

# 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

八谷好高・坪川将丈・江崎 徹

国土交通省航空局飛行場部建設課

菅野谷慎一

関西国際空港株式会社工務部工事企画調整グループ

吉見昌宏

## 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载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。特に、超大型航空機の導入も予定されていることから、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、本研究においては、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2項目について検討している。

- ① 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に基づく空港舗装平坦性の基準化
- ② 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を考慮した空港舗装構造の設計・評価法の基準化

以下では、それぞれについての概要を紹介する。

## 2. 航空機パイロットの操縦性ならびに航空機応答特性に基づく空港舗装の平坦性の基準化

### 2.1 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。

## 2.2 空港舗装の表面性状に関するパイロットの意識調査

### 2.2.1 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。

### 2.2.2 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-1、図-2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。

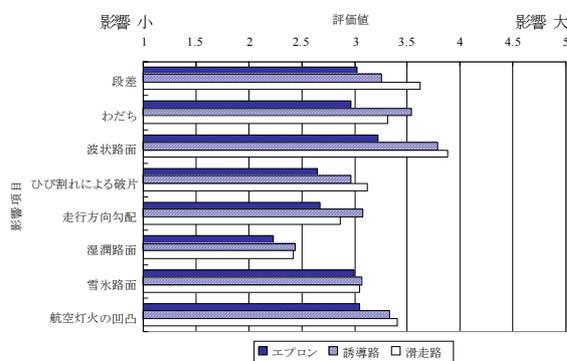


図-1 乗り心地評価 (舗装施設別)

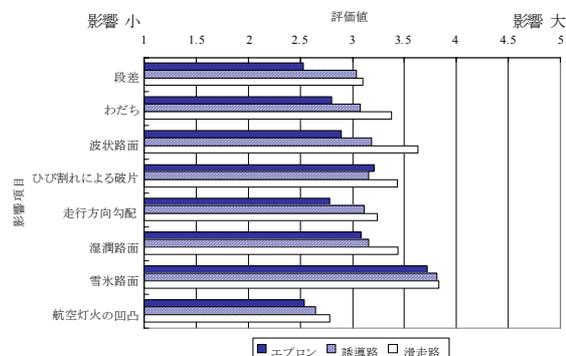


図-2 安全性評価 (舗装施設別)

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。

### 2.3 航空機の走行シミュ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。

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-3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。

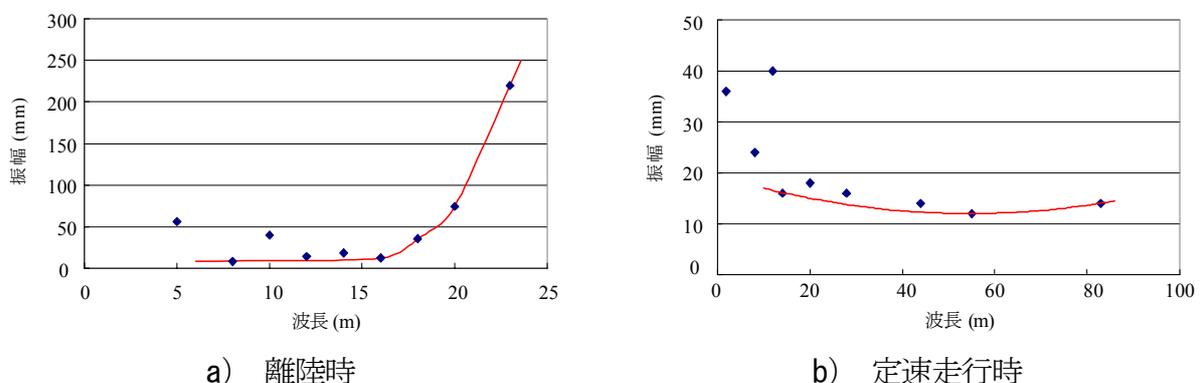


図-3 航空機応答から見た舗装平坦性評価

### 3. 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を考慮した空港舗装構造の設計・評価法の基準化

#### 3.1 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。

以下では、まず、最新の空港舗装構造設計法を紹介した後、移動、衝撃といった、荷重が空港舗装に実際に載荷される状況を考慮した舗装構造解析ならびに評価法について取りまとめる。

