

# 国際線エプロンにおけるエプロン不同沈下の検討

国際線エプロン JV 天野 喜勝

キーワード：圧密沈下，不同沈下，エプロン舗装，FUTO90

## 1. まえがき

国際線エプロンの事業では、面積約 35ha という広大なエプロン範囲においてコンクリート舗装を行った。当該事業用地の地盤には沖積粘性土が厚く堆積しており、エプロン舗装等の増加荷重による圧密沈下の発生、更には粘性土層の層厚及び土質特性のばらつきに起因する不同沈下の発生が懸念された。

また、事業用地内には、高さ 5~10m 程度の仮置土（既設盛土）も存在しており（図-1、図-2 参照）、当該部周辺については、過圧密状態と正規圧密状態との差に起因する不同沈下の発生も懸念された。

さらに、事業用地内の地下には京浜急行シールドトンネルや三菱石油シールドトンネル等の重要施設が整備されており、それらの近傍については影響対策として軽量盛土を採用し、盛土による増加荷重をほぼ 0 とする必要があるため、隣接区域との増加荷重の差による不同沈下の発生も懸念された。

このように様々な要因により不同沈下が発生し易い状況の場合、一般的には地盤改良で不同沈下を抑制することが考えられるが、当該事業用地は広大であり時間的な制約や事業費の観点からも、全域に地盤改良を採用することは困難であった。そこで、本事業においては、様々な要因で発生する不同沈下を的確に予測しコンクリート舗装に与える影響を定量的に評価することで、エプロン舗装に要求される性能を満足するように対策を立案した。

本報文では、上記の不同沈下に対する設計概要、及び施工時に実施した管理概要について報告する。

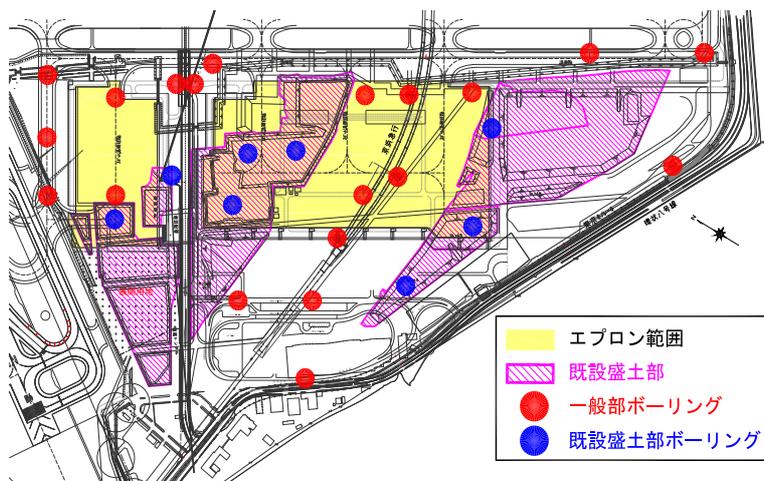


図-1 エプロンと既設盛土の範囲



図-2 仮置土状況

## 2. 地盤の概要

### 2-1 対象地盤の土層構成

図-3 に代表箇所土層断面を示す。土層構成は、上から Bs 層、As1 層の砂質土層が 10m 程度堆積しており、その下部に沈下の主な原因となる沖積粘性土層（Ac2 層）が 20m 程度と厚く堆積している。Ac2 層は砂分の混入程度により上下層に分割でき、更に沈下検討を行う上で圧密特性等に注目して細分化した。Ac2 層以深には洪積層が堆積している。

		地質凡例			
地質時代	地層区分	記号名			
		一般部		既設盛土部	
現世	盛土層	Bs	▽ AP 3.3m	Bs	▽ AP 7.3m
			▽ AP 1.0m	Bs	▽ AP 1.3m
完新世	沖積第 1 砂質土層	As1	▽ AP 5.7m	As1	▽ AP 5.7m
	沖積第 2 粘性土層	Ac2上-1	▽ AP 11.0m	Ac2上	▽ AP 12.3m
		Ac2上-2	▽ AP 12.4m		
		Ac2下-1	▽ AP 19.0m	Ac2下-1	▽ AP 19.0m
		Ac2下-2	▽ AP 23.0m	Ac2下-2	▽ AP 22.7m
		Ac2下-3	▽ AP 25.0m		

図-3 土層構成

## 2-2 沖積粘性土の圧密特性

圧密試験結果は、一般部と既設盛土部に分類し土層毎に整理した。Ac2 下層における  $e-\log P$  曲線を一般部と既設盛土部のそれぞれについて、図-4(a)、図-4(b)に示す。図中に平均値のラインを示したが、これを見て分かるように、一般部・既設盛土部ともに相当なばらつきがある。

