

関西国際空港における埋立造成調査工事

関西国際空港(株)建設事務所 正会員 遠藤 博
同 上 正会員 及川 研
同 上 天坂 三明
同 上 井上 文三

1. まえがき

関西国際空港は、大阪湾泉州沖約5 kmの海上に建設される世界初の本格的な海上空港である。建設海域の水深は16.5～19 mと深く、さらに海底には厚さ20 mに達する軟弱な沖積粘土層と数百mにおよぶ洪積粘土層が堆積している。このような厳しい条件下での護岸や埋立の急速施工事例はこれまで皆無であり、今後我が国の各地で続くであろう沖合人工島構想の先駆けとなるばかりでなく、大規模海洋開発プロジェクトとして、国際的にも注目されている。

空港島全体の建設工程は表-1に示すとおりで、平成5年3月の開港を目指して各施設の建設が進められている。空港島の建設工事は昭和62年1月に着工され、外周護岸約11 kmは昭和63年12月に概成した。(写真1)これに引続き現在は埋立工事を鋭意進めているところである。

空港島の埋立工事の特徴は、次の通りである。

- ① 前述したような地盤条件を有することから、埋立施工中および施工後において大きな沈下が予想される。
- ② これらの沈下を短期間に終了させるとともに、強度の増加を図るため、埋立地の全域にわたりサンドドレーンによる大規模な地盤改良を行う。
- ③ 急速施工が必要なため、埋立施工において高さ15 mにおよぶ盛土を揚土作業により連続的に形成する。

このような軟弱な地盤上の大量急速施工を円滑に進めていくためには、埋立による地盤の挙動を正確に把握することが必要である。このため、本工事に先立ち、埋立工事区域内に調査区を設定して各種計測を行い、その結果から設計条件の妥当性や施工法について検討することとした。

本文は、この埋立調査工事における海底地盤の圧密沈下特性、強度増加特性および揚土時の斜面安定について中間的にとりまとめたものである。

2. 埋立造成計画の概要

2・1 土地利用計画

空港島の面積は511 haで、その土地利用計画は図-1に示すとおりである。土地利用計画(第1期)は第2期以降の計画を考慮して、東側には滑走路(長さ3,500 m)や誘導路を、西側には旅客ターミナルビルなどの利便施設を中心に管理施設、貨物基地および給油施設などを配置している。

また、空港アクセス施設として空港島の北側へ鉄道、道路併用の連絡橋を、北西に海上アクセス基地を配置している。

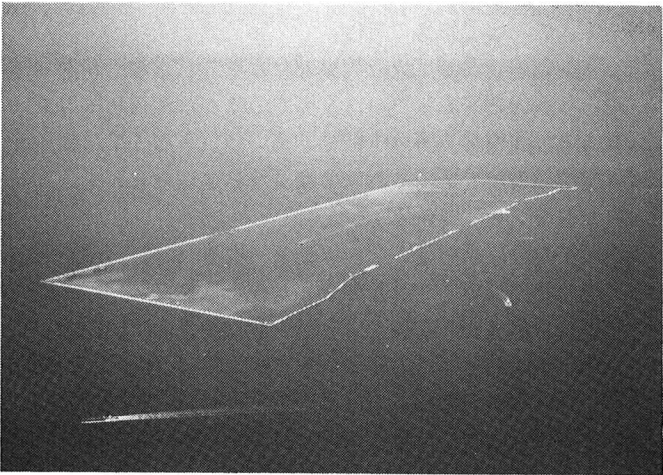


写真-1 空港島全景(平成元年4月)

表-1 空港島建設工程

区分		年						
		S	H					
護 岸	地盤改良							
	本 体 工							
埋 立	地盤改良							
	埋 立							
連絡橋	下 部 工							
	上 部 工							
空 港 施 設								
空港連絡鉄道								

