

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.681

March 2012

空港アスファルト舗装の補修設計法の違いが オーバーレイ厚に及ぼす影響

若月岳晴・坪川将丈・水上純一・齊藤泰

Effect of Rehabilitation Design Methods
on Overlay Thickness of Airport Asphalt Pavement

Takeharu WAKATSUKI, Yukitomo TSUBOKAWA, Junichi MIZUKAMI and Yutaka SAITOU

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

空港アスファルト舗装の補修設計法の違いが オーバーレイ厚に及ぼす影響

若月岳晴*・坪川将丈**・水上純一***・齊藤泰****

要 旨

平成23年4月に空港舗装補修要領が改定され、補修設計において理論的設計法が標準的な照査方法の一つとなった。理論的設計法を用いる利点は、これまでの経験等から設定していたオーバーレイ厚を理論的・力学的に検討することが可能となったことであるが、実務における検討事例が少ないのが現状である。

本検討では、補修設計として、空港アスファルト舗装の損傷に対して理論的設計法でオーバーレイ厚の試算を行い、これまでの経験的設計法で求められるオーバーレイ厚との傾向の比較を行った。また、理論的設計法で使用する設計パラメータがオーバーレイ厚に及ぼす影響を整理した。

キーワード：空港アスファルト舗装，補修設計，理論的設計法，経験的設計法

* 空港研究部 空港施設研究室 交流研究員（株式会社 日本空港コンサルタンツ）

** 空港研究部 主任研究官

*** 空港研究部 空港施設研究室長

**** 空港研究部 空港施設研究室 研究官

Effect of Rehabilitation Design Methods on Overlay Thickness of Airport Asphalt Pavement

Takeharu WAKATSUKI^{*}, Yukitomo TSUBOKAWA^{},
Junichi MIZUKAMI^{***} and Yutaka SAITOU^{****}**

Synopsis

“Airport pavement maintenance and rehabilitation manual” in Japan was revised in April 2011. In this revision, empirical-mechanistic design method was introduced as one of standard design method for rehabilitation of airport pavement. It is possible to design overlay thickness theoretically by using this design method. However, there are few cases of rehabilitation design which this design method was used. In this note, overlay thicknesses of airport asphalt pavement designed by both empirical-mechanistic design method and empirical design method were compared. Furthermore, effect of design parameters used for the empirical-mechanistic design method on overlay thickness was studied.

Key Words: airport asphalt pavement, rehabilitation, empirical-mechanistic design method, empirical design method

^{*} Researcher, Airport Facilities Division, Airport Department (Japan Airport Consultants, Inc.)

^{**} Senior Researcher, Airport Department

^{***} Head, Airport Facilities Division, Airport Department

^{****} Researcher, Airport Facilities Division, Airport Department

目 次

1. はじめに	1
2. 補修設計法の違いによるオーバーレイ厚の比較	2
2.1 各補修設計法によるオーバーレイ厚算定方法の概要	2
2.2 計算条件	4
2.2.1 共通条件	4
2.2.2 経験的設計法に係わる条件	7
2.2.3 理論的設計法に係わる条件	8
2.3 補修設計法の違いによるオーバーレイ厚の比較	11
2.4 まとめ	15
3. 理論的設計法のパラメータの感度分析	16
3.1 気温の影響	16
3.2 路床支持力の影響	18
3.3 まとめ	20
4. おわりに	20
参考文献	21
付録 検討条件の詳細	22

1. はじめに

平成 20 年 7 月に空港舗装設計要領(以下、「設計要領」という)¹⁾が改定され、空港舗装の新設時の設計方法は、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。

それを受けて平成 23 年 4 月に空港舗装補修要領(以下、「補修要領」という)²⁾が改定され、空港舗装の補修時の設計方法についても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。

補修要領は、設計要領と同様、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。

補修設計における性能照査の方法としては、理論的設計法と経験的設計法がある。経験的設計法による補修設計では、既設舗装の健全度による評価結果のほか、設計対象機種、設計反復作用回数および路床の設計 CBR といった少ない設計パラメータでオーバーレイ厚を設計できる。これまでの経験の蓄積から、経験的設計法に基づき設計されたオーバーレイ厚についても、舗装構造に対する安全性が確保されることが十分にわかっていることから、求められる性能を満足しているとみなすことができる。

一方、理論的設計法によって補修設計を行う場合、既設舗装の健全度による評価結果のほかに、舗装を構成する材料の物性値に関わる材料条件、交通量・荷重作用頻度・載荷時間等に関わる交通条件および温度に関わる環境条件などの各条件に対し設計パラメータを個々に設定する必要がある。このように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、パラメータの違いによる結果の変動傾向が明らかではない。そのため、設計にあたって各パラメータの設定値に求められている精度を判断することが難しい。

このような背景から、本検討では補修設計として、幾つか想定した既設舗装の損傷状態に対して理論的設計法でオーバーレイ厚の試算を行い、以下の 2 点について検討した。

1 点目は、滑走路端部中央帯を対象に経験的設計法と理論的設計法のオーバーレイ厚の比較を行い、補修設計法の違いがオーバーレイ厚に及ぼす影響を考察した。これは、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

とを目的としている。

2 点目は、設計パラメータがオーバーレイ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、それぞれの項目がオーバーレイ厚に及ぼす影響の程度を考察した。

なお、本検討では、経験的設計法で設計された空港アスファルト舗装を補修の対象とした。また、理論的設計法を用いて検討を進めるにあたっては、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、路盤・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がある。このうち、路盤・路床の支持力の照査については、これまでの空港舗装における経験上、既設舗装の路床土や粒状路盤材の材料性状に問題がなければ、航空機の繰り返し走行による路床土の過大な塑性変形は発生しないとみなされることから照査対象から省いた。

本資料の構成は、次のとおりである。

2 章では、経験的設計法と理論的設計法によるオーバーレイ厚の比較を行った。

3 章では、設計パラメータがオーバーレイ厚へ及ぼす影響について感度分析を行った。

4 章で全体のまとめを行った。

2. 補修設計法の違いによるオーバーレイ厚の比較

2章では、はじめに、各補修設計法によるオーバーレイ厚の計算方法について整理した。

次に、比較に用いる計算条件を設定し、滑走路端部中央帯を対象にしたオーバーレイ厚の算出を通して、経験的設計法と理論的設計法によるオーバーレイ厚の比較を行った。

2.1 各補修設計法によるオーバーレイ厚算定方法の概要

(1) 経験的設計法のオーバーレイ厚算定方法

経験的設計法では、解体調査の評価に基づきオーバーレイ厚を算定する。表・基層及びアスファルト安定処理上層路盤に用いられているアスファルト混合物に対しては、解体調査結果を用いて補修要領に記載されている表-1および表-2により評価する。表-1は既設舗装のアスファルト混合物層各層のマーシャル安定度試験による健全度評価の目安値である。表-1により各層に対して引き続き表・基層として、もしくはアスファルト安定処理上層路盤として使用してよいか健全度評価を行う。表-2は、既設舗装各層の上層路盤としての等価値で、オーバーレイを行う場合に、表-1で健全度評価した各層に対して、マーシャル安定度試験結果等で等価値による評価を行う。

オーバーレイ厚は、表-1および表-2による各層の健全度評価結果・等価値を用いて、補修要領の付録に示されている算定条件 a)~c)により選定される(1)~(3)式を用いて求める。

なお、オーバーレイの設計を行うにあたって、各層の考え方は図-1のとおりである。

表-1 マーシャル安定度試験による健全度評価の目安値

表・基層		アスファルト安定処理上層路盤	
マーシャル安定度	評価	マーシャル安定度	評価
8.8kN 以上	A	4.9kN 以上	E
4.9kN 以上 8.8kN 未満	B		
3.45kN 以上 4.9kN 未満	C	3.45kN 以上 4.9kN 未満	F
3.45k 未満	D	3.45k 未満	G

ここに、

A：表・基層として引き続き使用しても問題ない。

B：切削が望ましいが、存置する場合は、表・基層として扱うことができる（構造設計においては、アスファルト混合物層としてみなしてよい）。

C, F：切削が望ましいが、存置する場合は、アスファルト安定処理上層路盤として扱うことができる（構造設計においては、アスファルト混合物層としてみなしてよい）。

D, G：切削が望ましいが、存置する場合は、粒状路盤として扱う（構造設計においては、アスファルト混合物層とはみなさない）。

E：アスファルト安定処理上層路盤として引き続き使用しても問題ない。

表-2 既設舗装各層の上層路盤としての等価値

材料名	状 況	等価値
表・基層のアスファルト コンクリート	ひび割れがなく、マーシャル安定度が4.90kN以上	2.0
	ひび割れがなく、マーシャル安定度が3.45kN以上	1.5
	ひび割れが多く、アスファルト安定処理材の材質を満足しない	1.0
アスファルト安定処理材	マーシャル安定度が4.90kN以上	2.0
	マーシャル安定度が3.45kN以上	1.5
	アスファルト安定処理材の材質は満足しないが、粒度調整砕石なみには扱える	1.0
セメント安定処理材	一軸圧縮強度が2.9N/mm ² 以上	1.5
石灰安定処理材	セメント安定処理材、石灰安定処理剤の材質は満足しないが、粒度調整砕石なみには扱える	1.0
水硬性粒度調整鉄鋼スラグ	一軸圧縮強度が1.2N/mm ² 以上かつ修正CBR \geq 80	1.5
スラグ	修正CBR \geq 80	1.0
粒度調整砕石	修正CBR \geq 80	1.0

