

関西国際空港におけるLCCエプロン拡張整備について

坂本 岳志

関西エアポート株式会社 技術・施設部 基本施設グループ（〒549-8501泉佐野市泉州空港北1番地）。

本整備は、我が国初のLCC（Low Cost Carrier）拠点として2012年に整備した第2ターミナルに続き、更なるLCC需要を取り込むため、新たなLCC拠点施設を整備するものである。新ターミナルビル等の整備は2016年度中の供用を目指して整備中であるが、拡張エプロンや誘導路等のエアサイド部分については、高い拡張性と中大型機への対応を実現するための計画を基本理念とした整備が完了し、2016年3月31日に供用を開始している。本稿では、エアサイド部分における拡張整備の計画、設計概要および施工実績について述べる。

キーワード 空港、コスト削減、LCC、路床造成、情報化施工

1. はじめに

2010年5月に国土交通省が策定した成長戦略の1つにLCC専用ターミナルの整備と、それに伴う各種規制緩和の実現への取り組みが規程された。これを受け、関西国際空港においては、LCCの路線拡充を成長戦略の柱の一つに位置付け、LCCの誘致や専用ターミナル（第2ターミナル）の整備に取り組んできた。

2012年10月、関西国際空港2期島に第2ターミナルがオープンしたが、LCC需要は成長著しいアジアの需要を背景に益々高まっており、その処理能力は近い将来限界が生じると予測されることから、新LCCターミナルの整備を決定した。新LCCターミナル整備のうち、拡張エプロンや誘導路等のエアサイドについては2015年度中の供用開始を目指して2014年11月に現場着手し2016年3月31日に供用を開始している。なお、新ターミナルビルについては2016年度中の供用開始を目指し、現在整備中である。

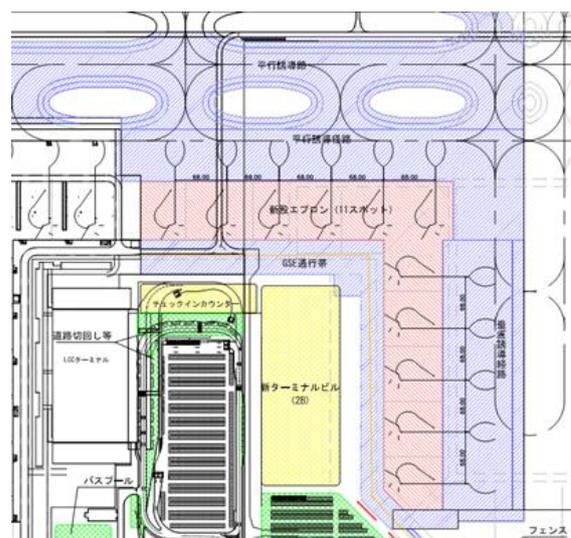


図-1 従来方式でのスポット配置案

2. LCCエプロン拡張整備計画の概要

LCCエプロン拡張整備計画においては、シンプル、コンパクトといった第2ターミナルのコンセプトを継承しつつ、自走運用とプッシュバック運用の併用による施設規模の低減と、運用効率性の両立や中大型機への対応が可能なスポット配置方法を検討し、整備コスト削減を図った。

スポット配置については、第2ターミナルエプロンをベースに改善策を盛り込み、6スポット（コードC機材であれば11機駐機可能、約9万m²）を整備することとした。

(1) スポット配置における課題

新たに整備するスポットを第2ターミナル同様の従来方式で配置した場合（図-1）、整備範囲が大きくなり、以下のような課題が発生する。

- ・早朝ピーク対応にあわせた施設規模となるため、昼間時間帯のスポット運用に無駄が生じる。
- ・チェックイン棟からの旅客移動距離が長く、旅客ハンドリング効率が悪い。
- ・将来拡張時、ターミナルビル前面にスポットの増設が不可能（バスハンドリングが発生。）

