

性能設計概念に基づいた実用的土質定数設定法

渡部 要一¹・植田 智幸²・三枝 弘幸³・田中 政典⁴・菊池 喜昭⁵

¹正会員 (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)
E-mail: watabe@ipc.pari.go.jp

²正会員 佐伯建設工業 (株) 建設本部 技術部 (〒101-8632 東京都千代田区東神田一丁目7-8)
E-mail: ueda-t@saeki-const.co.jp

³正会員 東亜建設工業 (株) 技術研究開発センター (〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町1-3)
E-mail: h_saegusa@toa-const.co.jp

⁴正会員 (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)
E-mail: tanakam@pari.go.jp

⁵正会員 (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)
E-mail: kikuchi@pari.go.jp

各種施設の設計基準に、性能規定による信頼性設計が本格的に導入されつつある。本論文では、このような動向に対応した実用的な土質定数設定法を提案している。性能照査に用いる土質定数は、地盤工学会基準JGS4001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。提案する方法は、平均値あるいは近似値に対して変動係数に応じた補正を施すだけの単純なものであるが、JGS4001と整合したかたちで、試験法に起因したばらつきやデータ解釈の信頼性が特性値に反映される。

Key Words : soil parameters, characteristic value, performance based design, design code, variability

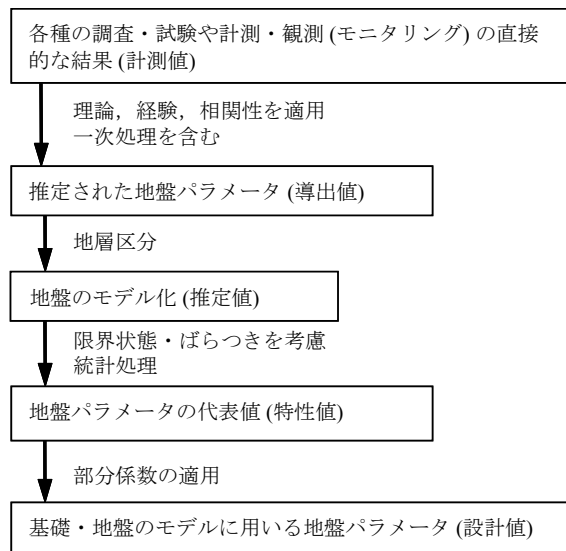
1. はじめに

各種施設の設計基準に、性能規定による信頼性設計が本格的に導入されつつある。本論文では、このような動向に対応した実用的な土質定数設定法を提案する。性能設計を実現するための設計コードとして、Eurocode⁷⁾やJGS4001²⁾が挙げられ、性能照査に用いる土質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³⁾が示されている。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、これを実現するために、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するとともに、Eurocode⁷⁾やJGS4001と整合した、合理的で、かつ、簡略化された特性値の設定方法を提案する。

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^{4,5)}。しかし、個々の設計で、これらのばらつきの程度をひとつひとつ考慮することは難しい。そこで、本論文で提案する方法では、試験法の信頼度に応じた補正を最初から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が、後述のように、特性値は導出値の平均値であることを原則とするJGS4001の概念とは、データ数が多い場合に若干異なっている。

神戸港の地盤調査で得られた一軸圧縮試験結果や段階

図-1 地盤パラメータの設計値を設定するフロー²⁾

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. 土質定数設定の原則

我が国の場合、性能照査に用いる土質定数の設計値は、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若干修正を加えてある。

