

**招待論文**  
**INVITED**  
**PAPER**

## 招待論文

## 沖合空港の建設技術—沈下対策を中心として—

COUNTERMEASURES FOR SETTLEMENT OF THE OFFSHORE AIRPORT

神田勝己<sup>1</sup>・鈴木慎也<sup>2</sup>

Katsumi KANDA and Shinya SUZUKI

<sup>1</sup> 関西国際空港(沖)空港計画部長<sup>2</sup> 同 技術部技術一課課長代理

(〒549 泉佐野市泉州空港北一番地)

**Key Words:** man-made island, settlement countermeasure, pleistocene layer, differential settlement, horizontal deformation

## 1. はじめに

平成6年9月4日、大阪湾泉州沖5kmの海上空港(関西国際空港)が、わが国初の24時間運用可能な国内・国際便の拠点空港として開港した。関西国際空港は、構想が提唱されて以来約30年を経過するが、この間、幾多の課題を克服し建設されてきた。

この海上空港の建設は、沖合の水深の深い海域において、大規模な人工島および膨大で多様な空港施設を、軟弱地盤・大規模沈下と戦いながら、自然環境の保全に配慮し、限られた工事期間・工事費用のもとで、安全確実に建設するという、極めて困難な工事であった。その中でも特に、軟弱で厚い沖積粘土層および砂層と粘土層が互層となった洪積層は、埋立地の荷重によって大規模に沈下することが予想され、これらの『沈下(不同沈下も含む)』を精度良く予測し、開港後も続く沈下に対し、構造や機能に支障が生じない空港施設を建設することが、空港建設技術上最大の課題であった。

## 2. 関西国際空港の概要

## (1) 空港計画

供用を開始した1期計画の施設配置を図-1に示す。空港の面積は約510ha、滑走路は長さ3500mが1本で、その離着陸能力は年間16万回である。エプロンは69スポット(当面56スポット)で、このうち41スポット(当面33スポット)は、旅客ターミナルビルとボーディングブリッジで結ばれている。アクセスは、道路、鉄道(JR、南海電鉄)、船舶と3モードが用意されている(図-2)。全長3.75km、道路・鉄道併用の連絡橋によって、対岸の臨空タウンと結ばれ、道路は、阪神高速道路湾岸線や近畿自動車道路へと接続している。空港内に設けられた

鉄道駅や駐車場は、旅客ターミナルに近接して建設され、その利便性を高めている。

## (2) 地盤条件

空港島の建設海域は、平均水深約18mで、その地層については、層序は一様で、岸から沖に向かって傾斜した単斜構造となっているが、岸に平行方向には、ほぼ一様な層序、層厚になっている。建設海域の代表的な地層構造断面を図-3に示す。地盤の表層には、ほぼ正規圧密粘土で、自然含水比 $w_n$ 50~120%、一軸圧縮強度 $q_u=0.04z$ (kgf/cm<sup>2</sup>)の軟弱な沖積粘土層(Ac層)が約18m堆積している。さらに、その下には過圧密比OCRが1.3程度の洪積粘土層(Ma;海成粘土,Dtc,Doc;非海成粘土)と洪積砂礫層が交互に堆積している。洪積層の上部の約140mとそれ以深の層の間には不連続面があって、粘土の圧密降伏応力はこの面の上下で大きく異なり、空港島の埋立て荷重により圧密沈下が生じるのは上部の洪積層である。この地盤上に層厚約33mの埋立地が造成される。埋立土は、和泉層群系土砂(砂岩、頁岩の岩砕土砂)と淡路島マサ土(風化花コウ岩)からなる。

## (3) 空港建設

一期の空港建設工事の特徴は次のようにまとめられる。① 面積約510ha、護岸延長約11.2km、埋立土量約1億8千万m<sup>3</sup>という、土木史上有数の大規模造成工事であること。② 平均水深約18mという大水深における人工島造成工事であること。③ 建設海域の海底には、約18mの厚さの軟弱な沖積粘土層と、その下の数百mの厚さの洪積粘土層が堆積すること。④ 大水深であるがため空港島の埋立荷重は45tf/m<sup>2</sup>に及び、このため、沖積粘土層のみならず洪積粘土層にも正規圧密沈下が生じ、その量は11mを越えることが予想されること。

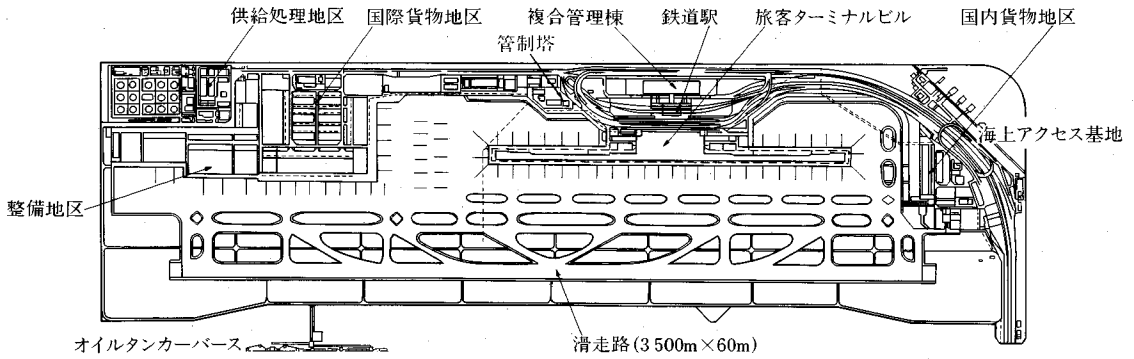


図-1 施設配置図

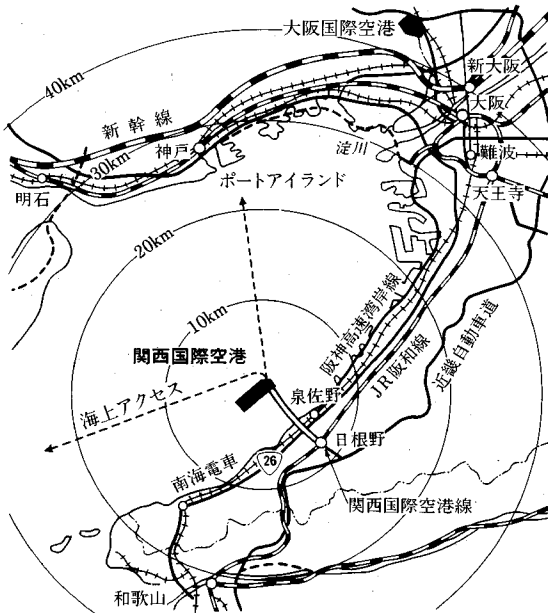


図-2 関西国際空港の位置とアクセス

区分	年	1987 (昭62)	1988 (昭63)	1989 (平元)	1990 (平2)	1991 (平3)	1992 (平4)	1993 (平5)	1994 (平6)
全体のスケジュール	着工	1.27							開港 9.4
護岸	地盤改良	■	■	■					
	本体工		■	■	■				■
埋立	地盤改良	■	■	■					
	本体工			■	■	■	■	■	
連絡橋	下部工		■	■	■	■	■	■	
	上部工								■
空港施設					■	■	■	■	■
空港連絡施設		■	■	■	■	■	■	■	■