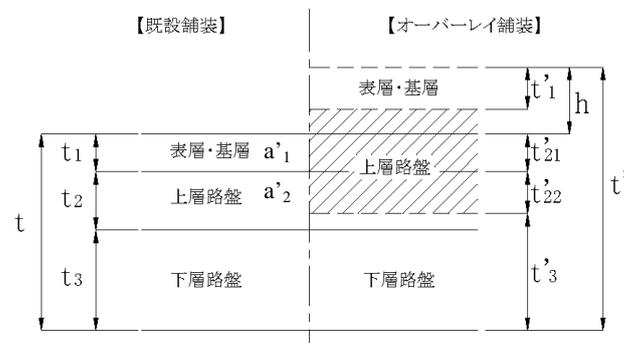


図-1 オーバーレイ舗装構造の説明図

a) $t' - (t'_1 + \sum_{i=1}^n a'_i t'_{2i} + t'_3) < 0$ で、しかも既設舗装の

表層、基層が新しい舗装の基層として使用できる場合

$$h = t'_1 - \frac{t'_1 + \sum_{i=1}^n a'_i t'_{2i} + t'_3 - t'}{a'_1} \quad (1)$$

b) $t' - (t'_1 + \sum_{i=1}^n a'_i t'_{2i} + t'_3) < 0$ であるが、既設舗装の

表層、基層が新しい舗装の基層として不適當で上層路盤とみなされる場合

$$h = t'_1 \quad (2)$$

c) $t' - (t'_1 + \sum_{i=1}^n a'_i t'_{2i} + t'_3) > 0$ の場合

$$h = t' - (\sum_{i=1}^n a'_i t'_{2i} + t'_3) \quad (3)$$

ここに、

t_1, t_2, t_3 : 既設舗装の表基層、上層路盤、下層路盤

t' : 新しい舗装の基準舗装厚

t'_1 : 新しい舗装の表・基層厚

$t'_{21}, t'_{22} \dots$: 新しい舗装の上層路盤として考えられる層の厚さ

t'_3 : 新しい舗装の下層路盤として扱う層の厚さ

$a'_1, a'_2 \dots$: 各層の等価値

(2) 理論的設計法のオーバーレイ厚算定方法

理論的設計法では、既設のアスファルト混合物層を解体調査によって得られるマーシャル安定度試験結果を用いて補修要領に記載されている表-1により評価する。表-1により各層に対して引き続きアスファルト混合物層としてみなしてよいか健全度評価した後、評価結果をもとにオーバーレイ厚の算定を行う。

オーバーレイ厚は、アスファルト混合物層下面に生じる引張りひずみを用いて補修後設計供用期間に生じる累積疲労度(DF₂)を計算し、その値が設計限界値以下であることを確認することで設計を行う。なお、累積疲労度の設計限界値は、舗装が破壊に至る累積疲労度 1.0 から、補修時点での累積疲労度(DF₁)を控除して設定する。累積疲労度は、疲労破壊曲線を示す式より求めたアスファルト混合物層が破壊に至るまでの許容繰返し回数と、航空機毎のパス/カバレッジ率、タイヤの走行確

率密度及び交通量を用いて算定した疲労度を累積して求める。

アスファルト混合物層の疲労破壊曲線は、補修要領に記載の(4)式を用いた。

$$N_f = \alpha \times \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^\beta \times \left(\frac{1}{E}\right)^\gamma \quad (4)$$

N_f : 破壊に至るまでの許容繰返し回数

ε : アスファルト混合物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)

α, β, γ : 定数 ($\alpha=7.681 \times 10^{-6}$, $\beta=6.333$, $\gamma=3.374$)

航空機 i による疲労度は、補修要領に記載されている(5)~(7)式を用いることにより得られる。

疲労度を(5)式により求めるためには、(6)式で得られるパス/カバレッジ率を用いる。パス/カバレッジ率は、カバレッジに対する交通量(=パス)の比率で、航空機のタイヤが常に同一地点を走行しないことを考慮するためのものである。なお、(6)式でパス/カバレッジ率を求めるために、(7)式により得られるタイヤの走行確率密度を用いる。タイヤの走行確率密度は、航空機により横断方向走行位置の標準偏差、タイヤ配置位置が異なることを考慮するためのもので、その模式図を図-2に示す。

$$FD(i, x) = \frac{n(i)}{N_f(i) \times P/C(i, x)} \quad (5)$$

$$P/C(i, x) = \frac{1}{\sum_{j=1}^n C_j(x) \cdot W_j} \quad (6)$$

$$C_j(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu_j)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

$FD(i, x)$: 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)

μ_j : 中心線からタイヤ j 中心までの距離 (m)

σ : 横断方向走行位置の標準偏差 (m)

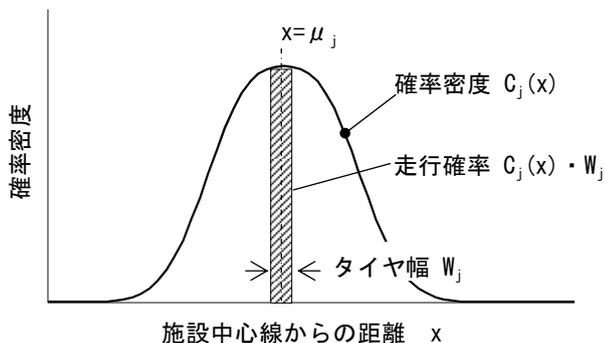


図-2 タイヤjの走行確率密度

累積疲労度は対象航空機の疲労度の重ね合わせであり、補修要領に記載の(8)式で求められる。図-3は、例えば3種類の航空機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。

$$CFD(x) = \sum_{i=1}^n FD(i, x) \quad (8)$$

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

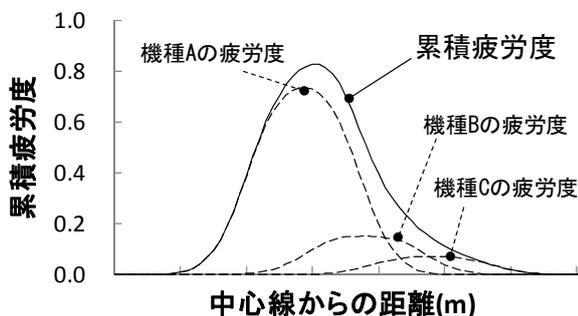


図-3 累積疲労度の概要

2.2 計算条件

2.2.1 共通条件

経験的設計法と理論的設計法のオーバーレイ厚を比較するにあたり、各補修設計法で共通する計算条件を抽出して整理した。

(1) 補修の目的

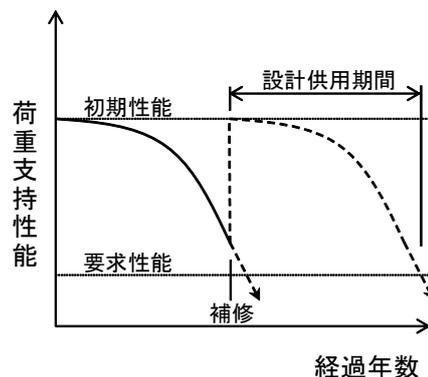
補修の目的は、図-4に示すように補修前後の荷重支持性能に対する要求性能の違いで異なり、主に「荷重支持性能の回復」と「舗装強度の増加」に分けられる。「荷重支持性能の回復」は、荷重支持性能に対する要求性能が舗装築造当時と同じ場合で、供用により低下した荷重支持性能を回復させることが補修の目的となる。一方、「舗装強度の増加」については、舗装築造当時の荷重支

持性能に対する要求性能が、交通量増大・就航機材大型化等により変更になった場合で、不足する荷重支持性能を補うことが補修の目的となる。

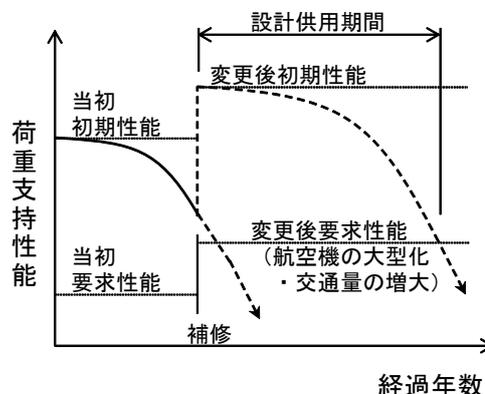
また、オーバーレイによる補修の目的は、図-5に示すように解体調査に基づく構造評価の違いでも異なる。

定期点検で路面性状に問題があると評価された場合に、それが構造に起因したものであるか評価するため非破壊調査・解体調査等が実施される。解体調査に基づく構造評価により、構造上問題がないと評価された場合は、走行安全性能および表層の耐久性能を回復させることが補修の目的となる。一方、構造上問題があると評価された場合については、荷重支持性能、走行安全性能および表層の耐久性能を回復させることが補修の目的となる。

本検討では、補修事例として多いと考えられる「荷重支持性能の回復」を補修の目的とし、解体調査に基づく評価で構造上問題があると評価された舗装状態に対し各補修設計法で求められるオーバーレイ厚を用いて比較を行った。



(a) 荷重支持性能の回復



(b) 舗装強度の増加

図-4 荷重支持性能の要求性能の違いによる補修目的

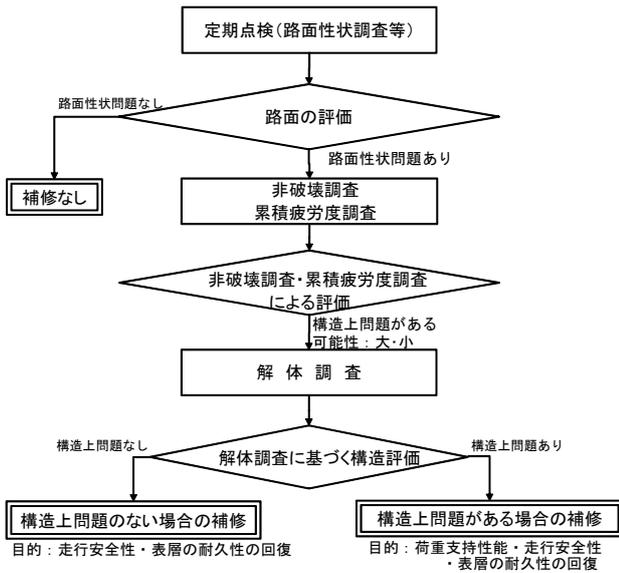


図-5 解体調査に基づく構造評価の違いによる補修目的

(2) 補修対象とした舗装

現在、空港で供用されているアスファルト舗装は、その多くが設計要領の施行前に築造されたもので、経験的設計法に基づいた空港舗装構造設計要領(以下、「旧設計要領」という)³⁾により設計されている。そこで、経験的設計法に基づいて設計された舗装を補修の対象とした。

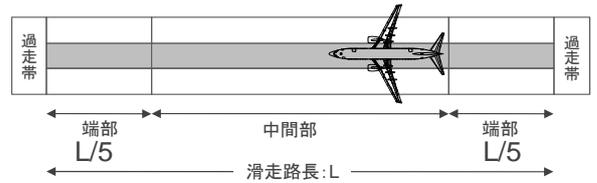
なお、本検討では、舗装は築造後にオーバーレイ等による補修が行われていない状態を想定した。

