

空港舗装における各種路盤の“等価値”に関する提案

A PROPOSITION OF EQUIVALENCES OF BASE COURSES AND SUBBASES OF VARIOUS MATERIALS IN AIRPORT PAVEMENT

須田 熙*・佐藤 勝久**

By Hiroshi Suda and Katsuhisa Sato

1. ま え が き

道路であると、空港であるとを問わず、アスファルト舗装においては、路盤に粒状材よりも高級な材料を使用した場合には、粒状材を路盤に使用した舗装よりも舗装厚を薄くさせることができる。たとえば、50 cm 厚の粒度調整碎石路盤をより高級な材料に置き換えた場合に、25 cm 厚の路盤で十分であるとするならば、この材料は、 $50/25=2.0$ の等価値を有していると定義することにする。

道路舗装の舗装厚設計法は、空港舗装のそれ¹⁾²⁾と若干異なるために、空港舗装における等価値に匹敵するものは等値換算係数と呼ばれ、空港舗装が粒度調整碎石を基準としているのに対して、道路舗装では表層・基層の加熱アスファルト混合物を基準としている。しかし、相互の関連は容易につけられるので、等値換算係数を空港舗装における等価値に換算して比較すると表-1 のとおりである。道路舗装の等価値は、いうまでもなく、有名な AASHO 道路試験の結果を基礎に導かれたものであるが、空港舗装ではそれよりも一段と低い値が採用されている。その主な理由は、空港舗装に加わる荷重が、自動車荷重に比べてはるかに大きいことにある。たとえば、大型航空機の 1 脚の荷重は 80 t、1 輪の荷重は 20 t、接地圧は 14 kg/cm^2 に達する。しかし、空港舗装においては、AASHO のような大規模な試験はなされておらず、一部小規模な現場試験^{3)~5)}が行なわれているにすぎない。このために、道路舗装と同じ等価値を空港舗装に採用することに不安が残っているために、一段と低い値を使用しているのが実情である。

空港舗装におけるこのような基本的な問題点を解明するために、著者らは、昭和 43 年に延長 170 m、幅 8.8 m

の円形試験舗装を製作し、17 区画、24 種類の舗装を設け、昭和 44 年、45 年の両年度にわたり、実物大の航空機荷重を走行させて舗装の挙動を観測した。この一連の実験により、空港舗装の路床や路盤に関する問題点の解明に努めたが、本文は、このうちの、等価値の問題だけを取り上げた研究報告である。

本研究ではまず、荷重走行による舗装・路床の破壊状況を解析し、次に、種々の破壊要因に対する路盤の等価値を求め、最後に、砂路床で得られたこれらの等価値を、他の地盤でも適用できるかどうかを検討した。

2. 実験方法

(1) 実験概要

空港において、アスファルト舗装の破壊が多い場所は、航空機の静止荷重や低速走行荷重が作用するエプロン、誘導路、滑走路末端部などである。このような条件を考慮して、写真-1 のような延長 170 m、幅 8.8 m の円形の試験舗装を製作し、実物の大型航空機に等しい車輪配置と荷重を有するトレーラー（以下、原型走行荷重車と呼ぶ、写真-2 参照）を用いて、舗装上で静的載荷および低速走行を繰返し実施した。載荷に伴う各種試験の結果から、空港舗装での合理的な路盤の等価値の決定がなされた。試験舗装は、現場 CBR が 13 程度の砂路床上に作られ、舗装厚、路盤材料を種々に変えた 17 区画、24 種類の舗装から成っている。路床および舗装体内には、各種の電氣的計器が埋設され、円形舗装の中心にある測定室で集中計測された。

