羽田空港D滑走路埋立部の施工と維持管理

野口 孝俊¹・渡部 要一²・鈴木 弘之³・
奥 信幸⁴・大和屋 隆司⁵・渡邊 雅哉⁶

¹正会員 国土交通省 関東地方整備局 港湾空港部
(〒231-8436 神奈川県横浜市中区北仲通五丁目57横浜第二合同庁舎14階)
E-mail: noguchi-t83ab@pa.ktr.mlit.go.jp

²正会員 (独)港湾空港技術研究所 地盤研究領域(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)
E-mail: watabe@ipc.pari.go.jp

³正会員 国土交通省 九州地方整備局 港湾空港部
(〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東二丁目10-7福岡第二合同庁舎2・3階)
E-mail: suzuki-h83ab@pa.qsr.mlit.go.jp

⁴正会員 東亜建設工業(株)東京支店(〒103-0022 東京都中央区日本橋室町四丁目1-6クワトロ室町ビル8F)
E-mail: n_oku@toa-const.co.jp

⁵正会員 東亜建設工業(株)東京支店(〒103-0022 東京都中央区日本橋室町四丁目1-6クワトロ室町ビル8F)
E-mail: r_yamatoya@toa-const.co.jp

⁶正会員 五洋建設(株)東京土木支店(〒112-8576 東京都文京区後楽二丁目2-8)
E-mail: masaya.watanabe@mail.penta-ocean.co.jp

東京国際空港(羽田空港)では、新たな離発着能力を創出するために、羽田空港再拡張事業として、沖合に4本目の滑走路(D滑走路)を新設する事業が2007年3月末に着工され、2010年10月末に供用開始した。羽田空港D滑走路の建設事業は、軟弱地盤が厚く堆積する地盤上の建設であること、河口部に位置するため、洪水時の河川流量を確保する観点から一部に栈橋構造が採用されていること、短い工事期間が設定されたことなどから、最新の土木技術を集結し、さまざまな設計・施工上の工夫をした。本稿は、当該事業の埋立部を中心に主に地盤工学の立場から、地盤改良工の施工、軽量土の施工と品質管理、埋立部の計測施工、盛土の施工と品質管理、供用開始後の維持管理について、その概要をとりまとめたものである。

Key Words : airport, reclamation, ground improvement, lightweight soil, quality control

1. はじめに

東京国際空港(羽田空港、写真-1)は、国際線を中心とする成田国際空港との役割分担から、主に国内線ハブ空港として国内航空ネットワークを担ってきた。しかしながら、増加する旅客数に対して、A～Cの3本の滑走路では発着能力が既に限界に達し、国内線のさらなる増便要求に答えられていなかった。また、東京や横浜をはじめとする首都圏の大都市に近接する立地の良さから、国際線発着枠の拡大に対する強い社会要請があった。

そこで、新たな離発着能力を創出・確保するために、羽田空港再拡張事業として、沖合に4本目の滑走路(D滑走路)を新設する事業が行われ、2010年10月21日に供用開始を迎えた。これにより、羽田空

港の年間発着能力が296,000回から407,000回へと約1.4倍に増加し、発着枠に余裕を創出することができた。

写真-1 東京国際空港(羽田空港)

供用中の空港制限区域における工事であり、特にC滑走路に離発着する航空機の直下での工事となったため、厳しい高さ制限が設けられた。このため、高さ制限に抵触する作業は、C滑走路の運用が休止される夜間（20:45～翌7:45の11時間）に限られた。また、大型船舶が輻輳する東京港第一航路の近傍での大規模・急速施工工事であり、工事用船舶の航行にも調整が必要であった。

このような厳しい施工条件にも拘わらず、供用開始時期が事前に設定され、工事規模に比べ設計・施工の期間を極めて短くせざるを得なかった。昼夜連続（24時間365日）施工や様々な施工上の工夫を実施した結果、当初予定通りの工期で施工を完了し、供用開始を迎えることができた。

本稿は、羽田空港D滑走路の建設事業について、主に地盤工学の立場から、地盤改良工の施工、軽量土の施工と品質管理、埋立部の計測施工、盛土の施工と品質管理、供用開始後の維持管理について、その概要をとりまとめたものである。羽田空港D滑走路建設事業に関連して、建設地の海底地盤特性については文献¹⁾、設計の詳細に関しては文献²⁾を参考にしていきたい。なお、以降に示す断面図の地層

番号①～③は工学的地層区分を示しており、①は高塑性粘土層、②は低塑性粘性土層、③は砂層をそれぞれ主体とする地層であり、記号Cは粘性土、Sは砂層を表している。

2. 地盤改良

(1) 地盤改良工法の選定

海底粘土地盤上に、高盛土に匹敵する大規模な埋立てを41ヶ月という短い工事期間内で完了し、かつ、供用開始後の残留沈下や不同沈下を許容範囲に抑制することが求められた。このため、海底地盤の改良工事はきわめて重要となり、サンドドレーン工法（SD工法）、低置換サンドコンパクションパイル工法（低置換SCP工法）、セメント深層混合処理工法（CDM工法）が目的に応じて使い分けられた。これらの3工法は、いずれも海洋工事において実績豊富なものである。