(3) 検討対象施設・舗装区分

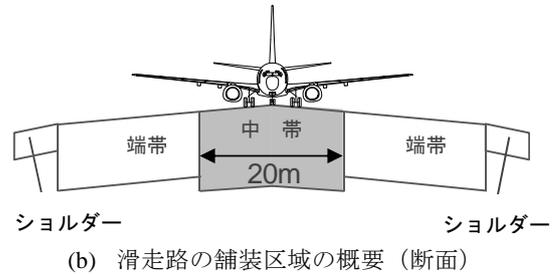
舗装厚は、施設や舗装区域ごとの走行特性に応じて異なる。本検討では、舗装厚が最も厚くなる滑走路端部中央帯を補修の対象として選定し、経験的設計法と理論的設計法のオーバーレイ厚の比較を行った。

表-3 施設・舗装区域の名称

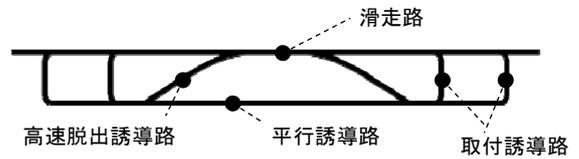
施設	舗装区域	
滑走路	端部	中央帯
		縁端帯
	中間部	中央帯
		縁端帯
	ショルダー・過走帯	
誘導路	取付・平行誘導路	
	高速脱出誘導路	



(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-6 施設・舗装区域の概要

(4) 設計供用期間

経験的設計法と理論的設計法のオーバーレイ厚の比較に用いる設計供用期間には、荷重支持性能に対する設計供用期間である 20 年を用いた。なお、理論的設計法については、設計供用期間 10 年についてもオーバーレイ厚の試算をおこない、設計供用期間の違いによるオーバーレイ厚の傾向を把握することとした。

(5) 既設舗装

a) 舗装構成

補修対象とした経験的設計法に基づくアスファルト舗装構成は、設計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設計 CBR が決まれば、基準舗装厚(表・基層厚と粒状材を路盤に用いた場合の路盤厚との合計厚)が得られる。本検討で用いた路床の設計 CBR10%における基準舗装厚は表-4 のとおりである。

施設・舗装区域に応じた舗装厚は、この基準舗装厚に対して表-5 に示す係数を乗じて求める。本検討では、滑走路端部中央帯を対象にするため、係数は 1.0 となり表-4 の基準舗装厚に対し減厚しない。

舗装構成は、表-5 で得られた基準舗装厚に対して、表-6、表-7 および表-8 を考慮して設定する。表-6 は表層・基層の合計厚の最小値、表-7 は上層路盤の標準厚

である。表-8 は上層路盤材料の等価値で、上層路盤材料に粒度調整砕石よりも良質な材料を用いる場合に、等価値による減厚を行うことができる。本検討では、上層路盤材料として、アスファルト安定処理材(等価値 2.0)を用いることとして、表-7 に示す上層路盤の標準厚に対して減厚を行った。表-9 に検討に用いた舗装構成を示す。

表-4 経験的設計法の基準舗装厚

設計反復作用回数区分	設計荷重区分	基準舗装厚 t (cm)
6,000 回以下	LA-12	74
10,000 回	LA-1	90
20,000 回	LA-1	96
40,000 回	LA-1	102
80,000 回	LA-1	109

表-5 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-6 表・基層合計最小厚 (cm)

設計反復作用回数区分	設計荷重区分		
	LA-1	LA-12	LA-2
6,000 回以下	14	13	12
10,000 回	15	14	12
20,000 回	15	14	12
40,000 回	16	15	-
80,000 回	17	16	-

表-7 上層路盤の標準厚 (CBR10%の場合)

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

表-8 上層路盤材料の等価値

材料名	主な材質	等価値
アスファルト安定処理材	マーシャル安定度(突き固め 75 回) 4.9kN 以上	2.0
	マーシャル安定度(突き固め 50 回) 3.45kN 以上	1.5
セメント安定処理材	一軸圧縮強度(材齢 7 日) 2.9N/mm ² 以上	1.5
石灰安定処理材	一軸圧縮強度(材齢 14 日) 2.9N/mm ² 以上	1.5
粒度調整砕石	修正 CBR80%以上	1.0

表-9 検討に用いた既設舗装構成

設計反復作用回数	設計荷重区分	表・基層 (cm)	As 安路盤 (cm)	As 合計厚 (cm)	粒状路盤 (cm)
6,000 回以下	LA-12	13	13	26	35
10,000 回	LA-1	15	15	30	45
20,000 回	LA-1	15	15	30	51
40,000 回	LA-1	16	15	31	56
80,000 回	LA-1	17	15	32	62

b) 既設舗装の状態

既設舗装の状態としては、舗装損傷事例として多いと考えられる表-10 および図-7 に示す舗装状態ケースを想定した。

舗装状態ケースは、アスファルト安定処理上層路盤の評価結果が異なる以下の3ケースを想定した。

舗装状態ケース 1 は、アスファルト安定処理上層路盤のマーシャル安定度が 4.9kN 以上あり、アスファルト安定処理上層路盤として引き続き使用しても問題なく、等価値は 2.0 と設定される状態を想定した。

舗装状態ケース 2 は、アスファルト安定処理上層路盤のマーシャル安定度が 3.45kN 以上 4.9kN 未満で、アスファルト安定処理上層路盤として扱い、等価値は 1.5 と設定される状態を想定した。

舗装状態 3 については、アスファルト安定処理上層路盤のマーシャル安定度が 3.45kN 未満で、粒状路盤として扱い、等価値は 1.0 と設定される状態を想定した。

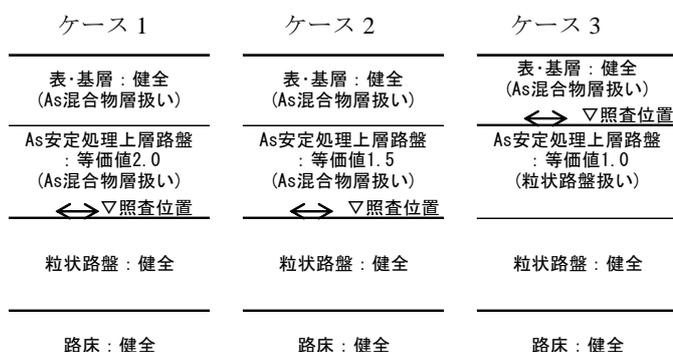
なお、舗装状態ケース 1~3 共通として、表・基層はマーシャル安定度 8.8kN 以上あり、引き続き表・基層として扱える状態、粒状路盤および路床については支持力低下・材料性状に問題がない健全な状態を想定している。

層間剥離については、補修要領で「層間剥離が発生している層まで撤去することを検討する必要がある。」

とされている。層間剥離の発生深さにもよるが、層間剥離を存置した場合、補修要領の設計例にもあるように大幅な増厚が必要となり、周辺へのすり付けが困難なことに加え、灯器・灯器配管の付け替え等も伴うことから、切削打換えを用いることが現実的である。以上のことから、層間剥離が発生した場合は、既設舗装の状態ケースから省いた。

表-10 既設舗装状態の設定

舗装状態 ケース	既設アスファルト混合物層各層の評価		粒状路盤・ 路床の評価
	表・基層	As 安定処理路盤	
1	表・基層として	等価値 2.0(As 混合物層扱い)	健全
2	引き続き扱える (As 混合物層	等価値 1.5(As 混合物層扱い)	
3	扱い)	等価値 1.0(粒状路盤扱い)	



(6) オーバーレイ最小厚

補修要領では、表層の施工上の最小厚はアスファルト混合物骨材最大粒径の 2.5 倍以上と規定されている。また、設計荷重 LA-3 以上の舗装の場合、表層に使用するアスファルト混合物の骨材最大粒径は、耐流動性を確保する観点から 20mm 以上を用いることが望ましいとされている。このことから、骨材最大粒径 20mm のアスファルト混合物を材料として使用した場合、オーバーレイの最小施工厚は 5cm となる。

本検討では、オーバーレイによる施工上の最小厚は 5cm とし、5cm 未満では切削打換え(切削+オーバーレイ)を行うものとした。

2.2.2 経験的設計法に係わる条件

(1) 設計反復作用回数，設計荷重区分

経験的設計法では、航空機の交通量を設計反復作用回数に換算して用いる。設計反復作用回数は、設計供用期間内に想定される航空機の離着陸回数を代表機種の交通量としてあらわしたもので、計算された反復作用回数に応じて表-11 に示す区分で表現される。設計荷重区分は、航空機の脚荷重や輪荷重の大きさ、接地圧等が考慮され機種に応じて表-12 に示すように LA-1 から LSA-2 まで分類される。一般に設計対象とする機種のうち、設計荷重区分が最大となる機種の設計荷重区分を用いて表現される。

本検討では、既往文献⁴⁾において整理された表-13 に示す現況交通量構成比をもとに、表-14 に示す設計反復作用回数および設計荷重区分を設定して用いた。

表-11 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
		アスファルト
～7,000 未満	6,000 回	a 区分
7,000 以上～	10,000 回	b 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

表-12 検討対象機種

運航機種	設計荷重区分
B747-400D	LA-1
B777-200	
B777-300	
A300-600	LA-12
B767-300	
A320-200	LA-2
MD-81	
MD-90	
B737-400	LA-3
B737-500	
B737-700	
B737-800	
DHC8-300	LA-4
DHC8-400	
トルニエ 228	LSA-1
BN-2	LSA-2

表-13 現況交通量の構成比率⁴⁾

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-14 検討に用いた設計反復作用回数区分

および設計荷重区分	
設計反復作用回数	設計荷重区分
3,000 回	LA-12
6,000 回	LA-12
10,000 回	LA-1
20,000 回	LA-1
40,000 回	LA-1
80,000 回	LA-1

(2) 路床の設計 CBR

路床の設計 CBR は、幾つかの空港の施工実績や試験舗装の事例を参考に 10% と設定した。

2.2.3 理論的設計法に係わる条件

(1) 交通条件

a) 交通量

理論的設計法では、交通量として離着陸する航空機数を機種毎に整理し、それを直接計算に用いるため、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想定交通量を理論的設計法に用いるものとした。

設計反復作用回数に応じた想定交通量としては、既往文献において整理された表-13 に示す現況交通量構成比をもとに設定された表-15⁴⁾の交通量を用いた。設計供用期間 10 年の場合、表-15 に示す供用 20 年交通量の 1/2 を用いた。