調査や試験によって計測された値が「計測値」である。計測値と地盤パラメータ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) は地盤パラメータを直接計測しているのだからわかりやすい。しかしながら、実際にこれに該当するパラメータは意外に少ない。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 ρ_w 、土粒子密度 ρ_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、 $e-\log p$ 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 ϕ 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、地盤パラメータ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モデルに対応して変化させる。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パラメータとするために、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、地盤パラメータのばらつきや当該パラメータの照査結果への感度を基に、施設ごとに設定される値が設計基準等に示される。このようにして求めた地盤パラメータを「設計値」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物材料であれば、その物性を表すパラメータ x 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、 $x_k = \mu(x) - 1.645 \sigma(x)$ によって定義される (例えば欧州規格⁶⁾)。ここで、 $\mu(x)$ は x の平均値、 $\sigma(x)$ は x の標準偏差である。このような特性値の設定は、構造物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%信頼水準の限界値が特性値として推薦された⁷⁾。JGS4001でも、Eurocode7とほぼ同様であるが、当該地盤パラメータ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。なお、信頼水準95%を特に推薦してはいない。

95%信頼水準の下限値を簡便に求めるため、Ovesen⁸⁾は $x_k = \mu(x) - 1.645 \sigma(x) / \sqrt{n}$ を提案した。ここで、 n はデータ数である。Schneider⁹⁾は $n=11$ のときの値を採用し、さらに単純化した式として $x_k = \mu(x) - 0.5 \sigma(x)$ 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提案する。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パラメータ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、地盤パラメータには常に同程度の信頼度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。

本論文で取り扱う特性値は、安定性照査のための値に限定したものではなく、沈下予測等にも用いる土質定数一般を取り扱うことを想定している。また、提案方法は、港湾で良く見られるような、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、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と考えている。

3. 補正係数を導入した特性値推定法の提案

(1) 地盤のモデル化

信頼性設計に供する土質パラメータ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、土質パラメータ(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、深さ方向に一樣($a^*=c_1$)、あるいは深さ方向に直線的に増加($a^*=c_1z+c_2$)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 は定数である。推定値 a^* は、土質パラメータ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、提案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、土質パラメータによってはばらつきを対数軸上で考えるほうが合理的なものもある。このようなパラメータを扱う際には、ばらつきを対数軸上で扱うので、対数軸上で

深度分布(深度については算術軸で考える)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、対数軸上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軸に戻すと、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。

(2) 特性値の考え方

提案方法によって、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ことは広く知られているが、個々の設計で、これらのばらつきの程度をひとつひとつ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、個々のパラメータの求め方にいつも遡って考えなければならない、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、本論文で提案する方法では、試験法の信頼度に応じた補正を最初から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)が自動的に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。

信頼性設計では、過去の経験を基にした設計パラメータ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 γ 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) 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パラメータを 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) であることに基づいた大前提である。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¹⁰⁾。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。対象としているパラメータ 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。

表-1 補正係数の値

変動係数 COV	補正係数 b_1	
	性能照査上耐力側の パラメータ (設計で安全側に寄与する定数)	性能照査上作用側の パラメータ (設計で危険側に寄与する定数)
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	結果の解釈やモデル化の再検討あるいは再調査	

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値を特性値とする。本提案法によれば、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%がフラクティル値30%あるいは70%程度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。本提案法では、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。

先に述べたように、土質パラメータの中には、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軸上で算出されていることが多いので、対数軸上で正規分布 (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、パラメータ 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、対数軸上での補正係数 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、補正係数は算術軸上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 ϕ については、 ϕ 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¹¹⁾等に示されている式等を用いて N 値からせん断抵抗角 ϕ を推定する場合など、設計に用いるべき値が経験を基にチューニングされて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^{12,13)}。

上述については、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、当該土質パラメータ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。本論文ではデータ数 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ータ数 n については設計基準類において個別に定めることが可能である。

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見なせる量については、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。

(4) 圧密定数とせん断定数の関係

粘土地盤の载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 ϕ_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¹⁴⁾。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、载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パラメータであるが、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

