

海上工事における地盤の沈下計測法—関西国際空港の事例—

A New Method of Measurement of Consolidation Settlement in Offshore Construction for Kansai International Airport

ふる 市 まさ ひこ おい かわ けん
古 市 正 彦* 及 川 研**

1. はじめに

「ウォーターフロント」という言葉が脚光を浴び始めるとともに、様々な沿岸域の開発が各地において進められようとしている。ここ関西の地において進められている代表的なプロジェクトが関西国際空港の建設である。このような沿岸域開発の需要が大きい地域は、主として東京湾、大阪湾、伊勢湾などの大都市圏の沿岸域であるが、これらの沿岸域の多くは軟弱地盤の問題を抱えている。

関西国際空港は、大阪湾泉州沖5kmの軟弱な海底地盤上に建設されている世界に類例のない本格的な沖合人工島の第1号である(写真-1)。面積511haのほぼ全域に約100万本のサンドドレーンを打設して地盤改良を行い、土量約1億5000万 m^3 の山砂を使用して埋め立てることとしており、その埋立層厚は30mにも及ぶ。

サンドドレーン工法は軟弱地盤の圧密を促進する工法なので、圧密の進み具合を施工中に常に観測しながら、その結果を設計や施工にフィードバックし、工事の安全性と精度を高める必要がある。このような施工の方法は情報化施工と呼ばれ¹⁾、関西国際空港の建設工事においても詳細な情報化施工が実施されているが²⁾、中でも沈下計測は粘土の強度とともに重要な計測項目として位置づけられる。しかし、関西国際空港のような大規模かつ大水深での急速な海上施工においては種々の制約条件があり、簡便かつ精度の良い沈下計測法は過去にあまり例がないため、新しい沈

下計測法を開発した。

本文は、新しい沈下計測法の基本的考え方、沈下計の設計、計測の手順、計測結果の検証、データの利用等について、とりまとめたものである。

2. 関西国際空港の護岸工事の概要

2.1 護岸の仕様

関西国際空港の建設においては、海域環境への配慮などから空港島の本格的な埋立に取りかかる前に、まず空港島を囲む外周護岸を水面上に立上げ、その後本格的な埋立へと進む手順をとっている。11.2kmの外周護岸のうちその77.5%にあたる8.7kmについては、図-1に示すようにサンドドレーンによる地盤改良と緩傾斜石積型式の組合わせを採用している。この護岸を約2年の工期で水面上に立上げるため、沖積粘土層厚約16~22mに直径400mmのサンドドレーンを1.6m×2.5m(等価換算2.0m×2.0m)の間隔で施工し、主要な荷重となる捨石①および捨石②の載荷の前に6か月の放置期間(圧密期間)を設けている。圧密計算の基礎となる土質条件は表-1に示すとおりであるが、Barron(バロン)の理論による圧密度の計算では180日で約90%となり、また最終的な沈下量は6~7mにも及ぶものと予測されている。

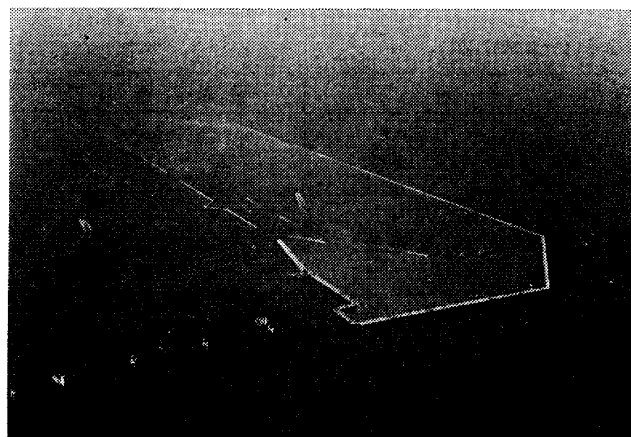


写真-1 関西国際空港建設工事の現状(昭和63年末現在)