図-4 建設スケジュール

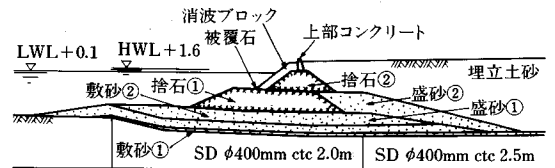


図-5 緩傾斜護岸断面図

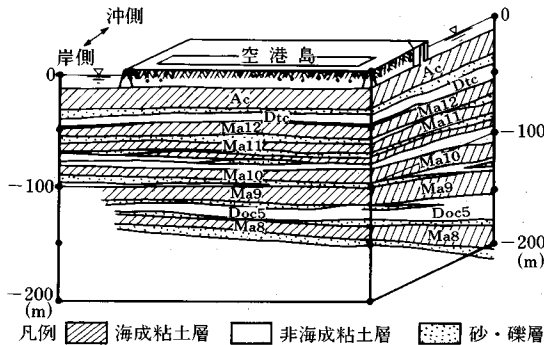


図-3 空港島地層構造断面図

⑤ 空港島の造成は5年間、さらに、空港施設建設も含めた空港建設全体は7年間という極めて限られた工期の中での急速施工を求められる(図-4)。このため、空港

島の造成工事においても5mに達する沈下が生じ、さらに、沈下進行中での空港施設の建設及び維持管理が必要であること。

このような厳しい条件下で行われた工事の概要を以下に示す。

空港島の建設工事は、沖積粘土層の地盤改良工事から始められた。外周護岸基礎の大部分および空港島内全域の沖積粘土層は、サンドドレーン工法によって改良された。サンドドレーンの打設本数は100万本に及び、自動制御装置を装備した12本あるいは14本の砂杭同時打設が可能な最新式のサンドドレーン船を最盛期には10隻用い、わずか1年余の施工期間で完了した。

次に、総延長11.2kmに及ぶ護岸の築造を行った。護岸の構造形式は、沈下に対する柔軟性、経済性、さらには魚礁効果などを考慮し、大部分を緩傾斜石積護岸構造

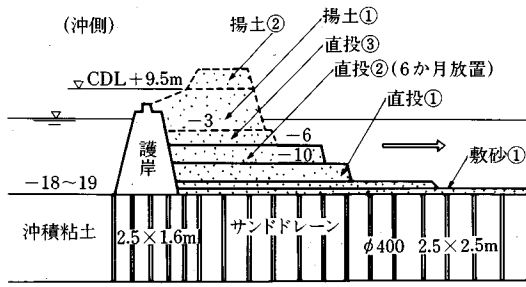


図-6 埋立施工手順

とした(図-5)。石材などの大量の資材や作業船などの船舶を、座標式工程管理表などを用い調達、施工管理することで、2年を待たずに護岸を竣工させた。

護岸の完成に続いて、空港島の埋立造成を行った。埋立の施工手順は以下の通りである(図-6)。まず1.5m厚の敷砂①を散布し、サンドドレーン工法により地盤改良を行った後、底開式土運船を用いた山砂投入による敷砂②を施工した。6ヶ月の圧密期間放置後、底開式土運船による直投①(-10mまで)、直投②(-6mまで)を施工し、再び6ヶ月放置期間をとる。その後、原地盤の強度が予定どおり増加していることを確認した後、底開式土運船による直投③(-3mまで)、揚土船による揚土①(+9.5m)を一気に施工した。揚土①の高さは、揚土船の施工能力及び盛土の安定性を考慮して設定したもので、さらに高い地盤高を確保する必要がある区域については、ダンプトラックによる揚土②を施工した。510ha、1億8千万m<sup>3</sup>の埋立に要した工期は3年で、最盛期には600万m<sup>3</sup>/月の埋立を、1日延べ86隻の土運船、12隻の揚土船によって行った。埋立の位置、範囲、日時などの情報をデータベース化し、工程管理および荷重履歴データとして活用した。

埋立が終わったエリアは、空港諸施設の建設まで、少なくとも6ヶ月の放置期間をとることとし、その間、埋立土の締固め工事を順次行った。

完成した人工島では、仮設備の整備を行うとともに、共同溝、雨水排水溝などの地下構造物や、旅客ターミナルビル、管制塔、滑走路などの空港諸施設について、工事工程を調整しつつ、資機材・人員を海上輸送することによって建設を進めてきた。空港施設の建設は3年で完成した。

### 3. 空港島建設における沈下対策

空港を建設するうえで、空港島建設から空港施設建設に至るまで、一貫した沈下対策を講じる必要があった。その概念図を図-7に示すが、沈下の基本的な問題は空港島建設段階でクリアーし、空港施設建設段階でフォ

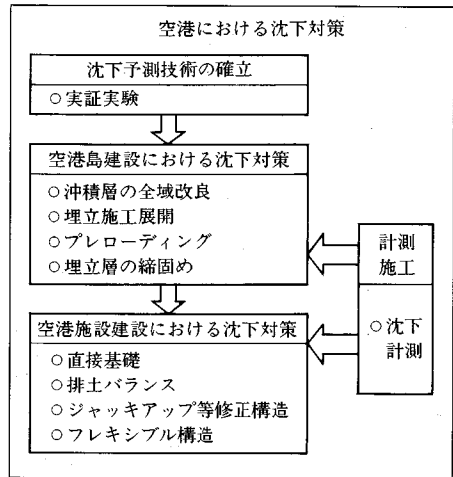


図-7 空港における沈下対策概念図

ローするという基本方針のもと、様々な対策を講じている。ここでは、まず、空港島建設段階における基本的な沈下対策について整理する。

#### (1) 課題と対策の基本方針

##### a) 沖積層

層厚18mの軟弱な沖積粘土層を未改良のまま埋立造成すると、30年を越える長期間にわたって大きな沈下が進行する。沖積層は埋立地の地表に近く、施設建設などによる局所的な荷重の不均一性が、あまり分散せずに伝播するため、不同沈下が大きくなり、また、沖積層に生じた不同沈下がほぼそのまま埋立地の地表に現れることとなる。さらに、沖積層を未改良のまま地盤の安定を確保しつつ行う埋立施工は長期間を必要とし、空港建設の要請に応えられない。このため、空港島全域の沖積粘土層を改良することとした。

##### b) 洪積層

洪積層については、深度が深く、改良工事を行うことは困難であるため、埋立荷重による自然圧密沈下になる。そこで、施設建設時から残された沈下(残留沈下)に伴う不同沈下を少なくする以下の対策を講じることとした。

##### ① 沈下予測技術の精度向上

45tf/m<sup>2</sup>にも達する空港島の荷重によって、上部の洪積層に正規圧密沈下が生じることが予測されたが、擬似過圧密性の高い洪積粘土層の圧密特性の評価、および、洪積粘土層と互層となっている砂層の排水性の推定については、ボーリングなどの事前の調査のみで予測することは困難である。このため、実証実験を行うことで、沈下予測精度の向上を図り、後続の本格的な工事にフィードバックすることとした。