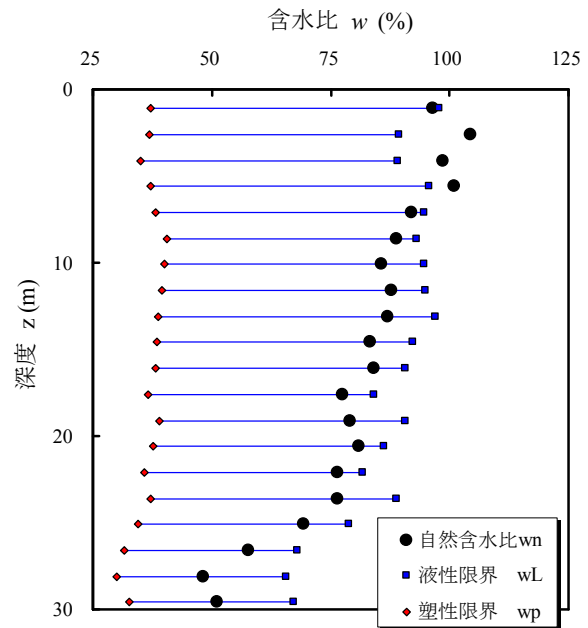


図-2 コンシステンシー特性の深度分布

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、圧密に関するパラメータはせん断に関するパラメータとも密接に関連している。すなわち、圧密に関する土質定数とせん断に関する土質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、各パラメータ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 σ'_{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、 σ'_v は鉛直有効応力である。 σ'_v が減少して力学的な過圧密状態になると、 c_u / σ'_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¹⁵⁾。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¹⁶⁾、あるいは1.0程度¹⁷⁾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を対象としているので、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パラメータを用いて、実用的な強度増加率 m を設定することに意

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 ²)	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 ²)	変動 係数 COV	補正 係数 $b_1 \times b_2$	特性値 c_{uk} (kN/m ²)	推定値 c_u^* (kN/m ²)	変動 係数 COV	補正 係数 $b_1 \times b_2$	特性値 c_{uk} (kN/m ²)	推定値 c_u^* (kN/m ²)	変動 係数 COV	補正 係数 $b_1 \times b_2$	特性値 c_{uk} (kN/m ²)
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	0.205	0.90 × 1.00	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	0.145	0.95 × 0.94	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

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土質パラメータを推定し、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. 土質定数設定への適用

(1) 地盤調査結果

本章では、前章で提案した土質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¹⁸⁾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

て取り上げることにした。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-2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。

(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)に対して提案する特性値設定法を適用し、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、全層にわたって一様な深度分