これらは整備コストの増加、拡張性の低下、将来スポットにおける運用効率低下の要因となる。これらの改善のためには、所要規模を満足しつつ整備範囲をコンパクト

トにするスポット配置が不可欠であった。

(2) 自走方式とプッシュバック方式のマルチ駐機案の採用

上記課題の改善のため、自走方式とプッシュバック方式を併用したスポット配置案(図-2)を採用した。

a) マルチ駐機案の特徴

本案は、自走方式スポットとプッシュバック方式スポットを交互に配置したマルチ駐機案である。以下に本案の特徴を示す。

- ・早朝のピーク時にはプッシュバック運用を主とし、スポット占有状況によっては自走運用に切替えることで施設規模の低減が可能。
- ・将来拡張時、ターミナル前面にスポットの増設が可能(バスハンドリング不要)。

以上のように、本案を採用することで整備範囲をコンパクト化し、従来案における課題の改善が可能となる。また、旅客歩行距離の短縮、機材集約によるハンドリング効率の向上等も可能になると考えた。

b) 従来方式との違い

第2ターミナルエプロンでは、自走運用スポット幅を60mとしたが、本案においては、スポット幅81mの自走運用スポットを6スポット配置し、各スポット間にコードC(表-1参照)プッシュバック運用スポット(空港土木施設の設置基準:幅40.5m)を5スポット配置することで、自走運用とプッシュバック運用の併用を可能とし、ピーク対応と施設規模の低減を両立した。従来方式と本案の駐機方法を図-3に示す。

また、プッシュバック方式スポットの未使用時には、自走方式スポットはコードE機材用プッシュバック方式スポットとしても使用可能であり、コードE機材を運航するLCCを昼間時間帯に受け入れる等の柔軟な運用が可能である。

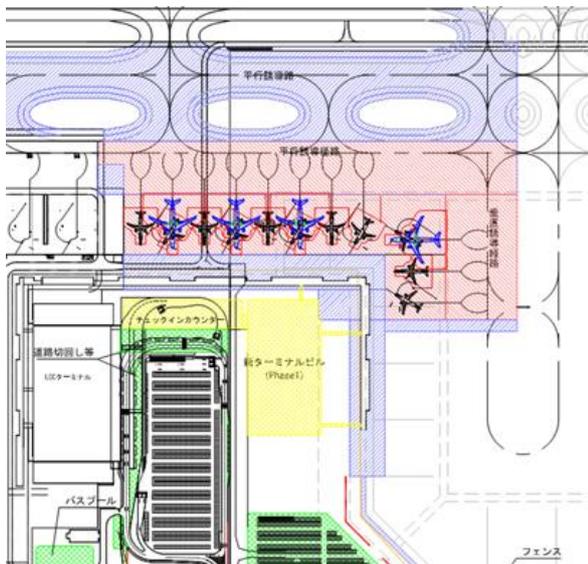


図-2 マルチ駐機案

表-1 機材コード区分

コード	翼幅	代表機材
A	15m未満	BN-2B等
B	15m以上、24m未満	CRJ200, CRJ100等
C	24m以上、36m未満	A320, B737等
D	36m以上、52m未満	B767等
E	52m以上、65m未満	A330, B747, B777等
F	65m以上、80m未満	A380等

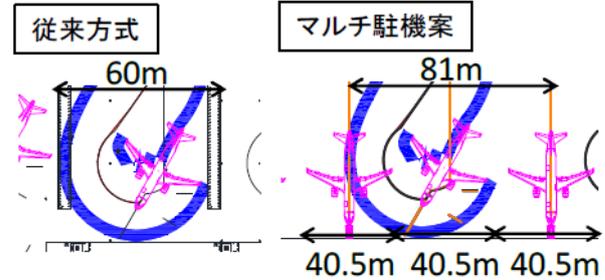


図-3 従来方式及びマルチ駐機案の駐機方法

表-2 設計反復作用回数の区分

計算で求めた反復作用回数	設計反復作用回数	設計反復作用回数区分	安全率
~ 3,500回未満	3,000回	M	1.7
3,500回以上 ~ 6,000回未満	5,000回	N	2.0
6,000回以上 ~ 12,000回未満	10,000回		
12,000回以上 ~ 25,000回未満	20,000回		
25,000回以上 ~ 50,000回未満	40,000回	0	2.2