#### 3.2 最新の空港舗装構造設計法

空港舗装構造の設計法として最近提案されている理論的な方法である、多層弾性理論を用いたものについて、わが国ならびに米国のを以下に紹介する。

##### 3.2.1 わが国の設計法

多層弾性理論を用いた理論的設計法では、航空機荷重が載荷された場合に、路床のひずみとアスファルトコンクリート層の水平ひずみを許容値以下にするように舗装構造が決定される。この設計法は、路盤としての等価値が不明な新しい材料を用いる場合や、より経済的な舗装構造を決定するのに適用可能であり、舗装の設計を合理化することが可能である（図-4）。以下では、空港拡張プロジェクトに使用する場合を想定して、多層弾性理論を用いた設計の考え方を取りまとめた。

滑走路・誘導路の舗装構造を決定するためには、従来の CBR 設計法と同様に、荷重の大きさ（設計航空機荷重）と頻度（設計交通量）が必要であるが、そのうち設計交通量は、既存部分の運用状況を考慮に入れて決定することも可能である。

このほか、多層弾性理論による設計法を採用する場合には、各層の弾性係数と破壊基準が必要となる。

この場合、基準ひずみは、現行の FWD による舗装構造評価法と同様に、CBR 設計法による舗装構造に基づいて決定できる。図-5 は、B747-400 が載荷されている場合に路床上面に発生する鉛直ひずみを多層弾性理論により計算し、繰返し載荷回数に基づいて基準ひずみを決定した場合の例である。

各層弾性係数は、室内試験と現場試験から決定できる。下層路盤に用いる材料の一つとしては、低価格で水硬性が期待できる水硬性スラグも考えられるが、その場合の弾性係数は室内試験による長期材齢時の強度と現場試験における強度の変動を考慮して決定すればよい。セメント安定処理材をアスファルト混合物層の直下に用いると、アスファルト混合

物層に生じるひずみを低減でき、舗装厚を薄くすることが可能となる。図-6 はこのような考え方に従って設計した舗装構造の例である..

