

徳島飛行場拡張事業に伴う沈下予測解析の 中間とりまとめ

ANALYSIS OF SETTLEMENT IN TOKUSHIMA AIRPORT EXPANSION PROJECT INTERIM REPORT

芳我耕治¹・山本幹夫²・田辺勇人²・大江吉仁²
Kouji HAGA, Mikio YAMAMOTO, Hayato TANABE, Yoshihito OOE

¹正会員 国土交通省四国地方整備局小松島港湾・空港整備事務所
(〒773-0001 徳島県小松島市小松島町字新港9-3)

² 国土交通省四国地方整備局小松島港湾・空港整備事務所
(〒773-0001 徳島県小松島市小松島町字新港9-3)

We are executing Tokushima airport expansion project, what is to extend the runway from 2,000m to 2,500m to enable the larger airplane to take off/land, and what is the relocation of passenger terminal facilities. In this project, it is required that the area is rapidly reclaimed about 40 hectares in short period of 4.5 years. Under the situation of such a large-scale, and rapid construction, accurate reclaiming design on the minute settlement presumption that considers functionality, economy, and constructional is demanded. This paper reports the interim results of settlement analysis based on monitoring while reclaiming this area.

Key Words : Settlement, Monitoring, Settlement plate, Compression index, Settlement calculation,

1. はじめに

徳島飛行場では、増大する航空需要に対応するため、大型機の就航が可能な滑走路の2500m化、及び大型機用ターミナル施設の移設等の拡張整備事業を進めている。図-1は、拡張整備範囲を示したものである。本事業では、約40ha(約700万m³)に及ぶ海上埋立、用地造成を約4年半の期間で急速に施工する必要がある。軟弱地盤上の空港埋立例としては、超軟弱な浚渫粘土が問題となった東京国際空港¹⁾や、長期的な沈下が問題となっている関西国際空港^{2) 3)}が挙げられる。しかし、いずれの空港においても圧密沈下を促進させるために地盤改良が実施されており、当該飛行場では外郭護岸部のみ地盤改良を実施している点で異なっている。徳島飛行場拡張部においては、無処理軟弱地盤上の大規模急速施工の状況下で、飛行場の機能性、経済性、施工性を考慮し、目標地盤高を確保するために精度の高い沈下予測が要求された。しかし、これには次の課題があった。

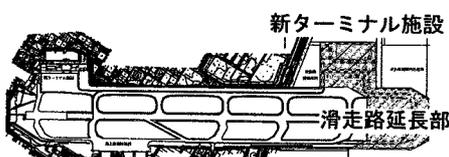


図-1 徳島飛行場拡張整備計画 平面図

①海上大規模埋立による地盤の大きな沈下量とその収束時期の把握、②急速施工に伴う埋立完了後の残留沈下量の把握、③施工時期の違いによる不等沈下の把握。本報では、これら課題を解決するために、施工中に実施した動態観測に基づき地盤の圧密特性を検証し、沈下予測に反映させることで精度の高い沈下予測を実施しているため、その中間結果を整理し報告する。

2. 用地造成工事の概要

表-1は拡張事業の工事工程を示したものである。用地造成工事は、外周護岸の築造を行いつつ以下の順序で実施している。①直投(海底~DL-2.5m)：底開式の大型土運船による、限界水深までの直接投入による埋立。②揚土1(DL-2.5m~+2.5m)：直投完了後、護岸開口部の締め切りを実施後のリクレーマ船、32tダンプトラック、ブルドーザ等による造成。③揚土2(DL+2.5m以上)：造成時にブルドーザおよび振動ローラによる敷き均し、締め固めを実施。揚土2工事は、試験施工により路床盛土、路体盛土に区分して転圧回数、仕上がり厚を設定した。また、揚土2は、海上工事の制約から、造成盛土工事と並行して仮置盛土を行っている。

なお、直投材は、細粒分が20%以下の良質な購入土を使用し、ターミナル部に用いた、揚土1・2材料は、兵庫県、和歌山県及び首都圏から発生する建設発生土（約50万m³）を用いている。