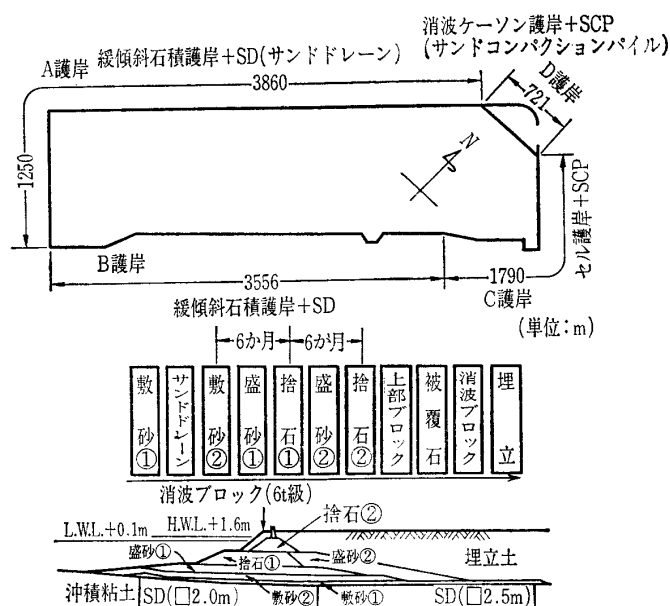


図-1 空港島護岸の構造

*運輸省第三港湾建設局企画課 補佐官(前関西国際空港編)

**関西国際空港建設事務所 技術課長

表—1 圧密計算の基礎となる土質条件

項 目	内 容
一軸圧縮強度	$[q_u = 0.04 z \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \text{ (} z \text{: 海底面からの深度 (m))}]$
単位体積重量	$\gamma_s = 1.4 \sim 1.6 \text{ (gf/cm}^3\text{)}$
含 水 比	$w = 50 \sim 120 \text{ (\%)} \text{ (} w = 50 \sim 120 \text{ (\%))}$
圧 密 係 数	$c_v = 60 \sim 140 \text{ (cm}^2\text{/d)} \text{ [(} c_v = 90 \text{ (cm}^2\text{/d))}]$
体積圧縮係数	$[m_v = 0.18 p^{-1.08} \text{ (cm}^2\text{/kgf)}]$
液 性 限 界	$w_L = 30 \sim 120 \text{ (\%)} \text{ (} w_L = 30 \sim 120 \text{ (\%))}$
塑 性 限 界	$w_p = 20 \sim 50 \text{ (\%)} \text{ (} w_p = 20 \sim 50 \text{ (\%))}$
液 性 指 数	$I_L = 0.8 \sim 1.2$
塑 性 指 数	$I_p = 10 \sim 90$

注〔〕書きは設計で用いた値

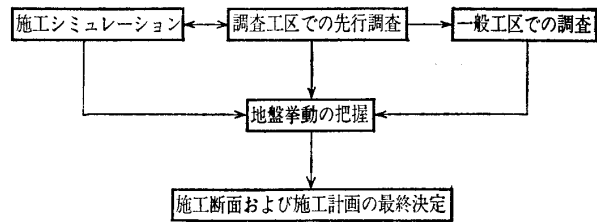
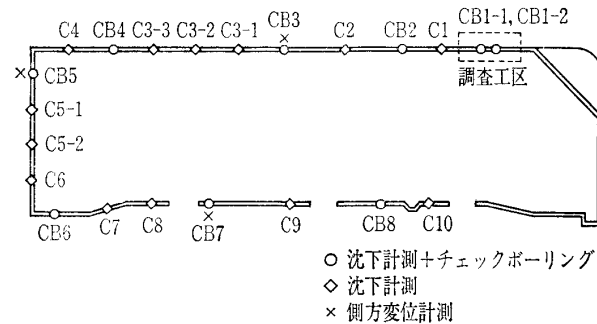
2.2 護岸の沈下安定管理システム²⁾