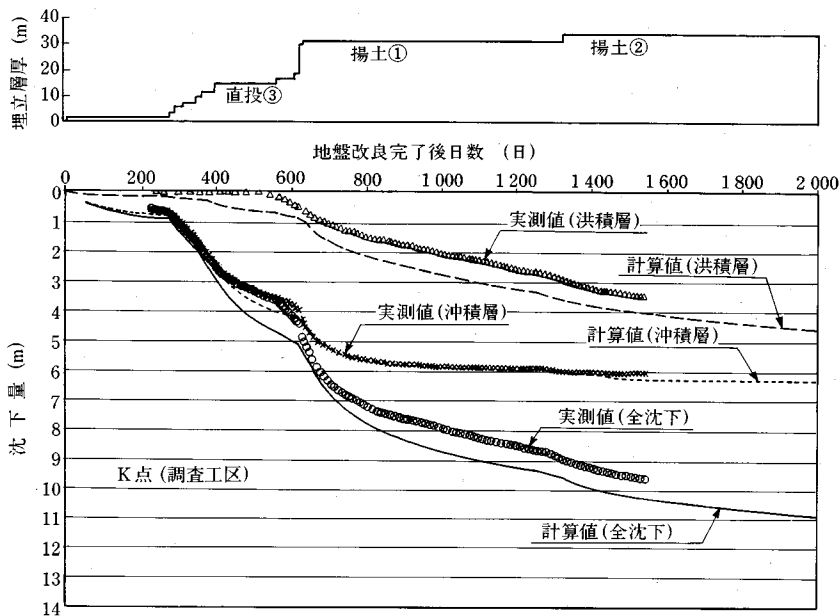


図-8 先行調査工区における沈下実測値と計算値の比較

## ② 計測施工

洪積層の残留沈下に伴う不同沈下に対しては、空港諸施設が構造上、機能上の問題が生じないよう対策を講じることとした。ただし、洪積層は比較的均一であり、かつ、地表から50m以深であることから、洪積層の不同沈下により地表に生じる不同沈下は小さく、対策が十分可能であるとの判断に基づいている。不同沈下の原因としては、荷重の不均一性によるもの、荷重の载荷履歴の違いによるもの、そして、地盤の層厚や圧密特性など土質条件の不均一性によるものの3つに大別することができる。前の2者については、沈下予測の精度を向上させることで、基本的には予測可能となるが、土質条件の不均一性による不同沈下は、一義的には決まらない。この予測法としては、モンテカルロシミュレーションなどの統計的予測法があるものの、ボーリング調査などの事前調査にも制約がある状況下では信頼性に問題があり、できるだけ実測に基づく予測を行う必要がある。このため、埋立地の建設段階で実測データを収集し、埋立地の施工天端高を決めるとともに、後の空港諸施設の設計、施工にフィードバックすることとした。

また、不同沈下によって、特に洪積層に加わる荷重が急激に変化する護岸周辺では、水平方向の変位が生じると考えられ、このエリアの施設に対する影響を把握する必要があった。この問題についても、実測データを施設建設にフィードバックすることとした。

### c) 埋立地盤

大規模な土量で広大な土地を埋立造成する工事においては、埋立ての施工時期(施工履歴)に違いが生じ、不

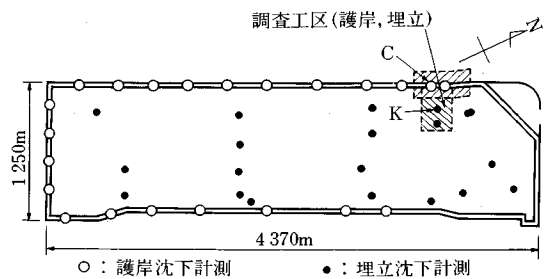


図-9 調査工区と沈下計測箇所

同沈下の原因となる。また、揚土船により急速に積み上げられた土砂は、比較的緩い状態で、施工後に圧縮沈下することとなる。このため、空港島の建設では、沈下対策に結びつく埋立て構造や埋立展開を計画するとともに、埋立層の締固めのための地盤改良を実施することとした。

## (2) 沈下対策

### a) 沖積層の全域改良

沖積層の改良工法としては、従来の臨海部開発での実績も多く、安定管理を慎重に行うことで高い信頼性が得られるサンドドレーン工法を採用した。

サンドドレーンは2.5mピッチの正方形配置としたが、図-8に示す沖積層の沈下の実測値にみられるとおり、6ヶ月ではほぼ沈下が終了し、一次圧密後の沈下もみられない。これは、沖積粘土層の一次圧密終了後にも、洪積層の沈下は継続して生じているため、空港島の重量が徐々に減少していること、すなわち、沖積粘土層にとっては徐々に除荷されている状態であることも関係し

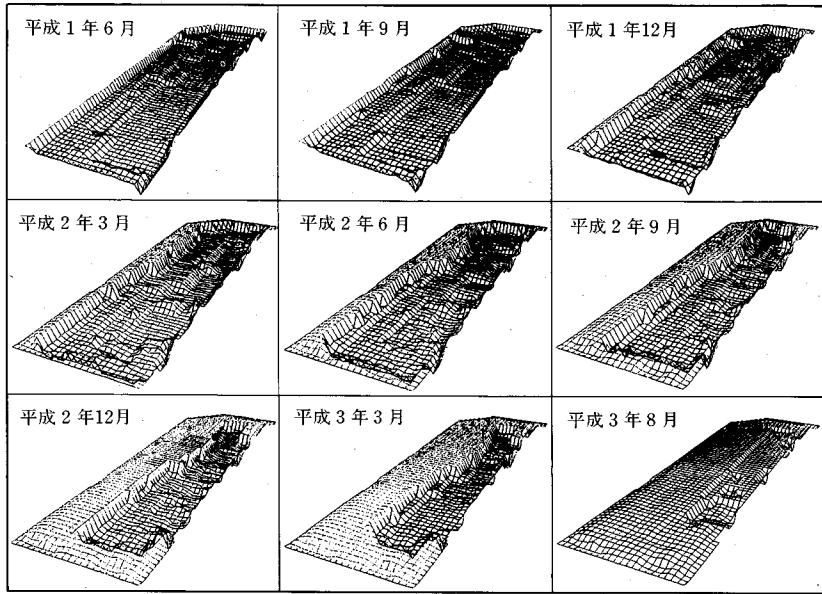


図-10 埋立展開鳥瞰図

ていると考えられる。

**b) 実証実験**

実証実験は、空港島内で最も沖合で、かつ、埋立荷重の大きな地区を選定し、全体の空港島の面積の約1%に相当する6haの調査工区を先行的に埋立て、その沈下を集中的に計測することで、沖積および洪積層の圧密沈下特性の予測技術の確立を図った。図-9に調査工区的位置を、図-8に計測結果を示すが、洪積層は、埋立が海面を切った揚土の段階から本格的に沈下を始めている。調査工区の沈下実測値を踏まえ、ボーリング調査などの事前調査段階で行った圧密沈下予測法を修正した。修正した予測法は、図-8のとおり実測値を再現している。

その後、調査工区のみならず、空港内の各地に設けた沈下計の実測値も、この予測法により説明でき、予測法の妥当性が確認されている。

**c) 埋立施工展開**

埋立は、図-10に示すように、地盤条件や空港施設の建设工程を考慮し、空港島短辺方向には淡路島側から泉佐野側に向かって、長辺方向にはほぼ平行に展開した。旅客ターミナルビルをはじめとする主要施設は空港島長辺方向に平行で、同一施設の埋立時期に大きなタイムラグが生じておらず、埋立時期の差による不同沈下の発生を抑えている。また、沖合に向かって徐々に粘土層が厚くなり、沈下の絶対量は大きくなるが、沖合の淡路島側から埋立てることで、沈下の大きい区域を先行的に沈下させ、施設建設後の残留沈下では空港島全体で均一化することができた。また、旅客ターミナルビル本館部や滑走路については、特に埋立時期の差が生じないように配慮し

