

関西国際空港の緩傾斜石積護岸工事における 沈下管理システムについて

関西国際空港株式会社 建設事務所 正会員 福 手 勤
同 上 大 上 周 三
三井不動産・大本・東亜・不動建設工事共同企業体 犬 山 忠 之
同 上 池 内 章 雄

1. まえがき

現在、海上埋立工事においてサンドドレーン工法により改良した軟弱地盤上に所定の厚さの盛土を施工するための管理方法として、工事範囲を一定の施工区域に細分割し、その区域ごとに沈下板を設けて盛土厚を管理する方法が多く用いられている。この施工管理方法は簡易で有効な方法であるが、管理の精度を上げるために、沈下板を多数設置すると、大型作業船の作業効率の低下を招いたり、盛土施工中に沈下板を破損した場合には、施工管理に重大な支障を与える恐れがある等の問題点も有している。

関西国際空港の空港島を取り囲む護岸のうち約80%においてサンドドレーン改良地盤上に緩傾斜石積護岸を築造する護岸構造が採用されている。これまで、経済的ではあるが急速施工に不適とされてきたサンドドレーン工法による大規模で急速な施工を安全かつ確実に実施するために、護岸2工区（三井不動産・大本・東亜・不動建設工事共同企業体）ではコンピューターを用いた沈下管理システムによる盛土厚管理を実施した。土運船の直投による埋立工事はその多くが水面下の作業であることもあって施工管理手法のシステム化が遅れていたが、新しい深浅測量手法の開発によって正確な施工情報が迅速に得られるようになり、工事期間中の沈下管理のシステム化が可能となった。その成果を一事例として報告するものである。

2. 地盤条件と護岸断面

(1) 地盤条件の概要

工事区域は水深約18mであり、海底面下に厚さ約20mの軟弱な沖積粘土層が分布し、それ以深には洪積砂質土と粘性土が互層をなして数百m堆積している。事前の土質調査によれば、沖積粘土層の土性は粘土分50～60%、シルト分40～50%とほぼ均一な粒度組成を有し、自然含水比は50～120%の範囲に分布し深度方向に減少している。また、単位体積重量は1.4～1.6 tf/m³、一軸圧縮強さは0.04 Z kgf/cm²（Z（m）は海底面からの深度）であり、ともに深度方向に直線的に増加する傾向が見られる。これらの土質試験結果は工事対象区域内の各ボーリング孔において、多少のバラツキはあるものの沈下管理の対象となる沖積粘土層は概ね均一な地盤であると評価できる。

(2) 護岸断面形状

護岸2工区の施工区域は図-1に示すように緩傾斜石積護岸のうち沖側護岸の大阪側端部より和歌山側へ調査工区約500mを含む延長1,913mの区間である。調査工区は一般工区での工事に先立ち、サンドドレーン改良地盤の挙動を事前に詳細に把握するために設けた。護岸の断面形状は図-2に示すように原地盤に約