(2) 整地と路床製作

試験舗装を設置した場所は、ゆるやかな起伏のある海岸台地で、土質は統一土質分類で SP または SW で示される細砂と粗砂であった。載荷試験の結果に含まれる

* 正会員 青森県土木部港湾課長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所土質部土質試験課長

表-1 道路・空港舗装における各種の等価値

層	材 料 名	FAA法 (空港)	アスファルト協会法 (空港)	カナダ法 (空港)	AASHO (道路)	アスファルト舗装要綱 (道路)	土木学会各申 (空港)
表層・基層	中央プラント加熱混合アスコン	—	—	2.0	3.14	2.86	基層 $M > 400 \text{ kg}$ …1.5
	低安定度路上混合アスコン	—	—	—	1.43	—	—
	サンドアスファルト	—	—	—	2.88	—	—
路	アスファルト安定処理	1.5	滑走路長 1500 m 以下輪荷重 6.8 t 以下では 2.0 滑走路長 1500 m 以上では 1.5, ただし $M > 340 \text{ kg}$ (75 回)	1.5	粗粒混合 2.14 サンドアスファルト 1.79	$M > 350 \text{ kg}$ (50回)…2.28 $M > 250 \text{ kg}$ (50回)…1.85	$M = 300 \text{ kg}$ (50回) …1.5
	セメント安定処理	$\sigma_7 > 53 \text{ kg/cm}^2$ …1.5		—	$\sigma_7 > 46 \text{ kg/cm}^2$ …1.64 $\sigma_7 > 28 \text{ kg/cm}^2$ …1.43 $\sigma_7 < 28 \text{ kg/cm}^2$ …1.07	$\sigma_7 = 30 \text{ kg/cm}^2$ …1.57	$\sigma_7 > 20 \text{ kg/cm}^2$ …1.3
	浸透式マカダム	—	—	1.5	—	1.57	—
	リーコンクリート	—	—	2.0	—	—	$\sigma_7 = 50 \sim 210 \text{ kg/cm}^2$ …1.5
盤	マカダム	—	—	1.5	—	1.0	—
	石灰処理	—	—	—	1.07~2.14	—	—
	粒度調整碎石	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

σ_7 : 1 週間 1 軸圧縮強度 M: マーシャル安定度

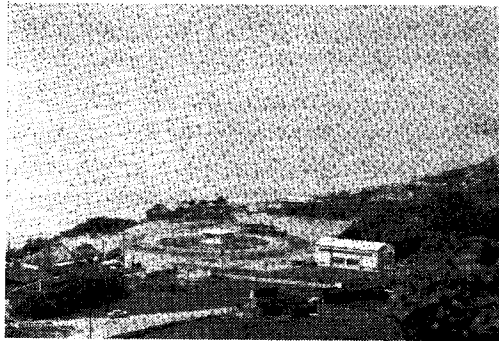


写真-1 試験舗装全景

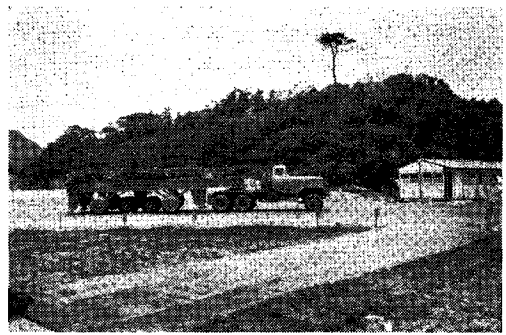


写真-2 原型走行荷重車

路床土の差異による影響をできるだけ小さくするために、舗装表面から 140 cm の深さまで掘削し、土を 1 個所に集めてよく混合し、均一な路床土を作り、1 層仕上り厚が 20 cm になるように 5 層に分けて転圧・敷設した。その結果、路床は表-2 に示されるように、ほぼ均一に仕上がった。