なお、表-15 に示す検討対象とした交通量における機種の諸元は付録の附表-1 に示す。

b) 施設区分別交通量

滑走路端部中央帯の交通量は、滑走路方向別利用率のうちの大きな値を、離陸回数、着陸回数それぞれに乗じた値の合計となる。

本検討では、滑走路方向別利用率は 7 : 3 とし、滑走路端部中央帯の交通量を設定した。

c) 走行条件

航空機の舗装への載荷時間は、アスファルト混合物の変形係数に影響する。

滑走路端部中央帯は、航空機の離着陸のタキシングに利用されるため、走行特性は低速走行(誘導路速度)となる。補修要領の設計例を参考に、載荷時間は 0.05 秒と設定した。

また、横断方向の走行位置の標準偏差については、補修要領の設計例に記載ある表-17 のとおりとした。

表-15 検討に用いた交通量 (滑走路, 設計供用期間 20 年, 離陸回数)⁴⁾

設計反復作用回数	LA-1		LA-12		LA-2	LA-3	
	B747 -400D	B777 -300D	A300 -B4	B767 -300	A320 -200	B737 -800	B737 -500
3,000			2,798	6,528	13,988		13,988
6,000			6,974	16,272	20,921		20,921
10,000	6,939	20,817	16,654	38,858	41,634	41,634	
20,000	15,254	45,761	27,457	64,066	137,284	137,284	
40,000	37,165	111,495	44,598	104,062	167,243	167,243	
80,000	82,215	246,644	82,215	191,834	191,834	191,834	

着陸回数は離陸回数と同数

表-16 滑走路端部中央帯の交通量算定方法

舗装区域	走行回数の算定方法
滑走路端部	(離陸回数+着陸回数)
中央帯	× 滑走路方向別利用率

表-17 走行条件

舗装区域	標準偏差			載荷時間
	航空機コード [*]	離陸	着陸	
滑走路端部	E,F	0.6m	0.6m	0.05 秒
中央帯	B~D	0.5m	0.5m	

(2) 累積疲労度の設計限界値

表・基層及びアスファルト安定処理上層路盤からなるアスファルト混合物層では、最下面となるアスファルト安定処理上層路盤下面で最も累積疲労度が大きくなるため、アスファルト安定処理上層路盤下面に着目して累積疲労度の設計限界値を設定する。

累積疲労度の設計限界値は、舗装が破壊に至る累積疲労度 1.0 から、補修時点での累積疲労度(DF₁)を控除して設定する。

補修時点での累積疲労度(DF₁)については、舗装を新設する場合では一般に荷重支持性能に対する設計供用期間 20 年で累積疲労度が 1.0 以下になるように設計されること、走行安全性能および表層の耐久性能に対しては設計供用期間 10 年とされていること、これまでの空港舗装における破損事例の調査結果⁵⁾をみると、10 年程度経過後に何らかの補修がおこなわれることが多いことを考慮して、供用期間 10 年相当の 0.5 から供用期間 20 年に近い 0.9 までを想定し、設計限界値を表-18 のとおり設定した。

アスファルト安定処理上層路盤のマーシャル安定度が低下して等価値が 1.0 と設定される場合は、アスファルト混合物層の最下面が基層下面になるため、基層下面の累積疲労度に着目して設計限界値が設定される。基層下面の補修時点での累積疲労度は、アスファルト混合物層の最下層に位置しておらず微小である。このため、基層下面の補修時点での累積疲労度は、補修要領の設計例と同じく考慮しないこととし、この状態における累積疲労度の設計限界値を 1.0 とした。

表-18 既設舗装の累積疲労度の設計限界値

	アスファルト安定処理上層路盤					基層
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0
補修時点での累積疲労度 DF ₁	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0
設計限界値	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	1.0

(3) 環境条件

多層弾性計算に用いるアスファルト混合物層の変形係数は、温度の影響を受ける。

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がある。

本検討では、補修要領に記載の月別の平均温度を用いる方法である(9)式により、オーバーレイ層と既設ア

スファルト混合物層の月別平均温度を算定した。

なお、月別平均気温は、補修要領の設計例に記載ある「東京」の表-19 に示す月別平均気温を用いた。

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

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
オーバーレイ層	As
表・基層	As
上層路盤	As 安定処理
下層路盤	砕石

図-8 標準的な補修における舗装構成

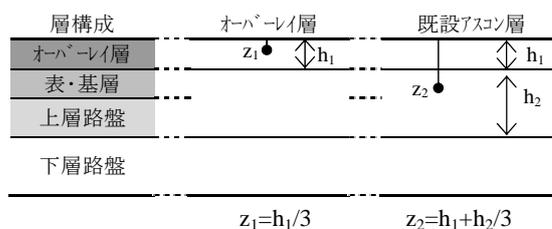


図-9 各層における温度算出位置

表-19 「東京」の月別平均気温

月	平均気温 (°C)	月	平均気温 (°C)
1月	5.8	7月	25.4
2月	6.1	8月	27.1
3月	8.9	9月	23.5
4月	14.4	10月	18.2
5月	18.7	11月	13.0
6月	21.8	12月	8.4

(4) 材料条件

a) 舗装材料の物性値

既設のアスファルト舗装およびオーバーレイに用いるアスファルトバインダの種類は、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。アスファルト舗装に関する物性値は、幾つかの空港の施工実績や試験舗装の事例を参考に表-20 のとおり設定した。

なお、疲労・劣化等による既設舗装のアスファルト混合物の物性値の性状変化については、疲労・劣化等が変

形係数に及ぼす影響が明らかとなっていないため、本検討では考慮しないこととした。

表-20 アスファルト舗装の物性値

項目	設定値
アスファルトバインダ	
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 g/cm ³
アスファルト混合物	
アスファルト配合率	5.5 %
密度	2.4 g/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
粒状路盤	
弾性係数	200 MPa
ポアソン比	0.35
路床	
設計 CBR	10 %
弾性係数	100 MPa
ポアソン比	0.35

b) アスファルト混合物の変形係数

補修要領では、アスファルト混合物の変形係数(S_{mix})を求める式として(10)式が記載されている。この(10)式は、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アスファルト混合物の変形係数(S_{mix})を算出する Heukelom, Klomp による実験式⁶⁾である。本検討ではこの(10)式を用いてアスファルト混合物の変形係数(S_{mix})を算出した。

$$S_{mix} = S_{bit} \cdot \left(1 + \frac{2.5}{n} \cdot \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^n \quad (10)$$

ここに、

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

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、アスファルトバインダの変形係数(S_{bit})については、補修要領に記載のある(11)式に示す算式を用いた。

$$S_{bit} = 1.157 \times 10^{-7} \cdot t_w^{-0.368} \cdot \exp(-PI) \cdot (T_{RB} - T)^5 \quad (11)$$

S_{bit} : アスファルトバインダの変形係数 (MPa)

t_w : 荷重時間 (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 : 荷重時の舗装温度 (°C)

一例として、オーバーレイ厚 7cm, 既設アスファルト混合物層厚 30cm, 荷重時間 0.05 秒, 気温については東京の月別平均気温とした場合の各層の舗装温度と変形係数(S_{mix})を表-21 に示す。

表-21 気温と変形係数の一例

月	月平均 気温 (°C)	変形係数 S_{mix} (MPa)			
		オーバーレイ 層	既設 As 層	オーバーレイ 層	既設 As 層
1	5.8	10.1	9.6	8,700	9,100
2	6.1	10.5	9.9	8,500	8,900
3	8.9	13.8	13.0	6,500	7,000
4	14.4	20.4	19.0	3,400	4,000
5	18.7	25.6	23.7	1,800	2,300
6	21.8	29.4	27.1	970	1,400
7	25.4	33.7	31.0	390	710
8	27.1	35.7	32.9	230	470
9	23.5	31.4	28.9	660	1,100
10	18.2	25.0	23.1	1,900	2,500
11	13.0	18.8	17.4	4,100	4,700
12	8.4	13.2	12.4	6,900	7,300

c) 粒状路盤・路床の弾性係数

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⁶⁾⁷⁾⁸⁾。Heukelom ら⁶⁾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(12)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⁷⁾。このことより、本検討における路床の弾性係数は $10 \times CBR$ (MPa)とした。

粒状路盤材の弾性係数(E_b)については、路床の弾性係数の 2 倍前後と設定している例⁸⁾⁹⁾が多く、補修要領の設計例でも $E_b=200$ MPa の値を用いている。このことを参考に、本検討における路盤材の弾性係数(E_b)としては $E_b=200$ MPa を用いることとした。

$$E_g = C_g \cdot CBR \quad (12)$$

C_g : 定数 (5 ≤ C_g ≤ 25)

2.3 補修設計法の違いによるオーバーレイ厚の比較

前項 2.2 により設定した経験的設計法と理論的設計法の比較検討に用いる計算条件は、表-22 に示すとおりである。

比較にあたり、はじめに各補修設計法で設計供用期間 20 年の場合におけるオーバーレイ厚の傾向を整理した。なお、理論的設計法については、設計供用期間 10 年の場合におけるオーバーレイ厚の傾向もあわせて整理した。

次に、荷重支持性能に対する設計供用期間である 20 年における経験的設計法と理論的設計法のオーバーレイ厚の比較を行った。

表-22 経験的設計法と理論的設計法の比較検討に関わる計算条件

計算条件	設定値	各設計法で用いる計算条件	
		経験的設計法	理論的設計法
対象施設	滑走路端部 中央帯	○	○
既設舗装構成	表-9	○	○
既設舗装の状態	表-10	○	○
累積疲労度の設計限界値	0.1~0.5, 1.0		○
設計供用期間	10 年		○
	20 年	○	○
設計交通量	設計反復作用回数 3,000~80,000 回	○	
	設計反復作用回数に相当する機材別離着陸回数 表-15		○
航空機機種・諸元	付表-1		○
設計荷重区分	表-14	○	
滑走路方向別利用比率	7:3		○
載荷時間	表-17		○
横断方向走行位置の標準偏差	表-17		○
物性値	表-20	※	○
気温地域	東京：表-19		○

※路床の設計 CBR のみ

(1) 舗装状態ケース 1

本ケースは、アスファルト安定処理上層路盤のマシナル安定度が 4.9kN 以上あり、等価値は 2.0 と設定されるケースである。各補修設計法とも、構造上問題がないと評価されるため、走行安全性能および表層の耐久性

