

## 1. はじめに

平成20年7月に空港舗装設計要領（以下、現要領）<sup>1)</sup>が改定され、空港舗装の設計方法は、従来の仕様規定型の設計法から性能規定型の設計法へ移行した。

空港舗装構造設計要領（以下、旧要領）<sup>2)</sup>は仕様規定型の設計法であり、経験的設計法が中心であった。経験的設計法は、特別な条件の場合を除けば、設計荷重区分と設計反復作用回数の区分、そして地盤条件に応じて舗装厚を提示していた。

一方、現要領は性能規定型の設計法であり、弾性理論にもとづく設計法である理論的設計法を中心としている。現要領は、空港舗装に求められる性能を定め、施設が設計供用期間にわたって性能を満足するように照査を行う設計法である。求められる性能には、荷重支持性能、走行安全性能そして表層の耐久性能などがある。

理論的設計法が標準的な設計法の一つとなったが、これまでの経験の蓄積から、検討した舗装構造に対する安全性が確保されるとわかっている場合には、経験的設計法による舗装も求める性能を備えているとみなすことができる。

本検討では、理論的設計法を用いて検討を進めるにあたって、荷重支持性能について着目した。荷重支持性能の確認には、路床の支持力の照査、アスファルト混合物層の疲労ひび割れに対する照査、コンクリート版の曲げ疲労破壊に対する照査がある。

設計にあたっては、各種の航空機が供用期間にわたって舗装上を走行する回数が、舗装を破壊に至らしめる走行回数よりも少なくなるように舗装厚を設計する。すなわち、累積疲労度（= 走行回数/破壊に至る走行回数） $\leq 1.0$ となる舗装厚を設計するものである。

理論的設計法によって設計をしようとする場合、交通量の組合せや設計パラメータなどの条件を個々に設定する必要がある。設計パラメータは多岐に渡るが、現時点では設計事例が少なく、現要領に記載されている標準的な値以外を入力した場合の舗装厚の変動傾向が明らかではない。

このような背景から、本検討では理論的設計法によって、アスファルト舗装とコンクリート舗装に対する幾つかの試算を行い、以下の2点について検討した。

1 つ目は、経験的設計法と理論的設計法の舗装厚の比較を行い、設計法の違いが舗装厚に及ぼす影響を考察した。理論的設計法で照査を行おうとする場合に、経験的

設計法との傾向の違いを把握できる参考資料とすることを目的とした。

2 つ目は、設計パラメータがアスファルト舗装厚、コンクリート版厚に及ぼす影響を検討した。理論的設計法は、種々の設計条件を設定する必要があるが、設計パラメータを設定する際に、それぞれの項目が及ぼす影響の程度を考察した。

本資料の構成は、次のとおりである。

2 章では現況の交通量を整理し、それらに基づき想定交通量を作成した。その上で、空港によって就航する機種の種類が異なることから、幾つかの機種を組み合わせた交通量を作成した。

3 章では、アスファルト舗装について、経験的設計法と理論的設計法による舗装厚の比較、設計パラメータが舗装厚へ及ぼす影響について感度分析をおこなった。

4 章では、コンクリート舗装に関して、経験的設計法と理論的設計法による版厚の比較、設計パラメータがコンクリート版厚に及ぼす影響について感度分析をおこなった。

5 章で全体のまとめをおこなった。

## 2. 交通条件の設定

### 2.1 交通量の作成方針

経験的設計法では、航空機の交通量を示す指標として設計反復作用回数を用いてきた。設計反復作用回数は、設計供用期間内に想定される機種の離着陸回数を設計対象機種の交通量として表した指標である。計算された反復作用回数に応じて表-1 に示す区分で表記される。

一方、理論的設計法では、離着陸する航空機便数を機種毎に整理し、交通量として直接計算に用いる。設計反復作用回数は用いない。

本検討では経験的設計法と理論的設計法の比較検討が目的であるため、両設計法の対比をしやすいように経験的設計法の設計反復作用回数に応じた理論的設計法の想定交通量を作成した。

### 2.2 検討対象機種

経験的設計法を用いる場合、機種は表-2 に示すように LA-1 から LSA-2 までの設計荷重区分に分類される。一方、理論的設計法では設計荷重区分を使用せず、各機種の諸元を入力値として使用する。

本検討に用いる想定交通量の作成にあたっては、検討対象機種を設定した。理論的設計法で計算する場合、厳密には各機種の諸元（タイヤ接地圧や主脚荷重など）が異なれば舗装へ与える影響は異なる。しかし、本検討の目的は、設計法の違いによる傾向を考察することであるから、表-2 のとおり荷重区分を代表する対象機種を設定した。表-2 は国内線定期旅客便の機種である。国際線および貨物便は一部の空港に限られるため含めていない。設定根拠は以下のとおりである。

検討対象機種の諸元は付録-A の表-A.1 に示す。

#### ① LA-1

LA-1 は B747-400D と B777-300D を対象機種とした。

2 機種の構成比率は、現状の運航比率から 1:3 とした。

(B777-300D は、国内を運航している B777-300 の飛行距離が、航空機メーカーが諸元で考慮している値に比べ短距離であり、実際の総質量が諸元よりも軽いことを考慮して、離陸質量を着陸質量の 1.05 倍と想定した機種である。)

#### ② LA-12

LA-12 は要領記載の代表機種 A300-B4、および運航便数が多い B767-300 を対象機種とした。A300 型機は型式による諸元の差が少ないことから、要領に記載されている A300-B4 とした。2 機種の構成比率は、A300 型機と B767 型機の現状の運航比率から 3:7 とした。

#### ③ LA-2

LA-2 は要領記載の代表機種 A320-200 とした。

#### ④ LA-3

LA-3 は運航便数の多い B737 型機とした。

B737 型機は、B737-500 や B737-800 といった型式の違いによって、機体の寸法や質量が最大で 3 割程度異なる。そこで、運航実績を参考にして設計反復作用回数が 10,000 回以上の場合は B737-800 を対象機種とし、6,000 回以下の場合は B737-500 を対象機種とした。

#### ⑤ LA-4

LA-4 以下および未分類の機種は、総質量が 20~30 t であるため DHC8-400 を対象機種とした。

表-1 設計反復作用回数の区分

計算された 反復作用回数	設計反復 作用回数	区分	
		アスフ アルト	コンク リート
~7,000 未満	6,000 回	a 区分	M 区分
7,000 以上~	10,000 回	b 区分	N 区分
12,000 以上~	20,000 回	c 区分	
24,000 以上~	40,000 回	d 区分	
50,000 以上~ 100,000 未満	80,000 回	e 区分	O 区分

表-2 検討対象機種

運航機種	設計荷重区分	検討対象機種
B747-400D	LA-1	B747-400D B777-300D
B777-300		
B777-200		
A300-600	LA-12	A300-B4 B767-300
B767-300		
A320-200	LA-2	A320-200
MD-90		
MD-81		
B737-800	LA-3	B737-800 B737-500
B737-700		
B737-500		
B737-400		
DHC8-400	LA-4	DHC8-400
DHC8-300		
ドルニエ 228	LSA-1	
BN-2	LSA-2	
CRJ-700	未分類	
CRJ-100		
DHC8-200		
DHC8-100		
E170		
SAAB 340B		

### 2.3 交通量の作成

#### (1) 現況交通量の整理

設計反復作用回数を2009年10月の時刻表にもとづき実際の空港にあてはめ、概ね表-3のような関係と仮定した。交通量ごとの機種構成比率を整理したのが、表-4である。LA-2とLA-3は空港によって使用機種が偏っているため、一つの区分とした。区分の中におけるLA-2とLA-3の比率は1:1とした。

設計反復作用回数の区分は、設計供用期間20年で最小6,000回であるが、小規模な空港では、それに満たない場合もあるため3,000回の区分を検討用に追加した。

#### (2) 検討ケースの作成

設計反復作用回数は同じであっても、空港によって大型機と小型機の構成比率が異なり、そのことが舗装厚へ影響するものと考えた。そこで、表-4に示した比率を基本比率とし、荷重区分間で比率の増減をおこない、下記に示す3つのパターンの交通量を作成した。

- ① 基本比率 (表-5 ①)
- ② LA-12を増加させたケース (表-5 ②)  
基本比率をもとにLA-12の比率を10%増し、近傍の2つの荷重区分について5%減じた。
- ③ LA-1を増加させたケース (表-5 ③)  
基本比率をもとにLA-1の比率を10%増し、近傍の2つの荷重区分について5%減じた。

作成した検討ケースの一覧を表-6に示す。交通量の詳細は表-A.3および表-A.4に示す。

表-3 設計反復作用回数と交通量の関係

設計反復作用回数	交通量
3,000回	~10便/日
6,000回	~15便/日
10,000回	~30便/日
20,000回	~70便/日
40,000回	~150便/日
80,000回	151便/日 ~

表-4 現況交通量の構成比率

設計反復作用回数	交通量の構成比率 (%)				
	LA-1	LA-12	LA-2 LA-3	LA-4	合計
3,000回	0	10	30	60	100
6,000回	0	25	45	30	100
10,000回	10	20	30	40	100
20,000回	10	15	45	30	100
40,000回	20	20	45	15	100
80,000回	30	25	35	10	100

表-5 検討ケースの設定例 (設計反復作用回数10,000回)

検討ケース	交通量の構成比率 (%)				
	LA-1	LA-12	LA-2 LA-3	LA-4	合計
① 基本比率	10	20	30	40	100
② LA-12増加	5 (-5%)	30 (+10%)	25 (-5%)	40	100
③ LA-1増加	20 (+10%)	15 (-5%)	25 (-5%)	40	100

( )内は基本比率に対する増減値

表-6 検討ケース一覧

検討ケース	最大荷重	検討ケースの交通量構成比率 (%)						
		LA-1	LA-12	LA-2	LA-3	LA-4	合計	
3,000回	基本比率	LA-12	0	10		30	60	100
	LA-12増加		0	20		25	55	100
	LA-1増加	LA-1	10	5		25	60	100
6,000回	基本比率	LA-12	0	25		45	30	100
	LA-12増加		0	35		40	25	100
	LA-1増加	LA-1	10	20		40	30	100
10,000回	基本比率	LA-1	10	20		30	40	100
	LA-12増加		5	30		25	40	100
	LA-1増加		20	15		25	40	100
20,000回	基本比率	LA-1	10	15		45	30	100
	LA-12増加		5	25		40	30	100
	LA-1増加		20	10		40	30	100
40,000回	基本比率	LA-1	20	20		45	15	100
	LA-12増加		15	30		40	15	100
	LA-1増加		30	15		40	15	100
80,000回	基本比率	LA-1	30	25		35	10	100
	LA-12増加		25	35		30	10	100
	LA-1増加		40	20		30	10	100

### 3. アスファルト舗装に関する検討

3章では、アスファルト舗装厚の算出をとおして、経験的設計法と理論的設計法の比較を行った。次に理論的設計法に関わるパラメータの感度分析をおこなった。

なお、本検討では、アスファルト舗装の比較検討をおこなう際に換算舗装厚を用いている。換算舗装厚は、舗装厚の算定において安定処理路盤層の厚さを等価値で換算したものである。

#### 3.1 材料条件

アスファルト舗装材料は、使用実績の多いストレートアスファルト 60-80 を想定した。表-7 にアスファルト舗装に関する物性値の一覧を示す。物性値は幾つかの空港の施工実績や試験舗装の事例を参考に設定した。設定根拠は、以下のとおりである。

##### ① 針入度および軟化点温度

針入度および軟化点温度は、表-8 のとおりである。施工実績の平均的な値とした。

##### ② 針入度指数

針入度指数(PI:Penetration Index)は、針入度と軟化点温度を用いて、(1)式から求められる<sup>5)</sup>。針入度 70、軟化点温度 48℃であれば、PI は-0.91 となる。PI は感温性を示す。

$$\frac{\log_{10} 800 - \log_{10} (25^\circ\text{C針入度})}{\text{軟化点温度} - 25} = \frac{PI - 20}{PI + 10} \times \frac{1}{50} \quad (1)$$

##### ③ アスファルトバインダの変形係数

アスファルトバインダの変形係数( $S_{bit}$ )は、舗装の温度と載荷時間の影響を受ける。求める方法は、材料試験から設定する方法、図表の判読による方法または(2)式から求める方法がある。本検討では現要領に記載のある(2)式に示す算式による方法とした。(2)式は Van der Poel のスチフネス・ノモグラムをもとに  $S_{bit}$  を計算機で算出可能にした式<sup>6)12)</sup>である。

$$S_{bit} = 1.157 \times 10^{-7} \cdot t_w^{-0.368} \cdot \exp(-PI) \cdot (T_{RB} - T)^5 \quad (2)$$

$S_{bit}$  : アスファルトバインダの変形係数 (MPa)

$t_w$  : 載荷時間 (s) (0.01 <  $t_w$  < 0.10 s)

PI : 針入度指数 (-1 < PI < 1)

$T_{RB}$  : 軟化点温度 (°C) (10 <  $T_{RB} - T$  < 70 °C)

T : 載荷時の舗装温度 (°C)

##### ④ 密度、配合率、空隙率

施工実績における平均的な値を用いた。

##### ⑤ 骨材容積係数

骨材容積係数  $C_v$  は以下のとおり計算される。

空隙率 3%未満の場合

$$C_v = \frac{V_A}{V_A + V_B} \quad (3)$$

空隙率 3%以上の場合

$$C_v = \frac{1}{0.97 + 0.01 \times (100 - (V_A + V_B))} \cdot \frac{V_A}{V_A + V_B} \quad (4)$$

$V_A$  : 骨材の容積率

$V_B$  : バインダの容積率

$$V_B = \frac{A \cdot d}{G_a}$$

A : アスファルトの配合率 (%)

d : アスファルト混合物の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$G_a$  : バインダの比重

表-7 アスファルト舗装の物性値

項目	設定値
<b>アスファルトバインダ</b>	
アスファルトの種類	ストレート As 60-80
針入度	70 (1/10mm)
軟化点温度: $T_{RB}$	48 °C
針入度指数: PI	-0.91
変形係数: $S_{bit}$	舗装温度別に算出
密度	1.04 $\text{g}/\text{cm}^3$
<b>アスファルト混合物</b>	
アスファルト配合率	5.5 %
密度	2.4 $\text{g}/\text{cm}^3$
空隙率	3.0 %
骨材容積係数: $C_v$	0.87
変形係数: $S_{mix}$	舗装温度別に算出
ポアソン比	0.35
<b>粒状路盤</b>	
変形係数	200 MPa
ポアソン比	0.35
<b>路床</b>	
CBR	10 %
変形係数	100 MPa
ポアソン比	0.35

表-8 針入度および軟化点温度の標準値 (As60-80)

項目	標準的な値の範囲	設定値
針入度 (25°C)	60~80 (1/10mm)	70
軟化点温度	44~52 (°C)	48

⑥ アスファルト混合物の変形係数  $S_{mix}$

アスファルト混合物の変形係数( $S_{mix}$ )は、アスファルトバインダの変形係数( $S_{bit}$ )と骨材の容積率から(5)式に示す Heukelom, Klomp の実験式<sup>9)</sup>で求められる。

本検討では、現要領に記載のある(5)式を用いた。

$$S_{mix} = S_{bit} \cdot \left( 1 + \frac{2.5}{n} \cdot \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^n \quad (5)$$

$$n = 0.83 \cdot \log_{10} \left( \frac{4 \times 10^4}{S_{bit}} \right)$$

$S_{mix}$  : アスファルト混合物の変形係数 (MPa)

$S_{bit}$  : アスファルトバインダの変形係数 (MPa)

$C_v$  : アスファルト混合物の骨材容積係数

なお、(5)式の適用範囲は  $S_{bit} < 10^5$  Pa であるとの指摘がある<sup>8)</sup>。それを超える場合には、 $S_{bit}$ は温度・時間換算則などから求める方法、 $S_{mix}$ は図-1 などから求める方法がある。

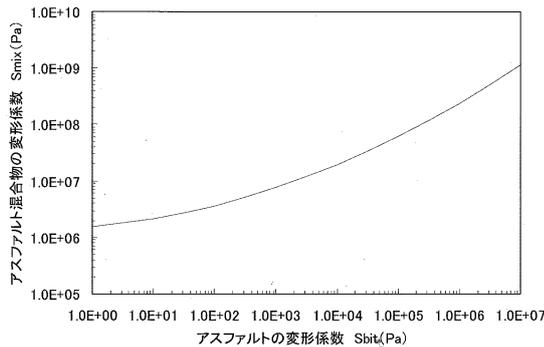


図-1  $S_{bit}$ - $S_{mix}$  クリープ曲線<sup>8)</sup>

⑦ 路盤・路床

路床土の弾性係数( $E_g$ )は、設計 CBR との関係から設定されることが多い<sup>9)11)17)</sup>。Heukelom ら<sup>9)</sup>によれば、現実の舗装に対する実験から求めた路床土の動的な弾性係数は、設計 CBR と比例関係にあり(6)式で示され、通常  $C_g=10$  程度とすることが多いとされている<sup>11)</sup>。本検討では、現要領に記載のある値として、路床の弾性係数を  $10 \times CBR$  (MPa)とした。

路盤材の弾性係数( $E_b$ )は、路床の弾性係数の2倍前後と設定している例が多い<sup>17)18)</sup>。本検討では現要領の設計例に記載のある値として  $E_b=200$  MPa とした。

$$E_g = C_g \cdot CBR \quad (6)$$

$C_g$  : 定数 ( $5 \leq C_g \leq 25$ )

3.2 解析条件

理論的設計法では、ひずみの算出に多層弾性解析を用いる。その際に必要となる解析条件を整理した。理論的設計法のパラメータの感度分析は3.4節で行う。

(1) アスファルト混合物の種類

a) 目的

空港アスファルト舗装では、表層・基層には密粒・粗粒アスファルトを用い、上層路盤にはアスファルト安定処理材を用いることが多い。また環境条件や交通条件などに応じて、改質アスファルトを用いることも多くなってきている。

解析に用いる物性値は、混合物の種類に応じた値を設定することが望ましいが、改質アスファルトなどは材料特性が複雑であるため、温度に見合った変形係数を簡便に推定する算式は見当たらない。

また、アスファルト安定処理材は、表層・基層と差別化した弾性係数の情報が少ない。FWD (Falling Weight Deflectometer)の調査結果から逆解析で弾性係数を求める場合にも、表基層のアスファルト層とアスファルト安定処理路盤層を分離して妥当な値を得ることが難しく、表層からアスファルト安定処理層下端までを単一のアスファルト混合物層として扱っている場合が多い。

そこで、改質アスファルトとアスファルト安定処理材の変形係数について考察した。

b) 改質アスファルト混合物

改質アスファルト混合物は、様々な改質材を使用することによって、耐流動性などの性能を向上させた材料である。通常密粒アスファルト混合物では、変形係数( $S_{mix}$ )を求めるために(2)~(5)式を用いる。しかし(2)式は、材料の違いを針入度と軟化点温度の違いのみで表現しているため、改質アスファルト混合物の特性を適切に表現することが難しい。

表-9 は、改質Ⅱ型アスファルト混合物と密粒アスファルト混合物を比較するために必要な値を施工事例からまとめたものである。

表-9 混合物の変形係数( $S_{mix}$ )の算出に関わる値

項目	密粒	改質Ⅱ型
アスファルトバインダ		
針入度 (1/10mm)	70	50
軟化点 (°C)	48	60
PI	-0.91	+1.03
アスファルト混合物		
配合率 (%)	5.5	
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.4	
空隙率 (%)	3.0	