埋立部の護岸断面図の例として、図-1に一般護岸部（捨石式傾斜堤護岸）、図-2に進入灯護岸部（ケーソン式護岸）、図-3に埋立・栈橋接続部（鋼管矢

図-1 一般部の護岸断面図（捨石式傾斜堤護岸）

図-2 進入灯護岸断面図（ケーソン式護岸）

図-3 埋立・栈橋接続部断面図

図-4 SD用砂材の粒径加積曲線

板井筒護岸)を示す。

埋立地内部の地盤改良には、SD工法を採用した。本工法は、盛土による圧密沈下とそれに伴う原地盤の強度増加促進を目的としたものである。

一般護岸部の地盤改良には、置換率30%の低置換SCP工法を採用した。SCP工法は、軟弱な粘土地盤中に締め固めた砂杭を構築してせん断抵抗を増加させ、強固な地盤に改良する工法である。しかしながら、一般護岸部には変形追従性のある捨石式傾斜堤護岸を採用したことから、低置換SCP工法とすることにより、SCPによるドレーン効果、すなわち圧密の促進による粘土地盤の強度増加にも期待した。なお、鋼管矢板井筒護岸が採用された接続部については、抗土圧構造物として変形を抑制する必要があることから、置換率78%の高置換SCP工法により強固な地盤に改良した。

ケーソン式護岸が採用された重要施設の箇所では、変位を極力抑えなければならないことから、より強固な地盤とするためCDM工法を採用した。

(2) SD工法

A.P.-35m付近まで堆積するYuc層（上部有楽町層粘土、圧密係数 c_v が約 $100\text{cm}^2/\text{day}$ ）を対象として、4ヶ月間の放置期間に圧密度80%程度を期待できるように、砂杭径を400mm、砂杭打設ピッチを $2.5\text{m} \times 1.6\text{m}$ 、砂杭下端深度をYlc層（下部有楽町層粘土）の上部（A.P.-35.5～A.P.37.5m）に設定した。SD改良したエリアは次に述べる低置換SCP改良で囲まれた堤内側全域である。

SD改良における砂杭は、層厚1.5mのサンドマット（透水係数 $1 \times 10^{-4}\text{m/s}$ 以上の砂層）を敷設後に打設した。その後、杭頭保護と目詰まりによる透水係数の低下がもたらす圧密遅れのリスクを低減するために、層厚2.5mの保護砂（透水係数 $1 \times 10^{-5}\text{m/s}$ 以上の砂層）を施工した。砂杭の打設本数は約184,000本、総延長約3,900,000mに達した。SDに用いた砂には、細粒分

写真2 SD 打設状況

含有率（粒径 $75\mu\text{m}$ 以下）が5%以下の九州産ならびに北海道産の海砂を用いることにより、高い透水性（透水係数 $1 \times 10^{-4}\text{m/s}$ 以上）と高い施工性（細粒分が少なく、SD打設船のケーシングパイプ内の砂落ちが良い）を実現した。SDに用いた砂材の粒径加積曲線の例を図-4に示す。

SDの打設は、2007年5月～2008年3月にかけて、24時間態勢で実施した。使用したSD船はいずれも12連装の打設機を備えたもので、最盛期には3隻のSD船をフル稼働させた。施工状況を写真-2に示す。SD船のリーダーの高さは、運用されているC滑走路の制限表面に抵触するため、昼間と夜間で施工箇所を移動させ、施工効率向上に努めた。滑走路の進入表面下の施工に当たっては、トラブル発生時にも航空機の運用に支障を来さぬよう、万一の場合にSD船を緊急脱出させる必要があり、ケーシング切断訓練を行うと共に、切断に要する時間等を把握して備えた。

SDの打設手順は、まずケーシングを所定の位置・深度まで貫入し、次に砂材の投入を行い、最後にケーシングを引き抜いて完了である。SDの出来形管理では、造成過程に、ケーシングの位置、貫入深度、砂材投入面の高さ、砂材投入量を管理し、計画値と実測値とを比較することで、所定のSDが造成できたことを確認した。SD用の砂材の品質管理では、砂材積出し港およびSD船上において、パンフロック試験と呼ばれる簡易メスシリンダー法による粒度試験を実施し、細粒分含有率が5%以内であることを確認した³⁾。

(3) SCP工法

外周護岸部には、工期、経済性、変形追従性を考慮し、さらに多様な生物環境の創造に寄与できる構造として、捨石式傾斜堤護岸を採用した。護岸下の軟弱な粘性土層は、直径2mの締め固めた砂杭を海底

写真-3 SCP 打設状況

図-5 SCP 杭間粘土に対する CPT の結果

地盤中に打設するSCP工法によって改良した。

SCPの打設は、置換率30%の低置換SCPとし、捨石式傾斜堤護岸の変形に追従できるようにした。打設ピッチは3.0m×3.5m、改良域の下端深度はYlc層の中層A.P.-42.0m（海底面下20～25m）である。なお、堤体法尻部の地盤表層については、すべりを防止する目的で置換率60%とした。打設時に砂杭間粘性土が乱されることが影響を考慮し、捨石マウンド（捨石1）の施工まではドレーン効果による粘土地盤の強度増加を見込まなくても施工可能なように改良範囲を決定した。

SCP打設に伴って発生する海底面の盛上がり土については、SCP打設完了後に掘削・撤去して廃棄する予定であった。しかしながら、その体積が計画量よりも多くなったため、処分先の受入れ容量を超える分については撤去せず、原位置に残置してSCP改

写真-4 CDM 改良の施工状況

写真-5 CDM 改良軸の先端（改良軸 8 本）

良を施した。

SDの打設と同様に、SCP船も現空港の制限表面に抵触するため、昼間は制限区域外で作業し、制限を解除した夜間（20:45～翌7:45）に限って制限区域内での作業をした。一部のSCP船については、昼間は制限区域外にて待機させた。最盛期には13隻のSCP船が稼働した。SCPの施工は、2007年4月に着手し、2007年12月に完了した。打設した砂杭の延長は、延べ約1,360,000mである。最盛期には1日あたり延べ約50隻のガット船によってSCP船への砂供給を行った。現地の施工状況を写真-3に示す。