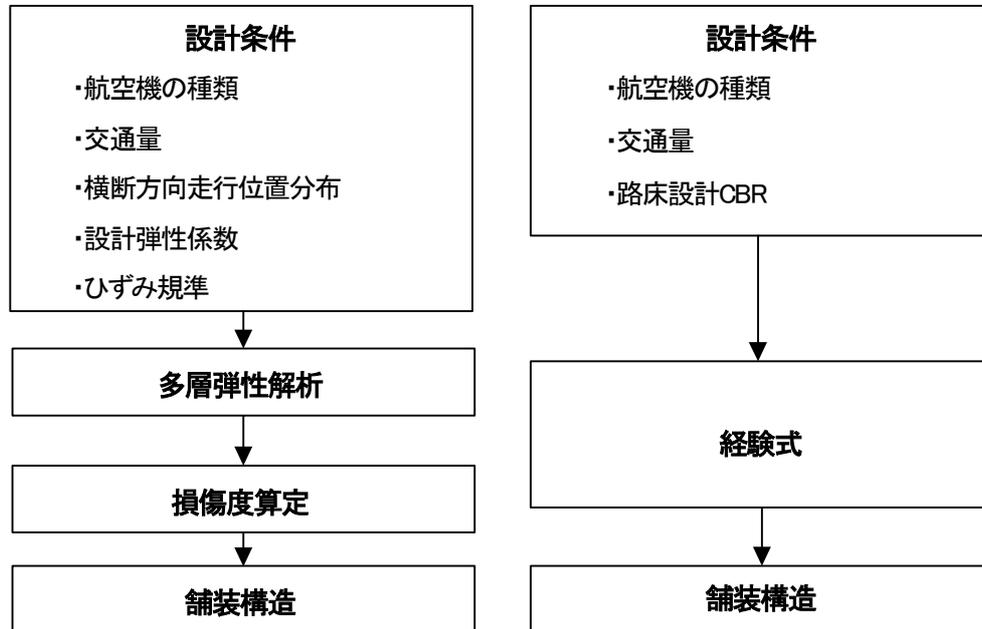


図-4 多層弾性理論による設計法と CBR 法の比較

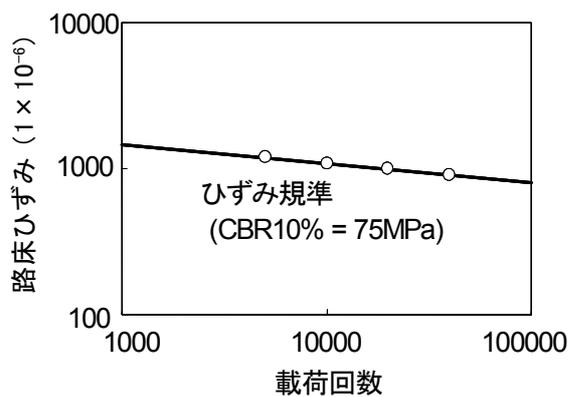


図-5 路床ひずみの規準

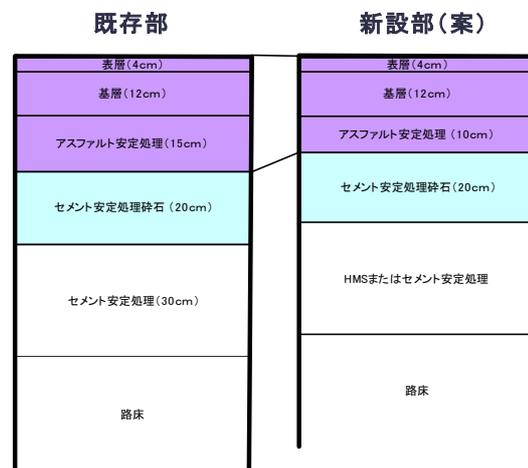


図-6 舗装構造の比較

### 3.2.2 米国の設計法

米国の設計法である、LEDFAA (Layered Elastic Design - FAA) は多層弾性理論による空港舗装構造設計アプリケーションであり、最初のバージョンは1994年にリリースされ、現在のバージョンは1.3である。LEDFAA1.2では、3軸6輪からなる主脚を持つ航空機(B777

等) に対応させたアプリケーションであったが、LEDFAA1.3 では、より複雑な主脚構成の航空機(例えば A380 のように 3 軸 6 輪からなる主脚と 2 軸 4 輪からなる主脚が混在する機種) に対する計算も可能となっている。また、LEDFAA1.2 は Advisory Circular (以下、AC) 150/5320-16 の中で、B777 を想定した舗装の構造設計を行う上での新しい標準設計法として規定され、B777 が利用する空港の建設において、AIP (Airport Improvement Program) からの補助を受ける場合にはこのアプリケーションによる設計が必要とされた。その後、2004 年 5 月の AC150/5320-6D の改訂 (Change3) に伴い、前述の AC150/5320-16 はキャンセルされ、LEDFAA1.3 は B777 だけではなく、全ての航空機を対象とし、AC の第 3 章と第 4 章にある舗装厚設計曲線による設計法の代替的な設計標準ツールとして規定された。

LEDFAA では、空港アスファルト舗装ならびに空港コンクリート舗装の構造設計を対象としており、新規建設ならびにオーバーレイに関する設計が可能である。アプリケーションに用いられている多層弾性理論に関しては、AC150/5320-6D の 7 章に詳細な記載がある。将来、対象とする航空機が増えた場合には LEDFAA で考慮できるように航空機データが追加されるが、AC150/5320-6D の第 3 章と第 4 章に記載のある舗装厚設計曲線図は追加されない予定である。

