

地上走行時の超大型航空機荷重に対するライフサイクルコストを 考慮した空港舗装の設計・補修に関する研究

国土技術政策総合研究所空港研究部空港施設研究室
航空局飛行場部建設課
新東京国際空港公団空港計画室
中央大学理工学部土木工学科
エアバス・ジャパン株式会社

1. はじめに

空港舗装施設は従来より航空機の静止状態を対象として整備されてきている。しかし、空港用地の地盤沈下や航空機荷重の繰返し載荷等に起因する舗装変状が進行すると、その上を航空機が高速走行するときには静止時よりもはるかに大きな荷重が加わることが考えられる。また、航空機制動時ならびに曲線走行時においては、過大な荷重が鉛直方向のみならず水平方向にも加わるほか、着陸時においてもきわめて大きな衝撃荷重が載荷される。

このような航空機走行時の動的荷重により舗装が受けるダメージは、現在開発中で2005年就航予定の超大型航空機が導入されることによりますます大きくなることが想定される。このため、空港舗装の抜本的な構造強化が必要となることは明らかであり、航空機地上走行時の運動特性の解明、航空機走行時に舗装構造に加えられる荷重特性の解明、そしてこの荷重に対する舗装構造の動的力学特性の解明が急務となっている。

これに加えて、変状の生じた空港舗装上を航空機が走行する場合には、航空機の振動が大きくなり、パイロットの操縦性は大きな影響を受けるので、地上走行時における航空機事故の発生も懸念される。これを防止するためには、舗装変状がパイロットの操縦性に及ぼす影響を解明することが必要になる。

そのため、航空機走行の安全性を確保するための空港舗装施設の構造設計ならびに補修規準の策定方法として、以下に示す3項目について研究している。

GPS (Global Positioning System) を使用した舗装縦断プロファイルの高精度高速計測方法

空港舗装走行時における航空機パイロットの操縦性ならびに航空機応答特性
航空機の静止・走行時における空港舗装の応答と舗装構造へ及ぼす影響

2. 空港舗装縦断プロファイルの高速計測方法

2.1 概要

わが国では、現在97の公共用飛行場により国内航空交通のネットワークが図られ、空港における旅客利用者数、貨物取扱量、そして飛行機の離発着回数等は年々増加の一途をた

どり、その需要は今日でも予想以上のペースで増大している。まさに航空輸送は社会経済にとって欠くことのできない重要な交通機関となっている。

舗装の縦断プロファイルの変化は車両の乗り心地や航空機の操縦性に多大な影響を及ぼすことから、この測定方法が多くの機関により開発されている。各々の装置に特有な評価指標も数多くあり、これら多くの指標を共通化するための努力が世界銀行が中心になって行われ、その結果としてIRI (International Roughness Index) が提案された。このIRIを算出するためには、縦断プロファイルの測定が不可欠である。しかし、縦断方向のプロファイルを水準測量により求めることは交通の妨げとなるばかりでなく、多くの人手と時間、費用を要する。そのために、効率よくかつ高精度で縦断プロファイルを測定する装置の開発が望まれていた。

ここで使用したプロフィロメータは相対的に廉価で、車両が通常道路を走行する程度の速度で測定可能であり、多量のデータを迅速に処理できる非接触型プロフィロメータである。縦断プロファイルの測定間隔はマクロテクスチャレベルの解析にも利用できるように1mm間隔の計測が可能であり、「逐次二点真直度測定法」の使用により、間隔が1mmで精度が ± 1.2 mmの測定値を得ることができる。この装置により取得されたデータは、舗装の幾何学的特性を評価することのための基礎的な素材として使うことができ、種々の問題を解決するための広範囲にわたる取り組みが可能となった。

2.2 供用中の空港におけるプロファイル測定

2.2.1 測定方法ならびに結果

上記の高速・高精度プロフィロメータを用いて、供用中の空港滑走路においてプロファイル測定を実施した。

具体的には、滑走路中心と、そこから左右に、1.92m、4.65m、5.50m離れた7つの測線を設け、南側を起点(0m)とし、北側を終点(3,000m)とした(図-1)。この7測線は、B747およびB767の脚配置をもとに決定したものである。