SCP改良地盤の品質管理には、SCP杭芯に対して標準貫入試験（SPT）を68箇所実施したほか、SCP杭間粘土に対して電気式静的コーン貫入試験（CPT）を実施した。CPTによって得られた杭間粘土の非排水せん断強さの深度分布を図-5に示す。盛上がり土に対する改良部分も、通常の改良部分と同様の改良効果が得られていることを確認できる。また、杭間粘土の乱れや、その後の強度回復状況、圧密による強度増加を確認することができる。短い工期が設定された本事業では、圧密度50%で次の施工工程に着手する計画であったが、その判断には、CPTによる品質管理手法を活用した。

図-6 浚渫土砂の供給場所

写真-6 管中混合処理土の施工状況

(4) CDM工法

ケーソン式護岸を採用した進入灯橋梁護岸および仮物揚場護岸の基礎地盤は、より強固な地盤とするためにブロック式改良のCDM工法を採用した。特に、進入灯橋梁護岸は、護岸としての機能に加えて、橋梁基礎としての機能も兼ね備えていなければならない。護岸の沈下、ならびに裏込めに伴う側方変形の許容値が小さい。

進入灯橋梁護岸では延長125m×幅55m、仮物揚場護岸では延長245m×幅60mの範囲でCDM改良を施した。改良深度はA.P.-16.5m～A.P.-45.0mの範囲で、CDM改良杭1本あたりの改良長は28.5mである。本工事における総改良土量は約62万 m^3 となった。4隻のCDM船によって、計4524本のCDM改良杭を打設した。

CDM改良杭1本あたりの改良面積が5.7 m^2 となるCDM船3隻（改良軸8本）と、改良面積4.6 m^2 となるCDM船1隻（改良軸4本）の計4隻を用いて、2007年9月から2008年3月までの6カ月間でCDM改良を実施した。施工状況を写真-4に、CDM船の改良軸先端の構造（改良軸8本のもの）を写真-5に示す。

通常のCDM施工では、打設に伴って発生する盛上り土を改良天端までグラブ船にて床堀・撤去して処分する。しかし、今回の施工では、CDMの施工前に

図-7 管中混合処理土のチェックボーリング結果（材齢 91 日）：(a) 一軸圧縮強さ；(b) 湿潤密度

敷砂を行い、盛上り部分までCDM改良することによって、盛上り土を撤去・処分することなく有効に活用して、その上にケーソンのマウンド（基礎捨石）を施工した。

CDMの配合は、現地から採取した粘土試料を用いて事前に配合試験を実施し、その結果に基づいて設定した^{4), 5)}。事前配合では、湿潤状態の現場土砂の単位体積あたりのセメント添加量で表すと、上層（A.P.-21m～A.P.-30m）で140～145 kg/m^3 、中層（A.P.-30m～A.P.-34m）で140～145 kg/m^3 、下層（A.P.-34m～A.P.-45m）で110～120 kg/m^3 で目標一軸圧縮強さ（平均3375 kN/m^2 、最小2250 kN/m^2 ）を満足した。施工開始後にチェックボーリングを実施し、採取試料に対して一軸圧縮試験を実施した結果、設計よりも十分大きな強度が得られていることが確認された。このため、その後の施工では、上層で120～125 kg/m^3 、中層（A.P.-30m～A.P.-34m）で110～120 kg/m^3 、下層（A.P.-34m～A.P.-45m）で80～95 kg/m^3 と再設定し、その後もチェックボーリングを

写真-7 気泡混合処理土の施工状況

図-8 筒先で採取した気泡混合処理土のフロー値と消泡率の関係

実施して目標強度を満足する結果が得られていることを確認した。このような配合の修正により、事前に設定した配合よりもセメント添加量を低減させることができた。

セメント系地盤改良工法は施工のやり直しができない。このため、綿密な配合の検討を事前に行うことが重要である。今回の施工では、施工中にチェックボーリングを併用して現地で発現される強度を確認し、その結果を配合設計にフィードバックすることによって、品質管理に役立てた。

3. 軽量土

(1) 原料土の採取

D滑走路の建設工事では、埋立ての全土量約3800万 m^3 のうち、約15%に相当する約550万 m^3 において、浚渫土砂を有効利用した軽量土（管中混合固化処理土および気泡混合処理土）を適用した。原料土とした浚渫土砂は、図-6に示すように、新空港島護岸前面の床掘部、第一航路部、他事業部の3箇所とした。

図-9 気泡混合処理土のチェックボーリング結果（材齢91日）：(a) 一軸圧縮強さ；(b) 湿潤密度

新空港島護岸前面の床掘部と第一航路部は、D滑走路の建設工事において発生した浚渫土砂であり、これに加えて、他事業から発生した浚渫土砂も活用した。

原料土とした浚渫土砂は計約362万 m^3 で、内訳は、管中混合処理土用として約336万 m^3 、気泡混合処理土用として約26万 m^3 を有効活用した。なお、これらの土量はいずれも浚渫地山数量である。