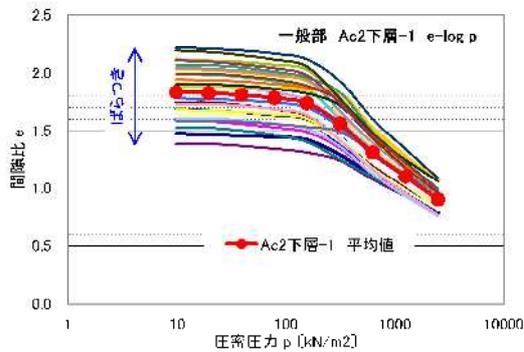


図-4(a) 一般部  $e-\log P$  曲線

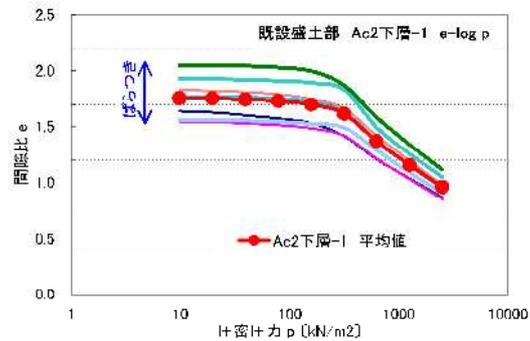


図-4(b) 既設盛土部  $e-\log P$  曲線

## 3. 既設構造物に対する影響対策工

エプロン範囲の直下には、図-5に示すように京浜急行シールドトンネル、三愛石油シールドトンネルといった重要構造物が配置されている。これらの施設に対しては、盛土による沈下の影響を与えないように、軽量盛土による対策を採用した。軽量盛土の仕様については、それぞれのトンネルに求められる供用性、安全性等から決定し、部位毎に3種類の軽量盛土 (SGM, FCB, EPS) を使い分けた。

図-6(a)にSGM、図-6(b)にFCBの施工状況写真を示す。

京浜急行シールドトンネルは、南側エプロンを分断するように走っている。トンネル直上は軽量盛土の対策工を施すことにより沈下が小さいが、トンネルを挟んだ左右のエプロンは400mm程度の沈下が見込まれるため、エプロン舗装にとっては不同沈下が生じやすい厳しい条件下となっている。

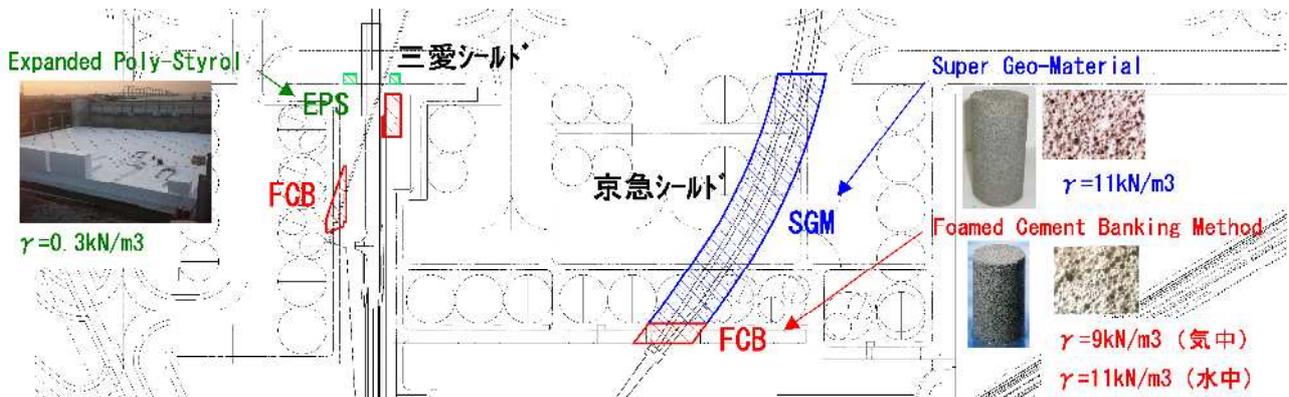


図-5 既設構造物に対する影響対策工



図-6(a) SGM施工状況



図-6(b) FCB施工状況

#### 4. エプロン舗装の要求水準

エプロン舗装については、以下の性能を満足する必要がある。

- ・ 作用する荷重に対し、十分な支持力・耐久性を持つ舗装構造とすること
- ・ 設計供用期間中においてエプロン等の勾配が規定勾配を逸脱しないものとし、所要の構造安定性、使用性を確保すること

しかしながら不同沈下が生じた場合は、エプロン舗装に以下の問題が生じる可能性がある。

- ・ 地盤の不同沈下により舗装版と路盤の間に空隙が生じ、これにより航空機載荷時の曲げ応力が大きくなり、舗装版が破壊する。
- ・ 不同沈下によって路面の平坦性が損なわれ、航空機の走行性を維持するために必要な勾配が満足されなくなる。

エプロン舗装に対する上述した影響を評価する上で、不同沈下が具体的にどのように発生するのかを定量評価する必要がある。不同沈下の発生を定量的に評価することが可能であれば、舗装の耐力は FEM 解析で求めることが可能であるし、勾配についても初期勾配からの変化を追跡することで要求水準を満足するか否かの評価が可能となる。

#### 5. エプロン不同沈下の検討

##### 5-1 基本方針

エプロン舗装に対する影響を評価する上で、不同沈下の発生を定量的に評価することが必要であるが、一般的に粘性土の圧密沈下量とその分布を一義的に決定することは困難である。しかしながら、エプロン舗装の評価に際しては高い精度の沈下予測が求められる。

上記の問題を解決するために、考案されたのが不同沈下シミュレーション手法である。圧密沈下量の予測精度が悪いのは、多くは地盤のばらつきに起因していると考えられる。本来ばらつきを持っている地盤を一義的な定数をもって評価するため、予測値と実測値が整合しない事態が発生する。従って、同手法においては一義的な土質定数を用いるのではなく、各種地盤定数のランダムな組み合わせを乱数により発生させるという手法（モンテカルロ法）で地盤のばらつきを考慮している。複数回乱数を発生させ、その都度沈下量を算定するこうした手法を用いることにより、一義的な結果を求めることは困難でも、発生しうる全ての沈下ケースを評価することで、真の値はそれらのケース内のどこかに含まれていると考える方法である。解析プログラムとしては FUTO90<sup>1)</sup>を使用した。ここで、FUTO90は奥村・土田<sup>2)</sup>により開発されたモンテカルロシミュレーションを用いた不同沈下予測プログラムである。