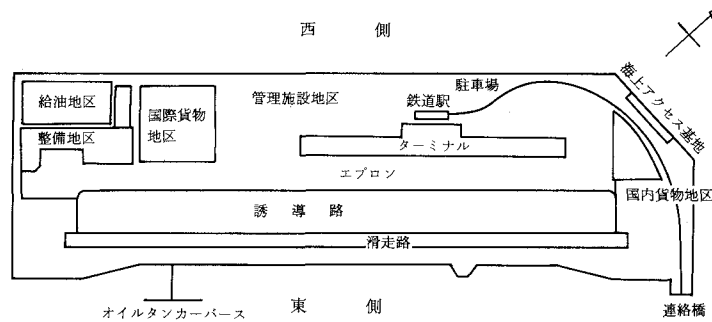


図-1 土地利用計画図

2・2 海底地盤の特性

空港島建設海域は大阪湾東部に位置し、水深16.5～19mで、その海底地形は海岸線から湾中央部に向って緩やかな斜面を形成している。海底の軟弱な沖積粘土層厚は、岸側の護岸部で約16m、沖側の護岸部で約20mである。沖積粘土層の下には、薄い砂れき層と洪積粘土層の互層が数百mの厚さで堆積している。沖積層の土質は空港島の建設区域において顕著な相違はみられず、ほぼ一様でその特性は以下のとおりである。なお設計に用いた値を〔 〕で示す。

単位体積重量 $\gamma_t = 1.4 \sim 1.6$ (gf/cm³) 含水比 $w_n = 50 \sim 120$ (%)

液性限界 $LL = 30 \sim 120$ (%) 液性指数 $I_L = 0.8 \sim 1.2$

非排水せん断強さ ($c_u = 0.02z$ (kgf/cm²) z はGLからの深さ)

圧密係数 $c_v = 60 \sim 140$ (cm/d) ($c_v = 90$ (cm/d))

体積圧縮係数 ($m_v = 0.18 p^{-1.08}$ (cm³/kgf) p は圧密圧力)

2・3 埋立土の特性

埋立土層の厚さは建設海域の水深と埋立による沈下量が大きいため約30mにおよぶものと推定される。空港島511haの埋立に必要な土砂は約1億5千万m³と見込まれ、最盛期には大量の土砂が搬入される。これらの土砂は兵庫県淡路島等の既設土砂採取地に加え、新たに大阪府阪南町と和歌山市加太において開発中の土砂採取地から調達する計画である。

埋立土は、風化花崗岩(マサ土)と和泉層群頁岩、砂岩に大別される。これらの埋立土の物性値は地盤の沈下および安定の検討を行う上で重要な要素となるため、近隣地域で実施した埋立地の実測結果などを参考にするとともに、室内試験を行い、以下のとおりとした。