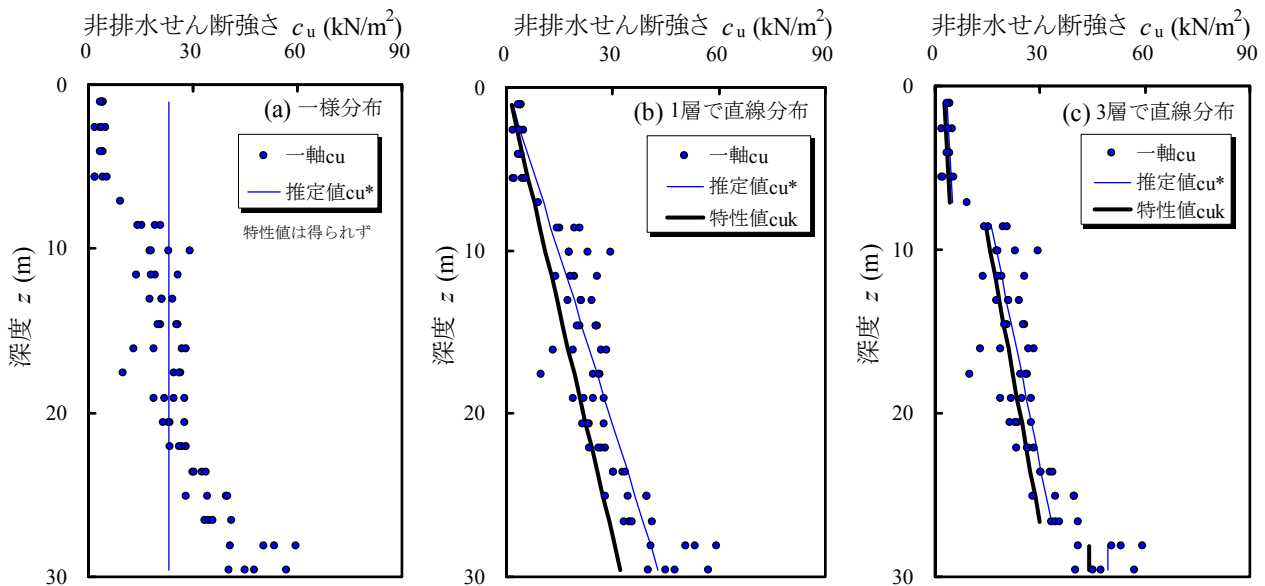


図-3 一軸圧縮試験結果の導出値 c_u ，モデル化した推定値 c_u^* ，特性値 c_{uk} ：(a) 深さ方向に一樣に分布するとしてモデル化，(b) 1層で直線分布としてモデル化，(c) 3層で直線分布としてモデル化

布を考えた場合，平均値 $c_u=23.0$ (kN/m²)で一定であるとして深度分布をモデル化できる (図-3(a)の推定値 c_u^*)。このとき，変動係数 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，「一樣な深度分布」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。

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/m²) でモデル化できる (図-3(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 $b_1 \times b_2 \times c_u^*=0.75 c_u^*$ によって得られる。ここ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%も小さくなっており，特性値は導出値の平均値としている地盤工学会基準 JGS4001と著しく異なっている。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-2のコンシステンシー特性の分布も参考にして，深度

分布を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/m²) ($0 < z < 7.5$ mの回帰直線)， $c_u^*=0.95z+8.1$ (kN/m²) ($7.5 < z < 27.5$ mの回帰直線)， $c_u^*=49.3$ (kN/m²) ($z > 27.5$ 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-3(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。

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¹⁹⁾を与える要因が説明できるものを除外した。

図-3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，導出値をしっかりと検討することによって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るともいえる。

