

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 )

# 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\*\*\*\*

## 要 旨

東京国際空港では、逼迫する航空需要に応えるため、沖合に4本目の滑走路(D滑走路)を建設する再拡張事業が進められている。建設予定地の事前海底地盤調査において、粘土層については乱さない試料が採取され各種室内試験により地盤定数の評価がなされた。また、砂地盤については標準貫入試験による $N$ 値で地盤の状態が評価された。一連の試験結果を基に、地質学的な知見も踏まえて当該地区の地層構成が明らかになった。粘土地盤の各種地盤定数については、建設予定海域で得られた全試験結果を深度方向にプロットし、工学的な判断を加味した代表的な深度分布が設定された。本稿では、これらの地盤定数の設定方法について詳細に考察するとともに、新たに得られた知見として、工学的性質だけに着目して深度分布を評価した場合に見落としがちな局所の変化について、地質学的な情報と工学的な情報とをリンクすることよって的確に捉えられる部分があることを明らかにした。また、設定された深度分布と平均値との関係について、標準偏差や変動係数を基にその工学的位置づけを考察した。

キーワード：地層断面，東京湾，地盤定数，非排水せん断強さ，ばらつき

---

\* 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  
\*\*\* 関東地方整備局東京空港整備事務所東京国際空港D滑走路プロジェクト推進室設計監理課長  
\*\*\*\* 国土技術政策総合研究所港湾研究部港湾施設研究室主任研究官  
〒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

## **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\*\*\*\***

### **Synopsis**

In the Tokyo International Airport (Haneda Airport), the new offshore expansion project with the fourth runway (D-runway) is being conducted. Undisturbed clay samples retrieved from the planned construction site were examined in the laboratory to evaluate their geotechnical properties. At the sandy layers, the standard penetration test was conducted to evaluate  $N$ -value. From the results of the site investigation, the stratigraphic model at the site was clarified. For the clay layers, a representative depth-profile for each soil parameter was determined by engineering judgment. This paper describes the detail of this engineering judgment. Some local soil properties, which are tended to be overlooked from only an engineering point of view, can be appropriately captured by linking the geological and geotechnical information. In addition, the determined depth-profile was evaluated from a statistical point of view in association with the data variation represented by standard deviation and coefficient of variation.

**Key Words:** stratigraphy, Tokyo Bay, soil parameter, undrained shear strength, variation

---

\* 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

\*\*\* Kanto Regional Development Bureau

\*\*\*\* National Institute for Land, Infrastructure, Transport and Tourism  
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 .....	103
1. はじめに .....	107
2. 調査内容 .....	107
2.1 調査の流れ .....	107
2.2 調査内容 .....	107
3. 調査結果 .....	108
3.1 地質学的地層区分 .....	108
3.2 工学的地層区分 .....	112
3.3 地質学的地層区分と工学的地層区分の関連 .....	115
4. 地盤定数の深度分布設定 .....	117
5. まとめ .....	120
謝辞 .....	121
参考文献 .....	121



## 1. はじめに

東京国際空港（羽田空港）は、長さ3000mの2本の平行滑走路（A滑走路とC滑走路）と長さ2500mの1本の横風滑走路（B滑走路）、ならびに2つの旅客ターミナルにより運用されており、年間発着能力が28.5万回ある世界有数の空港である。しかしながら、航空需要の増大に早急に対応する必要性から、長さ2500mの4本目の新設滑走路（D滑走路）を建設して年間発着能力を40.7万回に増加させるとともに、国際線地区を整備し近距離国際線の充実を図る再拡張事業が進められている（図-1）。本論文では、D滑走路建設事業の事前地盤調査結果を研究対象とする。

東京国際空港再拡張事業の一つであるD滑走路の建設は、性能発注による設計・施工一括発注方式が採用された。事前の工法評価選定会議において、栈橋工法、埋立・栈橋組合せ工法、浮体工法の3つの工法が検討され、いずれの工法も致命的な問題点はなく、工費・工期とも大差ないとの結論が得られた。これを受けて発注に向けた準備を進め、建設予定海域において、2003年の夏に地盤調査が実施された。

本稿では、入札のために地盤条件を提示した資料（以下、土質調査参考資料）作成の基となった地盤調査結果を再考する。地盤定数の設定にあたっては、地質学的な層区分を参考にしながら、建設予定海域の海底地盤を対象に得られた全試験結果を深度方向にプロットし、各種地盤定数の代表的な深度分布が設定された。その際には、試験結果のばらつきなどを考慮し、関係者による工学的判断を加味しており、それがどのような工学的判断であったのかについても本稿でとりまとめる。また、設定さ

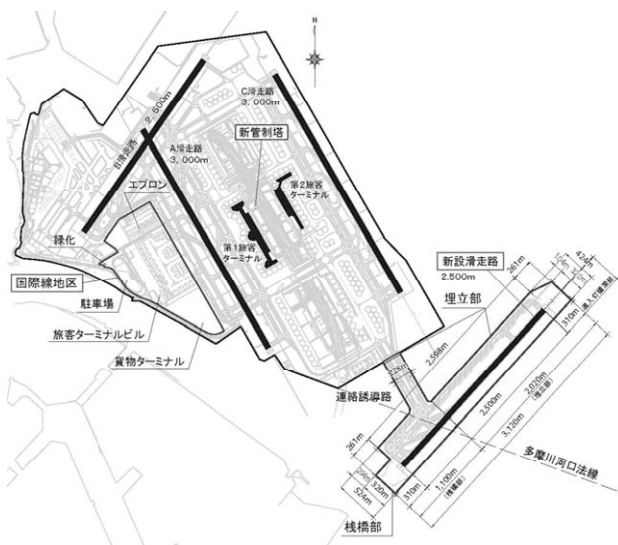


図-1 東京国際空港再拡張事業

れた地盤定数の深度分布について、平均値との関係を変動係数を用いて整理・表現した。これにより、工学的判断に基づいて設定された地盤定数の深度分布が、データのばらつきの中でどのように位置づけられるかを新たに検討した。

## 2. 調査内容

### 2.1 調査の流れ

上述の3つの工法の設計においては、必要とされる地盤定数の種類や調査間隔等が異なる。圧密沈下に関するパラメータなど栈橋や浮体では直接必要としないもの、支持層の深さなど埋立工法では直接必要としないものなど、調査で重点を置くべき項目は採用される工法に依存する。このため、土質調査参考資料作成にあたっては、いずれかの工法が設計をする上で有利になったり不利になったりしないような調査・試験項目の選定と調査間隔の設定になるよう配慮された。

砂層については標準貫入試験でN値を計測し、粘性土層についてはサンプリングが実施された。サンプリングされた乱さない試料については、試験室に搬入し、各種物理・力学試験が実施された。

調査・試験により得られた結果の整理として、N値の分布、ならびに物理・力学試験結果の分布がプロットされた。プロットされたデータの単なる平均をもって設計に使う代表的な分布とするのではなく、ばらつきのあるデータに対して、工学的な判断を加味して、やや安全側の設定がなされた。設定された地層構成断面と地盤定数は土質調査参考資料としてまとめられ、D滑走路の性能発注内容を具体化した要求水準書と合わせて提示された。

### 2.2 調査内容

D滑走路の北東端は東京港第一航路に近接するため、A.P.+17.1m以上の高さが要求される。水深が約20mある当該海域においては、埋立・栈橋組合せ工法の場合、埋立土による圧力増加が、関西国際空港二期事業の圧密圧力にも匹敵する600kN/m<sup>2</sup>以上に達することになる。

港湾地域における概略調査の間隔の目安が300～500mであること（日本港湾協会，1999）、ならびに、周辺地盤における既往ボーリングで得られた圧縮指数と液性限界を基にした水平方向の自己相関が0.7以上になったことを目安にして調査地点の間隔が検討された。その結果、ボーリング間隔を500mとして、図-2に示す調査位置が設定された。すなわち、滑走路部でA-1～A-14の14本、現空港からD滑走路にアクセスする誘導路の部分でB-1～B-3の3

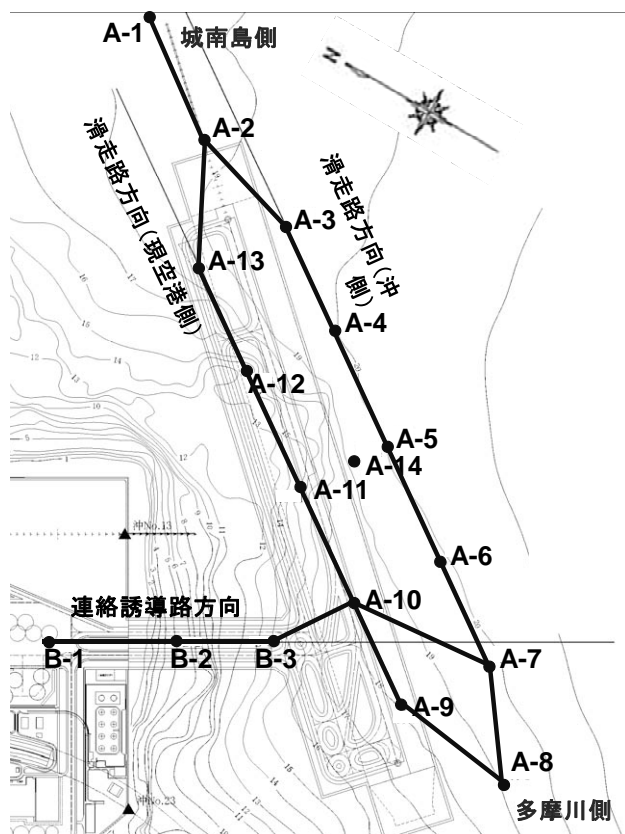


図-2 ボーリング調査位置図

本からなる計17本のボーリング調査が実施された。B-1は現空港内での陸上ボーリングであるが、他は櫓を設置しての海上ボーリングである。

ボーリングによる調査深度は海面から約100mで、一部は海面から約200mまで実施された。採取された粘土試料に対しては、液性限界・塑性限界試験、土粒子密度試験、粒度試験などの各種物理試験のほか、一軸圧縮試験、三軸非圧密非排水圧縮試験（三軸UU試験。拘束圧は有効土被り圧相当）、平均有効応力相当の等方圧で圧密して非排水圧縮する三軸CU試験（土田ら（1989）が提案した簡易CU試験）などの各種せん断試験、段階載荷による圧密試験などが行われた。この他に、繰返し非排水三軸試験なども行われたが、動的変形特性については本稿では取り扱わないことにする。

