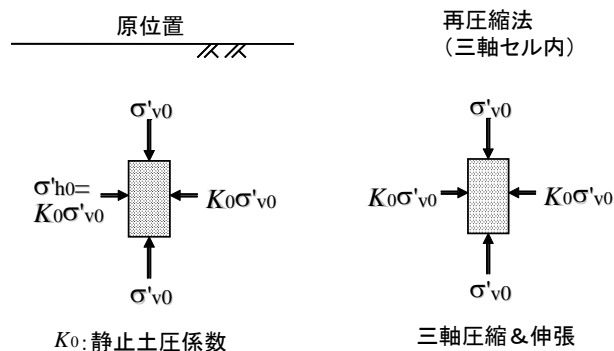
### 6.1 再圧縮三軸試験

**図-9**に示すような円弧すべりによる粘土地盤上の盛土の安定解析を考える。盛土直下では、鉛直応力が増加することによりせん断が生じるので、三軸非排水圧縮試験によりこれに相当するせん断強さ $c_{uc}$ を評価することができるものと考えられる。厳密には平面ひずみと軸対称の違いがあるがここでは考えないことにする。一方、円弧の終点、すなわち法先側のせん断は水平応力が増加することによりせん断が生じるので、三軸非排水伸張試験によりこれに相当するせん断強さ $c_{ue}$ を評価することができるものと考えられる。厳密には平面ひずみと軸対称の違いがあるとともに、三軸伸張試験では軸力を減少させるのに対し、盛土の破壊では水平応力が増加するといった違いがあるが、これらについてもここでは考えないことにする。設計に使う非排水せん断強さ $c_u$ は、圧縮試験から求めた $c_{uc}$ と伸張試験から求めた $c_{ue}$ の平均値として表される。日本の粘土では、次に述べる再圧縮法の場合に $c_{uc}$ は $c_u$ よりも30%程度小さくなることが多いようである(Watabe et al., 2002)。

一軸圧縮試験の結果はばらつきが大きく、信頼性に欠ける試験であると言われて久しい。非排水せん断強さの決定法として、最も信頼性が高いと考えられているのが再圧縮法と呼ばれている方法(Berre and Bjerrum, 1973)である。この方法では、**図-10**のように、採取した試料に対して原位置と同等の応力状態を再現して圧密することにより、試料の乱れ等の影響を小さくしてせん断試験が実施される。



**図-9** 粘土地盤上に築造された盛土の安定問題と強度異方性



**図-10** 原位置の応力状態と再圧縮法における三軸セル内での応力状態

地盤中の要素は鉛直に有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$ 、水平に静止土圧 $\sigma'_{h0} (=K_0\sigma'_{v0})$ を受けている。サンプリングされた試料は大気圧の下で全応力はゼロであるが、サクションにより等方的な残留有効応力がある程度残った状態になっている。三軸セルの中で $\sigma'_1 = \sigma'_{v0}$ 、 $\sigma'_3 = K_0\sigma'_{v0}$ で圧密することにより、原位置の有効応力と同等の状態を供試体に再現した上で行う非排水せん断試験を再圧縮三軸試験と称することにする。有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$ は、採取した試料の単位体積重量から算出することができるが、ここで問題になるのは静止土圧係数 $K_0$ をどのようにして設定するかである。原位置試験から求める方法もいくつか提案されているが、室内試験からも三軸セルを用いた $K_0$ 圧密試験により求めることができる。ただし、この方法で求められる $K_0$ 値は正規圧密状態の $K_0$ 値( $K_{0NC}$ と表すことが多い)であって、実際の地盤のように年代効果を受けた土の $K_0$ ではないことに注意が必要である(Watabe et al., 2003a)。原位置の $K_0$ 値の推定が困難な場合には、便宜的に $K_{0NC}$ の値を原位置の $K_0$ 値と仮定することも多い。日本の粘土では、正規圧密状態での $K_0$ はほとんどの場合0.45~0.55になる。