##### 5-2 検討条件

###### 5-2-1 解析土層モデル

本検討では、土質調査の結果を反映して現況に出来る限り忠実な三次元土層モデルを設定した。図-7にモデルの代表断面を示す。図中の上が三次元土層モデルより切出した断面図、下が FUTO90 に使用する解析メッシュ図である。このとき、鉛直方向のメッシュ分割については、通常深度方向の土質定数の相関距離が 4~5m であることから、4m を超えない範囲で設定した。また、三次元土層モデルの Dc2 層に深に関しては、過圧密比 OCR が平均 2 以上であることから、圧密沈下はほとんどないと判断しモデル化を省略した。

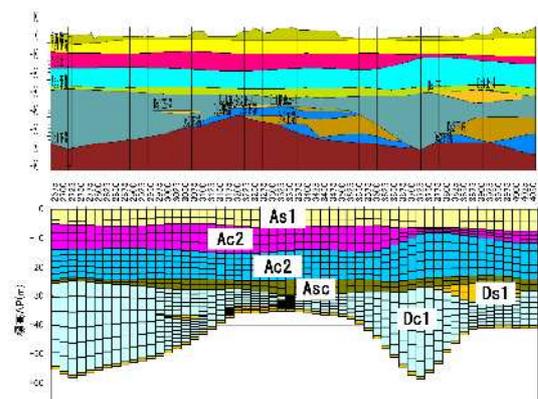


図-7 FUTO90解析土層モデル

### 5-2-2 水平方向メッシュ分割と平面エリアの設定

図-8に平面エリア分割図を示す。水平方向のメッシュ分割については、第Ⅲ期地区エプロン舗装設計及び東側ターミナル地区舗装設計時の実績より25mとした。

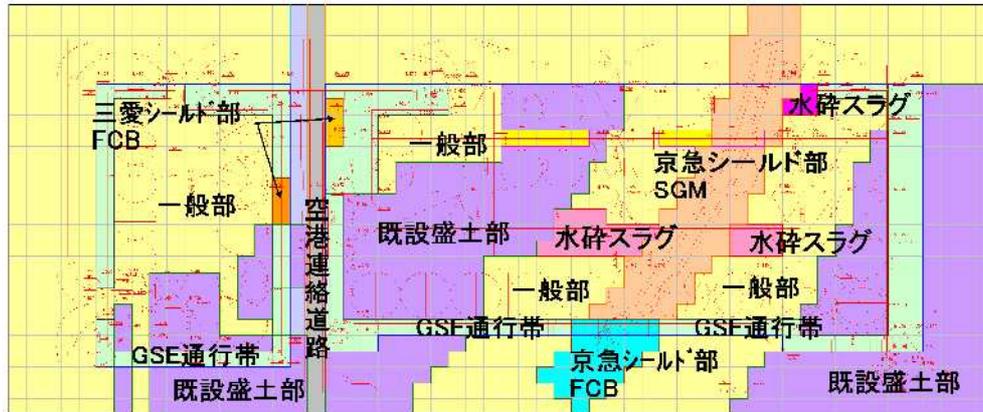


図-8 平面エリア分割

エリア区分は、土質定数の違いにより一般部と既設盛土部に区分した。一般部はさらに盛土荷重の違いにより京浜急行シート部のSGM部とFCB部、三菱石油シート部のFCB部、路床部を水砕スラグとしたエリアに区分した。またGSE通行帯(エプロン端部)及びGSE置場についてもエリア区分を設定した。

図-9に示すように、不同沈下量大きい箇所や初期勾配が最初から大きい箇所等には適度なすりつけ区間を設けることが必要となり、それには適度な単位体積重量である水砕スラグによる軽量盛土対策が有効であった。ここで、水砕スラグの単位体積重量は14~15kN/m<sup>3</sup>であり、他の軽量盛土(SGM: 11kN/m<sup>3</sup>, FCB: 9~11kN/m<sup>3</sup>)よりはやや重い材料である。

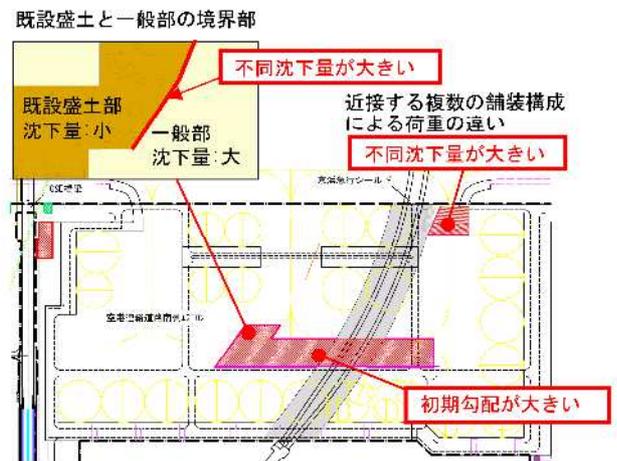


図-9 水砕スラグによる不同沈下対策

### 5-2-3 荷重条件

盛土材料の単位体積重量および解析上の舗装の層厚を表-1に示す。ここで、解析上の舗装厚は、代表的なものである。

表-1 盛土材料の単位体積重量および舗装厚

舗装	材料	厚さ	単位体積重量	備考	
		(m)	(kN/m <sup>3</sup> )		
舗装	コンクリート版	北浜エプロン	0.46	23.0	
		東側エプロン	0.47	23.5	
上層路盤	アスファルト安定処理	0.12	23.5		
下層路盤	三セクランチャーラン	0.32	23.0		
路床	水砕スラグ	1.5程度	14.0	軽量盛土部(京急上部)	
	現地発土	1.5程度	15.0	既設盛土部(一般部)	
	SGM	-	11.0	軽量盛土部	
路体	FCB	-	9.0~11.0	軽量盛土部	
	現地発土	-	13.0	一般部	