なお、図-2に示した建設予定海域での事前ボーリング調査位置と実際の空港建設位置にずれが見られるが、これは空港計画段階での事前ボーリング調査実施後、空港計画決定に向けた調整で飛行ルートが見直され、北東端近傍を中心に時計回りに7.5°回転した位置に空港建設位置が変更されたためである。

### 3. 調査結果

#### 3.1 地質学的地層区分

調査地点の間隔が広いこと、工学的情報だけでは局所的な地層変化に対応できないことが懸念された。そこで、地質学的な情報から層序を推定して工学的情報を補間することによってその精度向上が試みられた。

地層対比のために、鉍物分析、火山灰対比、年代測定、花粉やナンノプランクトンなどの微化石分析等による地質学的な分析が実施された。これらの結果を基に描かれた滑走路人工島の地層断面図を図-3に示す。同図には、地質情報に基づく層区分（黒の実線）に加え、各ボーリング孔で得られた砂質地盤のN値の深度分布も示してある。また、後述する工学的分類では①～⑤層に区分された（緑の実線）。図-2に示した3測線に対応して、(a)は当初予定されていた滑走路縦断方向の現空港側断面、(b)は当初予定されていた滑走路縦断方向の沖側断面、(c)は現空港とD滑走路人工島を結ぶ連絡誘導路縦断方向ならびに滑走路横断方向の断面を表している。

東京国際空港では従来、A.P.-35m付近まで堆積する軟弱層が沖積層に対応するものとしてA層、A.P.-35mよりも深い層が洪積層に対応するものとしてD層と区分し、工学的な観点から地層が分類・整理されてきた（田中ら、2002）。しかしながら、今回の調査結果の整理では、最新の地質学的な知見を反映した地層名が付けられている。すなわち、当該地盤は、覆砂(H)、有楽町層(Y)、七号地層(Na)、新期段丘堆積層(btg)、下総層群と呼ばれる東京層(To)と江戸川層(Ed)、そして更に下層の上総層群から構成されている（それぞれの層区分は図-3の黒の実線）。有楽町層と七号地層がいわゆる沖積層（最終氷期に形成された谷を埋める堆積物）に相当する。添字cは粘土層、sは砂層、gは礫層を表す。なお、従来用いられていたA層とD層と区分した地層名も括弧書きで付けられているが、従来のDc1をここではAc2とするなど、地層情報と整合させるために番号が従来のものとずれているので注意が必要である。

まず、図-3(a)について記述する。現空港に近いA-11とA-12には、厚さ5m前後の覆砂がある。これは、現空港護岸沖側周囲でかつて実施された浅場造成によるものである。Yuc（上部有楽町層粘土）とYlc（下部有楽町層粘土）との境界はほぼ水平であるが、Ylc下面は南西端でやや深くなっている。Naの大部分はNacとNasが互層になっているが、A-13ではNasが、A-2ではNacが著しく卓越している。NaはA-13で局所的に深く、A-11とA-8でもやや深い。北東側のA-2とA-1では、A.P.-60m付近にあるNaとToの間に



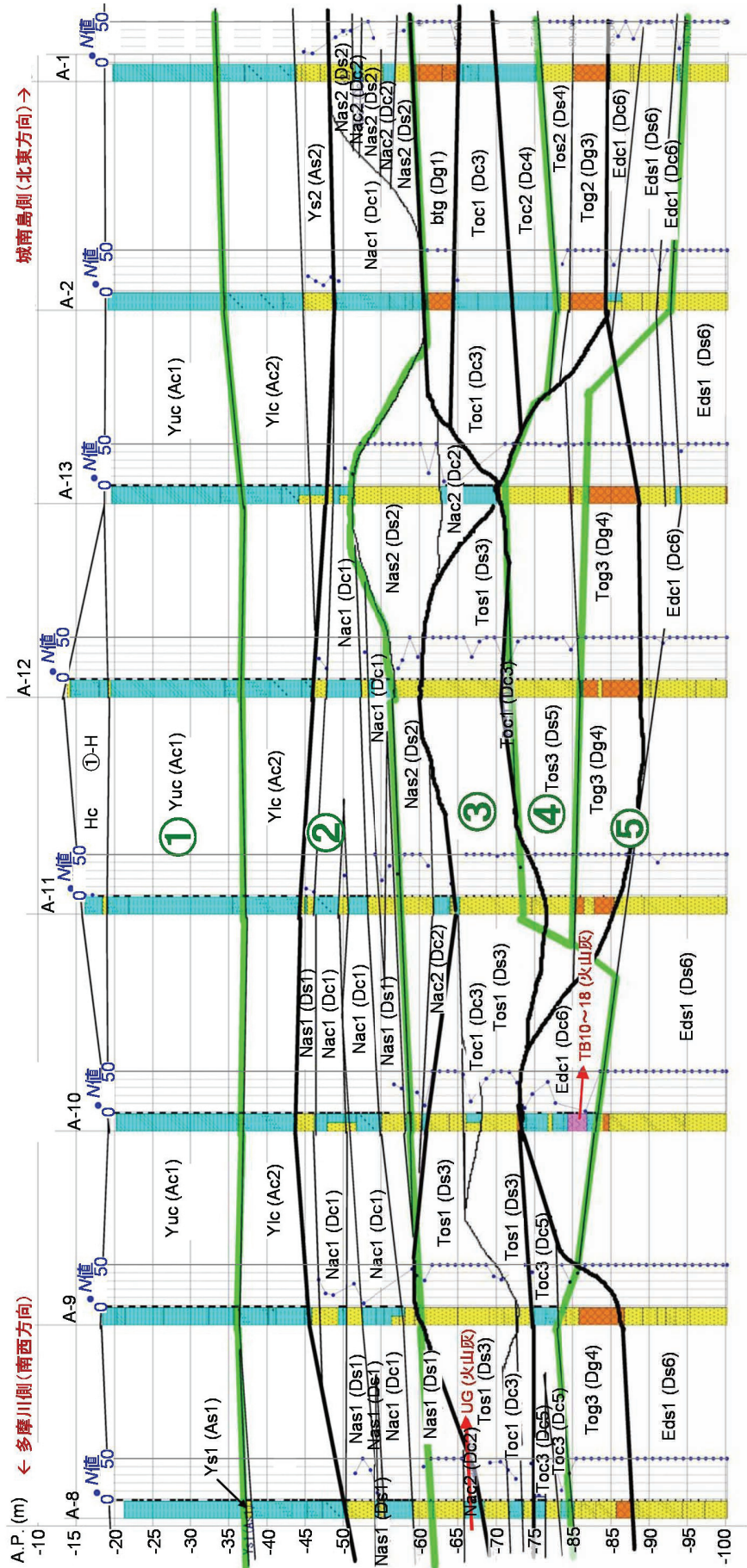


図-3(a) 地層断面図 (滑走路縦断面方向, 現空港側断面). 黒の実線は地質学的層区分で, 覆砂 (H), 上部有楽町層 (Yu), 下部有楽町層 (Yl), 七号地層 (Na), 新期段丘堆積層 (btg), 下総層群と呼ばれる東京層 (To) と江戸川層 (Ed) に区分され, 添字-cは粘土層, sは砂層, gは礫層を表す. 緑の実線は工学的層区分で①~⑤層に区分される.