(2) 管中混合処理土の施工と品質管理

設計については文献²⁾を参照いただきたい。管中混合処理土は、2008年10月21日から2009年10月28日までの約1年間で総計約470万 m^3 を施工した。なお、ここで示した施工期間には、護岸開口部の締切り工事に係る約2ヶ月の休止期間が含まれている。埋立部の中仕切り堤や外周護岸の進捗に対応させて最大3船団を配置させ、工期が短いことから、24時間体制での施工を行った。管中混合処理土の施工状況を写真-6に示す。

管中混合処理土の品質管理は、室内配合強度

表-1 計測項目とその主な活用

計測項目 (機器)	計測データ	主な活用方法
C沈下板	原地盤の全沈下量	沈下管理 沈下予測含む
CB沈下板		
水圧式 沈下計		
層別沈下計		
間隙水圧計	原地盤の層別沈下量 (圧密度)	
RI-CPT	原地盤の 非排水せん断強さ	安定管理
傾斜計	原地盤の水平変位の 深度分布	
GPS・深淺測量	埋立天端高 (載荷厚層・沈下量)	載荷履歴管理
土圧計	埋立荷重	
クロスアーム式 沈下計	埋立盛土の圧縮沈下量

図-10 計測計器類の設置位置

$q_{ul}=942\text{kN/m}^2$ に対応させ、事前配合試験で決めた土砂ごとの水セメント比 W/C を実現するように自動制御で行った。本工事における平均圧送距離は約600m、処理土のフロー値は約90mmであった。ここで、フロー値とは、アクリル盤上に置いたアクリル製円筒（内径80mm、高さ80mm）にスラリー状の材料を詰めた後、円筒を引き上げ、アクリル盤上に広がったスラリーの直径を読み取った値である。

チェックボーリングにより採取した試料に対する一軸圧縮強さ q_u ならびに湿潤密度 ρ_w の深度分布を図-7に示す。一軸圧縮強さの平均値は693kN/m²、不良率は11.7%であり、湿潤密度の平均値は1.343g/cm³であることを確認できる。これらの値は、いずれも設計上の要求仕様を十分に満足するものである。なお、一般に材齢28日で強度を管理することが多いが、本事業では性能規定に基づいた品質管理が行われ、かつ、十分な養生期間を確保できたことから、材齢91日で強度を管理した。

図-11 護岸部(SCP30%改良)の沈下実測値と予測との比較

図-12 埋立部(SD改良)の沈下実測値と予測との比較

(3) 気泡混合処理土の施工と品質管理

設計については文献²⁾を参照いただきたい。気泡混合処理土は、2009年5月19日から2009年11月28日までの約半年間で総計約79万m³を施工した。施工能力360m³/h級の専用プラント船2隻を配置させた。気泡混合処理土の事前の施工実績は、工法開発からの13年間で約52万m³であり、今回の施工土量は既往実績の約1.6倍にも相当し、これをわずかに約半年間で施工するというチャレンジングな大量急速施工であった。施工状況を写真-7に示す。

本工事における圧送距離は平均約400m、最大677mであり、これまでの施工実績に見られる圧送距離（多くの場合100m～200m）と比較しても長距離圧送であった。このため、施工時に消泡等による密度の増加が懸念された。施工時に筒先で採取した試料に対するフロー値と消泡率（圧送前後の気泡体積から算出）の関係を図-8に示す。その結果、従来の施工実績であるフロー値（150～200mm）で施工を行うと消泡率が80%以上と非常に大きくなり、品質管理上の問題が生じることがわかった。そのため、本工事では、フロー値を250～300mmと高流動化す

図-13 RI-CPT活用に関するフローチャート

ることで消泡率を低減させ、本施工を実施した。

チェックボーリングにより採取した試料に対する一軸圧縮強さ q_u と湿潤密度 ρ_t の深度分布を図-9に示す。一軸圧縮強さの平均値は、水中部で 449kN/m^2 、気中部で 322kN/m^2 であり、全体の不良率は9.2%であった。また、湿潤密度は、水中部で平均 1.089g/cm^3 、気中部で平均 0.987g/cm^3 であった。なお、より軽量な気中部では、セメント量を多く配合することによって水中部と同等の強度を得ている。これらの値は、いずれも設計上の要求仕様を十分に満足するものである。なお、管中混合処理土と同様に、十分な養生期間を確保できたことから、本事業では材齢91日で強度を管理した。

4. 計測施工による埋立て

(1) 計測機器の配置

埋立部は、急速施工により最大層厚45mにも及ぶ高盛土を軟弱地盤上に構築するため、護岸の安定性や盛土の沈下に関して、計測施工を実施した。計測に用いた各種計測機器や原位置試験項目の一覧を表-1に示す。各種沈下計、間隙水圧計、土圧計、傾斜計による測定や、RI-CPTならびに深浅測量の実施により、応力履歴ならびに沈下や側方変形などの地盤変形を測定した。これらの地盤情報を理論上の計算値と比較することで、安全性を確保しながら、急速な施工を可能にすることができた。また、文献²⁾に示したように、沈下予測に基づく最終埋立地盤高さの設定や、供用開始後の維持管理計画の最適化などに反映させた。

各種計測計器類の設置位置を図-10に示す。地盤条件、護岸の構造形式、先行施工区域などを考慮し

図-14 RI-CPTの計測結果例（左：非排水せん断強さ、右：湿潤単位体積重量）

図-15 RI-CPT計測結果に基づいた $e \sim \log p$ 関係と設計用 $e \sim \log p$ 関係（室内試験結果の平均）との比較

て5箇所の重点観測区域を設定した。また沈下計測位置は、堤体盛土中央部や滑走路・平行誘導路の中央部などに多数設置した。設置型の計測計器類は、磁気伝送型の中通信システムを用いることにより無線化して計測作業を効率化した。これは、計測機器のケーブルが、施工時に切断されるなどの事故を防止することにもなる。