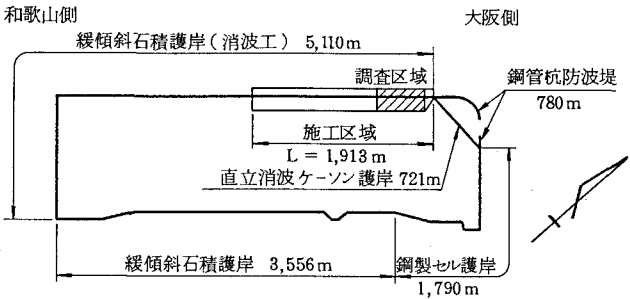


図-1 平面位置図

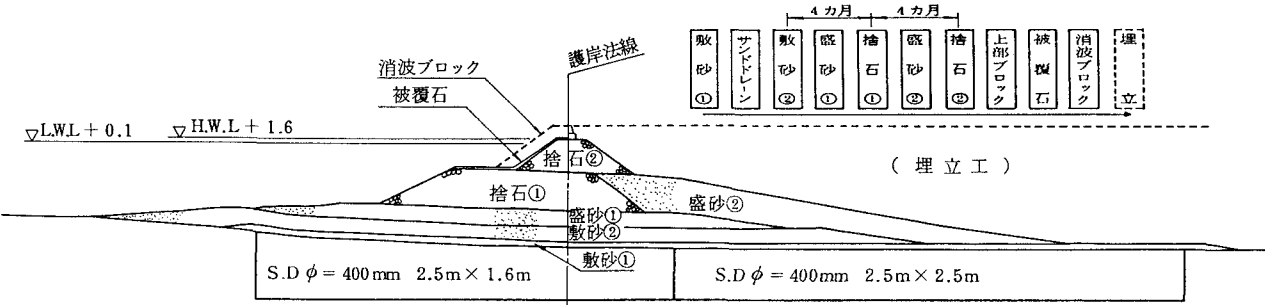


図-2 護岸標準断面図

1. 5 m厚の敷砂①を散布し、サンドドレーン工法によって地盤改良を施した後、主として底開式土運船を用いた山砂投入による敷砂②盛砂①を施工し、圧密期間を経て雑石による捨石①、山砂による盛砂②に続いて捨石②を築堤し、被覆石、上部工、消波ブロックを施工するものである。捨石①と捨石②の間にも一定の圧密期間を設けた。圧密期間は調査工区における動態観測結果による施工計画の見直しにより、当初設定された6ヶ月から4ヶ月に短縮された。

3. 沈下管理システムの概要

沈下を伴う盛土工事の管理方法は盛土の天端高さで管理する天端管理と所定の盛土厚で管理する盛土厚管理があり、本工事においては後者の盛土厚管理を用いている。護岸2工区では日々の深浅測量結果を整理して、各盛土段階ごとの施工履歴を決定し、所定の盛土厚を施工した場合の盛土天端高の経時変化を算出し、施工中の管理と検査基準断面の作成に経過時間に応じて計算された盛土天端高を使用した。

図-3に経時沈下量算定の基本フローを示す。まず施工着手前に事前の土質調査結果より原地盤の土質条件を定め、盛土の設計断面に実際の施工状況を考慮して断面条件（盛土段階）を決定して各盛土段階ごとの最終沈下量を計算する。盛土の施工に着手後、盛土施工中の深浅測量結果を整理して、各盛土段階の施工年月日を定めシステムにより、求める地点における理論時間沈下曲線を作成し、沈下量と盛土天端高の経時変化を把握する。また、沈下板にて計測された実測沈下量とシステムによる理論沈下量の対比を行い、その整合性を確認して差異が大きいと判断される場合は土質常数等の前提条件の再検討を行う。

沈下量の計算は一般に m_v 法、 $e \sim \log P$ 法、 C_α 法が用いられるが、ここでは港湾工事において実績が多くその妥当性が確認されている m_v 法を採用した。盛土の载荷によって地中に発生する応力はBoussinesqの式を基本とする弾性解により盛土を無限長の帯状荷重と評価して算出した。最終圧密沈下量および時間経過に伴う圧密沈下量は次式によって求めた。

$$S_o = \Sigma m_v \cdot \Delta h \cdot \Delta \sigma_z$$

$$S_t = S_o \cdot U(t)$$

ここに

S_o : 最終圧密沈下量

S_t : 時間 t における圧密沈下量

m_v : 体積圧縮係数

Δh : 圧密層分割片の厚さ

$\Delta \sigma_z$: 分割片中央における圧密応力

$U(t)$: 時間 t における平均圧密度

バーチカルドレーンによる圧密過程についてはドレーンおよびサンドマット部の透水性、ドレーンへの応力集中等により各種の提案がなされているが、本システムにおいては Barron の解に基づく次式を用いた。

$$U(T_n) = 1 - e^{-8T_n/F(n)}$$

ここに

T_n : 時間係数

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \log_e n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$n = de/dw$

de : ドレーンの影響円の直径

dw : ドレーン径

また、盛土载荷が何段階にも分けて行われる場合の圧密時間沈下曲線の解析方法は2段階以後の载荷に対する圧密応力のとり方によって、いくつかの方法が考えられるが、本システムでは以下に述べる手順にて圧密時間沈下曲線の作成を行った。