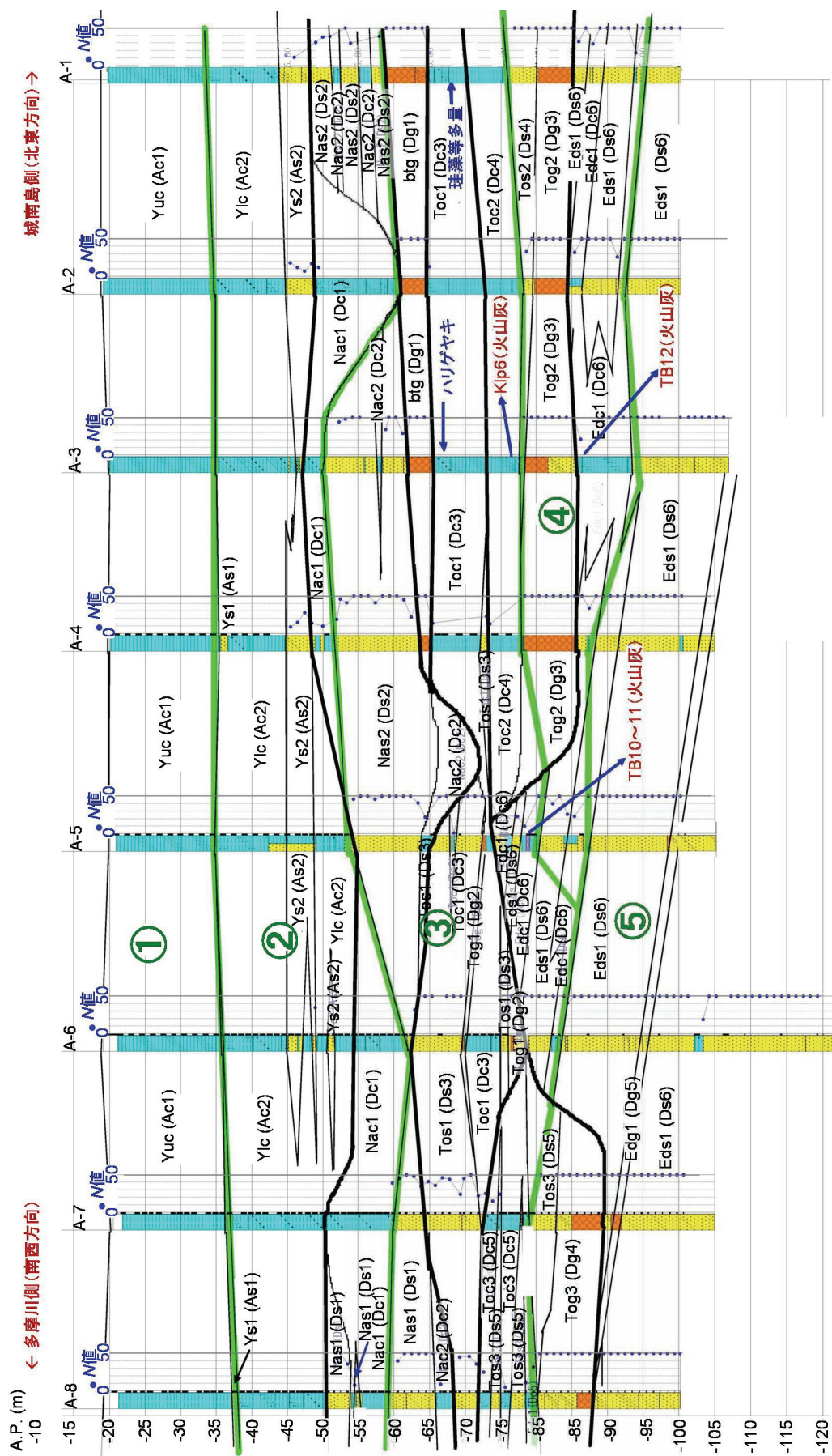


図-3(b) 地層断面図 (滑走路縦断方向、沖側断面)。黒の実線は地質学的層区分で、覆砂 (H)、下部有楽町層 (Yu)、上部有楽町層 (Yl)、七号地層 (Na)、新时期丘堆積層 (btg)、下総層群と呼ばれる東京層 (To) と江戸川層 (Ed) に区分され、添字cは粘土層、sは砂層、gは礫層を表す。緑の実線は工学的層区分で①～⑤層に区分される。

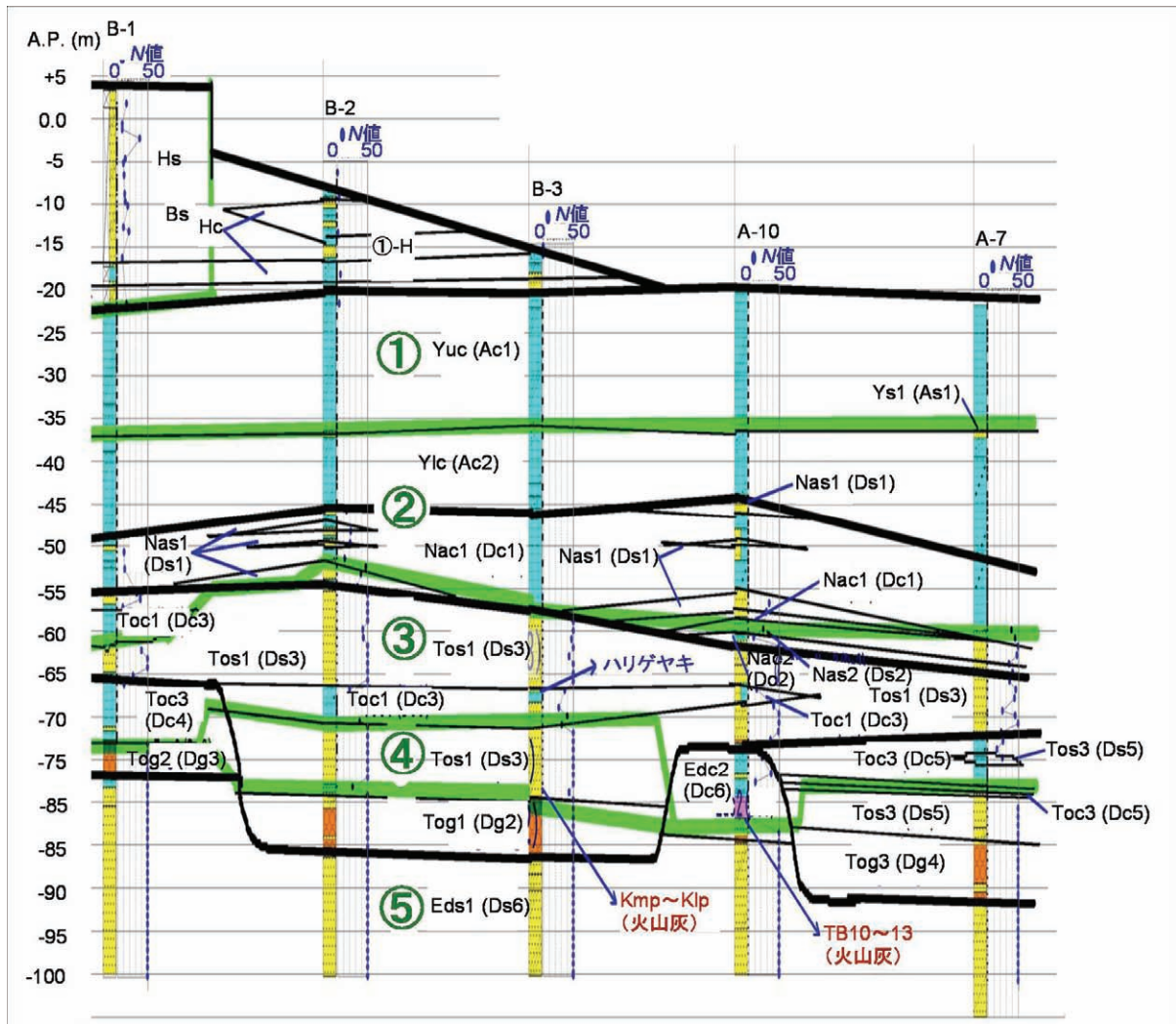


図-3(c) 地層断面図(連絡誘導路方向). 黒の実線は地質学的層区分で、覆砂(H), 上部有楽町層(Yu), 下部有楽町層(Yl), 七号地層(Na), 新期段丘堆積層(btg), 下総層群と呼ばれる東京層(To)と江戸川層(Ed)に区分され、添字cは粘土層, sは砂層, gは礫層を表す. 緑の実線は工学的層区分で①~⑤層に区分される.

新期段丘堆積層に相当する埋没段丘礫層 (btg) が見られる。Toの最下部には基底礫層 (Tog) が5~10mの厚さで堆積している場所が多い。Toは砂層が多いが、A-2やA-1では粘土層が10~15mの厚さで堆積している。Edは砂層である。Tog以深の大部分はN値が50以上の基盤層である。Toの砂層もN値が50以上あるほか、十分な厚さを有する場合にはNaの砂層もN値が50以上となっている。ToやNaの砂層を支持層とする場合には層厚が十分であるかどうかの評価に注意を要する。

次に、図-3(b)について記述する。上述の図-3(a)と500mほど離れた平行断面を描いている。現空港から離れるために最表層の覆砂は存在しない。また、A-1とA-2のみならず、A-3とA-4でもbtgが確認されている。しかしながら、両断面に特筆すべき差は見られないことから、細部において若干の差は見られるものの、当該地区の地盤は岸沖方向に大きな変化は認められないと言える。

このことは、次に記述する図-3(c)においても確認することができる。すなわち、各堆積層は岸沖方向にわずかに深くなっていく傾向がある程度でほとんど変化せず、特にYucとYlcの境界深度は全く変化していない。なお、現空港寄りの最表層に存在する覆砂の厚さは、B-2で10m以上、B-3で約5mである。

以下、本調査対象地域で得られた理学情報について、大磯丘陵での標準層序 (南関東標準層序) (岡ら, 1984) と東京地区で使用されている地層区分 (東京都港湾局, 2001) を対比して設定された結果をとりまとめる。

- 1) 軟弱な有楽町層 (Yuc) の基底はA.P.-35m付近であり、基底における堆積年代は、 $^{14}\text{C}$ 年代測定により5840±40年 (BP) であった。
- 2) 有楽町層 (完新世の堆積物) の基底は、9900~10000年前の堆積物であるA.P.-47~-55mに相当する。A.P.-40m付近には、約9000年前のカキ礁も確認された。
- 3) 沖積層の基底は、厚板状のガラス質火山灰 (UGと呼ばれる約16000年前に降灰した火山灰 (岡ら, 1984) の可能性が高い) が堆積し、カンラン石の混入が少ないA.P.-60~-70mに相当することが確認された。
- 4) A.P.-65~-90mを構成する地層のほとんどは東京層であることが確認された。これは、日本では後期更新世以前に消滅してしまった植物の花粉 (ハリゲヤキの花粉) が確認されたこと、ならびにA.P.-85m付近を基底とする砂礫層上面より約13万年前の箱根火山噴出物 (klp6と呼ばれる火山灰 (岡ら, 1984; 町田・新井, 2003)) と対比できたことによる。
- 5) A-5とA-10においてA.P.-80~-85mに挟まれる火山灰

層は、箱根火山の堆積物であるTB10~TB11 (大磯丘陵の火山灰層) と対比でき、また、A-3においてA.P.-86m付近の砂礫層直下の火山灰が約20万年前の箱根火山の噴出物TB12 (大磯丘陵の早田層上部) であると対比できたことから、砂礫層直下以深の地層が江戸川層であることが確認された。

- 6) A.P.-70~-75mの東京層の一部の粘土では、多量の珪藻、有孔虫、放散虫、ペレット等の混入が確認された。

### 3.2 工学的地層区分

物理特性の試験結果を図-4, 5に、また、力学特性の試験結果を図-6~10に示す。物理・力学特性は、水平方向に比較的均質である。これらの試験結果の深度分布、ならびにN値の深度分布を基にした工学的な観点から、深度方向に①~⑤の5つの層に区分することができる。なお、工学的な層区分は、設計に用いることを前提に設定されたもので、上述の地質学的な地層区分とは必ずしも一致していない。