**図-11**は、一部に薄い砂層を挟在するものの、粘土層が厚く堆積した大阪湾(関西国際空港)海底粘土地盤で実施された地盤調査結果で、一軸圧縮試験から求めた非排水せん断強さ $c_u (=q_u/2)$ 、再圧縮三軸試験から求めた圧縮せん断強さ $c_{uc}$ および伸張せん断強さ $c_{ue}$ の深度分布を示し

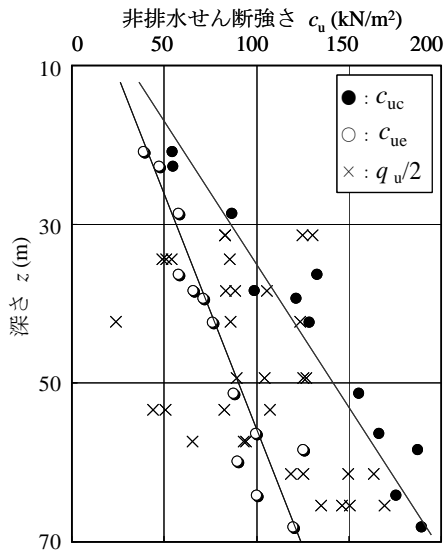


図-11 再圧縮三軸試験および一軸圧縮試験から得られた大阪湾海底粘土地盤のせん断強さ分布

たものである (Watabe and Tsuchida, 2001b). 一軸圧縮試験から求められる非排水せん断強さ ( $q_u/2$ ) は著しくばらつくものの、その平均値は、原位置と同等の応力状態を供試体に再現できる再圧縮三軸試験による圧縮および伸張非排水せん断強さの平均値 ( $c_{uc}$  と  $c_{ue}$  の平均値) とほぼ一致する。

上述のように、再圧縮三軸試験は優れた方法であるが、実務で使われることはほとんどない。粘土地盤の安定解析は  $\phi_u=0$  法 (Nakase, 1967) が基本であるにもかかわらず、設計法に最も適した試験法がほとんど実施されていないことは残念である。実務では一軸圧縮試験が行われるこ

とが多く、まれに三軸試験が行われたとしても、その大部分は、いくつかの拘束圧を設定して実施される非圧密非排水三軸圧縮試験 (UU試験) や、いくつかの等方圧密圧力を設定して実施される圧密非排水三軸圧縮試験 ( $\overline{CU}$  試験) である。このような試験から得られた結果は、 $\phi_u=0$  法に直接的に適用することはできず、せつかくの三軸試験も設計には活かされない。原位置の平均主応力で等方圧密した  $\overline{CU}$  試験の結果に対し異方性等を考慮して設計用せん断強さに補正し、これと一軸圧縮試験から得られた非排水せん断強さとの比較により、試料の乱れの程度を非排水せん断強さの推定に反映する土田ら (1989) の方法が、数少ない実務的な三軸試験の活用法として挙げられる程度である。

このような現状から、港湾の土質データベースに収録された三軸試験結果は少なく、ましてや、再圧縮三軸試験の結果は皆無である。そこで、以下では、一軸圧縮試験と再圧縮三軸試験の両者が実施された研究 (Watabe and Tsuchida, 2001b) を引用し、提案方法の適用を試みる。

## 6.2 一軸圧縮試験と再圧縮三軸試験の比較

図-12(a)に再圧縮三軸試験から設定した非排水せん断強さ  $c_u$  の深度分布 (導出値) を示す。ここで示した分布は、図-11で示した各深度における圧縮せん断強さ  $c_{uc}$  と伸張せん断強さ  $c_{ue}$  の平均値を導出値としたものである。なお、図-11よりも深いところまでのデータも示してある。地表面でせん断強さがゼロとなる回帰直線で近似すると、推定値として  $c_u^* = 2.4 z$  ( $kN/m^2$ ) が得られる。変動係数  $COV$  は