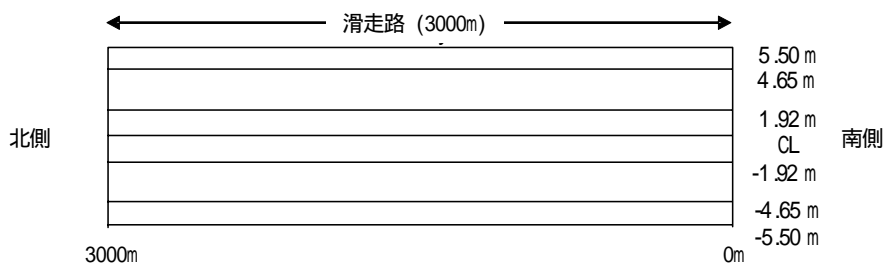


図-1 滑走路における測線位置

測定例として、測線 について、滑走路端部の100m区間のものを図-2に示す(プロファイルの往復の測定結果)。往復の測定結果はおおよそ一致していると思われる。

縦断プロファイルの測定は、従来より3mプロフィロメータを用いて1.5m間隔で行われている。これと今回開発した測定装置による結果、すなわち、絶対縦断プロファイルと従来型の計測器によるプロファイルの比較を行った(図-3)。従来型プロファイルの長波長成分の誤差が次第に累積していくのがわかる。

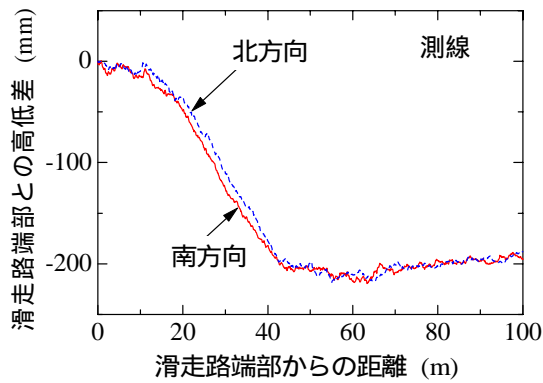


図-2 滑走路端部におけるプロファイル測定値の比較

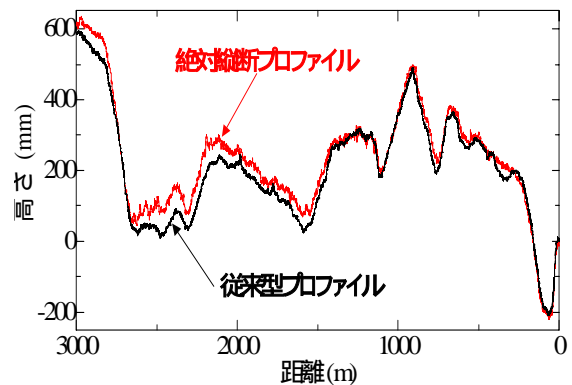


図-3 絶対縦断プロファイルと従来型プロファイルの比較

2.2.2 縦断プロファイルの評価

測定結果の評価として、IRIによるものとスペクトル解析によるものの2種類を実施した。IRIは世界各国において舗装のサービス性能を乗り心地で評価する際の指標として用いられており、クォーターカーを一定速度で舗装上を走行させたときに車両が受ける上下方向の運動変位の累積値と走行距離との比で定義したものである。今回の測定結果から算出したIRIを滑走路全長に渡って示したものが図-4である。両起点より500m地点周辺が大きくなっていることがわかる。

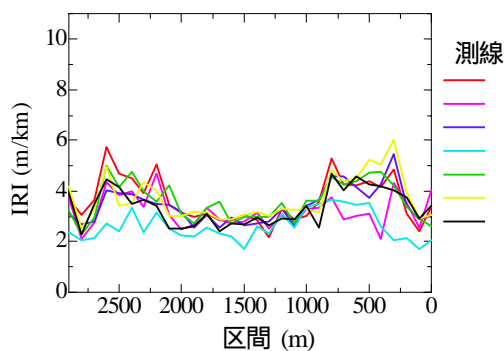


図-4 各測線におけるIRI

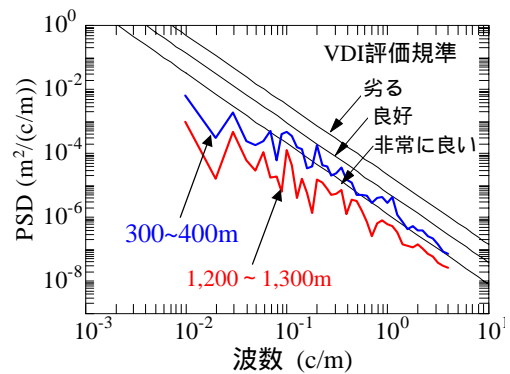


図-5 パワースペクトル密度による縦断プロファイルの評価

スペクトル解析は、連続不規則変動をそれぞれの波長成分に分解して各波長成分に凹凸の強さを示したものである。ここでは区間や測線間の比較をするための指標として、ドイツ技術者協会（Verien Deutscher Ingenieure）の道路評価規準を用いた。図-5はIRIで大きな値を示した地点（300～400m）と小さな値を示した地点（1200～1300m）を比較したものである。IRIで大きな値を示した地点のほうがパワースペクトル密度（PSD）も全体的に大きな傾向を示している。