試験結果の深度分布は多少なりともばらつくが、経験に基づいた工学的判断により、調査対象地域の代表的な地盤定数が設定された。ここでいう代表的な地盤定数 (設定値) とは設計に用いるべき値、すなわち設計値を意味する。

海上空港の基礎構造の設計には一般に港湾基準が適用される。2007年春に改定された新しい港湾基準 (日本港湾協会, 2007) では、信頼性設計に基づいた性能設計を実現するために、地盤定数の設定にも統計的な手法 (渡部ら, 2007) が採用された。しかしながら、D滑走路の設計は新しい港湾基準の導入より早かったため、従来の仕様規定型の港湾基準 (日本港湾協会, 1999) が適用された。このため、地盤定数の設定は、試験結果の平均値をもって設計値とすることが原則とされた。ただし、経験を基にした工学的判断として経験的にやや安全側の設定になるように配慮された。また、当該地盤の応力履歴や経験的に知っている常識的な地盤定数の範囲等を考慮して設定された。

設定値については、図中に直線で示してある。また、設定にあたって考慮した工学的判断については以下に記述する。

①層：海底面からA.P.-35m前後までに分布する軟弱な正規圧密粘土層であり、塑性指数 $I_p$ は80前後 (図-4)、含水比 $w_n$ は100~150% (図-5) で、粗粒分をほとんど含まず均質である。

軟弱粘土地盤の非排水せん断強さ $c_u$ は、一軸圧縮試験結

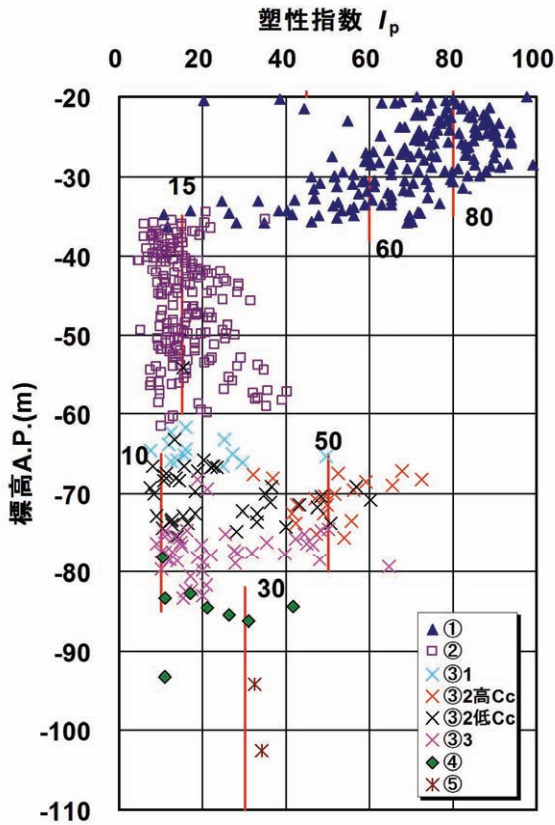


図-4 塑性指数の深度分布

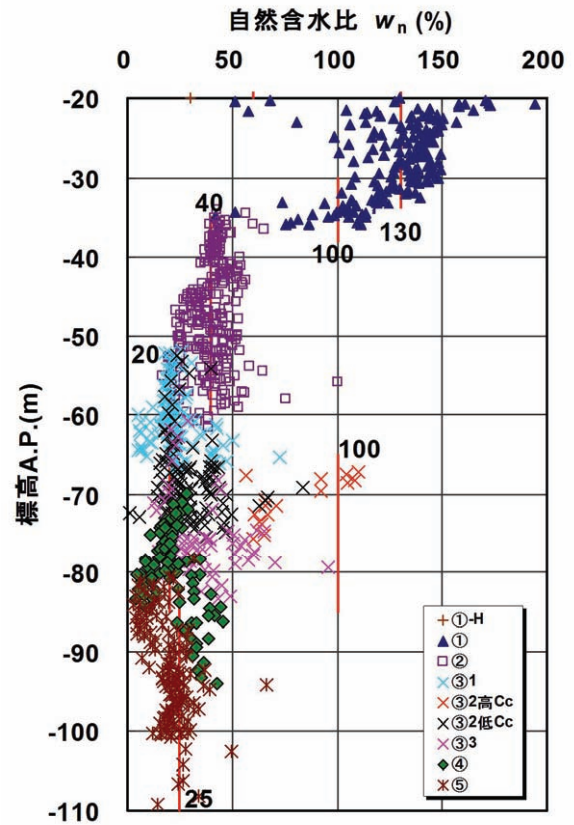


図-5 自然含水比の深度分布

果を基にして設定してきたという国内の多くの事例に倣って、また、他の試験に比べて最も多くの試験を実施したことも考慮して、ここでは、一軸圧縮試験の結果が採用された。なお、表層付近でやや大きなせん断強さが得られているデータがあるが、これは覆砂の直下に相当し、圧密による強度増加に起因している。

軽度に過圧密であると判断される(図-9)ことから、強度増加率 $m=c_v/\sigma'_{vc}$ (ここで $\sigma'_{vc}$ は正規圧密領域に载荷した圧密圧力)は、非排水せん断強さ $c_u$ の深度分布(図-6)と圧密降伏応力 $p_c$ の深度分布(図-9)を用いて算出される $c_u/p_c$ にほぼ一致する(渡部ら, 2007)。特に、対象としている粘土層は、侵食などによる力学的な過圧密を受けていないので、年代効果による疑似過圧密状態にあり、 $m=c_v/\sigma'_{vc}=c_u/p_c$ と考える(Hanzawa, 1983)ことが妥当である。 $m=c_u/p_c$ として強度増加率を算出したところ0.41となった。一般に $m=0.25$ 程度になる(Mesri, 1975; Watabe et al., 2003)ことが知られており、得られた値はこれよりも著しく大きい。一方、有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$ と圧密降伏応力 $p_c$ の深度分布(図-9)から当該層の過圧密比 $OCR=p_c/\sigma'_{v0}$ を算出すると1.50となった。

想定された3工法のうち、埋立・栈橋組合せ工法の場合、

埋立部では、埋立荷重による圧密が進行して強度増加することを設計で考慮する可能性がある。この場合、経験的な値よりも大きな $m=0.41$ をそのまま使うと、地盤の圧密によるせん断強さの増加を過大に期待してしまうことが懸念された。また、疑似過圧密の場合、さほど大きな過圧密比にはならないと考えられる。以上を考慮して、土質調査参考資料では $m$ とOCRを上述の値よりやや小さめになるように配慮され、それぞれ0.3と1.3と設定された。

圧縮指数(図-10)は1.3以上の値となっており、圧縮性の高い層であることがわかる。このことは、高塑性(図-4)、高含水比(図-5)であることと整合している。

②層：A.P.-35m前後～-60m前後に分布する地層である。粘性土に分類されるものが多いが、粗粒分含有率が高いため低塑性である。下半分には砂質土が挟在する。

塑性指数 $I_p$ が15程度と低い(図-4)ために、試料の乱れの影響を受けやすく、サクシオン(残留有効応力)も保持されないことから、一軸圧縮試験の適用範囲には入らないと判断された。実際、この層で得られた一軸圧縮試験結果(図-6)は、三軸UU試験(図-7)や簡易CU試験(図-8)の結果と比較すると著しく小さい値となった。

一方、簡易CU試験の場合、日本の多くの軟弱粘土に対

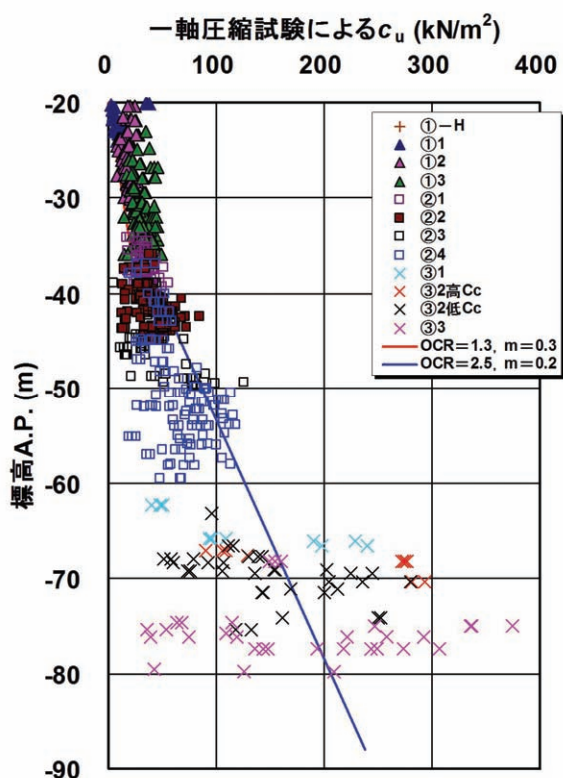


図-6 一軸圧縮試験による非排水せん断強さの深度分布  
-8 簡易CU試験による非排水せん断強さの深度分布

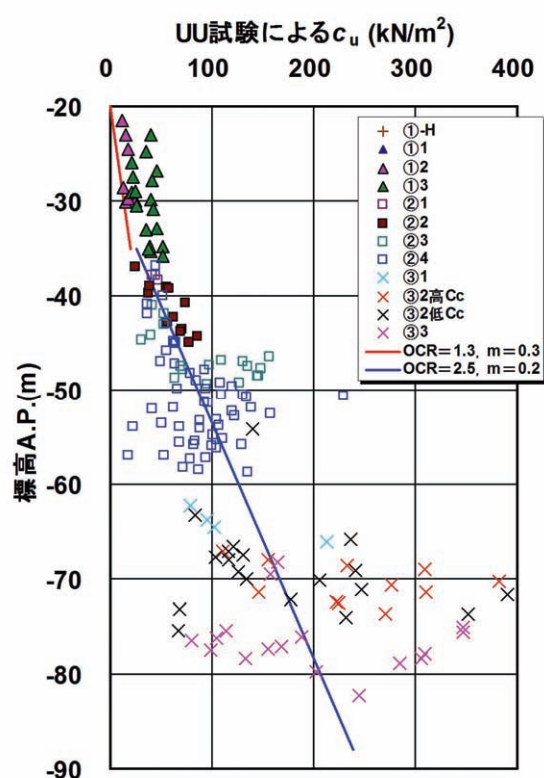


図-7 UU試験による非排水せん断強さの深度分布  
図-9 圧密降伏応力の深度分布

しては、得られた非排水せん断強さを0.75倍したものが設計に用いるせん断強さであるとされている。しかし、低塑性な当該層においても0.75という補正係数が適用できるかどうかは未知であった。

