

空港舗装の効果的な維持管理に向けたシステム構築

津田隆志¹・播本一正²・島田敬³・福手勤⁴・浜昌志⁵

¹正会員 関西国際空港株式会社 二期施設整備部（〒549-8501 大阪府泉佐野市泉州空港北1番地）

²正会員 関西国際空港株式会社 二期施設整備部（〒549-8501 大阪府泉佐野市泉州空港北1番地）

³フェロー会員 関西国際空港株式会社 二期施設整備部（〒549-8501 大阪府泉佐野市泉州空港北1番地）

⁴フェロー会員 工博 東洋大学 工学部環境建設学科（〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100）

⁵正会員 日本工営株式会社 名古屋支店（〒461-0005 愛知県名古屋市東区東桜2-17-14）

関西国際空港は複数滑走路を有する24時間運用の基幹国際空港である。国際競争力や顧客満足度の向上を図るためには、安全かつ良好な舗装施設を低コストで利用者に提供する必要がある。当空港ではライフサイクルコストの最小化の観点等から舗装管理のあり方を事後保全から予防保全へ転換する方針をたて、それを実行するためのツールとして舗装管理システムの開発を行った。開発した舗装管理システムでは舗装の現状の確認・評価のほか、将来の舗装パフォーマンスを予測・評価する機能も設けている。本稿では舗装管理システムに導入した表面性状の供用性曲線や、構造評価手法、並びに、舗装管理システムの実行機能概要について報告する。

Key Words : PMS, airport pavement, maintenance, monitoring

1. はじめに

関西国際空港は2007年8月2日に第2滑走路が供用開始し、「複数滑走路+24時間運用」というグローバルスタンダードに適った基幹国際空港として運用されている（写真-1）。一方、1994年9月に供用開始した第1滑走路は今秋より大規模補修工事を開始することや、舗装管理対象範囲が拡大したこと等を踏まえると、限られた予算内で舗装施設を計画的に管理、補修していく必要がある。舗装の効率的・効果的な維持更新は、今後、わが国の空港舗装において共通の重要課題であり、特に交通量が多い24時間運用空港では、補修工事の制約条件が非常に厳しいことから、計画的な管理が望まれている。

著者らは、このような背景から、第2滑走路の供用開始を契機に、計画的な維持管理及び意思決定のもとに補修を実施していく「舗装マネジメントシステム（PMS：Pavement Management System）」の考え方を前提とした舗装管理への転換を行うべく、管理支援ツールとして「関西国際空港版・舗装管理システム」の構築を行った。なお、ライフサイクルコストの最小化を図るには、劣化・寿命予測が重要となる。そのため、表面性状の低下を表す供用性曲線と舗装構造を疲労度で評価する方法について、1期舗装の供用性データ等をもとにプロトモデルを設定した。

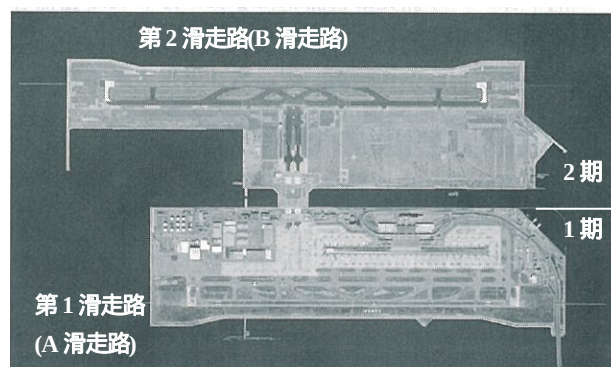


写真-1 関西国際空港

2. 現在の管理方法の問題点・課題

当空港は24時間運用であるため滑走路等の主要施設舗装の点検、補修が行える時間は夜間の3時間/日程度と極端に限定される。これまで、限られた時間内で早期に補修対策を実施する必要性から、点検者の経験に基づく事後対策による局部的な対応が中心であった。

このような管理における問題点としては、延命に向けた対処というよりも、むしろ当面の機能回復が主眼となっており、蓄積した点検や調査結果を十分に活用していないことから、必ずしも最適な対処になっていない可能性がある。また、滑走路を中心とするアスファルト舗