表-1 拡張事業の工事工程

	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20
護岸築造								
直投埋立								
造成(揚土1)								
造成(揚土2)								

3. 地盤概要

(1) 地形概要

徳島飛行場は、徳島県中西部の臨海地域、旧吉野川河口の右岸に位置し、今切川の河口に挟まれた三角州性の沖積低地に位置している。飛行場が位置する沖積低地の沖積層は、河川からの土砂の供給と波浪による浸食・堆積が交互に作用し複雑な地層構造であると推定される。

(2) 地質概要

図-2は、造成工事に先がけて実施した地質調査に基づいて作成した当該地の地質断面の概要である。沖積層の層厚は、40m程度確認されており、その内、上位30m程度が軟弱な層と判断された。

この地域の地質資料⁴⁾によると沖積層は下位から、下部層、中部層、および上部層に大きく分類されている。沖積下部層は、砂礫からなり、最大層厚10mとなる。沖積中部層は、おもにシルト～粘土からなり、縄文海進（5～6千年前）で堆積した海成粘土である。下半部には層厚0.2～1.0mで火山灰層を挟んでいる。沖積上部層はおもに砂～シルトで構成され、海退にともなって形成された三角州、潟湖に埋積した堆積物と推定されている。これら地盤の特徴は当該地における調査結果とも一致しており、造成領域の地層は特異な構成をしていないことがわかる。そこで、沈下検討においては、臨海地域の特徴を踏まえつつ調査結果に基づいて断面のモデル化を行った。

4. 沈下予測の前提条件

(1) 沈下予測の検討方針

図-3は、埋立領域の沈下予測の流れを示したものである。沈下予測では、用地造成初期に海底に設置した沈下板および各施工段階で盛土内に設置した沈下板による動態観測を継続し、観測結果を地質調査および室内土質試験結果により設定した沖積粘性土層の圧密特性（初期値）に反映させ、段階的に沈下

量の検証・精査・補正を行い、予測精度の向上を図る様にしている。

地盤沈下予測手法は、以下の理由からCc-Cv法⁵⁾による一次元圧密解析手法を採用した。

- ・当該地地盤は長期沈下を引き起こす洪積粘土層が厚く堆積する地盤では無く、洪積層の沈下量が小さいことが想定されること
- ・沈下の対象となる沖積地盤の層厚は30m程度と埋立幅500mに比べ薄く一次的な沈下挙動を示すと考えるのが妥当であること

Cc-Cv法による一次元圧密解析手法を計算手法に用いることで、造成端（護岸部）における側方移動の予測や長期沈下の予測は別途手法により実施する必要がある。しかし、長期圧密の影響が小さい、考慮する解析パラメータが少ない、モデル化が容易であることから、施工に並行した迅速な予測を可能としている。なお、予測した総沈下量および残留沈下量は、用地造成で必要となる土量の算出、嵩上げ量の設定時の基礎資料として用いている。