図-4に示すように、最初に第一段階盛土による時間沈下曲線

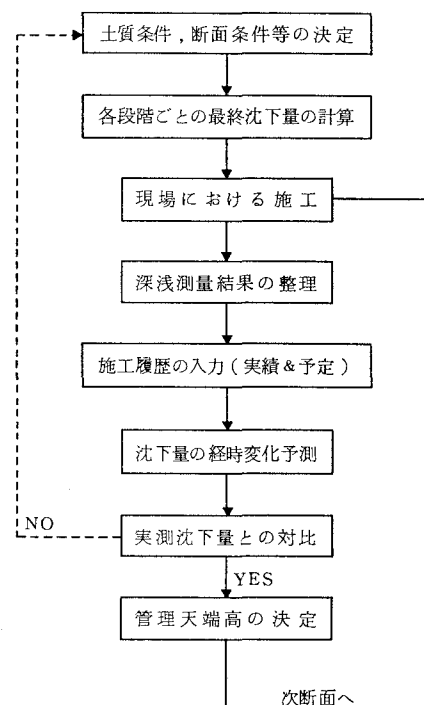


図-3 経時沈下量算定の基本フロー

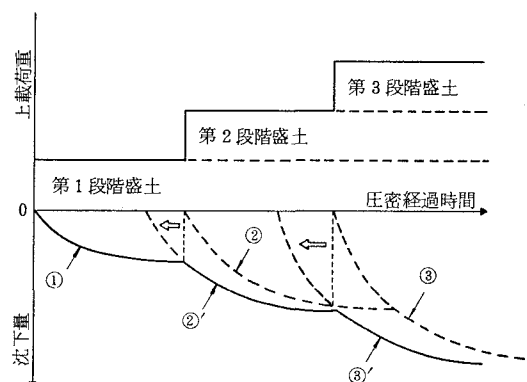


図-4 段階盛土の時間沈下曲線作成方法

を描く。(①曲線) 次に第2段階盛土載荷時点から第1段階盛土と第2段階盛土を加えた盛土による時間沈下曲線を描き、(②曲線) 第2段階盛土載荷時点では第1段階盛土による沈下が進行しているため、②曲線を第2段階盛土載荷時点での第1段階盛土による沈下量と一致するように後ろに平行移動する。(②' 曲線) 第3段階盛土以後についても同様な手順を繰り返すことによって、多段階盛土による圧密時間沈下曲線を求める。

4. 沈下管理システムの運用

護岸2工区では、従来の沈下板に頼った盛土厚管理を改め、実際の施工状況に応じて算出される理論沈下量に基づいて盛土厚管理を行う方法により、管理の範囲を沈下板周辺だけでなく施工区域全域に拡大し、施工精度によって発生する不同沈下の低減に努めた。管理に用いる理論沈下量は沈下板で計測される実測沈下量と各工種ごとに逐次対比を行い、その妥当性を照査した。本システムの運用方法について、以下に項目別に詳しく述べる。

(1) 土質条件の選定

設計段階においては、事前の土質調査結果に基づいて体積圧縮係数 m_v と圧密係数 c_v を図-5、図-6の破線に示す下式のように定めた。

$$\text{体積圧縮係数 } m_v = 0.18 P^{-1.08} \quad (\text{cm}^2/\text{kgf})$$

$$\text{圧密係数 } c_v = 90 \quad (\text{cm}^2/\text{day})$$

しかしながら、一般工区に先立って実施した調査工区の敷砂②盛砂①の施工によって計測された沈下量は、設計予測値とは若干の違いが見られた。

このため、護岸2工区においては、試験工区における観測結果を検討の上、事前の土質調査で実施された圧密試験結果のうち、有効土被り圧以下で行われた試験値を削除した後のデータを用いて3次回帰曲線による設計土質常数近似式を図-5、図-6の太線のように求め、沈下計算を行った。