能を回復させることが補修の目的となる。しかしながら、理論的設計法では、補修時点までの累積疲労度(D_{F1})がゼロではないことから、既設舗装に対し幾らかの累積疲労度(D_{F1})の蓄積があることを想定してオーバーレイ厚の試算を行った。このため、本ケースでは、理論的設計法のオーバーレイ厚の傾向のみ整理した。

図-10(a)・(b)は、舗装状態ケース 1 における理論的設計法のオーバーレイ厚の傾向を示したものである。

また、図-11(a)・(b)については、オーバーレイ厚と累積疲労度(D_{F2})の関係を示すものとして、各設計反復作用回数におけるオーバーレイ厚とアスファルト安定処理上層路盤下面の累積疲労度(D_{F2})の算定結果を整理したものである。

a) 理論的設計法におけるオーバーレイ厚の傾向

図-10(a)・(b)に示すように、オーバーレイ厚は、設計反復作用回数に着目した場合、設計反復作用回数が大きいほどオーバーレイ厚は厚くなる傾向があり、その傾向はオーバーレイ厚により設計反復作用回数 3,000 回、6,000 回~10,000 回および 20,000~80,000 回の範囲の 3 つのグループに分けられる。具体的には、設計反復作用回数が 6,000~10,000 回および 20,000~80,000 回の各範囲で、累積疲労度の設計限界値の増減によるオーバーレイ厚は同程度の傾向を示す。

その理由としては、図-11(a)・(b)に示すように、設計反復作用回数の各範囲でオーバーレイ厚の増厚に伴う累積疲労度(D_{F2})の減少傾向が同程度であるためである。

本検討で補修対象とした経験的設計法で設計された既設舗装のアスファルト混合物層厚は、表-23 に示すように設計反復作用回数 6,000 回と 10,000 回で、それぞれ 26cm, 30cm と異なるが、オーバーレイ厚の増厚に伴う累積疲労度(D_{F2})の減少傾向は同程度である。20,000~80,000 回の範囲についても同様、既設舗装のアスファルト混合物層の厚さは各設計反復作用回数で 30cm, 31cm および 32cm と異なるが、オーバーレイ厚の増厚に伴う累積疲労度(D_{F2})の減少傾向は同程度である。

以上のように、経験的設計法で設計された既設舗装では、設計反復作用回数が 6,000~10,000 回および 20,000~80,000 回の各範囲でオーバーレイ厚の増厚に伴う累積疲労度(D_{F2})の減少傾向が同程度であるため、累積疲労度の設計限界値により設定されるオーバーレイ厚も同様の傾向を示すと考えられる。

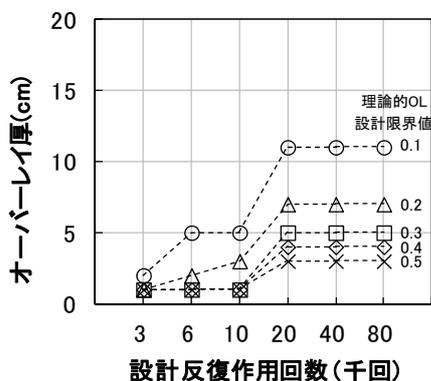
設計供用期間 10 年と 20 年のオーバーレイ厚の違いとしては、図-10(a)・(b)に示すように設計反復作用回数

と累積疲労度の設計限界値が同一条件の場合、設計供用期間 20 年のオーバーレイ厚のほうが、設計供用期間 10 年のオーバーレイ厚よりも最大 4cm 程度厚くなる傾向を示す。

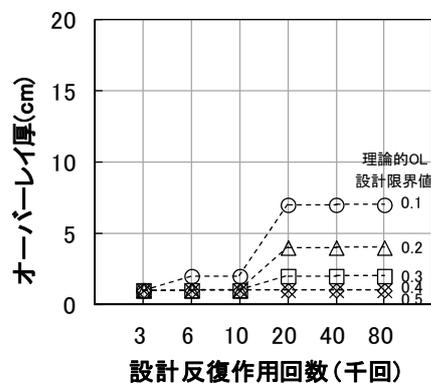
これは、設計供用期間 20 年の交通量が 10 年の交通量より大きいため、設計供用期間 20 年で発生する累積疲労度(DF₂)は、10 年で発生する累積疲労度(DF₂)より大きくなる。この累積疲労度(DF₂)をオーバーレイによって設計限界値以下に抑えるために、設計供用期間 20 年のオーバーレイ厚は 10 年のオーバーレイ厚より厚くなる傾向を示す。

表-23 既設舗装のアスファルト混合物層厚

設計反復作用回数	表・基層 (cm)	As 安路盤 (cm)	As 合計厚 (cm)
3,000	13	13	26
6,000	13	13	26
10,000	15	15	30
20,000	15	15	30
40,000	16	15	31
80,000	17	15	32

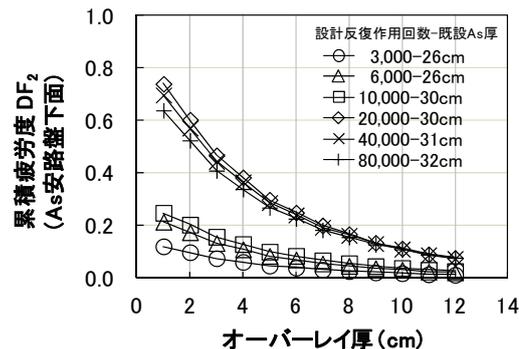


(a) 設計供用期間 20 年

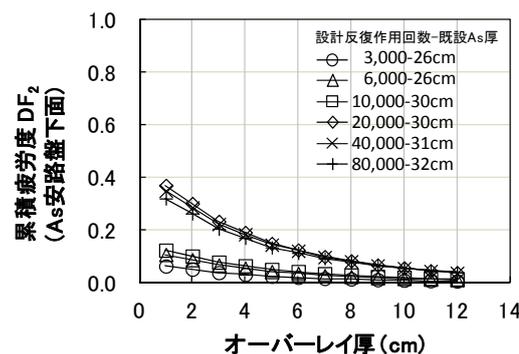


(b) 設計供用期間 10 年

図-10 理論的設計法のオーバーレイ厚の傾向



(a) 設計供用期間 20 年



(b) 設計供用期間 10 年

図-11 理論的設計法におけるオーバーレイ厚と累積疲労度(DF₂)の関係

(2) 舗装状態ケース 2

図-12(a)は、アスファルト安定処理上層路盤のマーシャル安定度が 3.45kN 以上 4.9kN 未満で、等価値は 1.5 と設定される舗装状態ケース 2 において、設計供用期間 20 年における経験的設計法と理論的設計法のオーバーレイ厚を比較した結果である。図-12(b)については、設計供用期間 10 年における理論的設計法のオーバーレイ厚の傾向を示したものである。

a) 各補修設計法におけるオーバーレイ厚の傾向

i) 経験的設計法のオーバーレイ厚の傾向

図-12(a)に示すように、オーバーレイ厚は、設計反復作用回数の大きさに関係せず、同程度の厚さとなる傾向を示す。

オーバーレイ厚が同程度の厚さとなる傾向を示す理由としては、表-23 に示すように経験的設計法で設計された既設舗装のアスファルト安定処理上層路盤厚は、設計反復作用回数の大きさにあまり関係せず 13~15cm とほぼ同じ厚さであるためである。

経験的設計法では、既設舗装厚から等価値を用いて換算舗装厚を求め、基準舗装厚と比較して不足分をオーバーレイ厚で補う。換算舗装厚を求める際にアスファルト安定処理上層路盤厚に等価値を乗じるが、各設計反復

作用回数におけるアスファルト安定処理上層路盤厚はほぼ同じ厚さであり、基準舗装厚に対し不足する厚さもほぼ同じ厚さとなる。

このため、オーバーレイ厚は設計反復作用回数の大きさに関係せずほぼ同じ厚さとなる傾向を示す。

ロ) 理論的設計法のオーバーレイ厚の傾向

理論的設計法のオーバーレイ厚の傾向は図-12(a)・(b)に示すとおりである。

本舗装状態ケース 2 におけるオーバーレイ厚は、舗装状態ケース 1 のオーバーレイ厚と同じである。

これは、理論的設計法では、アスファルト安定処理上層路盤のマーシャル安定度が 3.45kN 以上確保されている場合、舗装状態ケース 1(マーシャル安定度 4.9kN 以上、等価値 2.0)と舗装状態ケース 2(マーシャル安定度 3.45kN 以上 4.9kN 未満、等価値 1.5)は同じアスファルト混合物層として扱われるためである。

b) オーバーレイ厚の比較

図-12(a)に示すように、設計反復作用回数 3,000 回の場合、経験的設計法のオーバーレイ厚は、理論的設計法のオーバーレイ厚より厚くなる傾向を示す。6,000～10,000 回の範囲では累積疲労度の設計限界値(DF₂)が 0.1～0.2 の中間、20,000～80,000 回の範囲については 0.4 の時における理論的設計法のオーバーレイ厚と経験的設計法のオーバーレイ厚は同程度である。

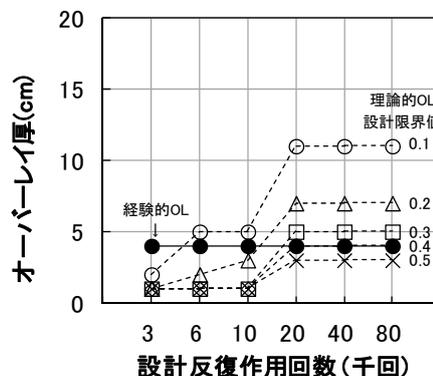
このように、経験的設計法と理論的設計法でオーバーレイ厚の傾向が異なる。そこで、経験的設計法と理論的設計法でオーバーレイ厚が異なる理由について考察した。

経験的設計法では、補修時点までの既設舗装のダメージは、マーシャル安定度によって設定される等価値により評価される。補修後の設計供用期間の交通量による舗装へのダメージについては、オーバーレイによる補修後舗装の換算舗装厚と新設舗装における基準舗装厚とを比較して、換算舗装厚が基準舗装厚を満足していることを確認することで「みなし」により考慮され、補修後の交通量による舗装へのダメージを直接的かつ定量的に評価していない。

