関西国際空港２期空港島造成工事における沈下・層厚管理について

MANAGEMENT FOR SETTLEMENT IN THE SECOND PHASE CONSTRUCTION WORK OF KANSAI INTERNATIONAL AIRPORT PROJECT

平林弘[1]・森川嘉之[2]・鈴木慎也[3]・田端竹千穂[4]
Hiroshi HIRABAYASHI, Yoshiyuki MORIKAWA, Takechiho TABATA and Shinya SUZUKI

[1]正会員　株式会社ドラムエンジニアリング　（〒102-0083 東京都千代田区麹町四丁目5-21 ）
[2]正会員　関西国際空港株式会社 建設事務所（〒549-0001 大阪府泉佐野市泉州空港北１番地）
[3]正会員　関西国際空港株式会社（〒549-8501 大阪府泉佐野市泉州空港北１番地）
[4]正会員　関西国際空港用地造成株式会社（〒549-0001 大阪府泉佐野市泉州空港北１番地）

The 2nd phase construction work of KANSAI International Airport are being performed even farther offshore than in the 1st phase where the water depth is approximately 19.5m and reclamation area is about 545ha. To reclaim land over such a vast area and complete the island airport in a short period of time, maximum use is being made of the experience accumulated during the 1st phase construction. To prevent uneven settlement, many magnetic-transmission type water pressure gauge and settlement plates have been installed to measure the amount of settlement during construction work and consideration of the predicted settlement during and after construction should be reflected in the design of the airport island. This report outlines management for settlement in the 2nd phase construction work.

Key Words : *Reclamation ground, Settlement, Settlement gauge*

１．はじめに

関西国際空港２期空港島用地造成工事は，延長約13kmの護岸を築造した後，その内側を山砂等で埋立てることにより，545haの空港用地を造成するものである．工事海域の水深は約18～20mで，海底下には層厚約20～26mの軟弱な沖積粘性土層とその下に厚さ数百mにも及ぶ洪積層が堆積しているために，平均約18mの沈下が見込まれている．１期空港島の沖合側に建設されるために，波浪や潮流等の気象・海象などの自然条件がより厳しくなるだけでなく，規模や工期についても厳しい中での施工となる．空港としての機能を長期間維持していくためには，供用開始以降も続く長期的な沈下を考慮して埋立地を造成する必要がある．２期空港島用地造成工事では長期的な沈下予測に基づいて埋立層厚を設定しているため，各施工段階で所定の埋立層厚を精度良く施工することが重要となっている．また，沈下を精度良く計測し，施工にフィードバックするとともに，長期的な沈下の見通しを検証していくことが重要である．本論文では，２期空港島用地造成工事で実施している沈下・層厚管理について報告する．

２．埋立工事の概要

埋立工事は，サンドドレーン工法により地盤改良を行った軟弱な沖積粘性土層の地盤強度を増加させながら，土運船や揚土船を用いて段階的に均一な層厚の埋立地盤を造成していくものである．排水層としての敷砂を散布し（敷砂①），直径40cm，長さ約25mのサンドドレーン打設後，土運船直投による水深－６mまでの敷砂②・直投①，土運船直投による－３mまでの直投②，揚土船を用いて直接揚土する＋9.5～12mまでの揚土①という順に施工が進み，埋立地は陸化する．揚土①に引き続き，護岸外部より揚土船により仮置きした土砂を重ダンプで運び，ブルドーザーにより敷き均した施工層厚約６mの揚土②と最終調整層の造成の施工を行う．揚土②と造成の施工に当たっては，均一性の高い地盤を造成し，舗装施設の基礎地盤として必要な支持力等を確保するために，

1層60cmの層状施工で，大型振動ローラーを用いた転圧締固め工法により埋立地盤の地盤改良を行っている．図-1に埋立工事の流れを示す．また，敷砂①とサンドドレーンを除き，主に頁岩とマサ土からなる山砂を埋立材として使用している．