(2) 沈下管理

滑走路は、供用開始後100年間にわたりその機能・性能を維持するための標高や勾配などの各種基

図-16 深浅測量システムの概要

図-17 埋立層厚履歴(上図)と沈下挙動のデータベース(下図)の表示例。盛土表面と原地盤表面をそれぞれ表示。

準値を満足することが求められている。このため、沈下の予測計算結果は、滑走路の運用や維持管理計画に大きな影響を与える。供用中の残留沈下を許容したD滑走路の沈下予測計算には、本プロジェクト用に新たに開発した圧密沈下予測・管理システム(HASP)を用いた。これにより、供用開始後100年後までの将来沈下量を圧密途上の段階のうちに予測して、最終埋立地盤高を設定した。施工中に発生する圧密沈下量を計測し、これを基に逆解析を実施して圧密定数の同定を行うことにより、将来的な沈下に関する予測精度を向上させた。将来予測は2009年7月末のデータを基にした逆解析結果を反映したものである。

護岸部(低置換SCP改良)および埋立部(SD改良)の実測沈下量とHASPによる将来予測との比較例を図-11および図-12に示す。解析結果は予測時点よりも過去の地盤挙動をよく説明できていること、また、

図-18 埋立層厚履歴モデルのデータ例

表-2 品質管理項目と計測方法

項目	管理基準値	計測・試験方法	計測頻度等
工法管理	盛土厚 転圧回数	$T \leq 0.9 \text{ m}$ 8回	GPS施工管理 GPS転圧管理 施工エリア 全面
日常管理	地盤 反力係数	山砂 $K_{FWD} \geq 65 \text{ MN/m}^3$ 岩ズリ $K_{FWD} \geq 180 \text{ MN/m}^3$	小型FWD試験 ($\phi 300$) 2000 $\text{m}^2/\text{回}$
定期 管理	原位 試験	地盤 反力係数 乾燥密度	山砂 $K_{FWD} \geq 65 \text{ MN/m}^3$ 岩ズリ $K_{FWD} \geq 180 \text{ MN/m}^3$ $D_c \geq 90\%$
	室内 試験	粒度試験 含水比試験 最大・最小 密度試験 締固め試験 修正 CBR試験	山砂対象 修正CBR $\geq 5\%$ JIS A 1204 JIS A 1203 JIS A 1224 JIS A 1210 E-c法 JIS A 1211

予測時点よりも後の最終埋立地盤高さの設定段階(着工日から1000日後)においても、予測計算値は実測値と良く一致していることがわかる。以上を確認した上で、HASPによる将来沈下予測値を用いて最終埋立地盤高さを設定した。

(3) 安定管理

圧密途上の地盤に対して、迅速かつ低コストで連続的に有用な地盤情報(コーン先端抵抗 q_t 、周面摩擦 f_s 、間隙水圧 u 、湿潤密度 ρ)が得られる試験法として、ラジオアイソトープ(RI)と電気式静的コーン貫入試験(CPT)を併用したRI-CPT試験を実施し、護岸の安定管理に活用した。護岸工事の安定評価において、RI-CPT試験はまだ適用実績の少ない新技術であ

図-19 盛土厚の管理システム

図-20 転圧回数の管理システム

ったことから、実際の安定管理では、サンプリング試料に対する室内試験の結果との比較により、RI-CPTによる評価結果の妥当性を検証した。

図-13にRI-CPT活用に関するフローチャートを示す。追加地盤調査時（着工前）に、RI-CPTの計測結果と室内せん断試験結果を比較することによってコーン係数 N_{ki} をあらかじめ得ておいた。これにより、施工中は迅速に試験結果を評価できるRI-CPTを実施するだけで、圧密途上の地盤に対して非排水せん断強さ c_u 、間隙比 e 、有効応力 σ'_v を求められる。得られた非排水せん断強さによってその時点での盛土の安定性を評価できるとともに、間隙比や有効応力から圧密の進行状況をモニタリングし、設定した圧密定数の検証・修正にも活用した。有効応力は、非排水せん断強さと強度増加率からも推定される。しかし、より正確な値を評価するために、貫入を止めて長時間放置し、貫入に伴う過剰間隙水圧を消散させることによって、盛土により発生した過剰間隙水圧

のみを計測する消散試験も実施した。RI-CPTにより得られた非排水せん断強さと湿潤単位体積重量の深度分布、および間隙比と有効応力の関係を図-14および図-15に例示した。

(4) 埋立・荷重履歴と沈下・動態観測システム

大量急速施工に対応するため、従来の単素子方式の測量システムに代わり、面的な地盤高の計測が可能となるナローマルチビーム方式の深浅測量システムを採用した。使用したシステムの模式図を図-16に示す。日々の深浅測量を高密度・広範囲で実施し、土砂投入前と投入後の地盤高情報を差分化することで、埋立層厚や沈下量のデータとして活用した。

本システムを用いて算出した埋立層厚図と沈下のコンター図を図-17に例示する。沈下量を面的に可視化することで、地盤改良の不具合などによる沈下傾向異常個所があれば、これを早期に発見できる。また、同システムにて得られた埋立層厚情報に時間

図-21 RI密度測定器

情報を付加することで、図-18に示すような三次元の盛土載荷履歴データベースを構築することが可能となる。実際、HASPによる長期圧密沈下予測計算では、このようにして得た盛土載荷履歴データベースを利用している²⁾。