(3) 舗装構造と埋設計器

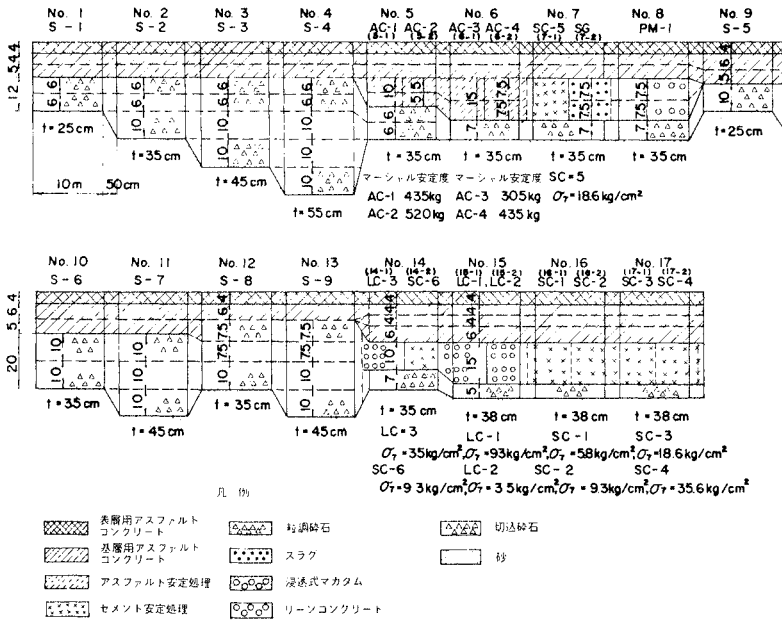
この試験舗装では、路盤の等価値の問題のほか、設計 CBR の問題、表層・基層の厚さや路盤の最小厚の問題などを検討することにした。図-1 は、試験舗装の構造と種類を示したものである。舗装区画 No. 1~No. 8 は、表層+基層厚を同じくして、路盤の等価値を主として検討しようとするもので、そのうち、No. 1~No. 4 は路盤が粒度調整碎石であって、等価値の検討の際の基準となる基準舗装である。No. 9~No. 17 は、等価値以外の問題を主として調べるものであるが、間接的に、等価値の問題も検討できる。1 区画の舗装の幅は 8.8 m、長さは中心線上で 10 m、内側へ向って 1.5% の片勾配

表-2 路床上の土質諸元

土 性	試 験 結 果
粒 度	$D_{10} = 0.2 \text{ mm}$ 内外, $D_{60} = 0.6 \text{ mm}$ 内外
統一土質分類名	SP (細砂)
比 重	2.73
最 適 含 水 比	12.1%
最大乾燥密度	1.815 g/cm^3
乾燥単位体積重量	平均 1.885 g/cm^3
現 場 CBR	平均 13.1
均 等 係 数	約 3.5

がついている。No. 5~No. 7, No. 14~No. 17 の区画では、同種の路盤ではあるが、若干材質の異なったものを 2 種類並べてある。このようにして、17 区画、24 種類の試験舗装が製作された。

測定計器は、図-2 に示すような舗装区画にそれぞれ埋設された。路床土圧計は路床の表面から 10 cm 下った位置 (No. 11 区画には、このほか深さ 90, 125, 160, 200 cm に土圧計を設置) に、沈下計は路床表面および舗装表面に、ひずみ計や温度計は表層・基層中に深さ 2~4 cm ごとにそれぞれ設置された。温度計を除いて他の計器は、舗装区画のほぼ中心付近に埋設した。埋設計