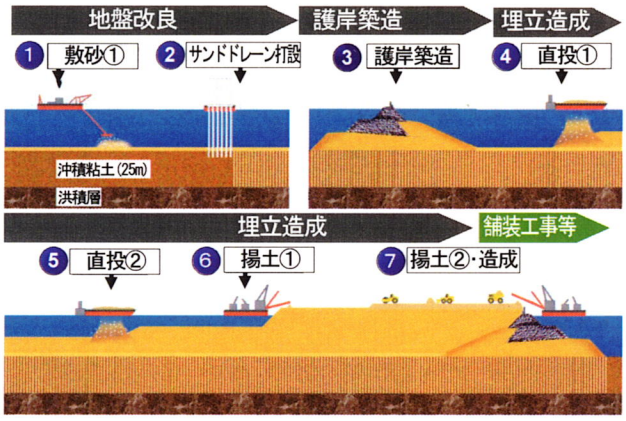

図-1　埋立工事の流れ

本工事は，軟弱地盤上に大量急速施工で空港島を造成するものであり，サンドドレーンで改良した沖積粘土の地盤強度が増加するのを持ちながら，不同沈下が発生しないように，薄層均一施工を行う必要があった．また，供用後ほぼ沈下が収束するまでの長期間にわたり空港機能を満足する地盤高を確保できるような埋立層厚を設定し，各施工段階毎で所定の層厚となるように施工を行う，層厚管理が大きな特徴である．

安定管理としては，敷砂②完了後と直投②開始前に，チェックボーリングを実施し，地盤強度の発現状況を確認することで次工種着手の判断を行っている．

3．沈下・層厚管理の必要性

埋立土砂などの荷重をかけると，軟弱な沖積粘土はサンドドレーンによって地盤改良されているために，施工中に大きく沈下し，短期間で沈下は終息する．一方，沖積粘土の下に存在する洪積粘土は施工後も長期間に渡り沈下する．そこで，空港島用地造成に当たっては，施工中の短期的な沈下だけでなく，長期沈下にも対応した管理を行う必要がある．

施工中に急激な沈下が発生するということは，隣接する施工エリアで施工時期が異なる場合，最初に施工した天端高に合わせた施工を行うと，最初のエリアで既に沈下が大きく発生しているが，後続エリアの沈下が発生していないため，図-2で示すように，隣接するエリアで施工層厚も残留沈下量も異なるために埋立地盤の不陸の原因となる．したがって，隣接するエリアで施工層厚が大きく変化しないように，できるだけ均一な層厚になるように施工する必要がある．

また，施工完了後も沈下が長期的に継続することから，

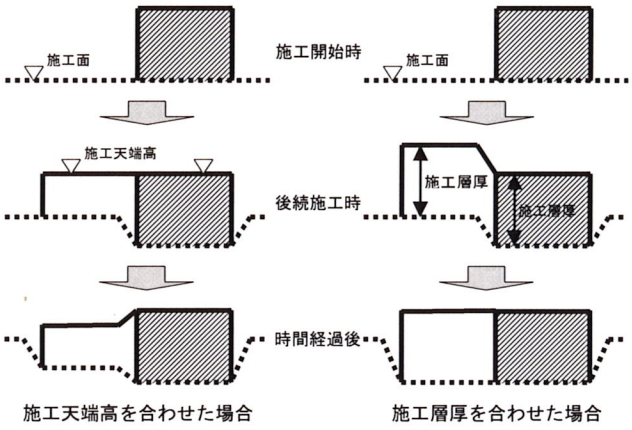

図-2　施工履歴差による埋立地盤の不陸

長期的な沈下予測に基づいて必要な埋立全層厚を設定している．長期的な沈下の予測において，沈下の経時変化に対しては排水条件等の不確実性が入り込み，正確な予測を行うことが難しいが，最終的な沈下についてはより確かな見通しを持てる．このため，短中期的な沈下の推移に左右されず，必要な地盤高を確保するために，埋立全層厚を管理目標とした．埋立層厚の設定概念を図-3に示す．各施工段階で把握した施工層厚と必要全層厚との差を計画施工層厚として埋立最終工程である造成において最終的に確定し，管理している．