サンドドレーンをはじめとするパーチャルドレーンで改良された地盤上に盛土を施工する場合には、一般的に情報化施工が行われているが、関西国際空港のような大規模工事では、現場計測の項目や密度について効率化を図る工夫をしなければ、現場計測に要する時間と費用は膨大なものとなる。そこで、これらの問題に対応するため、図—2に示すように、①施工シミュレーション²⁾、②調査工区での地盤挙動を把握する先行調査、③一般工区(本体工事部分)での調査の三つの調査結果を総合的に解析して地盤挙動を評価し、設計断面や施工方法、施工工程などへフィードバックすることとした。このような手順を踏む過程で調査工区においては、①沈下、②間隙水圧、③側方変位、④土圧、⑤粘土の強度等の項目について詳細な計測を行い、先行的に情報を得ることによって、一般工区での計測項目を①沈下と⑤粘土の強度だけに絞り込んだ。さらに一般工区での沈下と粘土の強度の計測地点数(計測密度)をできる限り絞り込み、図—3に示すように沈下については護岸法線方向300m～500mごとに1断面の割合で合計22断面、110地点(1断面当たり5点)での計測を計画した。

3. 沈下計測法の開発

3.1 沈下計測の制約条件

関西国際空港の護岸工事の沈下計測を実施するに当たっ

図—2 沈下安定管理システムの概念図²⁾

図—3 沈下計測地点

ては、精度、コスト、メンテナンスのほかに次のような制約条件を考慮する必要がある。

- ① 広い範囲で多数の沈下計測を行うためには、機動性のある方法でなければならない。
- ② 工事海域において多数の作業船が入出域を繰り返すため、可能な限りそれらの障害にならない方法がよい。
- ③ 急速施工を行うためには、埋立天端が水中にあるうちから、地盤の沈下特性を把握する必要がある。
- ④ 水深が18mと非常に深く、更に冬期においては季節風による波浪(昭和62年の冬期では、有義波高0.5m以上が38%)が生じるため、それらに耐えうる構造や計測方法が必要である。

3.2 新しい沈下計測法

軟弱地盤上に埋立を行った主要な事例³⁾を調べてみると、地盤改良の方法、建設期間、水深等がそれぞれ異なるものの表—2に示すようなものがある。従来の沈下計測方法と

表—2 主要な埋立工事における沈下計測方法

項 目	名 称	大 阪 南 港	神戸ポートアイランド	扇 島	関 西 国 際 空 港
工 事 概 要	海岸からの距離 (km)	—	0.2	0.6	5.0
	埋 立 面 積 (千 m ²)	9370	4360	5150	5110
	水 深 (m)	3～10	12	10	18
	建 設 期 間 (年)	22	14	4	6
	軟弱地盤の改良工法	パーチャルドレーン工法と水位低下工法	無改良 (一部プレローディング工法)	無改良	サンドドレーン工法
沈 下 計 測 方 法	沈下計測の概要	海底面に沈下板を設置し、パイプを水面上に出す。パイプの鉛直変位は近傍に設置したやぐらからレベルで確認している模様。	同 左	同 左	工事船舶の航行に支障のない深度まで沈下板のパイプを設置し、携帯型水圧式沈下計を潜水士が用いて水深を計ることにより、沈下量を把握する。
	沈下計測地点数	埋立天端が水中にある間は、計測地点数は少ない。	埋立天端が水中にある間は、計測地点数は少ないが、埋立面が水面上に出てからは地点数をふやしている。	計測地点数は不詳。	工事区域全域にわたって工事開始当初からの沈下計測を多数の地点で行う。