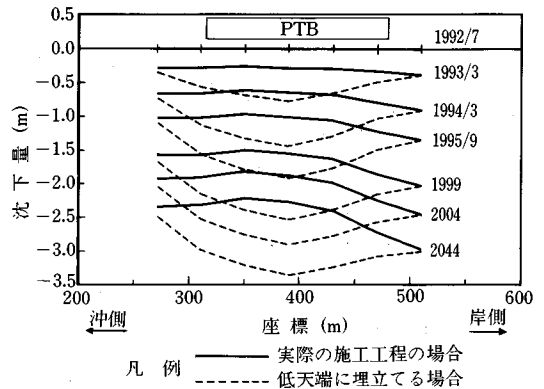


図-11 (a) PTBの埋立て方法の比較 (沈下分布図)

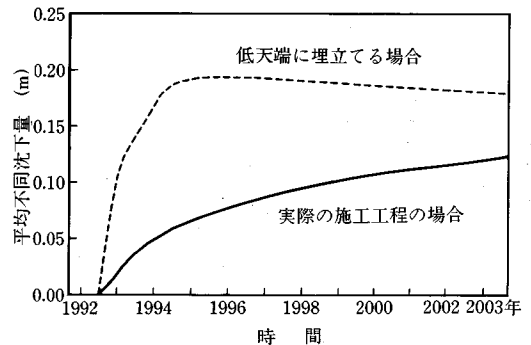


図-11 (b) PTBの埋立て方法の比較 (平均不同沈下量)

た。

また、揚土②の施工においては、揚土①までの沈下実測の結果に基づき沈下予測値を微修正し、最終的な盛り

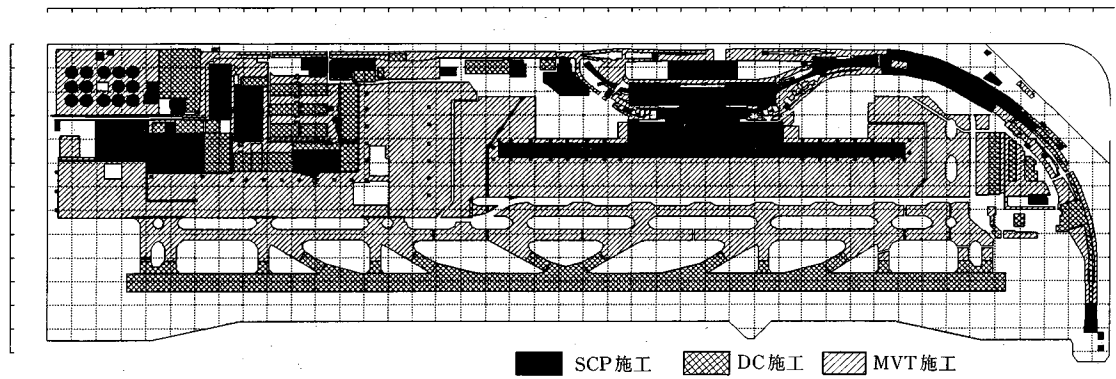


図-12 埋立土締固め工法別改良範囲

土高さを決定し、盛り立てることとした。

d) プレローディング

空港島内には、共同溝をはじめとする地下埋設構造物や、地下室を持つ旅客ターミナルビルなどの建築物が施工される。これらの施設を施工するにあたっては、埋立時には周辺地盤と同じ高さまで埋立てを行い、その後に土留め工などを用いつつ施工基礎まで掘削し、諸施設を建設した。

地下構造物の埋立て部分は、予め埋立高を低く抑え、その上に構造物を建設する方法も考えられるが、この場合には、構造物の荷重が、その施工とともに新たに加わることとなり、沖積層、洪積層に不同沈下が生じる。このため、プレローディングとして周辺と同じ高さまで埋立て、その後掘削する方法を採用した。

この効果を確認するため、旅客ターミナルビル本館において、実際の施工工程の場合の沈下と、埋立て時の高さを低くした場合に生じる沈下をシミュレーションにより比較し、図-11に示した。図には、後述する平均不同沈下量も示している。ビルの鉄骨が立ち上がった平成4年7月以降の両者の残留沈下、不同沈下に大きな差があることが分かる。

この他、航空機燃料の貯油タンクなどは、完成後に大きな荷重が沖積層などに加わるため、この部分はプレローディングを行い、予め沖積層を過圧密化することとした。

e) 埋立地盤の締固め

埋立層については、層厚が33mと厚く、最大粒径30cmの大きい礫を含み、水深3m以浅は揚土船で一気に埋立てた若齢岩砕地盤である。このため、埋立層の支持力や耐震性についての問題は少ないが、埋立土の自重や上載荷重による圧縮沈下、地震時のゆりこみ沈下などが生じ、空港諸施設に不同沈下が生じることが危惧され、不同沈下を抑える必要がある施設エリアの埋立層については、締固め工法による地盤改良工事を行った。地盤改

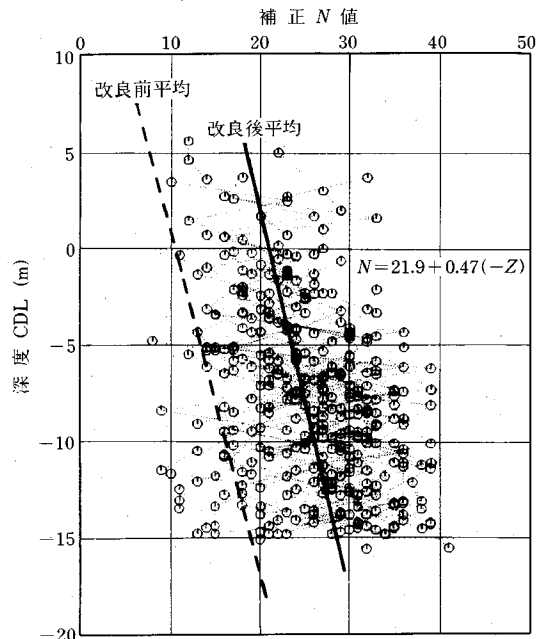


図-13 サンドコンパクション工法による改良効果

良面積は320haに及び、かつ、施工期間は、埋立てが完了してから上物工事に着手するまでの極めて短期間であることから、各種の地盤改良工法のうちの、岩砕地盤の施工実績などを考慮し、サンドコンパクション工法（SCP工法、砂杭径φ700、砂杭長15~25m、打設間隔2.3~2.5m、置換率5~7%）、動圧密工法（DC工法、ハンマー重量25t、落下高25m、打設間隔5m、11回打撃）、マンモスバイプロタンパー工法（MVT工法、タンパー面積9m<sup>2</sup>、バイプロ出力180kW、1分転圧2回）の3工法を選定した。各工法は、経済性、確実性等を考慮し、動圧密工法は一般的な建物および重要な舗装等の基礎、サンドコンパクション工法は重要構造物あるいは改良後の掘削を伴う建物等の基礎、マンモスバイプロタンパー工法は舗装等軽量の施設の基礎に用いている。各工法別