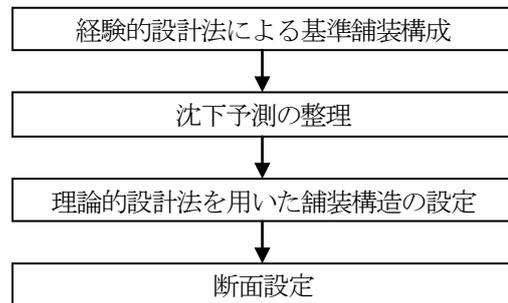


図-4 舗装断面設定の作業フロー

3. エプロン舗装設計の概要

(1) 設計条件

関西国際空港2期島で実施された過年度設計条件を整理し、今回の設計条件を以下のように設定した。

- ・設計年数: 20年
- ・設計荷重: LA-1 (B747-400)
- ・設計交通量: 20,000回 (20年: A330-300, A320-200)

なお、設計交通量については需要想定をもとにB747相当に換算した反復作用回数を算出(14,664回)して設定しており、設計反復作用回数の区分は表-2のとおりN区分となる。このような設計条件から、図-4に示す作業フローに基づいた舗装断面の設定をおこなった。

(2) 経験的設計法による基準舗装構成

「空港舗装構造設計要領 平成17年6月一部改訂」に準じ、基準舗装構成を設定する。設定に必要な路盤支持力の値は周辺の路盤支持力と同じ値の150MN/m³として設定する。

エプロン舗装で使用するコンクリートの設計曲げ強度は5N/mm²であり、N区分での安全率は2.0である。この場合のコンクリート曲げ応力度は (5N/mm²) / 2.0 = 2.5N/mm² となる。図-5より路盤設計支持力が150MN/m³の場合を算出するとコンクリートの基本断面の舗装厚は36cmとなる。

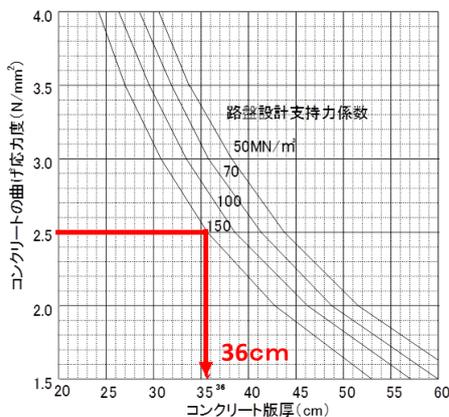


図-5 コンクリート版厚設計曲線 (B747-400)

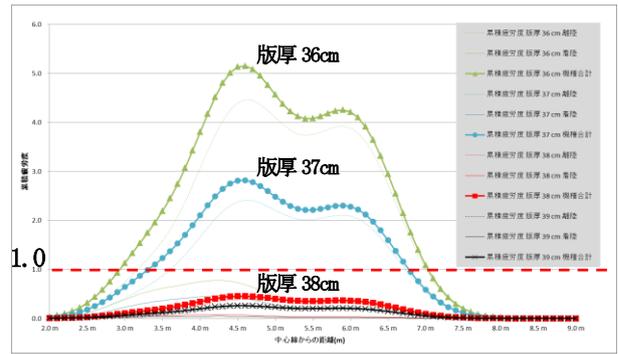


図-6 舗装厚別累積疲労度 (8.5m版)

(3) 沈下予測の整理

関西国際空港は海上空港であるため、埋立地盤に起因する沈下が現在も進んでおり、2期島では年間34cm沈下している。また、沈下量は場所ごとに異なるため、不同沈下に伴うコンクリート版下面で想定される空隙量の確認を行った。その際、近年の空港のコンクリート舗装の目地幅の主流である7.5mと8.5mで検討し、その結果7.5m版下面で想定される空隙は20年後の最大で0.5mm、8.5m版では0.7mmとなった。

ただし、今回の検討においてはコンクリート特有のクリープ特性を考慮し、コンクリート版は航空機が走行していない場合にも版自体の自重によるたわみが発生していると仮定し、クリープ変形した版には空隙(隙間)は無く、常に路盤から反力を受けているものと整理した。このため、本検討では沈下は考慮しないこととした。しかし、想定外の沈下挙動により空隙が発生する可能性があるので整備後の維持管理の中で空隙の有無については確認することとする。

(4) 理論的設計法を用いた舗装構造の設定

前項より、沈下を考慮せず疲労度が1.0以下となる舗装厚を設定する。各コンクリート版厚に対する累積疲労度は図-6のとおりとなり、累積疲労度が1.0以下となる38cmの舗装厚を採用する。

