

空港舗装の技術の現状とシステム構築へ向けて

阿部洋一¹・八谷好高²

¹ フェロー会員 工博 新東京国際空港公団理事 (〒282-8601 成田市成田空港内NAAビル)

² 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所土質部滑走路研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

空港舗装の設計から補修までを一連のものとして捉える空港舗装システムの構築についてわが国における現状を中心に論じている。まず、空港舗装に要求される性能として、走行安全性と構造安定性を詳細に吟味している。すなわち、前者では舗装の平坦性とすべり抵抗性を、後者では荷重支持力を検討対象としている。そして、これらの要求性能を満たすための舗装の設計、評価、補修方法について考察している。設計については、荷重ならびに環境条件を論じたあと、構造設計法を考察している。また、評価については舗装に対する要求性能別に検討を加え、補修については舗装の種類別に論じている。

Key Words: airport pavement, pavement system, serviceability, design, evaluation, rehabilitation

1. 緒言

航空輸送が交通輸送体系の中に占める位置は、大量高速輸送に対する要求の増大と安全面・費用面での改善も相まって、ますます大きくなっている。航空輸送ルートの空と地上の接点が空港であり、航空輸送を担う航空機が直接関与する土木施設は基本施設と称されている。この基本施設は、航空機が離着陸する滑走路、旅客・貨物のハンドリングに供するために航空機が駐機するエプロン、そして両者を連絡する誘導路に分けられ、いずれも舗装されている。本論文においてはこれらを空港舗装と総称する。

空港に関わる立場には、旅客・航空会社等の利用者、周辺住民、管理者の3者があって、それぞれ異なる要求をもち、これらへの対応が空港の機能を形成しているといえる。同様に、空港舗装への要求性能もそれぞれで異なっている¹⁾。利用者にとっては安全・快適であること、周辺住民にとっては舗装上を走行する航空機の騒音・振動が小さいこと、そして、管理者は、利用者・周辺住民に満足を与えられるように、舗装を技術的・経済的な妥当性をもって建設・維持できることであろう。

こうした意味では、舗装についての関心が高いといえない周辺住民に対しては空港舗装の配置に配慮することによって対応し、利用者たる航空機の乗員・乗客からの要求性能を主に考えればよからう。空港舗装に要求され

る性能は、対象とする施設によって異なり、滑走路においては航空機の離着陸時の安全性が一義的なものであるのに対し、誘導路やエプロンでは走行快適性にも注意が向けられよう。具体的な項目としてまず挙げられる平面形状についていえば、滑走路には航空機が安全に離着陸するのに十分な長さ、幅員、平坦性といったものが要求されるのに対し、エプロンにおいては航空機の操作上必要な広さと平坦性が要求される。誘導路の場合は、航空機の走行速度が滑走路に比べて低いため、幅員、平坦性について要求される性能は滑走路ほど厳しくはない。航空機荷重を支持するために必要となる舗装の強度についていえば、航空機の重量ならびに走行頻度に応じて要求性能が異なり、航空機が低速走行あるいは駐機する誘導路とエプロンに対しては、高速走行する滑走路と同程度かそれより厳しいものとなる。

空港管理者はこれらの要求性能を満たすことができるように、舗装を設計・施工し、維持していかねばならない。筆者は、これを効率的に行うためには、空港舗装の設計・施工・補修を一連のものとして捉えることのできるシステム、すなわち、空港舗装システムを確立しなければならぬと考えている。このシステムは、概念的には図-1に示すようなフローで表されよう。すなわち、要求性能に基づき、交通・環境条件を考慮に入れて構造ならびに形状設計を行って舗装を建設し、その後は要求性能ならびに交通・環境条件に基づいて舗装の状態を常

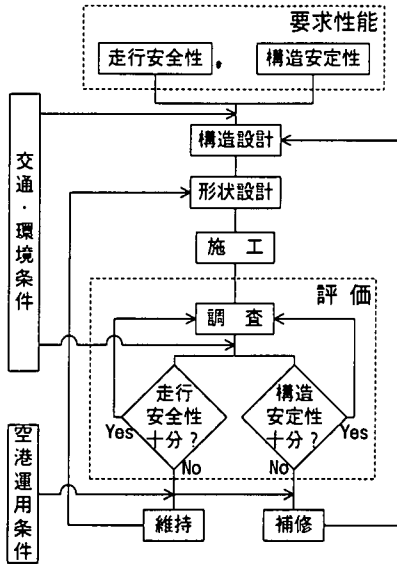


図-1 空港舗装システムの概念

時点検し、必要に応じて、空港運用上の制約条件に配慮しつつ、維持・補修方策を選択、設計、施工するといったものである。具体的な舗装システムは、幹線空港と地方空港のそれぞれで異なるべきものと考えている。たとえば、前者では可能な限り補修作業を必要としないゼロメンテナンス舗装システム、後者では補修計画の最適化が可能な舗装マネジメントシステムの採用が考えられる。これは、幹線空港では離着陸便数が多く、施設を長期間閉鎖しての補修作業が困難であるのに対し、地方空港では比較的容易に行えるからである。

筆者は、理論的設計法²⁾、マネジメントシステム³⁾、サービス性能限界状態設計法⁴⁾といった舗装に関する新技術が開発されて、実用に供され始めている現状に鑑みて、わが国における空港舗装システムのサブシステム、特に設計・評価・補修技術を集大成し、今後の技術の飛躍に資する必要があると考えた。以下では、まず、空港舗装に対する利用者からの要求性能、すなわち、走行安全性と構造安定性について考察する。前者についてはパイロットの操縦性ならびに乗員・乗客の乗心地に直接関わる舗装の平坦性とスリップ事故等の発生に関わる舗装のすべり抵抗性を、後者については航空機荷重に対する舗装の支持力を中心に論ずる。その上で、それらの要求性能を満たすための空港舗装の構造設計、評価、補修方法について考察する。設計については、荷重・環境特性を記してから、アスファルト舗装、コンクリート舗装それぞれの設計法について追求する。そして、評価について走行安全性、構造安定性に分けて論じてから、補修につい

てアスファルト、コンクリートの舗装種類別に検討を加える。

2. 走行安全性

航空機の安全運航のためには、航空機そのものの安全性はもちろんのこと、空港土木施設の信頼性も欠くことはできない。この空港土木施設のうちでも滑走路は航空機の運行に直接係わるものであり、舗装表面の平坦性とすべり抵抗性は極めて重要な項目となっている。

(1) 平坦性

線状舗装である滑走路・誘導路と面状舗装であるエプロンとでは平坦性に関わる要求性能が異なっている。この点について、前者では高速走行性・排水性の観点から、後者では排水性・駐機安定性の観点から考える必要がある。

滑走路・誘導路の縦断方向の平坦性については、特にパイロットの操縦しやすさに関わる面のほかに、乗客にも関係する乗心地といった面からの検討、2通りが必要である。

前者については航空機の走行速度が大きい滑走路で厳しく行う必要があり、縦断勾配、視距離、縦断勾配の変化量と変化点間隔といった項目により検討しなければならない⁵⁾。まず、縦断勾配は離着陸に必要な滑走路長や、進入の際にパイロットが視認する滑走路形状に影響を及ぼすため検討が必要であり、滑走路端部においては特に厳しい水平度が求められている。また、滑走路の見通しの程度を表している視距離については、航空機の走行速度が大きく、操縦性が車両に比して悪いため検討が必要となり、機体が高いことを考慮に入れる必要がある。そして、勾配変化量ならびに勾配変化点間隔については、離陸滑走時の走行速度が離陸速度に到達するまでに航空機が離陸することを防止したり、ノーズギヤと主脚間における機体縦方向の上下振動(porpoising)を防止するとの観点から検討の対象となっている⁶⁾。