図-2は、(2)式に表-9の値を適用し、密粒アスファルト混合物と改質Ⅱ型アスファルト混合物の変形係数を図示したものである。舗装温度の高い範囲では、変形係数は改質Ⅱ型アスファルト混合物>密粒アスファルト混合物となり妥当な関係であるが、舗装温度が20℃以下などの比較的低温の範囲では、改質Ⅱ型アスファルト混合物<密粒アスファルト混合物となり、受け入れがたい結果となる。

よって、改質アスファルトに対する変形係数を設計に適切に反映させる場合には、試験等による確認を要するものとする。また、温度に見合った変形係数を簡便に推定する方法の検討が必要と考えられる。

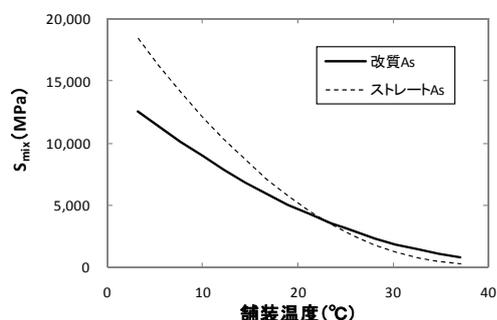


図-2 改質アスファルト混合物の変形係数

c) アスファルト安定処理材

アスファルト安定処理材についても、変形係数の考察をおこなった。

アスファルト混合物の変形係数は、FWD調査の結果を逆解析して推定することがあるが、混合物層をそれぞれの材料ごとに分割して解析した例は少なく、アスファルト安定処理材の変形係数に関する情報は少ない。

表-10に示すように、密粒アスファルトとアスファルト安定処理材の物性値を施工実績などから設定し、変形係数を比較した。2つの材料が置かれている温度条件、荷重速度は同じとした。検討断面は舗装表面から深さ15~30 cmに位置する上層路盤である。

図-3に変形係数の比較結果を示す。試算した結果は、計算上は密粒アスファルト混合物<アスファルト安定処理材であった。ただし、(2)~(5)式がアスファルト安定処理材についてまで適用可能かは不明であり、試験等によって確認する必要がある。

d) 考察

本検討では、このような状況から密粒アスファルト混合物を解析で用いるアスファルト混合物とした。変形係数は、(2)~(5)式で算定することとした。

表-10 比較対象とした物性値

項目	密粒 As	As 安定処理材
アスファルトバイнда		
針入度 (1/10mm)	70	
軟化点 (°C)	48	
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.04	
アスファルト混合物		
アスファルト量 (%)	5.5	4.0
空隙率 (%)	3.0	6.0
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.40	2.38
骨材容積係数 C <sub>v</sub>	0.87	0.88

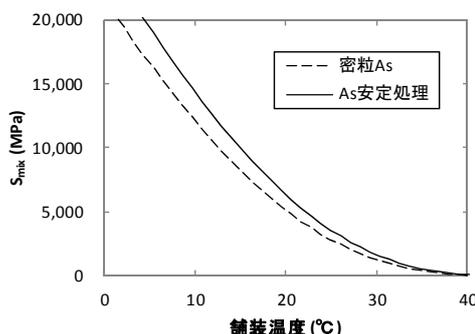


図-3 アスファルト安定処理材の変形係数

(2) アスファルト混合物層の層数

a) 目的

アスファルト混合物の変形係数は、舗装の温度によって異なる。舗装温度を試験等で求めない場合には、月平均気温などから舗装温度を推定する。推定式には舗装設計便覧<sup>4)</sup>における(7)式などがある。

(7)式は Witzak が提案した推定式であり<sup>14)</sup>、A.I.(The Asphalt Institute)の舗装構造検討プログラム DAMA で用いられている式の温度を華氏から摂氏に変換したものである。舗装温度の推定位置は、アスファルト混合物層の層上面から1/3の深さの位置である。

多層弾性解析でアスファルト混合物層をモデル化する場合、図-5のように1層と考える場合と、2層と考える場合とでは、舗装温度を求める位置が違う。1層のときは、舗装表面からの深さ z<sub>1</sub>、2層のときは z<sub>2a</sub>、z<sub>2b</sub> がそれぞれの温度算定位置となる。そのため、図-6に示すように、アスファルト混合物の変形係数が異なり、舗装厚の算定結果に差が生じるものと推察される。現要領の設計例ではアスファルト混合物は1層と想定している。

そこで、表層からアスファルト安定処理路盤までのアスファルト混合物層の層数の設定方法を変えて、層数が解析結果へ及ぼす影響について考察した。

$$M_p = M_a \left( 1 + \frac{2.54}{z + 10.16} \right) - \frac{25.4}{9(z + 10.16)} + \frac{10}{3} \quad (7)$$

$M_p$  : 月平均舗装温度 (°C)

$M_a$  : 月平均気温 (°C)

$z$  : 温度を推定する点の舗装表面からの深さ(h/3)

層構成	材料
表層	As
基層	As
上層路盤	As 安定処理
下層路盤	砕石

図-4 標準的なアスファルト舗装構成

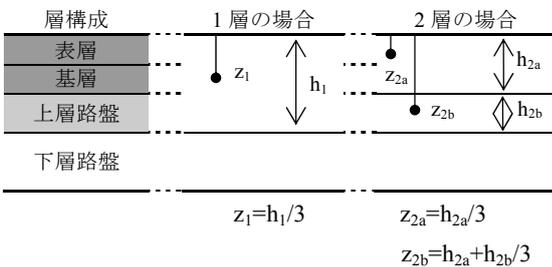


図-5 層数による温度算出位置の違い

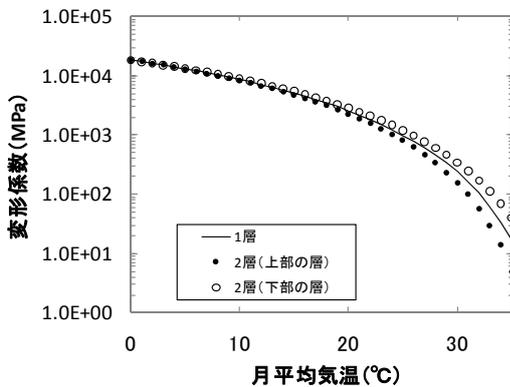


図-6 混合物層の層数による変形係数の違い  
(載荷時間 0.01 秒の場合)

b) 比較条件

表-11 に比較を行う 2 つのケースを示す. ケース 1 は, 表層からアスファルト安定処理路盤までを 1 層のアスファルト混合物層としてモデル化したケースである. 温度を求める位置は, 舗装表面から深さ  $h_1/3$  である (図-5).

ケース 2 は, ケース 1 を 2 層のモデルに分けたケースである. 1 層目は表層と基層を合わせた厚さであり, 温度算出位置は  $h_{2a}/3$ , 2 層目はアスファルト安定処理路盤の厚さとし, 温度算出位置は  $h_{2a} + (h_{2b}/3)$  である (図-5). 各層の物性は同じである.

c) 考察

検討結果を図-7 に示す.

滑走路中間部中央帯を想定した条件 (載荷速度 0.01 秒) では, アスファルト混合物層を 2 層としてモデル化した場合の方が, 舗装厚が 1cm 厚い. また, 誘導路を想定した条件 (載荷速度 0.05 秒) では, 2 層モデルの方が舗装厚が 2cm 厚くなる場合がある.

今回得られた結果では, モデル化の違いによる舗装厚への影響は最大 2cm である. 解析条件の設定にあたり, 舗装構成の層分割に忠実にモデル化することも考えられるが, 前節で述べたとおり, 現時点ではアスファルト安定処理材の物性値として明確なものがなく, 物性値の不確か性を伴いながら詳細なモデル化を行うほどの差ではないと考える. よって, 本検討では, 表層からアスファルト安定処理路盤までを 1 層のアスファルト混合物層としてモデル化した.

なお, 各材料の試験結果の傾向が得られた場合には, どのようなモデル化が適切か検討することが望ましい.

表-11 比較ケース

ケース	条件
1	アスファルト混合物層 1 層 (表層から アスファルト安定処理路盤の合計)
2	アスファルト混合物層 2 層 (上部の層: 表・基層の合計) (下部の層: アスファルト安定処理路盤)

表-12 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路 中間部 中央帯 平行誘導路
交通量	6,000~80,000 回
交通量の構成	表-6 の基本比率
物性値	表-7
気温地域	東京: 表-A.5

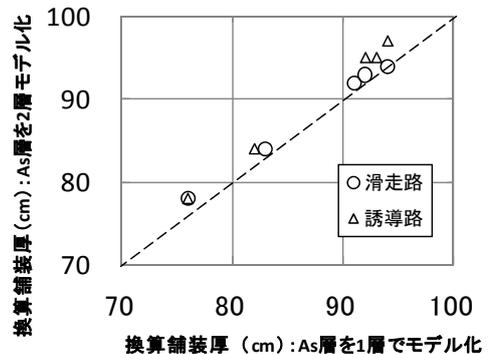


図-7 混合物層のモデル化の影響

(3) 小型機(LA-4)の取扱い

a) 目的

2章の表-4 に示した交通量の構成比率を整理した結果によれば、LA-4 が交通量に占める割合は、設計反復作用回数が 3,000 回の場合に 60%と高い。経験的設計法において、輪荷重が設計輪荷重の 1/2 となる機種は、設計上の影響が少ないため考慮していない。

理論的設計法では構造解析に要する時間が多く、検討対象機種を増やせば、それだけ検討時間が増す。設計結果に及ぼす影響が少ない機種であれば、省略することで構造解析にかかる時間を縮減できる。

よって、LA-3 と LA-4 のみで構成される交通量のケースを想定し、LA-4 が舗装厚へ及ぼす影響を考察した。

b) 比較条件

LA-3 と LA-4 の検討対象機種の主要諸元は、表-13 のとおりである。DHC8-400 は、総質量、主脚荷重および輪荷重が B737-500 の 1/2 以下である。

表-14 に比較を行う 2つのケースを示す。

ケース 1 は、表-4 に示す交通量の構成比率をもとに、LA-4 の比率が最も多い状況を想定し、LA-3:LA-4 を 4:6 としたケースである。交通量は滑走路における設計反復作用回数 6,000 回とした。

ケース 2 は、ケース 1 の交通量から LA-4 を除き LA-3 のみとしたケースである。

検討条件は表-15 のとおりである。

c) 考察

図-8 に滑走路中間部中央帯における累積疲労度の比較結果を示す。LA-4 の有無による累積疲労度の差は、LA-4 の主脚の位置が 4~5 m 付近となる場合に若干異なるが、舗装厚を決定する累積疲労度の最大値ではほとんど差がない。誘導路においても同様な傾向であった。よって、本検討ではLA-4を交通量に含めないものとした。

なお、交通量の大半が LA-4 である場合などは、検討が必要である。

表-13 機材諸元の比較 (満載時)

設計荷重の区分	LA-3	LA-4
航空機の種類	B737-500	DHC8-400
総質量 (t)	61	29
主脚荷重 (kN)	275	132
輪荷重 (kN)	138	66
タイヤ接地圧 (N/mm <sup>2</sup> )	1.34	0.95
車輪の配置形式	複車輪	複車輪
主脚間距離 (cm)	523	880

表-14 比較ケース

ケース	条件	比率 (離陸回数/20年)
1	LA-4 を含む	LA-3:LA-4 = 4:6 (=24,480 : 36,720)
2	LA-4 を含まず	LA-3:LA-4 = 4:0 (=24,480 : 0)

(着陸回数は離陸回数と同数)

表-15 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路 中間部 中央帯 載荷時間 (0.01 秒) 舗装厚 (As23 cm,路盤 36 cm)
	平行誘導路 載荷時間 (0.05 秒) 舗装厚 (As26 cm,路盤 36 cm)
交通量	6,000 回
交通量の構成	表-14
物性値	表-7
気温地域	東京 : 表-A.5

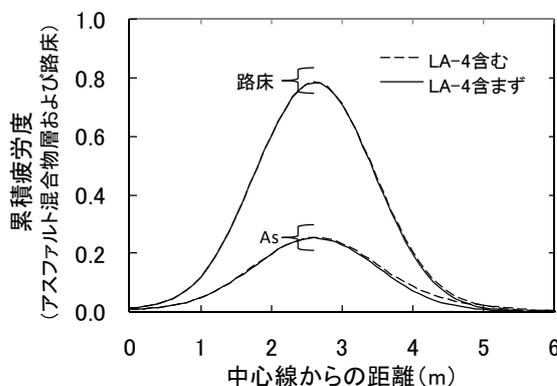


図-8 LA-4 の有無による累積疲労度 (滑走路中間部中央帯)

(4) 載荷時間

a) 目的

アスファルトバインダの変形係数( $S_{bit}$ )は、舗装温度のほかには載荷時間の影響を受ける。載荷時間は、載荷時間＝タイヤ接地長／走行速度として求める。

現要領の設計例では、航空機の走行速度を図-9に示すように滑走路中間部で160 km/h、滑走路端部および誘導路で32 km/hとしている。載荷時間は、各機種のタイヤ接地長に応じて図-10のような結果となるが、現要領の設計例では平均的な値として、滑走路中間部で0.01秒、その他で0.05秒の値を用いている。

各機種のタイヤ接地長は異なるから、載荷時間は図-10に示すようにわずかに異なる。ここでは、載荷時間の設定結果が舗装厚へ及ぼす影響を考察した。

図-10において、DHC8-400は他の機種に比べて載荷時間が短い。前項の検討においてLA-4が舗装へ及ぼす影響は、少ない結果であったので対象から除いた。

b) 比較条件

表-17に比較を行う2つのケースを示す。ケース1は、平均的な載荷時間としたものである。滑走路では0.01秒、誘導路では0.05秒としている。

ケース2は各機種のタイヤ接地長から求めた載荷時間を用いたものである。

検討条件は表-18のとおりである。

c) 考察

図-11に平行誘導路(アスファルト混合物層厚30cm、粒状路盤厚50cm、載荷時間0.05秒)の比較結果を示す。累積疲労度の値が、アスファルト混合物層および路床ともに載荷時間の設定のしかたに応じて若干異なる。しかし、舗装厚を大きく左右するほどの影響はない。滑走路中間部中央帯(載荷時間0.01秒)においても同様な傾向であった。

よって本検討では、載荷時間は表-16に示すように各施設における平均的な値としている。

表-16 施設ごとの平均的な載荷時間

施設・舗装区域	載荷時間 (秒)
滑走路中間部 (中央帯・縁端帯)	0.01
滑走路端部 (中央帯・縁端帯)	0.05
平行誘導路	
高速脱出誘導路	
シオルダー・過走帯	

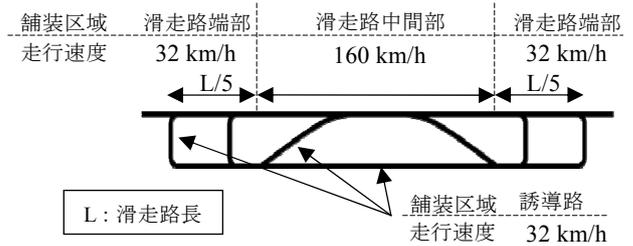


図-9 施設・舗装区域と走行速度

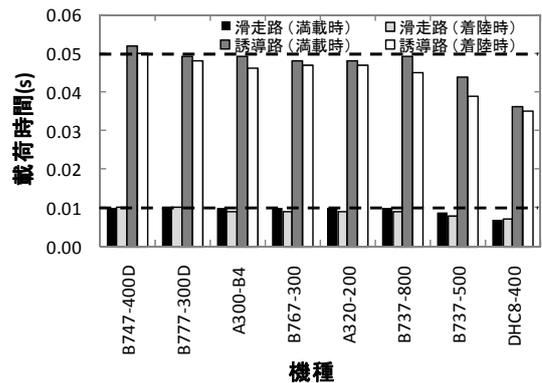


図-10 各機種の載荷時間

表-17 比較ケース

ケース	条件	備考
1	平均的な載荷時間	滑走路 0.01 秒 誘導路 0.05 秒
2	各機種の載荷時間	図-10の載荷時間

表-18 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路 中間部 中央帯 平行誘導路
交通量	20,000 回
交通量の構成	表-6の基本比率
物性値	表-7
気温地域	東京: 表-A.5

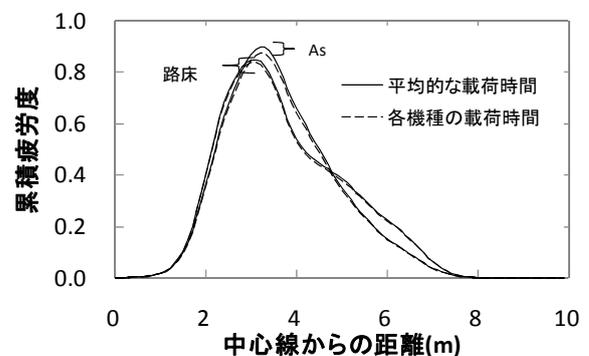


図-11 載荷時間の違いによる累積疲労度 (平行誘導路)

### 3.3 経験的設計法と理論的設計法の比較

#### (1) 検討対象施設

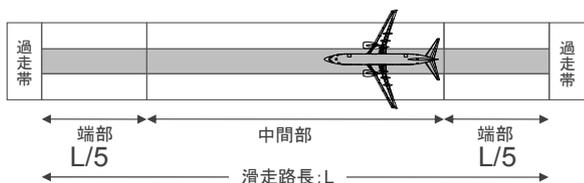
アスファルト舗装は、滑走路・誘導路の舗装に用いられる。これらの施設では、離着陸回数が同じであっても、図-12に示す施設や舗装区域ごとに走行特性に応じて舗装厚が異なる。そこで、それぞれの区域に対して経験的設計法と理論的設計法の比較を行った。

施設・舗装区域の概要を表-19および図-12に示す。施設・舗装区域の分け方は、理論的設計法においても経験的設計法と同様としている。

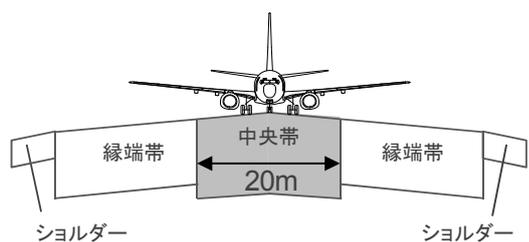
滑走路縦断方向は、走行特性の違いによって端部と中間部を分けている(図-12(a))。滑走路横断方向は走行確率によって、中央帯と縁端帯に分けている(図-12(b))。誘導路は、平行誘導路が対象誘導路の離陸量および着陸量を対象とするのに対し、高速脱出誘導路が着陸のみの使用という点で異なる(図-12(c))。

表-19 施設・舗装区域の名称

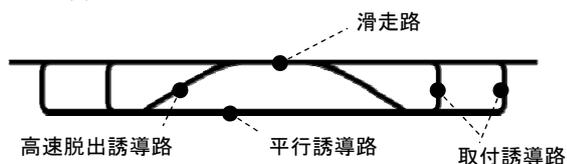
施設	舗装区域	
滑走路	端部	中央帯
		縁端帯
	中間部	中央帯
		縁端帯
ショルダー・過走帯		
誘導路	取付・平行誘導路	
	高速脱出誘導路	



(a) 滑走路の舗装区域の概要 (平面)



(b) 滑走路の舗装区域の概要 (断面)