3. 航空機パイロットの操縦性ならびに航空機応答特性

3.1 概要

航空機に対して安全な走行面を提供するという空港舗装の機能を確認するために、その表面状態については定期的に調査を行う必要がある。しかし、空港舗装の利用者たる航空機の乗員・乗客の立場からの機能評価については現状では明確になっていない。そのため、乗員・乗客のうちで航空機の地上走行に直接関わるパイロットの空港舗装に対する主観的評価を行ない、乗り心地および安全性に影響する表面性状について調査した。その結果に基づき、航空機の地上走行挙動に影響を与える滑走路の平坦性評価を汎用シミュレーションソフトAPRAS（Aircraft Pavement Roughness assessment software）および路面プロファイルモデルを用いて理論的に実施し、航空機の応答特性に基づく滑走路の平坦性評価値についてまとめた。

3.2 空港舗装の表面性状に関するパイロットの意識調査

3.2.1 アンケート調査

主に国内空港を利用しているパイロットに対して、航空機を舗装上に走行させている際に感じる表面性状に関する事項についてアンケート調査を実施した。その結果、62名から回答を得ることができた。調査項目は、航空機の乗り心地に関する評価と走行安全性に関する評価であり、それぞれ、滑走路、誘導路、エプロン別に調査した。

これらについては、舗装表面における8項目の影響因子（段差、わだち掘れ、波状路面、舗装のひび割れによる破片、走行方向の勾配、湿潤路面、雪氷路面、航空灯火の凹凸）に対する影響程度について、良し悪しの程度を5段階で評価してもらった。評価の回答としては、影響なし、あまりない、普通、ややある、大いに影響の5段階である。

3.2.2 調査結果

表面性状を支配する8項目の影響因子について、舗装施設別の影響程度を「影響なし」1点～「大いに影響」5点とし、数値化によって比較した結果を図-6、図-7に示す。

乗り心地に関しては「波状路面」（3.88）が全ての舗装施設において最も影響が強く現れており、次いで「段差」（3.63）、「航空灯火の凹凸」（3.41）であった。舗装施設別では、滑走路・誘導路に比して、エプロンでの影響は小さい。

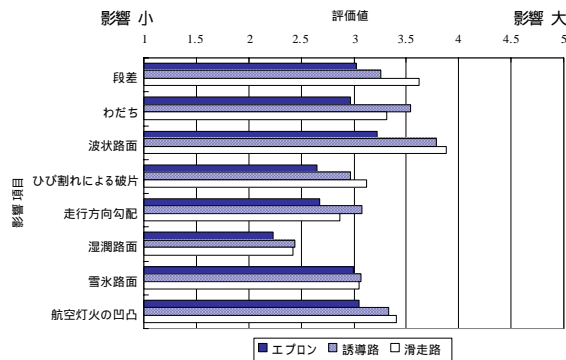


図-6 乗り心地評価（舗装施設別）

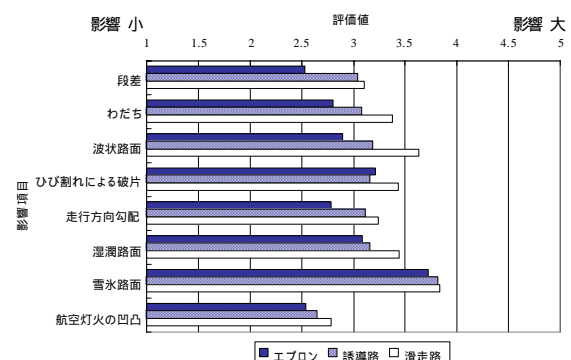


図-7 安全性評価（舗装施設別）

一方、安全性について検討すると、「雪氷路面」(3.83)が全ての舗装施設において最も影響が強く現れており、次いで「波状路面」(3.63)、「ひび割れによる破片」(3.44)である。舗装施設ごとの影響の違いでは、乗り心地同様、エプロンにおいては、誘導路・滑走路に比べ「ひび割れによる破片」以外は、全体的に影響の程度が低く、誘導路よりも滑走路で表面性状の影響が大きいことがわかった。

