

(Ⅲ-5)

関西国際空港の建設における沈下管理システム

Settlement Management System for the Construction of Kansai International Airport

関西国際空港(株)	新井洋一	*
同上	○及川 研	**
同上	鈴木慎也	***
同上	元野一生	****

By Youichi ARAI, Ken OIKAWA, Shinya SUZUKI, and Ichio MOTONO

関西国際空港は、沖合人工島(空港島)の上に建設されている本格的な海上空港である。建設区域の海底地盤は軟弱なため10mを超える沈下が将来にわたって続くことが見込まれる。このような条件下において、将来にわたって空港島が所定の天端高(50年後でもCDL+3.2m以上で、空港利用上から最大5mの高低差)を確保できるように、沈下管理システムを構築し、現地に適用している。

沈下管理システムは、土質調査→事前沈下予測→調査工事・沈下計測結果をもとに沈下予測を修正→埋立の段階施工・沈下計測結果をもとに各地点の施工天端高の決定→埋立の最終施工→空港施設の施工という一連の流れからできている。

埋立工事は、平成3年末までに完了する予定であるが、埋立済の地点においては、このシステムの運用により、ほぼ予測通りの天端高で推移している。

【キーワード】 埋立、沈下管理、沖積層、洪積層

1. はじめに

大阪湾泉州沖約5Kmの沖合に建設されている関西国際空港は、世界初の本格的な沖合人工島(空港島)形式の海上空港である。当空港の建設は、大水深(平均水深18m)、軟弱地盤(約20mの沖積層とその下に数100mにわたる洪積層がつづく)、大量・急速施工(面積511ha、埋立土量1億8000万 m^3 の埋立を5年で行う)という特徴を有し、地盤の最終沈下量も10mを超えることが見込まれる。また、空港島の天端は、空港供用開始から50年後でも空港施設が冠水しないCDL+3.2m以上を確保することが命題となっている。

このような大きな沈下が進行する中で埋立を進めるために、情報化施工すなわち、沖積層・洪積層の沈下計測結果を踏まえ、沈下予測精度の向上

を図り、この成果をもとに埋立天端高さを管理する沈下管理システムを構築し現地に適用した。

2. 建設区域の土質

(1) 埋立区域の土質

空港島の北端を通り、海岸線に直角方向の線上のボーリング結果を用いた地質構造断面図を図-1に示す。表層には(Ac)があり、その下に洪積粘土(Ma:海成粘土、Dtc,Doc:非海成粘土)と砂・れき層とが交互に現れている。沖積粘土層では、圧密降伏応力が土かぶり圧より若干大きい、ほぼ正規圧密状態であることを示している。この沖積粘土層は、物理特性(含水比 $\omega_n = 70 \sim 120\%$ 、液性限界 $\omega_L = 70 \sim 100\%$ 、単位体積重量 $\gamma_t = 1.45 \sim 1.55 \text{ tf/m}^3$)と圧密特性からみて我が国の港湾地域に見られる沖積粘土層とほぼ同様なものと評価できる。一方、洪積粘土層の場合には、かなりのばらつきが見られるものの、圧密降伏応力は有効土かぶり圧より大きく、OCR1.3程度の過圧密粘土であると評価できる。埋立荷重は45 tf/m^3 にも達するため、沖積粘土層のみではなく、洪積粘土