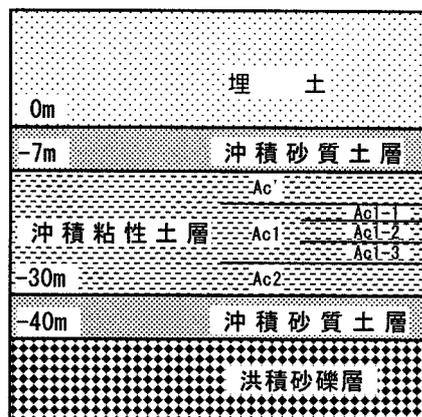


図-2 滑走路拡張部地質断面概要図

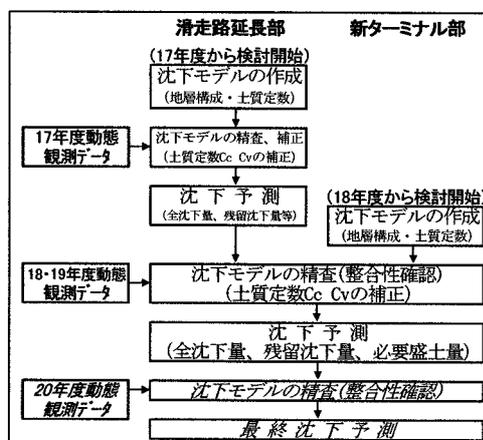


図-3 沈下検討フロー

(2) 沖積粘性土層の圧密特性

沈下予測を行うにあたって、地質調査結果を基に当該地盤における軟弱な沖積粘性土層の圧密特性の設定を行った。図-4は、地盤の圧密特性を評価する

際に考慮した調査位置を示したものである。圧密特性を整理した結果、Ac', Ac1-2, およびAc1-3の圧縮指数(Cc)では、新設エプロン・ターミナル部の値の方が滑走路拡張部の値と比べて2割程度大きく、Ac2のCcでは、逆に滑走路拡張部の方が1割程度大きな値であることが判明した。このことから、地盤の圧密特性は、滑走路拡張部、および新設エプロン・ターミナル部の2つの領域に分けて設定した。

図-5は、沖積粘性土層の圧密降伏応力(Pc)の深度分布を示したものである。当該地の沖積粘性土のPcは、有効土被圧の1.5~2.0倍程度の値を示しており、現状では過圧密状態であることがわかった。これは、海進、海退、および波浪による堆積、浸食を繰り返すことで、土被圧が大きく変化することが主な原因と推定される。

表-2に調査結果に基づいて設定した地盤定数(初期値)を示す。当該地盤の様に粘性土が過圧密状態である場合、過圧密状態から正規圧密状態への移行が場所により様々であり調査結果に基づく物性による沈下予測では限界がある。このため、施工中の動態観測データに基づいた沈下量の検証・精査・補正を行い、予測精度の向上を図ることが必要となる。

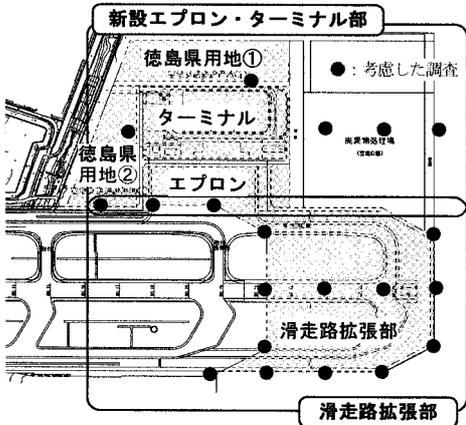


図-4 検討で考慮した土質調査位置平面図

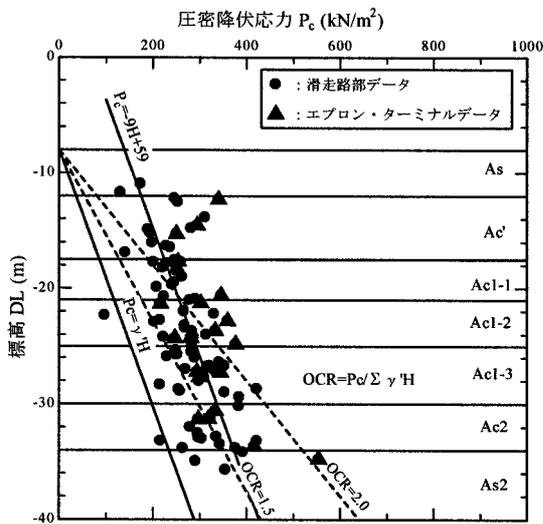


図-5 沖積粘性土層の圧密降伏応力の深度分布

(3) 検討断面のモデル化

図-6は、沈下検討における盛土のモデル化の概念を示したものである。大規模な埋立における沈下予測では、施工中においても沈下が進行していることから、施工段階ごとに出来形の管理を行い、実際の造成層厚(上載荷重)を把握し、検討モデルに造成層厚を反映させることが予測精度の向上につながる。そこで、本予測においても、滑走路延長部と新ターミナル部ごとに、実際の施工層厚を反映したモデルを作成した。