自然含水比(w) 5～7% れき分含有率 65～90%

細粒分含有率 5% 均等係数(U_c) 40～60

湿潤密度 (ρ_t) 陸上部1.96～2.07g/cm³

水中部2.09～2.21g/cm³

乾燥密度 (ρ_d) 1.70～1.90g/cm³ 相対密度(D_r) 35～65%

N値 地表面～地下水面 $N = 7$

地下水面以下 $N = 9 + 0.4z$

内部摩擦角(ϕ) 30～35°

なお、これらの土質定数については、埋立中および地盤形成後において現地調査を実施し、確認する予定である。

2・4 埋立の施工断面と施工手順

埋立の施工断面を図

—2、施工手順を図—

3に示す。埋立の施工

の概要は以下の通りである。

① 敷砂①を施工後、サンドドレーン(ドレーン径40cm、打設間隔2.5m×2.5m)により地盤改良

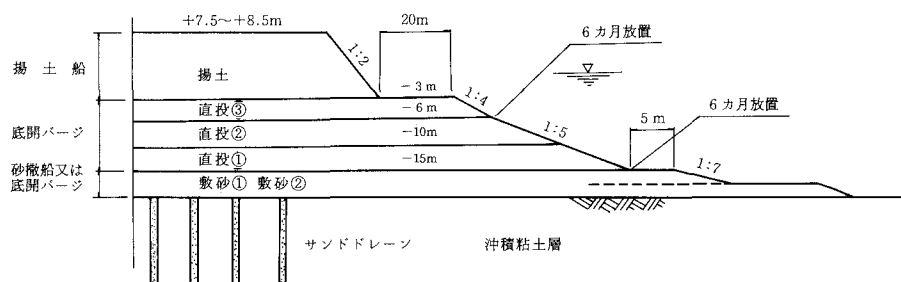


図-2 埋立断面図

を行う。

② ドレーン頭部と敷砂①（サンドマット）を保護するため敷砂②を緩投下により施工し、その後、圧密促進を図るため6ヶ月間放置する。

③ 底開バージによる直投①（-1

0 mまで）、直投②（-6 mまで）を施工し、その後再度圧密促進を図るため6ヶ月間放置する。

④ 海底地盤の強度が予定どおり増加したことを確認した後、底開バージによる直投③（-3 mまで）、揚土船による揚土（+8.5 m）を一気に施工する。

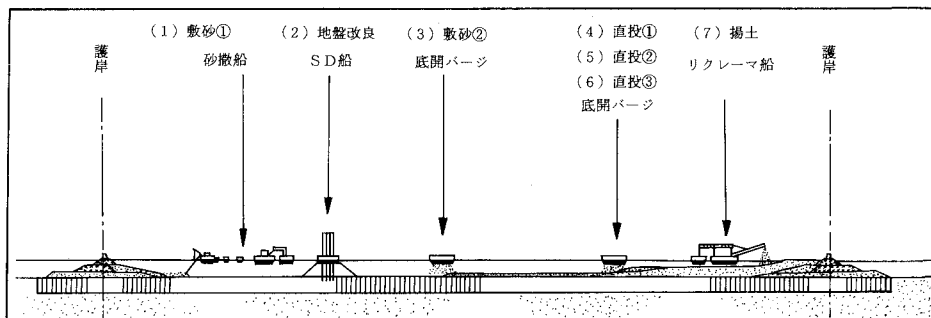


図-3 施工手順図

3. 埋立造成調査工事

3.1 調査内容

サンドドレーンによって厚い軟弱地盤を圧密促進させながら、総高30 mにおよぶ盛土を短期間に、しかも大規模に施工する空港島埋立工事においては、施工の各段階で地盤が予定した範囲内で挙動しているかどうかを確認しなければならない。このためには、現位置で実際と同様の盛土による試験、調査を実施し①埋立てによる地盤の沈下特性の把握②地盤の強度増加の確認と変形挙動の観測を行なう必要がある。

このような観点から、調査区において以下のような計測を実施した。調査区的位置を図-4に示す。また計測項目と計測機器を表-2に、その配置を図-5に示す。

沈下計測は、沈下板（鋼管構造）の他に、二重管沈下計、アンカーロッド式沈下計および水圧式沈下計による方法も併用している。粘土地盤の強度は沈下板の孔を利用してボーリングを実施し求める。また埋立による水平変位は傾斜計により測定する。これらのうち、アンカーロッド式沈下計、水圧式沈下計、間隙水圧計、傾斜計および土圧計による計測は自動計測となっており、計測データはケーブルによって観測槽のデータ集録装置に送信される。

計測機器の設置は、サンドドレーン打設後で敷砂②前の昭和63年4～5月に行い、計測は6月より開始した。計測の頻度は沈下板と杭式二重管沈下計については1回/週、自動計測による各種計測は4回/日としている。

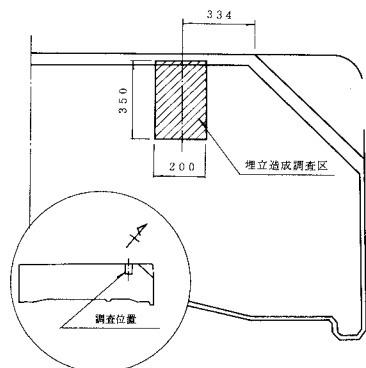


図-4 埋立造成調査区位置図

表-2 計測機器設置一覧表

計測項目	計測機器	計測方式	設置箇所
沈下	沈下板	水位計	10
	二重管沈下計	およびレベル	3
	アンカーロッド式	電気式自動計測	4
	水圧式		3
間隙水圧	間隙水圧計	自動計測	4
水平変位	傾斜計		3
土圧	土圧計		4