図一 試験舗装の構造と種類

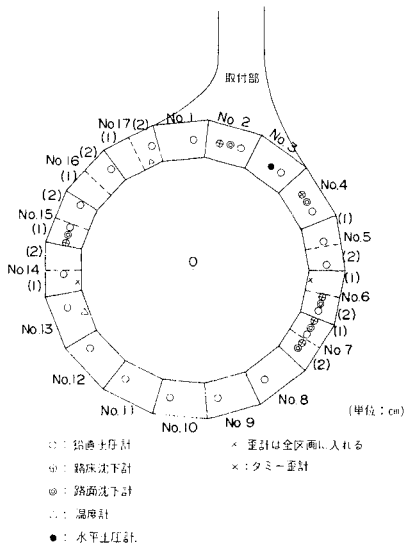
器の仕様概要を表一3に示す。

(4) 舗装の材料と施工管理

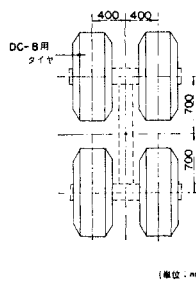
空港アスファルト舗装の材質や施工の条件は、道路舗装のそれと比べると若干きびしい面がある。これは航空機荷重が自動車荷重よりもはるかに重いことに由来している。試験舗装に使用された材料の粒度、材質および施工の基準は、通常空港舗装に使われているものである^{2),6)}。材質の目標値と舗設後の管理試験の平均値は表一4のとおりであり、平均値からのばらつきも少なく、ほぼ満足すべき舗設を行ない得たと考えられる。なお、各種路盤の粒度も、管理試験の結果、基準の範囲内におさまっている。

(5) 測定の種類と実験の経過

実験は、試験舗装上に原型走行荷重車を用いて、静的あるいは走行する荷重を加え、それに対する舗装の挙動を測定することによって実施された。原型走行荷重車の主車輪は、図一3に示すような配置であって、これは大型航空機 DC-8-63 の1脚の車輪配置に等しい。これに加わる荷重などは表一5のとおりであり、標準荷重と称するものは、DC-8-63 や巨人機 B-747 の満載時の輪荷重に匹敵する。また、軽荷重 A, B は、このような機種の着陸時荷重、燃料非積載時荷重に対応している。このほか、一部トラック荷重も載荷した。



図二 計器埋設位置



図三 原型走行荷重車主車輪

表一3 埋設計器仕様

測定項目	測定する層	使用計器	主な規格
応力	路床	カールソン型土圧計	定格容量 8 kg/cm ² (No. 3, 4, 11, 13)
			定格容量 16 kg/cm ² (他の区画)
沈下	路面	差動トランス型沈下計	定格容量 20 mm (調整付)
	路床	差動トランス型沈下計	定格容量 50 mm
ひずみ	表層・基層	ポリエステルゲージ	耐熱性、単軸、ゲージ長 67 mm ゲージ抵抗 120 Ω、ゲージ率 2.1
温度	表層・基層	カールソン型温度計	測定範囲 -30~+70°C

静的載荷試験では、これらの荷重を静止させて、舗装表層・基層内のひずみ、路床の土圧、路盤・路床の沈下、路面の沈下などを測定した。

動的載荷試験では、原型走行荷重車を 5 km/h と 15 km/h の速度で走行させて、静的載荷試験と同じ項目を測定した。

走行試験では、試験舗装上に走行線を定め、この上を繰返して図一3に示すような車輪荷重を通過させて、前記試験と同じ項目のほか、路面の凹凸の測定を行なった。走行速度は約 10 km/h である。荷重の走行線を図一

表-4 舗装材料の管理試験結果 (平均値)