AC の設計曲線図との対応であるが、AC150/5320-6D に記載のある空港アスファルト舗装の設計曲線は、例えば B747-400 の場合、16 輪 (2 軸 4 輪×4 脚) の影響を考慮した等価単車輪荷重により計算された路床のひずみに基づいている。しかしながら、LEDFAA1.2 では、2 軸 4 輪 (1 脚) に対する計算から路床のひずみを計算し、そのひずみを用いて CDF (Cumulative Damage Factor : 累積損傷度) を計算していた。一方、LEDFAA1.3 では、16 輪全てを考慮して CDF を求めていることから、LEDFAA1.3 で用いられている設計思想と AC の設計曲線は整合している。

路床に生じるひずみ規準について、LEDFAA1.2 では路床の弾性係数により変化するものとしていたが、LEDFAA1.3 では、路床の弾性係数により変化しないものとしている。LEDFAA1.3 で用いられているひずみ規準より、破壊に至るまでのカバレッジは以下のように計算されている。

- ・路床上面の鉛直ひずみについて

$$C = \left( \frac{0.004}{\varepsilon_v} \right)^{8.1} \quad C < 12,100 \text{ の場合}$$

$$C = \left( \frac{0.002428}{\varepsilon_v} \right)^{14.21} \quad C > 12,100 \text{ の場合}$$

ここで、

C : 破壊に至るまでのカバレッジ

$\varepsilon_v$  : 路床上面の鉛直ひずみ

- ・アスファルト層下面の水平ひずみについて

$$\log_{10}(C) = 2.68 - 5 \times \log_{10}(\varepsilon_h) - 2.665 \times \log_{10}(E_A)$$

ここで、

$C$  : 破壊に至るまでのカバレッジ

$E_A$  : アスファルトの弾性係数 (psi)

$\varepsilon_h$  : アスファルト層下面の水平ひずみ

また、前述の CDF は以下のようにして計算されており、CDF が 1 を超えると、残存寿命がないものと定義されている。

$CDF_i$  = ある航空機によるカバレッジ／破壊に至るまでのカバレッジ

$CDF = CDF_1 + CDF_2 + \dots + CDF_N$  (全ての航空機に関する  $CDF_i$  の和)

アプリケーションでは、[図-7](#) に示すように航空機データを設定し（ライブラリから選択することで航空機の諸元は自動的に入力される。離陸回数等の条件は手動入力である。）、[図-8](#) に示すように、仮の舗装構造を設定する。舗装構造としては、各層の材料（ライブラリから選択）、路床を除く各層の層厚、路床の CBR（または路床の弾性係数）を入力する。アスファルト混合物ならびにアスファルト安定処理材の弾性係数は変えることができず、粒状材の弾性係数については、材料種類とその厚さにより自動的に設定される。