表-2 沖積粘性土の圧密特性

地層名	共通			滑走路拡張部		新設エプロンターミナル部	
	水中重量	間隙比	圧密降伏応力	圧縮指数	圧密係数	圧縮指数	圧密係数
	γ_{sat} kN/m ³	e	Pc kN/m ²	Cc	Cv cm/d	Cc	Cv cm/d
埋土	10	-	-	-	-	-	-
As1	10	-	-	-	-	-	-
Ac'	8.3	1.1	252	0.20	1738	0.24	3500
Ac1-1	8.4	1.0	283	0.26	1277	-	-
Ac1-2	8.2	1.1	310	0.31	1623	0.35	1500
Ac1-3	8.0	1.1	351	0.30	1437	0.34	2800
Ac2	8.6	1.0	391	0.36	1144	0.33	1250

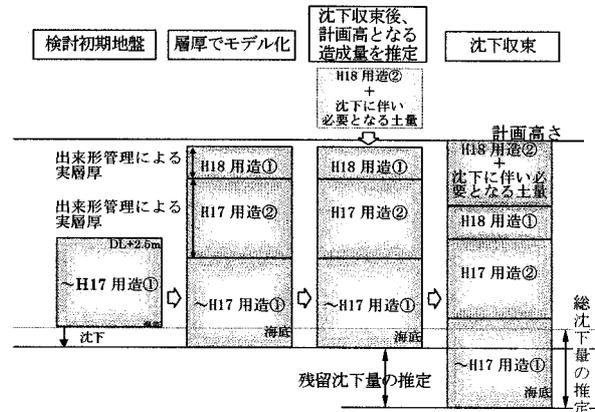


図-6 検討断面のモデル化概念図

5. 滑走路拡張部の沈下予測

(1) 沈下動態観測

施工中に発生する沈下量および施工層厚を把握するため、図-7に示す様に沈下板を面的に配置し、継続した観測を行っている。海底沈下板は、総沈下量を把握することを目的として、新設エプロン部に1箇所、滑走路拡張部に2箇所、海底に設置している。また、陸上盛立て以降の沈下を把握することを目的として51箇所に盛土内沈下板を設置している。

図-8は、海底沈下板と盛土内沈下板が隣接する陸側海底沈下板と盛土内6H沈下板、および海側海底沈下板と盛土内6B沈下板の動態観測結果を示したものである。なお、海底沈下板の値は盛土内沈下板設置時点を0としている。同図から海底沈下板と盛土内

沈下板での沈下量の差、つまり両沈下板に挟まれた盛土材の圧縮量(S)は、陸側で12cm、海側で5cmであることがわかる。この時、挟まれた盛土材の層厚(H)は10mであることから、盛土材の圧縮沈下率(S/H)は陸側で1.2%、海側で0.5%となる。

滑走路拡張部における盛土層厚は、陸側で16m、海側で20mあることから、盛土材による圧縮沈下量は10cm～19cmと粘性土の圧密沈下量の1割以下と小さな割合となる。従って、滑走路拡張部における沈下量は、軟弱な沖積層の圧密特性を精度良く評価することで予測が可能となる。