材 種	材 質 試 験	目 標 値	舗 設 結 果	備 考
粒度調整砕石	密 度 (g/cm ³)	2.23 以上	2.23	JIS-A-1210-2.5, $r_{d \max}$ の 100% 以上
アスファルト 安定処理	安 定 度 (kg)	250, 350, 450	305, 435, 520	75 回突固め
	フ ロー 値 (1/100 mm)	10~40	24	
	空 げ き 率 (%)	3~12	14	
	アスファルト量 (%)	3.0, 3.5, 4.0	2.95, 3.45, 3.95	
セメント安定処理	締 固 め 度 (%)	96 以上	99.3	現場試験は冬期室内養生
	σ_7 (kg/cm ²)	10, 20, 30, 40	5.8, 9.3, 18.6, 35.6	
	セメント量 (%)	—	2, 4.1, 5.4	
ス ラ グ	密 度 (g/cm ³)	2.04	平均 2.279	JIS-A-1210-1.4, $r_{d \max}$ の 96% 以上
	ス ラ ン プ (cm)	1.942 以上	2.123	粒調に同じ。空冷高炉鉱さい
リーコンクリート	σ_7 (kg/cm ²)	—	8	普通ポルトランドセメント
	セメント量 (kg/m ³)	50, 80	35, 93	
	水セメント比	—	182, 215	
	細骨材率	—	87.9, 66.5	
	σ_{28} (kg/cm ²)	—	42.3, 39.6	
表層アスファルト コンクリート	密 度 (g/cm ³)	—	52, 188	75 回突固め
	安 定 度 (kg)	900 以上	1 043	
	フ ロー 値 (1/100 mm)	25~40	33	
	空 げ き 率 (%)	3~5	3.6	
基層アスファルト コンクリート	アスファルト量 (%)	6 以上	7.0	マーシャル基準密度 2.344 g/cm ³
	締 固 め 度 (%)	98 以上	100	
	安 定 度 (kg)	800 以上	1 032	
	フ ロー 値 (1/100 mm)	20~40	33	
表層アスファルト コンクリート	空 げ き 率 (%)	5~7	5.0	マーシャル基準密度 2.338 g/cm ³
	アスファルト量 (%)	5 以上	5.8	
	締 固 め 度 (%)	98 以上	101	
	安 定 度 (kg)	800 以上	1 032	

表-5 原型走行荷重車荷重

		タイヤ 内 圧 (kg/cm ²)	タイヤ 接 地 圧 (kg/cm ²)	タイヤ 接 地 面 積 (cm ²)	脚 荷 重 (t)
原型走行 荷重車	標準荷重	14.0	13.4	1 378	73.6
	軽荷重 A	〃	〃	1 189	63.2
	軽荷重 B	〃	〃	942	50.4
トラック	A	6.5			5
	B	〃			7

表-6 荷重走行回数

試験脚荷重 (t)	試験区画	走 行 期 間	走 行 線	走 行 回 数
標準荷重 (73.6 t)	全区画	44.4/14~6/12	2	223
			3	342
			4	203
	No. 6~7	45.5/21~5/25, 5/28	2	800
No. 15~16	45.5/26~5/27	2	800	
No. 2~4	45.5/28~6/8	2	500 (No. 2; 400)	
軽荷重 A (63.2 t)	No. 2~4	45.6/30~7/14	11	3 000 (No. 4; 4 000)
	No. 6~7	45.7/14~7/17	11	1 000
軽荷重 B (50.4 t)	全区画	44.10/6~12/17	21	2 000
			22	2 000
	No. 2~4	45.6/13~6/26	22	3 000

4 に、また走行回数を 表-6 に示す。

このほか、ベンケルマンビームによる路面のたわみ量試験、LCN 試験 (空港における特殊な平板載荷試験)、

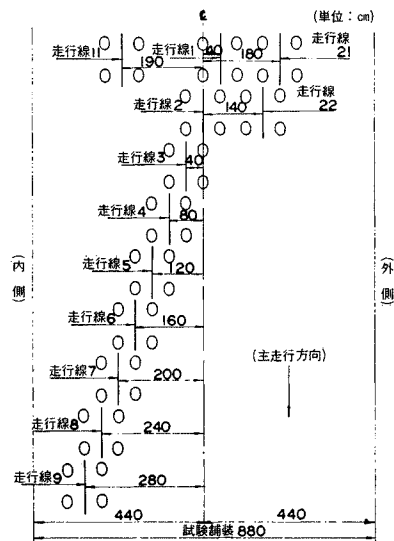


図-4 荷重走行線位置

平板載荷試験、実験終了後の舗装解体調査試験などを行った。

また、走行試験は、44年4月~6月、10月~12月、45年5月~7月に実施されたが、表層・基層内の温度は図-5 (昭和45年測定) に示すように変化しているの、各種測定結果に少なからぬ影響を与えていると考え