これらについてのわが国における規格は、表-1に示すとおり、滑走路長別に具体的に定められている⁷⁾。縦断勾配については、この表に示すもののほか、長さ1,500m以上の滑走路の場合には末端から滑走路長の1/4以下の範囲で0.8%以下にしなければならないとも規定されている。視距離については、縦断勾配が上記の規定を満足したとしても、滑走路全体の見通しが必ずしも良好ではない場合もあることから、規定値が設けられている。具体的には、任意地点におけるある高さから滑走路の半分以上の範囲にわたって他の地点上の同じ高さが見えなければならず、これが滑走路全長において可能となることとされ

表-1 滑走路の縦断方向平坦性に関する規定

滑走路長 (m)	縦断勾配 (%)	勾配変化量 (%)	α (m)
1,500以上	1.0以下	1.5以下	300
900以上1,500未満	1.0以下	1.5以下	150
900未満	1.5以下	2.0以下	50

ている。この場合の高さとは、900m以上の滑走路においては3m、それ以下では2mである。縦断勾配変化点間の最小間隔 (D, 表中の α を用いて式(1)より算定される) としては、45m以上が必要とされている。

$$D = \alpha \cdot (i_A + i_B) \quad (1)$$

ここに、 i_A , i_B は縦断勾配変化点(A, B)における勾配変化量である。

誘導路においては、航空機の走行速度が、200km/hを超える滑走路と比べて、30~50km/hと著しく小さい⁸⁾ため、縦断方向の平坦性に関わる要求はそれほど厳しくない。この点は、最大勾配ならびに視距離が滑走路の場合より緩めの値でもよいこと、しかも勾配変化量ならびに勾配変化点間隔が特に規定されていない⁷⁾ことからもうかがい知ることができる。しかし、走行中における航空機の燃料消費を抑えとの観点からは、可能な限り平坦性を確保することが必要である。

後者の乗心地に関する検討は、航空機の運動特性に注目して行われる必要がある。この点については、舗装の破損状況と乗心地を結びつけたPSI (Present Serviceability Index)⁹⁾ や、縦断方向のプロファイルに対する車両モデルの応答を表すIRI (International Roughness Index)¹⁰⁾ といった評価方法が開発されているものの、航空機の乗員・乗客を対象にしたものはみあたらないのが現状である。しかし、舗装表面の凹凸とパイロットによる体感評価や航空機の上下方向加速度とを結びつけるといった試み¹¹⁾ や、航空機をモデル化して舗装の凹凸に対する動的応答を求めようという試み¹²⁾ もなされ始めている。特に、前者においては表面凹凸の長波長成分の重要性が指摘され、空港別の評価がなされる段階に達している。

滑走路・誘導路の横断形状ならびにエプロンの平坦性については、排水が十分に行われないと離陸滑走中の航空機が性能を十分に発揮できないばかりでなく、水たまりが生ずると走行性に安定を欠くので、検討が必要となる。一般的には、滑走路・誘導路においては中心線からショルダーへ向かって両勾配がつけられており、エプロンについては片勾配や折れ勾配を導入することで排水溝へ雨水が速やかに流入するように工夫されている。

何れの場合も、表面勾配については、走行時・駐機時の安全性を確保するためには最大値を規定する必要がある。わが国の場合は、滑走路・誘導路では1.5% (延長900m以下の滑走路は2.0%)、エプロンでは1.0%と規定されている。なお、舗装建設時の平坦性に関する施工管理においては、水たまり防止の観点から3mプロフィロメータによる標準偏差をアスファルト舗装、コンクリート舗装のそれぞれで、2.4mm, 2.0mm以下とすることを規定している¹³⁾。

以上に記した規準は、舗装の設計ならびに建設時におけるものである。舗装の平坦性は、一般的には供用後においても大きく変化することはないが、わが国では空港の立地条件が必ずしも良好とはいえない場合が多いので、その点が懸念されるところである。このことは、供用中に確保すべき平坦性といった観点から規準を設ける必要性のあることを意味しており、舗装の平坦性が航空機の運動特性に及ぼす影響を定量化し、規準として合理化しなければならない。この際考慮しなければならない点に航空機のノーズギアと主脚との距離(ホイールベース)がある。航空機のホイールベースは車両に比べて著しく大きい(B-747で25.6m)ため、3mプロフィロメータのような弦長の短いものによる平坦性測定では航空機の走行特性の指標としてふさわしくない可能性もある。測定装置の弦長は今後の検討課題といえる。

(2) すべり抵抗性

舗装表面のすべり抵抗性は、舗装表面が湿潤状態になると低下し、駆動時のドロプレーニング現象や制動時のスリップ現象が生ずる危険性が大きくなるため、航空機が高速走行する滑走路で特に大きな問題となる。

これに対処するためには、雨水の滞水時間の短縮化がまず第一に必要なもので、上記のように舗装横断方向に勾配を設けている。しかし、航空機の走行上、勾配をあまり大きく取れないので、より排水性を高めるためにはさらなる工夫が必要となり、グルーピング等の細い溝を舗装表面に設けたり、開粒度アスファルトコンクリートからなる排水性材料層(surface friction course)を設けるといった方法が採られている¹⁴⁾。このほかにも、すべり抵抗性を確保する方法として舗装表面のテクスチャを粗くする方法がある。わが国の場合は(1)で記したように、横断方向に勾配を設けて排水時間を短縮しているが、滑走路のすべり抵抗性をより確実に確保するための方策として、横断方向にグルーピングを設置することを原則としている。

このような措置を講じたとしても、航空機が着陸したり、制動をかけたりするたびに舗装表面には航空機タイヤのゴムが付着するため、すべり抵抗性は徐々に低下していく。さらに、航空機の繰返し走行によりグルーピン

表-2 滑走路面のすべり摩擦係数の管理目標値

装置	速度 (km/h)	タイヤ	すべり摩擦係数	
			グルーピングあり	グルーピングなし
μメータ	65	RL-2	0.60	0.50
SFT	95	RL-2	0.55	0.45
SFT	95	AERO	0.45	0.40

グの形状がくずれ、それによってすべり抵抗性は低下する。そのため、すべり抵抗性を常時確認することが必要となる。

通常、舗装のすべり抵抗性はすべり摩擦係数として定量化される。しかし、その値は航空機・車両、走行速度、水膜厚、温度といった要因によって異なったものとなるため、測定方法を標準化した上で規定を定める必要がある¹⁵⁾。わが国においては、湿潤時における滑走路のすべり摩擦係数の目標値として、表-2に示すもの¹⁶⁾が提案されている(水膜厚1mm)。なお、従来はμメータを使用していたが、再現性の問題等のため、より信頼性の高いサーフェスフリクションテスト(SFT)を使用していく方向に変わっている。