※1 ( ) は地下水位以下の単位体積重量

解析に用いる荷重は現地盤からの増加荷重とし、解析ステップ毎に施工状況を考慮して算出し载荷した。既設盛土部については、施工時に切土をしてから路床部を盛土するが、FUTO90ではプログラムの都合上除荷過程が踏めないため、あらかじめ切土した地盤高を解析上の現地盤高とし、そこからの増加荷重を载荷した。また、京浜急行シールド及び三愛石油シールドの軽量盛土部では、現地盤の掘削により地中応力は一旦減少し、減少した地中応力は軽量盛土により増加していき、現地盤からある程度の高さまで盛土した後に再び現地盤高での地中応力を上回るが、前述のとおりFUTO90では除荷過程を表現できないため、解析上は現地盤高での地中応力を上回った時点から増加荷重を载荷した。

### 5-3 不同沈下シミュレーション結果

不同沈下シミュレーションの結果を以下に示す。解析結果は経過時間毎に試行回数分だけ存在するが、ここでは本工事引渡し時から50年後の平均地表面沈下量を示す。図-10は、南側エプロンの50年後の全試行回数(20回)の平均沈下量を示している。

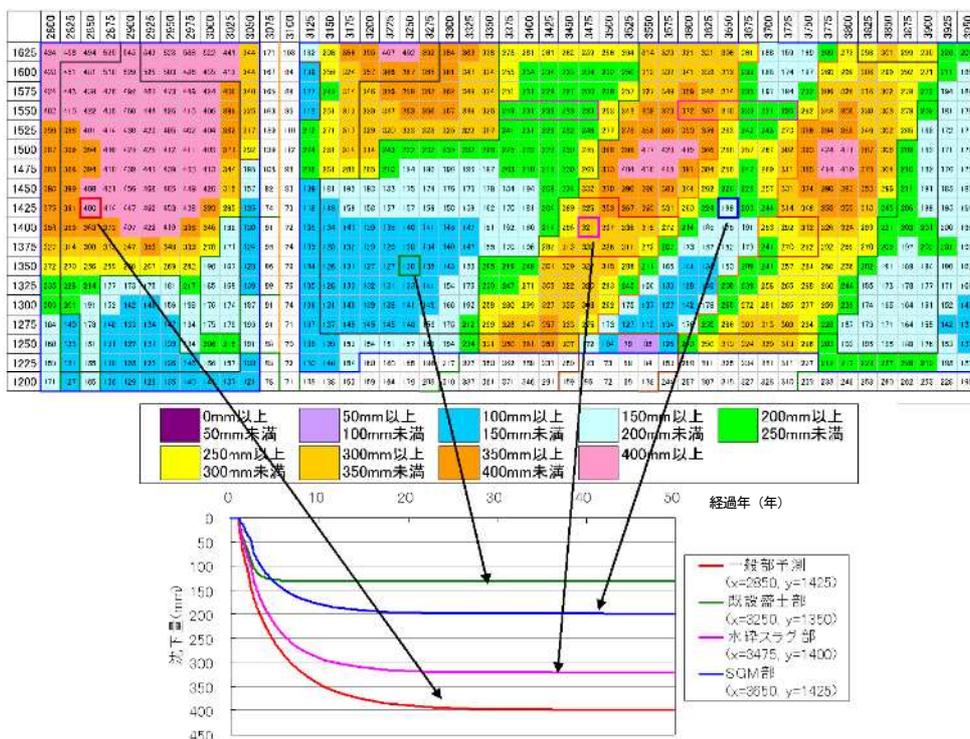


図-10 不同沈下シミュレーション結果(50年後平均沈下量)

図-10をみると、京浜急行シールドトンネルの直上は軽量盛土を施すため沈下量が小さい。また、既設盛土範囲の沈下量は概ね100~200mmであり、一般部の沈下量(概ね250~450mm)と比較して小さい。

本検討の経過年沈下量を、図-10にあわせて示している。一般部、既設盛土部、軽量盛土範囲(SGM範囲、水砕スラグ範囲)の全てにおいて、圧密は本工事引渡し時から5年~15年で収束する結果となる。既設盛土部については過圧密であるため弾性沈下の挙動を示しており、沈下の収束までの時間が最も短い結果となっている。

## 6. 施工時の管理

### 6-1 基本方針

実施設計においては、路体、路床、下層路盤、上層路盤、コンクリート舗装のそれぞれの施工段階においては上げ越しを考慮せず、発生した沈下量の分だけそれぞれの層厚を厚くすることで各層毎に設定した

計画高に仕上げていく計画としていた。しかし、各材料は当然のことながら上層にいく程高価になるため、予め施工段階毎の沈下量が予測できれば、路体・路床の施工段階で上げ越しを行い、上層の高価な材料は極力設計厚で仕上げていく方が合理的である。

そこで、前述の不同沈下シミュレーション結果及び施工時に設置した沈下板の計測結果を基に、各施工段階で上げ越し量を設定し施工を実施した。ここで、沈下板は路床盛土開始時点に約 100m ピッチで設置し、定期的な計測を行った。

なお上げ越しを行うのは原則として下層路盤施工時までとし上層路盤は厚さ管理とした。またコンクリート舗装施工時には打設前に上層路盤の天端高を計測し、舗装厚及び舗装表面の勾配が規定を満足する様に仕上がり高を設定した。