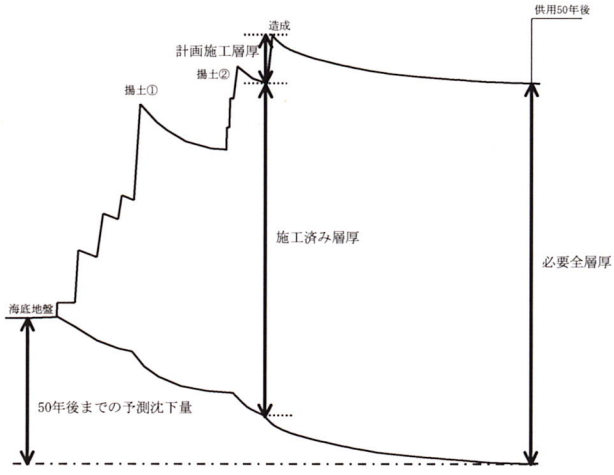

図-3　埋立層厚の設定方法

以上，施工中だけでなく長期的な視点からも，各施工段階における施工層厚を正確に把握し，最終工程において必要全層厚を確保するという「層厚管理」を行った．一方，施工層厚を把握するために必要な短期的な沈下予測を正確に行うための，沈下計測と予測のフィードバックシステムとしての「沈下管理」と，埋立全層厚を決めるための長期的な沈下の見直しを検証していく「沈下管理」も重要な技術課題である．

4．層厚管理

軟弱地盤上への人工島造成では，施工中および施工完了後に生じる不同沈下量を最小限にするために，薄層均一な施工層厚で埋立地を造成することが重要となる．そこで，本工事では施工段階毎に施工中の沈下量を考慮して目標天端高を設定し，所定の施工層厚を管理ブロック毎に確保する，層厚管理[1]を基本としている．

土運船による土砂の直接投入時には，海底に投入した土砂の堆積形状を正確に把握し，そのデータをもとに次の投入計画を綿密に立て，その計画に基づいて高い精度で土運船の位置決めを行う必要がある．そのために本工事では，ナローマルチビーム方式による深浅測量（図-4）や，コンピューターによる土砂投入堆積形状シミュレーション（図-５），ＲＴＫ-ＧＰＳによる位置決め（図-６）など，最新技術を導入した情報化施工を行なった．これにより，不陸が少ない薄層で均一な埋立層が形成され，精度の高い層厚管理が可能となる．

敷砂②以降の各施工段階での施工層厚は，まず各施工段階までの設定層厚の累計を求め，最初の施工層である敷砂①での設定と実施工との過不足層厚を加味したものを目標施工層厚とする．次に，敷砂②施工開始前の事前測量地盤高に目標施工層厚を加算した地盤高から，施工中の沈下量として事前測量から施工完了日までの沈下量

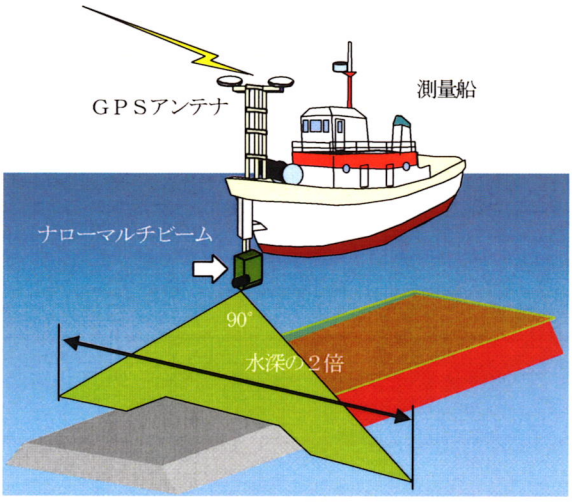

図-４　ナローマルチビーム方式による深浅測量

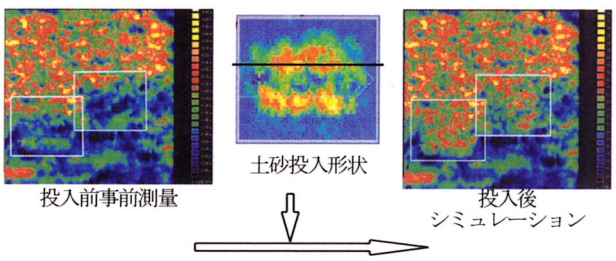

図-５　投入土砂堆積形状シミュレーション

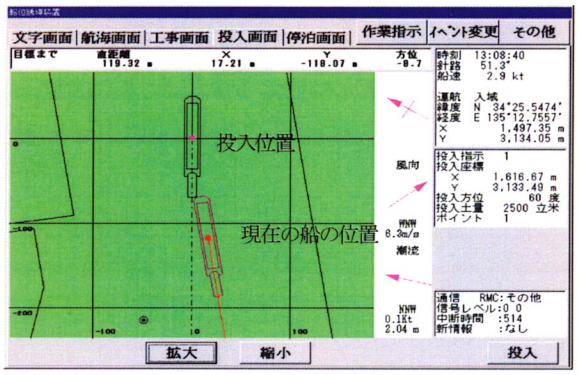

図-６　土運船位置決め

を差し引いた数値を目標天端高として設定する．

施工中の沈下量は，沈下計や沈下板による実測沈下量を用いるが，沈下計等が設置されていない管理ブロックでは計算により算出した．このとき，沈下計等のある管理ブロックにおいて，実測沈下量と計算沈下量との比を沈下比として算出し，沈下計等のない管理ブロックの計算沈下量に乗じて補正を行った．