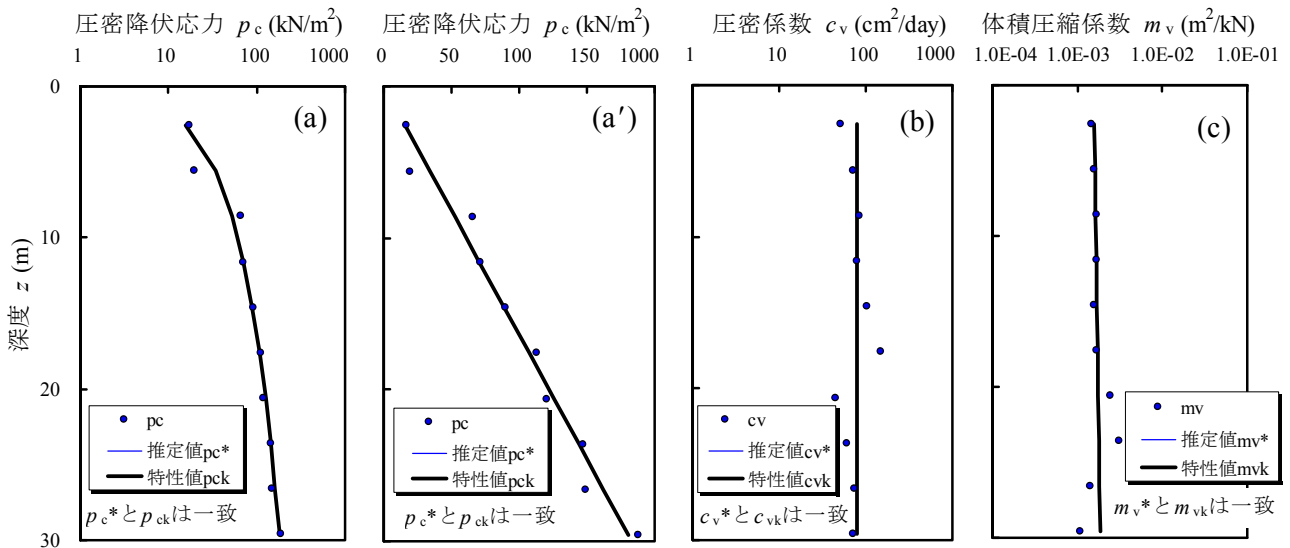


図-4 圧密試験結果の導出値，モデル化した推定値，特性値：(a)圧密降伏応力 p_c ，(a')圧密降伏応力 p_c ，(b)正規圧密領域での圧密係数 c_v ，(c)圧密圧力100kPa時の体積圧縮係数 m_v

(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，圧密パラメータ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 は圧密圧力 $p = 100\text{kPa}$ での値とした．まず，算術軸でこれらのパラメータを表したときに，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')のように算術軸上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，対数軸上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，算術軸上での分布モデルと対数軸上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．これらの圧密パラメータは，対数グラフ上に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-4(a)，(b)，(c)のように対数軸上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．

過圧密比OCRの深度分布を図-5(a)に示す．一般に，有効土被り圧 σ'_{v0} は直接計測することができないので，単位体積重量 $\rho_{st}g$ (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 σ'_{v0} を用いて

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 ²)	推定値 p_c^* (kN/m ²)	$\log p_c$	$\log p_c^*$	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 ²)
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 ² /day)	推定値 c_v^* (cm ² /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 ² /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 ² /kN)	推定値 m_v^* (m ² /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 ² /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

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

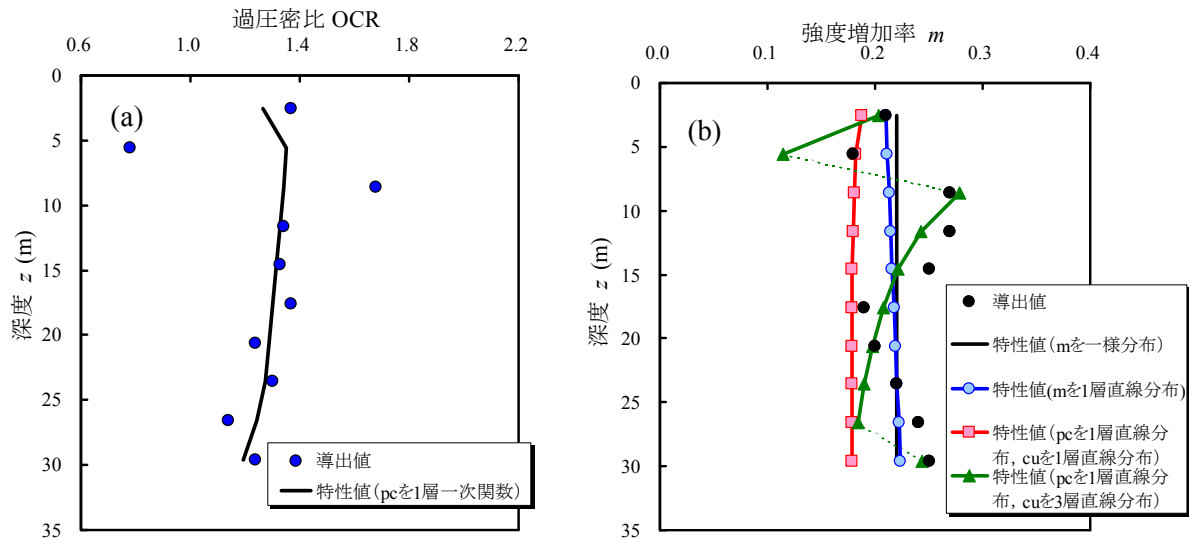


図-5 (a)過圧密比 $OCR (=p_c/\sigma'_{v0})$ と(b)強度増加率 $m (=c_u/p_c)$ の深度分布の導出値と特性値(黒の丸印は導出値. 黒の実線は導出値が深さ方向に一樣に分布するとしてモデル化した特性値. 青の丸印は導出値を1層直線分布としてモデル化した特性値. 赤の四角印は p_c を1層直線分布とした特性値と c_u を1層直線分布とした特性値から算出した特性値. 緑の三角印は p_c を1層直線分布とした特性値と c_u を3層直線分布とした特性値から算出した特性値.)