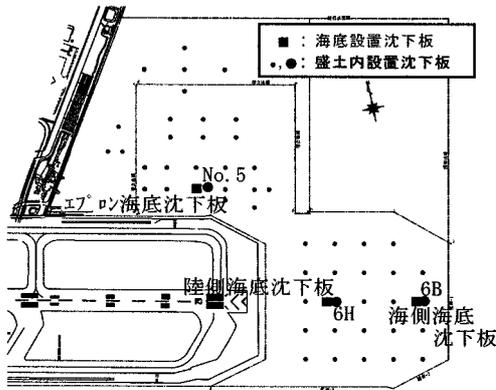


図-7 沈下板配置図

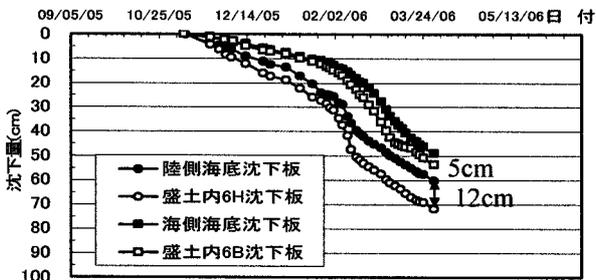


図-8 隣接する沈下板による動態観測結果

(2) 滑走路拡張部における圧密沈下予測の検証と圧密特性の補正

表-3は、造成段階において実施した圧密特性の検証・補正履歴一覧を示したものである。予測の検証は3年間で7回実施しており、補正は予測値が動態観測結果と一致する様に各土層のCc, Cvに補正率を乗じることで行っている。

図-9、図-10は、動態観測結果と補正した圧密特性を用いて予測した沈下～時間関係を比較したものである。両図から、初期段階の補正値を用いた予測は実際の観測結果と大きくずれていることが判る。しかし、3次検討以降の予測では、圧密特性の補正を行うことなく、断面モデルおよび工程の修正、工事車両による交通荷重の考慮と言った条件の微修正を行うことで実現象を精度良く表現できている。これは、粘性土が過圧密状態もしくは過圧密状態から正規圧密状態に移行している段階での補正値では、

その後発生する正規圧密状態で沈下を評価することが困難であったことに対し、3次検討以降は正規圧密領域での沈下を長期にわたり観測でき、粘性土層の正規圧密領域における圧密特性を精度良く把握できたことによると考えられる。

表-3 圧密特性の検証・補正履歴一覧

年度	検証・補正時期	補正率		造成状況	粘性土の状態 ^{※)}
		圧縮指数	圧密係数		
		Cc	Cv		
17	初期値	1.0倍	1.0倍	-	-
	1次検討 H17.7	0.55倍	200倍	DL-2.5m →DL+2.5m	過圧密
	2次検討 H18.2	3.0倍	2.0倍	DL+2.5m →DL+7.5m	過圧密→ 正規圧密
18	3次検討 H18.3	2.3倍	3.0倍	DL+7.5m →DL+8.5m	正規圧密
	4次検討 H18.10	3次検討と同じ値		DL+8.5m →DL+11.0m	正規圧密
	5次検討 H19.3	3次検討と同じ値		海底沈下板 周辺造成無	正規圧密
19	6次検討 H19.8	3次検討と同じ値		海底沈下板 周辺造成無	正規圧密
	7次検討 H19.12	3次検討と同じ値		海底沈下板 周辺造成無	正規圧密