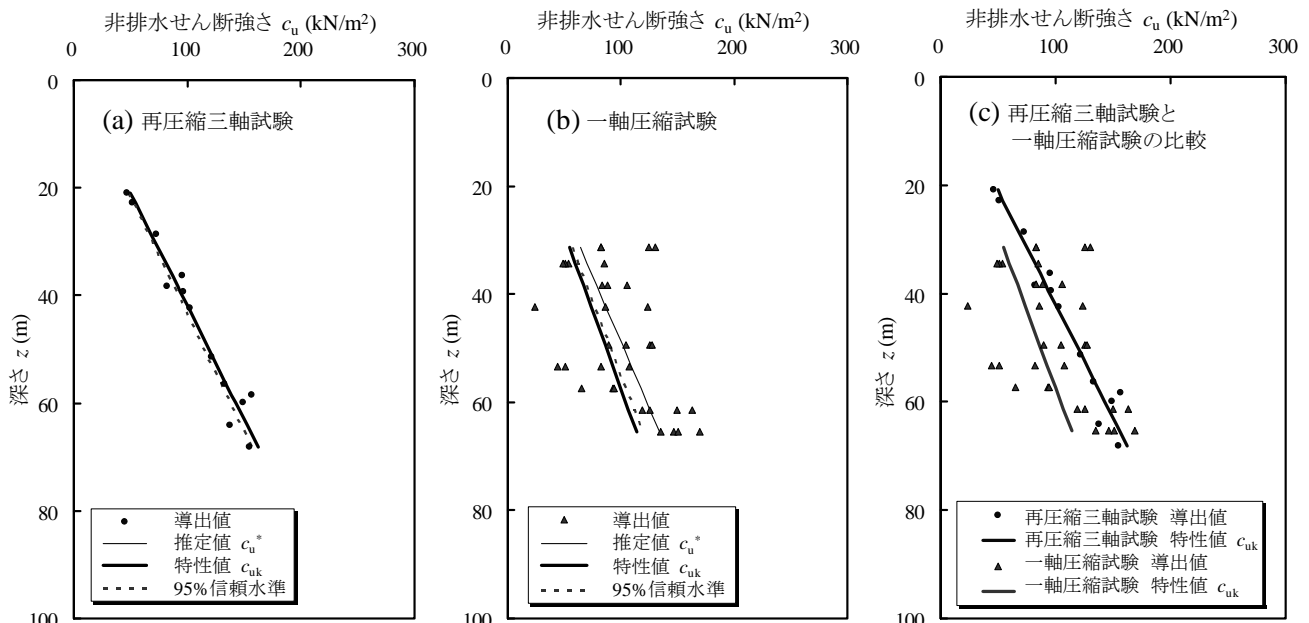


図-12 大阪湾粘土の非排水せん断強さの深度分布: (a)再圧縮三軸試験結果, (b)一軸圧縮試験結果, (c)三軸と一軸の特性値の比較

表-4 本論文の特性値設定法の適用範囲

調査・試験方法	当該調査・試験で得られる地盤定数	記号	本手法の適用		理由等	
			有	無		
物理探査	弾性波探査	粗密波速度	$V_p$	○	原位置での実験的な調査・試験であって、地盤の複合的な特性を評価しているため、統計的処理には適さない。	
	速度検層	粗密波速度	$V_p$	○		
		せん断波速度	$V_s$	○		
ボーリング	物理試験	湿潤密度（単位体積重量）	$\rho_t$	○	※	①性能照査において当該パラメータを直接用いる場合は補正の必要有り。 ②性能照査においてその他のパラメータを算出するために当該パラメータを用いる場合は補正の必要無し。
		含水比	$w$	○	※	
		土粒子密度	$\rho_s$	①	②	
		粒度試験	粒度（通過質量百分率）	$D_{10}$ 等	○	
	コンシステンシー試験	液性限界	$w_L$	○	※	
		塑性限界	$w_p$	○	※	
	一軸圧縮試験	一軸圧縮強度	$q_u$	○	※	非排水せん断強さ $c_u = q_u/2$ でも同様。
	三軸試験	粘着力	$c$	○	※	CU試験の場合は非排水せん断強さ $c_u$ ばらつきは $\tan\phi$ で考える。CU試験の場合は $q_c=0$
		せん断抵抗角	$\phi$	○	※	
	一面せん断試験	粘着力	$c$	○	※	ばらつきは $\tan\phi$ で考える。
		せん断抵抗角	$\phi$	○	※	
	圧密試験	圧縮指数	$C_c$	○	※	
		体積圧縮係数	$m_v$	○	※	
		圧密係数	$c_v$	○	※	
	現地透水試験	透水係数	$k$		○	原位置での実験的な調査・試験であって、地盤の複合的な特性を評価しているため、統計的処理には適さない。
	室内透水試験	透水係数	$k$	○	※	
	中空ねじり試験	せん断弾性係数、減衰定数	$G, h$		○	原位置での密度・拘束圧等の条件を再現して実施される実験的な調査・試験であって、地盤の複合的な特性を評価しているため、統計的処理には適さない。ただし、十分な試験個数が確保できている場合は補正の必要有り。
	繰返し三軸試験	せん断弾性係数、減衰定数	$G, h$		○	
サウンディング	標準貫入試験	N値	$N$		○	当該調査・試験で得られる値（計測値）をもとに算出される地盤定数の導出値は、経験式・相関式等でばらつきが考慮されているため、これらの導出値は、補正せずにそのまま特性値として扱うことができる。
	オランダ式コーン貫入試験	コーン貫入抵抗力	$q_c$		○	