* 建設事務所所長 工博

** 建設事務所技術課長 0724-32-8806

*** 建設事務所技術課課長代理

**** 建設事務所技術課第二係長

層にも沈下が生じ最終的にはあわせて10 mを越える沈下量が予想される。

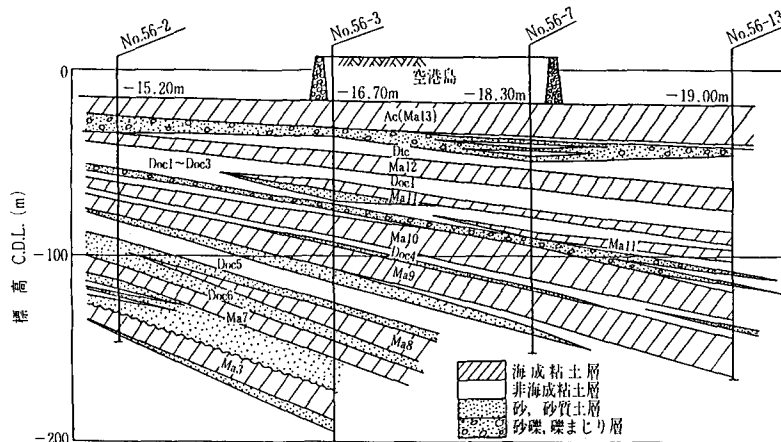


図-1 地質構造断面図(空港島北端)

3. 沈下管理システム

(1) 埋立工程

空港島の平均埋立層厚は30 m以上となるため、段階的な埋立工法を採用した。埋立施工手順を図-2に示す。

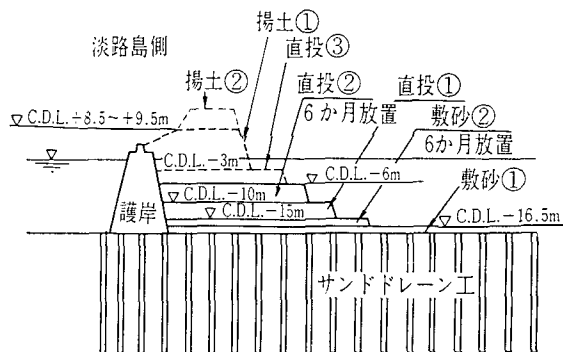


図-2 埋立施工手順

まず、沖積層の圧密促進のため、サンドマットとして敷砂①を敷設後、埋立全域にわたりサンドドレーン(2.5m×2.5m)を打設する。その後底開パージにより敷砂②及び直投①を施工していき、直投②(施工高CDL-6m)施工後6ヶ月放置し、沖積層の強度を増加を待つ。その後、直投③(施工高CDL-3m)、揚土①(施工高CDL~+9.5m)を施工する。揚土船による揚土できる高さは、盛土の安

定及び揚土船の施工能力からCDL+9.5mに制限されており、それ以上に盛土する場合はダンプトラック・ブルドーザーによる

揚土②を行い、所要の天端高に仕上げる。

埋立の平均的な展開は、敷砂②までは空港島全域ではほぼ同時に施工し、直投③以降は淡路島側より徐々に片押し施工する方式を採用した。

(2) 沈下管理基準

関西国際空港においては、島内各区域の舗装等を含めた地盤高が、開港時に空港計画上の所定の高さとなること、及び長期的に空港機能に支障が生じないように開港50年後においても少なくともHHWL(CDL+3.2m)よりも高くなることが要求されている。

当現場では施工中にかなりの沈下を生じること、また空港諸施設の建設の工程の都合からやむを得ずターミナル部など空港島の一部を先行して埋立ることにより、埋立途中の原地盤沈下量が異なっている場合があり、事前に埋立高さを確定しておくことは出来ない。埋立時に、実際の沈下量、施工履歴をもとに将来の残留沈下量を予測し、埋立高さを管理できるシステムを開発した。その際、沈下の管理基準は、旧開港時(平成5年3月末)において空港島各区域が所定の高さとなることを目標とした。なお、開港時期は平成6年夏頃に延期されているが、計画天端高さは旧開港時としている。図-3は、平成5年3月末の計画天端高さ(埋立地盤高さ)を示す。

(3) 沈下管理システム

沈下管理システムは、①土質調査→②事前沈下予測→③調査工事・沈下計測結果をもとに沈下予測を修正→④埋立の段階施工・沈下計測結果をもとに各地点の施工天端高の決定→⑤埋立の最終施工→⑥空港施設の施工という一連の流れからできている。