そこで、一軸圧縮試験と変形メカニズムは似ているが、拘束圧を作用させた状態で試験するUU試験の結果を用いて設定することとなった。なお、三軸UU試験の結果から設定された $c_u$ は、結果的には簡易CU試験から得られた非排水せん断強さを0.75倍した値とほぼ一致することが図から読み取れる。

次の③層にも一部に粘土層が見られ、後述するように力学特性の傾向は②層と似ていたことから、②層と③層を合わせて非排水せん断強さ $c_u$ と圧密降伏応力 $p_c$ が設定された。有効土被り圧 $\sigma'_{v0}$ と圧密降伏応力 $p_c$ の深度分布(図-9)から当該層の過圧密比OCRを算出すると2.46と大きな値であることがわかった。強度増加率 $m$ が $c_u/p_c$ で表されるものと仮定するには、過圧密比がやや大きすぎるが、ここでも上述の①層の場合と同様に、試験から得られた $c_u$ と $p_c$ のそれぞれの深度分布(図-7と図-9)を用いて算出してみたところ0.18が得られた。一般に $m=0.25$ 程度になる(Mesri, 1975; Watabe et al.ら, 2003)ことから、得られた

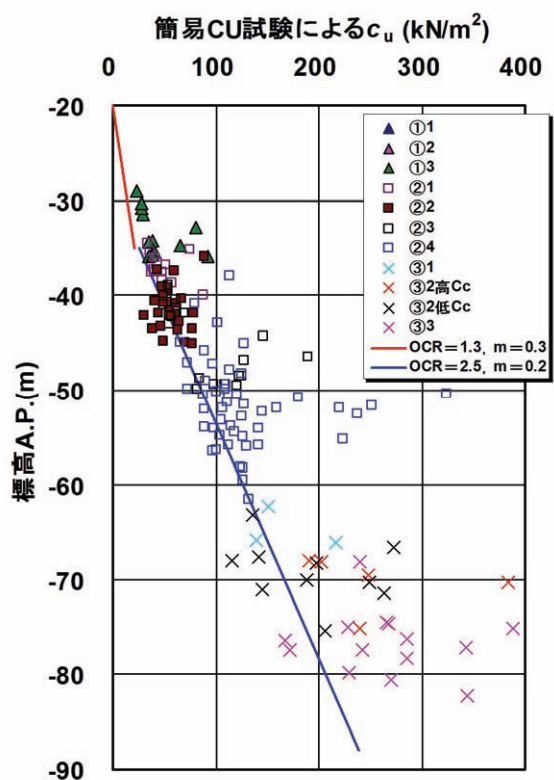


図-8 簡易CU試験による非排水せん断強さの深度分布

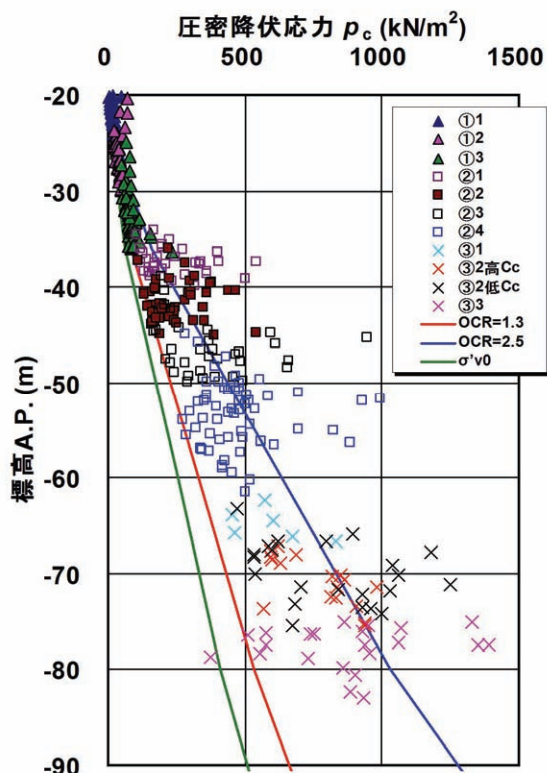


図-9 圧密降伏応力の深度分布

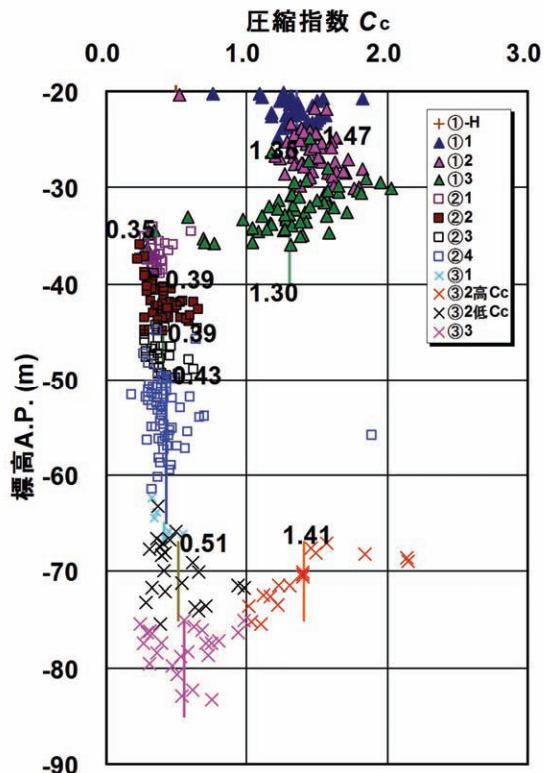


図-10 圧縮指数の深度分布

値はこれよりも著しく小さなものとなった。これは、除荷に伴う強度減少がある (Mitachi and Kitago, 1976) ことを示唆する結果である。

埋立・栈橋組合せ工法の場合、深い水深を有する建設予定地域では、②層を通る大きな円弧滑りが設計上想定される。また、かなりの深度であることからドレーン等による地盤改良は難しく、圧密に伴う強度増加は慎重に検討されなければならない。土質調査参考資料では、上述を考慮して、 $m$ については除荷に伴う減少があることからやや大きな値として0.2と設定され、OCRについては平均値として得られた値である2.5と設定された (試験結果のばらつきが大きいので有効数字2桁で表現された)。

圧縮指数 (図-10) は0.4前後の小さな値であり、圧縮性の低い層であることがわかる。このことは、低塑性 (図-4)、低含水比 (図-5) であることと整合している。

③層：A.P.-60m前後～-75m前後に分布する地層である。砂礫、粘性土、砂質土の互層地盤で、 $N$ 値が50以上の箇所もあり、小規模構造物の支持層となりうる。粘土層の力学特性については、上述②層で示したとおりである。なお、 $T_{oc}$ の一部には、高含水比、高塑性、高圧縮性の層が存在しており、塑性指数 (図-4)、含水比 (図-5)、圧縮指数 (図-10) において確認することができる。これらは、

地質学的情報として得られた珪藻等の微化石が多く含まれる層に相当する。このように物理特性は他と著しく異なるものの、力学特性については特筆すべき差異は認められなかった。

④層：A.P.-75m前後～-90m前後に分布する地層である。南西側ではこれに相当する層は見られない。一部小さな $N$ 値を有する粘土が挟在しているが、 $N$ 値50以上の連続した層が存在し、中～大規模構造物の支持層となりうる。

⑤層：A.P.-80m程度以深に分布する地層である。 $N$ 値が50以上の連続した層が厚く存在し、大規模構造物の支持層となりうる。せん断波速度は400m/s以上である。

### 3.3 地質学的地層区分と工学的地層区分の関連

地質学的地層区分では主に層序について着目しているのに対し、工学的地層区分では主に強度分布などに着目している。両者は相互に関連しているはずであるが、地盤定数は主として工学的地層区分を基に設定されるため、設計において両者の関連はあまり考慮されないのが実務の実情である。

上述のように、地盤定数の分布は、現空港に近く覆砂や埋立ての影響が強く表れるA-11、A-12、B-1、B-2、B-3を除くと、ボーリング孔によらずほぼ共通の深度分布で