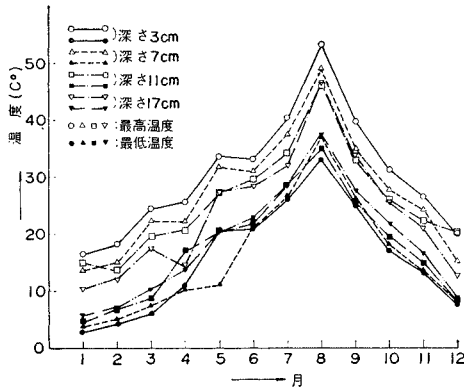


図-5 表層・基層の温度変化

られる（日最高温度と最低温度を、月ごとに平均したもの）。

(6) 舗装・路床の沈下の定義

以後、実験結果を解析するにあたって、舗装や路床の沈下の種類を図-6のように名づけることにする。

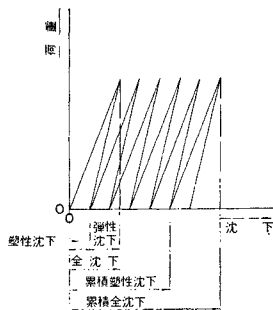


図-6 舗装・路床の沈下の定義

3. 試験荷重に対する舗装・路床の挙動

(1) 空港舗装の破壊基準

試験舗装の実験結果から、この舗装の各種路盤の等価値を求める際には、舗装の破壊の基準が必要となってくる。AASHOの道路舗装では、この基準として、サービス指数という概念が導入されたことはよく知られている。この概念の基礎となるものは、自動車交通に対する快適性ともいうべきものであった。しかし空港舗装では、乗心地や走行の快適性が舗装の評価を左右する重要な問題ではなく、むしろ、舗装の構造的破壊、表層材の破壊、わだち掘れなどが破壊の基準となっている。しかし、この基準が定量的に定まっているわけではなく、空港舗装の破壊基準を明確にすることはきわめて困難な現状である。

そこで、次節からは、試験荷重の繰返し走行（以下、繰返し走行回数を反復作用回数と呼ぶ）などによって、舗装各層や路床がどのような挙動を示したかを測定結果をもとに定量的に調べ、試験舗装が破壊状態に達しているかどうかを定性的に検討して見ることにする。

(2) 試験舗装厚と設計曲線

在来の空港アスファルト舗装厚の設計法^{1),2)}は、米国陸軍工兵隊によって確立されたもので、道路舗装厚の設計法の基礎となったものである。わが国でもこれに準拠しているが、舗装厚は、荷重条件と路床のCBR、反復作用回数が定まれば、設計曲線より簡単に求めることができる。この設計曲線を用いて、今回の試験荷重の条件と試験舗装厚に対して、必要な路床のCBRを逆算すると表-7のようになる。一方、製作された路床の現場CBRは約13であるから、この試験舗装は、試験荷重に対して、設計上は破壊またはそれに近い状態に達するものであるといえよう。

表-7 試験舗装厚と必要 CBR

荷重の種類	反復作用回数	舗装厚 35 cm (No. 2)	舗装厚 55 cm (No. 4)
標準荷重	800 回	必要 CBR 22	必要 CBR 12
軽荷重 A	1 000	21	11
軽荷重 B	3 000	21	11

(3) 路床の挙動

路床面から 10 cm 下った点の静止荷重に対する鉛直応力は、表-8 のとおりであった。また、路床中の鉛直応力の分布は図-7 のとおりで、一層の弾性理論から求めた値よりもやや大き目であった。舗装の表面と路床の累積塑性沈下と標準荷重の反復作用回数の関係の一例を図-8 と図-9 に示す（同じ反復作用回数で沈下量に差の起しているのは、測定した走行線の違いによるものである）。これらの舗装を試験終了後解体して求めた断面が図-10, 11 である。同様に、他の舗装の解体断面例を図-12~14 に示す。一般的にいえば、路床の累積塑性沈下は 20 mm 程度を越すと急激に大きくなり、路面の沈下に及ぼす路床の沈下の割合も半分以上であり、路床は破壊に達しているとみなすことができよう。全試験舗装を検討した結果、No. 1, 2, 9, 10, 12 舗装は、路床が破壊に達し、そのほかの舗装も破壊に近い状態になっているものと判定された。