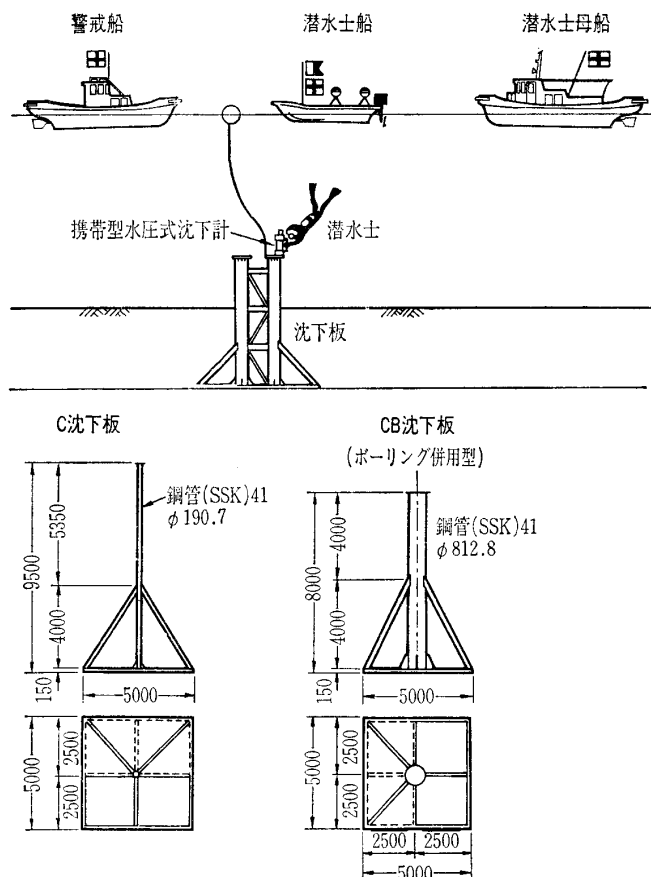


図-4 沈下板と携帯型水圧式沈下計による計測法

しては、①水面上にパイプが現れるような沈下板を設置してこの天端を近傍に設置してあるやぐらなどからレベル測量する方法、②杭式二重管沈下計による方法、③深浅測量を繰り返して沈下状況を把握する方法、④間隙水圧計（コード付）を海底面に置いて水圧から沈下を計する方法などがある。しかし、これらの方法については①②については沈下板の先端が水面に出ているため特に多くの測点で計測しようとする場合、工事施工・船舶航行の妨げとなる。③については深浅測量の精度上の問題から沈下量をよい精度で求めることが不可能である。④については広い範囲の多くの測点を計測しようとするコードの処理が現場で輻奏し経済的にも高価になる上、盛土などの施工が進む中で原地盤の沈下を継続して計測できないといった欠点がある。関西国際空港の場合には3.1で述べた制約条件があり、新しい計測法の開発が必要になった。

新しい計測法は図-4に示すように鋼管パイプと鋼板でつくられた沈下板をあらかじめ設置し、携帯型水圧計を潜水士が沈下板の鋼管パイプ天端にもっていき、水圧を計測することにより沈下量を計測する方法である。なお、沈下板の鋼管パイプは護岸の施工に伴い徐々に継ぎ足しされていく。この携帯型水圧計は高さ56cm、重量12kgfで、内部に記憶装置を持っているため、

ケーブルなどを必要とせず、現場には沈下板だけを設置すればよい。このため、水圧計のセンサーなど計測器自体に支障があった場合にもメンテナンスが容易である。

4. 沈下計測の実際

4.1 携帯型水圧式沈下計

(1) 設計思想

携帯型水圧計の設計に当たっては、可能なかぎり以下の条件を満たすようにした。

- ① 電源、データ記憶部を内蔵し、ケーブル等を接続しない構造であること。
- ② 気圧、潮位、海水の比重、波浪等による誤差をできる限り避けられること。
- ③ 長期間にわたる計測を安定的に行えること。
- ④ 潜水士が水中で作業しやすい形、大きさとする。
- ⑤ データの収集および処理が容易なこと。
- ⑥ メンテナンスが容易なこと。

(2) 仕様

携帯型水圧計と外部処理装置を含めて携帯型水圧式沈下計と称しているが、そのブロック図を図-5に、また水圧計の外観を写真-2に示す。ブロック図の順に沿って各機能を説明すると次のようになる。