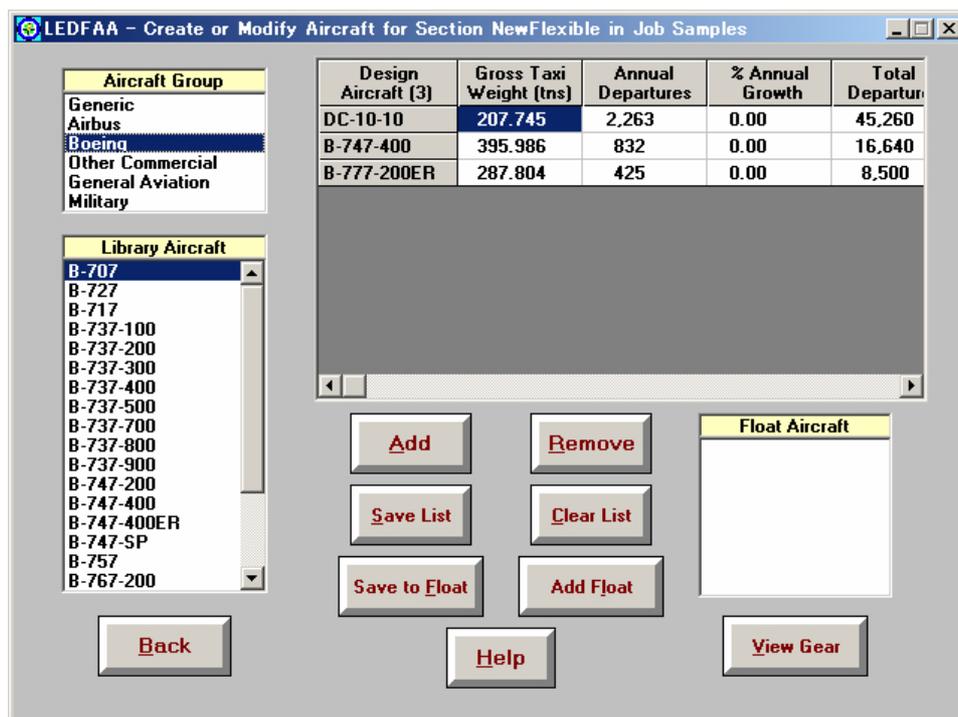


図-7 航空機データ設定画面

設定値を入力した後、厚さを計算したい層（図-8 では「→」印により下層路盤を指定している）を指定して「Design Structure」ボタンを押すと、設定した条件において、指定した層に必要な厚さが自動的に計算されるようになっている。また、「Life」ボタンを押すと、設定した舗装構造の残存寿命が計算される。

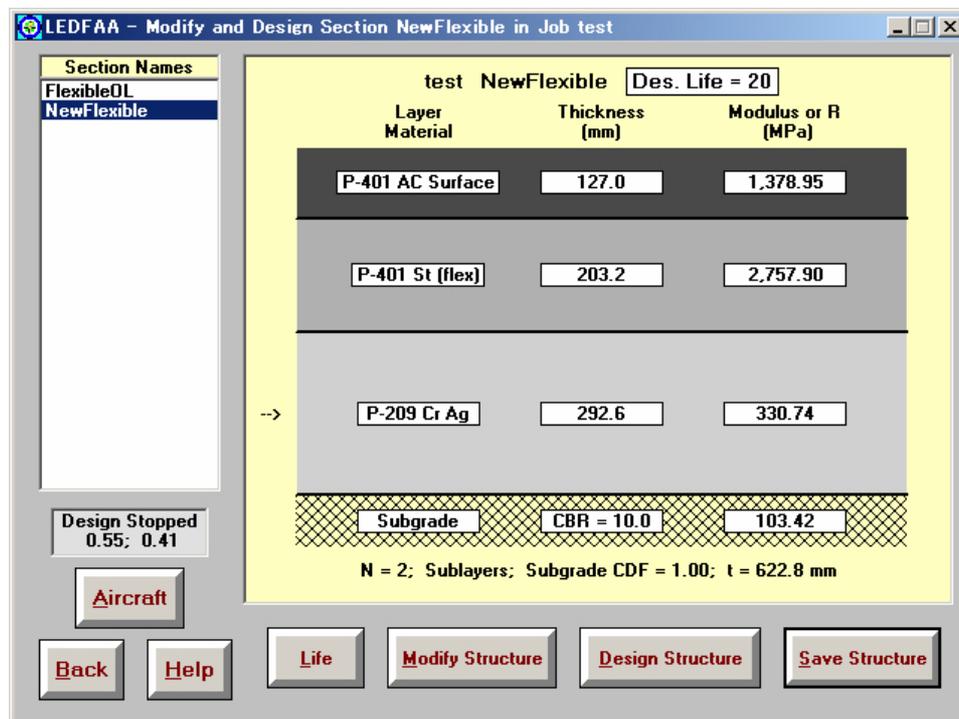


図-8 舗装構造条件設定画面

### 3.3 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-9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や幅は、舗装とタイヤの接地面を長方形で近似した長さや幅に等しい。解析で考慮した車輪配置は図-10a)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-10b) 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  $\varepsilon_{xx}$  と  $\varepsilon_{yy}$ 、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  $\varepsilon_{zz}$  を求めた。