3.3 航空機の走行シュミレーションによる舗装プロファイル評価

これまでの調査結果に基づき、表面性状が航空機の地上走行挙動に及ぼす影響を理論的に解明することを目的として、航空機の運動モデルの検討を行った。検討に際しては、汎用性の高い既存のシミュレーションソフトであるAPRasを使用し、離着陸時、滑走時において路面が航空機の乗り心地に及ぼす影響についてシミュレーションを行った。

APRasとは、滑走路面のプロファイルデータを入力することにより、離着陸時の航空機のパイロット座席における上下方向加速度 (PSA : Pilot Station Acceleration) と重心位置における上下方向加速度 (CGA : Center of Gravity Acceleration) を算出するシミュレーションソフトウェアである。安全性・快適性を評価するには、パイロットの座席における上下方向加速度 (PSA) が重要となり、値が0.4g以内である時に快適であると評価できる。

これまでの調査により、舗装表面の特定周波数 (波長) が航空機の乗員の乗り心地に関係のあることがわかった。ここでは、波状特性を加味したプロファイルを作成し、APRasを用いてPSA, CGA, 走行速度, 平坦性の相関について分析を行った。

図-8に航空機の走行挙動と舗装波状特性に着目したシミュレーション結果を示す (パイロット位置)。20knots定速走行時の図-8a)より、定速走行時では航空機に作用する上下方向加速度に関して、20m以下の波長の影響が大きく、10m付近にそのピークが見られ、振幅の増加とともにその値は増加する。これに対して、図-8b), c) (離着陸時) から、離着陸時は航空機の走行速度が大きいため、PSAでは50m付近や70m以上の長波長に関しても値が大きくなることがわかる。このことは、50mの波長が0.02c/mの空間周波数に相当することから、パイロットの意識調査で示された結果と合致している。また、定速走行時の加速度波形にピークが3箇所見られるのは、航空機モデルの共振周波数に対応しているためと思われる。走行速度を考慮するとこれらはおおむね1.5Hz以下となっている。