	電気式静的コーン貫入試験	コーン先端の貫入抵抗力	$q_t$		○	
	ベーンせん断試験	ベーンせん断強さ	$\tau_v$		○	
試験 載荷	孔内水平載荷試験	変形係数	$E$		○	原位置での実験的な調査・試験であって、地盤の複合的な特性を評価しているため、統計的処理には適さない。
	平板載荷試験	地盤反力係数	$K_v$		○	
		静的最大軸方向押し込み抵抗力	$P_0$		○	

※補正の必要性がある地盤定数であっても、3m程度以下の薄層の場合等、取得可能なデータ個数に限りがある場合にあっては統計的処理に適さないこともある。

0.071であり、表-1より補正係数 $b_1$ は1.0となる。データの個数 $n$ は10個以上あるので、 $b_2=1.0$ となる。データのばらつきが小さく、かつ、適切なモデル化ができていといえる。このケースでは、回帰直線がそのまま特性値の分布となっている。

図-12(b)に一軸圧縮試験から設定した非排水せん断強さ $c_u$ の深度分布（導出値）を示す。ここで示した分布は図-11で示したものと同じである。地盤表面でせん断強さがゼロとなる回帰直線で近似すると、推定値として $c_u^*=2.0\sigma$  (kN/m<sup>2</sup>)が得られる。再圧縮三軸試験から得られた推定値に比べて、一軸圧縮試験から得られた推定値はやや小さいもののほぼ一致している。図からわかるようにばらつきが大きく、変動係数 $COV$ が0.376もあるため、表-1より補正係数 $b_1$ は0.85となる。データの個数 $n$ は10個以上あるので、 $b_2=1.0$ である。したがって、一軸圧縮試験から得られる特性値は、図-12(c)に示すように、再圧縮三軸試験から得られる特性値よりも27%も小さなせん断強さしか設定できず、安定解析において非常に不利な設計条件とな

ってしまう。ばらつきのみならず、ここで示した例のように、そもそも一軸圧縮試験の適用限界を超えるような深部のデータを含む場合には、再圧縮三軸試験の優位性が顕著に現れる。

図-12(a), (b)には95%信頼水準に対応して設定される特性値も示してある。提案方法と95%信頼水準の両設定値を比較すると、再圧縮三軸試験と一軸圧縮試験のどちらの場合でもほとんど設定法の違いによる差は見られない。このことは、提案方法が、一般化された設計コードであるEurocode7やJGS4001と実務的にも十分な精度で整合したものであることを示唆している。

## 7. 適用範囲

第2章において、提案方法自体は、様々な地盤に対して広く活用できるものであると述べた。しかし、地盤定数の性質や調査・試験法によっては、ばらつき等を考える必要がないことも想定される。どのような場合に提案方