空港舗装のすべり抵抗性は、本来航空機が走行する場合のものについて規定する必要があるが、一般的には車両形式の測定装置を使用したときの値が用いられている。これについては、航空機と車両形式の測定装置によるすべり抵抗性の相関が良好である¹⁷⁾との報告も一部みられるが、詳細に検討して確かめる必要がある。このほか、グルーピングの目つぶれも排水性を大きく左右することから、グルーピングの健全度の評価法についても検討する必要がある。

3. 構造安定性

空港舗装には、表面形状のほか、荷重支持力、すなわち航空機がその上を安全に走行できる構造を有することも当然要求される。この場合、舗装が地盤の上に建設されることから、舗装のみならず、それを支える路床を含めた地盤もその対象となる。

(1) 地盤

地盤には、荷重支持力のほか、交通荷重の繰返し載荷に対する構造安定性が要求される。

地盤に作用する荷重圧力はその上部ほど大きいことから、この部分については特に路床と称され、詳細検討の対象となっている。路床の厚さは、深さ方向への荷重の伝播を考えると、1~2mで十分であり、わが国の空港に

表-3 軟弱地盤の例

土質	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	N値
粘性土	0.05	4以下
砂質土	ほとんど0	9以下

おいては、アスファルト舗装で荷重が大きい場合にのみ2mで、それ以外は1mとしている^{18), 19)}。これは、路床が損傷を受けた場合、アスファルト舗装のほうに舗装表面に破損が現れやすいことを考慮しているためである。路床の材質については、土質分類法により路床上としての適否を判定したり、その材質を直接規定したりする方法がある。後者の場合、具体的には、強度やCBRといった力学特性のほか、粒度や塑性指数といった物理特性が用いられる。

路床より下方の地盤に作用する荷重圧力は舗装と路床により分散されて小さくなるため、地盤の強度・変形特性は、それが軟弱な場合を除いて、特に検討する必要はなからう。空港舗装の場合には、表-3に示すような特性を有している地盤が検討の対象となる^{20), 21)}。

これに加えて、近年空港が山岳地や海上に建設されることも多くなってきていることから、圧縮・圧密といった変形に対する地盤の抵抗性にも注意しなければならない。これは、基礎地盤の圧密沈下が完了してから舗装工事を開始するという時間的余裕のある建設方法を探ることができないため、舗装完成後も沈下の継続する危険性が大きいからである。たとえば、前者では数十mから100mにも及ぶような盛土を、後者では数十mもの埋立を行わざるを得ないこともある。

供用開始後の地盤沈下、特に不同沈下は舗装に大きな問題を引き起こす。たとえば、埋立地盤上の空港舗装では、縦断方向で100mm程度の不同沈下により横びわれが発生した事例がある²²⁾。また、不同沈下は舗装の表面勾配のみならず、構造にも影響を及ぼし、供用開始後の補修が避けられない状況ともなる²³⁾。舗装は、通常、不同沈下が懸念される地盤上に建設されることはなく、その構造設計法もそのような地盤を対象にはしていない^{17), 18)}。しかし、空港の場合には、上記のように供用開始後の沈下が避けられない状況となることも多いことから、この点を考慮に入れた設計方法が必要となる。

このほか、地盤には舗装の施工基面としての役割も求められ、良好なトラフィカビリティが必要とされる。これは、通常その上に土質材料をまき出して転圧することにより路床や路盤を施工するので、各種施工機械が問題なく使用できるようにするためである。特に路床にあっては、その表面に良質材料からなる層を設けなければならない場合もある。

(2) 舗装

地盤に作用する荷重圧力を低減する目的で設けられる舗装は、利用者にとってはその時点で航空機荷重を安全に支持できるものであれば十分である。管理者にとってもその点は最低限確認すべきことであり、それを行う最も簡易な方法は、航空機荷重と舗装の荷重支持力を比較することによって航空機の乗り入れ可能性を判定することであろう。

この方法は、国際民間航空機構(International Civil Aviation Organization, ICAO)により具体化されている。ICAOは、1950年代後半に舗装強度を表わす方法としてLCN(Load Classification Number)法を提示した²⁴⁾。これは航空機荷重と舗装強度を同一の尺度(LCN)により比較可能とするものであったが、1980年代初めにはACN - PCN(ACN: Aircraft Classification Number, PCN: Pavement Classification Number)法へとさらに発展した¹⁴⁾。ACNは航空機が舗装に与える影響を指標化した数値、PCNは舗装の支持力を指標化した数値(交通量を制限することなく運行可能となる航空機荷重)を意味している。このACN-PCN法を採用することにより、航空機荷重と舗装強度の対応関係が明確になった。すなわち、ACNがPCNと等価かまたは小さければその航空機の空港への乗入れは問題ないが、ACNがPCNを超えても1.1倍以下であれば制限付きで乗り入れが可能であるとするものである。

航空機の重量は、後述するように、その運動状態によって異なったものとなる。特に、着陸時においては重力加速度の1.5倍にも達する衝撃荷重が舗装に加わる場合もある。したがって、このような荷重の変動を適切に定量化した上で、舗装の荷重支持力について検討する必要がある。

舗装の構造状態は、後述するように、交通荷重の繰返しにより変化する。ところが、ICAOの方法では、航空機が乗り入れる時点における空港舗装の構造状態を判断するだけである。管理者は、航空機に対して十分な構造安定性を設計期間中常時保つように舗装を管理しなければならないので、供用開始後の舗装構造状態を適切に予測することも必要不可欠となる。

4. 構造設計

上記のように、空港舗装には走行安全性と構造安定性の2種類の性能が要求される。これらはともに供用後の低下が避けられないため、管理者は設計期間中所要の性能を確保できるように舗装構造を設計しなければならない。

表-4 設計荷重

設計荷重の区分	主な機種
LA-1	B-747, DC-10, L-1011
LA-12	A-300, B-767
LA-2	A-320, MD-81, MD-87
LA-3	DC-9, B-737
LA-4	YS-11

(1) 荷重

舗装に対する荷重として主たるものは、いうまでもなく、交通荷重であり、それは通常大きさと度数によって表される。したがって、舗装の構造設計においては、将来の交通荷重を適切に予測し、設計荷重として定量化することが必要である。

空港舗装の設計対象である航空機は、大型ジェット機から小型プロペラ機までの広範囲に及んでいることから、設計期間中における航空機種別の交通量を予測しなければならない。この場合、予測された交通荷重を設計に取り込む方法としては、個々の荷重による舗装の疲労度を求めて合計するもの、標準荷重に置き換えてその繰返し回数に換算するものの2通りが考えられる。空港では大荷重の交通量が比較的多いことから、一般的には後者が採用されている。

航空機の設計荷重としては主脚が対象となる。一機あたりの主脚数は2~4脚であり、それぞれは2~6個の車輪で構成されている。設計においては、脚同士が十分離れているものとして、主脚一脚を荷重と考えるのが一般的である。わが国でもその点は同様であり、設計荷重として主脚一脚を考えている。この場合の設計荷重とは上記の標準荷重に相当するものであり、通常、乗り入れる航空機のうち舗装に及ぼす影響が最大となるものを選択する。なお、設計上の便宜を図るために、航空機荷重を表-4に示すようにいくつかのレベルに区分している^{18), 19)}。この区分は、アスファルト舗装ではたわみが、コンクリート舗装ではコンクリート版応力がほぼ同じになるようにして決定されたものである。