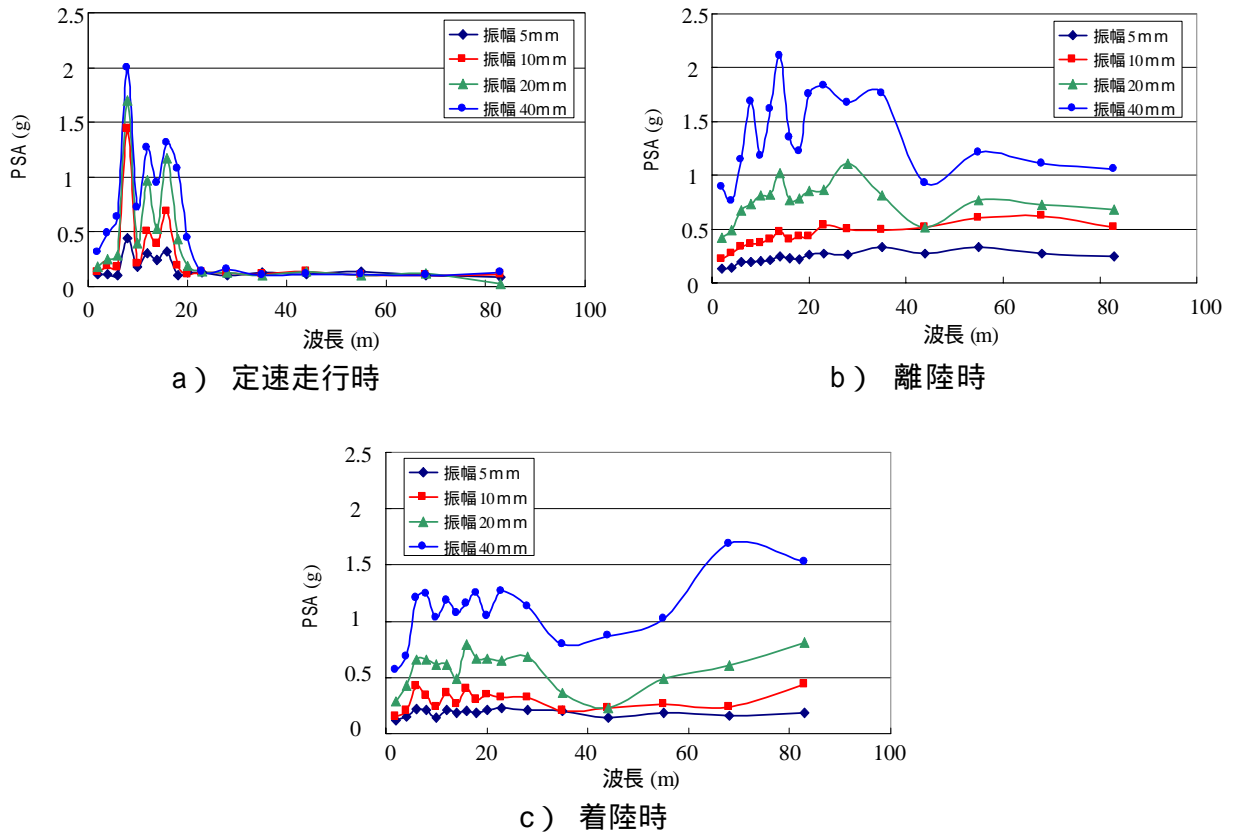


図-8 航空機の応答特性

以上で得られた振幅，波長と航空機の上下方向加速度の関係から，乗り心地の観点から舗装の平坦性評価基準を求めることができる．APRAsでは，乗員に作用する上下加速度の限界値を $\pm 0.4g$ に設定しているため，ここでもその値を使用して平坦性の新しい評価基準を検討することにする．図-9は，限界値に達したときの振幅と波長を表したものであるが，図より離陸時においては広範囲の波長域にわたって12~16mm程度であること，定速走行時においては5~16mの波長域で8mm程度であることがわかる．

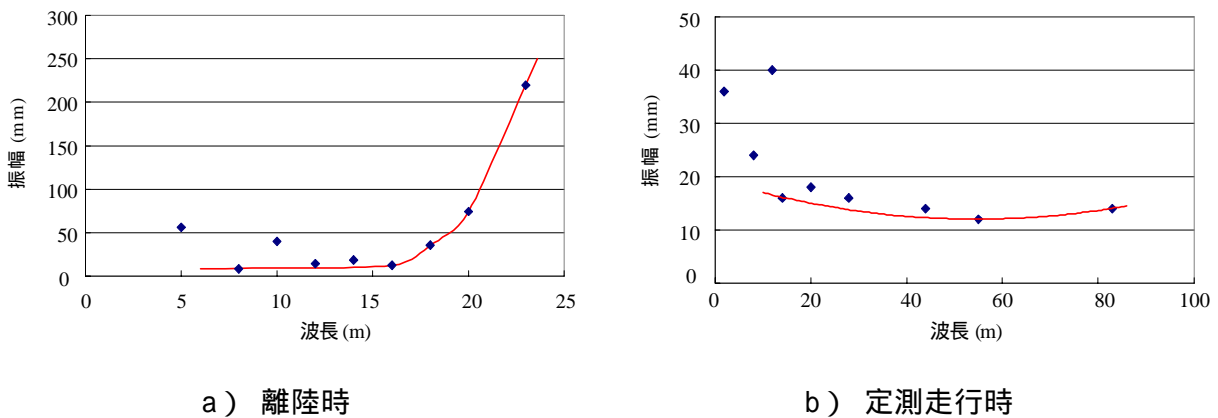


図-9 航空機応答から見た舗装平坦性評価

4. 航空機荷重に対する空港舗装の応答と舗装構造へ及ぼす影響

4.1 概要

航空機が変状のある舗装上を高速走行するとき、制動・曲線走行・着陸時には、空港舗装は静止時よりも大きな荷重を受けることが懸念される。そのため、航空機地上走行時の運動特性の解明、航空機走行時に舗装構造に加えらるる荷重特性の解明、そしてこの荷重に対する舗装構造の動的力学特性の解明が急務となっている。

このような課題を解決するために、移動荷重に対する空港舗装の応答解析、静的ならびに動的解析による空港舗装構造の評価について研究を行っている。

4.2 移動荷重に対する空港舗装の応答解析

航空機が走行する場合の舗装の動的応答について解析した。具体的には、移動する航空機タイヤの作用する要素と節点を効率的に検出し、舗装の挙動を解析できる3次元FEMプログラムを開発している。タイヤ接地圧は表面に鉛直に分布する荷重として処理している。8節点アイソパラメトリック要素を用いて滑走路をモデル化している。本プログラムの特徴は複雑な荷重条件と自由度が70,000以上になる大きな問題を、PCを用いて効率的に計算できることである。このプログラムを用いて、移動する航空機の輪荷重に対する応答を算出し、移動荷重の速度、アスファルトコンクリート層の厚さ、車輪配置が応答に及ぼす影響について考察した。