① センサー部

ストレインゲージ式の防水型圧力センサーで約20m（原地盤の水深と潮位から設定）の水深に相当する水

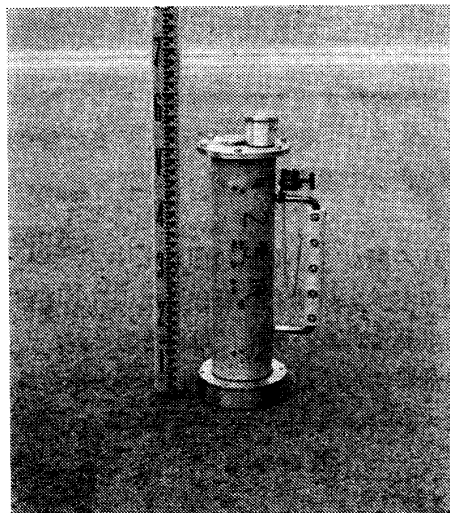


写真-2 携帯型水圧計の外観

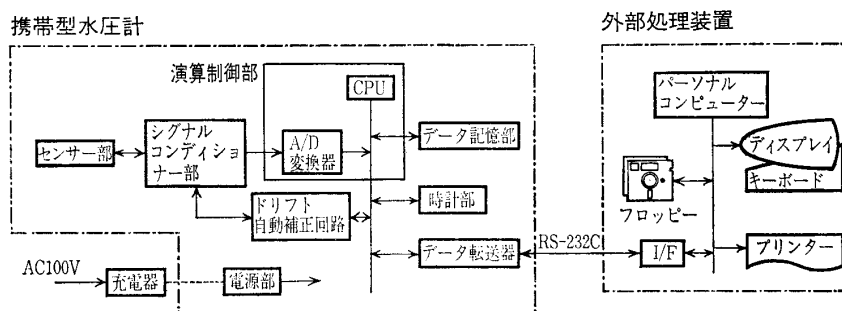


図-5 携帯型水圧式沈下計の回路等

圧の検出が可能（精度 $\pm 0.2\%$ ，水深20mで ± 4 cm）

② シグナルコンディショナー部

ストレインゲージ式圧力センサーの信号増幅用アンプ

③ 演算制御部

A/D 変換器，マイクロコンピュータを含む回路で水圧信号をデジタル化する。データは1地点で約1分間（300回）測定し，そのデータを記憶する。

④ データ記憶部

バックアップ電源付の IC メモリーに測定時刻（年月日時分）および測定データの記憶が約50地点分可能。

⑤ 時計部

時刻の確認および測定の時間制御を行う。

⑥ 電源部

UM-1 型ニッケルカドニウム電池（充電可能）

⑦ 外部処理装置

パーソナルコンピュータで構成され，記憶データをデータ記憶部から受信後，1地点で1分間（300回）測定したデータを平均して水圧の基本データとする。さらに，水深は水圧の基本データに気圧，海水の比重，別途計測されている潮位によって補正する。

4.2 沈下計測の手順

沈下計測の外業は，潜水士と補助員を乗せた船外機型小型船と潜水作業の警戒要員を乗せた警戒船をあわせて1パーティーとして行う。一方，内業は携帯型水圧計内のメモリーに記憶されたデータを取り出し，海水の比重，大気圧，さらに別途計測されている潮位を用いてパーソナルコンピュータで計算処理するものであり，1人で行える。この外業と内業をイラストでわかりやすく示したものが図-6であり，順を追って説明する。

(1) 外業

① 大気圧の測定（計測開始前）

現場で水圧を計測する場合には，大気圧を含んだ値として計測される。水深に換算するには，大気圧を含まない純粋に水圧だけを知る必要があるため，1日の

計測の前後には必ず大気圧を計測する。

② 精度確認のための定点測定（計測開始前）

各沈下板の深度（水深）を1週間に1回の頻度で計測することとしているが，圧密が進行してくると1週間での沈下量が数 cm 程度なので測定値の精度をその都度確認する必要がある。そこで，1日の計測の前後には必ず現場海域に設置してある海上基地の底部にある定点の水深を測定し，その日の測定値の良否の判定を行っている。

③ 沈下板での水深の測定

パーティーを組んで沈下板位置へ移動し，潜水士が沈下板の鋼管パイプ天端に携帯型水圧計をセットしたところでスイッチを入れ，1分間に300個のデータを取る。1分間に300個のデータを取ることによって波浪による水圧の変化を平均化し，誤差の発生をできる限り抑えることが可能となった。

測定値300個のデータのばらつきは平均値に対して水深換算値で $+1\sim 7$ cm， $-1\sim 6$ cm であり，測定水深（17 $\sim$ 2 m）が異なってもそのばらつき方に差は見られない。また，観測前後に実施する定点（-17m）でのそれは ± 1 cm と安定していた。

④ 沈下板での水深の測定（繰返し）

③の作業を繰り返す。潜水士の作業時間には制約⁵⁾があるため，測定地点が多くなれば，複数の潜水士が必要となる。なお，携帯型水圧計に内蔵されているメモリーには約50地点分のデータを蓄積する容量がある。