沈下量の管理にあたっては、埋立天端が海面下

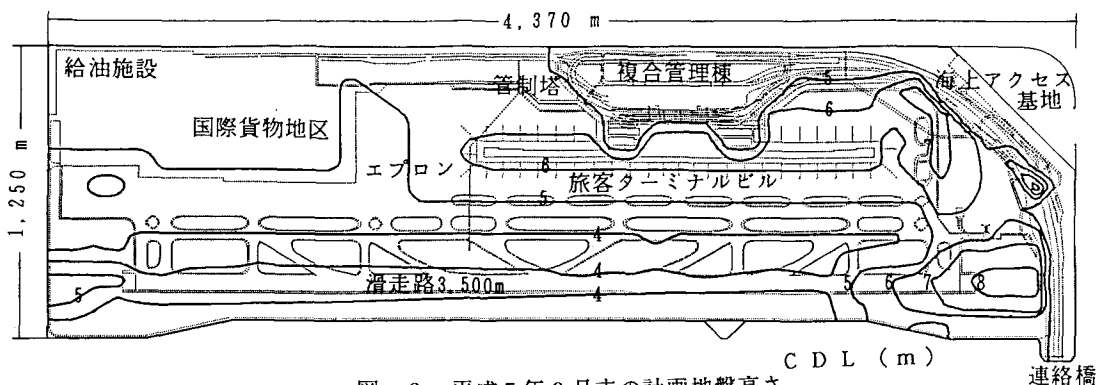


図-3 平成5年3月末の計画地盤高さ

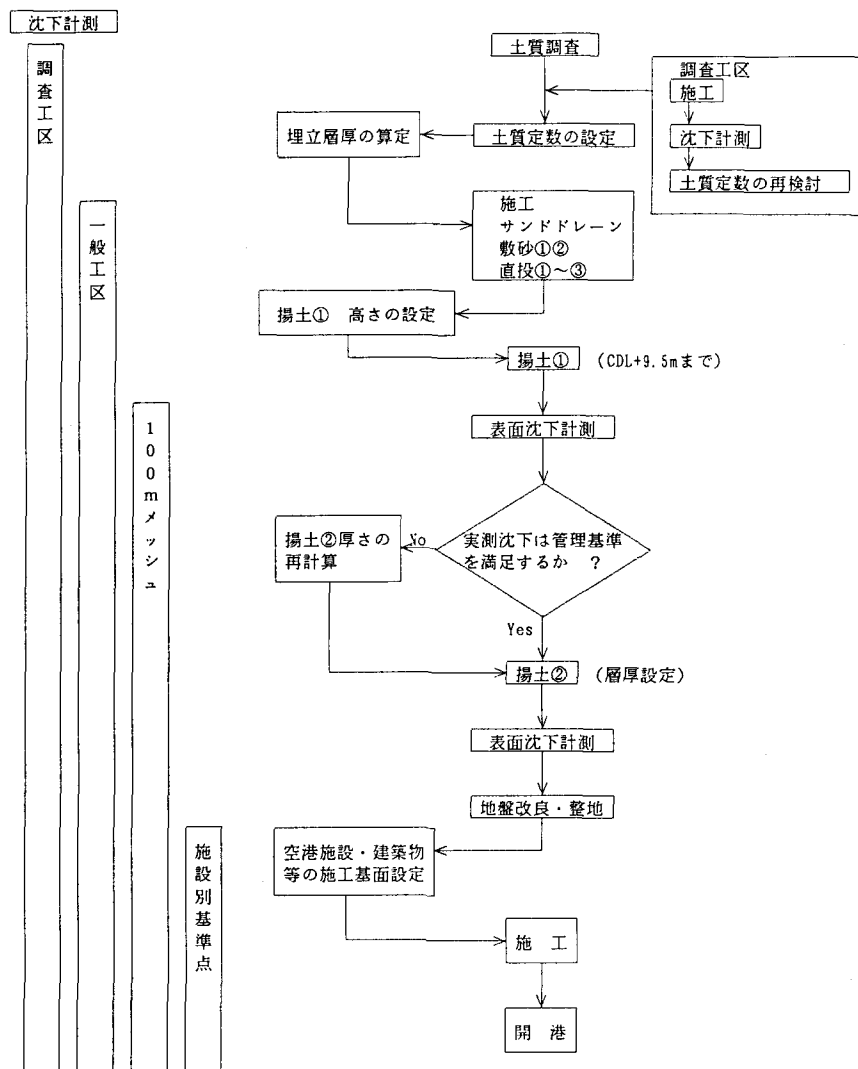


図-4 沈下管理のフロー図

の段階からの沈下量を計測すべきであるが、埋立海域は多数の土運船（バージ船）、揚土船（リクレマ船）が錯綜しており、多数の沈下計測を行うことは埋立の施工に支障をきたす。また、海底面の沈下を埋立の前から計測できる沈下板は空港島全域で19カ所しか設置しておらず、沈下板の実測値に基づいて空港島全域の沈下量を管理することは困難である。