(c) 誘導路の概要

図-12 施設・舗装区域の概要

#### (2) 検討条件

##### a) 交通条件

交通量は2章の表-6に示すとおりである。各施設・舗装区域の交通量は、航空機の走行特性を考慮して設定されている。交通量設定方法の概要と載荷時間を表-20に示す。また横断方向走行位置の標準偏差を表-21に示す。

交通条件の詳細は、現要領の設計例にある交通量の考え方の一例にもとづき以下のとおりとした。

##### ① 端部中央帯

端部中央帯の交通量は、滑走路方向別利用比率のうち大きな値を、離陸回数，着陸回数それぞれに乗じた値である。走行特性は低速走行となる。

##### ② 中間部中央帯

中間部中央帯の交通量は、離陸回数，着陸回数の全数である。走行特性は高速走行であり、横断方向走行位置の標準偏差の値が大きい。

##### ③ 端部縁端帯

端部縁端帯の交通量は、航空機の主脚車輪の外縁が中央帯から逸脱する確率を用いて算出される。模式的には図-13のような考え方となる。

現要領に記載されている方法として、逸脱確率は(8)式によって横断方向走行位置の標準偏差から確率的に求める方法がある。

$$P(z) = 1 - \int_{-\infty}^{W/2} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (8)$$

$P(z)$  : 逸脱確率

$x$  : 滑走路中心線からの距離 (m)

$\mu$  : 滑走路中心線から主脚車輪外縁までの距離 (m)

$W$  : 中央帯の幅 (m)

$\sigma$  : 横断方向走行位置の標準偏差 (m)

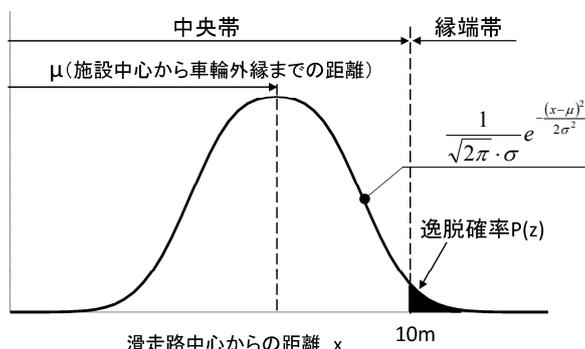


図-13 中央帯逸脱確率の概要

##### ④ 中間部縁端帯

端部縁端帯と同様の考え方となる。走行特性は高速走行である。

⑤ ショルダー・過走帯

ショルダー・過走帯の交通量は、現要領の設計例の方法を考慮し、舗装内に発生するひずみが最大となる機種が年1回の割合で走行する交通量としている。

走行特性は低速走行となる。横断方向走行位置の標準偏差は関与しない。

⑥ 平行誘導路

平行誘導路の交通量は、滑走路端部中央帯と同じとした。走行特性は低速走行である。

⑦ 高速脱出誘導路

高速脱出誘導路の交通量は、着陸回数のみを計上する。走行特性は高速脱出誘導路出口付近では、十分速度が落とされるため、舗装に対して条件の厳しい低速走行としている。

b) 環境条件

アスファルト混合物層の変形係数は、舗装温度の影響を受ける。舗装温度は気温のみならず、日射など気候に関する種々の影響を受ける。実験によらない場合に

は(7)式に示す推定式などにより、月平均気温から求めることができる。

一例として、アスファルト混合物層厚を30cm、気温を表-A.5の東京の月別平均気温とした時の舗装温度と混合物の変形係数( $S_{mix}$ )を表-23に示す。

表-23 気温と変形係数の一例

月	月平均 気温 (°C)	月平均 舗装温度 (°C)	変形係数 $S_{mix}$ (MPa)	
			載荷時間 0.01 秒	載荷時間 0.05 秒
1	5.8	9.7	13,000	9,000
2	6.1	10.1	12,000	8,700
3	8.9	13.2	9,600	6,900
4	14.4	19.4	5,500	3,800
5	18.7	24.2	3,100	2,200
6	21.8	27.7	1,900	1,300
7	25.4	31.8	900	600
8	27.1	33.7	600	400
9	23.5	29.7	1,400	900
10	18.2	23.7	3,400	2,300
11	13.0	17.8	6,400	4,500
12	8.4	12.7	10,000	7,200

表-20 施設・舗装区域別の設計交通条件

施設	舗装区域	走行回数の算定方法	載荷時間 (秒)
滑走路	端部中央帯	(離陸回数+着陸回数) × 滑走路方向別利用率	0.05
	端部縁端帯	端部中央帯交通量 × 逸脱確率	
	中間部中央帯	離陸回数+着陸回数	0.01
	中間部縁端帯	中間部中央帯交通量 × 逸脱確率	
誘導路	平行誘導路	端部中央帯交通量と同数	0.05
	高速脱出誘導路	着陸回数	
ショルダー・過走帯		最大のひずみを発生させる機材が年1回	

表-21 横断方向走行位置の標準偏差 (m)

航空機 コード	滑走路					誘導路	
	中央帯			縁端帯		平行誘導路	高速脱出
	中間部		端部	中間部・端部			
	離陸	着陸		離陸	着陸		
E,F	0.9	1.7	0.6	1.0	1.8	0.6	0.7
B~D	0.7	1.1	0.5	0.8	1.1	0.5	0.6

表-22 経験的設計法と理論的設計法の比較検討に関わる設計条件

条件	設定値
対象施設・交通量	表-20
交通量の構成	表-6
滑走路方向別利用率	7:3
離陸・着陸回数	設計反復作用回数 3,000~80,000 回
載荷時間	表-20
横断方向走行位置の標準偏差	表-21
物性値	表-7
気温地域	東京：表-A.5

(3) 経験的設計法の舗装厚

経験的設計法のアスファルト舗装厚は、現要領の付録の方法で求めることができる。標準的な条件の場合には、設計対象機種、設計反復作用回数および路床のCBRが決まれば、基準舗装厚は現要領の付録に記載されている表から得られる。本検討のケースでは、基準舗装厚は表-24のとおりとなる。

施設・舗装区域に応じた舗装厚は、これらの基準舗装厚に対して表-25に示す係数を乗じて求める。

舗装構成は、表-25で得られた基準舗装厚に対して、表-26および表-27などを考慮して設定する。表-26は表層・基層の合計厚の最小値、表-27は上層路盤の標準厚である。これらは現要領の付録に記載されている。

表-24 経験的設計法の基準舗装厚

検討ケース		設計荷重	基準舗装厚 t (cm)
6,000回以下	基本比率	LA-12	74
	LA-12 増加		
	LA-1 増加		
10,000回	基本比率	LA-1	90
	LA-12 増加		
	LA-1 増加		
20,000回	基本比率	LA-1	96
	LA-12 増加		
	LA-1 増加		
40,000回	基本比率	LA-1	102
	LA-12 増加		
	LA-1 増加		
80,000回	基本比率	LA-1	109
	LA-12 増加		
	LA-1 増加		

表-25 施設・舗装区域に応じた基準舗装厚の減厚

施設		舗装厚
滑走路	端部中央帯	1.0 t
	端部縁端帯	0.8 t
	中間部中央帯	0.9 t
	中間部縁端帯	0.7 t
	ショルダー・過走帯	0.5 t
誘導路	取付・平行誘導路	1.0 t
	高速脱出誘導路	0.9 t

表-26 表層・基層の合計厚の最小値 (cm)

設計荷重	設計反復作用回数				
	6,000	10,000	20,000	40,000	80,000
LA-1	14	15	15	16	17
LA-12	13	14	14	15	16
LA-2	12	12	12	-	-
LA-3	10	10	10	-	-

表-27 上層路盤の標準厚 (CBR10%の場合)

設計荷重	粒状路盤材 (cm)
LA-1	30
LA-12	25
LA-2	25
LA-3	25

(4) 理論的設計法による舗装厚の照査方法

本検討では、理論的設計法で舗装厚を求めるため、路床の支持力、アスファルト混合物層の疲労ひび割れについて照査する。

a) 路床

路床の支持力の照査は、路床の圧縮変形による累積疲労度が設計限界値以下であることを確かめることにより行う。路床の疲労破壊曲線を示す式は、現要領に記載されている(9)式のとおりとした。

$$N_f = \frac{10^\beta}{\varepsilon^\alpha} \quad (9)$$

$N_f$  : 破壊に至るまでの許容繰返し回数

$\varepsilon$  : 路床上面の鉛直ひずみ

$\alpha, \beta$  : 定数 ( $\alpha=11.213, \beta=-29.298$ )

航空機  $i$  による疲労度は(10)~(12)式から得られる。これらの関係の模式図を図-14に示す。

$$FD(i,x) = \frac{n(i)}{N_f(i) \times P/C(i,x)} \quad (10)$$

$$P/C(i,x) = \frac{1}{\sum_{j=1}^n C_j(x) \cdot W_j} \quad (11)$$

$$C_j(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu_j)^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

$FD(i,x)$  : 航空機  $i$  による疲労度

$P/C(i,x)$  : 航空機  $i$  のパス／カバレッジ率

$C_j(x)$  : タイヤ  $j$  の走行確率密度

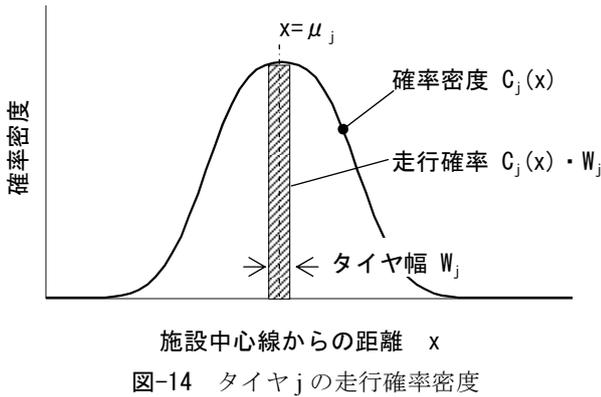
$n(i)$  : 航空機  $i$  の設計交通量

$N_f(i)$  : 航空機  $i$  による破壊に至るまでの許容繰返し回数

$W_j$  : タイヤ  $j$  の幅 (m)

$\mu_j$  : 中心線からタイヤ  $j$  中心までの距離 (m)

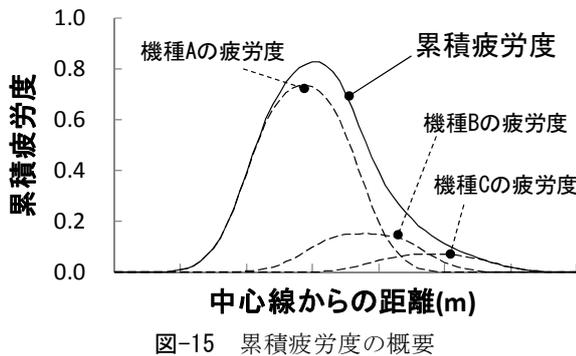
$\sigma$  : 横断方向走行位置の標準偏差 (m)



累積疲労度は対象機種種の疲労度の重ね合わせであり(13)式で求められる。図-15は、例えば3種類の機種A～Cによる疲労度が得られた場合の累積疲労度との関係を模式的に示したものである。

$$CFD(x) = \sum_{i=1}^n FD(i, x) \quad (13)$$

CFD(x) : 滑走路・誘導路の中心から距離  $x$  における累積疲労度



b) アスファルト混合物層

アスファルト混合物層では、アスファルト層下面に生じる引張りひずみを用いて、破壊に至るまでの累積疲労度が設計限界値以下であることを確かめることにより設計する。

アスファルト混合物層の疲労破壊曲線は、現要領に記載されている(14)式の関係を用いた。疲労度は路床と同様に(10)～(12)式で求められ、累積疲労度は(13)式で求められる。

$$N_f = \alpha \times \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^\beta \times \left(\frac{1}{E}\right)^\gamma \quad (14)$$

$N_f$  : 破壊に至までの許容繰返し回数  
 $\varepsilon$  : アスファルト層下面の引張りひずみ  
 $E$  : アスファルト混合物の変形係数 (MPa)  
 $\alpha, \beta, \gamma$  : 定数( $\alpha=7.681 \times 10^{-6}$ ,  $\beta=6.333$ ,  $\gamma=3.374$ )

(5) 経験的設計法と理論的設計法の比較

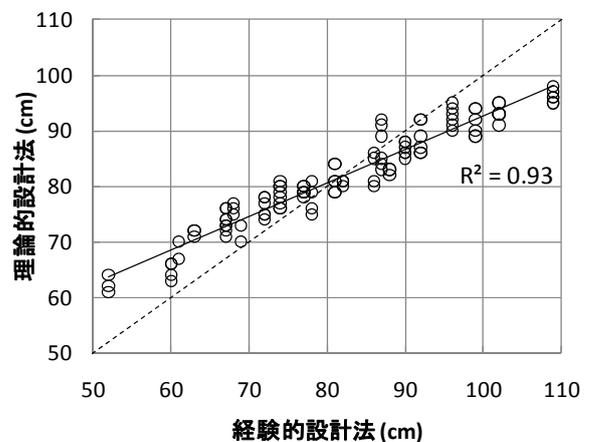
経験的設計法と理論的設計法の舗装厚を比較した。比較に用いた舗装厚は換算舗装厚である。

本検討における理論的設計法の舗装構成は、図-16に示すようにアスファルト混合物層の厚さを経験的設計法と同じに揃え、下層路盤厚を変化させた。つまり、アスファルト混合物層または路床のどちらかの疲労度が1.0に近づくまで、粒状路盤材の厚さを変えた。

図-17は表-22に示す検討条件にもとづいて理論的設計法によりアスファルト舗装厚を算定し、経験的設計法の舗装厚と比較をおこなったものである。経験的設計法と理論的設計法のアスファルト舗装厚は、換算舗装厚80cm付近で同等である。それ以上の範囲では理論的設計法の舗装厚が薄くなり、それ以下の範囲では理論的設計法の舗装厚が厚くなる傾向にある。

層構成	経験的設計法	理論的設計法
表層・基層	As	
上層路盤	As 安定処理	
下層路盤	砕石	砕石

図-16 舗装厚の設定方針



(6) 施設・舗装区域による影響

図-18(a)～(g)の各図は、表-22 に示す検討条件にもとづいて算定した理論的設計法の舗装厚と、経験的設計法の舗装厚を施設・舗装区域別に整理し比較したものである。

図-18(a)に示す端部中央帯では、経験的設計法より理論的設計法の結果が薄い舗装厚になる傾向である。一方、図-18(b)に示す中間部中央帯では、理論的設計法の結果が薄くなるとは限らない結果であった。3.3(9)項で関連する考察結果を示すが、経験的設計法では、厳密な数値解析によるものではないものの、航空機の走行特性として揚力などを考慮し<sup>26)</sup>舗装厚の低減を行っていた。そのため、中間部の舗装厚は、端部の舗装厚より減る方向であった。

理論的設計法では、これらの影響を含めていないが、中間部は端部よりも交通量が多く舗装厚が増すことと、載荷速度が短いことにより変形係数が高くなり舗装厚が減ることの釣り合いによって、結果として経験的設計法の舗装厚と同程度の舗装厚となっている。

図-18(c)・(d)に滑走路縁端帯の結果を示す。経験的設計法では航空機の走行特性を考慮し、端部中央帯の舗装厚に表-25 の減厚割合を乗じて、縁端帯の舗装厚を算出する。理論的設計法を用いる場合には、縁端帯の交通量を(8)式で示したように航空機の主脚外縁が中央帯から逸脱する確率によって計算する方法がある。

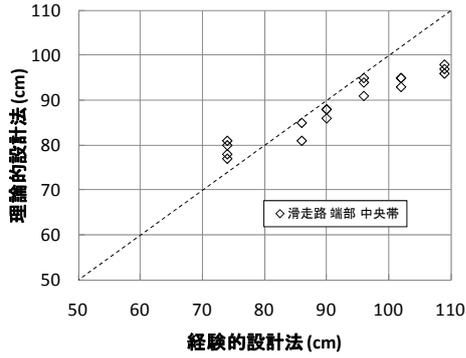
現時点では中央帯からの逸脱確率が 1 %以下の機種は、1 %の交通量が発生するものとして切り上げている。それらの影響と推察されるが、縁端帯では理論的設計法と経験的設計法の関係が、中央帯の場合と同様の傾向を示さない。

縁端帯の走行確率は、荒天時に航空機が横断方向にずれることによって確率が高まるものであり、実データによって分析することは難しい。

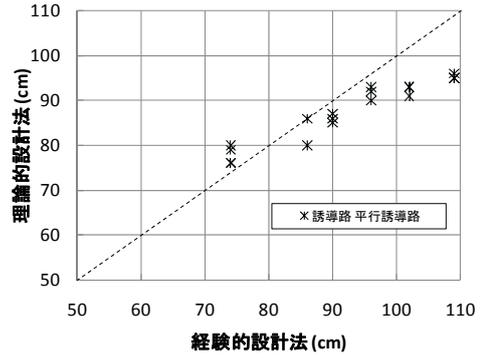
図-18(e)・(f)は誘導路の結果を示す。誘導路は経験的設計法では舗装厚の低減が考慮されないが、理論的設計法では交通量を適切に設定できることから、舗装厚が減る傾向となったものと考えられる。

図-18(g)に示すショルダー・過走帯の結果を示す。経験的設計法では、ショルダー・過走帯の舗装厚は、滑走路端部中央帯の基準舗装厚の 50 %であった。理論的設計法による場合、交通量の考え方の一つとして現要

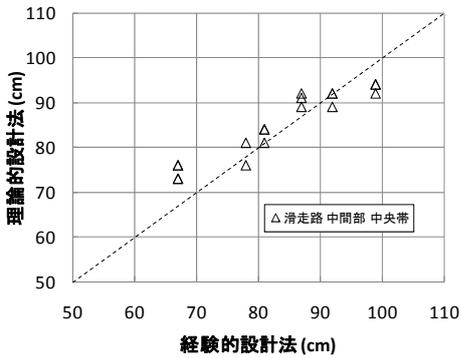
領の設計例では、最大のひずみを発生させる機種を年 1 回の交通量を想定している。そのため、交通量が異なっても、ひずみが最大となる機種が同じであれば舗装厚は同じとなり、交通量の少ない場合に経験的設計法の場合より舗装厚が厚く算定される傾向である。