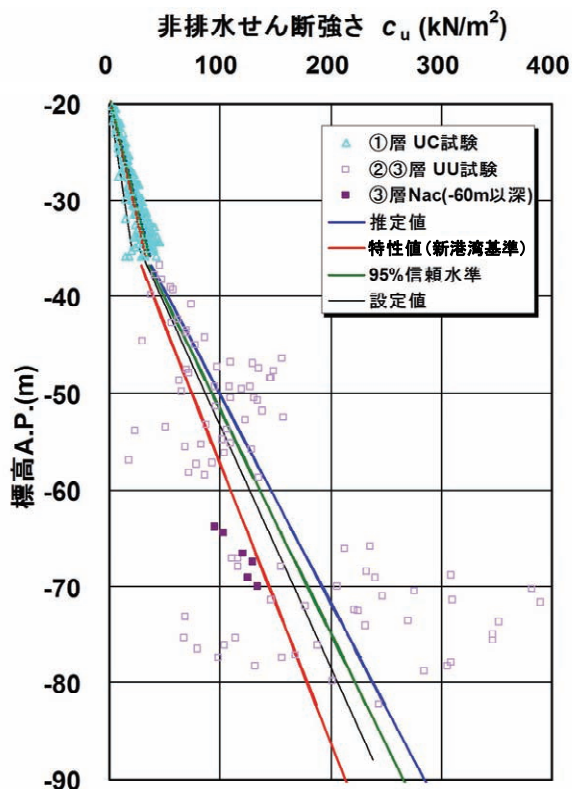


図-11 非排水せん断強さの深度分布：試験結果と設定値

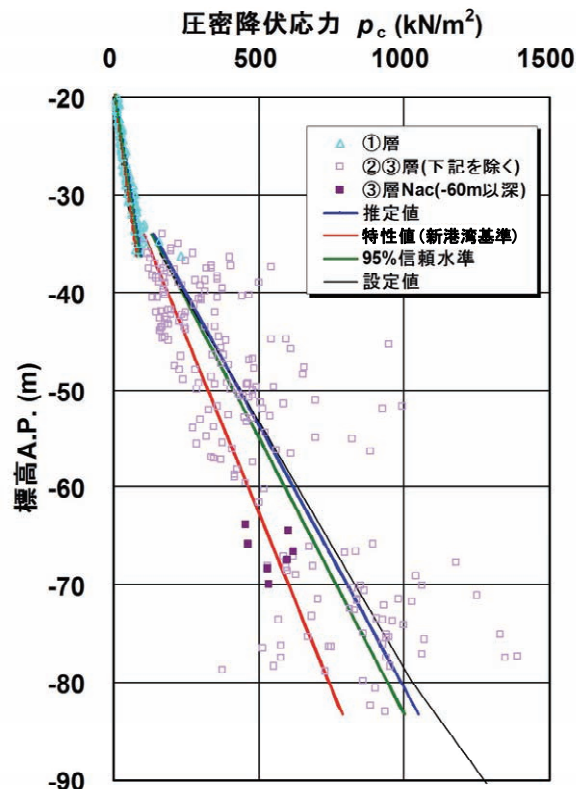


図-12 圧密降伏応力の深度分布：試験結果と設定値

表された。しかし、図-3に示した地層断面図を詳しく見てみると、③層のうちA.P.-60m以深において見られる粘土層の多くは東京層Tocであるが、A-13では七号地層Nacとなっており、堆積年代が異なっている。以下では、このことが地盤定数の深度分布にどのように現れているかを考察することにより、地質学的地層区分と工学的地層区分の関連について明らかにする。

①層については一軸圧縮試験、②層と③層については三軸UU試験により求めた非排水せん断強さ $c_u$ の深度分布を図-11に示す。③層のうちA.P.-60m以深の七号地層Nacについては、塗りつぶしたマーカーで識別して表示した。これによると、工学的情報にのみ着目した図-7では見落としていたことであるが、当該深度において、堆積年代が新しい七号地層Nacでは、堆積年代が古い東京層Tocよりも著しくせん断強さが小さいことが新たに見いだされた。このことは、工学的性質だけに着目して深度分布を評価してしまうと見落としがちな局所的変化について、地質学的な情報、すなわち堆積年代と適切にリンクすることによって見事に捉えられることを示している。同様のことは、圧密降伏応力 $p_c$ の深度分布を示した図-12においても、図-9で見落としていた局所的な変化を見いだすことができる。これらの検討により、500mという広い調査間隔

では捉えにくい局所的な地層変化について、地質学的な情報としての層序を考慮することにより適切に把握できることがわかる。

図-11と図-12には、土質調査参考資料における設定値（黒の細い実線）、新港湾基準により評価される特性値（赤の実線）、Eurocode 7 (EN 1997-1: 2004)などで採用されている95%信頼水準として評価される特性値（緑の実線）について深度分布を示している。

十分な個数のデータが得られていることから、データの分布のトレンドを捉えた推定値（青の実線）と95%信頼水準による特性値は5%程度の差しかなく、ほぼ一致している。土質調査参考資料の設定値は、上述したように、いわゆる工学的判断によって設定された値であるが、非排水せん断強さ $c_u$ については試験結果よりも小さめ（安全側）に設定されており、特に①層では約40%も小さめの設定になっている。ただし、実際の空港建設で①層は地盤改良されるため、この著しく小さく設定された強度が直接設計に使われるわけではない。一方、圧密降伏応力 $p_c$ についてはほぼ試験結果と一致するように設定されている。

渡部ら（2007）の方法が採用された新港湾基準（日本港湾協会、2007）では、データ個数がどんなに多くても、



データの個数に加え、変動係数として表されるデータのばらつきも考慮して特性値を評価する。しかしながら、Eurocode 7 (EN 1997-1: 2004) や同様の考えを採用しているJGS4001 (地盤工学会基準JGS4001-2004) では、95%などと設定された信頼水準を採用しているため、たとえデータにばらつきがあってもデータ個数が増えれば、特性値は推定値と一致するように設定される (渡部ら, 2007)。

本地盤調査結果では、深度分布を見ても明らかなように試験結果のばらつきが著しいため、新港湾基準による特性値は推定値よりもかなり小さく設定される。しかしながら、③層のA.P.-60m以深のNac層のように、周辺よりも局所的に弱い層が存在している場合、データの個数は十分にあったとしても、データのばらつきも考慮して特性値を設定することの重要性が示唆される。実際、新港湾基準による特性値は、A.P.-60m以深のNac層の試験結果を反映した設定値に相当しており、データのばらつきについては、単なるばらつきとして捉えるだけでは不十分で、地盤定数設定の上で重要な意味を持つこともあり得ることがわかる。

新港湾基準によって設定される特性値は、たとえデータの個数が多くてもばらつきを考慮して安全側に設定される。このように特性値を設定することは、ここで示した事例のように、局所的な変化にもある程度対応できているといえる。

#### 4. 地盤定数の深度分布について

上述した工学的に5つに区分した層のうち、①～③層の粘性土層について、自然含水比 $w_n$ 、非排水せん断強さ $c_u$ 、圧密降伏応力 $p_c$ 、過圧密比OCR、強度増加率 $m$ 、圧密係数 $c_v$ の深度分布を平均値 ( $c_u$ と $p_c$ については深度方向に増加するため回帰直線) として表し、これとの相対的なデータのばらつきを表すため、標準偏差 $\sigma$ を単位長さとするスケールを横軸にとった頻度分布図を作成した (図-13～18)。

設定値の信頼性を統計的に評価するには、信頼水準などで表されることが多い。しかし、土質調査参考資料では、上述のように経験に基づく工学的判断が強く反映されている。このため、設定値がどの程度の信頼水準の下限値 (あるいは上限値) にあるかを議論することよりも、データの平均値と、ばらつきの指標である標準偏差 $\sigma$ を使って、データのばらつきと設定値の相対的位置関係を評価した方が工学的に有用であると思われる。以下では、データのばらつきや設定値の相対的位置関係について、現空港の荷重やその周辺の覆砂の影響があるB-1～B-3の

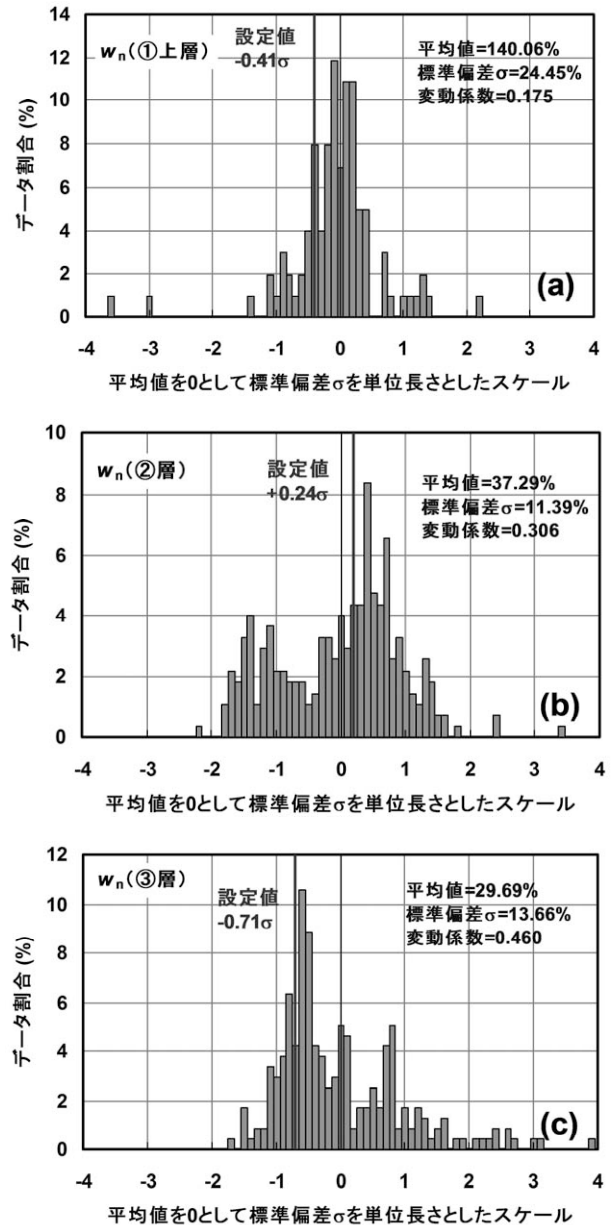


図-13 自然含水比の測定値のばらつきと設定値

ボーリング調査結果の全データ、ならびにA-11とA-12の覆砂直下近傍に当たる有楽町層のデータを除外し、自然地盤としての代表的な深度分布に着目した整理をした。

各図中に示した変動係数 (標準偏差を平均値で除した値) の範囲は0.106～0.535と様々であるが、釣鐘型の正規分布に近い分布を示すものは変動係数が小さい傾向にある。

図-13に示した自然含水比 $w_n$ の分布は、均質な①層上部ではきれいな釣鐘状の正規分布となっているが、低塑性粘性土で砂層も挟在する②層や③層では多少歪んだ分布となっている。工学的判断に基づく設定値は、平均値より $+0.24\sigma \sim -0.71\sigma$ の範囲で前後している。③層の設定値は