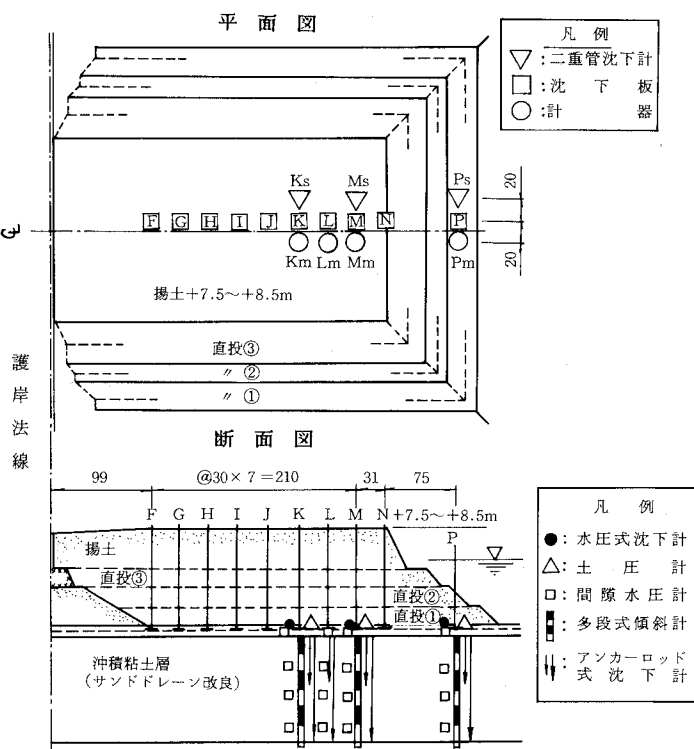


図-5 計測機器の配置

3・2 計測結果と解析

(1) 圧密沈下特性

沈下量に関しては、調査区内の10か所に沈下板を設置し、密な計測を行い、沈下特性を詳細に把握した。その結果、沈下板の場所の違いによる沈下特性の差異は認められなかった。また、沈下計測法の違いによる計測値の比較を行ったところ、図-6に示すようにどの計測法もほぼ同じ沈下傾向を示している。なお、沈下板の沈下量には、直投②の盛土荷重による洪積層の沈下の発生傾向がわずかながら現われている。

空港島海域における事前土質調査によると、圧密に関する定数は次の通りであった。

$$m_v = 0.18 p^{-1.08} \text{ (cm/kgf)} \quad c_v = 90 \text{ (cm/d)}$$

一方、埋立造成工事に先行して行われた護岸工事における沈下特性を解析したところ、実際の沈下量は上記定数によって求められる計算沈下量よりも小さかった。¹⁾ 同じような現象は埋立造成工事においても予想されるところであるが、護岸と埋立造成ではサンドドレーン間隔および荷重条件が異なるので、両者の沈下特性に差異が生じる可能性がある。このため埋立調査区において沈下挙動の計測と解析を行い、今後の埋立造成工事における沈下管理および埋立天端管理に資することとした。埋立調査区における直投②（出来形天端-6m、荷重層厚約15m）は昭和63年10月中旬に完了した。その後約6か月にわたり圧密沈下の挙動観測を行った。この観測によって求められた実測

沈下量と、前記の圧密定数による計算沈下量（A）を図-6に示す。両者を比較すると実測の沈下量は計算沈下量よりも小さかった。そこで、将来沈下量を精度よく予測するために、観測から得られた実測沈下データに対してフィッティングを行い、最終沈下量 S_f を予測し、次式より修正圧密定数を求めることにした。