このため、埋立天端が海面上となる揚土①後の天端を計測することとし、管理点は空港島を100m×100mのメッシュ毎にとした。図-4に沈下管理のフローを示す。

揚土①により最終埋立天端高まで仕上げられる区域について、揚土①の表面沈下実測値に基づく沈下予測計算をおこなって将来天端高を予測し、所要の天端高（管理基準）が確保できるかどうか確認を行うこととした。

揚土②を要する区域については、揚土②施工前に、揚土①の表面沈下実測値をもとに予測計算を行って将来の天端高さを予測し、管理基準を満足する揚土②の層厚を設定することとした。

具体的な管理方法は図-5のとおりである。

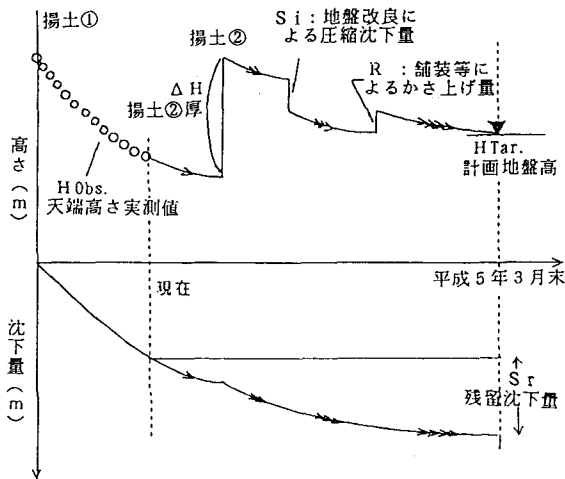


図-5 沈下管理方法

$$\Delta H = H_{Tar.} - H_{Obs.} + S_r + S_f + S_i - R \quad (1)$$

ΔH : 揚土②厚または天端の過不足量 (m)

$H_{Tar.}$: 平成5年3月末（旧開港時）の計画地盤高 (CDL) (m)

$H_{Obs.}$: 天端高実測値 (CDL) (m)

S_r : 天端高実測時から開港時までの海底面の残留沈下量 (m)

S_f : 埋土層の圧縮沈下量 (m)

S_i : 地盤改良による圧縮沈下量 (m)

R : 舗装等によるかさ上げ量 (m)

このシステムの採用の前提条件として事前の土質試験結果及び護岸工事の実績から判断して空港島建設海域の沖積層の沈下特性はほぼ均一であることが確認されていること、また、先行調査工区方式により沈下予測の精度向上が図られていることがあった。

4. 埋立調査工区での沈下計測

埋立による沈下量の正確な予測のため、一般工区の埋立に先行して調査工区を設け施工し、沈下量の観測を行い、沈下予測の精度の向上を図った。

埋立調査工区は図-6に示すように空港島のほぼ北西端に近い、面積6haの区域に設けられた。

調査工区では、沈下板、アンカーロッド、二重管式沈下計を設置して沖積層及び洪積層の沈下を計測した。

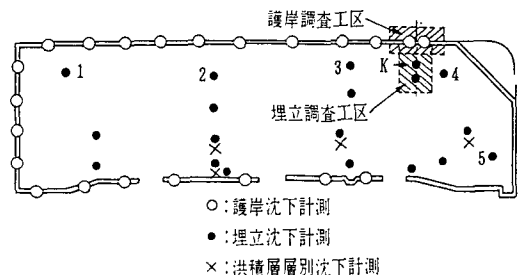


図-6 埋立調査工区と沈下板の位置

1) 2)