また、沖積粘度層の水中単位体積重量 γ' は土質試験結果より上部を $\gamma' = 0.45 \text{ tf/m}^3$ 、下部を $\gamma' = 0.55 \text{ tf/m}^3$ と定め、盛土材についてはすべて $\gamma' = 1.0 \text{ tf/m}^3$ と仮定した。

沖積粘度層以深の洪積層の沈下については、着手前の試算の結果、盛砂②終了時までの影響は少ないとして、本システムにおいては無視した。

(2) 盛土断面条件(盛土段階)の選定

本システムによる沈下管理を良好な精度で実施するためには、実際の施工に適合した計算用の盛土段階形状の選定も重要な要素である。護岸2工区においては、各工種ごとの施工計画や予想される沈下量、さらに工種間の圧密期間等を考慮の上、敷砂②盛砂①の管理のための盛土段階断面と、それ以後の捨石①と盛砂②の管理のための盛土段階断面の2種類の管理用断面を設定した。敷砂②盛砂①の管理用盛土段階は図-7に示すように敷砂①から盛砂①-3までの計7段階とし、捨石①と盛砂②の管理用盛土段階は敷砂②盛砂①工程の盛土段階数の削減により、図-8に示すように敷砂①から盛砂②-2までの計8段階と定めた。なお、実際の施工にあたっては、盛土天端はできる限り水平となるよう盛り上げて