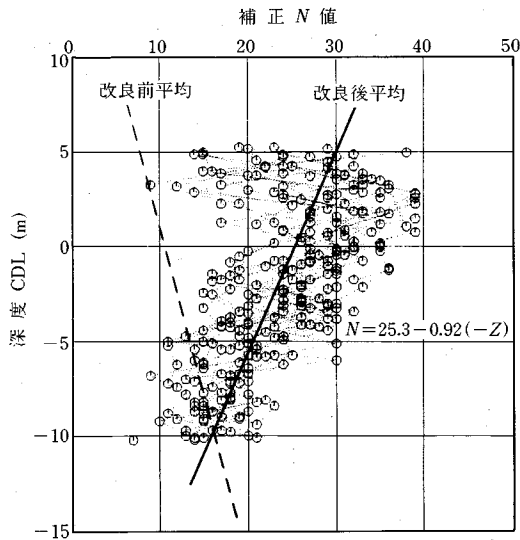


図-14 動圧密工法による改良効果

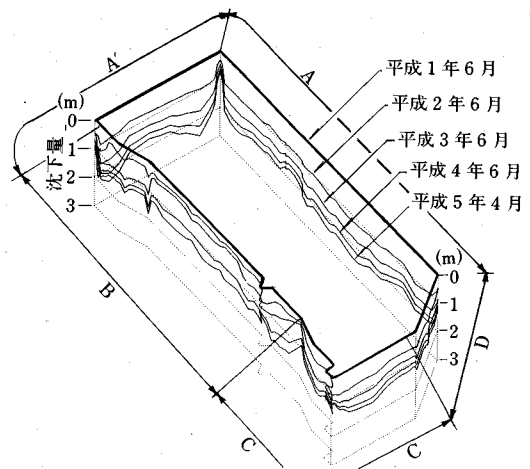


図-16 護岸の沈下分布

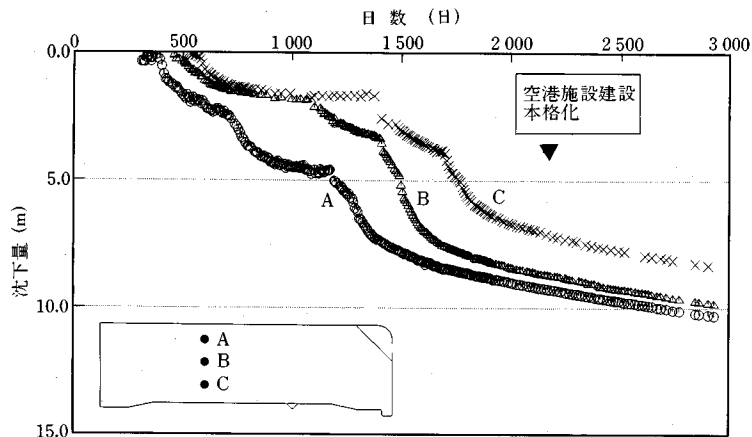


図-15 空港島横断方向の沈下傾向

の改良区域を図-12に示す。

埋立土の地盤改良に対しても、先行調査工区を設け、調査、設計、施工法の確認を行った。調査法としては、標準貫入試験から得られる  $N$  値を補正することで、締固め度合いの指標となることが確認され、広大な面積で急速に行われる地盤改良工事の効果を適切かつ迅速に確認するための管理手法として採用した。設計法については、現地に適合するよう打撃効率を設定することで設計法が確立できた。本工事においては、概ね  $3000\text{m}^2$  に一本の割合で標準貫入試験を行い、この結果をデータベースに入力し統計処理することで、 $N$  値の補正を行い、地盤改良効果を判定した。図-13, 14には、サンドコンパクション工法と動圧密工法による締固めの効果を、補正した  $N$  値により示している。

### (3) 空港島の沈下状況

これまで述べてきた様々な沈下対策を講じた結果、完成した空港島の沈下は、以下に示すような状況となっている。

#### a) 沈下状況

図-8に示したように、沖積層の沈下は6ヶ月でほぼ収束し、その後は洪積層のみが、次第に収束しつつ沈下している。

図-15には空港島の短辺方向に配置した沈下板の、埋立初期からの実測値を示す。粘土層厚が厚く、沈下の大きくなる沖側から埋立を行った結果、施設建設を開始した時期以降の沈下がほぼ平行になっていることが分かる。

図-16には、護岸が竣工してからの護岸の沈下分布を示す。護岸背後の埋立高さはほぼ同じで、埋立履歴の局所的な差も、先行的に埋立てた調査工区を除いて大きく



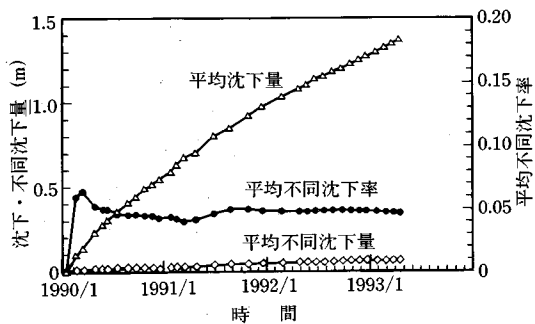


図-17 護岸の不同沈下の実測値

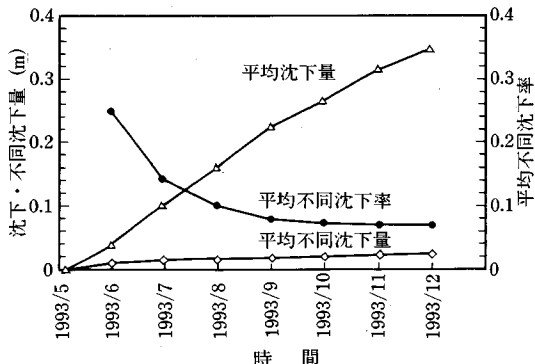


図-18 滑走路の不同沈下の実測値

ないため、荷重条件としてはかなり均一である。隅角部などでは、応力分散の影響で局所的に沈下が小さくなっているが、その他の部分では、局所的な不同沈下は見られず、数百mの長い波長のうねりがみられるが、その間は連続した滑らかな沈下が生じている。

### b) 不同沈下状況

上記のように、空港島はかなり一様な沈下となっている。この均一な沈下を定量的に見るため、実測値を統計処理し、以下で定義する平均不同沈下率 ( $F_{mean}$ ) によって評価する。

$$\Delta s_i = |s_i - s_{i+1}| \quad ; \text{不同沈下量}$$

$$\Delta s_{mean} = (\sum \Delta s_i) / N \quad ; \text{平均不同沈下量}$$

$$s_{mean} = (\sum s_i) / N \quad ; \text{平均沈下量}$$

$$F_{mean} = \Delta s_{mean} / s_{mean} \quad ; \text{平均不同沈下率}$$

ここに、 $s_i$  は観測点  $i$  の沈下量、 $N$  は観測点数

図-17には、沖側の護岸において、100m間隔で計られた沈下量を、背後の埋立が完了した日を基準にして整理し、平均沈下量、平均不同沈下量、平均不同沈下率として示している。初期には、データの誤差などの影響で平均不同沈下率が大きくなるが、時間とともに5%程度に収束している。また、空港島の中央の例として、図-18には、滑走路の舗装完成からの不同沈下状況を示す。観測期間が護岸よりも短い、やはり不同沈下率は6%程度に収束している。この値は、100m間の不同沈下で