(1) サンドドレーンで改良された沖積層の沈下
沖積粘土層に生じる沈下を早期に終了させるとともに、護岸や埋立の施工時に沖積粘土層を切るすべりを発生させないために空港島全域にわたりサンドドレーン工法による地盤改良が実施された。100万本にも及ぶ砂杭による地盤改良を、しかも大水深(-18m)において実施することは、我が国で初

めてのことなので沈下に関する綿密な管理が行われた。

図-7は埋立調査工区での沖積粘土層と洪積粘土層の実測沈下結果と計算値を比較して示したものである。沖積粘土層の実測沈下は揚土後9カ月程度ではほとんど終了しており、サンドドレーンによる沈下の促進効果は期待どおりに発揮されているが、当初の予測計算と比較して若干小さく、最終沈下量においては1.0m程度の差があった。このため、Barronの式を適用して実測沈下に対応する土質定数に修正した。図-7には、修正された土質定数により計算した沈下予測曲線と実測値との比較を示している。

また、この定数を用いて一般工区に配置されている沈下板の実測沈下量と計算沈下量を比較したところ、図-8に示すように両者はほぼ一致することが分かった。

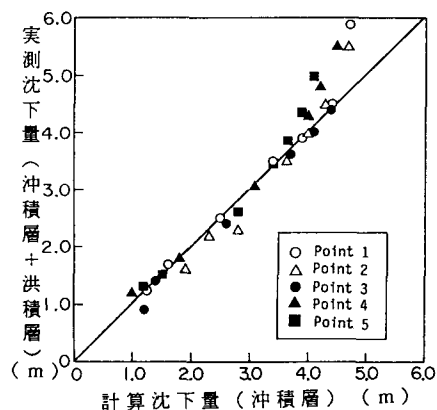


図-8 実測沈下量と計算値の比較（沖積層）

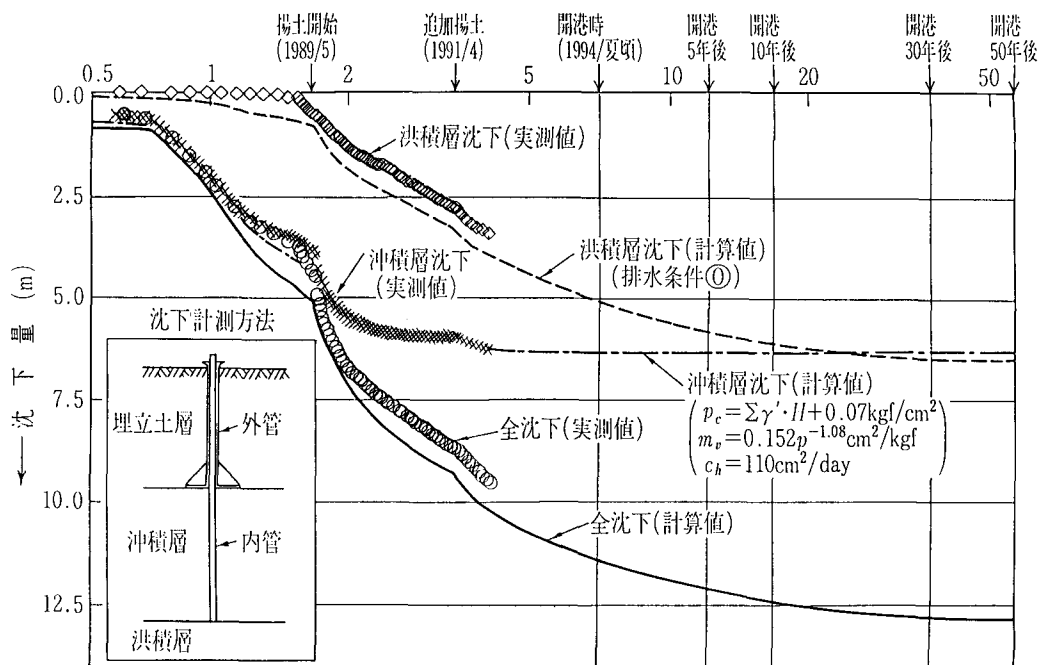


図-7 実測沈下と計算値（沖積層・洪積層） 調査工区 K点

(2) 洪積層の沈下¹⁾³⁾⁴⁾

洪積層の沈下計測も、図-6に示す埋立調査工区で実施されている。洪積層の沈下は、図-7に示すように直投②(CDL-6.0mまで)の放置期間の最後から生じ始め、揚土から27ヵ月後の平成3年8月末現在で3.4mに達している。また、洪積層の沈下と沖積粘土層の沈下をあわせた全沈下については、既に沖積粘土層の沈下が終了しているため、最近の沈下は洪積層のそれと一致しており、8月末現在9.5m、その沈下速度は8cm/月で徐々に減少している。洪積層の沈下は当初予測と比較して極めて速いと判断されたため、それまでの沈下実測値をもとに洪積層の沈下の見直しを行った。