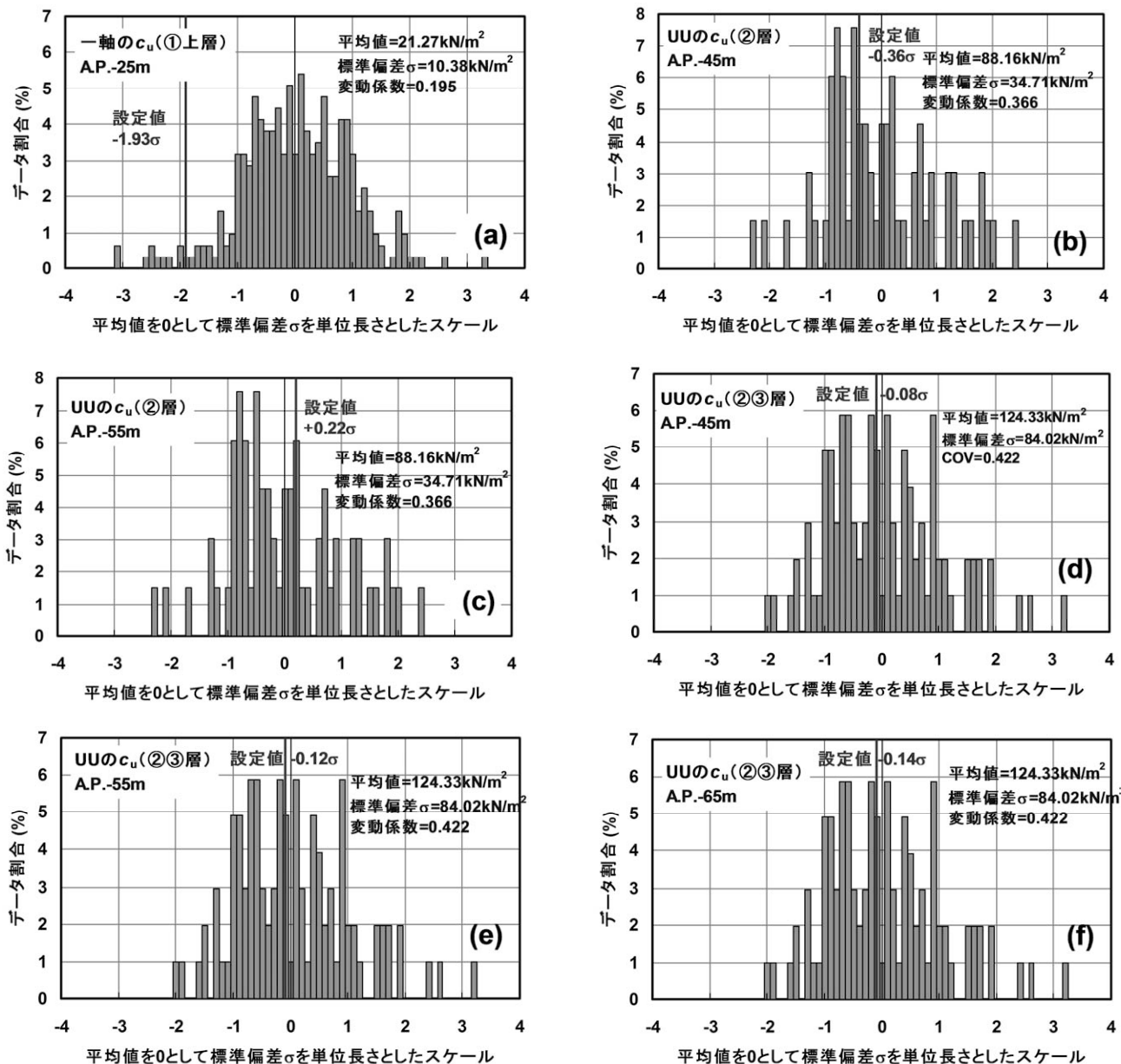


図-14 非排水せん断強さの測定値のばらつきと設定値

最頻値に近い値である。

図-11に示した非排水せん断強さ $c_u$ の分布は、上述の通り①層については一軸圧縮試験（図-6）、②層と③層についてはUU試験（図-7）の結果から設定された。

①層は釣鐘状の正規分布であるが、設定値は応力履歴や圧密による強度増加のバランスを考慮して控えめな設定となっており、設定値（A.P.-25m）は平均値より $1.93\sigma$ ほど小さい。②層のみを考える場合、A.P.-45mでは $0.36\sigma$ ほど小さいが、A.P.-55mでは逆に $0.22\sigma$ ほど大きくなる。これは、UU試験の結果がA.P.-50～60mで過小になっていることの影響を受けて、②層のみを回帰直線で表した分布がA.P.-45mで過大評価、A.P.-55mで過小評価になってい

るためである。②層と③層について共通する一つの分布として回帰直線で表すと、分布そのものが釣鐘状の正規分布になるとともに、設定値は平均値と非常に良く一致することが読み取れる。

図-15に示した圧密降伏応力 $p_c$ の分布は、きれいな釣鐘状をしてはいないが、データの大部分は $\pm 1.5\sigma$ の範囲に入っており、設定値は平均値そのものである。

図-16に示した過圧密比OCRの分布は、①層ではきれいな正規分布となっているが、設定値はこれよりも $0.90\sigma$ ほど小さい値である。②層と③層では同一のOCRが設定されたが、ほぼ平均値と一致していることがわかる。

図-17に示した強度増加率 $m$ の分布は、①層ではきれいな

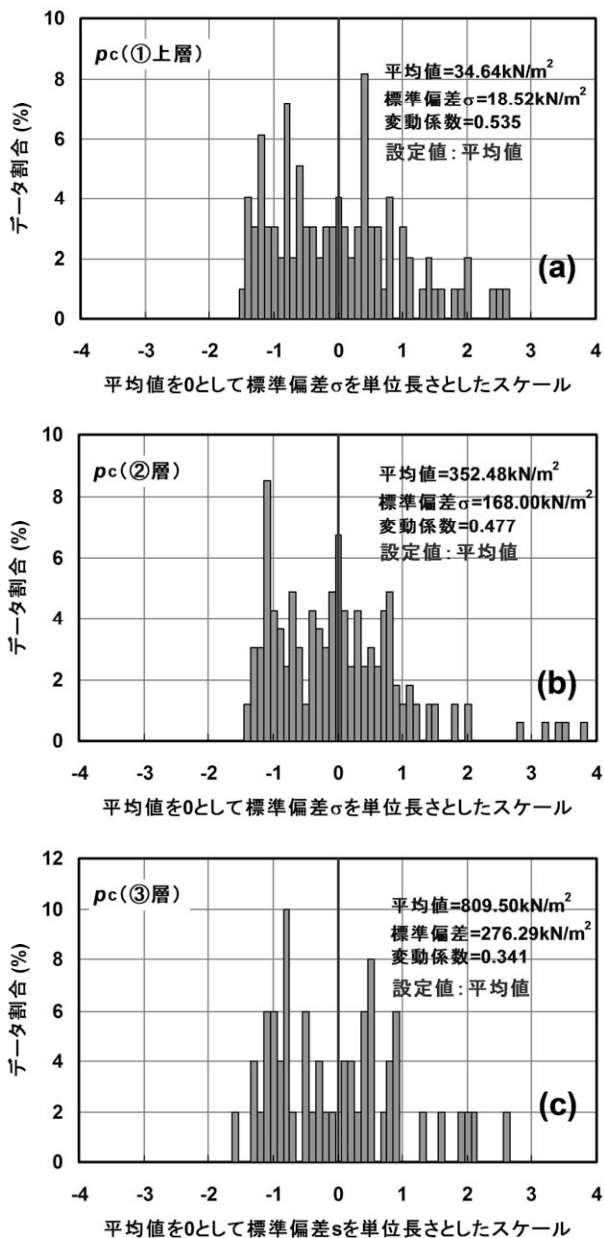


図-15 圧密降伏応力の測定値のばらつきと設定値

な正規分布となっており、最頻値と平均値が一致しているが、設定値は $0.58\sigma$ ほど小さな値である。②層と③層では、やや歪んだ分布形状であるが、設定値は平均値よりわずかに大きな値( $+0.26\sigma$ )に設定されていることがわかる。

図-18に示した圧密係数 $c_v$ の分布は、対数値の頻度分布を示しているが、釣鐘状の分布に近く、対数正規分布と見なせることがわかる。データの範囲は対数での標準偏差 $\sigma'$ に対して $\pm\sigma'$ 程度に収まっている。なお、図の平均値は相乗平均であるが、対数をとらずに算術軸上で算出する相加平均よりも小さい値となっているので注意が必要である。