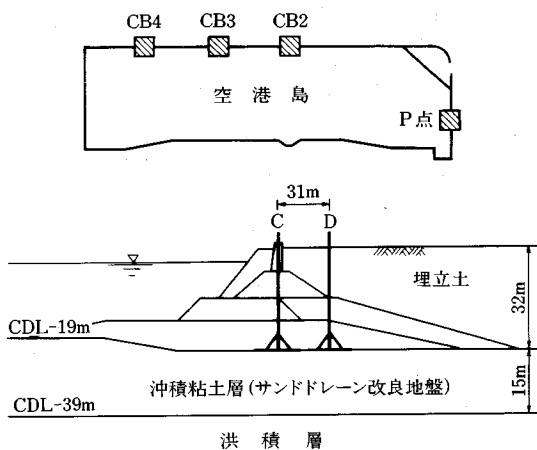


図-19 護岸近傍の水平変位の実測点

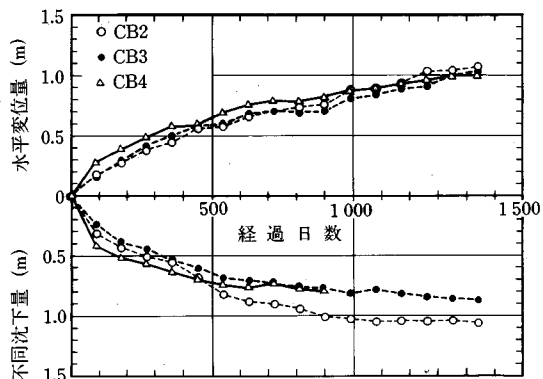


図-20 護岸における水平変位と不同沈下の変化

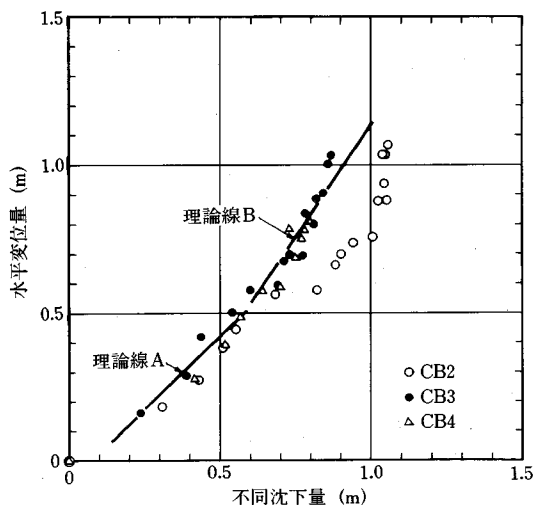


図-21 護岸の水平変位と不同沈下の関係

あり、これよりも測点間隔を短くしていくと、ほぼリニアに不同沈下率は低減し、50m間では、約半分の不同沈下になっている。これは、不同沈下の波長が数百mオー

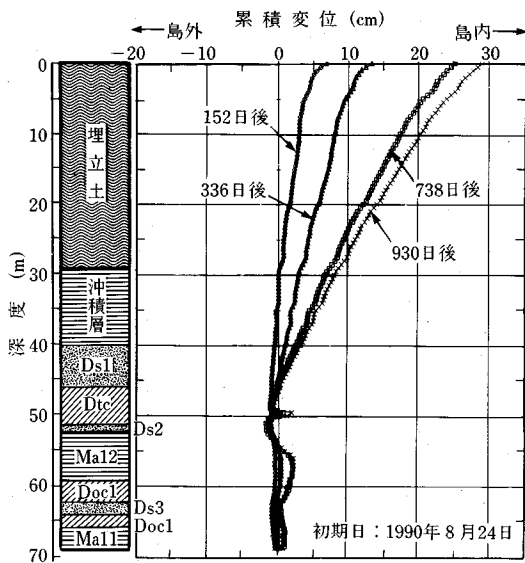


図-22 地中変位の実測値

ダーと非常に長いためである。

一般の比較的均一な地盤の埋立地でも、不同沈下率は10%程度と言われている。これに比べて、空港島の不同沈下は、かなり小さな値になっている。これは、深部にある洪積層の沈下のみが進行している中での不同沈下であるため、沖積層および埋立層の地盤改良の成果とすることができる。

次に、不同沈下に起因する現象として、水平変位の状況を見る。図-19に示す地点で、護岸背後の埋立を始めた時期からの、護岸法線の島内側への水平変位と、護岸近傍の不同沈下の経時変化を、図-20に示す。不同沈下量としては、護岸から30m島内側の点と、護岸との不同沈下量をとっている。護岸近傍では、主に荷重変化によって不同沈下が大きく現れるが、この不同沈下の進行に伴って、水平変位も進行している。不同沈下と水平変位の両者の関係を見ると、図-21に示すように、ほぼリニアな関係がみられる。この関係は、島を剛体と考え、不同沈下する粘土による回転運動によって水平変位が生じると考えた場合の図中に示す計算線にほぼ一致している。図-22には、護岸付近の傾斜計(図-19のP点)による地中の水平変位分布を示すが、洪積層上面を支点とした回転運動がみられる。このように、洪積層の不同沈下に起因する水平変位は、非常にシンプルな形で現れていることが確認された。

#### 4. 空港施設建設における沈下対策

##### (1) 課題と対策の基本方針

空港島造成における沈下対策によって、残留沈下およ

びそれに伴う不同沈下は、かなり低減されているものの、空港施設建設以降の洪積層の残留沈下は、3mを越え、空港施設の設計、施工においても、十分な沈下対策が要求された。

最大の沈下対策は、沈下が収まるのを待って施設を建設することであるが、厳しい工期との狭間で選択した方針として、沖積層の沈下がほぼ終了する6ヶ月以降に施設を建設することとした。

施設建設後の残留沈下に対しては、各施設の残留沈下に応じて建設時の施設高を高くする、いわゆる上げ越し施工を行った。また、この際、施設建設個所の沈下計測を行い、計測結果に応じて予測を修正し、上げ越し高を決定した。

不同沈下対策としては、施設荷重と周辺地盤との荷重差が小さくなるよう排土バランスを可能な限りとれるよう、施設荷重、地下構造および基礎工に工夫を凝らした。

施設の構造的な対策としては、建築物などの基礎形式として、基本的にベタ基礎による直接基礎を採用した。これは、建築物とその周辺地区との不同沈下を除くことをねらったものである。また、共同溝や半地下道路躯体などの長大構造物は、1ブロックを短くして、不同沈下に追随できる構造物としている。さらに、施設に生じた不同沈下の修正機構として、ほとんど全ての建築物は、ジャッキアップによる修正が可能な構造物としている。

水平変位の対策としては、構造の伸縮性を高めることで構造的に対応することとする。

##### (2) 沈下対策

###### a) 設計時の対策

不同沈下を抑えるため、施設建設による荷重変化を極力小さくするよう、設計上の配慮を行った。通常の建築物については、地下部分の掘削土の重量と建築物重量のアンバランスを $\pm 2\text{tf/m}^2$ 程度に抑えている。また、島内道路アバット部では、軽量盛り土材を用いることで、建設による増加荷重を低減している。また、図-23に示すように、施設配置上、地下1階を持たせている旅客ターミナルビル本館では、建物重量 $9\text{tf/m}^2$ に対し、排土重量は $17\text{tf/m}^2$ で、 $8\text{tf/m}^2$ のアンバランスが生じ、平面規模も $300\text{m} \times 150\text{m}$ と大きいため、荷重差が洪積層にも伝播し、荷重差による不同沈下が大きく生じることが危惧された。この不同沈下を低減するため、基礎下の地盤を重量材で置換して、アンバランスを $4\text{tf/m}^2$ 程度になるまで改善することとした。重量材としては乾燥密度 $3.5\text{tf/m}^3$ の鉄鉱石を選定し、2.5m厚で敷き詰めた。この鉄鉱石の不同沈下対策効果を予測するため、鉄鉱石がある場合と、ない場合の比較計算を行った。本館基礎の打設時期以降の両者の計算値を図-24に示すが、中央部での両者の差は20cm程度となっている。