洪積粘土層の沈下には、排水条件、圧密係数、圧密降伏応力等が影響するが、最も影響を与えるものは排水条件であると考え、排水条件を変えたケースについて感度分析してみた。その結果、非常に速い実測沈下は、当初の排水条件に更に3層の砂層を排水層に加えることにより再現できた¹⁾。

図-7の修正後の計算沈下曲線と実測値を比較してみると、揚土以前においては実測沈下が遅れて生じ、0.5mほど小さいが、揚土後においては両者はほぼ平行に推移し、その傾向は現在まで継続している。将来にわたり所要の埋立天端高を確保するという面からは、揚土時を始点としてそれ以降の沈下量が問題であるが、両者がほぼ平行であることは揚土後において計算値と実測値がほぼ一致していることを示している。

これらの結果、沖積粘土層と洪積層の各々の沈下実測をもとに修正した計算値の和により、海底地盤の全沈下量を求めることができる。計算沈下に用いる土質条件としては、沖積層は土質定数を、洪積層は排水層を修正したものを採用した。

また、この排水条件を用いて一般工区に配置されている沈下板の洪積層の実測沈下量と計算沈下量を比較したところ、図-9に示すように両者は一致することが分かった。

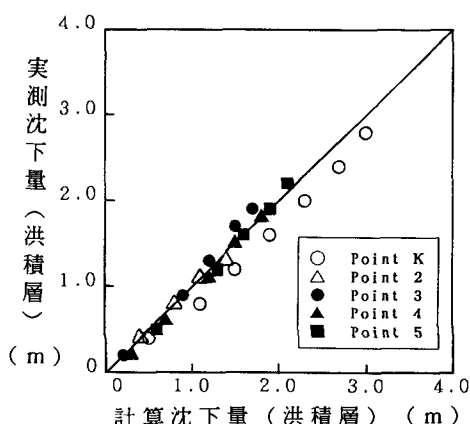


図-9 実測沈下量と計算値の比較(洪積層)

(3) 埋立土の圧縮

沈下管理のためには海底面の沈下の他、埋立土層自体の圧縮量及び各種地盤改良による地盤の締固めによる圧縮量の把握が必要となる。

a) 埋立土の自然圧縮

調査した埋立土は和歌山県加太産土、大阪府阪南産土及び兵庫県淡路産土(マサ土)である。いずれもバージで運搬され、直接リクレーマ船により揚土したドライ揚土である。なお、加太産土については、バージ船から一旦海中に仮置きしたのち、リクレーマ船で揚土したウェット揚土も調査した。揚土厚さは約12~14mで、盛土内沈下板と表面沈下板の沈下量の差から埋立の圧縮を求めた(図-10)。