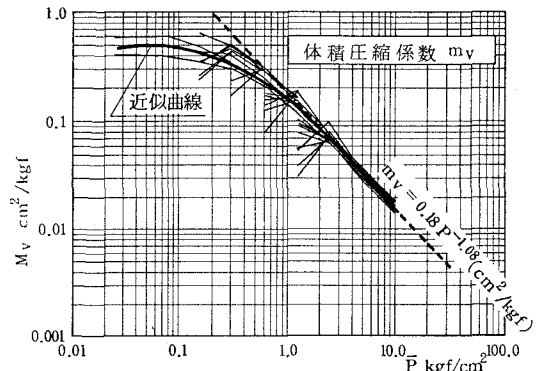


図-5 圧密試験結果と体積圧縮係数 m_v 近似曲線

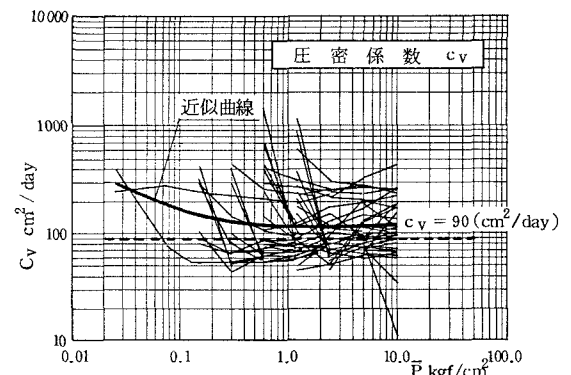


図-6 圧密試験結果と圧密係数 c_v 近似曲線

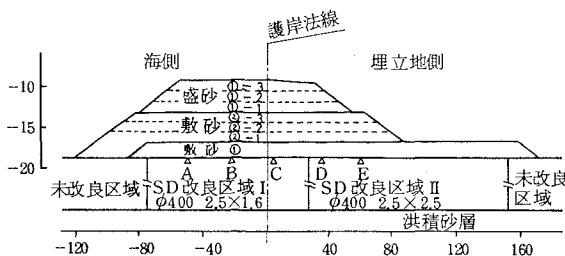


図-7 敷砂②盛砂①管理用盛土段階図

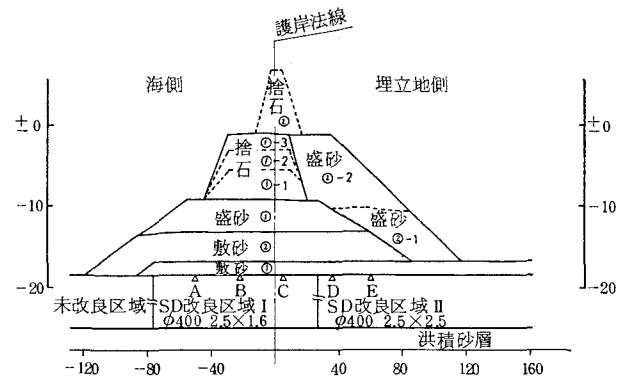


図-8 捨石①と盛砂②管理用盛土段階図

いくように努めた。

管理に用いる断面上の測点は、各工種ごとの天端部に限定し、設置した沈下板の観測記録との対比の関係より、敷砂②盛砂①の管理については図－7中のA、B、C位置の3点を、捨石①と盛砂②の管理については図－8中の護岸法線付近C位置の1点を用いた。

(3) 盛土段階ごとの施工履歴の整理

従来の深浅測量方法はその処理の多くを手作業に依存しており、測量成果の作成に多くの時間を要していたが、関西国際空港建設工事においては電波測位機とデジタル測深機を連動させ計算機によって処理する新しい深浅測量方法が導入されたので、精度の高い施工情報が迅速に入手できるようになった。

護岸2工区では前項で定めた管理測点ごとに盛土の施工状態を判定する水深を定め、日々の深浅測量結果を整理した水深データと対比し、護岸法線方向延長20mごとに各盛土段階の施工年月日を実際の施工状況に応じて決定した。

以上のようにして求めた各盛土段階ごとの施工日（未施工の段階については施工予定日）に基づいて、システムを用いて護岸法線方向延長20mごとに理論時間沈下曲線を作成し、盛土により発生する沈下に応じて日々変化する盛土天端の管理を行った。

5. システム管理による結果

(1) 施工履歴

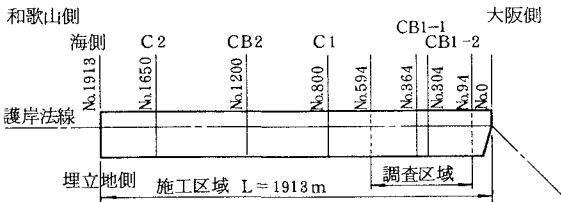
沈下管理を行う場合、各断面ともほぼ同様の施工期間となることが望ましいが、実際の施工においては、資材供給の問題、他工区との関係、臨時的開口部の設置、台風対策処置等工事着手時には考慮できなかった様々な要因により、図－9に見られるように施工計画作成時に設定した標準工程とは異なった施工履歴を有する断面も多くなった。

沈下板設置断面における敷砂②盛砂①、捨石①と盛砂②の各工種ごとの盛土着手から完了までの施工日数を表－1に示す。

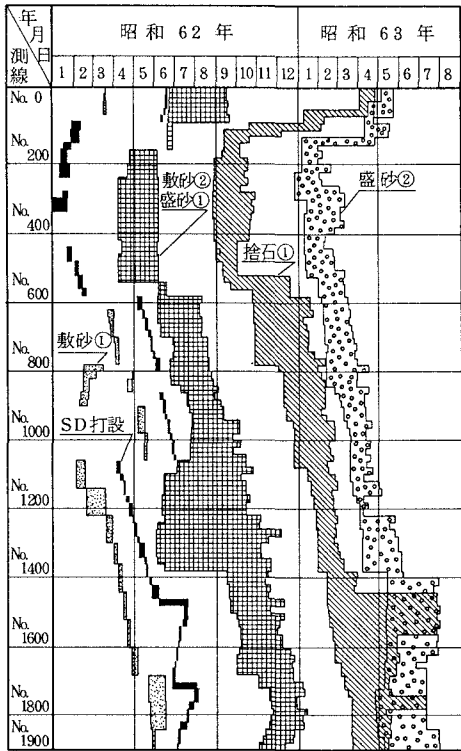
表－1 沈下板設置断面での各工種の施工日数

沈下板	断面No.	敷砂②盛砂①	捨石①	盛砂②
CB1-2	No. 304	59日	64日	57日
CB1-1	No. 364	56日	59日	48日
C1	No. 800	71日	50日	36日
CB2	No. 1200	136日	36日	33日
C2	No. 1650	85日	90日	53日