空港舗装構造が一定の速度で移動する輪荷重の作用を受けている場合を想定して解析を行った。解析対象区間は長さ20m、幅20m、深さ10mである。幾何学的な対称性を考慮して、図-10のように解析領域の半分を有限要素で離散化して、移動荷重を受ける滑走路の動的解析を行っている。車輪が通過する位置にある要素の長さとは幅は、舗装とタイヤの接地面を長方形で近似した長さとは幅に等しい。解析で考慮した車輪配置は図-11a)に示すような単軸荷重である。解析には8節点ソリッド要素を用いている。解析に使用する全節点数は22,540、全要素数は18,720となる。ここでは、表面たわみおよび図-11b)に記したタイヤ中心位置に沿ったアスファルト要素 E_A における ε_{xx} と ε_{yy} 、脚中心位置すなわちモデルの対称軸に沿った路床要素 E_S の ε_{zz} を求めた。

等速度 $V=36\text{km/h}$ で単軸荷重が移動するとき、解析領域中央の荷重図心点での表面たわみ、AC層要素 E_A と路床要素 E_S のひずみ応答履歴は図-12のようになる。アスファルト層下面の荷重走行方向のひずみ ε_{xx} は引張と圧縮の状態が発生する。最大引張ひずみは 248×10^{-6} 、圧縮ひずみは最大引張ひずみが発生する前後で起こり、最大圧縮ひずみは 43×10^{-6} である。これと直交する水平方向のひずみ ε_{yy} は、引張ひずみだけが発生し、荷重の中心点直下で最大で、その値は 170×10^{-6} となる。路床上面の鉛直方向の垂直ひずみ ε_{zz} は、移動荷重により常に圧縮ひずみが生じ、移動荷重の中心点が直上にあるとき圧縮ひずみは最大になり、その値は 287×10^{-6} である。