法を適用し、どのような場合に提案方法を適用する必要が無いのか、本章では、その適用範囲についてまとめる。

地盤定数の中でも土粒子密度 $\rho_s$ などは、それ自体が直接的に設計で用いられることはほとんどなく、他の地盤定数の試験結果から導出値を算出する際に用いられる。このような場合、補正された土粒子密度を用いて得られた地盤定数に対して、改めて補正を施すと、部分的に二重の補正が施されることになり、過剰な補正となる恐れがある。このため、例えば間隙比 $e$ は、土の湿潤密度 $\rho_t$ 、含水比 $w$ 、土粒子密度 $\rho_s$ から算出されることから、間隙比 $e$ に対してのみ補正を施し、算出に用いられる他の地盤定数（ $\rho_t$ 、 $w$ 、 $\rho_s$ ）に対しては補正を行う必要はない。

土質試験により得られた導出値とサウンディングにより得られた換算値の両者が存在している場合、土質試験結果に対しては補正を施すが、サウンディング調査結果からの換算値に対しては補正の必要はない。これは、標準貫入試験の $N$ 値をせん断抵抗角 $\phi$ に換算する場合には、ばらつきが考慮された経験式が使われていること、静的コーン貫入試験の先端抵抗 $q_t$ から非排水せん断強さ $c_u$ を算出する際には、別途実施された室内せん断試験の特性値を基に、当該地盤に対して適切なコーン係数 $N_{kt}$ をキャリブレーションして設定しておくことが前提であることに基づいている。

その他、原位置での実験的な調査・試験であって、地盤の複合的な特性を総合的に評価している試験結果の場合なども補正の必要はない。

地盤定数の特性値を設定する際の導出値に対する補正の必要性について、上述の観点に基づいて整理したものを表-4にまとめる。なお、補正の必要がある地盤定数であっても、3m程度以下の薄層の場合など、やむを得ない事情により取得可能なデータ個数に限りがある場合には、統計的処理に適さないことから、本手法を適用する必要はない。地層断面が複雑な場合には、構造物の重要度や規模、地盤調査の頻度やデータ個数等に応じて、適用すべきかどうかの判断が必要になる。

ここでは、サウンディング調査結果から得られた計測値に対する取扱いは、本手法による必要は無いとした。

これは、サウンディング調査結果は、複雑な原地盤の諸特性・諸条件を原位置で総合的に評価した結果得られた指標であることに加え、導出値に換算する際に、経験的に特性値が得られるように換算式や相関関係が設定されていることが前提であるからである。しかしながら、サンプリングと室内土質試験によって地盤定数を評価するよりも、サウンディング調査（特に静的コーン貫入試験）を多用する傾向が強い欧米諸国などでは、深度方向に細

かいピッチで計測・換算された導出値に対してばらつきを考慮して特性値を設定する傾向にある。将来的には、諸外国での状況との整合も視野に入れて、サウンディング調査結果に対しても信頼性を議論しなければならない可能性があることを記しておく。

## 8. まとめ

本論文では、信頼性設計に対応した筆者らの提案による新しい地盤定数設定法を概説し、設定される特性値について、一般化された設計コードであるEurocode7やJGS4001により設定される特性値と比較した。また、具体例を通じて、提案方法の適用性を考察した。得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 提案方法は、導出値の平均値あるいは回帰式によってモデル化して深度分布を推定し、これに変動係数（ $COV>0.1$ の場合）やデータの数量（ $n<10$ の場合）に応じた補正係数を乗じて特性値を設定する、実用的な地盤定数設定法である。同設定法は2007年に制定された新しい港湾基準に採用された。
- 2) 変動係数に応じた補正係数は、設計上危険側に寄与するか、安全側に寄与するかに応じて、累積確率密度が約30%あるいは約70%に相当するフラクタイル値となるように設定するが、データ数10個、変動係数0.1のときに信頼水準95%の信頼区間の上下限値を特性値に設定することと対応している。
- 3) 提案方法は、本格的な統計処理を省略した方法であるが、データ数10個、変動係数0.1のときには、信頼水準95%の信頼区間の上下限値を特性値と設定することと対応するなど、Eurocode7やJGS4001とも整合する工夫がなされている。
- 4) 提案方法により設定される特性値を95%信頼水準の上下限値に相当する値と比較すると、データ数が10個以上の場合にはやや安全側、データ数が10個未満の場合にはやや危険側に設定される。特にデータ数が少なく、95%信頼水準の限界値に相当する値が非現実的な安全側の値にある場合でも、提案方法で設定される特性値は現実的な程度に安全側の値に設定される。
- 5) Eurocode7やJGS4001では、データ数が十分にあると、データにばらつきがあっても、信頼区間が狭くなり、平均値と特性値が一致する傾向がある。しかし、提案方法では、たとえデータ数が多くても、ばらつきの程度が特性値に反映されるため、ばらつきが小さなデータを得る努力が設計で実を結ぶような設計体