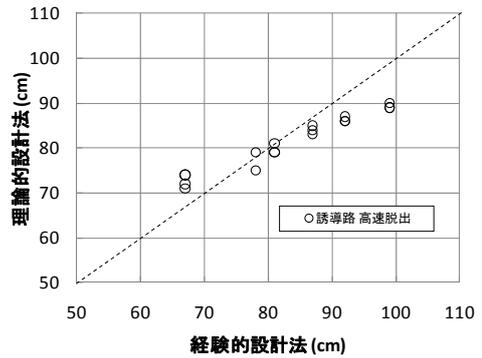
(a) 滑走路 端部 中央帯



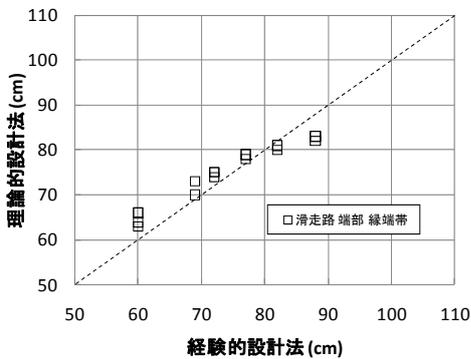
(e) 平行誘導路・取付誘導路



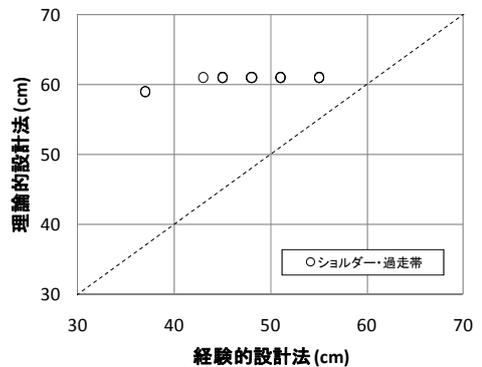
(b) 滑走路 中間部 中央帯



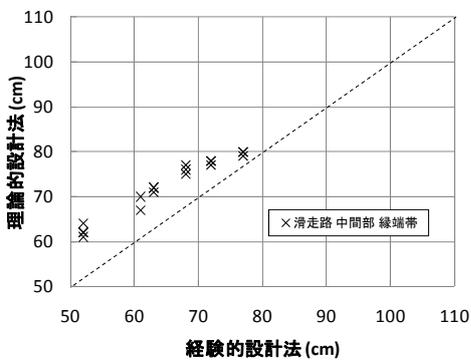
(f) 高速脱出誘導路



(c) 滑走路 端部 縁端帯



(g) ショルダー・過走帯



(d) 滑走路 中間部 縁端帯

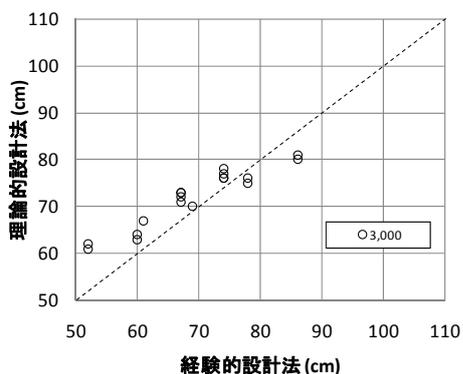
図-18 施設・舗装区域による比較

(7) 設計反復作用回数の影響

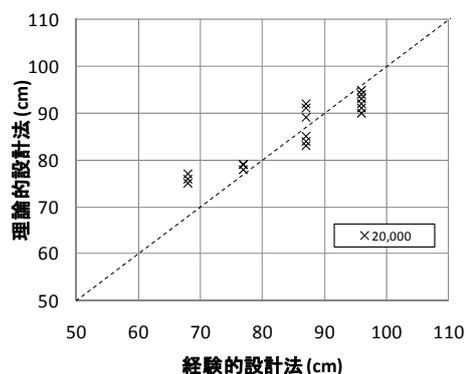
図-19(a)～(f)の各図は、表-22に示す検討条件にもとづいて算定した理論的設計法の舗装厚と、経験的設計法の舗装厚を設計反復作用回数別に整理し比較した結果である。

設計反復作用回数が6,000回以下の範囲では、理論的設計法の舗装厚が大きくなる傾向を示す。

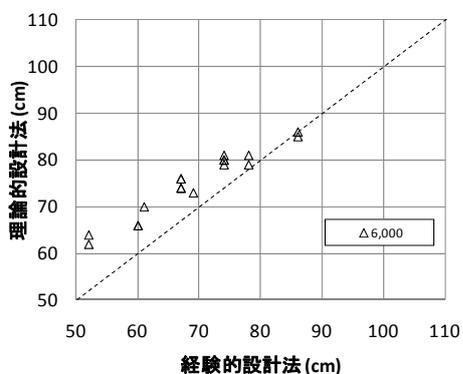
10,000～20,000回の範囲で理論的設計法と経験的設計法の舗装厚は近い。一方、40,000～80,000回においては、理論的設計法による舗装厚が薄くなる傾向を示す。



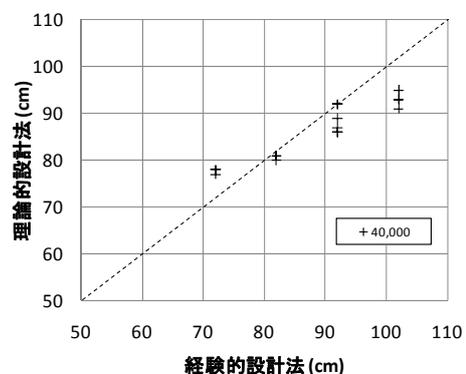
(a) 設計反復作用回数 3,000回



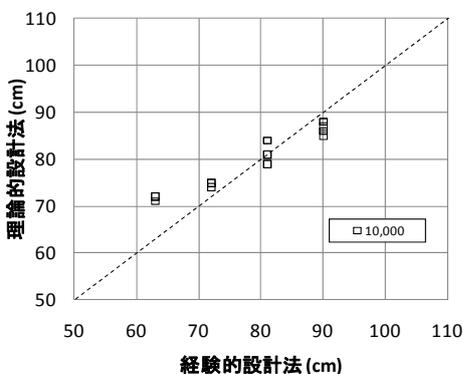
(d) 設計反復作用回数 20,000回



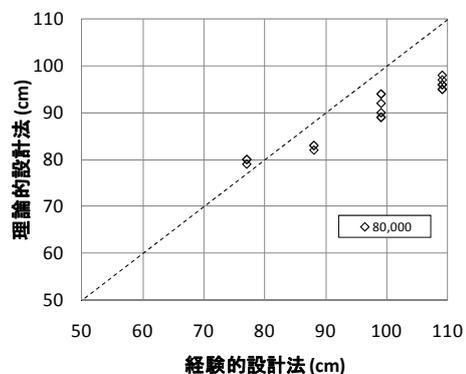
(b) 設計反復作用回数 6,000回



(e) 設計反復作用回数 40,000回



(c) 設計反復作用回数 10,000回



(f) 設計反復作用回数 80,000回

図-19 設計反復作用回数による比較

(8) 交通量の構成の影響

同一の設計反復作用回数であっても、空港ごとに運行している機種構成比率は異なる。そこで、交通量の構成比率に着目して整理した。比較ケースを表-28に示す。各ケースの交通量は2章の表-6に基づいている。

検討の結果を図-20に示す。ケース1とケース2は同程度の舗装厚である。一方、ケース3のようにLA-1の比率を大きくしたケースでは舗装厚は減る傾向にある。大型機の比率が増加することによって、アスファルト舗装厚は厚くならない。むしろ小型機であっても輪荷重が大きい場合、影響を及ぼすことに注意を要する。輪荷重の影響は3.4(2)項で改めて考察する。LA-1の比率が大きいかもかわらず舗装厚が減る要因として、荷重が大きい機種はタイヤ輪数が多く、一輪あたりの輪荷重が小さいことが考えられる。

図-21に主要機種の主脚位置と接地圧の関係整理了。空港によって、就航している機種で主脚配置が近いものが複数ある場合には、疲労度の重ね合わせの影響があるため、注意が必要である。

表-28 比較ケース

ケース	条件
1	基本比率のケース (LA-2,LA-3 が主体)
2	LA-12 の比率を増加したケース
3	LA-1 の比率を増加したケース

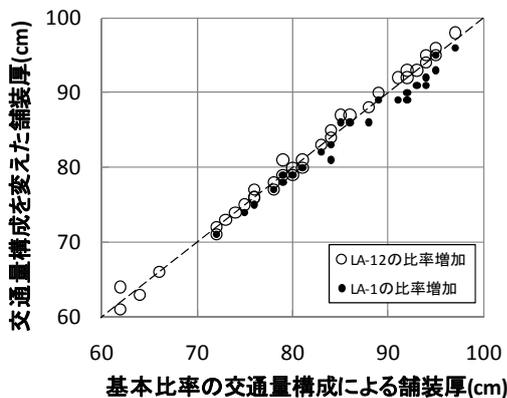


図-20 交通量構成の違いによる比較

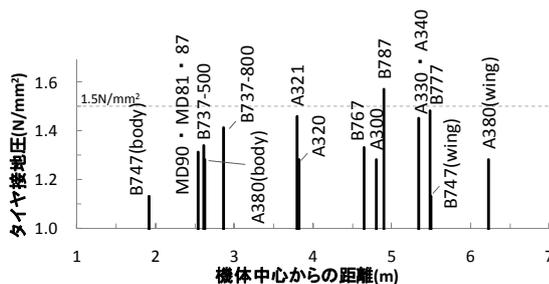


図-21 対象機種の主脚位置と接地圧の関係

(9) 滑走路中間部における揚力の影響

a) 目的

経験的設計法では、航空機の走行特性を考慮し、施設・舗装区域に応じて基準舗装厚を減じていた。例えば、滑走路中間部中央帯の舗装厚は、滑走路端部中央帯の基準舗装厚の90%である。これらの割合が設定された背景には、揚力の影響などを検討した結果<sup>26)</sup>があると考えられるが、揚力の影響は厳密な計算結果にもとづいて設定されたものではない。

理論的設計法を用いた場合、図-18(b)のように滑走路中間部は、端部に比べて舗装厚が減らない。

そこで、航空機の走行時の力学的な応答を検討可能な解析ツール(APRas:航空機走行時応答シミュレーションソフト)によって、走行時の主脚荷重の低下量を計算し、それが揚力によるものであると仮定して、減厚した舗装に対する影響を考察した。

b) 検討方法

検討方法は以下の方法による。

また、検討条件は表-29のとおりである。

- ① 理論的設計法により基準舗装厚(滑走路端部中央帯)を算出する。
- ② ①の90%の舗装厚(滑走路中間部中央帯の舗装に相当)を算定する。
- ③ 検討対象の航空機の離陸重量を一定の割合で減じてゆき、②の舗装厚が満足するか照査を行う。
- ④ ③の条件を満たしたときの航空機の主脚荷重と同一の主脚荷重となるときに滑走距離をAPRasにより求める。
- ⑤ ④の滑走距離について、滑走路端部区域の位置(L/5)と比較し考察する。

c) APRas の検討条件

APRasは、航空機の諸元、滑走路の縦断線形、標高、気温などを入力することにより、航空機に作用する荷重などを求めることが出来るアプリケーションである。

APRasに関わる検討条件は、表-30のとおりとした。検討に用いた縦断線形は、現在供用している滑走路長3,000mのものとした。

d) 考察

上記①～③の結果は表-31のとおりである。

図-22は停止時の主脚荷重を100%として、滑走距離と主脚荷重の割合を示したグラフである。上記の検討から、基準舗装厚の90%の舗装厚が対処可能な主脚荷重は、停止時主脚荷重の88%となる場合であった。

図-22に基づく、滑走路末端から滑走距離が630mとなった地点で主脚荷重が88%となったことがわかる。

3,000 m の滑走路であれば滑走路端部の区間 L/5 (600 m)をわずかに超えた位置となる。このことは経験的設計法において、滑走路中間部中央帯の舗装厚の減厚割合を 90 %としていることと、滑走路端部の区間を L/5 としている関係は、離陸時における揚力の関係から妥当な組合せであることを示していると考えられる。

表-29 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路 中間部 中央帯
交通量	20,000 回
交通量の構成	表-6 の基本比率
物性値	表-7
気温地域	東京：表-A. 5

表-30 APRas の計算条件

条件	設定値
対象航空機	B747-400
走行条件	離陸
気温	15 °C
空港標高	0 m
風速	0 m/s

表-31 検討結果

項目	検討結果
① 舗装厚	94 cm (換算舗装厚) 表・基層 15 cm アス安 15 cm 下層路盤 49 cm
② 減厚した舗装厚 (①×90%)	85 cm (換算舗装厚) 表・基層 15 cm アス安 15 cm 下層路盤 40 cm
③ ②を満足する主脚荷重	停止時の 88 % 質量

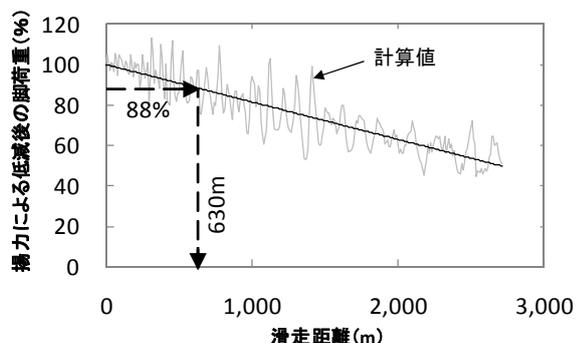


図-22 滑走距離による主脚荷重の低減結果

(10) ショルダー・過走帯の交通量の考察

a) 目的

経験的設計法では、ショルダー・過走帯の舗装厚は、滑走路端部中央帯の基準舗装厚の 50 %としていた。

一方、理論的設計法を用いる場合、要領的設計例では、ショルダー・過走帯の交通量の一例として、ひずみが最大となる機種が、年1回走行するという条件である。そのため、図-18 (g) に示したように対象滑走路の離着陸数が異なっても、最大機種が変わらなければ、理論的設計法の舗装厚は変わらない。

そこで、ショルダー・過走帯における航空機の逸脱状況を整理し、同区域の舗装厚を考察した。

b) 滑走路本体からの逸脱事例

表-32 に航空機が滑走路本体を逸脱した事例を整理した。LA-4 以上と分類可能な航空機が滑走路本体を逸脱した事例は、運輸安全委員会の航空事故調査報告書<sup>31)</sup>によると 1990～2009 年の 20 年間に 5 件発生している。発生した空港は異なっている。

表-32 滑走路本体からの逸脱事例

発生年	空港名	型式	区分
1993 年	花巻空港	DC-9-41	LA-3
1994 年	名古屋空港	A300B4-622R	LA-12
1996 年	福岡空港	DC-10-30	LA-1
2002 年	下地島空港	B767-200	LA-12
2009 年	成田国際空港	MD-11F	LA-1

c) ショルダー・過走帯の走行回数と舗装厚の関係

図-23 にショルダー・過走帯における 20 年間あたりの走行回数を 1～20 回とした場合の舗装厚を示す。舗装構成は、表層をアスファルト混合物層 5 cm と固定し、粒状路盤の厚さを変えて検討した。

経験的設計法において設計反復作用回数が 80,000 回の場合、ショルダー・過走帯の舗装厚は 55 cm である。理論的設計法における 20 年間に発生する走行回数に換算すると 8 回である。

また、同様に経験的設計法で設計反復作用回数 20,000 回の舗装厚と走行回数 2 回の場合が同じとなる。ショルダー・過走帯を走行した事案が 20 年間に 5 回であり、発生した空港も異なる事案であることを考えると、経験的設計法でも必要な舗装厚は確保されているものと考えられる。

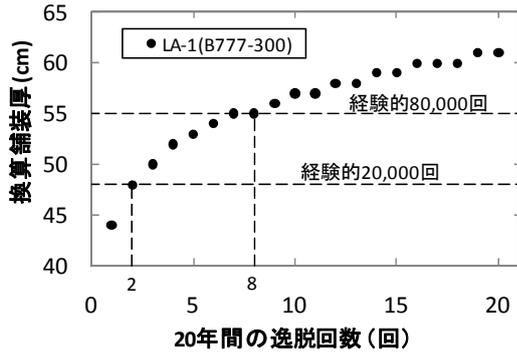


図-23 逸脱回数と舗装厚の関係

(11) 小規模交通量に対する考察

設計反復作用回数が少ない空港では、最大機種が小型機で構成される場合が多い。図-24 に示すように、小規模な交通量（設計反復作用回数 6,000 回以下）の空港では、約 8 割が LA-2 以下を最大機種としている。そこで表-33 に示すように LA-2 以下の機種で構成される場合の影響を考察した。

検討の結果、図-25 に示すように最大機種が小型機である場合、同じ設計反復作用回数であっても、経験的設計法と理論的設計法の差が広がる傾向にあることがわかる。

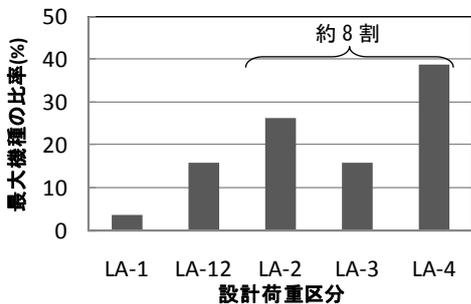


図-24 小規模な交通量の空港における最大機種の比率

表-33 検討ケース（6,000 回）

検討ケース	比率 (%)				
	LA-12	LA-2	LA-3	LA-4	合計
基本比率	25	45	30	100	
最大 LA-2	なし	70	30	100	
最大 LA-3	なし	なし	70	30	100

表-34 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路（全舗装区域） 平行誘導路，高速脱出誘導路
交通量	6,000 回
交通量の構成	表-33
物性値	表-7
気温地域	東京：表-A.5

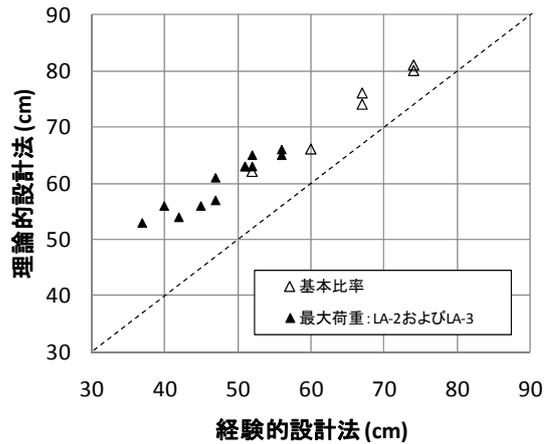


図-25 小規模な交通量における機種構成の影響

(12) 平行誘導路の有無による影響

a) 目的

図-26 に示すように平行誘導路が設置されない空港では、滑走路末端とエプロン間を移動する場合、滑走路中間部を低速で走行する。

平行誘導路を備えている空港では、滑走路中間部は高速走行のみであるが、このように滑走路を低速で走行する場合には、誘導路と同じ载荷時間が作用する。そのため離着陸のみに使用される場合に比べて、アスファルト混合物層に対して厳しい条件が想定される。ここでは、平行誘導路の無い場合において、経験的設計法と理論的設計法の舗装厚の比較をおこなった。

b) 検討条件

検討条件を表-35 に示す。

設計反復作用回数は 10,000 回とした。交通量の構成は表-36 に示すように LA-1 を除く組合せを想定した。

c) 経験的設計法における交通量

設計反復作用回数は、表-37 に示すように離陸時の滑走路交通量を 2 倍したものと着陸時の交通量を用いて計算される。

d) 理論的設計法における交通量

アスファルト舗装の変形係数は、载荷時間の影響を受ける。エプロンと滑走路末端の間の移動は、誘導路としての使用もあるから、理論的設計法の交通量の考え方は、図-26 の A-A 断面の交通量は表-38 のとおり整理できる。

e) 考察

検討の結果を表-39 に示す。

平行誘導路のない空港の滑走路では、経験的設計法と理論的設計法で算出した舗装厚の差は少ない傾向である。

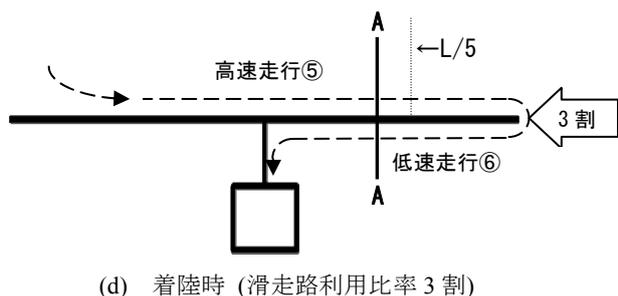
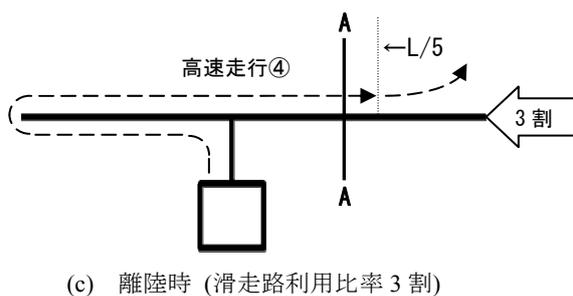
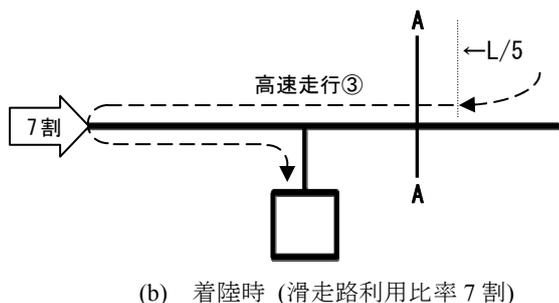
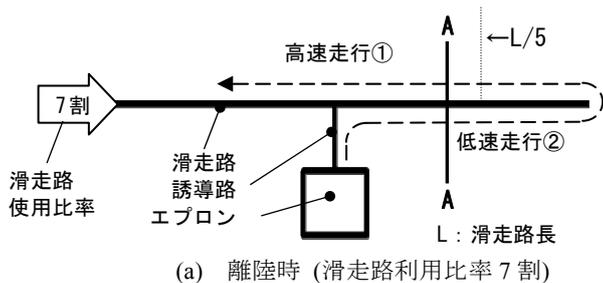