この結果から、ドライ揚土は60cmの圧縮量を、ウェット揚土は20cmの圧縮量を想定した。

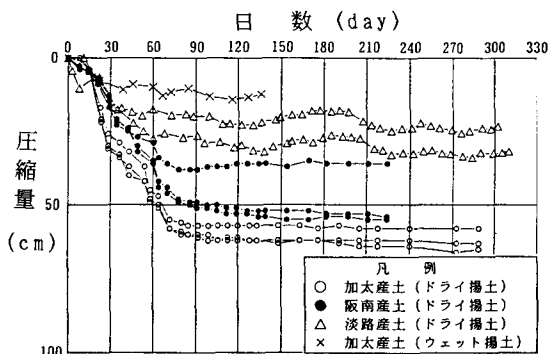


図-10 埋立土の自然圧縮量

b) 地盤改良による締固め圧縮沈下量

空港島の埋立土の締固めのための地盤改良工法としてMVT（大型タンパーによる振動締固め工法）、DC（動圧密工法）とSCP工法が採用されている。締固めによる圧縮沈下量としては、調査工事の結果をもとに、次のとおり想定した。

$$MVT = 0.5 \text{ m}$$

$$DC = 1.5 \text{ m}$$

$$SCP = 0.7 \text{ m}$$

5. 沈下管理システムの適用

(1) 沈下管理システムの適用例

空港島内での沈下管理システムの事例を述べる。図-11は、空港島エプロン部での沈下管理の一例である。揚土①は平成2年8月29日にCDL+8.39mで揚土されている。その後、海底面の圧密沈下と埋立土の圧縮により平成3年2月13日には $H_{obs.} = CDL + 6.12\text{m}$ に沈下している。この時点で平成5年3月末の計画天端（管理基準）と比較した。

開港日までの残留沈下量 $S_r = 2.31 \text{ m}$

開港時の施設高 $H_{Tar.} = CDL + 5.60 \text{ m}$

埋土層の圧縮沈下量 $S_f = 0 \text{ m}$ （揚土後3ヶ月以上経過しており、埋立土の圧縮は終了している）

地盤改良はMVTなので圧縮沈下量 $S_i = 0.50 \text{ m}$

エプロン舗装によるかさ上げ量 $R = 0.70 \text{ m}$

(1)式を再掲すると

$$\Delta H = H_{Tar.} - H_{obs.} + S_r + S_f + S_i - R$$

各々代入して、天端の過不足量 $\Delta H = 1.59 \text{ m}$

平成3年6月9日に揚土②を層厚1.50mで施工した。出来高はCDL+7.34mであった。

揚土②後、平成3年7月22日現在の実測天端と平成5年3月末の計画天端（管理基準）を同様に比較した。 $H_{obs.} = 6.87 \text{ m}$ 、 $S_r = 1.35 \text{ m}$ 、 $S_i = 0.50 \text{ m}$ 、 $R = 0.70 \text{ m}$ であるので(1)式によると天端の過不足量 $\Delta H = -0.12 \text{ m}$ となり、12cmの高めに推移していることとなり、これ以上の揚土は必要ないことが分かる。