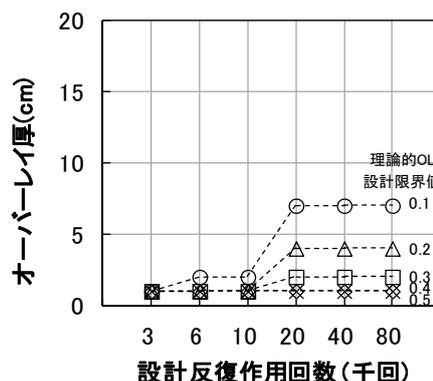
一方、理論的設計法における交通量による舗装へのダメージは、累積疲労度の概念を用いて定量的に評価している。補修時点までの既設舗装のダメージは、累積疲労度(DF₁)により、補修後の設計供用期間の交通量による舗装へのダメージについても累積疲労度(DF₂)によ

て評価される。

以上のように、経験的設計法と理論的設計法で交通量による舗装へのダメージを評価する方法が異なることがオーバーレイ厚の違いとしてあらわれていると考えられる。



(a) 設計供用期間 20 年



(b) 設計供用期間 10 年

図-12 各補修設計法によるオーバーレイ厚の比較

(3) 舗装状態ケース 3

図-13(a)は、アスファルト安定処理上層路盤のマーシャル安定度が 3.45 未満で、粒状路盤として扱われ、等価値は 1.0 と設定される舗装状態ケース 3 において、設計反復作用回数 20 年における経験的設計法と理論的設計法のオーバーレイを比較した結果である。図-13(b)については、設計供用期間 10 年における理論的設計法のオーバーレイ厚の傾向を示したものである。

また、図-14(a)・(b)については、オーバーレイ厚と累積疲労度(DF₂)の関係を示すものとして、各設計反復作用回数におけるオーバーレイ厚と基層下面の累積疲労度(DF₂)の算定結果を整理したものである。

a) 各補修設計法におけるオーバーレイ厚の傾向

イ) 経験的設計法のオーバーレイ厚の傾向

図-13(a)に示すように、オーバーレイ厚は、設計反

復作用回数の大きさに関係せず、同じ厚さとなる傾向を示す。

オーバーレイ厚が同じ厚さとなる傾向を示す理由としては、舗装状態ケース 2 の経験的設計法と同様、各設計反復作用回数におけるアスファルト安定処理上層路盤厚はほぼ同じ厚さであり、基準舗装厚に対し不足する厚さもほぼ同じ厚さになるためである。

このため、設計反復作用回数の大きさに関係せず、オーバーレイ厚はほぼ同じ厚さとなる傾向を示す。

ロ) 理論的設計法のオーバーレイ厚の傾向

理論的設計法のオーバーレイ厚の傾向は図-13(a)・(b)に示すとおりである。

オーバーレイ厚は、設計反復作用回数に着目した場合、設計反復作用回数が大きいほどオーバーレイ厚は厚くなる傾向があり、その傾向はオーバーレイ厚により設計反復作用回数 3,000～10,000 回および 20,000～80,000 回の範囲の 2 つのグループに分けられる。具体的には、設計反復作用回数 3,000～10,000 回の範囲で、設計反復作用回数の大きさに応じてオーバーレイ厚が厚くなる傾向を示すが、20,000～80,000 回の範囲では、設計反復作用回数の大きさに関係せず、オーバーレイ厚が同じ値となる傾向を示す。

このように、各設計反復作用回数の範囲で異なったオーバーレイ厚の傾向を示す理由としては、本ケースにおけるオーバーレイ厚の増厚に伴う累積疲労度(DF_2)の減少傾向が図-14(a)・(b)に示すように、各設計反復作用回数の範囲で異なった傾向を示すためである。

設計反復作用回数 3,000～10,000 回の範囲では、オーバーレイ厚の増厚に伴う累積疲労度(DF_2)の減少傾向は各設計反復作用回数により異なり、オーバーレイ厚が同じ厚さの場合では、設計反復作用回数が大きいほど累積疲労度(DF_2)は大きくなる傾向があるため、設計反復作用回数が大きいほどオーバーレイ厚は厚くなる。

一方、設計反復作用回数 20,000～80,000 回の範囲では、各設計反復作用回数におけるオーバーレイ厚の増厚に伴う累積疲労度(DF_2)の減少傾向が同程度であるため、設計反復作用回数の大きさに関係せず、オーバーレイ厚は同じ値になる傾向を示す。

なお、本検討では図-13(b)に示すように設計供用期間 10 年の 80,000 回におけるオーバーレイ厚が、20,000～40,000 回の範囲のオーバーレイ厚より 1cm 薄くなる傾向を示す結果となった。この理由としては、図-14(b)の累積疲労度算定結果に示すように、80,000 回にお

ける累積疲労度の算定結果(DF_2)が、他の 20,000～40,000 回よりも若干低くなる傾向を示すためである。

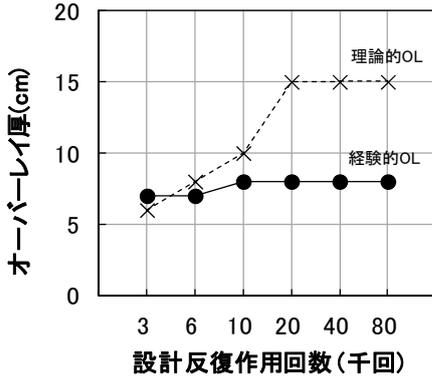
設計供用期間 10 年と 20 年におけるオーバーレイ厚の違いとしては、設計供用期間 20 年のオーバーレイ厚のほうが、10 年のオーバーレイ厚より最大で 4cm 程度厚くなる傾向を示す。

このように、オーバーレイ厚が設計供用期間で異なる理由は、舗装状態ケース 1 およびケース 2 と同様、交通量が大きくなると累積疲労度(DF_2)もあわせて大きくなるためである。

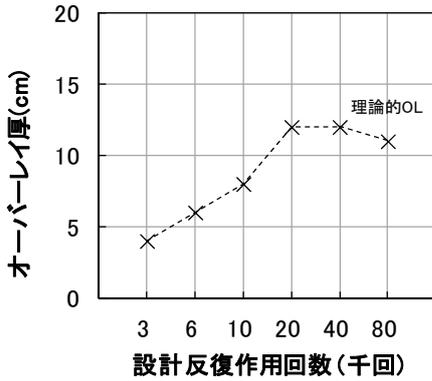
b) オーバーレイ厚の比較

図-13(a)に示すように、設計反復作用回数 3,000 回では経験的設計法のオーバーレイ厚は理論的設計法のオーバーレイ厚よりも厚くなる傾向を示す。一方、6,000～80,000 回の範囲では、経験的設計法のオーバーレイ厚は理論的設計法のオーバーレイ厚よりも薄くなる傾向を示す。

このように、本ケースで経験的設計法と理論的設計法のオーバーレイ厚が異なる理由は、舗装状態ケース 2 と同様、交通量による舗装へのダメージを考慮する方法が異なるためである。

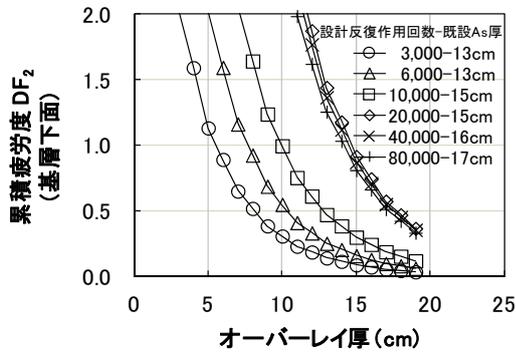


(a) 設計供用期間 20 年

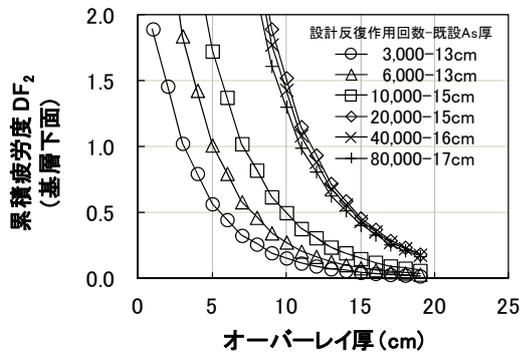


(b) 設計供用期間 10 年

図-13 各設計法によるオーバーレイ厚の比較



(a) 設計供用期間 20 年



(b) 設計供用期間 10 年

図-14 理論的設計法におけるオーバーレイ厚と累積疲労度(DF₂)の関係

2.4 まとめ

経験的設計法で設計された空港アスファルト舗装の補修設計法について、幾つか想定した既設舗装の損傷状態に対して経験的設計法と理論的設計法によるオーバーレイ厚の比較を行った。

本検討で得られた成果は以下のとおりである。

(経験的設計法について)

- ① 舗装損傷状態が同じ場合、オーバーレイ厚は設計反復作用回数の大きさに関係せず、同じ厚さになる傾向がある。

(理論的設計法について)

- ② 舗装損傷状態および累積疲労度の設計限界値が同じ場合、設計反復作用回数が大きいほどオーバーレイ厚は厚くなる傾向を示す。
- ③ 舗装損傷状態および累積疲労度の設計限界値が同じ場合、設計反復作用回数 20,000~80,000 回の範囲のオーバーレイ厚は同程度の厚さとなる傾向がある。
- ④ 設計供用期間 20 年のオーバーレイ厚は、設計供用期間 10 年のオーバーレイ厚よりも最大で 4cm 程度厚くなる傾向がある。

(経験的設計法と理論的設計法の比較結果について)

- ⑤ 舗装状態及び設計反復作用回数により、経験的設計法と理論的設計法のオーバーレイ厚の傾向は異なる。
表・基層および粒状路盤・路床が健全である場合の経験的設計法と理論的設計法のオーバーレイ厚の傾向は表-24 に示すとおりである。

表-24 オーバーレイ厚の傾向(設計供用期間 20 年)

舗装状態	As 安路盤の等価値	設計反復作用回数	累積疲労度設計限界値(DF ₂)	オーバーレイ厚の傾向
2	1.5	3,000	0.1~0.5	経験 > 理論
		6,000~10,000	0.1	経験 < 理論
			0.2~0.5	経験 > 理論
		20,000~80,000	0.1~0.3	経験 < 理論
			0.4	経験 ≒ 理論
		0.5	経験 > 理論	
3	1.0	3,000	1.0	経験 > 理論
		6,000~80,000	1.0	経験 < 理論