航空機種が同一であっても、旅客・貨物、燃料等の積載量といった航空機質量そのもののほかに、走行速度、駐機時間といった点に違いがあるため、航空機荷重が舗装に及ぼす影響は基本施設内において必ずしも同一とはならない。また、誘導路・エプロン上の駐機位置(スポット)は通常複数であること、滑走路が一本であっても離着陸方向が一定ではないことから、交通量は基本施設で異なったものとなっている。したがって、厳密にいえば、基本施設ごとに設計荷重を変える必要があることになろうが、実務上は簡易な方法によって交通荷重の違いを考慮している。

表-5 舗装区域と施設

舗装区域	施設
A	滑走路端部, 平行誘導路, ローディングエプロン
B	滑走路中間部, 脱出誘導路, ナイトステイエプロン
C	メンテナンスエプロン
D	オーバーラン, ショルダー

わが国の場合には, 航空機を対象にした舗装区域をA~Dの4つの区域に分けている^{18), 19)}. A, B, C舗装区域は, それぞれ, 出発時, 着陸時, 燃料非積載時の航空機が走行あるいは駐機する箇所であり, D舗装区域は航空機が通常は通行しない箇所である. 具体的な施設を表-5に示す. このうち, 滑走路中間部においては, 航空機が高速走行することにより両翼に揚力を受ける結果, 舗装に加わる荷重は実質的に小さくなるので, この部分はB舗装区域に含まれている. 結果として, A, B, C, Dの順に舗装厚は大きいものから小さいものになっていく.

交通荷重の度数を標準荷重の交通量として表すためには, 交通荷重が舗装構造に及ぼす影響を荷重の大きさ別に定量化し, その荷重の交通量を標準荷重による等価な交通量に換算しなければならない. この定量化方法としては, ① $\sqrt{P} \log N$ —一定 (P : 荷重, N : 破壊回数)²⁵⁾, ② $N_3 = (P/5)^4 N$ (P : 荷重 (tf), N : P の交通量, N_3 : 5tf換算交通量)²⁶⁾ といったタイプのものが一般的に用いられるが, わが国の空港の場合には①のタイプを採用している.

交通荷重の度数を定量化する際には, 舗装横断方向の走行位置も要素として考える必要がある. 空港の場合は道路に比べて走行位置の分散が大きく, その度合いを標準偏差で表すと, 道路が0.3m程度であるのに対して, 空港では0.6~6mとされている²⁷⁾. なお, この横断方向荷重分布については, 最近の調査によって, 誘導路より滑走路のほうが, また小型機より大型機のほうが広がっていることがわかっている^{8), 28)}. これを設計に取り込むためには, まず種々の航空機の横断方向走行位置分布を把握し, それらによる舗装への影響度を明らかにする必要がある. 走行位置分布の具体的な定量化方法としては, 個々の航空機の影響を重ね合わせて最大となる値を用いるもの, 横断方向にみたときの特定の範囲を均等に走行すると考えるもの^{27), 29)}の2通りがあるが, わが国では前者を採用している.

わが国の空港舗装の構造設計における交通荷重の定量化方法を具体的に示そう. まず, 交通量については, 航空機の大型化が急速に進展していること, 航空需要の正確な将来予測が難しいことなどから, 設計期間を10年として推定する必要がある. 次に, 設計荷重を適切に選定

し, 設計期間中における種々の航空機の交通量を設計荷重による交通量へと換算する. そして, 走行位置の横断方向分布を考慮に入れて, 設計交通量, すなわち設計カバレッジとして定量化する. この設計カバレッジは, 設計を簡略化するために3,000カバレッジから40,000カバレッジまでの5段階に区分している.

荷重に関する課題としては, 運動状態による航空機荷重の違いの定量化方法が挙げられる. 現行設計法では設計荷重として静止荷重を採用しているが, 航空機荷重はその運動状態によって, 停止時・駐機時の静止荷重, 着陸時の衝撃荷重, 走行時の動的荷重の3形態をとると考えられる³⁰⁾. このうち, 衝撃荷重については, 現在の航空機はプロペラ機の時代と異なって滑走路へは接線着陸を前提としているため, 衝撃時の加速度は重力加速度を大幅に超えることはなく, 静止時荷重に比べてさほど大きなものとはならないとみなされている. 一方, 航空機の降下速度を1.8m/secと仮定すると静止荷重の1.3倍程度になること³¹⁾, 実際にも重力加速度の1.5倍を超える衝撃荷重となる場合のあることが報告されている. 後者の場合であっても, 航空機の着陸時には燃料がほとんど消費されているので, 衝撃による荷重の増加分は旅客・燃料を満載した航空機質量の最大でも3割程度となるにすぎないが, この点については確認する必要がある. また, 走行時の動的荷重は舗装の平坦性が良好でない場合に問題となるが, 滑走路での高速走行時には翼に揚力が作用するため静止荷重より小さくなるので, 低速走行である誘導路走行時がむしろ検討対象となろう³¹⁾. このような運動状態による荷重の違いに加え, 舗装材料の力学特性や舗装構造の時間依存性も無視することはできない. このようなことから, 上記のように基本施設をA~D舗装区域に区分するだけでは不十分と考えられ, 今後さらに詳細な検討が必要となってくる.

このほか, 設計カバレッジの算定においては, 滑走路, 誘導路の横断方向や広大なエプロンにおける荷重分布の定量化を始め, 種々の荷重の交通量を設計荷重の走行回数へ換算する方法といった点についての吟味も必要となってくる. さらに, 大型機にみられる, 主脚同士が近い場合や主脚が多数輪からなる場合の荷重の定量化についても十分な検討が必要と考えている.

(2) 環境

舗装の構造設計においては, 交通荷重のほかに, 温度, 降雨(雪)量, 地下水位といった環境について十分に考慮することが必要である³²⁾.

温度条件は, 材料と構造の両面において重要な検討項目である. 前者の材料面では, アスファルト混合物の力学特性が温度に依存して大きく変化するため, その材料や配合に配慮する必要がある. また, セメントや石灰に

よる安定処理材料の強度発現速度も温度によって変わることには注意しなければならない。後者の構造面では、特にコンクリート舗装がその対象となる。すなわち、コンクリート版の深さ方向の温度勾配は交通荷重に匹敵する設計要因であり、平均温度変化量は、日地間隔、連続鉄筋コンクリート舗装の鉄筋量、プレストレストコンクリート舗装のプレストレス量に関わる重要な要因である。このほか、寒冷地における舗装・路床の凍上ならびに凍結・融解現象には、いうまでもなく温度が関係する。

降雨、地下水といった水の問題も重要な設計要因である。たとえば、降雨量はコンクリート舗装のポンピング現象の発生に関わるほか、粒状材など安定処理していない土質材料は水浸による強度低下がみられたりする。