装では、ひび割れやわだち掘れといった比較的損傷速度の遅い損傷から、運行に支障が生じる可能性の高い層間剥離現象等も他空港で報告されており¹⁾、事後的な対応では安全性が確保できないことも想定される。加えて、管理対象範囲が拡大することや、限られた予算内で顧客満足度や国際競争力を確保するためには、一層のコスト削減や効率的・効果的な予算執行が課題として挙げられる。

一方、複数滑走路を有した現状では、管理対象範囲が拡大した反面、運用方法の調整によって夜間の点検、補修時間の確保が可能となり、機能回復に伴う補修工事や、ライフサイクルコストの最小化を勘案した管理を行うことが可能となる。

このように、当空港では第2滑走路供用を契機に、これまでの対処療法的で経験を重視したアプローチから脱却し、PMSを導入することで、予防保全の見地から安全性と機能性を確保し、最終的にはライフサイクルコストの最小化を目指すものとした。

なお、わが国の航空局の施策としても重要な舗装の維持管理は“事後保全”から“予防保全”へ移行する必要性を示しており²⁾、PMSの導入による管理は必要不可欠であると考えられる。

3. 2期建設の概要

関西国際空港の2期事業は既存の空港島から200m離れた沖合に約545haの用地を造成し、4,000mの平行滑走路(B滑走路)と関連する諸施設を整備したものである。建設位置が既存の空港島より沖合いであることから、沈下等の埋立空港における諸問題を地盤工学的な見地から解決するとともに、大規模、急速施工をコスト削減を踏まえて実現した³⁾。

アスファルト舗装の構造設計においては、合理性、経済性を高めるために、多層弾性論を用いた理論設計法を採用し、その舗装構造の妥当性及び破壊規準を検証するために実規模の舗装構造調査を実施している⁴⁾。

採用した標準構造は図-1に示すとおりであり、埋立土

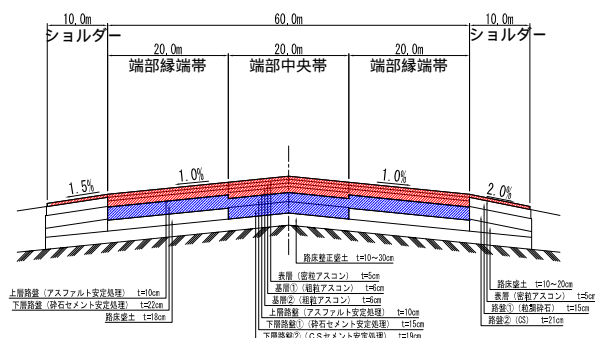


図-1 2期滑走路標準構造図

を十分に転圧施工した路床上に、セメント安定処理層とアスファルト混合物層で構成し、1期舗装施設に比べ約50cm程度(路床含む)の減厚を図っている³⁾。

4. 課題解決のための方策

従来の事後保全から予防的な保全へ脱却するとともに、必要なサービスアビリティ(安全性や乗り心地等)を確保するための舗装管理の充実、維持管理費の最小化を行うために、PMSの考え方を前提とした舗装管理を採用するものとした。

PMSとは、舗装の現況評価を行うのみならず、将来の状態を予測し、適切なタイミング、方法、予算で維持・補修を行うことを可能とするマネジメントシステムである。PMSの必要性や効果については、海外並びにわが国の道路舗装⁵⁾⁶⁾で報告があるように、一定のサービス水準を維持した上でライフサイクルコスト低減に有効な手段である。

なお、PMSは図-2に示すようにマクロマネジメントとミクロマネジメントが連携して機能するものであるが⁷⁾、工学的には後者の構築が重要な課題であり、今回のPMSの開発に際しては後者に対象を絞った。

技術的な課題としては、図-3に示すマネジメントサイクルを稼働するために、モニタリング方法や損傷評価方法を、劣化・寿命予測方法を設定する必要がある、それらを管理、評価するツールとしてのシステム構築が必要と