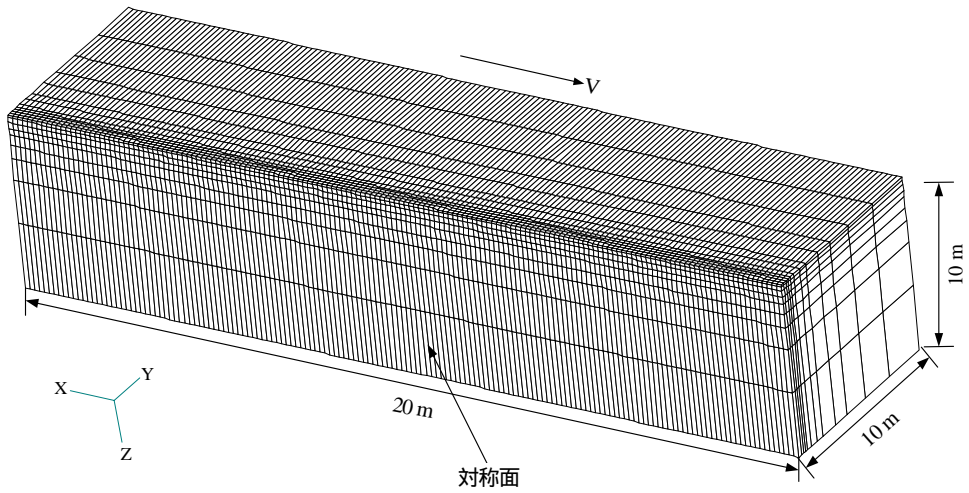


図-10 空港舗装の3次元有限要素分割

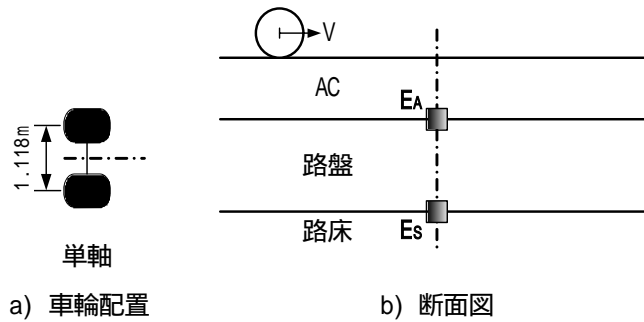


図-11 車輪配置と着目した要素の位置

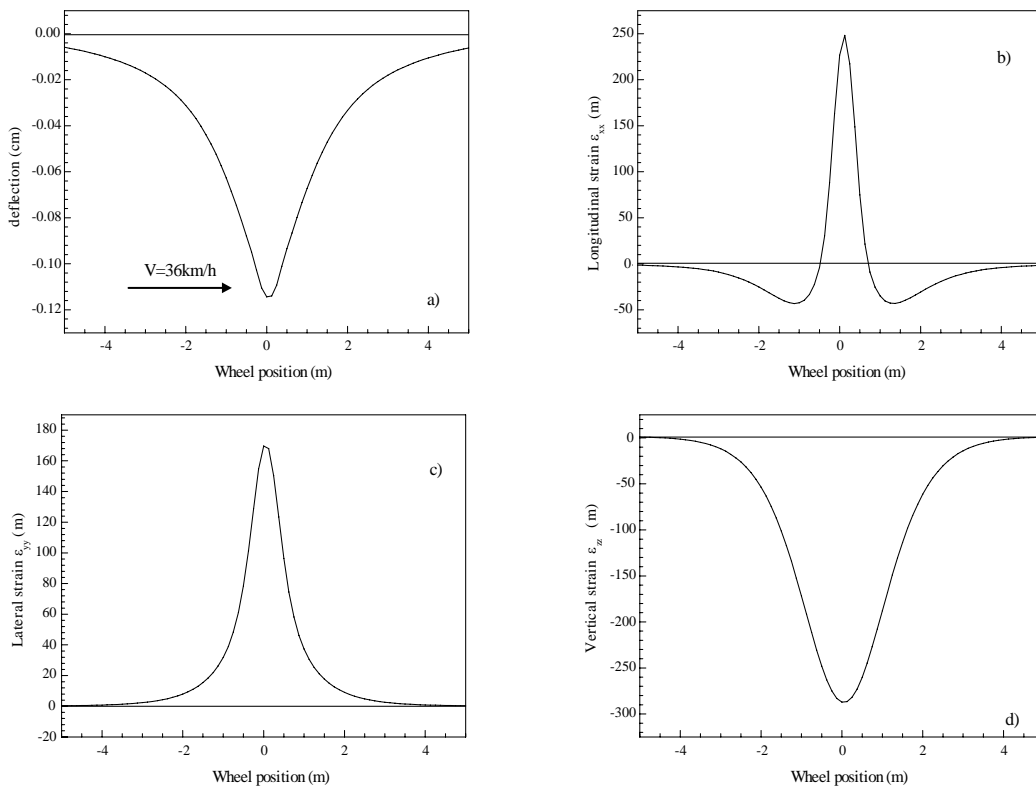


図-12 単軸荷重による着目点の表面たわみとひずみの変化

a) たわみ; b) AC要素E_Aのひずみ ϵ_{xx} ; c) AC要素E_Aのひずみ ϵ_{yy} ; d) 路床要素E_Sのひずみ ϵ_{zz}

4.3 静的ならびに動的解析による空港舗装構造の評価

載荷試験，解析方法の違いによる滑走路・誘導路走行時の表・基層，上層路盤，路床の評価について，次の4方法による違いを調べた．

走行載荷試験の走行荷重逆解析弾性係数を用いた走行荷重対応解析

FWD載荷試験の動的逆解析弾性係数を用いた走行荷重対応解析

FWD載荷試験の静的逆解析弾性係数を用いた静止荷重対応解析

静的載荷試験の静的逆解析弾性係数を用いた静止荷重対応解析

アスファルト舗装構造の理論的構造設計における研究成果を総合して定めた破壊規準により，載荷試験，解析方法による構造評価の違いに関して比較を行う．載荷速度としては，空港舗装を対象とした米国の設計法で用いられている周波数10Hzを使用している．