ただし、経験的設計法による基準舗装構成検討時点での設計路盤支持力を150MN/m³設定しているが、累積疲労度 (FD ≤ 1.0) に余裕があるため、路盤支持力を下げた場合の経済比較を行い、路盤支持力と路盤厚の選定を行った。

関西国際空港ではNC版を施工する際の路盤は、CSセメント安定処理路盤 (σ_r = 4N/mm²) を採用しており、「空港舗装設計要領及び設計例 平成25年4月一部改訂」に記載された「コンクリート舗装の路盤厚設計曲線」とは一軸圧縮強度が異なり使用できない。そのため、本検討ではハーバーの2層弾性理論¹⁾を用いて必要路盤厚を設定した。設計路盤支持力別必要路盤厚と疲労度の関係を整理すると表-3のとおりとなる。

表-3によれば路盤支持力を下げると路盤厚は薄くなる。ただし、セメント安定処理路盤の最小施工厚は15cmであるため、必要路盤厚が15cm以下となる支持力は、全て路盤厚を15cmとし、経済比較を行った。その結果、本検討では、最も経済的となる設計路盤支持力は130MN/m³であり、その際必要な路盤厚は14cmとなるが、最小施工厚から15cmを採用した。

以上より、エプロン舗装断面は図-7のとおりとなる。

表-3 設計路盤支持力別必要路盤厚と疲労度の関係

路床K値 MN/m ³	路盤K値 MN/m ³	路盤厚 cm	Co舗装厚 cm	疲労度	路盤単価 円/m ²	Co舗装単価 円/m ²	舗装単価 円/m ²
80	150	17	38	0.46	679	8,359	9,038
80	140	16	38	0.56	646	8,359	9,005
80	130	14	38	0.74	613	8,359	8,972
80	120	12	38	1.02	613	8,359	8,972
80	120	12	39	0.50	613	8,540	9,153
80	110	10	39	0.68	613	8,540	9,153
80	100	8	39	1.00	613	8,540	9,153
80	100	8	40	0.54	613	8,721	9,334

※注) 路盤厚15cm以下の単価は最小施工厚である15cmの単価で検討



図-7 エプロン舗装断面図

4. エプロン拡張整備工事の舗装工事実績

(1) 工事概要

LCCエプロン拡張整備工事の概要は以下の通りである。

- 工事数量 (主要工種)
 - コンクリート舗装：エプロン 88,000m²
 - アスファルト舗装：誘導路本体 54,000m²
 - アスファルト舗装：誘導路ショルダー 30,000m²
 - アスファルト舗装：GSE通行帯 13,200m²
- 工期：2014年10月3日～2015年11月30日

なお、本整備においては制限フェンスの撤去・新設が含まれており、施工の効率性を踏まえ、先行して制限フェンス新設を実施することで新たな制限ラインに切替え、一様な舗装整備を実施できるようにした。図-8に整備全体図を示す。

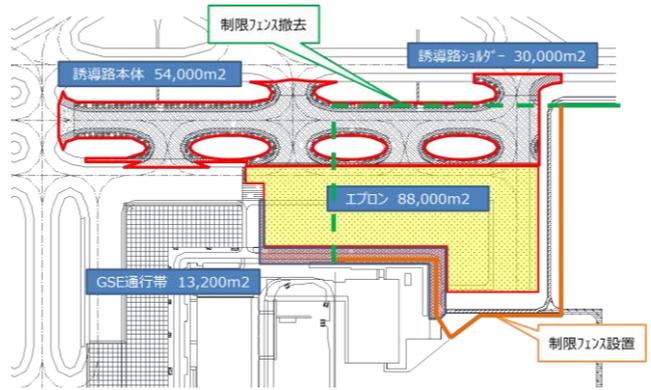


図-8 整備全体図

(2) 施工フロー

コンクリート舗装 (エプロン) の施工フローを図-9に示す。

なお、本稿では記載しないがアスファルト舗装の施工に関しても土工事から路床調整盛土までは同様のフローで実施しており、路盤と舗装に関してそれぞれの舗装構成での施工を実施している。