## 6-2 路体・路床の上げ越し量の設定

路体の上げ越し量の設定は、不同沈下シミュレーション結果を基に決定した。図-11 に 2009 年 9 月末(引渡し予定日) 時点での不同沈下シミュレーション結果(平均値)を示す。

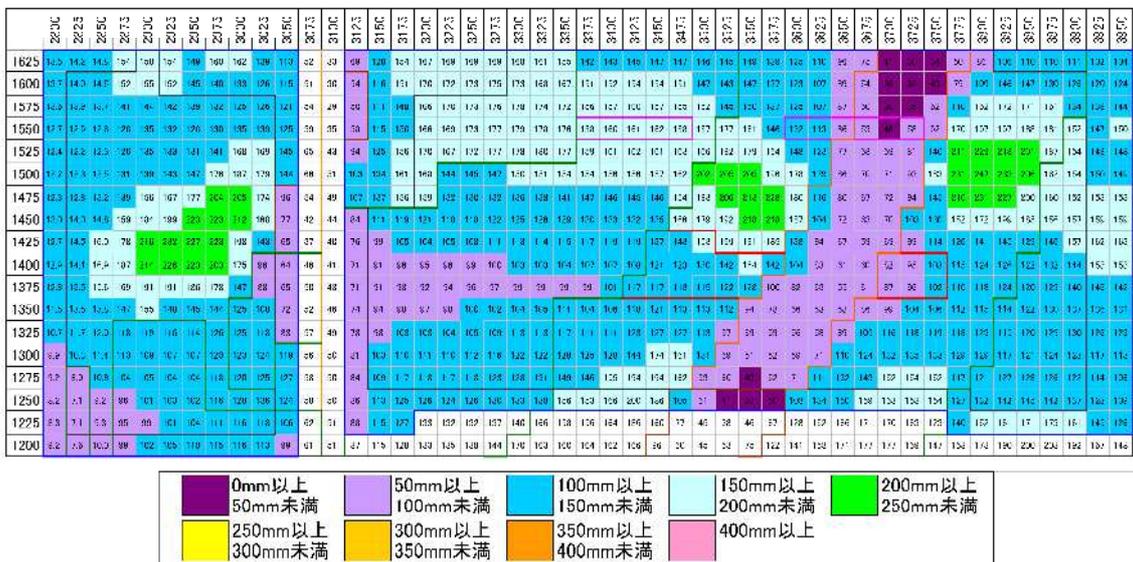


図-11 2009 年 9 月末時点での不同沈下シミュレーション結果

図-11 より、引渡し予定日までに一般部で 100mm~250mm 程度、既設盛土部で 100mm~150mm 程度、軽量盛土部(京急シールド直上部)で 50mm 程度の沈下が予測された。そこで、路体施工時の上げ越し量としては、予測される沈下差を考慮して一般部 100mm、既設盛土部 50mm、軽量盛土部 0mm と設定した。

前述のとおり、路床盛土開始時に約 100m 間隔で沈下板を設置し、定期的に計測を実施した。また、不同沈下シミュレーション結果より、沈下板設置位置近傍での沈下曲線を抽出し実測値との比較を行いながら施工を進めた。路床は、20cm 毎に転圧し 5 層に分けて施工を実施した。路床の上げ越し量は、5 層目施工前の沈下計測結果を基に下式により設定した。

$$(\text{路床の上げ越し量}) = (\text{路体の上げ越し量}) - (\text{沈下量}) + (1)$$

ここに 1 とは、沈下計測結果及び沈下予測値より、2009 年 9 月末時点での沈下量が路体での上げ越し量より大きいと推定される場合に路床施工時に追加する上げ越し量の増分である。

路床 5 層目施工前の沈下計測結果は、一般部で 30mm~50mm、既設盛土部で 10mm~30mm であった。図-12 に、南側エプロンの計画高平面図(コンター図)を示す。なお、図中の青線はエプロン内に設置した表面排水の位置を示す。図-12 の黄色ハッチング範囲が最も計画地盤高が低い(盛土量が小さい)箇所であり、

図-11 の沈下予測結果をみると他と比べて予測沈下量が小さくなっている。また、沈下板による計測結果においても、沈下予測結果と同様、他より若干小さめの沈下を示した。なお、沈下計測結果と沈下予測値を比較した結果、一部を除きほぼ予測値どおりに沈下が進行していることが確認できた。

そこで、路床の上げ越し量については、以下の様に設定した。路体施工時には一般部、既設盛土部それぞれに対し一律の上げ越し量を設定していたが、計画地盤高が高い箇所（図-12の黄色ハッチング範囲外）については、沈下予測結果と路体での上げ越し量の差分、及びエプロン内の確実な排水勾配確保も考慮し、前式の 1として50mmの上げ越し量増分を設定した（黄色ハッチング範囲は 1=0）。なお、図-12の水色ハッチング範囲については沈下の実測値が予測値よりも小さかったため、1=0のままとした。

ここに、一般部の黄色ハッチング範囲において沈下計測結果が30mmのエリアの路床上げ越し量は、  
 $100\text{mm}$ （路体の上げ越し量） $-30\text{mm}$ （沈下量） $+0\text{mm}$ （1） $=70\text{mm}$ となる。

同様に、一般部のハッチング範囲外において沈下計測結果が50mmのエリアの路床上げ越し量は、  
 $100\text{mm}$ （路体の上げ越し量） $-50\text{mm}$ （沈下量） $+50\text{mm}$ （1） $=100\text{mm}$ となる。