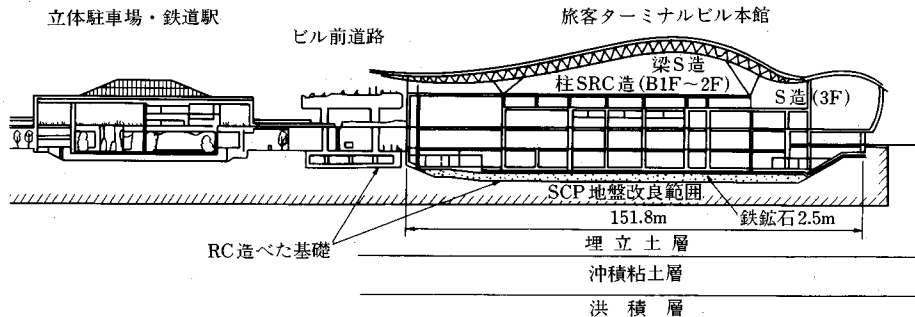


図-23 旅客ターミナル地区の沈下対策

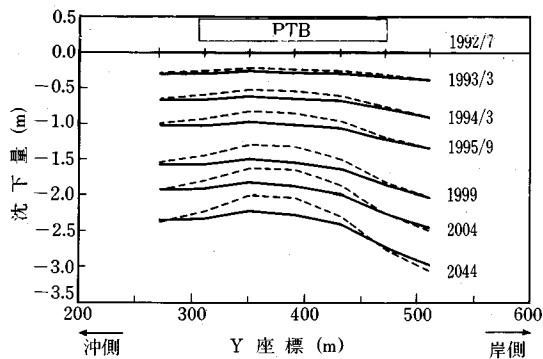


図-24 (a) PTBの鉄鉱石敷設の効果 (沈下分布図)

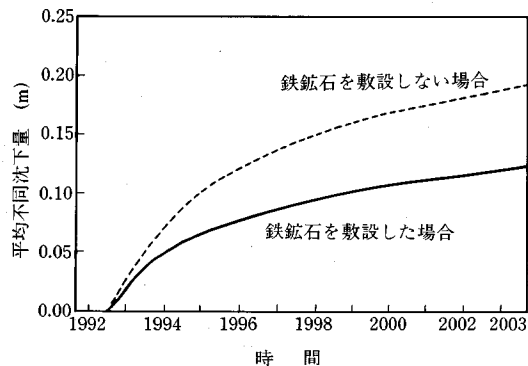


図-24 (b) PTBの鉄鉱石敷設の効果 (平均不同沈下量)

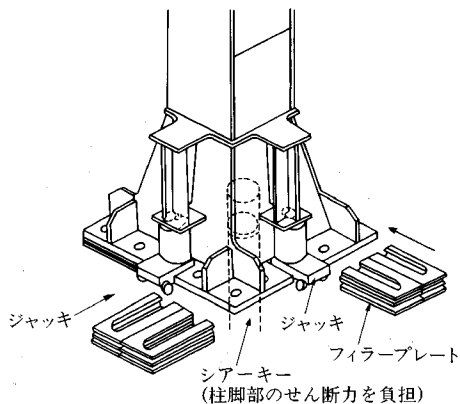


図-25 PTB

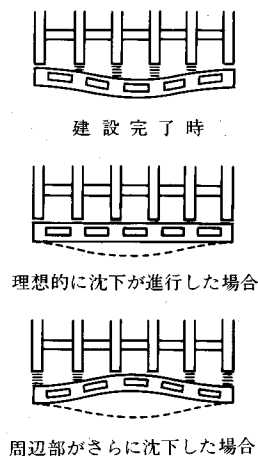


図-26 旅客ターミナルビル本館凸状不同沈下への対応

構造的な対応としては、前述のとおり、建築物の基礎形式を、図-23の旅客ターミナル地区にみられるように、ベタ基礎による直接基礎としている。旅客ターミナルビル本館や鉄道駅などの建築物が直接基礎になっているのはもちろんのこと、旅客ターミナルビルに300mの幅で接続している高架道路についても、この区間の基礎は、ビルと同様に排土バランスを考え、コンクリート躯体基礎として、ビルと一体に沈下するように配慮している。

また、建築物などは、柱脚をジャッキアップすることが可能なディーテールとしている。高架道路などの構造物も、杓座を取り替えることで、ジャッキアップによる調整が可能である。旅客ターミナルビルの本館のジャッキ

キアップ可能量は40cmで、その構造を図-25に示す。さらに、本館部分は周辺よりもやや荷重が小さく、凸状の不同沈下が生じることが予測されるため、図-26に示すように、建物中央部の基礎レベルを低く構築し、予めフィラープレートを挿入しておき、その後の不同沈下の進行に合わせてフィラープレートを抜いてレベル調整を行うことで、ジャッキ修正可能量を大きく活用するような設計としている。また、旅客ターミナルビル周辺地区のエプロンについても、プレストレストコンクリートと

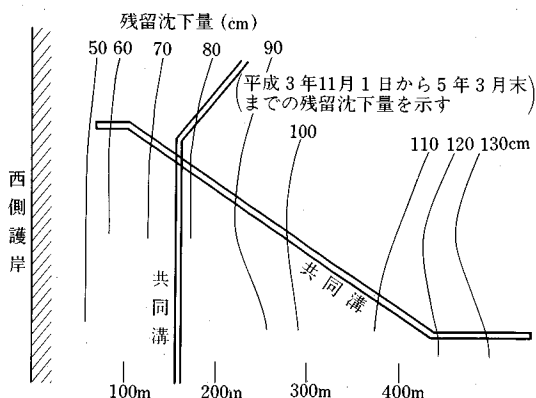


図-27 護岸近傍の共同溝の上げ越し量分布

し、予期せぬ不同沈下が生じた場合には、反力盤などを設置することでジャッキアップによる修正が短期間で可能な構造としている。

共同溝や半地下掘割道路などについては、構造物の柔軟性を持たせるため、1ブロックを通常よりも短くしている。例えば、共同溝は通常は1ブロック30mであるが、これを15mとしている。

また、不同沈下に伴って生じる水平変位に対しては、島外と島内を結ぶ構造物である連絡道路橋や進入灯点検橋などで、杓の可動量を大きくする、杓座幅に余裕をもたす、下杓を溶接によって橋脚に取り付け、その移設を容易にしたベースプレート方式にする、桁遊間を広くする、耐震連結装置や伸縮装置に余裕をもたせるなどの対策を講じている。

#### b) 施工時の対策

埋立完成後、6ヶ月を経て、施設の建設に入ったが、それでも、10cm/月にも及ぶ速度で沈下が進行する中での施工となった。

空港諸施設は、例えば旅客ターミナルビルとエプロンのように、施設相互の高さの整合がとれていない場合には、空港機能や排水機能上問題が生じる。ところが、施設の建設着手時期は、それぞれ異なり、沈下も場所によって異なることから、各施設を施工する高さの設定が問題となった。また、長大な雨水排水管、共同溝や滑走路、広大なエプロンなどの施設は、それぞれの施設が、機能上、許容勾配などの制約を持つが、施設全体を同時に着工することは困難である。

これらの問題を解決するため、空港島の各地の沈下予測計算に基づき、開港から開港50年後まで見通した中で、空港機能上問題の生じない施設高さを検討し、その結果を、全体の施設建設が概ね開始される時点（平成5年3月末、以下基準日という）において、施工計画高として設定した。この基準日以降の残留沈下量は2m程度