- 系を実現できる。
- 6) 変動係数を小さくすることを目的に据えることにより、データの適切な解釈と適切な深度分布のモデル化が導かれる（技術者の能力向上支援）とともに、再圧縮三軸試験のように、ばらつきが小さくなる試験法の導入（試験技術の開発）が進むものと期待できる。
- 7) データにばらつきがあったり、データの個数が不足したりしているときに、従来は技術者の判断で安全側に定数を設定していた。提案方法では、このような技術者の判断を変動係数に応じた補正というかたちで体系化して置き換えている。十分にばらつきの小さいデータが十分な数だけ得られていれば、特性値は導出値とほぼ一致するので、従来の設計法で用いていた地盤定数と本質的に同じ値が設定される。
- 8) 圧密に関する地盤定数とせん断に関する地盤定数は互いに関連し合っており、圧密降伏応力、非排水せん断強さ、強度増加率の関係が整合するように設定する必要がある。圧密降伏応力と非排水せん断強さから強度増加率の特性値を設定する際には、それぞれの導出値と導出値から導出値を求めて提案方法により特性値を求める場合と、それぞれの特性値と特性値から算出される値を特性値とする場合の2通りの考え方がある。圧密とせん断とを関連づけていることから、設計では後者の考え方のほうが合理的である。
- 9) 提案方法は、地盤定数全般に広く適用できる。しかし、地盤定数の中には、他の地盤定数のデータ整理に用いられても、それ自体が直接的に設計で用いられることがないものもあり、その地盤定数の使われ方によっては提案方法を適用する必要が無い場合もある。

## 参考文献

- Berre, T. and Bjerrum, L. (1973): Shear strength of normally consolidated clays, *Proceedings of the 8th ICSMFE*, Moscow, pp.39-49.
- EN 1990: 2002: Eurocode 0, Basis of structural design.
- EN 1997-1: 2004: Eurocode 7, Geotechnical design –Part 1: General rules.
- Mesri, G. (1975): New design procedure for stability of soft clays, Discussion, *ASCE*, 101(GT4), pp.409-412.
- Mitachi, T. and Kitago, S. (1976): Change in undrained shear strength characteristics of saturated remolded clay due to swelling, *Soils and Foundations*, Vol.16, No.1, pp.45-58.
- Nakase, A. (1967): The  $\phi_u=0$  analysis of stability and unconfined compression strength, *Soils and Foundations*, Vol.7, No.2, pp.33-45.
- Orr, T.L.L. (2006): Development and implementation of Eurocode 7, *Proceedings of the International Symposium on New Generation Design Codes for Geotechnical Engineering Practice – Taipei 2006*, CD-ROM, pp.1-18.
- Ovesen, N.K. (1995): Eurocode 7 for geotechnical design, *Proceedings Bengt B. Broms Symposium on Geotechnical Engineering*, Singapore, pp.333-360.
- Schneider, H.R. (1997): Definition and determination of characteristic soil properties, *Proceedings 12th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Hamburg, Vol.4, pp.2271-2274.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996): *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Third Edition, Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., pp.161-173.
- Watabe, Y. and Tsuchida, T. (2001a): Influence of stress release on sample quality of Pleistocene clay collected from large depth in Osaka Bay, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.4, pp.17-24.
- Watabe, Y. and Tsuchida, T. (2001b): Comparative study on undrained shear strength of Osaka Bay Pleistocene clay determined by several kinds of laboratory test, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.5, pp.47-59.
- Watabe, Y., Tsuchida, T. and Adachi, K. (2002): Undrained shear strength of Pleistocene clay in Osaka Bay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128, No.3, pp.216-226.
- Watabe, Y., Tanaka, M., Tanaka, H. and Tsuchida, T. (2003a):  $K_0$ -consolidation in a triaxial cell and evaluation of in-situ  $K_0$  for marine clays with various characteristics, *Soils and Foundations*, Vol.43, No.1, pp.1-20.
- Watabe, Y., Tanaka, H., Tsuchida, T. and Tanaka, M. (2003b): Normalization of stress-strain relationship for aged and cemented natural clay, *Proceedings of the International Symposium on the "Deformation Characteristics of Geomaterials", IS-Lyon03*, pp.535-544.
- 石井一郎 (1985) : 土質データベースの開発について, 港湾技研資料, No.515.
- 地盤工学会 (2000) : 土質試験の方法と解説, pp.496-497.
- 地盤工学会基準JGS4001-2004: 「性能設計概念に基づいた基礎構造物に関する設計原則」.
- 鈴木 誠 (2002) : 地盤設計における特性値に関する考察, 第37回地盤工学研究発表会講演集, pp.5-6.
- 田中洋行 (2003) :  $N$ 値に代わる原位置調査, 基礎工, Vol.31, No.2,