5. 空港盛土の品質管理

(1) 空港盛土の概要

本プロジェクトで、空港盛土に使用した材料のうち約70%は、千葉県房総半島の中央部から産出される良質な砂質土で、一般に山砂と称されるものである。房総半島の山砂は、古くから首都圏の埋込材やコンクリート用骨材として多用されてきた材料である。残りの30%の材料は、西伊豆などで生産された礫質土であり、一部は、首都圏からの建設発生土のうち良質なものが用いられた。

本工事ではプロジェクトのための大型土砂採取場を確保せず、既に許可済みの約60箇所の材料産出土源から集積して盛土を埋め立てた。空港盛土部分のうち、高さA.P.+2.5m以上の部分は、大型振動ローラを使用した転圧施工とした。空港盛土の体積は、揚土2工（図-1参照）が11,212,148m³、路床整正工が768,756m³、仮設道路維持管理工が544,320m³である。

写真-8 小型FWD試験に用いた装置

図-22 小型FWD試験と平板載荷試験結果の相関

空港盛土は、路体部と路床部からなり、路体は空港構造の基盤として、路床は舗装構造の下層として航空機荷重を支える。このため、十分な地盤剛性やせん断強さが必要であった。一方で、本工事は工期短縮を目指して大量急速施工とする必要があったため、1回の施工層厚を通常よりも厚くする厚層化施工の実現も求められた。

(2) 空港盛土の品質管理

1日あたりの盛土造成土量が80,000m³を越える大量急速施工を実現するため、転圧試験や各種室内試験、計測計器の開発、品質管理手法の検討等を行った。具体的には、大型振動ローラを用いた振動締固めの実施、良質な砂質土による盛土の構築、施工中の転圧試験による管理値の設定、転圧管理システムの開発とこれを用いた層厚・転圧回数の管理、厚層化施工に対応したRI密度測定器の開発とこれによる締固

め度の管理, 小型FWDによる地盤剛性の管理により, 空港盛土の品質を確保した. 事前に実施した転圧試験の結果から, 施工層厚0.9mまでであれば, 所要の性能を有する盛土を構築できることを確認し, 実施工において採用した.

品質管理項目および管理値を表-2に示す. 本工事での盛土の施工管理は工法規定とし, 転圧管理システムを用いて転圧回数と盛土厚さを管理した. 週1回の頻度で定期試験を行い, 事前の転圧試験で得られた管理値を逸脱していないかどうかを確認した.

定期試験では, 現場でブルドーザを使用した撤出し・転圧を行い, 1回の施工層厚0.9mに対して上中下0.3m厚ごとの平均乾燥密度をRI密度測定器により計測した. また, 表層の地盤反力係数を小型FWD試験により計測した. 複数の土源からの盛土材料を使用したことから, 材料のばらつきがあることにも対応するため, 従来から行われてきた盛土の施工管理手法との整合も図り, 締固め度 $D \geq 90\%$ (E-c法による締固め試験結果から算出)であることを合わせて確認した.

室内試験では, 修正CBR試験および最大・最小密度試験を行い, 地盤の支持力や液状化抵抗についても確認した. 日常管理は 2000m^2 ごとに1回の割合で実施し, 盛土厚や転圧回数と合わせて, 小型FWD試験による地盤反力係数を確認した.

(3) 施工管理・品質管理方法

a) 転圧管理

転圧管理システムは, GPSをブルドーザと振動ローラに取り付けて, 撤出し・転圧回数をリアルタイムで管理するシステムである. 本工事では, RTK-GPSによる補正情報を用いてGPSの位置情報を補正して精度を高めた.

ブルドーザの排土板にGPS受信機を設置し, 位置情報が運転席の画面にリアルタイムで表示することによって, 撤出し高さを確認した(図-19). また, 振動ローラにもGPS受信機を設置し(図-20), 運転席の画面上に転圧回数毎に色分けしてカラー表示することにより, 未転圧箇所を残さずに, 所定の施工が容易かつ確実にできるシステムとした. 各データは, 無線LANを用いてコントロールルームに集約され, リアルタイムで施工管理がなされた.

b) RI密度測定

厚層化施工の管理用に, 散乱型RI密度測定器を活用した. 長尺の計測ロッドの先端付近にRI線源と受信部を設け, 深層の密度と水分量を計測することができる.

計測システムの模式図を図-21に示す. RI密度測

図-23 予防保全の必要性に関する重要度の分類

定器には, バックグラウンド計, 密度計, 水分計の3本のロッドがあり, 同一孔に対して深度0.3m, 0.6m, 0.9mにおいてそれぞれのロッドにより延べ9深度で計測した. 1点当たりの各測定時間は約1分であり, 9深度での計測には付随する作業を含めて計約15分を要した. 計測は, 転圧後に削孔し, ケーシングロットを打ち込んで削孔を保護した後にロッドを挿入して密度計測をした. 湿潤密度および水分量は放射線源から受信部までの距離0.3mの平均値が得られる.

c) 小型FWD試験

小型FWD (Falling Weight Deflectometer) 試験は, 重錘を落下させて, 動的な载荷によるたわみ量から地盤反力係数や弾性係数を求める試験方法である. 静的な平板载荷試験と比較すると, 試験方法が簡易で, かつ, 装置の持ち運びが便利なことなどから, 多数の測点に対して短時間のうちに試験を実施することができる.