図-26 平行誘導路が無い場合の交通量

表-35 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路 中間部 中央帯
交通量	10,000 回
交通量の構成	表-36
滑走路使用比率	7:3
物性値	表-7
気温地域	東京: 表-A.5

表-36 交通量の組合せ

検討ケース	比率 (%)	
	LA-12	LA-2 LA-3
基本比率	50	50

表-37 経験的設計法における交通量

離着陸	交通量
離陸	離陸交通量 $\times 0.7 \times 2$
着陸	着陸交通量 $\times 0.7$

表-38 理論的設計法における交通量 (A-A 断面)

離着陸	载荷時間 (秒)	交通量	計算根拠 (図-26)
離陸	0.05	0.7	②
	0.01	1.0	①+④
着陸	0.05	0.3	⑥
	0.01	1.0	③+⑤

表-39 舗装厚の比較結果

設計法	換算舗装厚 (cm)
経験的設計法	78
理論的設計法	76

### 3.4 アスファルト舗装厚に関わるパラメータの分析

本節では、アスファルト舗装の理論的設計法に必要な設計パラメータについて、それぞれのパラメータに対し実際の設計で想定される値の範囲で感度分析を行った。

#### (1) 横断方向走行位置の標準偏差

##### a) 目的

航空機の横断方向走行位置の分布は、八谷ら<sup>3)</sup>によって調査され、旧要領における設計反復作用回数の設定において反映されている。横断方向走行位置は、一般に正規分布で仮定され、標準偏差は表-40のように各施設の走行特性と航空機の規模に応じて設定される。

理論的設計法では、その標準偏差を用いて、検討対象となる舗装上を通過する航空機の走行回数を求める。具体的には、横断方向走行位置の標準偏差は(10)~(12)式に示されるように疲労度を求める際のパス/カバレッジ率に使用されている。

近年、航空機やILS(計器着陸装置)の性能向上に伴い、横断方向走行位置の標準偏差は小さくなる傾向と考えられる。標準偏差の値が小さくなれば、同一地点の走行確率が高くなり、舗装が厚くなることが想定される。そこで、標準偏差の値を仮定し舗装厚を比較した。

##### b) 比較条件

表-41は、ある空港における走行実績データを参考に仮定した値である。現要領の設計例において記載されている標準的な値と比べて標準偏差が小さい。

比較ケースを表-42に示す。検討条件は表-43のとおりである。

##### c) 考察

検討結果を図-27に示す。標準的な値を用いた場合に比べて、仮定した値を用いた場合の舗装厚は、同じか1cm厚い結果である。施設が異なっても傾向は同様であり、横断方向走行位置の標準偏差が及ぼす影響は、小さいものと考えられる。

表-40 横断方向走行位置の標準偏差 (標準的な値)

施設および走行特性		標準偏差	
		コード E・F	コード B~D
滑走路中間部	離陸	0.9 m	0.7 m
	着陸	1.7 m	1.1 m
滑走路端部, 誘導路		0.7 m	0.6 m

表-41 横断方向走行位置の標準偏差 (仮定値)

施設および走行特性	標準偏差	
滑走路中間部	離陸	0.6 m
	着陸	0.8 m
滑走路端部, 誘導路	0.4 m	

表-42 比較ケース

ケース	条件	備考
1	標準的な標準偏差	表-40
2	仮定した標準偏差	表-41

表-43 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路 端部 中央帯 滑走路 中間部 中央帯 平行誘導路
交通量	6,000~80,000 回
交通量の構成	表-6の基本比率
物性値	表-7
気温地域	東京: 表-A.5

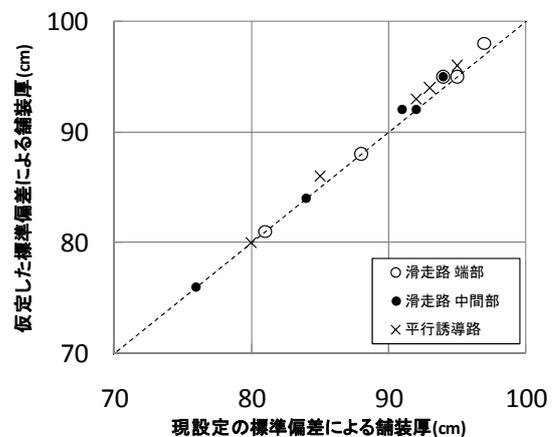


図-27 標準偏差の違いによる影響

(2) 主脚一脚あたりの軸数の影響

a) 目的

理論的設計法の試算を行った結果、小型機であっても大型機と同程度の疲労度となる場合がみられた。

舗装が破壊に至るまでの許容繰返し回数は、(15)および(16)式によって算定される。同一舗装であれば、アスファルト混合物層の変形係数は同じであり、ひずみだけが変数となる。

ここでは、大型機と小型機では総質量が異なっても、主脚一脚あたりの軸数が違う場合、輪荷重が同等となり疲労度が近い値を示す場合があることに着目した。そこで輪荷重が同じ場合に軸数を変え、ひずみの影響を考察した。

・アスファルト混合物層の設計疲労曲線

$$N_f = 7.681 \times 10^{-6} \times \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{6.333} \times \left(\frac{1}{E}\right)^{3.374} \quad (15)$$

$N_f$  : 破壊に至るまでの許容繰返し回数

$E$  : アスファルト混合物層の変形係数 (MPa)

$\epsilon$  : アスファルト混合物層下面の引張ひずみ

・路床の設計疲労曲線

$$N_f = \frac{10^{-29.298}}{\epsilon^{11.213}} \quad (16)$$

$N_f$  : 破壊に至るまでの許容繰返し回数

$\epsilon$  : 路床上面の鉛直ひずみ

b) 比較条件

検討では B777-300D の輪荷重をもとに、輪荷重を同一とし軸数を 1 軸、2 軸および 3 軸とした荷重モデルを想定した。荷重ならびに舗装構成の検討条件は表-44 のとおりである。

c) 考察

表-45 に軸数を変えた場合のひずみの結果を示す。

アスファルト混合物層下面の引張ひずみは、軸数によらず、ほぼ同じであった。

図-28 はタイヤ縦断方向について、アスファルト混合物層下面のひずみの分布を示したものである。軸数が異なる場合のひずみの結果を重ねた。図中の挿絵は各軸数のタイヤ配置とグラフ横軸の関係を説明したものである。ひずみの最大値の発生位置は、いずれの軸数の場合でもタイヤ直下である。また、隣接する車輪の影響を受けて、ある位置のひずみが、特に大きくなるといった傾向はみられない。

表-45 に示すように、1 軸の場合は主脚荷重に換算すると B737-800 相当であり、3 軸の場合は B777-300D である。両者のひずみは同等であり、アスファルト混合物層に対しては、小型機であっても大型機と同等の影響があることがわかる。

一方、感覚としては 1 軸の場合に比べれば、3 軸の場合の方が舗装に対する影響が大きくなるものと想像される。しかし、航空機の載荷速度などを考慮した場合、軸数と舗装の破壊過程の因果関係について検討されたものは見当たらず、現時点では軸数の影響は明らかではない。

表-44 検討条件

項目	設定値
輪荷重	194kN(B777-300D 相当)
軸数	1, 2, 3 軸
舗装構成	アスファルト混合物層：30cm 路盤：40cm
弾性係数	As：390 MPa (8月：東京) 路盤：200MPa 路床：100MPa

表-45 輪荷重を同一 (194 kN) とした場合の比較

軸数	1 軸	2 軸	3 軸
車輪配置と軸数			
As 下面ひずみ $\times 10^{-4}$	2.8	2.8	2.6
路床上面ひずみ $\times 10^{-4}$	6.0	6.8	7.5
主脚荷重 (輪荷重 $\times$ 軸数)	388 kN	776 kN	1164 kN
相当する航空機	B737-800	A300-600	B777-300D

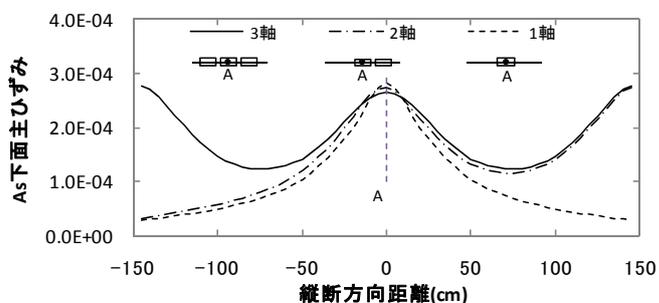


図-28 輪荷重を同一とした場合の As 下面ひずみ

(3) 気温が異なる地域の影響

a) 目的

経験的設計法では地域による気温の差は考慮されず全国一律の舗装厚となる。しかし、理論的設計法ではアスファルト混合物の変形係数( $S_{mix}$ )が舗装温度の影響を受けるから、寒冷または温暖な地域では舗装厚に差が生じるものと考えられる。

アスファルト混合物層の温度設定の方法には、年間、季節別、または月別の平均温度を用いる方法、あるいは年間にわたる温度出現頻度を用いる方法などがあるが、本検討では現要領の設計例に記載のある、月別の平均温度による方法による。

そこで、札幌、東京および那覇を取り上げ、これらの地域における舗装厚の比較を行った。

b) 検討条件

3 地域の気温を図-29 に示す。また、変形係数( $S_{mix}$ )の例を図-30 に示す。図-30 はアスファルト混合物層厚を 30 cm、荷重速度を 0.05 秒とした場合の値である。3 地域の詳細な気温は表-A.5 に示す。

アスファルトの種類は、東京と那覇はストレート As60-80 を想定し表-7 の物性値を用いた。札幌はストレート As80-100 相当とした。両者の違いは表-46 の値とした。検討条件は表-47 のとおりとした。

c) 考察

図-31 に東京の気温による舗装厚と、札幌・那覇の気温による舗装厚を比較した結果を示す。

那覇は気温が高いため変形係数が 1 年間を通して低く、舗装厚が最大 10 cm 増す。一方、札幌はその逆に舗装厚が最大 8 cm 減る。これらの結果から、気温による舗装厚の差は大きいものと考えられる。

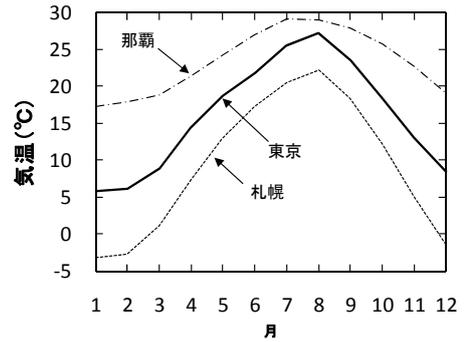


図-29 地域の違いによる気温の傾向

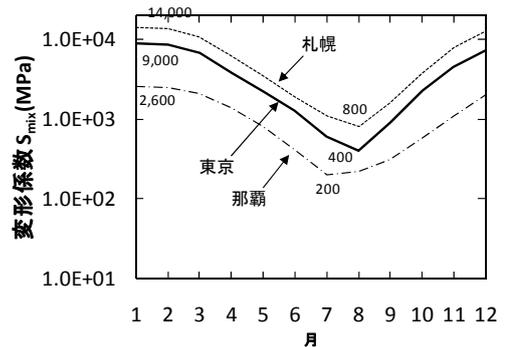


図-30 地域の違いによる変形係数の傾向

表-46 アスファルト種類による物性の違い

項目	As60-80	As80-100
アスファルトバインダ		
針入度 (1/10mm)	70	90
軟化点 (°C)	48	46
PI	-0.91	-0.80

表-47 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路 端部 中央帯
交通量	6,000~80,000 回
交通量の構成	表-6 の基本比率
物性値	表-7
気温地域	札幌, 東京, 那覇 : 表-A.5

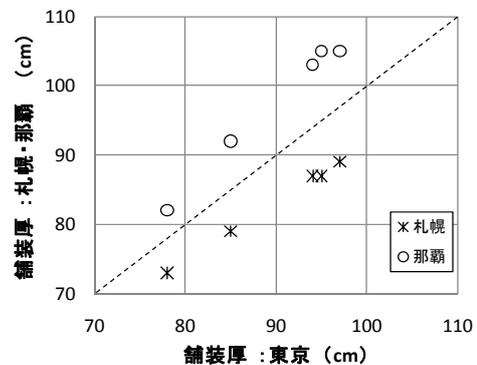


図-31 地域差による舗装厚の影響

(4) 交通量の季節変動の影響

a) 目的

空港によっては、旅客の動態などに応じて交通量の季節変動がある。

理論的設計法で設計する場合に、現要領の設計例では舗装温度が舗装厚へ及ぼす影響を考慮するため、舗装の疲労度を1月から12月まで月毎に算出している。その際に交通量は、年間の交通量を等分割して各月へ与えている。

舗装温度が舗装の疲労度に影響を及ぼすことはわかっているから、交通量の季節変動が想定される場合、それらの条件を見込むことによって、舗装厚へ及ぼす影響があるか考察した。

b) 検討条件

検討ケースは、表-48に示すように年間交通量を等分割した場合と、交通量に季節変動を考慮した場合の2ケースとした。季節変動を考慮した交通量を想定するため、現況の交通量をもとに年平均交通量に対する各月の交通量の変動状況を想定した。

図-32は会社・国管理空港に関する現況交通量の整理結果である。2割以内の変動率で年間をとおして大きく変わらない傾向である。

図-33は特定地方管理空港について同様に整理した結果である。12～2月頃に減少し、8～10月頃に増加している傾向がある。変動率は平均交通量の20%程度である。

地方管理空港は、年間交通量が少ないため、月ごとの交通量の変動がわずかであっても、比率が大きく変動する。よって変動比率の整理から除いた。

以上から季節変動を考慮した場合の交通量のモデルを図-34のとおり想定した。検討条件は表-49のとおりである。

c) 考察

図-35に結果を示す。

交通量の季節変動が20%以内の条件下では、舗装厚の差は1cm前後である。反面、図-32のグラフにある突出した空港のように季節変動が明確になっている場合は、影響の程度を検討する必要があると考える。

表-48 比較ケース

ケース	条件	備考
1	等分割交通量	年間交通量を12等分
2	季節変動考慮交通量	図-34

表-49 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路 端部 中央帯
交通量	6,000～80,000回 (表-48を考慮)
交通量の構成	表-6の基本比率
物性値	表-7
気温地域	東京：表-A.5

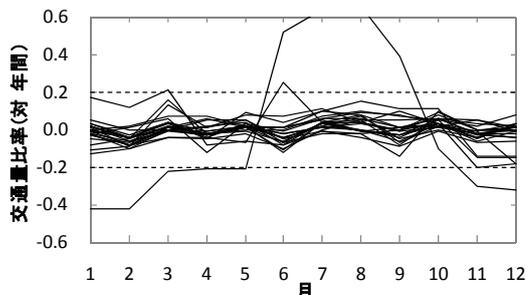


図-32 交通量の季節変動 (会社・国管理空港)

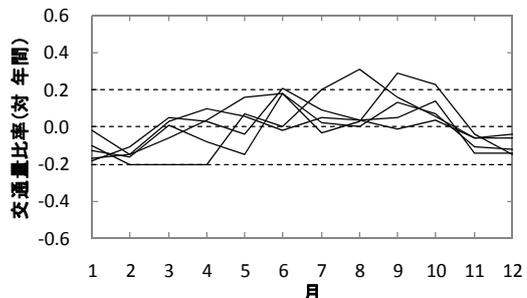


図-33 交通量の季節変動 (特定地方管理空港)

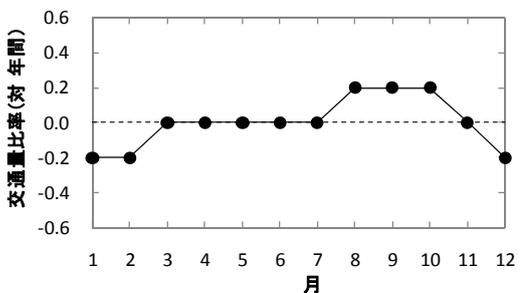


図-34 交通量の季節変動 (検討モデル)

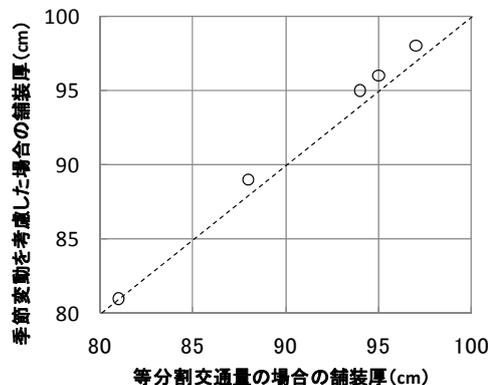


図-35 季節変動を考慮した場合の影響

d) 疲労度が大きくなる季節の傾向について

本項の参考として、疲労度が大きく算定される季節の傾向について考察した。

既往の文献<sup>10)</sup>において、実際の舗装では、夏季は疲労破壊よりも混合物の流動によるわだちぼれが顕著となり、疲労ひびわれは主に春、秋に問題にされるといいう指摘がある。

(15)式に示したようにアスファルト混合物層における疲労破壊輪数は、ひずみと変形係数が同一項にある。そのため、夏季に変形係数が小さくとも、ひずみが大きければ相殺され、結果として舗装の疲労度は高くなる。

図-36にアスファルト混合物層厚 30 cm, 粒状路盤厚 50 cm と仮定した舗装におけるアスファルト混合物の変形係数( $S_{mix}$ )と、各機種の疲労破壊回数との関係の一例を示す。載荷時間は 0.05 秒である。

変形係数( $S_{mix}$ )が 2,000 MPa 程度の場合に疲労破壊回数が少なくなる傾向がみられる。変形係数( $S_{mix}$ )が 2,000 MPa のときの舗装温度は図-37に示すように 25 °C, 舗装厚にもよるが気温に換算すると約 20 °Cであり、文献の指摘と同様な傾向であった。