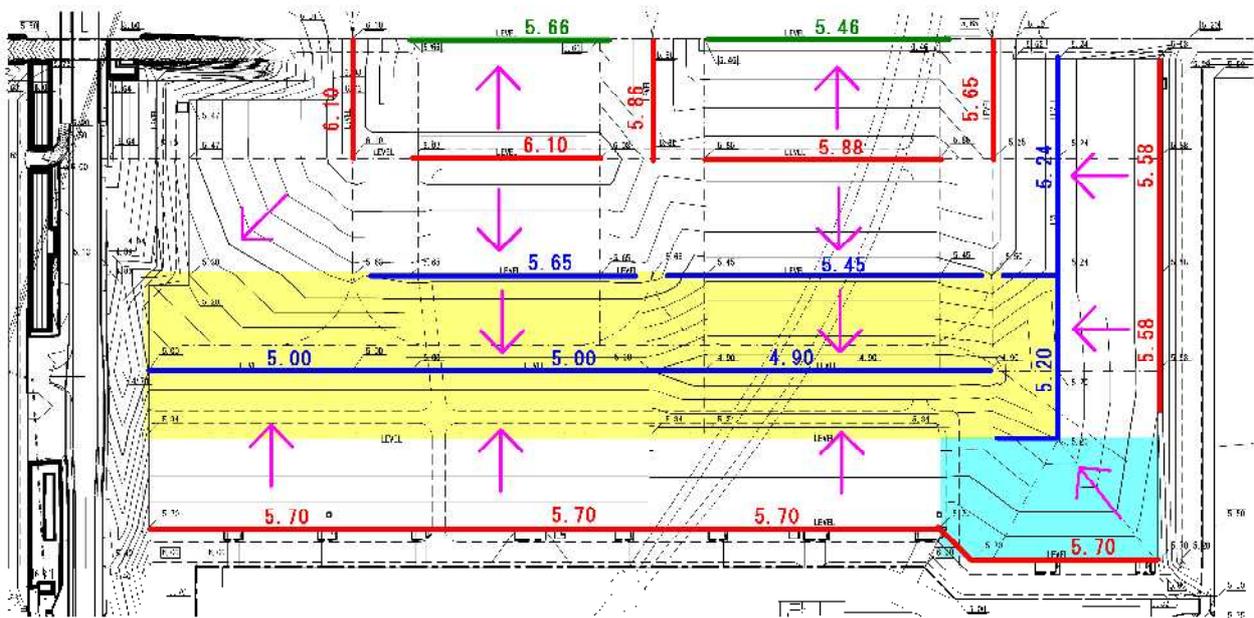


図-12 南側エプロン計画高平面図

### 6-3 下層路盤の上げ越し量の設定

下層路盤は、1層目20cm+2層目12cmの2層に分けて施工を実施した。下層路盤の上げ越し量は、2層目施工前の沈下計測結果を基に下式により設定した。

$$(\text{下層路盤の上げ越し量}) = (\text{路体・路床の上げ越し量}) - (\text{沈下量}) + (2)$$

ここに、下層路盤の上げ越し量設定においては、エリア毎の上げ越し量には上式の 2は見込まず、路体・路床の上げ越し量と下層路盤2層目施工時の沈下量により算出される各エリア間の上げ越し量の差をすりつけるための調整にのみ 2を用いることを基本方針とした。

下層路盤の上げ越し量の設定時には、以下の2つの時期における勾配チェックを実施した。

#### ①下層路盤施工完了時における勾配のチェック

- ・ 以後の沈下が0であっても勾配が逸脱しないすりつけ範囲の設定
- ・ 盛土高の違いによる上げ越し量の差（一般部同士、既設盛土部同士）のすりつけ範囲の設定

#### 2009年9月末（引渡し予定日）時点での予測勾配のチェック

- ・ 上げ越し量増分（2）の必要性の確認
- ・ エプロンの排水勾配（緩勾配、逆勾配）の確認

ここで、前記①は、以下の手順で実施した。

(i)エリア毎の沈下計測結果より各エリアの上げ越し量を設定、(ii)それ以後の沈下を0とした場合の各コンクリート版4隅の仕上がり高を算定、(iii)コンクリート版毎に最大勾配を算定・勾配のチェック(図-13参照)、(iv)すべての勾配が規定を満足すれば完了、満足していない場合はすりつけ範囲の再設定

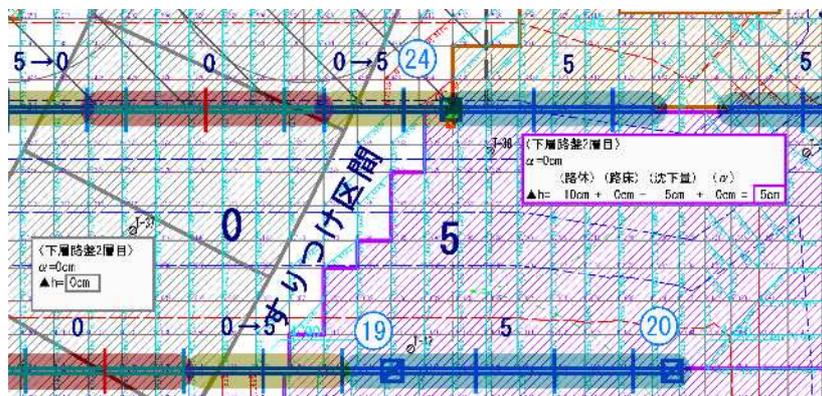


図-13 下層路盤施工完了時における勾配のチェック(軽量盛土部と一般部)

また、前記②を行うためには2009年9月末(引渡し予定日)時点での沈下量が必要となる。

そこで、以下の様に引渡し予定日での沈下量を推定した。一般部では、主たる沈下対象層であるAc2上層、Ac2下層がコンクリート舗装による増加荷重にて圧密降伏応力を超過する可能性が高い。(コンクリート舗装打設により急激に沈下が進行する可能性がある。)