3. 理論的設計法のパラメータの感度分析

3.1 気温の影響

a) 目的

理論的設計法では、設計に用いるアスファルト混合物の変形係数が舗装温度の影響を受けるため、寒冷または温暖な地域においてはオーバーレイ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があるが、本検討では補修要領の設計例に記載されている月別の平均温度による方法に基づいた。

地域としては、寒冷の代表として札幌、標準として東京、温暖には那覇を取り上げ、これらの地域におけるオーバーレイ厚の比較を行った。

b) 検討条件

3地域を気温を図-15に示す。また、気温変化に伴う変形係数(S_{mix})の傾向の一例として、オーバーレイ層7cm、既設舗装のアスファルト混合物層厚30cm、載荷時間0.05とした場合の月別平均気温における各層の変形係数を図-16および図-17に示す。図-16はオーバーレイ層、図-17については既設アスファルト混合物層の変形係数(S_{mix})の傾向を示したものである。3地域の詳細な気温は付表-2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-20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-25の値とした。検討条件は表-26のとおりとした。

既設舗装の状態は、理論的設計法ではアスファルト安定処理上層路盤のマーシャル安定度が3.45kN以上確保されている場合、アスファルト混合物層として扱われる。そのため、前章で示したように舗装状態ケース1(マーシャル安定度が4.9kN以上)と舗装状態ケース2(マーシャル安定度が3.45kN以上4.9kN未満)は同じオーバーレイ厚となることから区別せず扱うこととした。

表-25 アスファルト種類による物性の違い

項目	As60-80	As80-100
針入度 (1/10mm)	70	90
軟化点 (°C)	48	46
PI	-0.91	-0.80

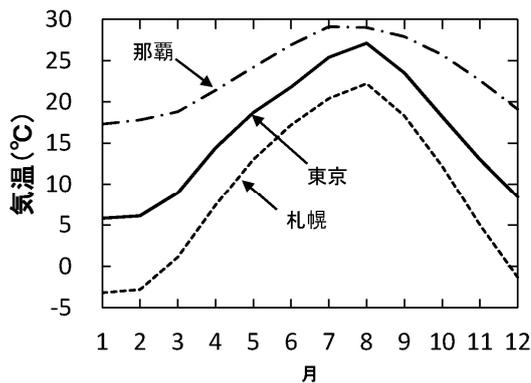


図-15 地域の違いによる気温の傾向

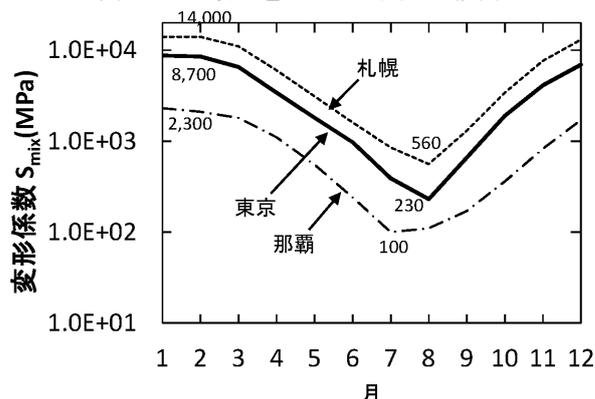


図-16 地域の違いによるオーバーレイ層の変形係数の傾向

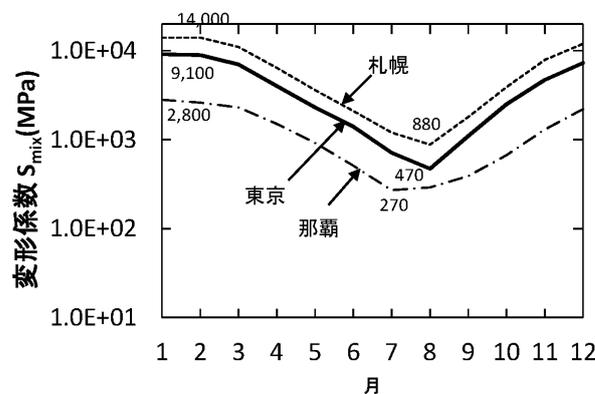


図-17 地域の違いによる既設アスファルト混合物層の変形係数の傾向

表-26 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路 端部 中央帯
既設舗装構成	表-9
既設舗装の状態	表-10
累積疲労度の設計限界値	0.1~0.5, 1.0
設計供用期間	10年, 20年
交通量	6,000~80,000回
交通量の構成	表-13
物性値	表-20
気温地域	札幌, 東京, 那覇: 付表-2

c) 考察

図-18(a)～(d)は東京の気温によるオーバーレイ厚と、札幌・那覇の気温によるオーバーレイ厚とを比較した結果である。

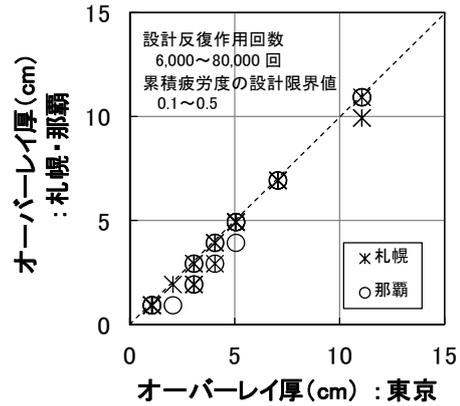
また、気温の違いが累積疲労度にどのように表れるか傾向を把握するために、オーバーレイ厚とアスファルト混合物層最下面の累積疲労度算定結果との関係を整理した。一例として、設計供用期間 20 年、設計反復作用回数 20,000 回の場合におけるオーバーレイ厚とアスファルト混合物層最下面の累積疲労度計算結果を図-19(a)・(b)に示す。

図-18(a)～(d)に示すように、舗装状態ケース 1～3 のいずれのケースにおいても、標準とした東京の気温によるオーバーレイ厚に対し、寒冷な地域の札幌および温暖な地域的那覇のオーバーレイ厚は最大でも 1cm 程度しか差がないことがわかる。

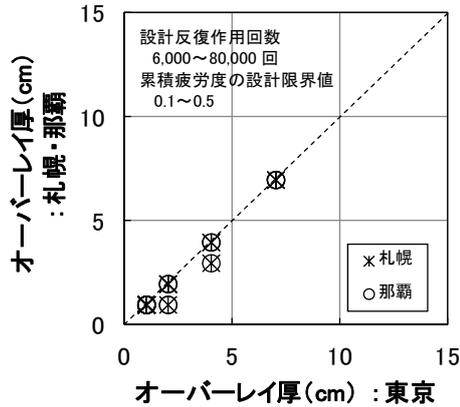
これは、気温の違いによってアスファルト混合物層の変形係数は異なるが、図-19(a)・(b)に示すようにオーバーレイ厚増厚に伴うアスファルト混合物層最下面の累積疲労度の減少傾向は、気温が異なる 3 地域とも同程度となる傾向を示すためである。

この理由としては、(4)式が示すようにアスファルト混合物層の疲労破壊回数は、ひずみと変形係数がともに分母にあるため、気温が高く変形係数が小さくとも、ひずみが大きければ相殺され、結果としてアスファルト混合物層の疲労度は高くないことが影響したと考えられる。

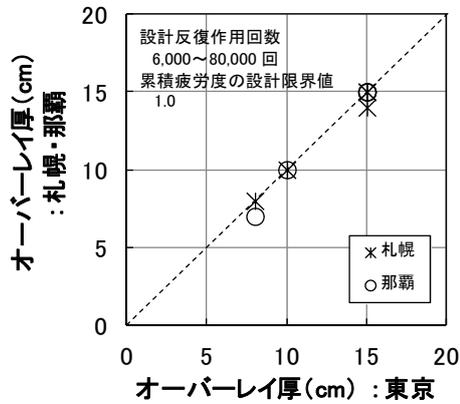
以上のことから、気温の違いによるオーバーレイ厚の差は小さいものと考えられる。



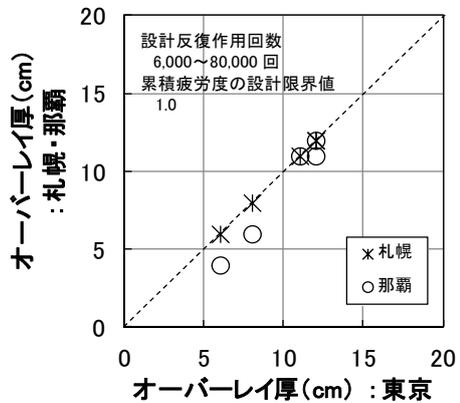
(a) 舗装状態ケース 1・2 (設計供用期間 20 年)



(b) 舗装状態ケース 1・2 (設計供用期間 10 年)

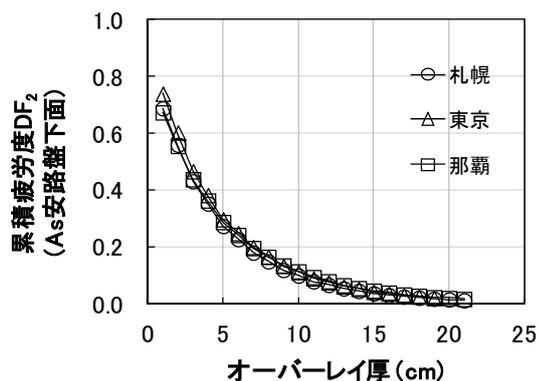


(c) 舗装状態ケース 3 (設計供用期間 20 年)

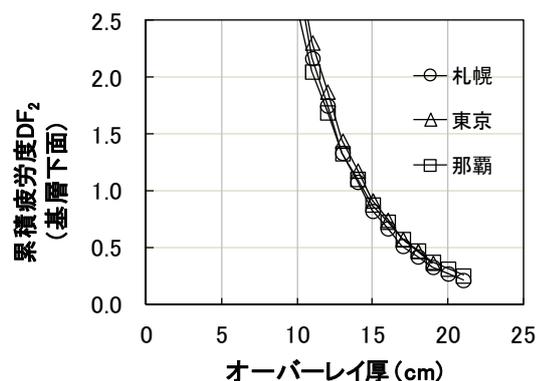


(d) 舗装状態ケース 3 (設計供用期間 10 年)