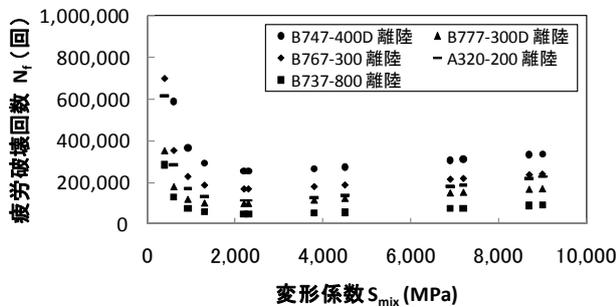


図-36 変形係数  $S_{mix}$  と疲労破壊回数  $N_f$  の関係

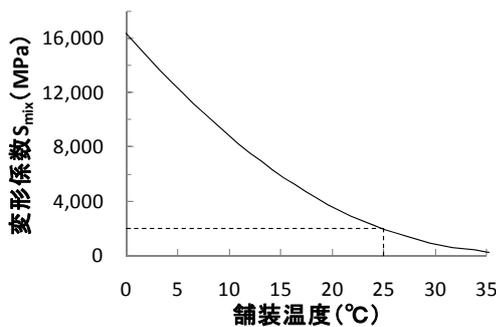


図-37 舗装温度と変形係数  $S_{mix}$  の関係

(5) 路床の支持力の影響

a) 目的

アスファルト舗装の疲労度を求める場合、アスファルト層下面および路床上面のひずみを用いる。ひずみは多層弾性解析によって求めるため、路床の支持力は路床のみならずアスファルト混合物層のひずみにも影響を与える。そこで、路床の設計 CBR を変えた場合の影響について考察する。

b) 検討条件

本検討では、路床の弾性係数を CBR×10 (MPa)と想定している。幾つかの空港の事例を参考に CBR 6%・14% の場合を検討対象とした。検討ケースを表-50に示す。検討条件を表-51に示す。

c) 考察

図-38に支持力を変えた場合の舗装厚の比較結果を示す。経験的設計法よりも理論的設計法の場合のほうが、CBR の違いによる舗装厚の差が小さい。また、CBR6%の場合には、交通量の増加に伴う舗装厚の増加割合は、理論的設計法の方が経験的設計法よりも高い。

表-50 比較ケース

ケース	条件	備考
1	CBR 6%	60 MPa
2	CBR 10%	100 MPa
3	CBR 14%	140 MPa

表-51 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路 端部 中央帯
交通量	6,000~80,000 回
交通量の構成	表-6の基本比率
物性値	表-7, CBRは表-50による
気温地域	東京:表-A.5

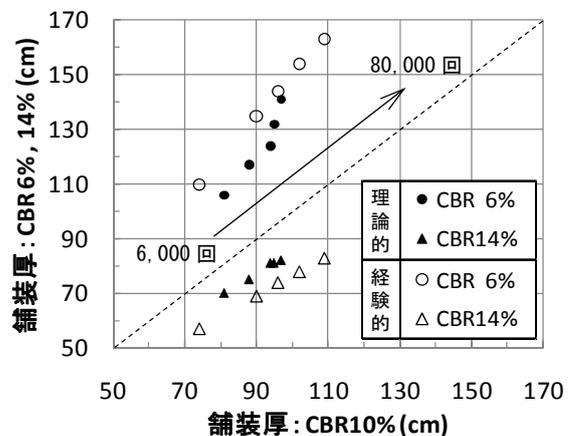


図-38 CBR が異なる場合の影響

### 3.5 まとめ

アスファルト舗装について、経験的設計法と理論的設計法による舗装厚の比較をおこなうとともに、設計パラメータがアスファルト舗装厚の算出結果へ及ぼす影響について検討した。

本検討で得られた成果は以下のとおりである。

(解析条件について)

- ① 改質アスファルトの変形係数を既存の算定式で算出すると妥当な結果が得られない。理論的設計法で用いるためには、実験などによる確認が必要である。
- ② アスファルト混合物層を多層弾性解析により検討する場合、混合物層のモデル層数を1層としても舗装厚に及ぼす影響は小さく、各層の変形係数が明らかでない場合は、舗装構成を詳細にモデル化する必要性は低い。
- ③ 載荷時間は、平均的な載荷時間を用いても設計結果に及ぼす影響は少なく、個々のタイヤ接地長を考慮する必要性は低い。
- ④ 交通量の季節変動の影響は、本検討の変動範囲では舗装厚へ及ぼす影響は少なく、年間交通量を等分割した交通量で問題のない結果である。
- ⑤ LA-4 荷重が舗装厚に及ぼす影響は小さく、本検討の条件の範囲では、交通量に計上しなくても支障ない結果である。
- ⑥ 疲労度が大きくなる季節は変形係数が小さくなる夏季ではなく、むしろ春・秋などに相当する時期であり、既往の文献における指摘と同様の計算結果がみられた。

(経験的設計法との比較結果について)

- ⑦ 経験的設計法と理論的設計法によるアスファルト舗装厚は、換算舗装厚 80cm 付近で同等である。それ以上の範囲では理論的設計法の舗装厚が薄くなり、それ以下の範囲では理論的設計法の舗装厚が厚くなる傾向にある。

- ⑧ ショルダー・過走帯の舗装厚は、滑走路本体からの逸脱事例を考慮すると、経験的設計法の舗装厚においても必要な舗装厚は確保されていると考えられる。
- ⑨ 経験的設計法で滑走路中間部中央帯の舗装厚を基準舗装厚の 90%としていることと、滑走路端部の区域が滑走路末端から L/5 と設定されている関係は、離陸時における揚力との関係からは妥当な組合せであると考えられる。
- ⑩ 平行誘導路のない空港において、経験的設計法と理論的設計法の結果は乖離しない傾向である。

(パラメータの感度について)

- ⑪ アスファルト舗装に対しては、機種ごとの総質量よりも輪荷重の影響が大きい傾向にあった。小型機でも輪荷重が大きい場合、大型機と同程度の影響を及ぼす場合があり、重要なパラメータである。
- ⑫ アスファルト混合物は舗装温度の影響を受けるため、同じ交通量であっても、東京と那覇では最大 10 cm の舗装厚の差が生じる場合もあり、影響の大きいパラメータである。
- ⑬ 路床の支持力が舗装厚へ及ぼす結果は大きく、重要なパラメータである。
- ⑭ 横断方向走行位置の標準偏差の変動が、舗装厚に及ぼす影響は小さい。

#### 4. コンクリート舗装に関する検討

コンクリート舗装も旧要領<sup>2)</sup>では経験的設計法が中心であった。経験的設計法でコンクリート舗装を設計する場合には、無筋コンクリート舗装であれば、設計曲げ強度を設計反復作用回数に応じた安全率で割り、荷重応力がその強度を上回らないように版厚を設計する。

設計曲げ強度が 5 N/mm<sup>2</sup>、路盤の設計支持力係数  $K_{75}$  が 70 MN/m<sup>3</sup> といった標準的な条件であれば、設計荷重区分、設計反復作用回数の組合せに応じて、表-52 のようにコンクリート版の厚さが要領に記載されている。

また、路盤の設計支持力係数  $K_{75}$  が 70 MN/m<sup>3</sup> 以外の場合には、旧要領の付録に記載されているコンクリート版厚設計曲線により版厚を求めることができる。コンクリート版厚設計曲線は、Westergaard の中央載荷公式をもとにした影響図を福手が電算化したプログラム<sup>27)</sup>をもとに求められた図である。

一方、現要領<sup>1)</sup>では、理論的設計法が標準的な設計法の一つとなっている。理論的設計法によってコンクリート舗装を設計する場合は、コンクリート版に生じる応力による曲げ疲労破壊に対して照査を行い、荷重支持性能を確認する。

コンクリート版に生じる応力には、コンクリート舗装上を航空機が走行することによる荷重応力と、日温度変化による温度応力がある。これらが合成応力となってコンクリート版に生じる。設計では、これらの応力の繰り返しによる曲げ疲労破壊が、供用期間にわたって発生しないような版厚を設定するものとなる。

理論的設計法によって照査・設計する場合、交通量の構成や設計パラメータなどの条件を個々に設定する必要がある。しかし、現時点では設計事例が少なく、設計パラメータの違いが版厚の算出結果へ及ぼす影響が明らかではない。

4 章ではコンクリート舗装について、経験的設計法と理論的設計法の比較をおこなうとともに設計パラメータがコンクリート版厚の算出結果へ及ぼす影響を検討した。

表-52 経験的設計法によるコンクリート版厚 (cm)

設計荷重の区分	設計反復作用回数の区分		
	M 区分 6,000	N 区分 10,000 ~40,000	O 区分 80,000
LA-1	37	42	45
LA-12	32	36	39
LA-2	30	34	36
LA-3	27	30	32

#### 4.1 検討条件

##### (1) 検討対象施設

コンクリート舗装は主にエプロンで用いられる。そこで、本検討ではローディングエプロンを検討対象施設とした。設計供用期間は 20 年とした。

##### (2) コンクリート舗装の物性値

検討対象のコンクリート舗装は、標準的な無筋コンクリート舗装を想定した。物性値は表-53 のとおりである。

##### (3) 解析方法および解析モデル

航空機が載荷することによりコンクリート版に発生する荷重応力は、有限要素法(FEM)などを用いた解析方法で求めることができる。本検討では、路盤をバネ支承とした平板 FEM 解析によった。使用したプログラムは CPfor<sup>28)</sup>である。

解析モデルは図-39 に示すように、コンクリート版 1 枚の寸法を 8.5×8.5m とし、縦横に 3 枚ずつの合計 9 枚を並べたモデルとした。隣り合うコンクリート版の間には目地が設けてある。

目地構造は、ダウエルバーと同等の荷重伝達率を確保可能なせん断ばね係数を(17)式<sup>29)</sup>により設定しモデル化している。そのため、ダウエルバーの材料条件や配置などは設定していない。

主な解析条件は表-54 のとおりである。

$$\log_{10} k_s = a - 0.27 \cdot \left( \frac{10^3}{l \cdot K_B} \right) \quad (17)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{E_C \cdot h^3}{12(1-\nu^2) \cdot K_B}}$$

$$a = 17.9 - 0.378 \cdot E_{ff} + 0.00252 \cdot E_{ff}^2 \quad (E_{ff} \geq 80 \% \text{ の場合})$$

$k_s$  : せん断ばね係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$l$  : 剛比半径 (cm)

$E_C$  : コンクリートの弾性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$h$  : コンクリート版厚 (cm)

$\nu$  : コンクリートのポアソン比

$K_B$  : 路盤支持力係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$a$  : 係数

$E_{ff}$  : 荷重伝達率 (%)

表-53 コンクリート舗装の物性値

項目	設定値
コンクリート	
設計曲げ強度	5 N/mm <sup>2</sup>
弾性係数	34,000 MPa
ポアソン比	0.15
単位体積重量	2.3 g/cm <sup>3</sup>
線膨張係数	10×10 <sup>-6</sup> /°C
路盤	
路盤の設計支持力係数 K <sub>75</sub>	70 MN/m <sup>3</sup>

表-54 解析条件

項目	設定値
コンクリート版	
解析方法	平板 FEM 解析
コンクリート版形状	8.5×8.5 m (図-39 参照)
版の枚数	9 枚 (図-39 参照)
荷重方法	中央荷重 (図-39 参照)
目地の構造	
荷重伝達率	85 %
せん断ばね係数	500 N/mm <sup>2</sup>
曲げばね係数	0 N/mm <sup>2</sup>
ねじりばね係数	0 N/mm <sup>2</sup>

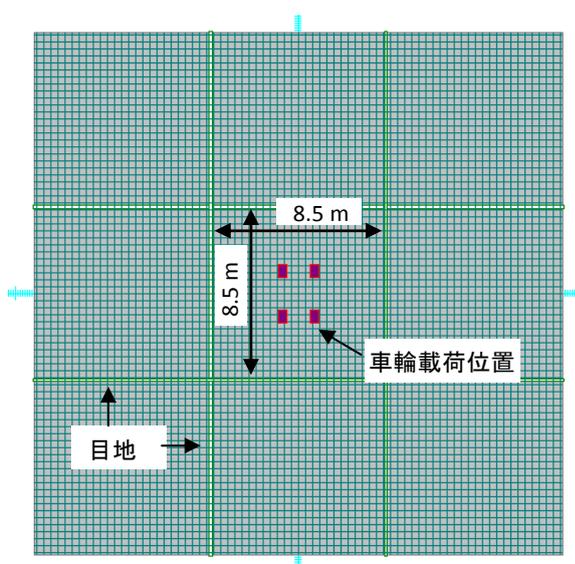


図-39 FEM 解析モデル

(4) 荷重応力

コンクリート版に生じる荷重応力は、主脚が載荷している版の下面に発生する最大主応力を(18)式により各節点で求め、それらの最大値を用いている。

表-53~54 を条件として計算した結果の一例として、コンクリート版厚 42 cm の場合の結果を表-55 に示す。

$$\sigma_p = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2} \quad (18)$$

$\sigma_t$  : 最大主応力 (MPa)

$\sigma_x, \sigma_y$  : x, y 方向の応力 (MPa)

$\tau_{xy}$  : せん断応力 (MPa)

表-55 主脚荷重 応力算定結果 (MPa)  
(版厚 : 42 cm, K<sub>75</sub> : 70 MN/m<sup>3</sup>)

機種	離陸	着陸
B747-400D	1.87	1.77
B777-300D	2.31	2.21
A300-B4	2.10	1.89
B767-300	1.90	1.80
A320-200	1.73	1.65
B737-800	1.96	1.69
B737-500	1.61	1.35
DHC8-400	0.93	0.89

(5) 温度応力

理論的設計法では、温度応力を考慮した設計が可能となった。温度応力はコンクリート版内の温度分布の差によって生じるひずみが拘束され生じる。

コンクリート版内の温度分布は、版厚などの構造条件と、気温や日射などの環境条件の影響を受ける。空港コンクリート舗装は道路舗装に比べて厚く、コンクリート版に対する温度応力の影響が道路舗装とは異なる。

坪川ら<sup>23)</sup>は、表-56 に示すようにコンクリート版厚を 34 cm と 42 cm とした場合について、版上下面温度差の発生頻度分布を旧運輸省港湾技術研究所野比実験場の試験舗装の長期観測から明らかにし、さらに(19)式の温度応力式を提案している。(19)式は現要領において使用可能な温度応力式として記載されている。

よって、本検討では温度応力式に(19)式を用い、版上下面温度差の発生頻度分布に表-56 に示す値を用いた。表-56 の(a),(b)どちらの発生頻度分布を使用するかに関しては、交通量と版厚の関係から、版厚 34 cm による版上下面温度差の発生頻度分布は、設計反復作用回数が 10,000 回以下の検討に使用し、版厚 42 cm の結果は、設計反復作用回数 20,000 回以上の場合に用いた。

$$\sigma_t = (-0.772 \cdot h + 0.854) \cdot \frac{E_c \cdot \alpha \cdot \theta}{2 \cdot (1 - \nu)} \quad (19)$$

- $\sigma_t$  : 版中央の温度応力 (N/mm<sup>2</sup>)
- $h$  : コンクリート版厚 (m)
- $E_c$  : コンクリートの弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)
- $\nu$  : コンクリートのポアソン比
- $\alpha$  : コンクリートの温度膨張係数 ( $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )
- $\theta$  : コンクリートの版上下面温度差 ( $^{\circ}\text{C}$ )

表-56 版上下面温度差の発生頻度

(a) 版厚 34 cm の場合

版上下面 温度差 ( $^{\circ}\text{C}$ )	版上下面の温度差の発生割合	
	温度応力が 正の時間帯	温度応力が 負の時間帯
19	0.0008	-
17	0.0111	-
15	0.0336	-
13	0.0460	-
11	0.0472	-
9	0.0655	-
7	0.0718	-
5	0.0924	-
3	0.0902	-
1	0.1323	0.0040
-1	0.1665	0.0812
-3	0.1566	0.3334
-5	0.0717	0.4700
-7	0.0135	0.0942
-9	0.0009	0.0172
-11	-	0.0011

(b) 版厚 42 cm の場合

版上下面 温度差 ( $^{\circ}\text{C}$ )	版上下面の温度差の発生割合	
	温度応力が 正の時間帯	温度応力が 負の時間帯
17	0.0011	-
15	0.0123	-
13	0.0392	-
11	0.0467	-
9	0.0518	-
7	0.0724	-
5	0.0948	-
3	0.1109	-
1	0.1411	0.0067
-1	0.1879	0.1448
-3	0.1516	0.4346
-5	0.0766	0.3521
-7	0.0133	0.0478
-9	0.0003	0.0140

(6) 交通条件

a) 交通量

検討に用いた交通量は2章の表-6に示すとおりである。

b) 横断方向走行位置の標準偏差

エプロンにおける横断方向走行位置の標準偏差を表-57に示す。横断方向走行位置の標準偏差は、航空機が各施設を走行する際の走行特性によって異なる。

滑走路および誘導路では、既往の研究成果<sup>3)</sup>を参考に標準的な値が現要領に記載されているが、エプロンに関しては標準偏差を得ることを目的とした調査は行われておらず値がない。そのため、現要領の設計例では、エプロン上における横断方向走行位置の標準偏差は、走行速度が近似している誘導路に準じた値を設定している。

本検討でも同様の設定とした。

表-57 横断方向走行位置の標準偏差 (m)

航空機コード	エプロン	平行誘導路
E,F	0.6	0.6
B~D	0.5	0.5

c) 温度応力が正・負となる時間帯の交通量比率

版上下面温度差の発生頻度分布は、温度応力が正となる場合、負となる場合に分けて整理されている。版厚 42 cm の場合、温度応力が正となる時間帯は概ね 10~25 時、負となる時間帯は概ね 25~10 時とされている<sup>23)</sup>。

交通量の比率は、温度応力が正となる時間帯に交通量が多いものと考え、表-58のとおり仮定した。

表-58 温度応力が正・負となる時間帯の交通量比率

温度応力	時間帯	交通量比率
温度応力が正	10時~25時	90%
温度応力が負	25時~10時	10%

(7) コンクリート版の疲労度算定方法

理論的設計法によってコンクリート版厚を求める場合には、コンクリート版の曲げ疲労破壊について照査して版厚を決定する。コンクリートの設計疲労曲線は現要領に記載されている(20)式のとおりとした。

$$\log_{10} N_d = \frac{a - \sigma_{rd} / f_{bd,h}}{b} \quad (20)$$

- $N_d$  : 許容繰り返し回数 (回)
- $\sigma_{rd}$  : 繰り返し最大曲げ応力 (MPa)
- $f_{bd,h}$  : 寸法効果を考慮した設計曲げ強度 (MPa)
- $a, b$  : 定数 ( $a=1.19614, b=0.08672$ )

ここで、 $f_{bd,h}$  は寸法効果を考慮した設計曲げ強度であり(21)式のとおりである。

$$f_{bd,h} = 0.8 \cdot \left( 0.6 + \frac{2.25}{h^{1/4}} \right) \cdot f_{bd,h_0} \quad (21)$$

- $f_{bd,h_0}$  : 版厚 150 mm の設計曲げ強度 (MPa)
- $h$  : 版厚 (mm)