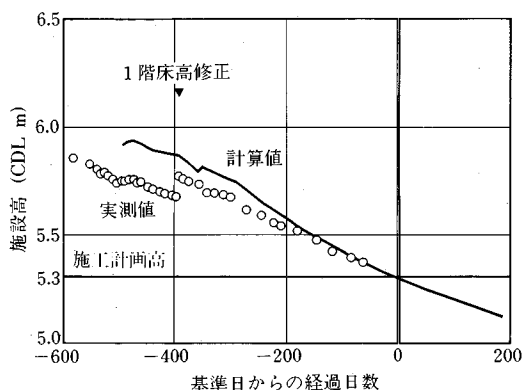


図-28 PTBの施設高の変化

で、空港内がほぼ一様に沈下すると予測されることから、この基準日における施工計画高を管理目標として空港島造成及び空港施設建設において天端高管理を行った。すなわち、施設の基礎工事におけるレベルを、施設建設時から基準日までの予測沈下量の分だけ施工計画高よりも上げ越して設定することとした。図-27には、共同溝の一部の上げ越し量を平面的に示す。埋立履歴の差と護岸ざわであることによる荷重の差が重なって、共同溝に沿った沈下が異なるが、共同溝の各点の上げ越し量を変えることで、概ね所要の計画高にすることができた。旅客ターミナルビルでは、掘削、鉄鉱石の布設、上部工建設と、施設建設に伴う荷重変動が大きく、沈下にも変動が大きかった。掘削時に上げ越し量を設定して工事に着手したが、当初の予測と若干異なる沈下が生じたため、基礎コンクリート打設時点で、10cm程度の修正を行い、計画高どおり施設高が確保できた（図-28）。

## 5. おわりに

空港建設における沈下対策について、空港島の建設と空港施設の建設段階の対策を記述した。空港の建設以前には、現地においてボーリングや音波探査などを始めとして多くの地盤調査を実施し、沈下対策を検討している。その際、地盤調査の内容・方法・結果の解析、さらには、沈下の予測・沈下対策など広範な問題点について、各学会の先生方から各方面にわたり御指導を頂戴した。その後、現地工事へと進んだが、工事の開始から空港の完成に至るまで、先生方に御指導を頂いてきた。実証実験により、洪積層の沈下は実験前の予測沈下速度を上回るといった情報が得られ、空港島と空港施設の設計を修正することとなった。緊急で重要な課題であったが、適切な御指導により無事解決し、この開港へと至った。先生方に対し誠心より感謝申し上げます。

関西国際空港は、さらに沖合に滑走路2本を建設する

など全体構想の整備計画がある。今より地盤条件が厳しくなり難しい工事になるが、この空港建設の経験が大いに役立つこととなる。現在は、一日も早くこの経験が生かされるよう、全体構想の計画策定と合意形成に努力しているところであり、関係者の方々の御支援をお願いします。

**追記：**最終稿をまとめた段階で兵庫県南部地震が発生した。地震直後、空港の被害が心配で、空港内の中央防災センターおよび運用管理室と連絡をとった。これらは、24時間運用体制であり、かつ、開港後イレギュラー情報の連絡網が構築されていたこともあって、早朝の地震であったにもかかわらず適確に状況を把握していた。その報告によると滑走路には異常がなく航空機は離着陸している。連絡橋の道路・鉄道は、点検のため通行禁止（道路は7時前に解除）としている。施設の被害は旅客ターミナルビル前の歩道ブロックが一部沈下しているだけである。護岸・岸壁・その他施設には異常がない。この報告を聞いて安心したものの、自分の目で確かめるため空港に駆けつけ、報告どおりであることを確認した。ほっとしてテレビを見て地震被害の様子を知り愕然とした。その後の情報は被害が拡大する一方で恐ろしくなった。今回の地震に対する当空港の耐震性は実証されたものの、自然の厳しさを考えれば、空港内で観測された地震波を解析し、耐震対策の一層の充実が望まれる。

最後になりましたが、今回の地震により犠牲になられた方々のご冥福をお祈りするとともに、被害を受けられた方々にお見舞い申し上げ、一日も早く平常の生活に戻られるよう祈ります。

#### 参考文献

- 1) 前田進, 福手勤: 関西国際空港建設海域の海底地盤特性, 海底地盤に関するシンポジウム, 土質工学会関西支部, pp. 55-60, 1987年11月.
- 2) 新井洋一, 及川研, 鈴木慎也, 元野一生: 関西国際空港の建設における沈下管理システム, 第9回建設マネージメント問題に関する研究発表・討論会, 土木学会, 1991年12月.

- 3) 小松明, 及川研, 鈴木慎也, 元野一生: 関西国際空港の埋立に伴う洪積層の沈下, ウォーターフロント開発シンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 143-146, 1992年1月.
- 4) 及川研: 空港島建設工事における沈下管理システム, 関西国際空港の施工技術, 土木学会土木施工研究委員会, pp. 115-130, 1992年3月.
- 5) 神田勝己, 上原逸, 及川研, 鈴木慎也: 沖合人工島の沈下予測-沈下管理システムとしてのアプローチ-, 土と基礎, Vol. 41-2, 1993年2月.
- 6) 岩谷文方, 小松明, 田中伸佳: 関西国際空港における若令埋立地盤の物性値, 第25回土質工学研究発表会講演集, pp. 261-264, 1990年6月.
- 7) 小松明, 田中伸佳, 及川研, 西田捷幸: 関西国際空港における埋立土の地盤改良効果について, 第27回土質工学研究発表会, pp. 2165-2168, 1992年6月.
- 8) 及川研, 新井洋一, 鈴木慎也, 元野一生: 沖合人工島の護岸近接区域における沈下と変形, 第27回土質工学会研究発表会, pp. 1327-1330, 1992年6月.
- 9) 及川研, 神田勝己, 元野一生, 土田孝: 空港島埋立地盤の不同沈下特性, 第28回土質工学研究発表会, pp. 1899-1902, 1993年6月.
- 10) 坂口博三, 奥田豊, 鈴木慎也, 神田勝己, 及川研: 洪積層の沈下に伴う水平変位について, 第29回土質工学研究発表会, pp. 1313-1314, 1994年6月.
- 11) 吉田宏司, 白石修章, 神田勝己, 鈴木慎也: 洪積層の沈下に伴う不同沈下特性について, 第29回土質工学研究発表会, pp. 1311-1312, 1994年6月.
- 12) 吉田宏司, 南兼一郎, 奥田豊: 空港島における洪積層の沈下に伴う不同沈下量予測方法について, 第49回年次学術講演会, pp. 240-241, 1994年9月.
- 13) 鈴木慎也, 新井洋一, 及川研, 元野一生: 沈下進行中の空港施設施工基礎設定法, 第27回土質工学会研究発表会, pp. 1701-1704, 1992年6月.
- 14) 鈴木慎也, 神田勝己, 上原逸, 及川研: 埋立地盤に建設する空港施設の沈下対策, 第28回土質工学研究発表会, pp. 1895-1898, 1993年6月.
- 15) 吉福司, 神田勝己, 上原逸, 及川研, 角南進, 多賀謙蔵, 山辺秀夫, 有岡真一: 関西国際空港旅客ターミナルビルの構造設計と沈下管理, その2. 沈下進行中の地盤における施工基準面の設定と沈下管理, 日本建築学会大会学術学術講演梗概集(関東), p. 2909, 1993年9月.
- 16) 山辺秀夫, 上原逸, 鈴木慎也, 多賀謙蔵, 小林由事, 田淵博昭, 有岡真一: 関西国際空港旅客ターミナルビルの構造設計と沈下管理, その3. 本館の鉄鉋石置換工事による不同沈下低減対策, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), p. 2910, 1993年9月.
- 17) 白石修章, 神田勝己, 鈴木慎也, 篠崎巨: 関西国際空港の不同沈下対策, 第49回年次学術講演会, pp. 556-557, 1994年9月.

(1995.2.6 受付)