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。この場合には、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-5(a)に示した実線は、後者の特性値を表している。

(4) 強度増加率の設定例

強度増加率 m の深度分布を図-5(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(黒の実線)と、直線分布と想定した場合(青の丸印)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(赤の四角印)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(緑の三角印)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(黒の実線と青の丸印)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(赤の四角印と緑の三角印)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程度である^{20,21)}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こと、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パラメータの特性値を設定し、圧密試験からは圧密に関するパラメータ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導出値から特性値を設定することは、これを単独で使う場合を除き、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-3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-4(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パラメータの特性値とせん断に関するパラメータ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-5(b)の分布(緑の三角印)は、導出値(黒の丸印)の分布傾向を捉えている。

5. 三軸試験の有効な活用方法

(1) 再圧縮三軸試験

図-6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}

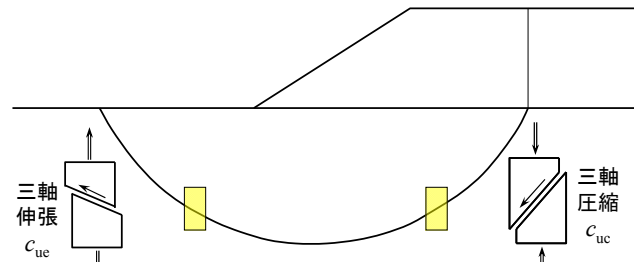
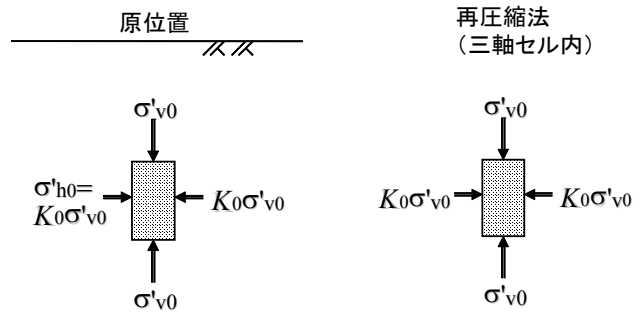