pp.40-43.

土田 孝, 水上純一, 及川 研, 森 好生 (1989) : 一軸圧縮試験と三軸試験を併用した新しい粘性土地盤の強度決定法, 港湾技術研究所報告, Vol.28, No.3, pp.81-145.  
日本港湾協会 (2007) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説.

福井次郎, 白戸真大, 松井謙二, 岡本真次 (2002) : 三軸圧縮試験による砂の内部摩擦角と標準貫入試験 $N$ 値との関係, 土木研究所資料, No.3849, 52p.

渡部要一 (2004) : 信頼性設計の導入と土の安定性について, 平成16年度講演会講演概要, 港湾空港技術振興会, pp.59-72.

港湾空港技術研究所報告 第48巻第2号

2009・6

編集兼発行人 独立行政法人 港湾空港技術研究所  
発行所 独立行政法人 港湾空港技術研究所

横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL.046(844)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

Copyright© (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

## CONTENTS

Development of Life Cycle Management System for Open-type Wharf .....	Ema KATO, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA .....3
Development of the Three-dimensional Numerical Model of Sediment Transports and Topographic Changes of Intertidal Flats due to Sands and Cohesive Sediments Generated by Tidal Currents and Wave-induced Currents and an Application to the Field. .....	Ken-ichi UZAKI, Yoshiaki KURIYAMA .....37
Evaluation of Strain Rate Effect with Isotache Model on Long-Term Consolidation of the Clay Deposits at Kansai International Airport .....	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Yoshiyuki MORIKAWA .....63
Thickness Effects on Long-Term Consolidation Behavior of Osaka Bay Clays .....	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Tsuyoshi EMURA .....83
A Study of the Geotechnical Investigation Results at the Planning Site of the D-Runway of the Tokyo International Airport .....	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Takatoshi NOGUCHI, Masafumi MIYATA .....103
New Determination Method of Soil Parameters for Performance Based Design .....	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA, Yoshiaki KIKUCHI .....123
10-Year Follow-up Study on Long-Term Properties of Air-Foam Treated Lightweight Soil Placed in Coastal Areas .....	Yoichi WATABE, Masanori TANAKA, Shinji SASSA .....145
Performance of corrosion prevention by painting methods in marine atmosphere and performance evaluation methods for soundness of paint layers .....	Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Toru YAMAJI .....161
Generation Method of Directional Random Waves with Arbitrary Spectrum .....	Katsuya HIRAYAMA, Ichiro MIYAZATO .....199