埋立地盤のような地下水位が高い場合には路床・地盤の強度が低下する恐れが強いため、地下水を低下させる措置を講じたり、耐水性に優れた材料を用いるといった工夫が特に必要となろう³³⁾。これは、雨水等が浸入してくる場合も同様なので、何らかの排水対策を取らなければならない。しかし、面積の広大な空港舗装では排水対策を確実なものとするには実際には容易ではない。米国の道路を対象に採用されている³⁴⁾ような排水時間の考慮可能な設計方法を開発する必要性も高いといえる。

上記のような環境要因については、国土をブロックに分けて地域性を考慮できるようになっている設計法³⁴⁾もある。わが国の空港舗装においてはそのような手法を特に用いていないが、上記のアスファルト混合物の材質、コンクリート舗装の構造設計、凍上抑制層などの考え方において部分的には取り入れられている。今後は、地域係数の導入も含めて環境要因の取込み方法についての検討が改めて必要であろう。

(3)設計

舗装は、一般的にアスファルト舗装、コンクリート舗装に区別されるが、表層に使用されている材料のみではなく、その設計法にも大きな違いがみられる。通常、前者においてはアスファルト混合物層ならびに路床、後者においてはコンクリート版の構造安定性に注目して設計法が構築されている。

a)アスファルト舗装

アスファルト舗装は、交通荷重の繰返し走行を受けることにより、破損が発生・進行し、破壊に至るものと考えられる。その場合、破壊を明確に定義することが難しいばかりではなく、力学的解析手法により破損の進行メカニズムを追求することは不可能に近い。そのため、アスファルト舗装の構造設計法として現在実用化されているものは、ほとんどが経験的な手法に基づくものである。

空港を対象にした初めてのアスファルト舗装の構造設計法である米国陸軍工兵隊(U. S. Army Corps of Engineers,

CE)法³⁵⁾は、米国カルフォルニア州道路局で研究開発されたCBR設計法を空港舗装へ適用したものである。この設計曲線は、試験舗装や供用中の空港舗装での調査に基づいて見直され、式(2)のように数式化が図られている³⁶⁾。

$$t = \sqrt{\frac{P}{8.1CBR} - \frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

ここに、 t : 舗装厚 (in),

P : 荷重 (lb),

A : 接地面積 (in²).

この方法はわが国の空港アスファルト舗装設計法においても採用されている¹⁸⁾。ただし、この式が5,000カバレージの交通量に対応したものであるため、それ以外の場合に対処するために荷重繰返し係数 f ($= 0.23 \log C + 0.15$, C : カバレージ) が導入されている。これによって、任意の設計カバレージに対応する舗装厚が、式(2)によるものに荷重繰返し係数を乗ずることにより求められる。また、航空機主脚が複数の車輪からなる場合の対応方法、安定処理材路盤を用いる場合の設計方法といったものも整備されている。

b)コンクリート舗装

コンクリート舗装には、無筋コンクリート(NC)舗装、連続鉄筋コンクリート(CRC)舗装、プレストレストコンクリート(PC)舗装がある¹⁹⁾が、一般的にはNC舗装が採用されることが多く、CRC、PC舗装は幹線空港での使用事例が多い。破壊の定義が難しいことはコンクリート舗装の場合も同様であるが、コンクリートがアスファルト混合物に比較してより弾性的な挙動をすることから、設計法としてはコンクリート版の疲労破壊に注目した解析的手法が用いられることが多い。

わが国の空港NC舗装の構造設計法が準拠している米国ポルトランドセメント協会(Portland Cement Association, PCA)法³⁷⁾では、交通荷重による応力に対して適切な安全率を用いてコンクリート版厚を算定すれば、温度等交通荷重以外の応力に対しても十分に安全であるとしている。この安全率としてわが国では交通量に応じて1.7~2.2を用いている。路盤の設計支持力係数(K_{75})70MN/m²、コンクリートの設計基準曲げ強度5N/mm² (材齢28日)の場合、LA-1に対するコンクリート版厚は380~450mmとなる。

CRC舗装においては、横びびわれ部において荷重伝達が行えるように、びびわれ幅を平均で0.5mm以下に抑えることを原則としている。縦方向鉄筋の量と設置位置については、従来は経験に基づいたものとなっていたが、解析的手法が開発されて^{38), 39)}、前者は0.65%、後者は表面から版厚の1/3の高さと規定された。PC舗装の設計法としては、荷重が作用した状態でのPC版下面のびびわれ発

生を許容するものを採用している。この場合の鋼材量は、プレストレス導入による鋼材の増加応力度が 100N/mm^2 以下となるように決定される⁴⁰⁾。

空港舗装の構造設計における問題点としては、まず第一に舗装の破壊、すなわち、供用限界が必ずしも合理的に定義されていないことが挙げられる。これは舗装には本来交通荷重による圧力を低減して下方の地盤へ分散させる機能に加えて、航空機・車両等に安全・快適な走行表面を提供するといった機能を併せ持つことが要求されるものの、現行設計法では後者に関する考慮が十分にはなされていないためである。走行安全性を保証するための定量化が早急に必要であろう。また、走行安全性、構造安定性といった要求性能を所定の期間確保するためには、それらの経時変化を適切に定量化する方法を確立することが不可欠である。さらに、舗装の評価とそれに続く補修工法の選択・設計との一体化を図るためには、構造設計法を経験的手法から力学的解析手法へ移行させることが極めて重要である。

ゼロメンテナンス舗装システムの必要性については1.で指摘したところであるが、このようなことを可能ならしめる構造としては、構造体であるコンクリート版上に表層材であるアスファルトコンクリート層を敷設するという、いわゆるコンポジット舗装が考えられる⁴¹⁾。また、コンクリート舗装においても路盤に高強度セメント安定処理材を用いることにより、コンポジット舗装とすることも可能である⁴²⁾。これらの設計法としては6.で後述するオーバーレイ厚設計法が準用できると考えられるので、設計法として体系化を図ることも可能であろう。

5. 評価

空港舗装は、2.、3.で論じた航空機の走行安全性ならびに舗装構造の安定性が設計期間中確保されるように、両者に関わる要求性能の観点から点検・評価されなければならない。この場合、調査時点における評価だけではなく、将来の状態についても推定できることが舗装管理者の立場からは肝要である⁴³⁾。わが国の空港舗装システムにおいては、評価から補修までを一連のものにとらえ、舗装表面性状の評価に引き続いて構造評価を行い、適切な補修方法を選定・設計するというシステムを採用している。

(1) 走行安全性

航空機の走行安全性に大きく関わる項目は、2.で記したとおり、舗装表面の平坦性とすべり抵抗性である。

a) 平坦性

平坦性の中でも、パイロットの操縦性に関わるものについては、地盤沈下が懸念される場合を除けば、供用後に表面形状が著しく変化する危険性は少ないため、問題が生ずるようなことはほとんどないといつてよい。しかし、乗員・乗客の乗心地に関わるものについては、その変化が大きいと考えられるため、頻度を上げて調査することが必要である。その場合、舗装や地盤に将来変状が生ずれば平坦性も損なわれることになるので、縦断方向の平坦性やわだちぼれといった乗心地に直接関わる項目のほかに、ひび割れ等も取り込むことによって舗装表面の破損状況を総合的に評価することが一般的に行われている。