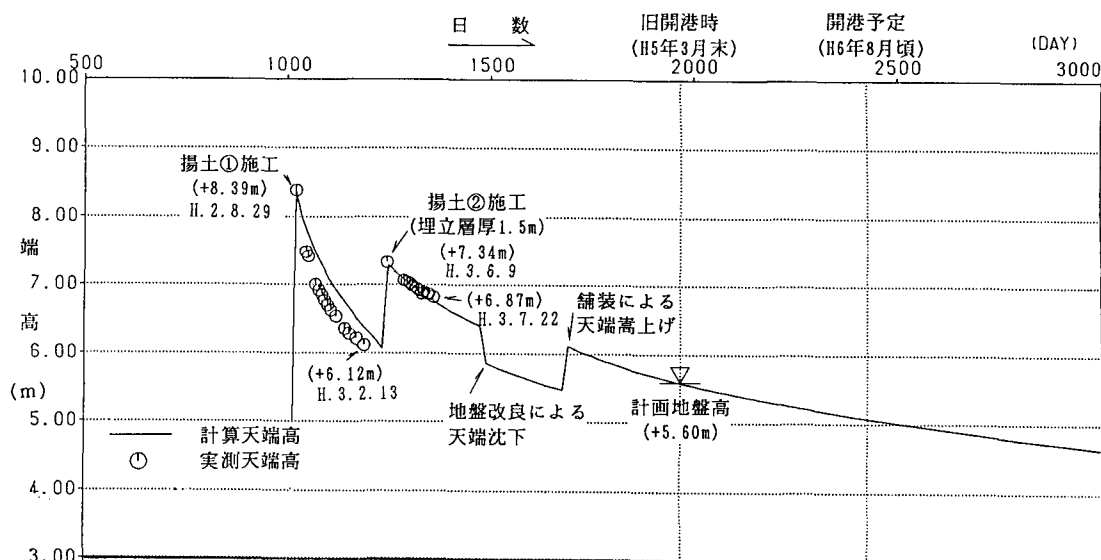


図-11 エプロン部での沈下管理例

(2) 沈下管理の精度

図-12には、埋立の終了した区域の197点を選んで、実測天端高と残留沈下量から推定した天端高さと計画天端高さとの差を頻度分布で示す。これによると、平均は+0.43 mで、分散幅は0.65 mであった。ほとんどが管理基準である平成5年6月末の計画天端を上回っており十分な管理が行われている。計画天端を下回ると予想される約20%は天端高さが足りないため今後揚土を行う予定である。

また、空港諸施設の建設にあたっては、切盛バランスを図りつつ、諸施設が所定の天端高さになるように施工時の基面高さを調整していく予定である。

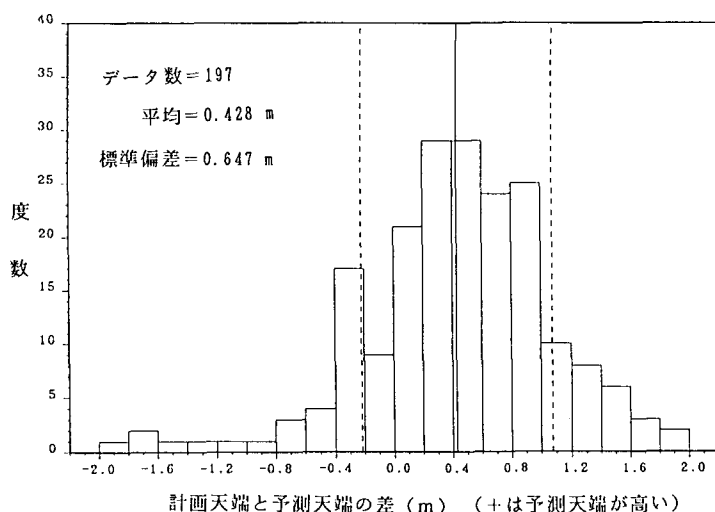


図-12 平成5年3月末時点での実測天端からの予測天端と計画天端との比較

6. おわりに

埋立の進捗は、9月15日現在投入総土量の95%にあたる1.73億 m^3 が投入済みであり、平成3年末には終了する予定である。

すでに埋立済みの区域では旅客ターミナルビル・管制塔などの建築物群の建設が進められている。沈下速度が約8 cm/月もある中での施設建設にあたっては、開港時に各施設が所定の天端高さに推移させるため、施工時から開港時までの残留沈下量の正確な予測による基面の設定が必要となっている。このため、100mメッシュ点での沈下管理の他、

各施設での天端管理をおこなっていくこととしている。

【参考文献】

- 1) 小松明・及川研・岩崎三日子：関西国際空港—空港島の造成—，土質工学会誌「土と基礎」，Vol. 39, No5, Ser. No. 400, pp. 25～30. 1991年5月.
- 2) Arai, Y. Oikawa, K. and Yamagata, N.: Large-Scale Sand Drain Works for the Kansai International Airport Island, Proc. of the international conference on geotechnical engineering for coastal development (GEO-COAST'91).

PHRI Vol. 1 pp. 281-286,
Sep. 1991

- 3) 及川研・小松明・鈴木慎也・山縣延文：関西国際空港の埋立に伴う洪積層の沈下，第26回土質工学研究発表会，平成3年発表講演集，2分冊の2 pp. 1201～1204，土質工学会，1991年.

- 4) Endo, H. Oikawa, K. Komatsu, A. and Kobayashi, M.: Settlement of Diluvial Clay Layers Caused by a Large Scale Man-Made Island, Proc. of the international conference on geotechnical engineering for coastal development (GEO-COAST'91). PHRI Vol. 1 pp. 177-182, Sep. 1991