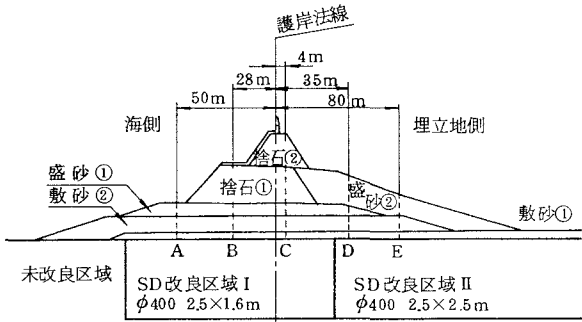
各沈下板設置断面において工種ごとの施工日数にはかなりのバラツキが見られるが、これはシステムを照査する面から見ると、施工日数の異なる沈下板設置断面において計測された実測沈下量とシステムによる理論沈下量に整合性があるならば、同様の管理を行っている施工区域全域について管理手法の妥当性が確認できる。



図－10 沈下板平面位置図



図－9 施工履歴図（全域）



図－11 沈下板配置断面図

(2) 沈下板による実測沈下量との対比

沈下板は図－10に示すように護岸法線延長上の断面No. 304、No. 364、No. 800、No. 1200、No. 1650の計5断面上に設置した。また、設置断面ごとに図－11に示すように護岸法線より海側へ28mにA点、50mにB点の2点、陸側へ4mにC点、35mにD点、80mにE点の3点あわせて5測点を

設けた。

沈下量の計測は携帯型水位計を用いて沈下板頂部の水深を測定し潮位による補正を行って、沈下板頂部の標高を求める方法で週一回を原則として実施された。

実測と理論との対比は対象とした沈下板断面における施工履歴に応じた理論沈下量と沈下板による計測値との比較により行った。No. 364, No. 1200 断面における例を図-12と図-13に示す。