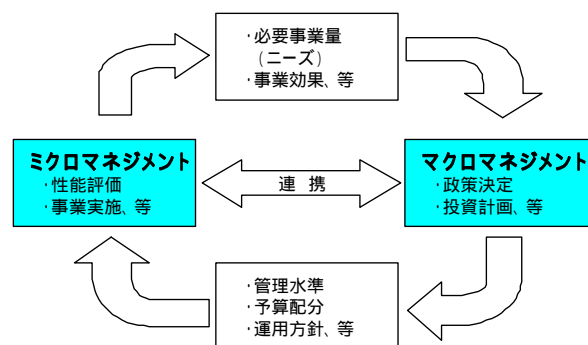


図-2 ミクロマネジメントとマクロマネジメント

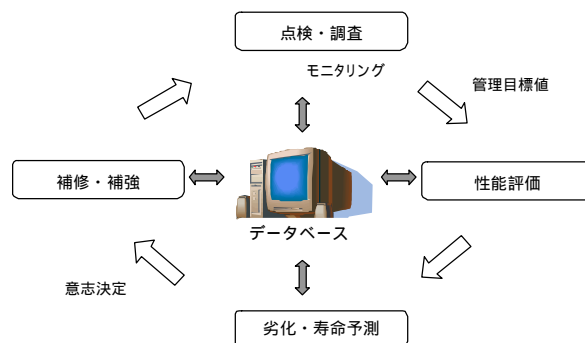


図-3 マネジメントサイクル

なる．特に，舗装の劣化・寿命予測は，最小限の負担で計画的かつ戦略的に舗装管理を行う上で必要不可欠であり，当空港では 1 期舗装施設の点検データを活用することで，実用性の高い予測曲線の設定ができると考えた．また，2 期舗装施設では，経年変化を把握する上で重要な建設直後の供用前の各種データを取得した．

5．技術的課題の対応方法

本稿では，先に記した技術的課題のうち，舗装の劣化・寿命予測の対応方法について記す．具体的には表面性状の供用性曲線の設定法と，FWD 試験・交通量を勘案した舗装構造の評価方法について記す．なお，構築した舗装管理システムの概要については次章に記す．

(1) 供用性曲線の設定

空港舗装の表面性状の評価には，下式で得られる PRI (Pavement Rehabilitation Index, 舗装補修指数) が用いられ，同指標により表面性状が定量化され，評価基準に基づき補修の必要性が評価される²⁾．これまで，当空港では 1 期地区で計 9 回分の PRI データがあり，このデータを解析することで，供用性曲線を設定することにした．

$$PRI = 10 - 0.450CR - 0.0511RD - 0.655SV$$

ここに，

CR：ひび割れ率(%，ひび割れ面積/区画面積)

RD：わだち掘れ量(mm，最大値)

SV：平坦性(mm，標準偏差)

供用性曲線は年間平均気温，設計 CBR，設計荷重，離着陸回数を説明変数とした重回帰式にて推定している研究事例⁸⁾があるが，今回は同一空港内のデータを活用しているため，交通量，走行形態以外の条件は基本的に同一である．そのため，走行形態の影響は施設・部位別に整理し，供用性曲線はカバレージを説明変数とした．カバレージとは種々の航空機の交通量を代表機種に換算したものであり，PRI 測定時期に合わせて施設・部位別の累

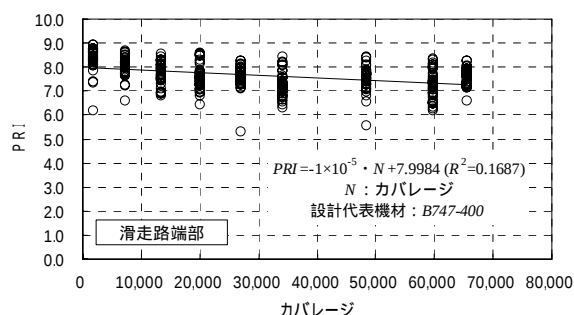


図-4 滑走路端部の表面性状の推移

積カバレージを算定した．

図-4 に舗装厚，運航形態が同様とみなせる滑走路端部の PRI データに対して，カバレージ(N)を説明変数とした表面性状の推移を示す．解析データは，維持工事でひび割れ部のシール充填やパッチングが行われたデータは除外している．このように同一カバレージでもバラツキが大きく，単純な回帰分析では不適切と考えた．なお，複数ある誘導路では少ないカバレージにおける PRI データが多く，更にバラツキが大きなものとなった．そこで，既存文献⁹⁾を参考にカバレージ階級別の最頻値をその階級における代表分析として回帰分析することとした．この手法を用いることで，信頼性を考慮した供用性曲線的设计も可能となる．作成した滑走路および誘導路の供用性曲線を図-5 に示す．なお，供用性曲線を検討した際に得られた知見は以下のとおりである．