通常, 落下による衝突エネルギーは衝撃载荷的なものとなるが, 硬質ゴムバッファを装着することにより, 载荷時間を長くして急速载荷的なものとしている. 使用した小型FWD試験装置を写真-8に示す. 载荷盤の径は300mm, 重錘の質量は20~30kg, 落下高さは0~1200mmである. 最大落下高さで得られる動的な载荷荷重は約40kNである. 小型FWD試験と平板载荷試験の結果は, 図-22に示すように $K_{30}=0.5K_{FWD}$ の良い相関関係にあった. ここで, K_{30} は直径300mmの円板を用いて平板载荷試験により得られた地盤反力係数, K_{FWD} は小型FWDにより得られた地盤反力係数である.

図-24 予防保全必要施設の抽出結果

6. 維持管理計画

(1) 基本方針

羽田D滑走路は、埋立構造と栈橋構造からなる複合構造（ハイブリッド構造）であり、滑走路としては我国初の構造形式である。設計供用期間は通常の公共施設に比べても非常に長い100年と設定されており、設計・施工に引き続き、竣工後30年間にわたる維持管理業務までを一括契約とした。このような大規模工事において、維持管理を含め設計と施工を一体的に契約する調達方式の採用はこれまでに例がない。維持管理計画では、設計や施工上の思想を反映した一貫性のある維持管理計画の策定、重要施設への「予防保全」概念の導入、継続的に維持管理計画の見直しを図る体制の構築を基本方針とした。

(2) 設計・施工における留意事項

D滑走路では、設計・施工と一貫性のある維持管

理計画を策定することを1つの柱としており、具体的には次の3項目が実施された。

a) ライフサイクルコストを考慮した構造部材や材質の採用

栈橋部では、設計供用期間100年の長期耐久性を考慮し、各部材に対して適切な防食仕様を選定した。杭の防食のために、水中部には電気防食、潮間帯や飛沫帯には耐海水性ステンレスによるライニングを施した。鋼桁の腐食環境改善のために、耐久性材料であるチタン製カバープレートで桁の底面を被覆するとともに、桁の内部空間の除湿のために空調システムを導入した。また、支承の腐食環境の改善のために、鋼製支承防護カバーを採用した。

b) 設計・施工・維持管理段階における各種情報のデータベース化

出来形や品質記録などの施工記録情報を工事管理システムに保管してデータベース化し、維持管理のための基礎データとした。また、工事完了後は、工

表-3 維持管理のための測定項目

予想される 変状	計測すべき 項目	計測 機器等	数量	備考
護岸部の 沈下 および 水平変位	沈下	沈下板	5箇所	施工管理に 用いた沈下板 等を活用
	変位			
埋立部の 沈下	沈下	沈下板	4箇所	
	島内水位	CB沈下板 (縦坑)	3箇所	
	層別沈下	層別沈下計	3箇所	
	間隙水圧	間隙水圧計	1箇所

図-25 維持管理のための測定位置

事管理データベースを維持管理システムに移行した。

c) 維持管理の簡易性の確保

D滑走路では、維持管理が容易で、かつ、確実に劣化状況を把握できる構造とすることを維持管理上の性能として規定している。そのために、鋼桁のチタン製カバープレートを補強して、これを栈橋内点検用足場としても活用できる構造とした。また、接続部上部工に点検用の歩廊を設けて維持管理に役立てるとともに、Pca床板に点検孔を設けたり、支承防護カバーに点検用小窓を設けたりした。

(3) 予防保全概念の導入

D滑走路の維持管理計画では、部材劣化が著しく進行する前に補修を行い、大掛かりな補修を未然に回避することでトータルな維持管理コストの削減を図る手法として、予防保全概念を導入した。これを具体化するために、予防保全対象施設の抽出、劣化指標の定量化、維持管理情報のデータベース化により、効率的な予防保全計画を策定し、より合理的で経済的な施設の延命と、安心・安全な施設の使用を達成しようというものである。

a) 予防保全対象施設の抽出

D滑走路の維持管理計画では、図-23に示すように、環境の厳しさと、損失の大きさの2つの観点を点数化して評価し、予防保全が重点的に必要となる「リスクの高い」施設を抽出した。これにより判定した予防保全対象施設の抽出結果を図-24に示す。主な予防保全対象施設は、滑走路と誘導路の舗装、栈橋部・接続部・連絡誘導路部の基盤施設、進入灯橋梁、

進入灯橋梁取付部と物揚場の護岸、支承、伸縮装置、気象施設や航空保安施設の基礎である。

b) 構造物劣化指標の定量化

構造物の劣化程度を定量化して表現し、大量に得られる点検データと関連付けられれば、統計的な予測計算が可能となり、補修計画の策定もできる。また、データの蓄積を重ねることで予測精度向上も期待できる。

c) 維持管理情報のデータベース化

施工が終わり、維持管理が始まると、維持管理計画で挙げられた項目のデータを所定の頻度で取得し、維持管理データベースに記録・蓄積していくことになる。取得した点検情報は、モバイルPCを使用して点検と同時に入力している。目視観察を基本とした巡回や定期点検では、点検員の個人差が入り込み易い。また、点検対象が膨大であるため、点検忘れといった事故や重複点検といった無駄が発生する可能性もある。

これらを防ぐ仕組みとして、点検員が現場でデータを即時入力できるように、モバイルPCを活用した点検システムを構築した。点検対象の位置情報、点検調書と共に、入力部位のブロック分け、劣化損傷項目と発生位置、劣化度判定の参考例なども現場で閲覧可能である。これにより事務所に帰ってからの入力業務の負担軽減や、入力規格の統一化にも役立てられる。モバイルPCには、点検記録としてデジタルカメラで撮影された写真データを整理保管する機能も付加されている。