このような舗装破損状況の定量化手法としては、乗心地の観点から開発されたPSI⁴⁴⁾、補修の観点からのPCI(Pavement Condition Index)⁴²⁾といったものがあり、わが国の空港舗装ではPRI(Pavement Rehabilitation Index)を用いている⁴¹⁾。PRIは、アスファルト舗装、コンクリート舗装のそれぞれで、次式により計算され、補修の時期は、このPRIの値によって、A(必要なし)、B(近い将来必要になる)、C(早急に必要である)の3ランクに分けている。

① アスファルト舗装

$$PRI = 10 - 0.450CR - 0.0511RD - 0.655SV \quad (3)$$

ここに、

CR: ひびわれ率 (%、=ひびわれ面積/区画面積)、
RD: わだちぼれ (mm、最大値)、
SV: 平坦性 (mm、 3m^2 7010メークによる標準偏差)。

② コンクリート舗装

$$PRI = 10 - 0.290CR - 0.296JC - 0.535SV \quad (4)$$

ここに、

CR: ひびわれ度 (cm/m^2 、=ひびわれ長/区画面積)、
JC: 目地部の破損率 (%、=破損目地長/目地長)、
SV: 段差 (mm、最大値)。

このPRIは、舗装技術者の補修に関する主観の評価に基づいて開発されたものであり、乗員・乗客の乗心地といった観点からの評価方法ではないのが大きな問題であると考えられる。また、舗装の平坦性に対する航空機の動的応答は機種によって異なるため、本来は新型航空機の乗入れ可能性を検討するときには走行安全性にも注目しなければならないはずである。しかし、このような点について現状では十分な検討ができず、先に述べた平坦性測定装置の弦長との相関性も含めて、早急な対応が必要となっている。

b) すべり抵抗性

舗装のすべり抵抗性には、パイロットの操縦性や乗員・乗客の乗心地といった観点からは問題とならない程度の表面形状の変化も影響を及ぼす場合がある。具体的には、わだちばれや局所的なへこみが原因で水たまりが生じたり、舗装横断方向でみると左右対象とならないといった場合である。これに加えて、滑走路表面に航空機の着陸・制動時にタイヤゴムが付着することによるすべり抵抗性の低下も懸念される。特に、後者が原因の低下度は前者の場合に比較してかなり速いことから、頻度を適切に定めた上で、すべり抵抗性について点検する必要がある⁴³⁾。

また、すべり抵抗性は舗装表面に付着したタイヤゴムを除去することにより回復することが確認されているので、すべり抵抗性の低下度を定量化して、作業頻度の合理化を図る必要がある。このようなすべり抵抗性の日常管理やゴム除去作業の検査方法は、小型測定装置の使用により簡略化も可能であると考えられる⁴⁴⁾ から、これについても研究を継続して、舗装システムに取り込んでいくことが大切である。

(2) 構造安定性

舗装の構造安定性については、前述のように、設計対象航空機より大型の航空機が乗り入れる場合に、その適否を判断するために確かめる必要がある。また、走行安全性、構造安定性といった要求性能が満たされなくなって、何らかの補修・補強を行う場合の舗装の現状把握を目的としても的確な構造評価が必要である。

舗装の構造を評価する方法には解体調査と非破壊調査があるが、作業性を考えるというまでもなく後者が有利である。解体調査においては、路床のCBR・支持力係数や路盤材料の強度といった特性値を把握して構造強化方法を決定する。非破壊調査としては、舗装に荷重を加え、その応答としてたわみを測定する方法が一般的に用いられ、得られたたわみから舗装の構造状態を推定し、構造強化方法を決定する。

わが国の空港舗装においては両者を併用しているが、近年は非破壊評価法を採用することが多くなっている。この方法としては、アスファルト舗装に対してダイナフレクトを用いることにしているが、最近ではコンクリート舗装のみならず、アスファルト舗装にもフォーリングウエイトデフレクトメータ(FWD)を適用することが標準となりつつある。

アスファルト舗装を対象にしたダイナフレクトによる構造評価法は、最大たわみ(DMD)が基準値(基準DMD)を上回る場合に何らかの補修・補強を行うというものである⁴⁵⁾。FWDによる方法では、最大たわみに注目するもののほかに、たわみ曲線を逆解析することにより得られ

る舗装各層の弾性係数に注目するものも検討されている⁴⁶⁾。

コンクリート舗装に対するFWDによる構造評価法は、コンクリート版の弾性係数、路盤の支持力係数、目地の荷重伝達率を算定し、コンクリート版下の空隙の有無と大きさを推定することにより舗装構造を評価して、補修の必要性を判断するものである⁴⁷⁾。具体的には、たわみ測定をコンクリート版中央部と目地部で行い、前者からはコンクリート版の弾性係数、後者からは目地の荷重伝達率を把握し、両者から得られる路盤支持力係数を比較することにより、空隙の有無とその大きさを推定する方法である。

構造評価における問題点としては、自然環境の考慮方法、残存寿命の把握方法が挙げられる。前者については、構造調査により得られた結果は特定の自然環境下におけるものなので、測定結果を比較する場合にはそれらを標準状態におけるものに換算することが必要である。たとえば、温度は、アスファルト混合物の力学性状に変化をもたらし、コンクリート版にはそりを生じさせ、結果として測定値に影響を及ぼす。また、雨水の滞水状態、地下水位といった自然環境も測定結果に影響を及ぼす。後者については、調査時点における構造状態は把握できるものの、残存価値が十分に評価できない点が大きな問題であろう。これは、荷重に対する舗装の弾性応答は、舗装が構造破壊に至る直前まではほとんど変化しないため、一度の構造調査からだけでは残存寿命を推定することが困難であるからである。舗装の残存寿命に関する情報は構造強化方法の合理化にとって必要不可欠であり、その評価方法を確立することが急務であると考えている。

6. 補修

舗装の破損には舗装表面だけのものと舗装構造にまで及んでいるものがあり、補修方法としては、前者ではオーバーレイが一般的であるのに対して、後者の場合はオーバーレイに加えて打換えも用いられる⁴¹⁾。

空港舗装の補修の場合、運用上の制約から施設を長く閉鎖できないことが多く、短時間施工の可能な補修工法が必要である。特に、滑走路の補修では、夜間に工事をして翌朝は供用しなければならず、アスファルトによるオーバーレイを用いざるを得ない場合が多い。しかし、その場合でも、わだちばれ等を防ぎ、交通開放時期のより早期化を可能にするような材料面でのより一層の工夫が必要とされる。

(1) アスファルト舗装

アスファルト舗装の補修方法としてはアスファルトコ

ンクリートによるオーバーレイが一般的に用いられる。この場合のオーバーレイ厚算定法は、5.で論じた構造評価法と一体化することが合理的であると考えられる。すなわち、非破壊試験で得られたたわみ曲線を逆解析することにより舗装各層の材料特性を推定し、これに基づいてオーバーレイ厚を算定するといった方法である。わが国の場合、オーバーレイ厚を種々に変えた舗装を仮定してダイナフレクト荷重に対するたわみ（計算DMD）を計算し、それが新たな設計条件に対応する基準DMD以下となるようにオーバーレイ厚を決定するという方法を採用している^{49）}。