⑤ 精度確認のための定点測定（計測終了後）

沈下板での計測作業終了後，②と同じ作業を行う。

⑥ 大気圧の測定（計測終了後）

①と同じ作業を行う。

(2) 内業

① 潮位データの収集

現場海域に別途設置してある潮位計より得られた潮位データを整理する。

② 海水の比重の入力

海水の比重は厳密には水温によって変化するが，1.03を用いた。

③ データ処理

計測した沈下板の地点ごとに300個分の水深データと300個の平均値とを計算し，出力する。

4.3 計測結果の検証

新しい計測方法による結果を検証するため，調査工区中のほぼ同一地点に設置された携帯型水圧式沈下計とアンカーロード式沈下計（抵抗撓動型）の計測結果を図-7に示す。両者の計測結果には最大値で ± 10 cm 程度のばらつきはあるが良く一致している。測定値に誤差が生ずる要因は，主として海水の濁りによるセンサーのフィルター部分の目詰まりによるものと，その水洗時の分解による機械的

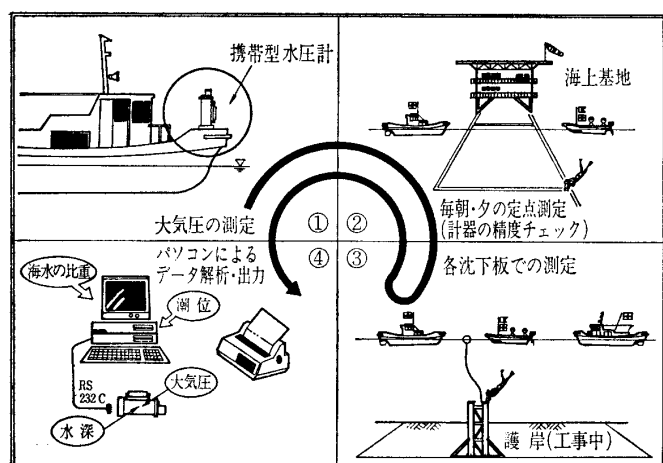


図-6 携帯型水圧式沈下計による沈下計測の手順

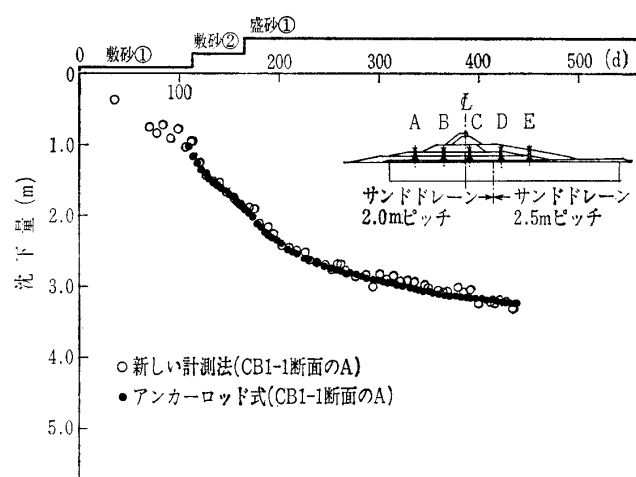


図-7 沈下計測結果の検証

なものがあったが、種々の改良を加えた結果計測精度は十分実用に耐えるものとすることができた。

この結果をもとに、調査工区のと一般工区の沈下計測はすべて沈下板と携帯型水圧式沈下計との組合わせにより実施することとした。

5. 沈下解析と施工へのフィードバック

5.1 沈下解析²⁾

(1) 計算沈下量と実測沈下量の比較

設計時点においては、事前の土質試験結果から土質定数を設定しているが、実際の沈下量がこの土質定数に基づく計算結果に一致するとは限らない。これは、ばらつきのある土質試験結果を一つの値で代表させざるを得ないこと、さらにはバーチカルドレーンによる圧密速度を支配する水平方向の圧密係数 c_h の評価など難しい問題を含んでいることによる。そこで、先行調査工区における代表的な計測結果を設計条件に基づく計算結果とあわせて示したのが図-8である。沈下量の計算は、港湾構造物の設計において実績の多い m_v 法により行っている。同図からは、実測沈