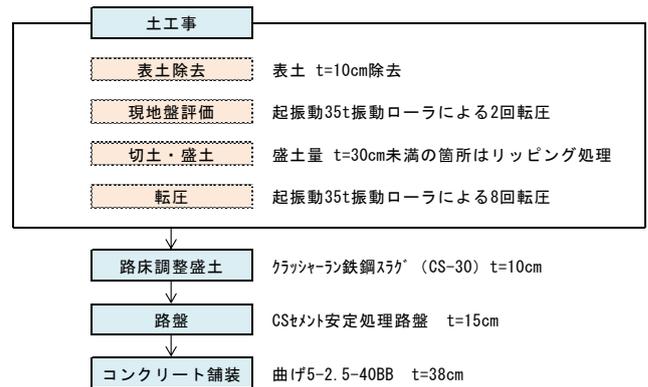


図-9 コンクリート舗装施工フロー

(3) 土工における施工および品質管理手法

a) 振動ローラによる転圧締固め工法

エプロン、誘導路等の広大な範囲の路床造成を面的かつ効率的に管理する必要があることから、地盤の面的均一性を施工中にリアルタイム評価できる手法として、最大粒径300mmの岩砕土砂を用いた振動ローラによる転圧締固め工法 (振動ローラ加速度応答法) を採用した。

本システムは図-10 (a) に示す振動ローラのフレームに取り付けた加速度計をもとに、2秒間の加速度応答波形を高速フーリエ変換し、乱れ率 (地盤剛性の向上に伴う高周波成分スペクトルの出現率) により、地盤の締固めを評価するものである。加速度剛性は図-10 (b) に示すモデルより導き出された式 (1a) から、乱れ率をもとに2秒ピッチ (2m×2m) 毎に算出する。²⁾

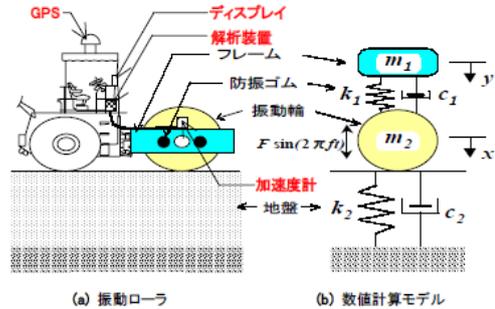


図-10 振動ローラ～地盤系モデル

$$E = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2)}{B \cdot \pi} \cdot \frac{\left(\frac{4}{3} \text{乱れ率} + 1\right)^2 \cdot (2\pi f_0)^2 \cdot m_2}{1 - 0.32\alpha + \sqrt{0.1024\alpha^2 - 1.64\alpha + 1}} \quad \text{式 (1a)}$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{F}{m_1 + m_2}g\right)^2$$

b) 現地盤処理・性状把握

路床造成のための切土・盛土に先立ち、過去の空港島用地造成時から長年放置され、その間の降雨の影響や頁岩のスレーキング等により経年劣化した可能性のある地盤の表土10cmを除去した。

表土除去後、地盤の緩みなどを解消する観点と地盤変形係数により地盤剛性を評価することによる現地盤の性状把握を目的に、振動ローラによる2回転圧を実施した。

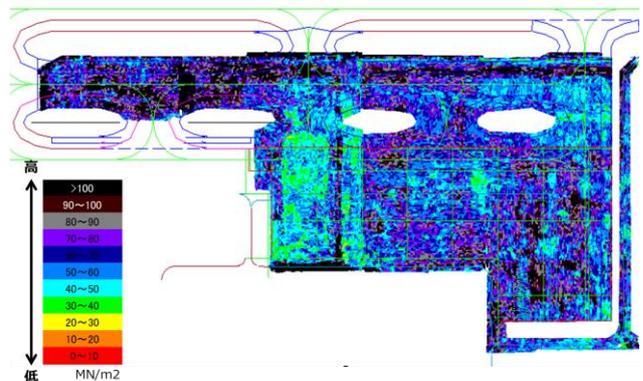


図-11 地盤変形係数分布図 (2回転圧後)

地盤変形係数の分布を図-11に示す。これまでの経験か

ら地盤変形係数が $30\text{MN}/\text{m}^2$ 以上であれば路床体として概ね良好であると判断しており、今回の結果では一部 $30\text{MN}/\text{m}^2$ を下回っている箇所(黄色着色部)が見受けられたが、当該箇所は切土範囲に該当し除去されるため造成、転圧後に路床体としての良否を判断することとした。