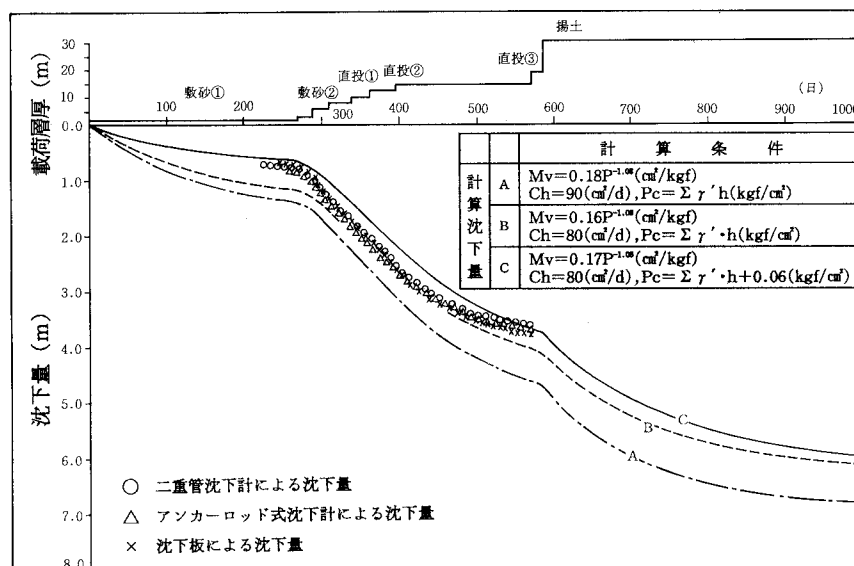


図-6 沈下の実測値と計算値

$$S_f = m_v \cdot \Delta p \cdot H \quad \dots (1)$$

m_v : 体積圧縮係数
 Δp : 増加応力
 H : 圧密粘土層厚

$$T_h = \frac{C_h}{de^2} \cdot t \quad \dots (2)$$

T_h : 時間係数
 C_h : 水平方向圧密係数
 de : ドレーンの有効径
 t : 経過時間

フィッティングによる将来沈下の予測法としては、双曲線法、門田法、星埜法、浅岡法などがあるが、ここでは二次圧密も含めた将来沈下量を精度よく予測するとされる双曲線法を用いた。²⁾ 双曲線法で求められた最終沈下量をもとに、式(1)、(2)より m_v 、 C_h を逆算したところ、以下の定数を得た。

$$m_v = 0.16 p^{-1.08} \text{ (cm/kgf)} \quad C_h = 80 \text{ (cm/d)}$$

そこで、この圧密定数を用いて沈下計算を行い、図-6に示す計算沈下量（B）を得た。計算沈下量は実測値をほぼ再現しているものの、初期の部分では、実測沈下量は計算沈下量よりやや小さめである。これは海成粘土特有の擬似過圧密状態のためと考えられる。そこで、粘土地盤の圧密降伏応力（ p_c ）を調べたところ、沖積粘土の上層部で0.06 kgf/cm²、下層部で0.12 kgf/cm²程度の過圧密状態であることが示されていた。経過日数の初期における沈下は沖積層上部の沈下の割合が顕著であるので、 p_c を次のように設定した。

$$p_c = \sum \gamma' \cdot h + 0.06 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

このような過圧密状態を設定した上で、 m_v 、 c_h 値を逆算したところ、以下の値が求められた。

$$m_v = 0.17 p^{-1.08} \quad (\text{cm/kgf}) \quad c_h = 80 \quad (\text{cm/d})$$

これらの土質定数で計算された計算沈下量 (C) を図-6 に示す。この計算沈下量 (C) は実測沈下量をよく表わしており、今後の埋立造成に対する沈下予測に適用できるものと考えられる。以上の土質定数の修正のもとに、今後予定されている直投③、揚土工に対する沈下を予測したところ、最終沈下量は当初考えられた量より約 70 cm 程度少ないことが分かった。この結果、揚土工においては、この沈下特性を考慮した施工管理が必要である。