計算に必要な載荷履歴（荷重履歴）は，土運船による土砂投入前後にナローマルチビーム方式による深浅測量を実施し，取得した地盤形状から設定した．日々の測量データを基に管理ブロック毎に平均化した地盤高の経時変化を天端高推移図として作成した．

沈下計のある管理ブロックでは，実測沈下量と天端高推移図から施工層厚を把握するとともに，層厚を入力した沈下計算を行うことで，図-７に示す沈下比（実測値／計算値）を算出した．沈下計のない管理ブロックでは，施工地盤高を入力した沈下計算から得られる計算沈下量と直近の沈下計の沈下比を用いて，施工層厚を算出した．計算に採用した単純化した載荷ステップと，土運船による直接土砂投入の直投①までの実測とを比較した例として，図-８に示す．また，土砂投入前と投入後の深浅測量の差分を重ね合わせることで算出した施工層厚も上記手法で算出した施工層厚とよく一致していることを確認した．

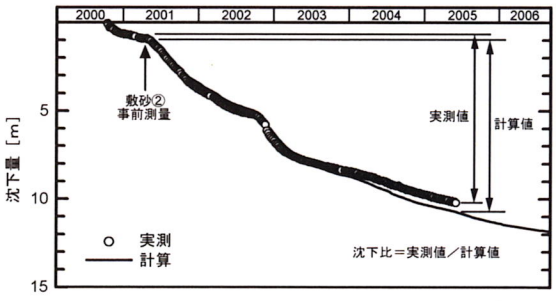

図-７　沈下比の算出

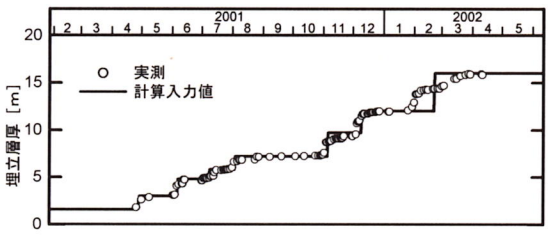

図-8 直投①までの埋立層厚と計算用荷重ステップ

5．沈下管理

(1) 沈下計測

施工中に発生する沈下量を考慮した施工層厚を確定するためには，沈下量を出来るだけ精度良く把握する必要がある．そこで，磁気伝送水圧式沈下計と呼ばれる沈下計を採用し，施工開始からの海底地盤の沈下を面的に計測している[2)]．これは水圧を計測する埋設型の沈下計であり，水圧と潮位および大気圧から沈下計の標高の変化としての沈下量が算出され，データ伝送方式に低周波磁界を用いるものである．従来用いられてきた鋼製沈下板は沈下計測のための鋼管が埋立地盤面より立ち上がっており，鋼管保護のために土運船による土砂直投を行うことができず，ガット船などによる特殊施工とならざるを得なかった．また，沈下板の鋼管は作業船舶の航行障害物ともなることから，施工の進捗にあわせて鋼管継足し作業が発生し，埋立地の陸化前はダイバーによる海中計測作業も必要となる．そこで大量急速施工に伴う沈下計測の合理化を図るために，新しい計測技術である磁気伝送水圧式沈下計を導入することとした．沈下計は図-9に示す地点に設置し，面的な沈下傾向を把握できるようにした．