なお、振動ローラ加速度応答法により得られる地盤変形係数以外にも、平板載荷試験(K75)による支持力係数(基準値: $80\text{MN}/\text{m}^2$)やSRIDによる含水比、締固め度を $2,000\text{m}^2$ に1箇所測定し、全ての管理測点において基準値を満足していることが確認できた。よって現地盤の性状としては概ね良好であることが確認できた。

c)造成土工

現地盤の性状が良好であると判断できたため、路床造成のため切土、盛土に着手した。岩砕土砂の最大粒径 300mm と振動ローラによる転圧効果を考慮し、盛土については1層の仕上がり厚さを 30cm 以上 60cm 以下と規定し、 30cm に満たない箇所については、現地盤をリッピングにより掻きほぐし、仕上がり厚さが 30cm 以上となるように実施した。切土面、盛土面ともに 35t 振動ローラによる8回転圧を行い、現地盤処理時と同様にGNSSによる転圧回数管理と振動ローラ加速度応答法による面的管理を行った。なお、転圧回数の根拠は過去の2期空港島用地造成やエプロン・誘導路造成工事での試験施工結果により実証されている回数であり、締固め度が収束する回数である。8回転圧後の地盤変形係数の分布図を図-12に示す。

転圧後は、現地盤処理と同様に平板載荷試験等の品質管理試験を実施するとともに、全ての範囲をプルーフローリング試験により確認した。

d)切土路床面の不良箇所

切土路床面において、転圧後に所要支持力が得られない箇所が見受けられた。原因は現地盤の性状であると考えられたため、切土路床面以下を掘削したところ、路床面から 60cm 以内の箇所で滞水している状況が確認された。

(図-13)

これは空港島造成時の転圧層間が不透水層となったことで雨水が滞留し、今回最適含水比より湿潤側で振動ローラによる締固めを行ったことが、所要支持力が得られなかった要因であると推察される。このように土中に水分が存在する条件下ではセメントを添加し、一体的に締

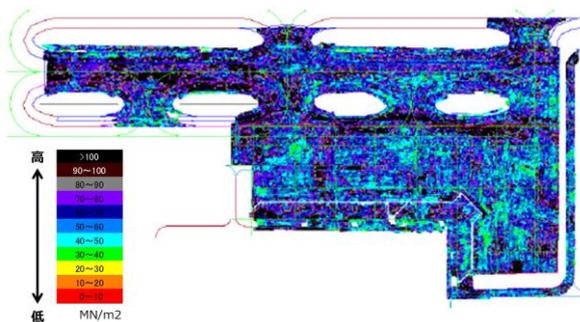


図-12 地盤変形係数分布図(8回転圧後)



図-13 路床面下部滞水状況



図-14 移動式プラントによる製造状況

固める対策が最も効果的でかつ、確実であると判断されたため、路床面下部 60cm を原位置でセメント改良することとした。なお、セメント添加量は本地盤での試験施工結果より $30\text{kg}/\text{m}^3$ とした。

(4) 路床調整盛土～セメント安定処理路盤の施工

a)路床調整盛土の施工

路床造成に用いた土砂は、最大粒径 300mm の岩砕土砂であり仕上げ高の調整が困難なため、不陸整正層として平均厚 $t=10\text{cm}$ のクラッシャーラン鉄鋼スラグ(CS-30)を敷均し施工した。

b)セメント安定処理路盤の施工

コンクリート舗装の路盤として、一軸圧縮強度 $\sigma_7=4.0\text{N}/\text{mm}^2$ のCSセメント安定処理路盤材を移動式プラント(リテラ)にて現地で製造し、厚さ $t=15\text{cm}$ で施工した。(図-14)なお、実機による試験練り結果からセメント添加量 6.1% 、最適含水比 11.8% として製造を行った。

(5) GNSSによる情報化施工

情報化施工(mmGPSによる機械の制御)を実施することにより、高精度の仕上がり結果が得られ、従来のマニュアル操作の作業より大幅に作業効率が向上した。前述した土工、路床調整盛土、路盤施工にはmmGPSを搭載したブルドーザ、モーターグレーダー、ベースペーパーを使用した。情報化施工の採用により、丁張の設置数が少なく測量作業の軽減も図れ、作業員と機械の接触事故も