図-6 粘土地盤上に築造された盛土の安定問題と強度異方性



K_0 : 静止土圧係数

三軸圧縮 & 伸張

図-7 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

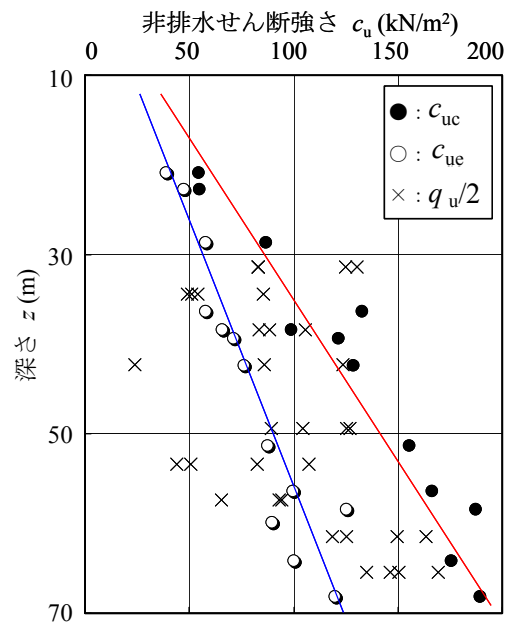


図-8 再圧縮三軸試験および一軸圧縮試験から得られた大阪湾海底粘土地盤のせん断強さ分布

は c_{uc} よりも30%程度小さくなることが多いようである²⁾。

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

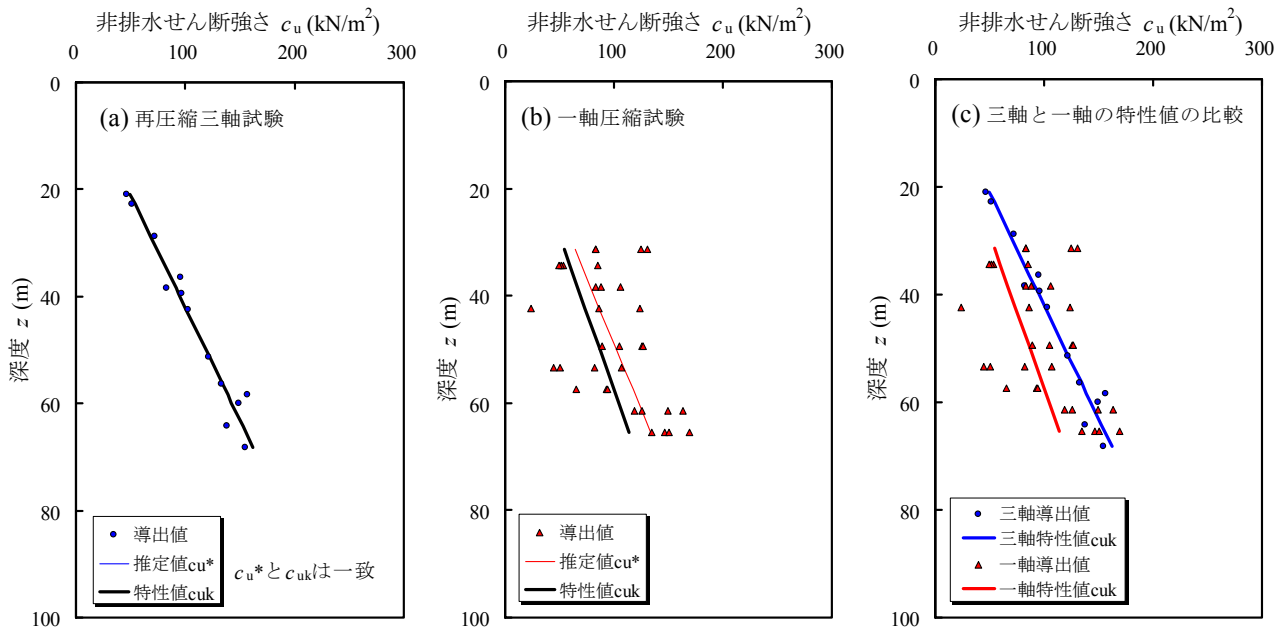


図-9 大阪湾粘土の非排水せん断強さの深度分布：(a)再圧縮三軸試験結果，(b)一軸圧縮試験結果，(c)三軸と一軸の特性値の比較

再圧縮法と呼ばれている方法²³⁾である。この方法では、図-7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。

地盤中の要素は鉛直に有効土被り圧 σ'_{v0} 、水平に静止土圧 σ'_{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、サクシオ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 σ'_{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²⁴⁾。日本の粘土では、正規圧密状態での K_0 は0.45～0.55になることが多い。

図-8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} の深度分布を示したものである⁹⁾。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 (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⁴⁾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¹⁸⁾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⁹⁾を引用し、提案する土質パラメータ設定法の適用を試みる。

(2) 一軸圧縮試験と再圧縮三軸試験の比較

図-9(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-8で示した各深度における圧縮せん断強さ c_u と伸張せん断強さ c_{uc} の平均値を導出値としたものである。なお、図-8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 $c_u^*=2.4z$ (kN/m²)が得られる。変動係数 COV は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るといえる。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-9(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-8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 $c_u^*=2.0z$ (kN/m²)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-9(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になってしまう。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。