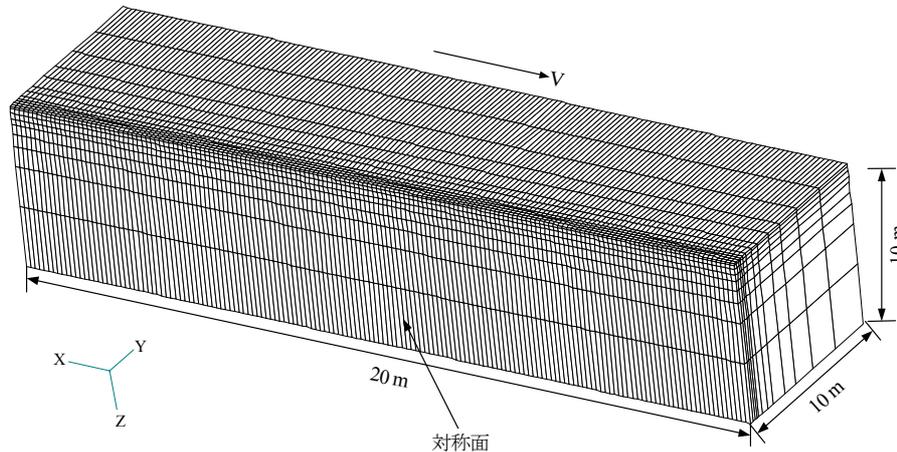


図-9 空港舗装の 3次元有限要素分割

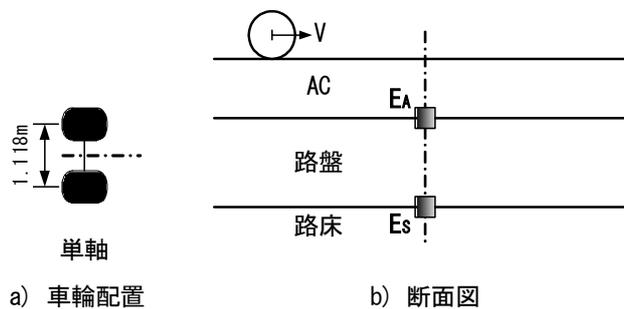


図-10 車輪配置と着目した要素の位置

### 3.4 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。

- ① 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
- ② 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
- ③ 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
- ④ 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。

大型航空機が高頻度で使用するわが国の代表的な空港を設計対象にして構造を決定した滑走路舗装を例にとって計算した破壊回数を表-1に示す。

その結果、①～④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载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、走行载荷と静的载荷をみれば、走行载荷のほうが厳しい評価となることもわかる。

表-1 滑走路の破壊回数

	①	②	③	④
表・基層	$5.0 \times 10^6$	$1.5 \times 10^6$	$2.0 \times 10^5$	$2.0 \times 10^6$
上層路盤	$2.0 \times 10^4$	$2.2 \times 10^4$	$3.0 \times 10^4$	$2.8 \times 10^4$
路床	$2.0 \times 10^6$	$5.0 \times 10^4$	$4.0 \times 10^5$	$1.2 \times 10^8$

#### 4. 結論

本研究は次のようにまとめられる。

##### ① 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。

##### ② 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

空港舗装に対する载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明らかにした。

#### 5. 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、空港舗装施設の設計ならびに補修に関する基準化を図ることとしたい。