図-15 mmGPS搭載ベースペーパー

無く完了することができた。(図-15)

(5) コンクリート舗装の施工

a) 初期ひび割れ対策

コンクリート舗装の施工時期が4月上旬～8月下旬で暑中コンクリートとなるため、乾燥や急激な温度変化による初期ひび割れを防止するための対策を事前に検討し、以下の対策を実施することとした。

- ・遅延形の混和剤の使用（初期硬化速度抑制によるワーカビリティの向上）
- ・浸透型初期養生剤の使用（後期養生実施までの時間短縮）
- ・特殊繊維を織り込んだ養生マットの使用（吸水により変色することで客観的に湿潤状態を把握）

b) 施工方法

コンクリート舗装の施工は、セットフォーム工法により実施した。セットフォーム工法による機械編成を図-16に示す。

コンクリート版は基本8.25mの正方形版であり、隣接するコンクリート版との間には目地を設け、荷重伝達のためにダウエルバーで繋いでいる。また、コンクリート舗装全体の膨張収縮を吸収するため一般的に100～200mの間隔で膨張目地を設置する必要がある。今回の場合、最大で150mの間隔で膨張目地を設置しており、その間を1日の打設範囲として施工を行った。(図-17)

施工時には各段階での確認事項を抽出したチェックリストを作成し、打設範囲毎に徹底した管理を行った。その結果、養生不足などの施工方法に起因する初期ひび割れの発生は無く、すべての打設を完了することができた。

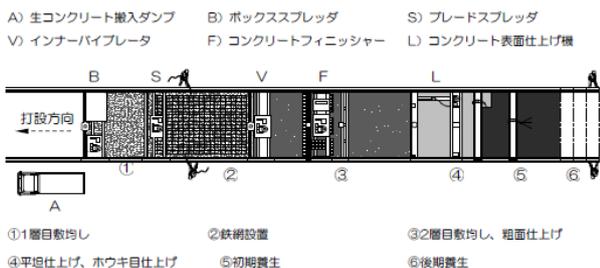


図-16 セットフォーム工法の機械編成

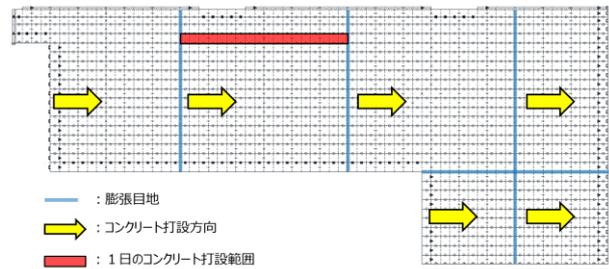


図-17 コンクリート打設平面図



図-18 コンクリート打設状況

5. まとめ

以上のように、関西国際空港のLCCエプロン拡張整備においては、計画段階からLCCが持つ特徴的な運航形態に対して様々な工夫を盛り込むことで、施設規模の低減を図り整備コストの削減を実現した。また、設計段階においても累積疲労度 (FD≤1.0) を満足する中での経済比較を行い、さらなるコスト削減を図った。

施工段階においては、関西国際空港特有の地盤（最大粒径300mmの岩砕土砂）での路床造成を振動ローラ加速度応答法を用いた面的管理を実施し、広大な施工範囲の中で均一な支持力を有した路床を構築することができた。ただし、空港島造成時の転圧層間が不透水層となり滞水している箇所が見受けられたので、今回の事象を教訓とし次回以降の整備に活かしたい。また、コンクリート舗装については事前の対策により、初期ひび割れの発生は無かったが、今後1年を通して膨張・収縮を繰り返すなかでひび割れが発生する可能性がある。さらに2016年3月31日に供用を開始していることで、航空機の繰り返し荷重が作用することや、沈下の影響によりひび割れ等の変状が生じる可能性があるため、今後の維持管理を適切に行うとともに、今後ひび割れ等の変状が生じた場合には、その要因を分析し、今後の設計手法にフィードバックさせることとしたい。

参考文献

- 1) 空港コンクリート舗装設計要領解説書 1977.3/P30
- 2) 藤山・建山：振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集 No.652/III-51,115-123,2000.6