図-18 地域差によるオーバーレイ厚の影響



(a) 舗装状態ケース 1・2



(b) 舗装状態ケース 3

図-19 オーバーレイ厚と累積疲労度(DF_2)の関係
(設計供用期間 20 年, 設計反復作用回数 20,000 回)

3.2 路床支持力の影響

a) 目的

補修設計において、アスファルト舗装の疲労度を求める場合、アスファルト混合物層下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 $CBR \times 10$ (MPa) と想定している。路床支持力の検討ケースは、幾つかの空港の事例を参考に、路床支持力が低いケースに路床の設計 CBR 6%、標準ケースとして路床の設計 CBR 10%、高いケースには路床の設計 CBR 14% を取り上げ、これらの路床支持力におけるオーバーレイ厚の比較をおこなった。検討ケースを表-27 に示す。検討条件を表-28 に示す。

なお、路床支持力として検討に用いる路床の設計 CBR 6%・14% における既設舗装構成は、経験的設計法に基づき、表-29 に示すとおり設定した。路床の設計 CBR 10% における既設舗装構成については、2 章で既に設定しているのでここでは省略する。

表-27 比較ケース

ケース	路床の設計 CBR	弾性係数
1	CBR 6%	60 MPa
2	CBR 10%	100 MPa
3	CBR 14%	140 MPa

表-28 検討条件

条件	設定値
対象施設	滑走路 端部 中央帯
既設舗装構成	表-29, 路床の設計 CBR10%は表-9
既設舗装の状態	表-10
累積疲労度の設計限界値	0.1~0.5, 1.0
設計供用期間	10 年, 20 年
交通量	6,000~80,000 回
交通量の構成	表-13
物性値	表-20, 路床の設計 CBR は表-27 による
気温地域	東京: 表-19

表-29 検討に用いた既設舗装構成

設計反復 作用回数	設計荷重 区分	路床設計 CBR (%)	表・基層 (cm)	As 安 路盤 (cm)	As 合計厚 (cm)	粒状 路盤 (cm)
6,000 回	LA-12	6	13	18	31	61
		14	13	13	26	18
10,000 回	LA-1	6	15	18	33	84
		14	15	13	28	28
20,000 回	LA-1	6	15	18	33	93
		14	15	13	28	33
40,000 回	LA-1	6	16	18	34	102
		14	16	13	29	36
80,000 回	LA-1	6	17	18	35	110
		14	17	13	30	40

c) 考察

図-20(a)～(d)に路床支持力を変えた場合のオーバーレイ厚の比較結果を示す。

アスファルト安定処理上層路盤がアスファルト混合物扱いの舗装状態ケース 1・2 では、標準とした路床の設計 CBR10%のオーバーレイ厚に対し、路床支持力が低いケースである路床の設計 CBR6%におけるオーバーレイ厚は、最大で 4cm 薄くなる傾向を示す。一方、路床支持力が高いケースである路床の設計 CBR14%におけるオーバーレイ厚は、標準とした路床の設計 CBR10%のオーバーレイ厚よりも最大で 2cm 厚くなる傾向を示す。路床支持力が低いケース(路床の設計 CBR6%)と高いケース(路床の設計 CBR14%)とのオーバーレイ厚の差は、最大で 6cm となり本ケースでは路床支持力の影響は大きいものと考えられる。なお、この傾向は、設計供用期間 10 年および 20 年のいずれの場合においても同様である。

アスファルト安定処理上層路盤が粒状路盤扱いの舗装状態ケース 3 では、標準とした路床の設計 CBR10%のオーバーレイ厚に対し、路床支持力が低いケースの路床の設計 CBR6%および高いケースの路床の設計 CBR14%におけるオーバーレイ厚は、最大でも 1cm 程度しか差はないため、本ケースでは路床支持力の影響は小さいものと考えられる。なお、この傾向は、設計供用期間 10 年および 20 年のいずれの場合においても同様である。

このように、舗装状態ケース 1・2 と舗装状態ケース 3 で路床支持力の違いによるオーバーレイ厚の傾向が異なる。この理由としては、表-29 に示すように、経験的設

計法で設計された既設舗装のアスファルト安定処理上層路盤の厚さが路床の設計 CBR により異なることが影響していると考えられる。

舗装状態ケース 1・2 では、既設舗装のアスファルト混合物層厚は、表・基層厚とアスファルト安定処理上層路盤厚との合計厚となる。このうち、アスファルト安定処理上層路盤厚は路床の設計 CBR により異なり、路床支持力が低いケースである路床の設計 CBR6%と、路床支持力が高いケースの路床の設計 CBR14%とでは厚さに 5cm の差がある。この差が影響し、本ケースにおける既設舗装のアスファルト混合物層厚は、路床の設計 CBR の違いにより 5cm の差が生じており、これは路床支持力の違いによるオーバーレイ厚の差とほぼ等しい。

一方、アスファルト安定処理上層路盤が粒状路盤扱いの舗装状態ケース 3 では、既設舗装のアスファルト混合物層厚は表・基層厚のみとなり、その厚さは路床の設計 CBR の大きさに影響しない。そのため路床の設計 CBR の違いによる既設舗装のアスファルト混合物層厚の差はない。本ケースにおける路床支持力の違いによるオーバーレイ厚の差も 1cm 程度しかなく、路床支持力の違いによるアスファルト混合物層厚の差とほぼ同様の傾向を示しているといえる。

以上のように、経験的設法で設計された既設舗装では舗装状態ケース 1・2 と舗装状態ケース 3 で路床の設計 CBR による既設舗装のアスファルト混合物層厚が異なり、それがオーバーレイ厚に影響を及ぼしていると考えられる。

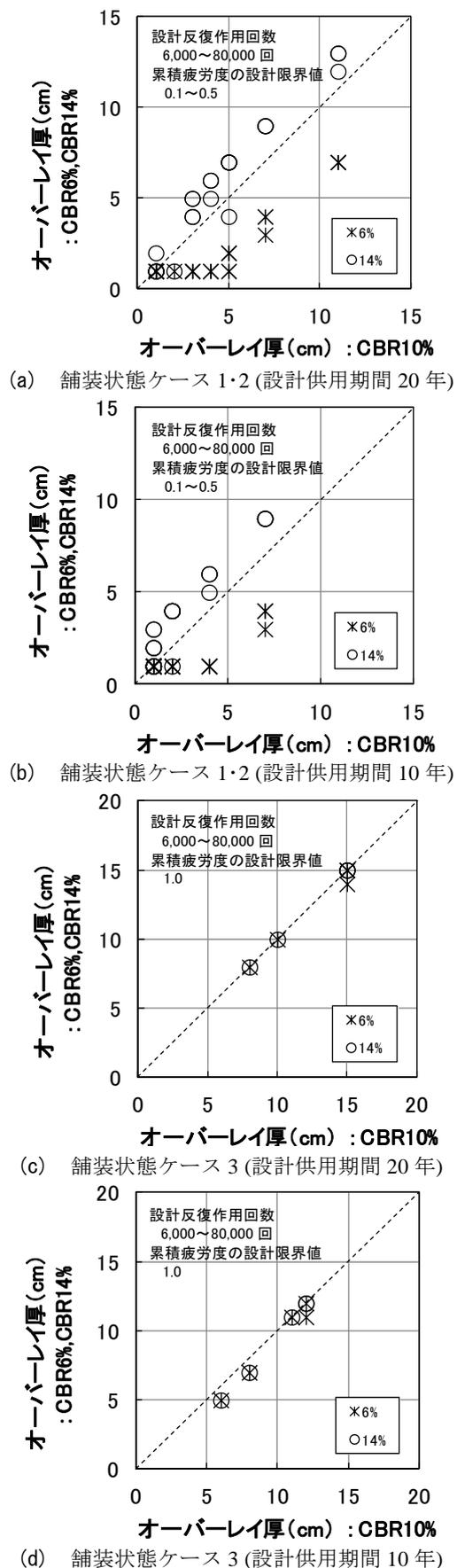


図-20 路床の設計 CBR が異なる場合の影響

3.3 まとめ

経験的設計法で設計された空港アスファルト舗装の理論的設計法による補修設計において、設計パラメータがオーバーレイ厚の算出結果に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。

(気温による影響)

- ① アスファルト混合物層最下面の累積疲労については、気温の違いによる影響が小さい。このため、アスファルト混合物層最下面の累積疲労度に着目してオーバーレイ厚を設定した場合、気温が違うことによるオーバーレイ厚の差は小さい。

(路床支持力の影響)

- ② 路床の設計 CBR が低い(CBR6%)既設舗装におけるオーバーレイ厚と、路床の設計 CBR が高い(CBR14%)既設舗装におけるオーバーレイ厚の差は最大で 6cm 程度生じるが、このオーバーレイ厚の差は、既設舗装のアスファルト混合物層厚が路床の設計 CBR により異なることに起因している。

4. おわりに

理論的設計法は、これまでの経験的設計法で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補修設計法である。しかしながら、理論的設計法での補修設計事例が少なく、理論的設計法のオーバーレイ厚と、経験的設計法によるオーバーレイ厚との傾向の違いが不明であった。また、理論的設計法は、オーバーレイ厚を経験等から少ない設計パラメータで設定していた経験的設計法と異なり、多岐に渡る設計パラメータを個々に設定する。これらの設計パラメータ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、補修設計事例が少なく、個々の設計で考察する必要があった。

本検討では、各補修設計法におけるオーバーレイ厚の傾向および補修設計法の違いがオーバーレイ厚に及ぼす影響について比較・整理できた。また、主要なパラメータについての影響の程度を検討し、整理できた。

補修設計法の違いによるオーバーレイ厚についての検討結果は 2 章の章末に、パラメータの感度分析については 3 章の章末に整理したとおりである。

参考文献

- 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：空港舗装補修要領及び設計例，2011.
- 3) (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.
- 4) 高橋真一・坪川将丈・水上純一・齋藤泰：空港舗装における理論的設計法パラメータの感度分析，国総研資料，No.633，2011.
- 5) 八谷好高，早野公俊，竹内康，今西健司，坪川将丈：空港アスファルト舗装の表面性状の実態，土木学会舗装工学論文集，第11巻，2006.
- 6) Heukelom,W. and A.J.G. Klomp: Road Design and Dynamic Loading.Proc.of AAPT, Vol.33,pp.92-125,1964
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.

(2012年2月14日受付)

付録 検討条件の詳細

付表-1 検討対象機種的主要諸元

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 ²)		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 ²)	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

付表-2 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

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 681 March 2012

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019