図-14は、各土層における圧密降伏応力 $P_c$ (解析入力値:ばらつき考慮)と、上層路盤完了時(図中の×)及びコンクリート舗装完了時(図中の●)の地中応力との関係を示している。

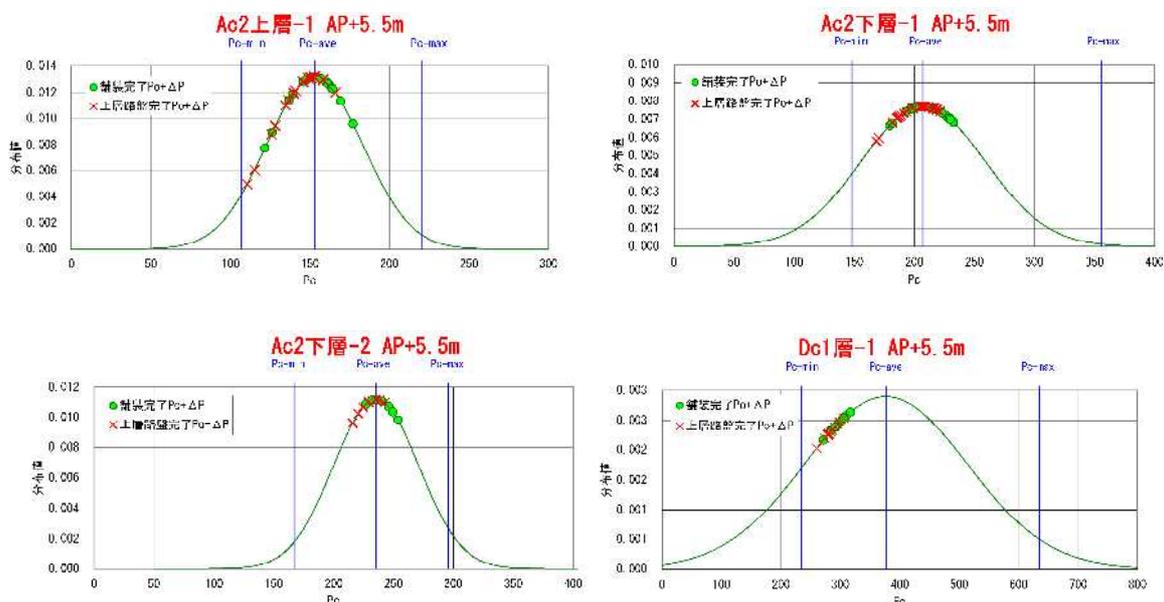


図-14 圧密降伏応力 $P_c$ と上層路盤完了時・コンクリート舗装完了時の地中応力との関係

図-14より、Ac2上層、Ac2下層は、上層路盤完了時からNc舗装完了時の間に地中応力が圧密降伏応力 $P_c$ を超える可能性があることが判り、沈下板による計測結果(沈下曲線)から双曲線法等を用いてNc舗装打設後の沈下を予測することは危険側の予測(小さめの予測)となる可能性がある。そのため、不同沈下シミュレーション解析(以下、FUTO)より得られた各地点の沈下曲線と、沈下板による計測結果を比較した上で、FUTOの結果を基に沈下量予測を実施した。

図-15 に、代表 8 箇所における沈下板による計測結果と F U T O の結果（平均値）を示す。ただし図-15 には、参考のため 2009 年 9 月末日までの比較を示している。

沈下板による計測結果と F U T O の結果（平均値）を比較すると、ほとんどの計測箇所において、一般部・既設盛土部ともに、実測値が F U T O の結果よりも小さい沈下傾向を示した。しかしながら、一般部については前述のとおりコンクリート舗装打設により沈下曲線が急激に変化する可能性があることから、安全側を考慮して F U T O の結果（平均値）を用いることとした。また、既設盛土部については、F U T O より得られた沈下予測曲線を係数倍したフィッティングの結果、F U T O の結果を 35%程度にした場合に計測結果とよく一致したため、既設盛土部の沈下予測としては F U T O の結果（平均値）の 35%の値を用いることとした。上記の設定により、一般部と既設盛土部の沈下差を大きく予測することになり、より安全な検討となる。