- 1) PRI はカバレージの増加に伴い低下傾向があり，滑走路よりも誘導路の低下速度が大きい．1,000 カバレージに対して PRI の低下量は，滑走路 0.02，誘導路 0.25 となった．既存文献⁸⁾では経過年数と PRI の年間変化率を研究しているが，同書においても滑走路よりも誘導路の低下速度が大きいことを報告している．このことは航空機の走行速度が大きく影響していると考えられる．
- 2) ひび割れ率等の各指標を個別に整理すると，平坦性が PRI の低下に最も多く影響していた．
- 3) わだち掘れ量に顕著な低下傾向が見られなかった理由の一つとして，同一測線での測定ではないことが挙げられる．今後，供用性曲線を設定する上

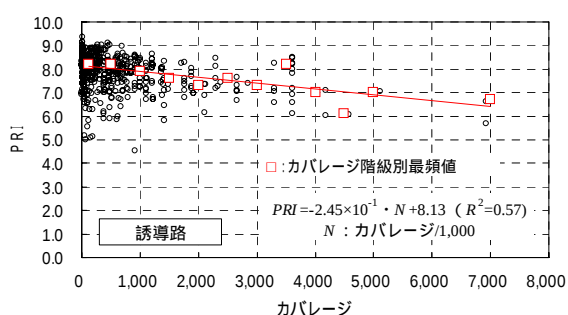
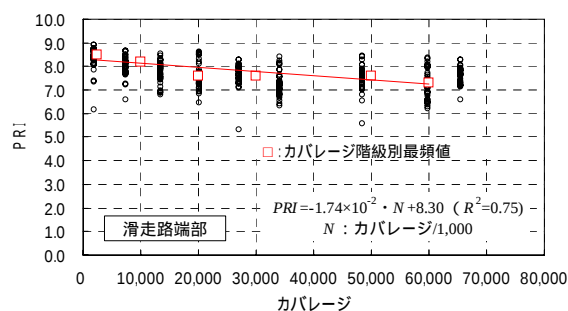


図-5 滑走路端部、誘導路の供用性曲線

で、調査手法の改善点として挙げられる。

(2) 舗装構造の評価方法

2期施設のアスファルト舗装設計は前記したとおり、多層弾性論を用いた理論設計法の考えに基づく疲労設計法を採用している。具体的には各就航機材が滑走路等の舗装の横断方向の任意点に与える個々の疲労度を累積して求めるものであり、累積疲労度(D_f)は下式で表される。

$$df(x,i) = \frac{P(i)}{P/C(x,i) \times Nf(i)}$$

$$Df(x) = \sum_{i=1}^m df(x,i)$$

$df(x,i)$: 機材*i*が与える*x*地点における疲労度

$Df(x)$: *x*地点における累積疲労度

$P(i)$: 機材*i*の交通量（離陸または着陸）

$P/C(x,i)$: 機材*i*の*x*地点における「スリッジ」率

$Nf(i)$: 機材*i*が与えるひずみと破壊規準式から求められる許容繰返し回数

x: 滑走路中心からの距離

設計段階では交通量(P)は需要予測に伴う計画値を用い、許容繰返し回数(Nf)は室内試験や実規模走行試験等から設定している⁴⁾。パス/カバレッジ率(P/C)とは、舗装体に1カバレッジを与えるのに必要な交通量であり、航空機の脚配置、1期運航調査で得た横断方向の走行分布より設定している。