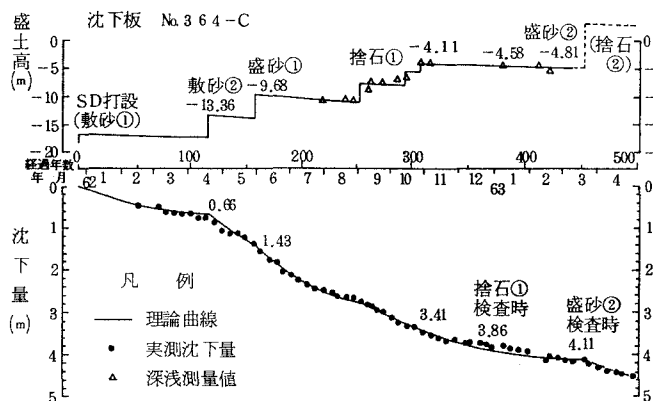


図-12 沈下板断面No.364における理論時間沈下曲線と実測沈下量

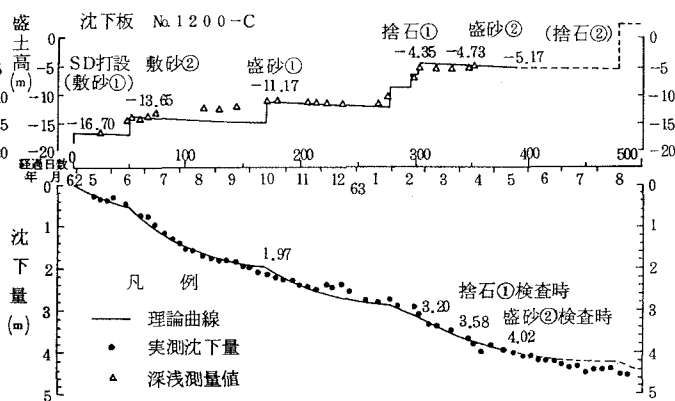


図-13 沈下板断面No.1200における理論時間沈下曲線と実測沈下量

各沈下板設置断面ごとに、システムを用いた敷砂②盛砂①の理論沈下量と沈下板測点A, B, Cでの実測沈下量との比較、また、捨石①と盛砂②までの理論沈下量と沈下板測点Cの実測沈下量との比較を行い、表-2と表-3にまとめた。ここで実測値が理論値を上回った場合を正の値、逆の場合を負の値としてその差異を表わした。

敷砂②盛砂①の管理においては、No.800断面で実測値が理論値をわずかに上回り、No.1200断面では逆に理論値が上回り、No.1650断面では実測値と理論値がほぼ等しい結果となった。

捨石①と盛砂②の管理においては、No.364, No.800, No.1200の各断面で理論値が実測値を上回り、No.304, No.1650の断面で逆の傾向となった。

各工種ともに沈下板設置断面ごとに±10cm程度のバラツキが見られるが、全体の平均値では理論沈下量と実測沈下量はほぼ一致している。

さらに、実測値と理論値との差異を階級別度数分布としてヒストグラムで表わしたものを図-14と図-15に示す。その結果、敷砂②盛砂①の管理、捨石①と盛砂②の管理ともに類似した傾向を示し、実測沈下量と理論沈下量の差

表-2 敷砂②盛砂①管理における実測値と理論値の対比

沈下板	No. 800			No. 1200			No. 1650		
測点	A	B	C	A	B	C	A	B	C
資料数	9	11	10	27	29	29	17	22	22
実測値との差異	6.1	8.9	7.6	⊖8.0	⊖1.1	⊖10.4	3.5	⊖6.5	2.2
差異の平均	7.5 cm			⊖6.5 cm			⊖0.3 cm		
	0.2 cm								

表-3 捨石①と盛砂②管理における実測値と理論値の対比

沈下板位置	No.304	No.364	No.800	No.1200	No.1650
資料数	36	36	25	16	20
実測値との差異	12.6 cm	⊖4.2 cm	⊖9.3 cm	⊖4.7 cm	5.9 cm
	0.1 cm				

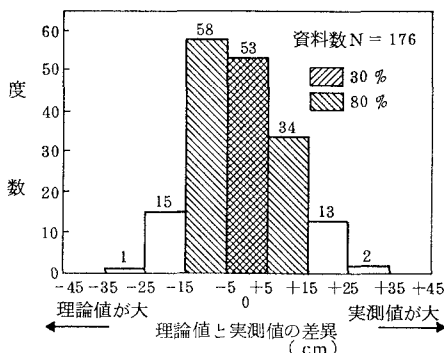


図-14 敷砂②盛砂①管理の場合のヒストグラム

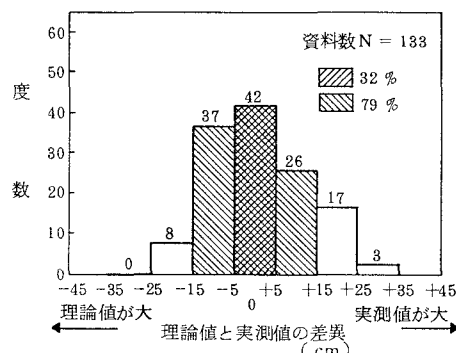


図-15 捨石①と盛砂②管理の場合のヒストグラム

異が±5cm以内に全データの約30%が含まれ、同様に±15cm以内に約80%が、さらに±25cm以内に全データの98%が収まった。これは実測沈下量の計測方法が潮位に基づいた水深の測定によるものであることを考慮すれば、かなり高い精度で理論沈下量と実測沈下量は整合している。