(2) 間隙水圧

圧密に関する重要な指標である過剰間隙水圧を調べるために図-5 の K, M, L, P の 4 点の粘土中に間隙水圧計を埋設して計測を行った。図-7 に間隙水圧の経時変化を示す。同図によると、敷砂① (サンドマット) の過剰間隙水圧は盛土施工を通し 0.1 kgf/cm² 以下であり、敷砂①での過剰間隙水圧はほとんど発生していない。すなわちマットレジスタンス等の問題が発生していないことが確かめられた。一方、沖積層の過剰間隙水圧は盛土施工毎に増加しており、直投②直後に 1.2 kgf/cm² 程度の値を示している。直投②における盛土荷重が約 1.5 kgf/cm² であり、段階荷重されたことを考慮すると、間隙水圧は妥当な値を示しているといえよう。一方、放置期間中の間隙水圧の消散は順調に進んでおり、その挙動からも圧密は順調に進んでいると判断される。

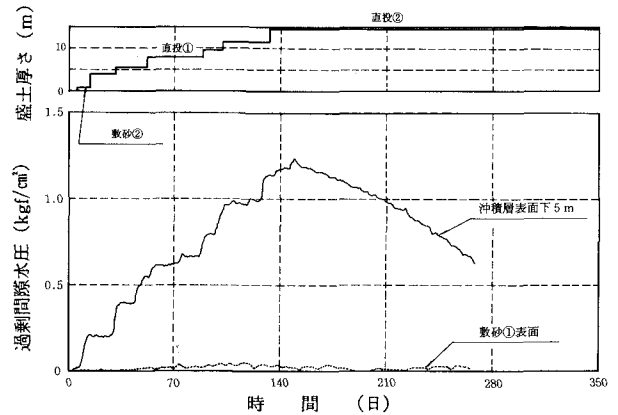


図-7 過剰間隙水圧の経時変化

(3) 強度増加の特性

埋立造成工事では調査区も含めて、サンドドレーン地盤改良を行い、圧密の促進による粘土地盤の強度増加を期待している。直投③、揚土工 (両方で約 2.5 kgf/cm² の載荷荷重となる) は底開バージおよび揚土船で一気に埋立てるもので、かつての埋立または盛土工事では前例のない載荷条件である。このため揚土斜面の安定に対して厳しい管理が要求される。したがって粘土地盤の強度増加に対しても詳細な観測と確認が行われた。粘土地盤の強度増加量 Δc は事前の土質試験結果をもとに次の式で求めることにした。

$$\Delta c = \Delta p \cdot c_u / p \cdot U \cdot \alpha \quad \dots (3)$$

Δp : 増加応力 c_u / p : 強度増加率 = 0.3 と設定
 U : 圧密度 α : 強度発現の遅れを考慮した係数

応力に関する圧密度 U_p がひずみに関する圧密度 U より遅れることは、知られているところであり、 U_p と U の関係は次式で表わされる。

$$U_p = \frac{1}{p_r / p_0 - 1} (10^{U \cdot \log_{10} p_r / p_0} - 1) \quad \dots (4)$$

[p_r : ある載荷段階での最終有効応力 p_0 : 初期有効応力]

強度増加量は厳密には (4) 式で求められる U_p を用いて計算されるべきであるが、ここでは式 (3) の α を 0.9 とした計算強度増加量とチェックボーリングで得られた実測の強度増加量の関係を比較したものを図-8 に示す。同図より、圧密度が低い間は計算値と実測値の差は大きいが、圧密度が高くなるに従って、実測値は計算値に近づくことが分る。この結果、直投②後 4 か月目の実測強度増加量は計算値の約 85 % に相当し、6 か月目では約 90 % に達することが予想される。これらのことから、圧密の進行に伴う強度増加は計算値より若干小さい傾向はあるものの順調に進んでいることが実証された。