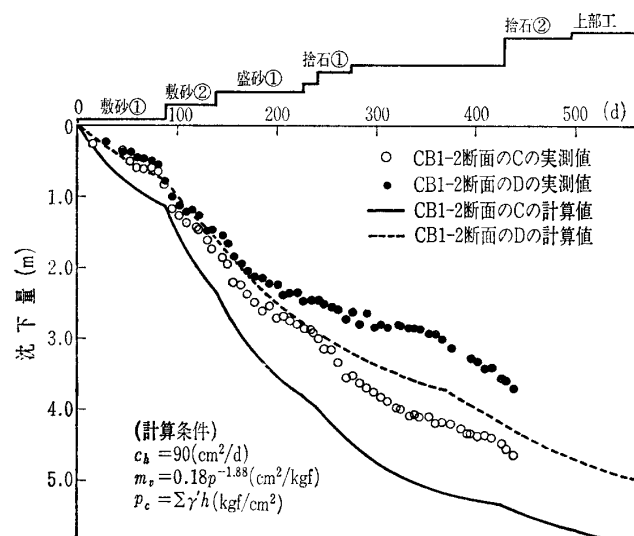


図-8 設計条件に基づく計算沈下量と実測沈下量

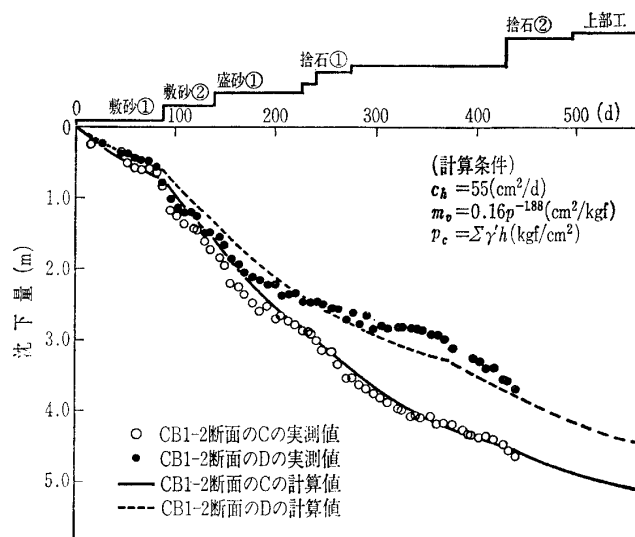
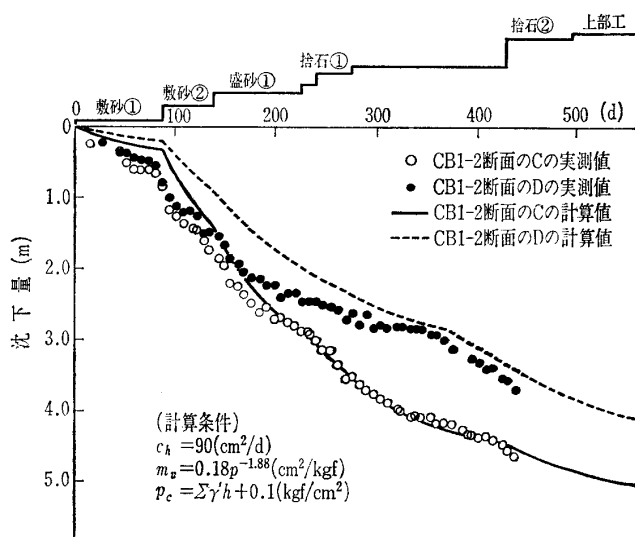