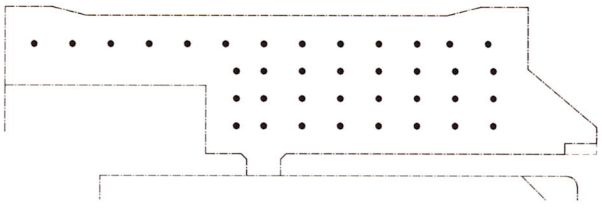

図-9 磁気伝送水圧式沈下計設置位置

揚土①は直投①までの薄層均一施工と異なり，40m×40mを施工単位として，層厚約15mに及ぶ埋立を極めて短期間に行うものである．したがって，施工層厚が増加するだけでなく，埋立地盤が陸化することにより施工荷重も急増することから，施工による原地盤の沈下速度が最大となる．このような条件下では，平面的な施工履歴差から施工時期により沈下量が異なることとなる．施工時期に応じた沈下を考慮して所定の施工層厚を確保する層厚管理を基本として，不同沈下の要因となる施工層厚の差異を極力少なくするために，直投①施工面上に直投②・揚土①施工層厚確認を目的とした新規沈下板（ＣＣ沈下板）を設置した． また，揚土①完了後直ちに，揚土①天端に地表面沈下板（揚土①定点）を設置し，沈下状況の把握に努めた．

揚土②・造成の施工に伴い，施工層厚把握，揚土①天端の沈下計測および磁気伝送水圧式沈下計位置での埋立材の圧縮量を把握するために，地表面沈下板を設置した．これら沈下計や沈下板の設置状況の概念図を図-10に示す．

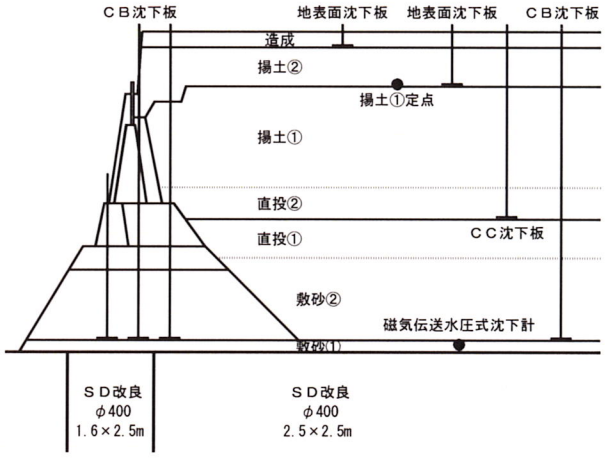

図-10 沈下計の設置状況

沈下管理では施工中の沈下をより正確に計測するだけでなく，長期的な沈下予測に基づいた埋立層厚を設定しているため，沈下予測の妥当性を検証することも重要である．図-11に示した埋立部に２ヶ所設けた重点観測地点においてロッド式沈下計，層別沈下計，間隙水圧計を設置した．洪積層の沈下挙動を計測，検証するとともに，滑走路供用以降の長期的な空港の維持・管理のための基礎データを収集している．図-12に計測機器設置イメージを示す．また，計測結果の一例として，計測櫓①での沈下計計測結果を図-13，計測櫓②での砂層過剰間隙水圧計測結果を図-14に示す．