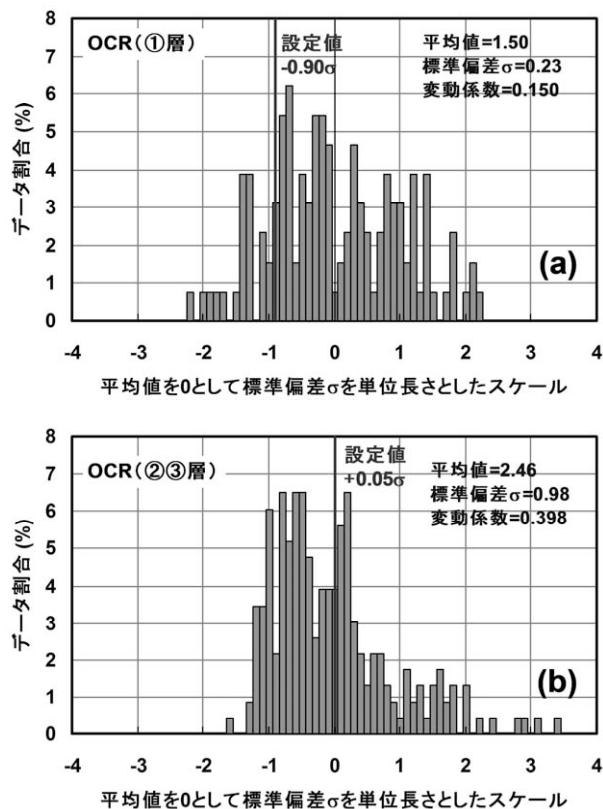


図-16 過圧密比の測定値のばらつきと設定値

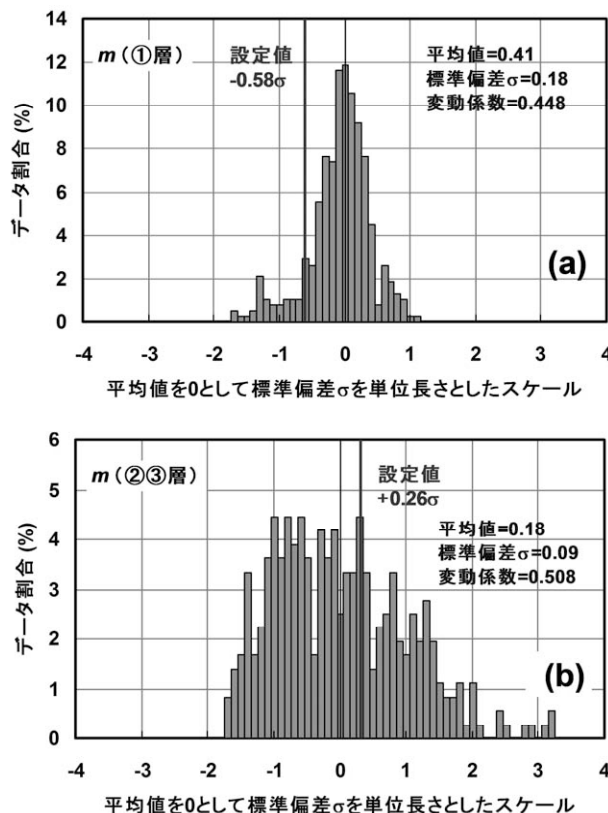


図-17 強度増加率の測定値のばらつきと設定値

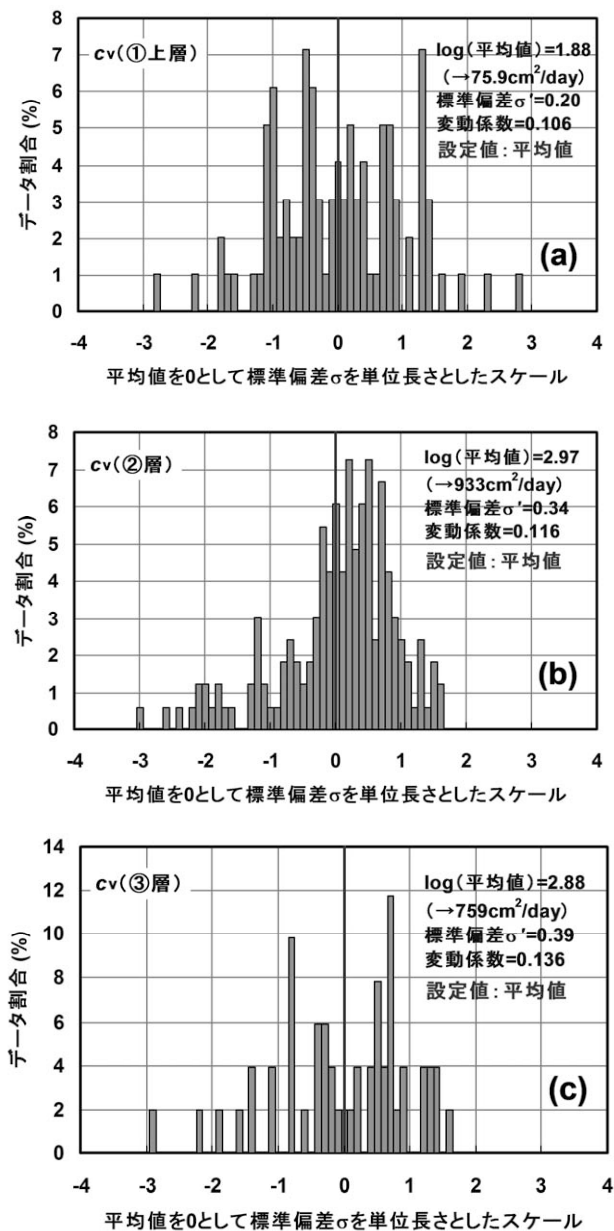


図-18 圧密係数の測定値の対数のばらつきと設定値

## 5. まとめ

本稿では、東京国際空港D滑走路建設予定地において500m間隔で実施されたボーリング調査結果について、詳細に考察した。以下に、得られた知見をとりまとめる。

- 1) 延長3500mにも及ぶ測線に対して地層断面図が描かれ、地質学的・工学的な層区分が行われた。物理・力学試験結果として得られた各種地盤定数の深度分布に対して、代表的な分布が設定された。
- 2) 東京国際空港D滑走路建設予定地の海底地盤は、地質学的な層区分として、有楽町層(Y)、七号地層(Na)、

新期段丘堆積層、下総層群と呼ばれる東京層(To)と江戸川層(Ed)に区分され、図-3に黒の実線で示す地層断面によって表された。

- 3) 工学的な層区分としては、力学特性の違いや支持層としての機能を判断材料として、①～⑤の5つの層に区分することができ、図-3に緑の実線で示す地層断面によって表された。
- 4) 覆砂や埋立ての影響が強く表れている部分を除くすべてのデータを基に、非排水せん断強さや圧密降伏応力といった力学特性の代表的な深度分布が設定された。非排水せん断強さの深度分布については、①層ではこれまでの港湾域における地盤調査の経験から一軸圧縮試験結果による設定が妥当であるが、②層と③層では、一軸圧縮試験ではなく、三軸UU試験結果を基に設定することで妥当な深度分布が得られた。このことは、三軸UU試験から得られた非排水せん断強さは、簡易CU試験の結果を0.75倍して得られた非排水せん断強さとほぼ一致した事実によっても裏付けられている。
- 5) 工学的層区分による③層のうちA.P.-60m以深の粘土層に着目し、これを地質学的層区分と比較すると、大部分は東京層To<sub>c</sub>に区分されるが、堆積年代が新しい七号地層Na<sub>c</sub>が空港のほぼ中央部で横断方向に入り込んでいることがわかった。このことは、非排水せん断強さの深度分布や圧密降伏応力の深度分布を見たときに、当該深度において、七号地層のデータが東京層のデータに比べて顕著に小さくなった事実と整合した。工学的性質だけに着目して深度分布を評価してしまうと見落としがちな局所的变化については、地質学的な情報と工学的な情報をリンクすることによつて的確に捉えられると言える。
- 6) データのばらつきについては、単なるばらつきとして捉えるだけでは不十分で、地盤定数設定の上で重要な意味を持つこともあり得る。新港湾基準によって設定される特性値は、たとえデータの個数が多くてもばらつきを考慮して安全側に設定される。このように特性値を設定することは、工学情報を見ただけでは見落としがちな局所的な変化にもある程度対応して地盤定数を設定できている。
- 7) 土質調査参考資料では、代表的な地盤定数の深度分布として、工法などを考慮した工学的な判断を加味して設定されており、①層では強度増加率 $m=0.3$ と過圧密比 $OCR=1.3$ 、②層と③層では $m=0.2$ と $OCR=2.5$ と設定された。これらの値は、地盤調査結果として得られた値、すなわち①層では $m=0.41$ と $OCR=1.50$ 、②

層と③層では $m=0.18$ と $OCR=2.46$ と比較し、①層では安全側の設定、②層と③層ではほぼ同等の設定になっている。①層については、埋立工法の場合に、圧密の進行による強度増加を過剰に期待しないように小さな値が設定されている。これらの代表的な分布について試験結果と比較した結果、データのばらつきがある中で概ね適切な設定になっていることが確認された。

候補に挙げられた3つの工法のうち、実際の施工は埋立・栈橋組合せ工法で行われることが入札により決まり、2007年3月末より着工された。なお、空港建設位置が事前調査位置から若干変更されており、上述した事前調査結果を再評価する必要が生じたため、工事開始前に施工者による追加調査が実施された。得られた結果については、本稿で示した事前調査結果と同等の結果になっている。

## 謝辞

本論文で対象とした「土質調査参考資料」において、調査・試験結果を基に地盤定数の代表的な深度分布を設定するにあたっては、筆者らに加え、国土交通省関東地方整備局、(独)港湾空港技術研究所、(財)沿岸技術研究センターの関係者による共同作業を実施した部分がある。特に、田中洋行氏(北海道大学大学院、元港湾空港技術研究所)には多くのご助言をいただいた。また、理学情報に基づいた地質学的なとりまとめについては大里重人氏(パシフィックコンサルタンツ)より多大なるご協力をいただいた。本稿執筆にあたっては、上記関係各位からの多大なるご助言を賜った。ここに記し、関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- EN 1997-1: 2004: Eurocode 7, Geotechnical design -Part 1: General rules.
- Hanzawa, H. (1983): Undrained strength characteristics of normally consolidated aged clay, *Soils and Foundations*, Vol. 23, No.3, pp.39-49.
- Mesri, G.(1975): New design procedure for stability of soft clays, Discussion, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, 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.
- Watabe, Y., Tanaka, H., Tsuchida, T. and Tanaka, M. (2003): 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.
- 岡 重文, 菊地隆男, 桂島 茂 (1984) : 東京西南部地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅), 地質調査所
- 田中洋行, 北詰昌樹, 土田 孝 (2002) : 羽田空港沖合展開事業に係る地盤工学的課題, 土木学会論文集, No.722/III-61, pp.1-12.
- 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 (1999) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.225-256.
- 日本港湾協会 (2007) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, pp.291-329.
- 東京都港湾局 (2001) : 新版東京港地盤図.
- 町田 洋, 新井房雄 (2003) : 新版火山灰アトラスー日本列島とその周辺, 東京大学出版会.
- 渡部要一, 植田智幸, 三枝弘幸, 田中政典, 菊池喜昭 (2007) : 性能設計概念に基づいた実用的土質定数設定法, 土木学会論文集C, Vol.63, No.2, pp.553-565, 2007.
- 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

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