図-9 修正 c_h , m_v を用いた計算沈下量と実測沈下量


図-10 過圧密を考慮した計算沈下量と実測沈下量

下量が少なめ、あるいは沈下が遅れ気味であり、500日経過時には、1m程度の差が見られる。

(2) c_h , m_v の修正

このように実測沈下量は設計時の想定と異なることが明らかになり、その見直しが必要となった。そこで、施工中の計測結果を次の施工に活かすため、施工開始から約220日時点までの実測沈下に対して双曲線法によりフィッティングを行った結果から、 c_h , m_v の修正を行った。その結果、 $c_h=55(\text{cm}^2/\text{d})$, $m_v=0.16p^{-1.08}(\text{cm}^2/\text{kgf})$ が得られ、この値を用いて計算した結果と実測沈下量を比較したのが図-9である。この沈下計算結果は、実測値を非常に良く再現していることから、修正した c_h , m_v は適切な値であったことが明らかになった。

(3) 擬似過圧密を考慮した修正

c_h , m_v を修正する方法のほかに、事前の土質試験結果から沖積粘土が年代効果を受けわずかな擬似過圧密粘土と考えられていたので、圧密降伏応力を $p_c=\Sigma\gamma' h+0.1(\text{kgf}/$

cm²) と評価²⁾して沈下計算を行った。この沈下計算結果と実測沈下量を比較したのが図-10である。この沈下計算結果も実測値を良く再現しており、圧密降伏応力を $p_c = \Sigma \gamma' h + 0.1 (\text{kgf/cm}^2)$ と評価したことの妥当性を示している。

5.2 施工へのフィードバック

前節で述べた沈下解析は先行調査工区における沈下計測結果に対するものであるが、一般工区におけるほかの沈下計測の結果に対して c_h , m_v を修正することを試みた。 c_h , m_v ともばらつきがあるものの、ほぼ正規分布を示しており、その平均値は、

$$c_h = 55 (\text{cm}^2/\text{d})$$

$$m_v = 0.16 p^{-1.08} (\text{cm}^2/\text{kgf})$$

と先行調査工区での結果とほぼ一致していることが明らかになった。

一般工区では、護岸施工開始後捨石①の載荷直前において沈下の傾向が設計時の計算に比べて少なめ、あるいは遅れ気味であることが明らかになったことから、その後の載荷層厚を調整しなければ護岸天端が高止まりする可能性が生じた。そこで、各護岸の沖積層厚の違い等を反映させて捨石①の層厚を0.6~1.0m減ずることとした。その後も継続的に沈下状況を監視してきたが、その後の傾向も $c_h = 55 \text{ cm}^2/\text{d}$, $m_v = 0.16 p^{-1.08} (\text{cm}^2/\text{kgf})$ を用いた計算値に良く一致している。このため、捨石②以降の載荷においては層厚の調整を行う必要もなく、順調な沈下状況となっている。

このような施工断面の調整を施工初期の段階において行うことができたのは、精度の高い沈下計測を種々の制約条件下において安定的に行えたことによる。これは、新しい

沈下計測法の開発によるところが大きい。

6. あとがき

関西国際空港、この世界に類例を見ない大規模人工島の建設は、ひとことで言えば軟弱地盤への挑戦であり、圧密沈下量等の計測はそのための最も重要な情報の収集である。現地では、平成元年6月までに予定より1か月早く外周護岸が完成し、現在は埋立が急ピッチで進められている。新しい沈下計測法は、護岸工事における沈下解析や施工管理に大きく貢献するとともに、埋立工事でも同様な方法により沈下計測が実施されている。

海上工事における沈下量等の計測は、陸上の場合と異なり大きな困難を伴うが、今後関係者の創意工夫により計測技術の向上が図られることを切に望むものである。

最後に、携帯型水圧式沈下計の実用化に当たり御尽力いただいた(株)共和電業、ならびに沈下の計測とデータの整理を担当していただいた調査共同企業体構成会社の各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉国 洋：パーチカルドレーン工法の設計と施工管理、技報堂, pp.127~159, 1979.
- 2) 前田 進：大規模沖合人工島の建設における地盤改良工法の将来展望と一事例、土木学会論文集, 第406号/III-11, 1989, 6.
- 3) 土質工学会編：土質工学ケースヒストリー集, 第1集, pp.417~474, 1983.
- 4) 前田 進ほか：関西国際空港におけるサンドドレーン改良地盤の沈下安定管理, 第24回土質工学研究発表会, 1989.
- 5) 労働省令, 第34号：高気圧作業安全衛生規則
(原稿受理 1989.4.24)