本設計法の考え方は、供用後における構造評価に活用することができ、実際の交通形態に応じた現状評価や推定交通量に基づく将来予測が可能となる。構造評価を行う上での調査手法は、非破壊試験法である当社所有のFWD試験機(Falling Weight Deflectometer)を用いることにした。ここで、設計時に繰返し平板載荷試験等に基づいて設定した路床の弾性係数とFWD試験の解析値として得られる逆解析弾性係数には、1期地区の点検結果を踏まえると大きな相違が推測され、疲労度を適切に評価できないと考えた。そこで、供用前にFWD試験を行い、舗装完成後の弾性係数を用いて、モニタリング用の破壊規準を設定するものとした。具体的にはFWD試験から得られる逆解析弾性係数を用い、設計交通量が作用したときに疲労度が1.0となるような破壊規準を設定した。このような考え方をとることで、設計と維持管理を結びつけることができ、運航形態に応じた構造評価が可能となる。FWD逆解析結果から得られた各層の弾性係数と設計時の弾性係数の違いを表-1に示し、路床における設計時とモニタリング用の破壊規準の違いを図-6に示す。なお、破壊規準策定時に得られた知見、今後の活用法は以下のとおりである。

表-1 弾性係数の違い(滑走路)

層区分		設計弾性定数		逆解析弾性係数(MPa)	
		弾性係数(MPa)	ポアソン比	端部	中間部
アスコン層	表層	3,100	0.35	3,900	4,200
	基層	2,600	0.35		
	アス安	2,600	0.35		
路盤層	砕石セメ安	2,300	0.2	3,400	3,000
	CSセメ安	900	0.2		
路床		80	0.3	820	810

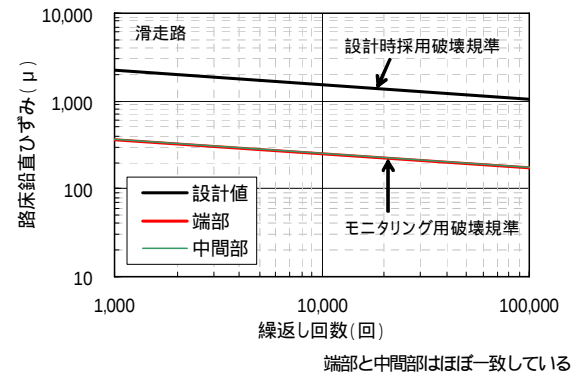


図-6 破壊規準の違い(滑走路)

- 1) 設計段階における路床の弾性係数は、繰返し平板載荷試験をもとに、試験値の変動や水浸、拘束圧の補正を行い80MPaと設定したが、FWD試験の逆解析から得られた弾性係数は800MPa程度とオーダーが異なる。これは1期地区の管理データでも同じ傾向となっている。
- 2) 計画交通量では、アスファルト混合物とセメント安定処理路盤の疲労度は非常に小さく、構造的には路床の疲労度に注目する必要がある。なお、設計段階においても路床の疲労度から舗装厚が定まっている。
- 3) FWD試験は定期的実施し、得られる逆解析弾性係数を用いて順解析を行い、解析から得られるひずみをモニタリング用の破壊規準に代入することで、疲労度の把握が可能となる。なお、実績の交通量については別途、利用実態を踏まえて管理していく。
- 4) 供用後において、アスファルト混合物の老化やセメント安定処理路盤の硬化に伴い、舗装の弾性係数は増加すると予測される。アスファルト混合物の老化に伴う表面性状の変化については、物性試験や路面性状調査と関連つけて評価していく必要がある。

6. システム概要

舗装管理システムは、国内外で稼働しているシステム^{10),11)}を参考にしたり、PMSに必要となる評価項目¹²⁾を設

定して開発した。開発対象範囲は、暫定的に2007年8月に供用した2期舗装施設としたが、2期舗装施設は拡張計画があることや、1期舗装施設を含めた舗装管理を将来的に実施することを踏まえ、新たな機能の追加等を容易にできるような構成とした。また、舗装の現況評価と将来の状態を予測可能にすることはもとより、日々のモニタリングデータの更新や現状把握をする上での操作の容易性を持たせて構築した。

具体的には本システムでは、各モニタリング項目の登録およびそれら結果を時期、施設、損傷形態等を条件とした検索による閲覧・出力、表面性状、舗装構造の将来予測が可能である。システムの実行機能は次の通りであり、これら機能はモジュール化しており、この中から1)、2)、6)のモジュール概要を紹介する。

- 1) 巡回点検結果登録・閲覧機能
- 2) 定期点検結果登録・閲覧機能
- 3) 路面摩擦結果登録・閲覧機能
- 4) 補修工事登録・閲覧機能
- 5) 品質管理結果登録・閲覧機能
- 6) 舗装評価機能