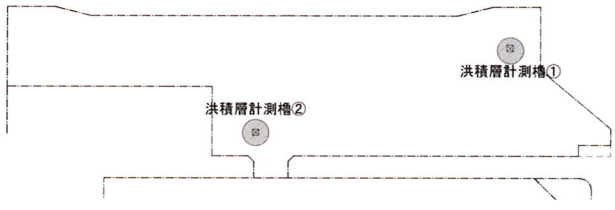

図-11 洪積層重点観測地点

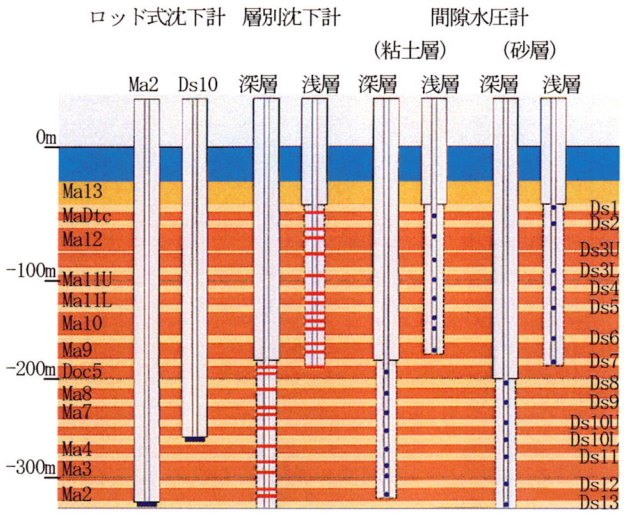

図-12　計測機器設置イメージ

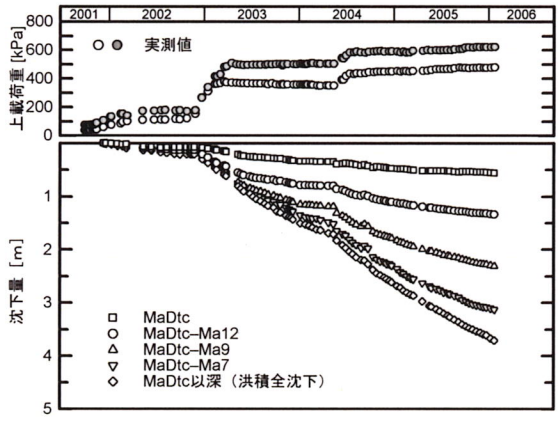

図-13　計測櫓①での洪積層沈下

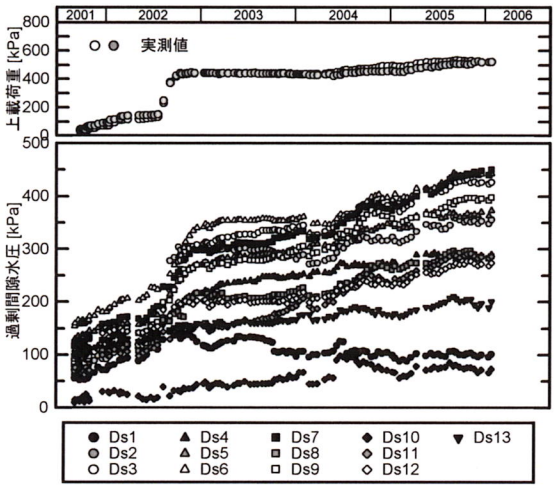

図-14　計測櫓②での洪積砂層過剰間隙水圧

(2) 埋立地盤の圧縮

海底地盤の沈下を把握することも重要であるが，施工した埋立層厚を正確に把握するために，埋立層自身の圧縮量の把握も重要な課題であった．磁気伝送水圧式沈下計と施工途中の埋立地盤上に設置した沈下計との沈下量を比較すると，同一期間であっても両者に差が生じていて，いずれも磁気伝送水圧式沈下計による沈下量の方が小さい状況であった．これは，磁気伝送水圧式沈下計は海底地盤の沈下量を計測しているのに対して，施工途中に設置した沈下計は海底地盤の沈下量に加えて，設置位置より下部の埋立層の圧縮量も計測していることが原因であるためである．埋立層の圧縮という現象は，１期空港島造成時にも観測されている．

図-15に示す磁気伝送水圧式沈下計とＣＣ沈下板による沈下量の差から，直投②によって敷砂②・直投①の層が圧縮するが，直ちに収束し，その後は変化していないことが分かる．揚土①施工時にはこの層が再度圧縮し，揚土①完了後も経過日数180日頃まで１ｍ弱の圧縮現象が続いている．

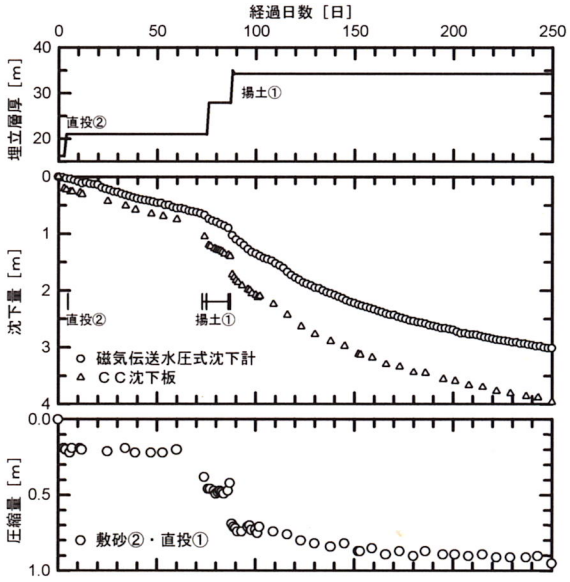

図-15　直投②・揚土①による埋立層の圧縮

揚土②施工開始からの結果を図-16に示す．揚土②施工開始直前に揚土①施工面上に設置した地表面沈下板による沈下量と，磁気伝送水圧式沈下計およびＣＣ沈下板による沈下量を比較したものである．揚土②施工開始後150日までは圧縮現象は見られないが，徐々に埋立層の圧縮が始まり，揚土②施工完了まで続き，約40cmである．しかし，ほぼ揚土②完了と同時に圧縮は収束している．埋立層の圧縮のうち，敷砂②・直投①の部分は10cm程度であり，揚土②施工中に既に収束している．埋立層の圧縮の大部分は直投②・揚土①の部分によるものである．