※) 粘土の状態は、上載荷重と圧密降伏応力を比較して判断した

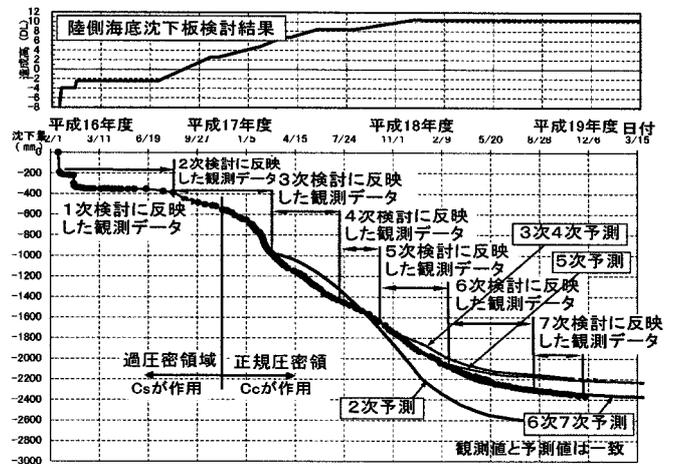


図-9 陸側海底沈下板沈下予測結果

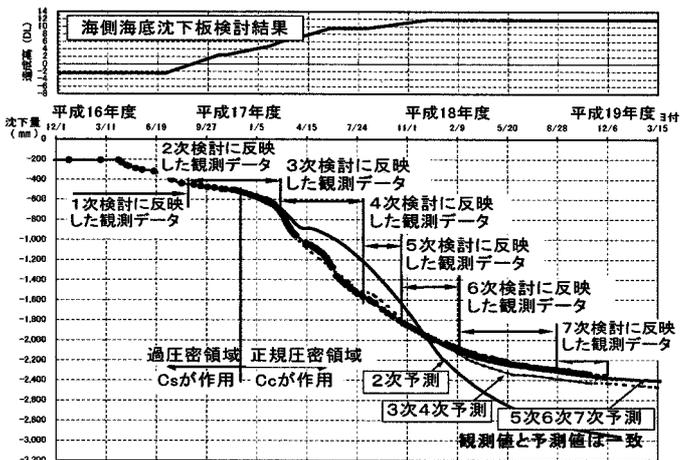


図-10 海側海底沈下板沈下予測結果

6. 新設エプロン・ターミナル部の沈下予測

(1) 沈下動態観測

図-11は、滑走路と同様に海底沈下板と盛土内沈下板が隣接するエプロン海底沈下板と盛土内No.5沈下板(図-7 位置図参照)の動態観測結果を示したものである。同図から両沈下板に挟まれた盛土材の圧縮量(S)は、9cmであることがわかる。この時、挟まれた盛土材の層厚(H)は6mであることから、新設エプロン部における盛土材の圧縮沈下率(S/H)は1.5%となる。

新設エプロン部における盛土層厚は、陸側で7m、海側で13mであることから、盛土材による圧縮沈下量は11cm~20cmとエプロン部における粘性土の圧密沈下量の1割~2割程度と滑走路のそれと比べて大きな割合となる。また、隣接する新設ターミナル用地および盛土材の仮置用地として利用している徳島県造成用地では、盛土材に細粒分が多い建設発生土を利用しており、大きな盛土材の圧縮沈下が懸念された。従って、新設エプロン・ターミナル部における沈下予測は、軟弱な沖積層の圧密特性と盛土材料の圧縮特性を精度良く評価する必要があると考える。

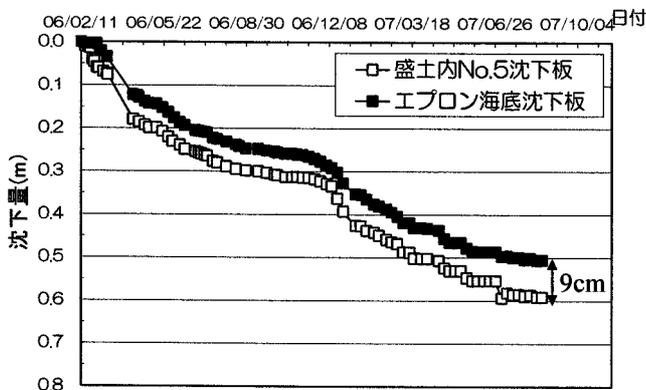


図-11 隣接する沈下板による動態観測結果
(新設エプロン部)

(2) 盛土材の圧縮特性

新設エプロン・ターミナル部においては盛土材の圧縮沈下量が総沈下量に占める割合が大きい。従って、新設エプロン・ターミナル部の沈下検討においては、①粘土層の過圧密領域の圧密特性、②正規圧密領域の圧密特性、および③盛土材料の圧縮特性をそれぞれ把握しなければ、同地区の沈下現象を精度良く評価することは不可能となる。

そこで、動態観測結果から盛土材の圧縮量を算出し、単位盛土層厚当たりの圧縮量と上載荷重(有効土被圧)の関係に整理することで盛土材の圧縮特性を評価した。

図-12は盛土材の単位層厚当たりの圧縮量と有効土被圧の関係を示したものである。同図から、若干

バラツキが認められるが、エプロン・ターミナル地区、および徳島県造成用地(仮置用地)の2つの地区ごとに片対数グラフ上でほぼ直線の関係があることがわかる。そこでエプロン・ターミナル地区、県用地ごとに圧縮量と有効土被圧の相関関係を表-4に示す様に把握し、ターミナルおよび徳島県造成用地の全沈下量(沖積層の圧密沈下量+盛土の圧縮沈下量)を予測した。