航空機  $i$  によるコンクリート舗装版における疲労度は、アスファルト舗装の場合と同様に、(22)～(24)式から得られる。これらの関係を図-40 に示す。

$$FD(i,x) = \frac{n(i)}{N_f(i) \times P/C(i,x)} \quad (22)$$

$$P/C(i,x) = \frac{1}{\sum_{j=1}^n C_j(x) \cdot W_j} \quad (23)$$

$$C_j(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu_j)^2}{2\sigma^2}} \quad (24)$$

- $FD(i,x)$  : 航空機  $i$  による疲労度
- $P/C(i,x)$  : 航空機  $i$  のパス／カバレッジ率
- $C_j(x)$  : タイヤ  $j$  の走行確率密度
- $n(i)$  : 航空機  $i$  の設計交通量
- $N_f(i)$  : 航空機  $i$  による破壊に至るまでの許容繰り返回数
- $W_j$  : タイヤ  $j$  の幅 (m)
- $\mu_j$  : 中心線からタイヤ  $j$  中心までの距離 (m)
- $\sigma$  : 横断方向走行位置の標準偏差 (m)

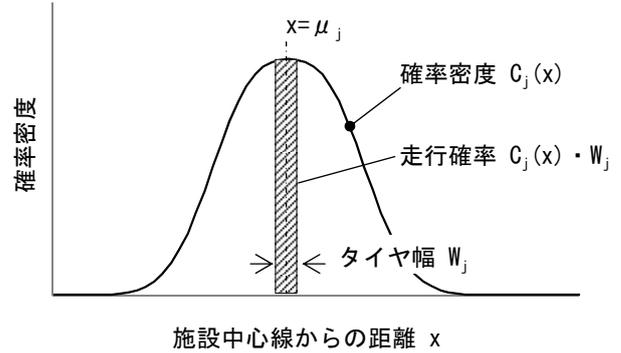


図-40 タイヤ  $j$  の走行確率密度

累積疲労度は、各機種の疲労度の重ね合わせであり(25)式で求められる。図-41 は、例えば3種類の機種 A～C による疲労度が得られた場合の累積疲労度との関係を模式的に示したものである。

$$CFD(x) = \sum_{i=1}^n FD(i,x) \quad (25)$$

$CFD(x)$  : 中心線から距離  $x$  における累積疲労度

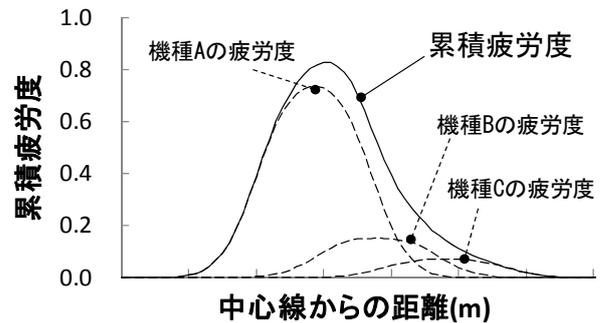


図-41 累積疲労度の概要

(8) 小型機(LA-4)の取扱い

a) 目的

理論的設計法を用いる場合には、コンクリート版に生じる主脚荷重応力を機種ごとに FEM 解析などで求める必要がある。そのため、設計結果に及ぼす影響が少ない機種であれば、省略することにより構造解析にかかる時間を縮減できる。

経験的設計法では、輪荷重が設計輪荷重の 1/2 となる機種は、設計上の影響が少ないため考慮していない。

そこで、LA-3 と LA-4 のみで構成される交通量のケースを想定し、LA-4 がコンクリート版厚へ及ぼす影響を考察した。

b) 比較条件

LA-3 と LA-4 の検討対象機種の主要諸元は、表-59 のとおりである。DHC8-400 は、総質量、主脚荷重および輪荷重が B737-500 の 1/2 以下である。

表-60 に比較を行う 2 つのケースを示す。

ケース 1 は、表-4 に示す交通量の構成比率の整理において、LA-4 の比率が最も多い状況を想定し、LA-3:LA-4 を 4:6 としたケースである。交通量はエプロンおける設計反復作用回数 6,000 回とした。

ケース 2 は、ケース 1 の交通量から LA-4 を除き LA-3 のみとしたケースである。

検討条件は表-61 のとおりである。

c) 考察

図-42 にコンクリート版における累積疲労度の比較結果を示す。LA-4 の有無による累積疲労度の差は、LA-4 の主脚の位置が 4~5 m 付近の場合にわずかに異なるが、コンクリート版厚を決定する累積疲労度の最大値では、ほとんど差を生じていない。よって、本検討では LA-4 を交通量に含めないものとした。

表-59 機材諸元の比較 (満載時)

設計荷重の区分	LA-3	LA-4
航空機の種類	B737-500	DHC8-400
総質量 (t)	61	29
主脚荷重 (kN)	275	132
輪荷重 (kN)	138	66
タイヤ接地圧 (N/mm <sup>2</sup> )	1.34	0.95
車輪の配置形式	複車輪	複車輪
主脚間距離 (cm)	523	880

表-60 比較ケース

ケース	条件	比率 (離陸回数/20年)
1	LA-4 を含む	LA-3:LA-4 = 4:6 (=19,440 : 29,160)
2	LA-4 を含まず	LA-3:LA-4 = 4:0 (=19,440 : 0)

(着陸回数は離陸回数と同数)

表-61 検討条件

条件	設定値
交通量	6,000 回
交通量の構成	表-60
物性値	表-54
検討対象コンクリート版厚	32 cm
版上下面温度差の発生頻度分布	表-56(a) (版厚 34 cm)

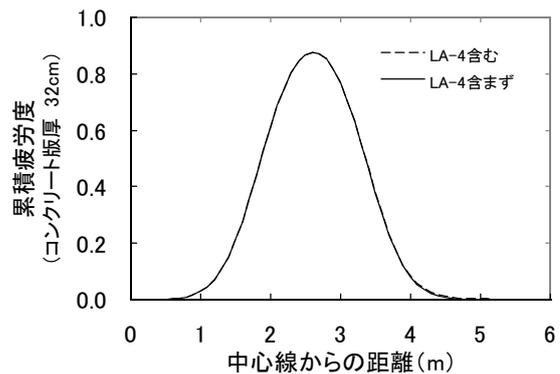


図-42 LA-4 の有無による影響

## 4.2 経験的設計法と理論的設計法の比較

### (1) 経験的設計法と理論的設計法の比較結果

図-43 は、表-62 に示す検討条件にもとづいて、理論的設計法により舗装厚を算定し、経験的設計法の版厚と比較したものである。

コンクリート版厚 40 cm 程度において、経験的設計法と理論的設計法の結果が同程度である。40 cm 以上の範囲では理論的設計法の版厚が薄くなり、それ以下の範囲では理論的設計法の版厚が厚くなる傾向にある。

経験的設計法では、表-52 に示すように設計反復作用回数が 10,000～40,000 回の交通量を一つの区分としている。そのため、図-43 の A 部に示すように交通量が変わっても版厚が変わらない。一方、理論的設計法では個別の交通量に基づいて版厚を検討するため、経験的設計法に比較して薄い版厚となる。

表-62 比較検討における設計条件

条件	設定値
対象施設	エプロン
交通量の構成	表-6
交通量（設計反復作用回数）	3,000～80,000 回
温度応力が正・負となる時間帯の交通量比率	正:負=9:1
横断方向走行位置の標準偏差	表-57
物性値	表-53
版上下面温度差の発生頻度	表-56

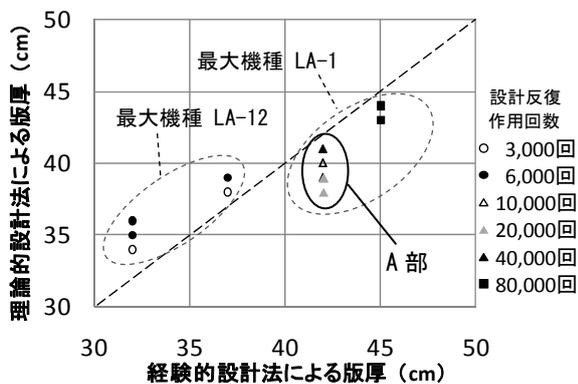


図-43 経験的設計法と理論的設計法の比較結果

### (2) 交通量の構成の影響

同一の設計反復作用回数に対して、交通量の構成比率を変えたケースの比較を行った。比較ケースを表-62 に示す。各ケースの交通量は表-6 に基づいている。

比較結果を図-44 に示す。コンクリート舗装では交通量の構成比率を変えた場合でもコンクリート版厚に大きな差は見られない。

ただし、設計反復作用回数が 3,000～6,000 回の場合には、ケース 1 とケース 3 のコンクリート版厚が異なった結果となった。設計反復作用回数 3,000～6,000 回のケース 1 とケース 3 は、機材構成の比率だけでなくコンクリート版に発生する応力が最大となる機種が異なることから、このような結果になったものと考えられる。

表-63 比較ケース

ケース	条件
1	基本比率のケース
2	LA-12 の比率を増加したケース
3	LA-1 の比率を増加したケース

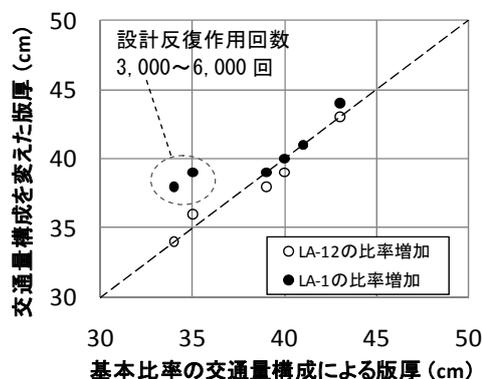


図-44 交通量構成の影響

### (3) コンクリート版厚へ影響を及ぼす荷重条件

#### a) 目的

前項の検討において、コンクリート版に発生する荷重応力が最大となる機種が異なると版厚に影響がある傾向があった。そこで、同一版厚のコンクリート舗装に対して各機種の疲労度を算出し、それぞれの影響を考察した。航空機諸元以外の設計条件は同一としている。

#### b) 検討条件

各機種の交通量は設計反復作用回数換算ではなく、離陸 100,000 回とした。検討対象の版厚は 42 cm とした。

表-64 に検討条件を示す。

表-64 検討条件

条件	設定値
交通量	離陸 100,000 回
物性値	表-52
コンクリート版厚	42 cm
版上下面温度差の発生頻度分布	表-56(b) (版厚 42 cm)

c) 考察

図-45 に機種別の疲労度を図示した。縦軸に疲労度を示した。この図からコンクリート舗装版に対しては、B777-300D の疲労度が他の機種に比べて大きいことがわかる。図-44 において、設計反復作用回数 3,000~6,000 回でケース 3 の舗装厚が増したのは、この B777-300D の有無による影響が大きいと考えられる。

一方、図-45 および表-65 に示すように、B747-400D は LA-1 の荷重区分であるが、B767-300 や B737-800 よりも疲労度が小さく、荷重区分と疲労度の大きさは比例していないことがわかる。

コンクリート舗装の場合、疲労度に影響を及ぼす荷重条件は、車輪配置や各車輪のタイヤ間距離など、複数の要因が関わっているものと考えられる。航空機諸元のうち特定の 1 項目が疲労度の結果を決定づけるものとはなっていない。

しかしながら、おおよその傾向としては、主脚荷重が大きい機種ほど、版に発生する主脚荷重応力は高くなる傾向である。

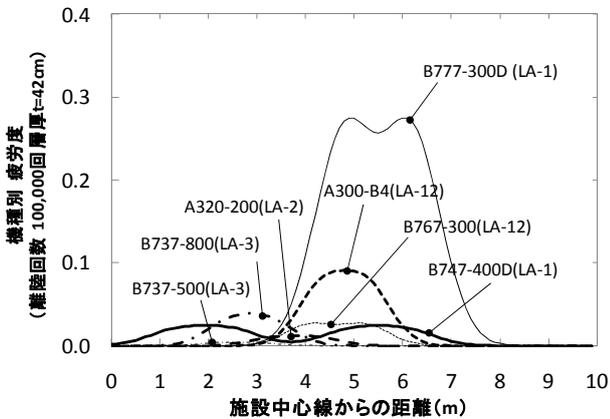


図-45 主要機種の疲労度分布

表-65 主要機種の疲労度と荷重区分の関係 (疲労度順)

疲労度	機種名	荷重区分	脚荷重 (kN)	輪荷重 (kN)
0.28	B777-300D	LA-1	1,161	194
0.09	A300-B4	LA-12	690	173
0.04	B737-800	LA-3	363	182
0.03	B767-300	LA-12	670	168
0.02	B747-400D	LA-1	658	165
0.01	A320-200	LA-2	319	160
0.004	B737-500	LA-3	275	138

4.3 コンクリート版厚に関わるパラメータの分析

(1) 横断方向走行位置の標準偏差の影響

a) 目的

横断方向走行位置の標準偏差は、航空機が各施設を走行する際の走行特性によって異なる。

エプロンでは誘導路の値に準じた標準偏差を用いている。しかし、駐機位置付近などでは、航空機導入線などに沿って走行するため、誘導路を走行するときよりも低速走行となり、横断方向走行位置の標準偏差は小さい値になることが多いと想定される。そこで、標準偏差の値を変えコンクリート版厚に対する影響を考察した。

b) 比較条件

比較検討は、表-66 に示すようにエプロンにおける標準的な値と、標準偏差を 0.1 m 刻みに小さくした場合のケースとした。

c) 考察

図-46 に検討結果を示す。横断方向走行位置の標準偏差の値が小さくなった場合でも、版厚の差は 0~1 cm 厚くなる程度であり影響は小さいものと考えられる。仮に標準偏差の値が 0.1 m と小さい場合でも版厚の差は、最大で 2 cm である。

表-66 比較ケース

ケース	条件	標準偏差 (m) (航空機コード B~D)
1	標準ケース	0.5
2~5	仮定値	0.4, 0.3, 0.2, 0.1

航空機コード E,F の標準偏差は上記に 0.1 m 加算

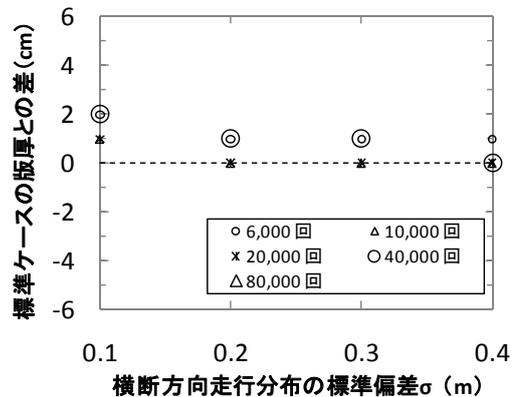


図-46 横断方向走行位置の標準偏差の影響

(2) 版上下面温度差の影響

a) 目的

コンクリート版の温度応力は、版上下面の温度差によるひずみが拘束を受けることによって発生する。

版上下面温度差の発生頻度分布は、コンクリート版の試験舗装の長期観測から明らかにされたものであり<sup>23)</sup>、標準的な気候であれば、これらの値を用いることが考えられる。

一方、温暖または寒冷の傾向を示す気候地域においては、版上下面温度差および発生頻度分布が異なることが想像される。しかし、そのような条件下における版上下面温度差は明らかでない。よって、版厚 42 cm の場合の頻度分布をもとに、版上下面温度差の範囲が異なる場合の影響を考察した。

b) 比較条件

比較ケースを表-67 に示す。比較ケースの作成にあたっては、表-56 に示した版厚 42 cm の温度発生頻度分布そのままにして、温度のみを-2~+2℃の範囲でスライドさせ作成した。比較ケースの詳細を表-68 に示す。

c) 考察

検討結果を図-47 に示す。版上下面温度差を 2℃変えることによって、コンクリート版厚 3 cm の影響があり、版上下面温度の影響は大きいものと考えられる。

表-67 比較ケース

ケース	条件	備考 (版上下面温度差の範囲)
1	-2℃	-11~15℃
2	0℃	標準 -9~17℃
3	+2℃	-7~19℃

表-68 比較ケースの詳細

版上下面温度差 (℃)			版上下面温度差発生頻度分布	
ケース 1	ケース 2	ケース 3	温度応力が正の時間帯	温度応力が負の時間帯
15	17	19	0.0011	-
13	15	17	0.0123	-
11	13	15	0.0392	-
9	11	13	0.0467	-
7	9	11	0.0518	-
5	7	9	0.0724	-
3	5	7	0.0948	-
1	3	5	0.1109	-
-1	1	3	0.1411	0.0067
-3	-1	1	0.1879	0.1448
-5	-3	-1	0.1516	0.4346
-7	-5	-3	0.0766	0.3521
-9	-7	-5	0.0133	0.0478
-11	-9	-7	0.0003	0.0140

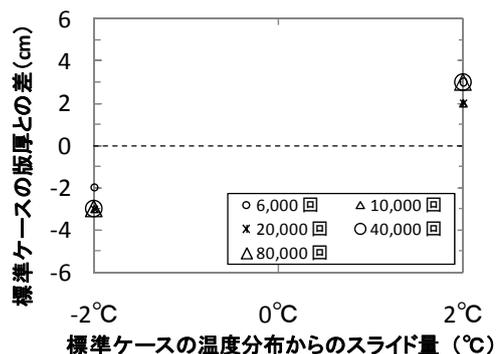


図-47 版上下面温度差の影響

(3) 温度応力が正・負となる時間帯の交通量比率の影響

a) 目的

文献<sup>23)</sup>によれば版厚 42 cm とした場合、温度応力が正となる時間帯は概ね 10~25 時、負となる時間帯は 25~10 時であった。

現況の交通量を整理すると、それぞれの時間帯の交通量の比率の平均は、正:負=75:25 であった。ここでは、これらの比率が異なった場合の影響を考察した。

b) 比較条件

現況の交通量の比率が、おおよそ正:負=75:25 であったことから、標準的な比率は正:負=8:2 とした。比較ケースは、表-69 に示すとおり 7:3~9:1 までの 3 ケースを設定した。

c) 考察

検討結果を図-48 に示す。

温度応力が正・負となる時間帯の交通量比率を変えて影響を考察したが、版厚に及ぼす影響は多い場合でも 1 cm であり、影響は小さいものと考えられる。

表-69 比較ケース

ケース	交通量比率	備考
1	7 : 3	
2	8 : 2	標準
3	9 : 1	

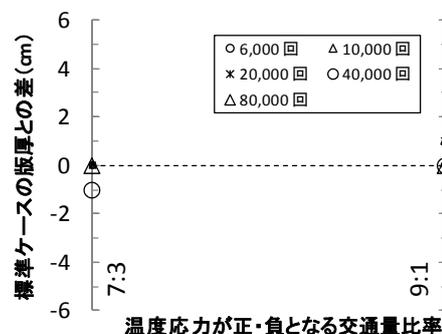


図-48 温度応力が正・負となる交通量比率の影響

(4) 設計曲げ強度の影響

a) 目的

設計曲げ強度は、通常施工されている空港コンクリート舗装では  $5 \text{ N/mm}^2$  とされることが多い。しかし、近年、高強度コンクリートなどを使用する場合も生じてきたことから、設計曲げ強度による影響の考察を行った。

b) 比較条件

比較ケースを表-70 に示す。

設計曲げ強度は  $5 \text{ N/mm}^2$  を標準とし、 $\pm 10\%$  となる設計曲げ強度のケースを想定した。

c) 考察

検討結果を図-49 に示す。

検討の結果、設計曲げ強度を  $-10\%$  変動 ( $4.5 \text{ N/mm}^2$ ) すると、コンクリート版厚は  $5\sim 6 \text{ cm}$  厚いものとする必要がある。また  $+10\%$  変動 ( $5.5 \text{ N/mm}^2$ ) したものは  $3\sim 6 \text{ cm}$  薄くなる傾向にある。