前記①、②の検討を行った結果、基本方針どおり各エリアでの 2 は設定せず、すりつけ範囲の調整箇所のみ 2 を設定することで勾配が満足できることを確認できた。

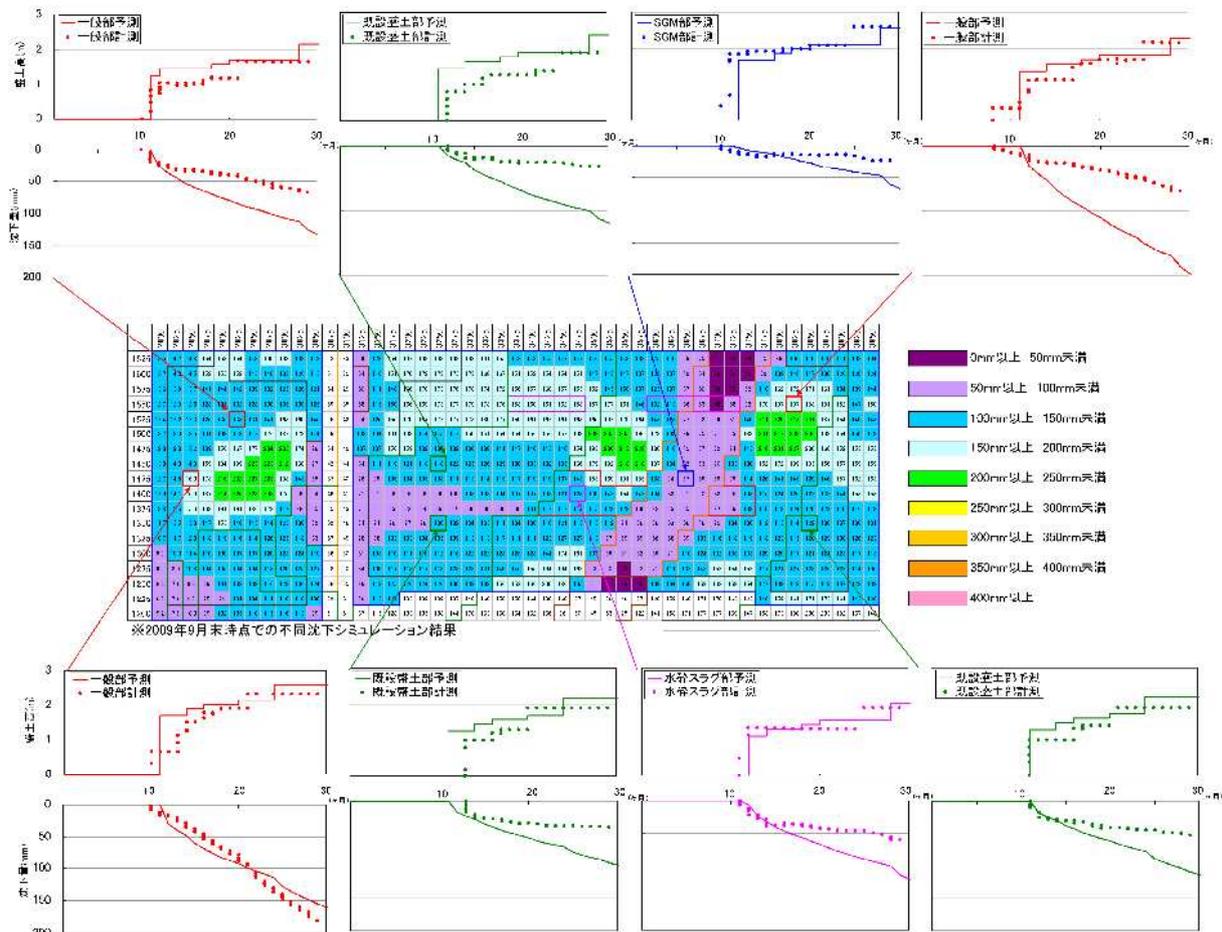


図-15 沈下板による計測結果と F U T O の結果（2009 年 9 月末日まで）

#### 6-4 コンクリート舗装仕上がり高の設定

コンクリート舗装仕上がり高設定時には、打設前に各コンクリート版の 4 隅の上層路盤天端高を計測し、Nc 舗装の舗装厚が確保されているか、また、仕上がり天端の勾配が規定勾配を満足しているかを確認し、最終調整を図った上で打設を実施した。なお、コンクリート舗装の施工は、基本的に型枠を用いた先打ちを 1 レーン置きに施工した後に間打ちを行うため、各レーン単独での勾配確認だけでなくレーン間での勾配も確認した上で仕上がり高を設定した。

## 6-5 その他制約条件

エプロン舗装内には、表面排水溝、幹線排水特殊柵立上り、テザーアンカー、三愛・AGP マンホール等が設置されるが、それらの構造物の天端高にコンクリート舗装の仕上がり高を合わせる必要がある。すなわち、それらの構造物が仕上がった時点で周囲のコンクリート舗装の仕上がり高は決定してしまう。

特に、表面排水溝についてはベースを構築しないと周囲の下層路盤、上層路盤を上げることができず、なおかつ、ベース天端高はそのまま上層路盤天端高となる。また、側壁を構築しないとコンクリート舗装が打設不可能であり、更に側壁天端はそのままコンクリート舗装天端高に、側壁高はそのままコンクリート舗装厚になる。

したがって、エプロン舗装上げ越し量設定範囲区分と上記構造物の平面位置関係、及び双方の工事工程を十分吟味した上で、それぞれの構造物の上げ越し量を設定して施工を進めていくことが重要であった。そこで、コンクリート舗装内の構造物については、最終の仕上げ（表面排水では側壁、幹線排水特殊柵では立上り）を極力コンクリート舗装打設直前まで待ち、コンクリート舗装の仕上がり高に合わせて仕上げを行う様に工程調整を行った。

## 7. あとがき

2009年9月30日に、本事業の対象施設であるエプロンの引渡しを無事行うことができた。現在のところ、前述の下層路盤の上げ越し量設定時及びコンクリート舗装仕上がり高設定時に懸念していたような急激な沈下現象はみられず、コンクリート舗装の勾配も規定範囲内におさまっており、不同沈下が発生する地盤上でのコンクリート舗装の施工を、より合理的に行うことができた。

2009年9月30日より、25.5年間の維持管理業務がスタートしたが、今後も定期的な計測を継続し、実際の挙動を踏まえた上で、実施設計時に計画した大規模補修計画の妥当性の確認及び見直しを実施していく、航空機の運用に影響を与えることがない様十分な検討を継続していきたい。



(参考文献)

- 1) (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部土質研究室：不同沈下シミュレーションプログラム FUT090 マニュアル
- 2) 奥村樹郎・土田孝（1981）：土質定数のばらつきを考慮した不同沈下の推定, 港湾技術研究所報告, 第20巻3号