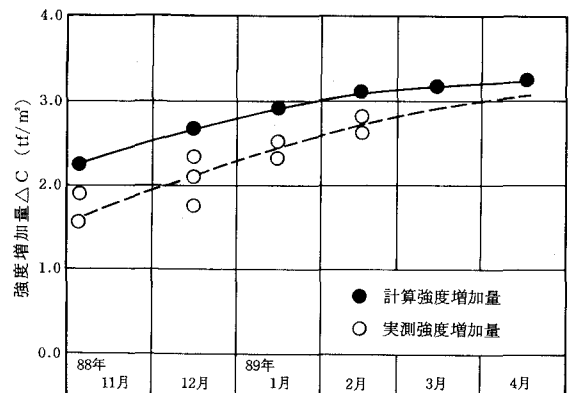


図-8 強度増加量の経時変化

(4) 揚土時の斜面の安定解析

a) 揚土断面の安定解析

直投②後、継続的にチェックボーリングを実施して、強度の発現状況を確認した。その結果、強度はほぼ予定通りに発現していることが分った。この結果に基づいて、揚土断面に対する斜面の安定解析を行った。安定解析にあたっては、斜面の法勾配、埋立土の単位体積重量などの値をパラメーターとして、想定される計算条件に対してシミュレーション計算を行なった。安定計算は砂質土と粘性土の複合地盤であることを考慮して、スエーデン法およびビショップ法を併用した。計算結果を表-3に示す。この結果、天端高+8.5 m、揚土の自然法勾配1:2の断面に対しても所要の安全率が得られた。

b) 盛土施工中の安定管理

一方、斜面が安定計算上安全であっても、地盤構成や土質の性質は複雑であり、地盤強度のばらつきも考えられるので、施工中の載荷がどの程度安全に行なわれているかを知るために、盛土施工中の安定管理を行なう。安定管理は傾斜計による水平変位と沈下板等による沈下量の情報をもとに「松尾・川村法」「栗原法」「富永・橋本法」などの各管理手法を用いて行うことにしている。なお、傾斜計による水平変位量を任意の時間に入手できる新しい観測プログラムを開発し、安定上クリティカルな載荷時には24時間連続的な監視が可能なシステムを採用した。

4. まとめ

関西国際空港における軟弱地盤上の大量急速埋立工事を円滑に実施するため、本工事に先立ち、工事区域の中に調査区を設け、埋立に伴う地盤の挙動を詳細に把握した。埋立工事が途中段階であるため中間的な報告にならざるを得ないが、計測結果とその解析から以下のような結果が得られた。

- (1) 現地における実測沈下量は、事前の土質調査から得られた計算沈下量と比べて小さめである。地盤を若干の過圧密状態と設定した上で、体積圧縮係数と圧密係数を若干修正することにより、計算沈下量は実測沈下量によく一致する。この方法により、埋立による圧密沈下量をかなり正確に予測することができる。
- (2) 圧密に伴う強度増加は、計算値よりわずかに小さい傾向はあるものの、順調に進んでいる。
- (3) ①および②より、サンドドレーンによる圧密は順調に進んでいる。
- (4) 圧密による強度増加を踏まえて、揚土断面の安定解析を行ったところ、計画どおりの断面のままで所要の安全率が確保される。今後、揚土に伴う水平変位等を計測し、斜面の安定管理を行っていく。

現地の調査区では、直投②後の6ヶ月間放置が終了し、平成元年5月より揚土を開始している。揚土工は8月まで続けられる予定であり、この間および揚土完了後に得られた結果とその解析をもとに、埋立の本工事を安全かつ迅速に進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 前田 進 他：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年6月
- 2) 吉国 洋：バーチカルドレーン工法の設計と施工管理、1979年

表-3 揚土斜面安定の検討

ケース	直投③までの 出来形	揚土高	揚土 法勾配	安全率 (F _s)	
				スウェーデン法	ビショップ法
①	直投② 天端高CDL-6m	CDL+7.5m	1:2	1.29	1.70
②	法勾配 1:4		1:4	1.39	1.84
③	直投③ 天端高CDL-3m	CDL+8.5m	1:2	1.19	1.60
④	法勾配 1:5 小段巾 2.5m		1:4	1.28	1.73