$0.1 \text{ N/mm}^2$  あたり  $0.6\sim 1.0 \text{ cm}$  程度の変動があり、影響が大きいパラメータであると考えられる。

表-70 比較ケース

ケース	設計曲げ強度の比率	備考 (設計曲げ強度)
1	-10%	$4.5 \text{ N/mm}^2$
2	0%	標準 $5.0 \text{ N/mm}^2$
3	+10%	$5.5 \text{ N/mm}^2$

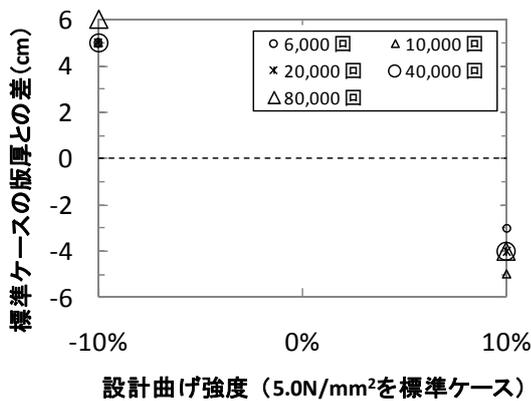


図-49 設計曲げ強度の影響

(5) 路盤の設計支持力係数  $K_{75}$  の影響

a) 目的

路盤の設計支持力係数  $K_{75}$  は、要領において  $70 \text{ MN/m}^3$  が標準的な値となっている。ここでは、支持力係数が異なった場合の版厚に対する影響を考察した。

b) 比較条件

比較ケースを表-71 に示す。

比較検討の範囲については、 $50\sim 150 \text{ MN/m}^3$  とした。旧要領において、設計支持力係数が  $50 \text{ MN/m}^3$  未満は、施工上問題があるため用いてはならず、また  $150 \text{ MN/m}^3$  を超えるような大きな支持力係数は粒状路盤の長期安定性、耐久性が明確ではないことから通常は用いないという記述を参考に設定した。

c) 考察

検討結果を図-50 に示す。路盤の設計支持力係数が  $50 \text{ MN/m}^3$  の場合に版厚は概ね  $3 \text{ cm}$  厚くなり、 $150 \text{ MN/m}^3$  の場合に版厚は概ね  $5 \text{ cm}$  薄くなる傾向であり、影響の大きいパラメータであると考えられる。

表-71 比較ケース

ケース	路盤の設計支持力係数 $K_{75}$	備考
1	$50 \text{ MN/m}^3$	
2	$70 \text{ MN/m}^3$	標準
3	$150 \text{ MN/m}^3$	

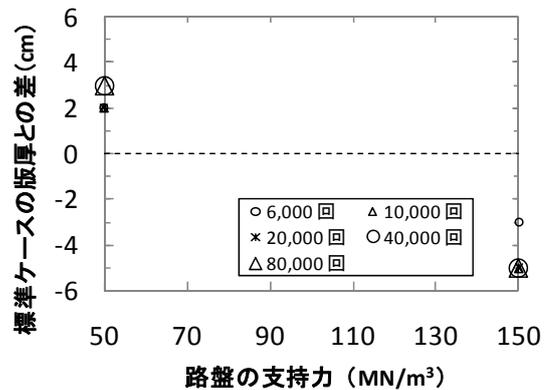


図-50 路盤の設計支持力係数  $K_{75}$  の影響

#### 4.4 まとめ

コンクリート版厚の算出をとおして、経験的設計法と理論的設計法の比較をおこなうとともに、設計パラメータがコンクリート版厚の算出結果へ及ぼす影響について検討した。本検討で得られた成果は以下のとおりである。

(解析条件について)

- ① LA-4 荷重がコンクリート版厚に及ぼす影響は小さく、本検討の条件の範囲では、交通量に計上しなくても支障ない結果である。

(経験的設計法との比較結果について)

- ② 経験的設計法と理論的設計法によるコンクリート版厚は、版厚 40cm 付近で同等である。それ以上の範囲では理論的設計法の版厚が薄くなり、それ以下の範囲では理論的設計法の版厚が厚くなる傾向にある。

(パラメータの感度について)

- ③ 設計曲げ強度は、 $0.1 \text{ N/mm}^2$  あたりコンクリート版厚約 1cm の差が生じ、重要なパラメータである。
- ④ 版上下面温度差の影響は  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  あたり 3 cm 程度であり、影響の大きいパラメータである。  
版上下面温度差が、要領に記載されている傾向と異なることが考えられる場合には留意する必要がある。
- ⑤ 路盤の設計支持力係数  $K_{75}$  は、コンクリート版厚へ及ぼす影響が大きいパラメータである。
- ⑥ 横断方向走行位置の標準偏差は、駐機位置付近などで値が小さくなることを考慮しても、コンクリート版厚に対し 1 cm 程度の影響であり、影響が小さいパラメータである。
- ⑦ 温度応力が正・負となる時間帯の交通量比率は、コンクリート版厚に対して影響が小さいパラメータである。
- ⑧ コンクリート舗装において、航空機荷重が舗装厚に影響を及ぼす要因は、いくつかの条件に関連しているものと考えられ、1 つの諸元（主脚荷重や輪荷重など）に特定できない。おおよその傾向としては、主脚荷重の影響が大きい傾向である。

#### 5. おわりに

理論的設計法は、これまでの経験的設計法では考慮することが難しい条件に対しても、力学的、理論的な検討を行うことで対応可能な設計法である。

そのため、舗装厚を経験等から設定していた従来の設計法と異なり、個別に設計条件を設定する。これらの設計条件が検討結果に及ぼす影響の度合いは、設計パラメータによって異なることが想像されていたが、設計事例が少なく、個々の設計で考察する必要がある。

本検討では、主要なパラメータについての影響の程度を検討し、傾向を整理できた。また、通常のアスファルト以外の材料については、解析に必要な物性を把握する必要があることが判った。

アスファルト舗装、コンクリート舗装、それぞれに関する検討結果のまとめは 3 章、4 章の章末に整理した。

設計パラメータの結果概要を表-72、73 に示す。

表-72 アスファルト舗装に関する設計パラメータの影響検討結果

パラメータ	パラメータの変化量		必要舗装厚の増減
横断方向走行位置の標準偏差	現設定→仮定値	航空機コード B~D 滑走路着陸の場合 ( $\sigma$ 110→ $\sigma$ 80 cm : 一例)	0~1 cm 増
月平均気温	温暖	東京→那覇	4~10 cm 増
	寒冷	東京→札幌	5~8 cm 減
交通量の季節変動	20%の季節変動	8~10月 : +20% 12~2月 : -20%	0~1 cm 増
CBR	4%増	10→14%	11~15 cm 減
	4%減	10→6%	25~44 cm 増

表-73 コンクリート舗装に関する設計パラメータの影響検討結果

パラメータ	パラメータの変化量		必要版厚の増減
横断方向走行位置の標準偏差	交通集中	$\sigma$ 50→ $\sigma$ 20 cm	0~1 cm 増
版上下面温度差	2℃増	-9~17→-7~19℃	2~3 cm 増
	2℃減	-9~17→-11~15℃	2~3 cm 減
温度応力が正負となる時間帯の 交通量比率	正 10%増	8:2→9:1	0~1 cm 増
	負 10%増	8:2→7:3	0~1 cm 減
設計曲げ強度	10%増	5.0→5.5 N/mm <sup>2</sup>	3~5 cm 減
	10%減	5.0→4.5 N/mm <sup>2</sup>	5~6 cm 増
路盤の支持力係数	支持力係数 小	70→50 MN/m <sup>3</sup>	2~3 cm 増
	支持力係数 大	70→150 MN/m <sup>3</sup>	3~5 cm 減

## 参考文献

### 要領等

- 1) (財) 港湾空港建設技術サービスセンター：空港舗装設計要領及び設計例，2010.
- 2) (財) 港湾空港建設技術サービスセンター：空港舗装構造設計要領，1999.

### アスファルト舗装関連

- 3) 八谷好高，梅野修一：航空機走行位置分布の実態と舗装構造への影響，港湾技研資料，No.757，1993.
- 4) 日本道路協会：舗装設計便覧，pp.115-118，2006.
- 5) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，第2分冊，pp.130-131，2007.
- 6) 土木学会：多層弾性理論による舗装構造解析入門，舗装工学ライブラリー3，pp.61-62，2005.
- 7) 牛尾俊介・菅原照雄：アスファルトの工学特性（第3報），アスファルト混合物の変形特性，とくにクリープ特性について，石油学会誌，第24巻，第4号，pp.209-217，1981.
- 8) 牛尾俊介：アスファルト舗装のわだち掘れ予測方法に関する研究，土木学会論文報告集，第323号，pp.151-163，1982.
- 9) Heukelom,W. and A.J.G. Klomp: Road Design and Dynamic Loading,Proc.of AAPT, Vol.33,pp.92-125,1964
- 10) 姫野賢治，渡辺隆，丸山暉彦：低スティフネス状態におけるアスファルト混合物の疲労破壊特性に関する研究，土木学会論文集，第366号/V-4，pp.143-151，1986.
- 11) 姫野賢治・渡辺隆・丸山暉彦：アスファルト舗装の疲労寿命予測システムに関する研究，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.269-278，1987.
- 12) Per Ullidtz and K.R.Peattie : Pavement analysis by Programmable Calcurators, Transportation Engineerig Journal.ASCE,Vol.106,No.TE5,pp.581-597,1980.
- 13) Per Ullidtz:PAVEMENT ANALYSIS,Elsevier,1987
- 14) 阿部忠行，田中輝栄：アスファルト舗装の寿命予測～コンピュータ・プログラム DAMA～，アスファルト，Vol.29，No.149，pp76-81，1986.
- 15) The Asphalt Institute; SW-1 Asphalt Pavement Thickness Design Software for Highways,Airports,Heavy Wheel Loads and Other Applications User's Guide,pp85-97.
- 16) 菅原照雄：アスファルト混合物の物性，土木学会論文集，第348号/V-1，pp.27-36，1984.
- 17) 阿部長門，増山幸衛，小笠幸雄，峰岸順一，菅野伸一：アスファルト舗装の各層の変形係数の決定手法について，アスファルト，Vol.36，No.179，pp.53-72，

1994.

- 18) 古財武久，塩尻謙太郎：アスファルト舗装の構造設計における最近の動向(6)「弾性理論を中心とした各種設計法」，アスファルト，Vol.22，No.119，pp.58-64，1979.
- 19) 土木学会舗装工学委員会舗装設計小委員会：力学的一経験的舗装設計指針，アスファルト，Vol.48，No.218，pp.2-47，2005.
- 20) 姫野賢治:パソコンによる舗装の多層弾性構造解析，アスファルト，Vol.32，No.161，pp65-72，1989.
- 21) 姫野賢治，渡辺隆，勝呂太：アスファルト舗装の内部温度の推定に関する研究，土木学会論文集，第366号/V-4，pp.123-132，1986.
- 22) 安崎裕：車両重量の現況と道路舗装への影響，アスファルト，Vol.29，No.149，pp.3-8，1986.

### コンクリート舗装関連

- 23) 坪川将丈：空港舗装の設計・維持管理手法の高度化に関する研究，国土技術政策総合研究所研究報告，No41，2010.
- 24) 坪川将丈，水上純一，八谷好高，亀田昭一：日温度変化による空港コンクリート舗装の温度応力に関する研究，土木学会舗装工学論文集，第12巻，pp157-164，2007.
- 25) 坪川将丈，水上純一，江崎徹，八谷好高：空港コンクリート舗装の温度応力に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No.341，2006.
- 26) 森口拓：空港コンクリート舗装の構造設計法に関する一提案，運輸省港湾技術研究所，pp16-17，1969.
- 27) 福手勤：空港コンクリート舗装設計への電算プログラムの応用，港湾技研資料，No.262，1977.
- 28) 西澤辰雄，松野三朗：コンクリート舗装の構造解析における有限要素法の適用性について，土木学会論文報告集，第338号，pp207-215，1983.
- 29) 福手勤，八谷好高，山崎英男：コンクリート舗装の目地部における荷重伝達機能，港湾技術研究所報告，第21巻，第2号，pp207-236，1982.
- 30) 八谷好高，坪川将丈，松崎和博，阿部寛，早野公敏，秋元洋胤，亀田昭一，佐々木健一，棚木隆：高強度コンクリートの空港舗装への適用性，国土技術政策総合研究所資料，No.100，2003.

### その他資料

- 31) 運輸安全委員会：航空事故調査報告書，  
<http://jtsb.mlit.go.jp/jtsb/aircraft/kensaku/airjiko.html>

(2011年2月14日受付)

付録-A 検討条件の詳細

表-A.1 検討対象機種の主要諸元

設計荷重の区分		LA-1		LA-12		LA-2	LA-3		LA-4
CODE		E	E	D	D	C	C	C	D
航空機の種類		B747-400D	B777-300D	A300-B4	B767-300	A320-200	B737-800	B737-500	DHC8-400
総質量(t)	満載時	278.3	249.6	150.9	143.9	68.4	79.2	60.8	28.7
	着陸時	260.4	237.7	133.0	136.1	64.5	66.4	49.9	27.4
脚荷重(kN)	満載時	658	1,161	690	670	319	363	275	132
	着陸時	615	1,105	608	634	301	304	226	126
輪荷重(kN)	満載時	165	194	173	168	160	182	138	66
	着陸時	154	184	152	159	151	152	113	63
車輪の配置形式		B747型	1脚6輪	複々車輪	複々車輪	複車輪	複車輪	複車輪	複車輪
複車輪の横中心間隔(cm)		111.8	140.0	92.7	114.3	92.7	86.0	77.0	49.6
複々車輪の縦中心間隔(cm)		147.3	290.0	139.7	142.2	—	—	—	—
タイヤ接地圧(N/mm <sup>2</sup> )		1.13	1.48	1.34	1.33	1.28	1.41	1.34	0.95
タイヤ接地面積 A(cm <sup>2</sup> )	満載時	1,460	1,311	1,291	1,263	1,250	1,291	1,030	695
	着陸時	1,363	1,243	1,134	1,195	1,180	1,078	843	663
タイヤ接地幅(cm)	満載時	31.7	30.0	29.8	29.5	29.3	29.8	26.6	21.9
	着陸時	30.6	29.3	27.9	28.7	28.5	27.2	24.1	21.4
タイヤ接地長(cm)	満載時	46.1	43.7	43.3	42.8	42.7	43.3	38.7	31.7
	着陸時	44.5	42.4	40.6	41.6	41.4	39.6	35.0	31.0
脚中心間隔(cm) B:ボディギア W:ウイングギア	B~B間	384	1,097	960	930	759	572	523	880
	B~W間	358							
脚荷重応力(MPa) (版厚t=42cm)	離陸	1.87	2.31	2.10	1.90	1.73	1.96	1.61	0.93
	着陸	1.77	2.21	1.89	1.80	1.65	1.69	1.35	0.89

表-A.2 現況の運航便数の比率 (%)

設計反復 作用回数	LA-1		LA-12		LA-2	LA-3		LA-4
	B747 -400D	B777 -300D	A300 -B4	B767 -300	A320 -200	B737 -800	B737 -500	DHC8-400
3,000		1%以下	4	6	16		16	58
6,000		1%以下	15	8	28		16	32
10,000	2	8	7	13	10	21		40
20,000		5	4	13	17	32		29
40,000	8	14		16	9	37		17
80,000	6	21	9	17	14	20		12

表-A.3 検討交通量（滑走路，供用期間 20 年，離陸回数）

設計反復 作用回数	検討 ケース	LA-1		LA-12		LA-2	LA-3	
		B747 -400D	B777 -300D	A300 -B4	B767 -300	A320 -200	B737 -800	B737 -500
3,000	基本			2,798	6,528	13,988		13,988
	LA-12 増			3,518	8,210	7,330		7,330
	LA-1 増	2,676	8,027	1,605	3,746	13,379		13,379
6,000	基本			6,974	16,272	20,921		20,921
	LA-12 増			7,621	17,783	14,517		14,517
	LA-1 増	4,088	12,264	9,811	22,892	32,703		32,703
10,000	基本	6,939	20,817	16,654	38,858	41,634	41,634	
	LA-12 増	4,244	12,733	30,560	71,307	42,444	42,444	
	LA-1 増	9,248	27,744	8,323	19,421	23,120	23,120	
20,000	基本	15,254	45,761	27,457	64,066	137,284	137,284	
	LA-12 増	9,551	28,653	57,307	133,716	152,818	152,818	
	LA-1 増	19,703	59,108	11,822	27,584	78,810	78,810	
40,000	基本	37,165	111,495	44,598	104,062	167,243	167,243	
	LA-12 増	31,649	94,947	75,957	177,234	168,794	168,794	
	LA-1 増	41,988	125,964	25,193	58,783	111,968	111,968	
80,000	基本	82,215	246,644	82,215	191,834	191,834	191,834	
	LA-12 増	75,189	225,568	126,318	294,742	180,455	180,455	
	LA-1 増	88,500	265,499	53,100	123,899	132,749	132,749	

着陸回数は離陸回数と同数

表-A.4 検討交通量（誘導路，供用期間 20 年，離陸回数）

設計反復 作用回数	検討 ケース	LA-1		LA-12		LA-2	LA-3	
		B747 -400D	B777 -300D	A300 -B4	B767 -300	A320 -200	B737 -800	B737 -500
3,000	基本			2,176	5,077	10,880		10,880
	LA-12 増			2,755	6,429	5,740		5,740
	LA-1 増	1,960	5,879	1,176	2,744	9,799		9,799
6,000	基本			5,454	12,725	16,361		16,361
	LA-12 増			5,977	13,947	11,385		11,385
	LA-1 増	2,976	8,928	7,142	16,666	23,808		23,808
10,000	基本	3,958	11,874	9,499	22,164	23,747	23,747	
	LA-12 増	3,068	9,203	22,086	51,535	30,676	30,676	
	LA-1 増	6,805	20,414	6,124	14,289	17,011	17,011	
20,000	基本	11,137	33,410	20,046	46,774	100,231	100,231	
	LA-12 増	6,905	20,716	41,432	96,675	110,486	110,486	
	LA-1 増	14,514	43,543	8,709	20,320	58,057	58,057	
40,000	基本	27,350	82,049	32,819	76,579	123,073	123,073	
	LA-12 増	23,192	69,575	55,660	129,872	123,688	123,688	
	LA-1 増	31,038	93,114	18,623	43,453	82,768	82,768	
80,000	基本	60,780	182,341	60,780	141,821	141,821	141,821	
	LA-12 増	55,447	166,340	93,150	217,351	133,072	133,072	
	LA-1 増	65,608	196,824	39,365	91,851	98,412	98,412	

着陸回数は離陸回数と同数

表-A.5 月別平均気温 (°C)

月	札幌	東京	那覇
1	-3.2	5.8	17.3
2	-2.8	6.1	17.8
3	1.1	8.9	18.8
4	7.4	14.4	21.4
5	13.0	18.7	24.2
6	17.2	21.8	26.9
7	20.4	25.4	29.1
8	22.2	27.1	29.0
9	18.3	23.5	27.9
10	12.2	18.2	25.7
11	5.0	13.0	22.6
12	-1.3	8.4	19.1

東京の気温は、現要領の設計例の値

その他の地域は、2000年から2009年までの10年間の月別平均気温