4.で論じたように、わが国の新設アスファルト舗装の構造設計法においては経験的な方法であるCE法を用いている。これに対して、非破壊評価法では多層弾性理論を採用しているので、両者の整合性が現時点では十分に取られておらず、新設と補修における設計法の連続性が確保できない事態となっている。これは、空港舗装システムを確立するためには早急に解決しなければならない事項であると考えられる。これに加えて、5.においても記したように、残存価値（寿命）の算定方法を確立することも重要な課題として残されており、補修設計の合理化のためにはその解決が急務である。

(2) コンクリート舗装

コンクリート舗装の補修方法としては、アスファルトによるオーバーレイ、コンクリートによるオーバーレイ、コンクリートによる打換えの3種類があり、施工期間はこの順に長い。

アスファルトによるオーバーレイの場合は、施工期間が最も短くてすむものの、供用後のわだちぼれといった問題が懸念される。この設計法としては、オーバーレイ後のコンクリート版のひずみに注目してオーバーレイ厚を算定する方法がわが国で整備されている^{49）}。

このわだちぼれを防止するために、コンクリートによるオーバーレイも用いられる。この場合は、従来より式(5)によるオーバーレイ厚算定式が用いられている^{49）}。

$$h_0 = \left\{ h_d^p - C \left(\frac{h_d}{h_{db}} \cdot h_c \right)^p \right\}^{1/p} \quad (5)$$

ここに、

- h_0 : オーバーレイ厚 (cm),
- h_d : 新材料を用いるときの所要版厚 (cm),
- h_{db} : 旧材料を用いるとしたときの所要版厚 (cm),
- h_c : 既設版厚 (cm),
- C: 既設版の破損状態による係数 (0.35~1.0),
- p: 新旧版間の付着程度による係数 (付着, 直接, 分離オーバーレイで, 1.0, 1.4, 2.0をとる) .

この中では、付着オーバーレイ工法が工費等の面からみて有利であるが、工法の確実性に問題があるとして空港ではほとんど用いられていない。現在この工法を積極的に使用していくために、新旧版間の付着を確保する方法の検討が進められている^{50), 51)}。このほか、コンクリートによるオーバーレイでは空港施設を長期間にわたって閉鎖しなければならぬ事態となるため、施工してから供用開始までの時間を短くできる半たわみ性材料によるオーバーレイ工法も検討されている⁵²⁾。

オーバーレイが難しい程度にまでコンクリート版の破損が進行している場合には、コンクリート版を打換える必要がある。その際には、施設の閉鎖期間を短縮するために工場製作によるプレキャスト版が用いられることがある⁵³⁾。このほか、PC舗装が沈下した場合の補修工法として、油圧ジャッキによりPC版を持ち上げ、その下にセメントミルクを充填するというリフトアップ工法が開発されている⁵⁴⁾。

コンクリート舗装の補修システムにおいては、評価システムと一体化を図ることが大きな課題である。なかでも、コンクリート版の疲労度を推定することは難しく、その後のオーバーレイ厚算定が不正確となる危険性も大きい。また、材料・工法面でも、補修に伴う施設閉鎖を可能な限り短縮でき、しかも通常のコンクリート舗装程度に耐久性のあるものの確立が望まれている。さらに、打換えに際しては、既設舗装の解体に伴う発生材の再利用方法についても十分に検討する必要がある、一部においてすでに実施している空港もある。

7. 結語

第二次世界大戦後に本格化したわが国の民間航空輸送システムは発展の一途をたどり、昭和40年代始めには、増大する国際航空輸送への需要に対処するために新東京国際空港が計画されるとともに、空港土木施設整備の合理化を図るための研究が本格的に開始された。本論文は、それ以来今日に至るまで30年にわたる成果の集大成を試みたものであり、設計、評価、補修を中心に、わが国における空港舗装システムについて総括している。

空港舗装システムを確立するためには、航空機の荷重特性、舗装の性状、補修の履歴、環境条件についての総合的評価手法を確立して、情報のフィードバックシステムを整備することが必要であると指摘されて⁵⁵⁾から20年ほどで、わが国の空港舗装システムは本文に記した段階にまで到達した。今後、この完成度を高めるために解決すべき課題として、次の3項目が挙げられる。まず第一は空港舗装の破壊の定義であり、構造安定性に加えて航空機を対象にした走行安全性の観点からの要求性能につ

いて十分考慮しなければならない。第二は設計から評価を経て補修に至るまでの設計原理を統一することである。これは、設計法が経験に基づくものであるのに対し、構造評価ならびに補修設計法では力学的解析手法が採られているからである。そして、最後は舗装の性状の経時変化、すなわち、パフォーマンスの定量化であり、トータルコストの考え方を空港舗装システムに取り込んで行く上で必須の項目である。