その後の造成においては，優位な圧縮は計測されていない．こうした埋立層の圧縮を考慮して埋立層厚をデータベース化している．

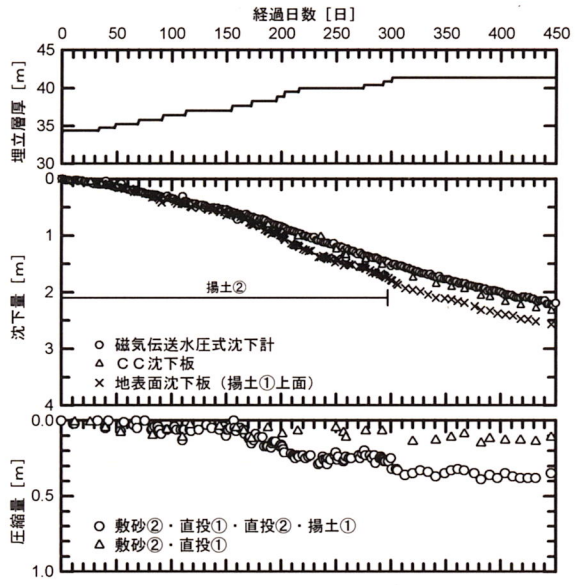

図-16 揚土②による埋立層の圧縮量

(3) 沈下予測の検証

図-２に示したように，２期空港島造成における埋立層厚設定の基本的な考え方は，供用50年後に目標地盤高を確保するための必要埋立層厚を設定するということである．その際，ある時期の実測沈下量が当初予測沈下量と比べて小さい場合でも，あくまでも50年後の予測沈下量を用い，実測値と計算値との比である沈下比の適用や，その時期以降の計算残留沈下量を用いてはいない．一方，沈下計測を行っている各地点において，実測沈下と計算沈下を絶えず比較し，両者に違いがある場合には，その原因の推定を行い，長期的な沈下の見直しを検討している．その一例を図-17に示すが，従来の土質力学モデルであるＤＢモデルや，洪積粘土の特性を加味した曲線モデルによって，実測沈下をかなりよく説明できている．

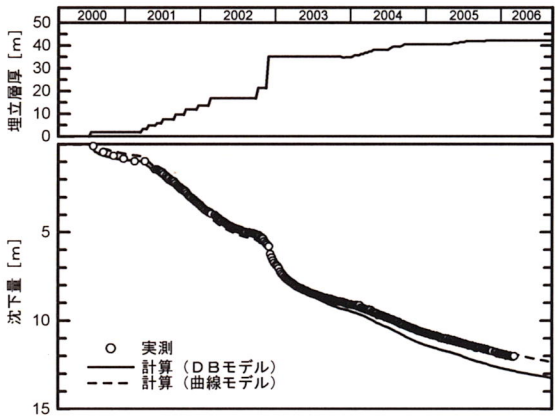

図-17 埋立部における沈下量（実測値と計算値の比較）

６．まとめ

長期的な沈下予測を基に目標地盤高を確保するために設定した必要層厚に対して，施工時には所定の層厚を確実に施工するように，沈下・層厚管理を実施した．また，施工の進捗にあわせて随時沈下計を設置することによってより精度の高い沈下・層厚管理を目指した．その結果，埋立層の圧縮という現象も確認でき，埋立層の圧縮量も考慮した計画部分の施工層厚の設定を行うことが出来た．このような綿密な沈下・層厚管理を行うことにより，2007年に限定供用される区域では，所定の埋立層厚を確保した空港島の造成が完了している．

参考文献

1) 水上純一，下川義和，播本一正：関西国際空港２期護岸工事における沈下層厚管理について，海洋開発論文集，第19巻，pp. 183-188，2003.
2) 田端竹千穂，水上純一，森川嘉之，浅香智昭：大規模埋立地における磁気伝送水圧式沈下計による沈下測定，海洋開発論文集，第19巻，pp. 171-176，2003.