なお、システムのメイン画面は図-7に示すとおりであり、GISを活用して開発しており、容易に舗装状況を視覚的に判断することが可能である。

(1) 巡回点検モジュール

日常的に実施している点検結果を管理するモジュールであり、目視調査結果を中心としたデータを管理する。従来までの管理では、点検データの活用が十分でなかったが、本モジュールを利用することで、巡回点検データを有効活用できている。巡回点検で主に確認される損傷は、ひび割れであり、ひび割れをひび割れ率としてデータ管理することで、路面性状調査の補完を行うものとしている。また、点検結果は「巡回点検カード」といった定型書式に整理し、それらの検索、閲覧を可能としている。

(2) 定期点検モジュール

定期点検モジュールは、表面性状を調査する路面性状調査(PRI)、FWD試験、アスファルト混合物の性状調査、表面測量(勾配変化)を管理している。これらの評価は、舗装を各条件に応じて設定したユニット(基本サイズ:21×30m)に区切り、管理を行うものとしており、条件に応じた検索機能により現状把握や履歴が確認できるほか、評価値との対比を行うことが可能である。

なお、これらの点検結果はシステムに直接入力するこ

とは効率性に欠けることから、所定のエクセル形式ファイルに整理したデータを一括で登録し、作業性を高めている。また、FWD試験結果においては、温度補正や逆解析ソフト(BALM99)¹³⁾を組み込み、データ解析も容易に実行できるものとした。

閲覧では現況把握を容易にするため、図面上で損傷度合いによって着色すること等で一覧性を高めている。図-8は1期舗装データを仮データとして登録したときのPRI閲覧結果である。平面上で視覚的な評価を行うとともに、任意の検索条件による結果表示や、ユニット単位に情報登録している過去の履歴等が確認できる。

(3) 舗装評価モジュール

前記した表面性状の供用性曲線や舗装構造の疲労度評価をシステムに組み込み、実績表面性状変化と予測表面性状の把握、実績交通量に基づく構造評価を行うモジュールである。PRIやFWD調査結果は定期点検モジュールと連携しており、滑走路利用状況、誘導路走行割合を勘案した各施設・部位における交通量を登録することで、交通量変化に伴う現状、将来予測を行うものとしている。