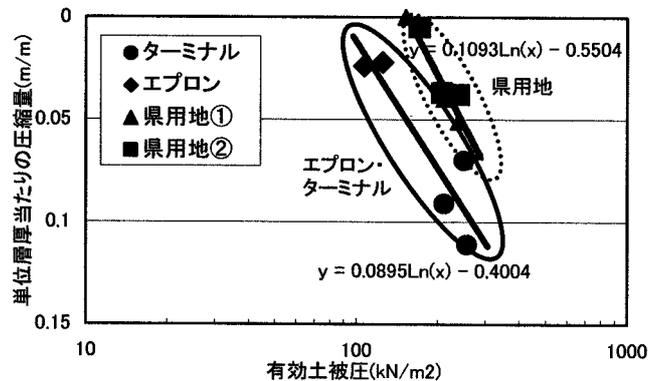


図-12 盛土材の単位層厚当たりの圧縮量と有効土被圧の関係(4次補正時の関係)

表-4 単位盛土層厚当たりの圧縮量と有効土被圧の相関式

地区	相関式(4次補正時の関係)
新設エプロン	$\Delta \varepsilon = 0.09 \ln(P) - 0.40$
新設ターミナル	
徳島県用地①	$\Delta \varepsilon = 0.11 \ln(P) - 0.55$
徳島県用地②	

$\Delta \varepsilon$: 単位盛土層厚当たりの圧縮量 ($\Delta \varepsilon < 0$ で $\Delta \varepsilon = 0$)
P: 有効土被圧 (kN/m²)

(3) 新設エプロン・ターミナル部における圧密沈下予測の検証と圧密特性の補正

表-5は、新設エプロン・ターミナル部の造成段階において実施した圧密特性の検証・補正履歴一覧を示したものである。また図-13は、エプロン部における動態観測結果と補正した圧密特性を用いて予測した沈下~時間関係を比較したものである。

沈下予測の検証は2年間で5回実施しており、補正は滑走路検討時と同様に予測値が動態観測結果と一致する様に各土層のCc, Cvに補正率を乗じることで行っている。

新ターミナル部における粘性土の圧密特性は、海底に設置した沈下板により把握している。上載荷重から判断すると、1次検討時および2次検討時の動態観測データはその殆どが、過圧密領域での沈下となる。その後、4次検討時の観測において正規圧密領域の沈下現象を計測し始めたと推測している。従って、1次~3次検討時点において、動態観測結

果から正規圧密領域の圧密特性を評価しているが、正規圧密領域のデータが不足しており、その予測精度は低く、その後の検証により再補正が必要となったと考える。

建設発生土による盛土の圧縮特性は、海底に設置した沈下板と盛土中に設置した沈下板の関係から把握している。検討においては、沖積粘性土層のみの沈下量と全沈下量(沖積層の圧密沈下量+盛土の圧縮沈下量)の予測精度が重要となる。

動態観測結果に基づく盛土の圧縮沈下予測は双曲線法により実施している。双曲線法では放置期間の計測結果が重要となるが、1次～3次検討時点では、県用地仮置地区において、仮置盛土が連続して造成され、十分な放置期間のデータが得られていない。このため、1次～3次検討では、盛土の圧縮特性の推定精度が低かったと判断する。一方、4次検討時