なお、本文中ではほとんど言及できなかったが、材料、施工面での技術についても、交通荷重が大きくて頻度が少ない、舗装面積が広い、補修可能時間が少ないといった空港舗装特有の条件下で着実に進歩していることはいうまでもない⁵⁶⁾。この点については別の機会に譲ることとしたい。最後に、本論文でまとめた空港舗装システムは運輸省ならびに新東京国際空港公団における技術開発の成果であり、両組織の関係諸氏に対し深く謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) (社) 土木学会土構造物および基礎委員会舗装機能の評価技術に関する研究小委員会：舗装機能の評価法，192p., 1992.
- 2) Department of the Army and the Air Force: *Flexible Pavement Design for Airfields (Elastic Layered Method)*, 1989.
- 3) Haas, R., Hudson, W. R. and Zaniewski, J.: *Modern Pavement Management*, Krieger Publishing Co., 583p., 1994.
- 4) (社) 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会：土木学会コンクリート標準示方書 [舗装編]，168p., 1996.
- 5) International Civil Aviation Organization: *Aerodrome Design and Operations, Aerodromes, Vol.1*, 157p., 1990.
- 6) Horonjeff, R.: *Planning and Design of Airports*, McGraw-Hill Inc., 460p., 1975.
- 7) 運輸省航空局：空港土木施設設計基準，(財) 航空振興財団，1989.
- 8) 笠原 篤，阿部洋一，片岡孝三，荻島 徹：大型航空機の誘導路における走行特性，土木学会論文集，No.420/V-13, pp.239-244, 1990.
- 9) Highway Research Board: *The AASHO Road Test, Report 5, Pavement Research*, Special Report 61E, 352p., 1962.
- 10) Sayers, M. W., Gillespie, T. D. and Paterson, W. D. O.: *Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements*, World Bank Technical Paper, No. 46, The World Bank, 87p., 1986.
- 11) (社) 土木学会空港舗装研究委員会：新東京国際空港の舗装に関する研究，258p., 1985.
- 12) Gerardi, A. and Krueger, D.: The Effect of Runway Roughness on Aircraft Fatigue Life, *Aircraft/Pavement Interaction*, American Society of Civil Engineers, pp.77-95, 1991.
- 13) 運輸省航空局：空港土木工事共通仕様書，(財) 航空振興財団，1993.
- 14) International Civil Aviation Organization: *Pavements, Aerodrome Design Manual, Part 3*, 346p., 1983.
- 15) International Civil Aviation Organization: *Pavement Surface Conditions, Aerodrome Service Manual, Part 2*, 85p., 1984.
- 16) (財) 航空保安協会：グルーピング滑走路の安全性に関する第二次調査研究報告書，101p., 1986.
- 17) Home, W. B.: Status of Runway Slipperiness Research, *Transportation Research Record*, No.624, pp.95-121, 1976.
- 18) 運輸省航空局：空港アスファルト舗装構造設計要領，(財) 航空振興財団，78p., 1990.
- 19) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領，(財) 航空振興財団，121p., 1990.
- 20) 運輸省航空局：空港アスファルト舗装構造設計要領，(財) 航空振興財団，86p., 1982.
- 21) 運輸省航空局：空港コンクリート舗装構造設計要領，(財) 航空振興財団，105p., 1977.
- 22) 林 洋介，佐藤勝久：地盤の不同沈下による空港舗装の破損，第19回土質工学研究発表会講演集，pp.1489-1490, 1984.
- 23) 早田修一，八谷好高：地盤の不同沈下を考慮した空港コンクリート舗装の構造設計，土木学会論文集，No.451/V-17, pp.313-322, 1992.
- 24) International Civil Aviation Organization: *Strength of Pavements, Aerodrome Manual, Part 4*, 1960.
- 25) 竹下春見，岩間 滋：道路舗装の設計，オーム社，254p., 1960.
- 26) (社) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，324p., 1993.
- 27) Yoder, E. J. and Witzczak, M. W.: *Principles of Pavement Design, Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc., 711p., 1975.
- 28) Hachiya, Y., Umeno, S., Sato, K. and Sugimura, M.: Influence of Aircraft Loading to Surface Characteristics of Airport Pavements in Japan, *Mini-Workshop on Paving in Cold Areas, Canada/Japan Science and Technology Consultations, Vol.1*, pp.209-240, 1993.
- 29) Rada, G. R. and Witzczak, N. W.: Aircraft Traffic Mix Analysis Damage Factors and Coefficients, *Aircraft/Pavement Interaction*, pp.1-20, 1991.
- 30) 阿部洋一，宮下盛雄，笠原 篤：大型航空機による空港舗装の挙動，土木学会論文集，No.375/V-5, pp.139-147, 1986.
- 31) Yang, N. C.: *Design of Functional Pavements*, McGraw-Hill, Inc., 467p., 1972.
- 32) 阿部洋一，古財武久：滑走路舗装の経年変化と材料特性，石油学会誌，第28巻，第6号，pp.445-454, 1985.
- 33) Cedergren, H. R.: *Drainage of Highway and Airfield Pavements*, John Wiley & Sons, Inc., 285p., 1974.
- 34) American Association of State Highway and Transportation Officials: *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, 1993.
- 35) Ahlvin, R. G.: Flexible Pavement Design Criteria, *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, Vol.88, No. AT1, pp.15-33, 1962.
- 36) Pereira, A. T.: *Procedures for Development of CBR Design Curves*, Waterways Experiment Station, S-77-1, 57p., 1977.
- 37) Packard, R. G.: *Design of Concrete Airport Pavement*, Portland Cement Association, EB050.03P, 61p., 1973.
- 38) Sato, R., Hachiya, Y. and Kawakami, A.: Development of New Design Method for Control of Cracking in Continuously Reinforced Concrete Pavement, *4th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, pp.431-443, 1989.
- 39) Abe, Y., Kameta, S., Sato, R. and Hachiya, Y.: A New Design

- Approach for Control of Cracking in Continuously Reinforced Concrete Pavements, *2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements*, pp.283-296, 1990.
- 40) 福手 勤, 佐藤勝久, 犬飼晴雄: 下面びわれを許すプレストレスコンクリート版の空港舗装への適用性, 土木学会論文報告集, No.343, pp.119-207, 1984.
- 41) 運輸省航空局: 空港舗装補修要領 (案), 95p., 1984.
- 42) U. S. Army Engineers, Waterways Experimental Station: *Condition Survey Procedures*, 49p., 1985.
- 43) Federal Aviation Administration: *Measurement, Construction, and Maintenance of Skid-Resistant Airport Pavement Surfaces*, AC150/5320-12B, 1991.
- 44) 八谷好高, 梅野修一, 藤倉豊吉: 空港滑走路のすべり抵抗性, 土木学会, 舗装工学論文集, 第1巻, pp.159-166, 1996.
- 45) 佐藤勝久, 福手 勤: ダイナフレクトによる空港アスファルト舗装強度評価とかさ上げ厚設計, 土木学会論文報告集, No.303, pp.109-118, 1980.
- 46) 八谷好高, 野田 工: 空港アスファルト舗装の構造評価の実際, 土木学会第50回年次学術講演会講演集第5部, pp.582-583, 1995.
- 47) Hachiya, Y. and Sato, K.: Nondestructive Evaluation Method of Concrete Pavement by FWD, 土木学会論文集, No.420/V-13, pp.303-309, 1990.
- 48) Hachiya, Y., Sato, K. and Kawakami, A.: Thickness Design of Asphalt Overlays on Concrete Pavement, *7th International Conference on Design, Construction and Performance of Asphalt Pavements*, Vol. 1, pp.61-72, 1992.
- 49) Federal Aviation Administration: *Airport Pavement Design and Evaluation*, FAA Advisory Circular, AC150/5230-6C, 159p., 1978.
- 50) 早田修一, 八谷好高, 佐藤勝久: コンクリートオーバーレイにおける付着工法の改善, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.323-331, 1992.
- 51) Abe, Y., Kameta, S., Sato, R. and Hachiya, Y.: An Numerical Investigation on Stresses at Interface between Overlay Concrete and Existing Pavement Concrete, *XXth World Congress, Seminar on Airfield Pavements*, pp.78-91, 1995.
- 52) 八谷好高, 市川常憲: 半たわみ性材料によるコンクリート舗装の急速補修, 土木学会論文集, No. 550/V-33, pp.185-194, 1996.
- 53) Sato, K., Fukute, T. and Inukai, H.: Some New Construction Methods for Prestressed Concrete Airport Pavements, *2nd International Conference on Concrete Pavement Design*, pp.149-159, 1981.
- 54) 八谷好高, 佐藤勝久, 犬飼晴雄: 沈下したプレストレスコンクリート舗装版のリフトアップ工法の開発, 土木学会論文集, No.421/VI-13, pp.145-154, 1990.
- 55) Hudson, W.R. and Kennedy, T.W.: Parameters of Rational Airfield Pavement Design System, *Transportation Engineering Journal of American Society of Civil Engineers*, Vol. 99, No. TE2, pp.235-253, 1973.
- 56) 阿部洋一, 室田篤利: 空港舗装工事の管理基準とその体系化について, 土木学会論文集, No.360/V-3, pp.147-154, 1985.

(1997. 3.18受付)

CURRENT AIRPORT PAVEMENT TECHNOLOGY AND ITS SYSTEMATIZATION

Yoichi ABE and Yoshitaka HACHIYA

Development of airport pavement system that deals with activities from design to rehabilitation successively is summarized, focusing on the current system in Japan. First, as functions required for airport pavements, both riding safety and structural capacity are described in detail ; that is, evenness and skid resistance of the pavement surface in the former, and load carrying capacity in the latter. Then, the system of airport pavement design is argued in addition to loading and environmental conditions. The methods to evaluate the pavement conditions on required functions are also discussed. Finally, the rehabilitation strategies in both asphalt and concrete pavements are described.