6. 結論

本論文で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 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、実用的な土質定数設定法を提案した。
- 2) 提案方法は、基礎構造物の信頼性設計を実現するための設計コードであるEurocode7やJGS4001で要求される地盤定数設定法と整合するものである。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%に相当する値を設定するが、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とすることと対応している。
- 3) 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。

- 4) 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。提案した土質定数設定方法では、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。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土質定数と本質的に同じ値が設定される。
- 5) 圧密に関する土質定数とせん断に関する土質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した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二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方が合理的である。
- 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。

参考文献

- 1) EN 1997-1: 2004: Eurocode 7, Geotechnical design –Par 1: General rules, 2004.
- 2) 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」, 2004.
- 3) 鈴木 誠: 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, 2002.
- 4) 土田 孝, 水上純一, 及川 研, 森 好生: 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, 1989.
- 5) Watabe, Y. and Tsuchida, T.: 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, 2001.
- 6) EN 1990: 2002: Eurocode 0, Basis of structural design, 2002.
- 7) Orr, T.L.L.: 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, 2006.
- 8) Ovesen, N.K.: Eurocode 7 for geotechnical design, *Proceedings Bengt B. Broms Symposium on Geotechnical Engineering*, Singapore, pp.333–360, 1995.
- 9) Schneider, H.R.: Definition and determination of characteristic soil properties, *Proceedings 12th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Hamburg, Vol.4, pp.2271–2274, 1997.
- 10) 渡部要一: 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, 2004.
- 11) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 1999.
- 12) 田中洋行: N 値に代わる原位置調査, 基礎工, Vol.31, No.2, pp.40–43, 2003.
- 13) 福井次郎, 白戸真大, 松井謙二, 岡本真次: 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., 2002.
- 14) Nakase, A.: The $\phi_u=0$ analysis of stability and unconfined compression strength, *Soils and Foundations*, Vol.7, No.2, pp.33–45, 1967.
- 15) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, pp.496–497, 2000.
- 16) Mitachi, T. and Kitago, S.: Change in undrained shear strength characteristics of saturated remolded clay due to swelling, *Soils and Foundations*, Vol.16, No.1, pp.45–58, 1976.
- 17) Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G.: Soil Mechanics in Engineering Practice, Third Edition, Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., pp.161–173, 1996.
- 18) 石井一郎: 土質データベースの開発について, 港湾技研資料, No.515, 1985.
- 19) Watabe, Y. and Tsuchida, T.: 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, 2001.
- 20) Mesri, G.: New design procedure for stability of soft clays, Discussion, *ASCE*, 101(GT4), pp.409–412, 1975.
- 21) Watabe, Y., Tanaka, H., Tsuchida, T. and Tanaka, M.: 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, 2003.
- 22) Watabe, Y., Tsuchida, T. and Adachi, K.: Undrained shear strength of Pleistocene clay in Osaka Bay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128, No.3, pp.216–226, 2002.
- 23) Berre, T. and Bjerrum, L.: Shear strength of normally consolidated clays, *Proceedings of the 8th ICSMFE*, Moscow, pp.39–49, 1973.
- 24) Watabe, Y., Tanaka, M., Tanaka, H. and Tsuchida, T.: 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, 2003.

(2006. 7. 14 受付)

PRACTICAL DETERMINATION METHOD OF SOIL PARAMETERS FOR PERFORMANCE BASED DESIGN

Yoichi WATABE, Tomoyuki UEDA, Hiroyuki SAEGUSA,
Masanori TANAKA and Yoshiaki KIKUCHI

This paper proposes a new practical method to evaluate soil parameters for performance based design. The characteristic value of soil parameter is the expected value in principle, but it is not the mere average. We should take into account of errors statistically estimated, errors in derived values associated with testing methods, inhomogeneity of the soil itself, and limited number of test data. The new method uses a correction factor based on the variation coefficient derived from the soil data. In this method, the characteristic value automatically reflects the variability of derived values associated with the testing method and the reliability of the data interpretation.