表-5 圧密特性の検証・補正履歴一覧
新設エプロン・ターミナル部

年度	検証補正時期	補正率				盛土圧縮特性	造成状況	粘性土の状態※
		過圧密領域		正規圧密領域				
		Cs	Cv	Cc	Cv			
	初期値	1.0倍	1.0倍	1.0倍	1.0倍	-	-	-
18	1次検討 H18.3	0.28倍	4.0倍	2.3倍	3.0倍	初期設定	DL+2.5m ↓ DL+5.2m	過圧密
	2次検討 H18.10	0.28倍	1.6倍	1.35倍	1.6倍	再補正	DL+5.2m ↓ DL+5.5m	過圧密
	3次検討 H19.3	2次検討と同じ値				2次検討と同じ値	DL+5.5m ↓ DL+6.5m	過圧密 →正規
19	4次検討 H19.8	0.26倍	1.6倍	1.7倍	1.6倍	再補正	海底沈下板 周辺造成無	正規 圧密
	5次検討 H19.12	4次検討と同じ値				4次検討と同じ値	海底沈下板 周辺造成無	正規 圧密

※) 粘土の状態は、上載荷重と圧密降伏応力を比較して判断した

点では、比較的長期に渡る放置期間のデータが観測され、精度の高い盛土の圧密特性の把握が可能となったと考える。

沈下検討により予測した総沈下量と残留沈下量は、用地造成に必要となる土量、および目標計画高さを確保するために必要となる嵩上げ高さを設定する際の基礎資料とし、次段階における用地造成工事に反映させている。

7. まとめ

用地造成で必要となる土量の把握、供用後に目標計画高さを確保するための嵩上げ量の設定を目的として沈下予測検討を実施した結果以下の結論を得た。

- 1) 沈下予測の結果、精度の高い沈下予測が実施でき、当該検討における一次元圧密解析手法の妥当性が確認できた。
- 2) 逐次盛立段階における動態観測結果による沈下予測の精査が予測精度の向上につながることを示した。
- 3) 建設発生土の圧縮量を把握することで、建設発生土による埋立領域における沈下予測精度、および必要土量の算定精度を向上できることを示した。
- 4) 予測された造成区域別の残留沈下量は、目標計画高さを確保するために必要となる施工層厚、嵩上げ量、および必要土量の算定に反映させることができた。
- 5) 沈下予測精度を向上させたことで、用地造成で必要となる土量を精度良く把握し、盛土材の海上輸送、および用地内の陸上輸送を最小限に抑えることができ環境負荷を抑えることができた。

今後は、更に予測の精査を行い、舗装工事実施に伴う用地造成最終段階における目標計画高さを確保するための最終造成高さの設定に、沈下検討成果を活用していく予定である。

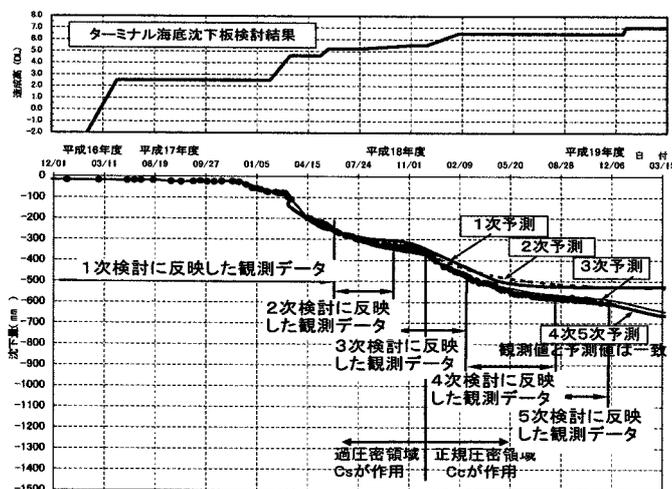


図-13 陸側海底沈下板沈下予測結果

参考文献

- 1) (財)沿岸開発技術研究センター：東京国際空港沖合展開事業技術総録，2000。
- 2) 関西国際空港株式会社：関西国際空港埋立造成工事誌，1994。
- 3) 平林弘，森川嘉之，鈴木慎也，田端竹千穂：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，海洋開発論文集，第22巻，pp.745-750，2006。
- 4) 日本の地質「四国地方」編集委員会編：日本の地質8 四国地方，共立出版株式会社，1991。
- 5) 港湾施設の技術上の基準・同解説，社団法人日本港湾協会，(上巻)2編第11章11.3，pp.235-241，1999。