以上の結果より判断して、本工事においてシステムによって算出された沈下量の値は盛土の施工管理の面で十分な精度を有している。

(3) 施工区域全域にわたる沈下管理の評価

前項において沈下板による実測値とシステム理論値との照合を行い沈下板設置位置でのシステム管理の妥当性を確認したが、沈下板を持たない施工区域全域の適合性を調べる適切な方法がない。ここでは、護岸単位延長ごとの資材投入量のバラツキの程度によって、施工区域全域の施工精度の検証を試みた。

表-4 敷砂②盛砂①における単位施工延長あたりの山砂数量管理表

区 域	延 長	①設計数量	②出来形数量	② / ①	③投入数量	③ / ②
No. 594～800	206m	223,510m ³	233,172m ³	1.04	276,558m ³	1.19
No. 800～1000	200	217,000	220,452	1.02	272,771	1.24
No. 1000～1200	200	217,600	226,852	1.04	276,560	1.22
No. 1200～1400	200	218,400	219,433	1.00	264,099	1.21
No. 1400～1600	200	218,400	219,228	1.00	271,350	1.24
No. 1600～1800	200	224,200	226,251	1.01	269,096	1.19
No. 1800～1913	113	129,611	131,477	1.01	149,936	1.14
計	1,319m	1,448,721m ³	1,476,865m ³	1.02	1,780,370m ³	1.21

敷砂②盛砂①の山砂投入において、施工区域の断面No. 594からNo. 1913までを約200mごとに7区域に分割し、その区域ごとに設計数量、出来形数量、投入数量を算出、投入数量と出来形数量との比を求め、そのバラツキの程度により区域ごとの施工精度の確認を試みた。ここで、設計数量と

は設計断面に基づいたNET数量であり、出来形数量とは検査基準断面に対しての出来形の増減を設計数量に考慮した値をいう。投入数量とは施工記録上の土運船の投入位置と船上での検収数量に基づいて区域別に分類した数量である。

その結果、表-4に見られるように投入数量と出来形数量の比は他工区との境界に接する区域において異なった値を示したが、他の区域では平均値に対して2～3%程度の差に収まっている。

以上の結果より、敷砂②盛砂①の施工は前項で述べた沈下板周辺における結果と同様に、施工区域全域にわたって均一な施工精度をもって行われたと推定される。

6. ま と め

本工事においては施工区域内に調査工区を有し事前の土質調査資料が豊富であったこと、原地盤の軟弱層が比較的均一である上、盛土断面形状もほぼ同一であること、さらに新しい深浅測量手法の採用により正確な施工情報が入手できたこと等により、当初の予想を上回る精度で理論沈下量と実測沈下量が整合した。

通常、大きな沈下を伴う盛土工事において、沈下量の経時変化の理論値と実測値が整合することは非常に珍しいとされている。しかしながら、このような沈下管理システムを用いた理論沈下量に基づいた盛土施工管理は、従来の沈下板による盛土管理に比べ、管理範囲が施工区域全域に均一な精度で拡大されるほか、大型作業船の施工を制約する恐れが少なく、大きな沈下を伴い、大規模でかつ急速な施工を要求される埋立工事に適した管理手法であると思われる。

関西国際空港建設工事において、サンドドレーン工法が大規模急速施工を前提とする大水深下の軟弱海底地盤の改良に十分適用可能であることが示され、今後の臨海部開発や沖合人工島建設の有力な工法となると考えられる。本システムも地盤安定解析や土運船投入管理等の他のシステムとの関連性を強化し、同工法における総合的な埋立盛土管理手法として確立していきたい。

参 考 文 献

- 1) 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施工管理』
土木学会論文集第391号／VI-8 1988年3月
- 2) 福手 勤ほか：『関西国際空港におけるサンドドレーン改良地盤の圧密特性』
第23回土質工学研究発表会 1988年6月