(4) 埋立部の維持管理計画

a) 維持管理の基本概念

埋立部の滑走路や誘導路等の施設では、供用開始後の残留沈下量を考慮した設計がなされている。したがって、これらの施設の構造や機能の健全性を将来にわたって確保していくためには、設計で予測した供用開始後の残留沈下量と実測沈下量とを比較・検証することが重要である。維持管理計画の中での調査・計測の主な目的は、このような検証作業にある。

滑走路や誘導路では、埋立地盤の絶対的な沈下や相対的な沈下差（不同沈下）に伴い縦断面の勾配変化が、また、埋立部と栈橋部の接続部の境界付近では、段差や開きが生じる恐れがある。一方、埋立護岸では、上部工の沈下や法線の変位等が生じる恐れがある。これらの変状は、空港機能に対して直接的に影響を及ぼす恐れがあることから、適切な維持管理を実施していくことが重要である。

b) 調査・計測項目

沈下予測精度向上のためには、地盤表面の沈下量を把握するだけでなく、各地層における層別沈下量や、粘土地盤に発生する過剰間隙水圧の消散状況から、圧密対象層の圧密の進行程度（圧密度）を把握することも必要である。また、埋立てによる圧密圧力増分を正確に評価して予測に反映するためには、盛土内の残留水位を把握することも必要である。埋立部および埋立護岸部において、維持管理の一環として行う測定項目を表-3に、測定位置を図-25に示す。施工管理に用いた沈下計や間隙水圧計のうち、供用開始後にも引き続き計測可能で、かつ、当該地点での観測が維持管理上有用であると考えられるものについて、引き続き利用することにした。

c) 調査・計測頻度

供用開始後、約30年間は沈下量も大きいことから、計測頻度を年に4回とするが、それ以降は2年に1回とする。計測機器の期待耐用年数は10年程度であるが、それ以降は、残留沈下量が0.20m程度と予測できることから、水準測量によって地盤表面の標高を計測し、沈下データに代える予定である。

7. まとめ

本稿では、羽田空港D滑走路の建設事業について、地盤改良工の施工、軽量土の施工と品質管理、埋立部の計測施工、盛土の施工と品質管理、供用開始後の維持管理について、その概略をとりまとめた。

最新の計測機器などを導入し、大量急速施工に対応した施工管理を実現した。地盤調査結果や埋立土量ならびに計測施工による記録データのデータベース化を通じて、将来の沈下量を精度良く予測し、これに基づいて施工時の最終盛土高さの決定や、維持管理計画の策定を行った。重要施設の維持管理には、予防保全の概念が導入された。設計施工に加えて、維持管理までを含む一括契約方式が採用されており、

維持管理においても設計・施工時からの情報を共有し、将来にわたる空港機能維持まで一体的に取り組む体制が構築されている。

本稿では紹介していないが、面的な構造物である空港施設の沈下計測に適した方法として、車載型のレーザースキャナによる水準測量も維持管理の一環として別途試みられている。これについては、別の機会に報告する予定である。

謝辞：本稿のとりまとめにあたって、羽田空港新滑走路建設工事に係る「技術検討委員会」（委員長：石原研而教授）、国土交通省関東地方整備局、港湾空港技術研究所、羽田再拡張D滑走路建設工事共同企業体をはじめとする関係各位に多大なる御指導をいただいた。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡部要一, 田中政典, 野口孝俊, 宮田正史: 東京国際空港D滑走路の海底地盤調査結果と設計値の統計的位置づけ, 土木学会論文集C, Vol.64, No.3, pp.585-597, 2008.
- 2) 野口孝俊, 渡部要一, 鈴木弘之, 堀谷常廣, 梯浩一郎, 小倉勝利, 水野健太: 羽田空港D滑走路の設計, 土木学会論文集C, Vol. 68, No. 1, pp.150-162, 2012.
- 3) 棕林浩一郎, 堀内大廉, 相川秀一, 伊藤嘉邦: D滑走路における埋立地盤改良工, 東京国際空港建設技術発表会(第5回)技術報告集, pp.4-19, 2008.
- 4) Kawamura, K., Noguchi, T., Kurumada, Y., Jinde, S., Watanabe, M. and Nakanishi, M.: Application of cement deep mixing method in Tokyo International Airport D-Runway Project -Vol. 1 Construction outline-, *Proceedings of the International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, DM'09/Okinawa*, pp.247-252, 2009.
- 5) Watanabe, M., Noguchi, T., Kakehashi, K. and Nii, K.: Application of cement deep mixing method in Tokyo International Airport D-Runway Project -Vol. 2 Quality Control-, *Proceedings of the International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization, DM'09/Okinawa*, pp.659-664, 2009.

(2011. 7. 14 受付)

EXECUTION AND MAINTENANCE OF D-RUNWAY IN HANEDA AIRPORT

Takatoshi NOGUCHI, Yoichi WATABE, Hiroyuki SUZUKI, Nobuyuki OKU,
Ryuji YAMATOYA and Masaya WATANABE

In the Tokyo International Airport (Haneda Airport), a new runway named “D-runway” was constructed from March 2007 to October 2010. Because some part of the D-runway is located in a river mouth, a hybrid structure consisted of piled pier and reclamation fill was adopted. In the reclamation section, not only the ground improvement technologies (SD, CPD and CDM) but also the new developed construction materials (pneumatic mixing cement treated soil and air-foam treated lightweight soil) were utilized. This technical report describes the outline of the execution, quality control, and maintenance plan of the D-runway structure, from a view point of geotechnical engineering.