滑走路走行時に対応した破壊回数を図-13，図-14，図-15，表-1に示す．

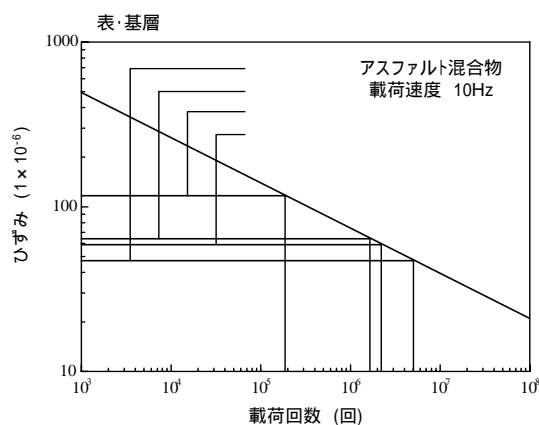


図-13 表・基層の破壊回数

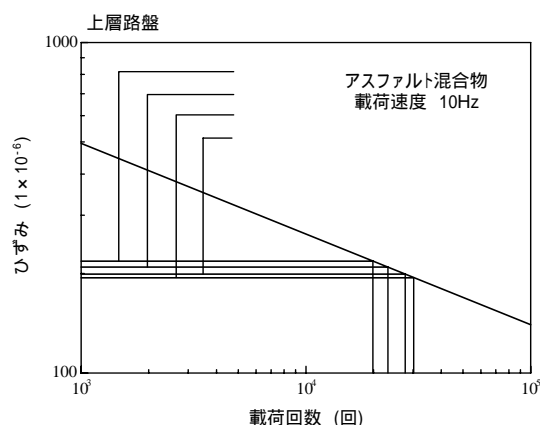


図-14 上層路盤の破壊回数

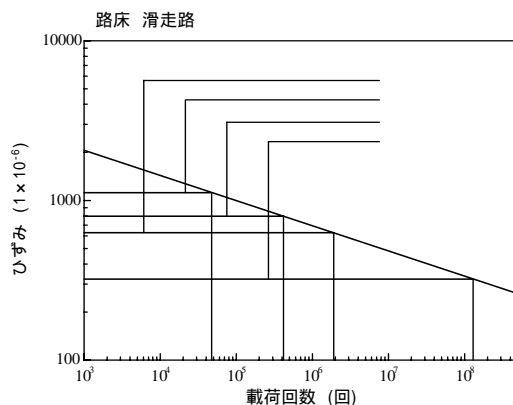


図-15 路床の破壊回数

表-1 滑走路の破壊回数

表・基層	5.0×10^6	1.5×10^6	2.0×10^5	2.0×10^6
上層路盤	2.0×10^4	2.2×10^4	3.0×10^4	2.8×10^4
路床	2.0×10^6	5.0×10^4	4.0×10^5	1.2×10^8

その結果、～ のいずれの方法においても、路床よりは上層路盤において少ない載荷回数で破壊が生ずること、すなわち、ひび割れが卓越することがわかる。また、評価方法の違いとして、FWDを対象に考えると、動的逆解析を行う場合が厳しい評価となることがわかる。また、走行載荷と静的載荷をみれば、走行載荷のほうが厳しい評価となることもわかる。

5. 結論

本研究は次のようにまとめられる。

空港舗装縦断プロファイルの高精度高速計測方法

舗装縦断プロファイル測定時の問題解決、多量データの迅速処理を目標に全自動化を計った測定装置を開発した。また、縦断プロファイルの測定間隔はマクロテクスチャレベルの解析にも利用できるように1mm間隔の計測を可能とした。さらに、プロファイル測定において、逐次二点真直度測定法の原理を採用し、その適用性を確認した。

航空機パイロットの操縦性ならびに航空機応答特性

航空機の地上走行挙動に着目した空港舗装に対するパイロットの主観的評価については、半数近くのパイロットが乗り心地・安全性に対する影響を感じていること、舗装表面からの主要影響因子は乗り心地と走行安全性で異なっていることがわかった。

航空機荷重に対する空港舗装の応答と舗装構造へ及ぼす影響

空港舗装に対する載荷試験により動的解析と静的解析の相違点ならびに構造評価の違いについて検証した。また、三次元有限要素法による空港舗装構造の荷重応答の解析方法ならびに逆解析方法について研究するとともに、移動荷重に対する舗装構造の応答についても検討した。

6. おわりに

本研究では、航空機が空港舗装上を走行するときに、航空機が舗装の表面形状から受ける影響、反対に航空機の静止、走行の違いによる舗装への影響についてまとめた。今後は、データの蓄積等、研究の熟度を高めることにより、空港舗装施設の構造設計ならびに補修に関する規準を策定することとしたい。

なお、本研究の成果には運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」による共同研究のものも一部含まれている。運輸施設整備事業団ならびに関係各位に謝意を表する。