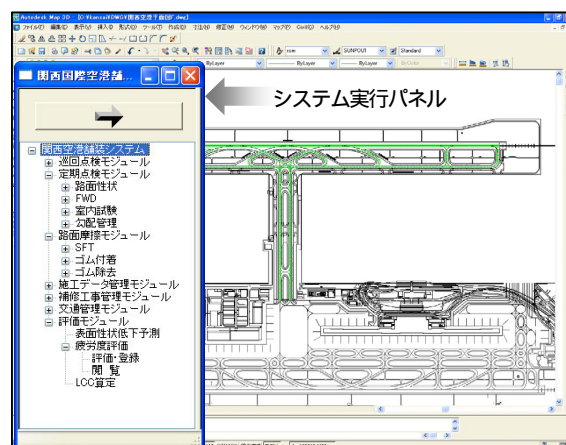


図-7 システムメイン画面と実行パネル

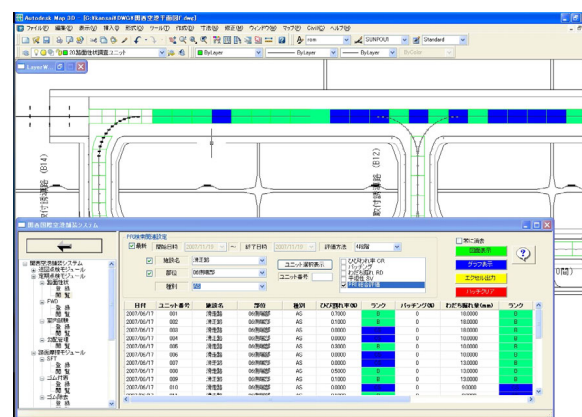


図-8 PRI 調査結果の閲覧結果

7. おわりに

PMS の概念を踏まえて舗装管理手法の検討やシステム開発を実施したが、以下の成果を得ることができた。

- 1) 空港舗装の管理に必要となるサービスアビリティやモニタリング項目をPMSの観点から設定することができた。
- 2) 表面性状の変化として PRI に着目し、カバレッジを説明変数とすることで、ある程度の精度を得た供用性曲線が設定できた。
- 3) 舗装構造設計法として用いた疲労設計法を、維持管理にも反映することができた。具体的には供用前に実施した FWD 試験結果をもとにモニタリング用の破壊規準式を設定し、設計との対比を可能とした。
- 4) 操作性、拡張性を重視した「関西国際空港版・舗装管理システム」を開発することができた。
- 5) 調査(モニタリング)～評価～将来予測といった、マネジメントサイクルを実行するための機能をシステムに加えることができた。

今後は日常から適切なモニタリングを実施し、モニタリングデータを舗装管理システムへ蓄積していく。得られたモニタリングデータをもとに、評価基準の再評価や供用性曲線の妥当性評価等を行い、より精度の高い供用性曲線の設定やマネジメントシステムの信頼性の向上を図る等、舗装管理システムを漸次追加・補強していく予定である。

参考文献

- 1) 久保宏，八谷好高，長田雅人，平尾利文，浜昌志：最近の空港アスファルト舗装の損傷と改良方法について，舗装工学論文集 第9巻，pp.35-40，2004.12.
- 2) 国土交通省航空局：空港土木施設管理規定，2003.12.
- 3) 池田憲造，安岡政光，田端竹千穂：関西国際空港 2 期用地造成事業，基礎工 Vol.35，pp.69-72，2007.1.
- 4) 前川亮太，島田敬，福岡知久：原型荷重車の走行試験による空港アスファルト舗装の構造設計，舗装工学論文集 第11巻，pp.17-22，2006.12.
- 5) Federal Aviation Administration：PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM，AC150-5380-7，1988.9.
- 6) 藪雅行，伊藤正秀：舗装マネジメントシステムの開発，土木技術資料，pp.28-33，2004.12.
- 7) 福手勤：社会資本のアセットマネジメントの実用化に向けた取り組みと課題(平成17年度特別講演会)，港湾空港技術振興会，2005.11.
- 8) 八谷好高，早野公敏，竹内康，今西健治，坪川将丈：空港アスファルト舗装の表面性状の実態，舗装工学論文集 第11巻，pp.147-154，2006.12.
- 9) 清野昌貴，岳本秀人，丸山記美雄，遠藤桂：プロジェクトレベルにおける舗装の供用性曲線適用手法について，舗装工学論文集 第10巻，pp.191-196，2005.12.
- 10) 猪岡英夫，浜昌志，亀田昭一，平山健一：中部国際空港における舗装管理システムの開発について，航空局第6回空港技術報告会，2005.12.
- 11) Shaghin，Keifer & Burkhalter：AIRPORT PAVEMENT MANAGEMENT: ENHANCEMENTS TO MICRO PAVER，THE 2002 FAA AIRPORT TECHNOLOGY TRANSFER CONFERENCE，2002.
- 12) 笠原篤：舗装マネジメントシステムからアセットマネジメントシステムへ，舗装工学論文集 第10巻，pp.K1-K4，2005.12.
- 13) FWD 研究会：FWD に関する研究(2002 年度報告書)，pp.21-24，2001.

DEVELOPMENT OF PMS FOR EFFECTIVE MAINTENANCE OF AIRPORT PAVEMENT

Takashi TSUDA, Kazumasa HARIMOTO, Takashi SHIMADA,
Tsutomu FUKUTE and Masashi HAMA

Kansai International Airport is a key airport with multiple runway and 24-hour operation service. In order to improve international competitiveness and customer satisfaction it is necessary to provide safe and satisfactory pavement at low cost. Kansai International Airport diverted its policy from breakdown maintenance to preventive maintenance considering the minimization of life cycle cost. It developed pavement management system as a tool to achieve this policy objective. Besides verification and evaluation of present condition, this system consists of predicting and evaluating the future performance of the pavement. This paper reports about the introduction of performance curve of surface characteristics, structural evaluation technique etc in the pavement management system. It also covers the outline of the practical application of the pavement management system.