(4) 路盤の挙動

図-10~14 を見てもわかるように、路面の累積塑性沈下は、その大部分が表層・基層・路床の累積塑性沈下であり、路盤面の累積塑性沈下は、その下の路床面の累

表-8 各舗装下の鉛直応力

試験区画	舗装厚 (計器埋設深さ) (cm)	ダンプトラック		原型走行荷重車		
		A	B	標準荷重	軽荷重A	軽荷重B
		5.0 t	7.05 t	73.6 t	63.2 t	50.4 t
No. 1 (S-1)	25 (35)	2.37	2.67	7.39	8.21	7.77
No. 2 (S-2)	35 (45)	2.22	2.51	9.80	8.33	6.55
No. 3 (S-3)	45 (55)	1.53	1.71	6.04	5.18	4.14
No. 4 (S-4)	55 (65)	1.07	1.30	4.80	3.83	2.74
No. 5-1(AC-1)	35 (45)	1.97	2.24	7.53	6.83	5.30
No. 5-2(AC-2)	35 (45)	1.99	2.14	6.35	6.03	5.15
No. 6-2(AC-3)	35 (45)	1.80	2.04	5.95	6.00	4.22
No. 7-1(SC-5)	35 (45)	1.44	1.77	6.73	5.65	4.64
No. 8 (PM)	35 (45)	1.76	2.09	6.52	6.46	6.02
No. 9 (S-5)	25 (35)	2.71	3.04	9.20	8.44	6.86
No. 10 (S-6)	35 (45)	2.05	2.54	7.91	7.75	6.38
No. 11 (S-7)	45 (55)	1.49	1.70	5.67	4.69	3.71
No. 12 (S-8)	35 (45)	1.77	2.11	6.84	6.77	5.36
No. 13 (S-9)	45 (55)	1.68	1.93	5.92	5.61	4.49
No. 14-1(LC-3)	35 (45)	0.88	1.06	4.15	3.58	2.86
No. 15-1(LC-1)	38 (48)	0.62	0.70	2.23	1.70	1.32
No. 15-2(LC-2)	38 (48)	1.12	1.38	3.78	—	2.61
No. 16-2(SC-2)	38 (48)	0.92	1.17	4.97	4.47	3.50
No. 17-2(SC-4)	38 (48)	0.87	1.04	4.20	3.74	2.91

(単位: kg/cm²)

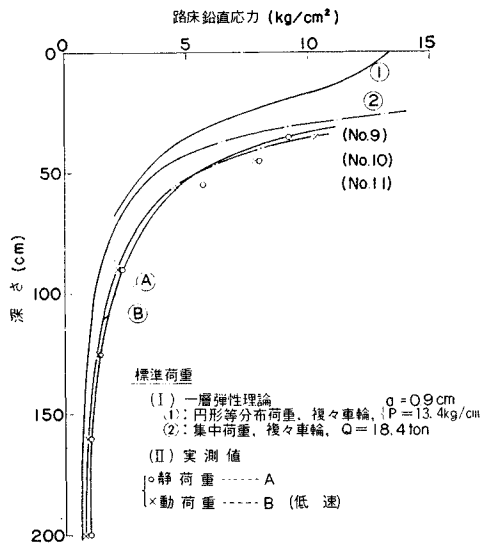


図-7 路床中の鉛直応力分布

積塑性沈下が、路盤面まで波及したものが大部分であると推定される。また、舗装の解体試験においても、路盤

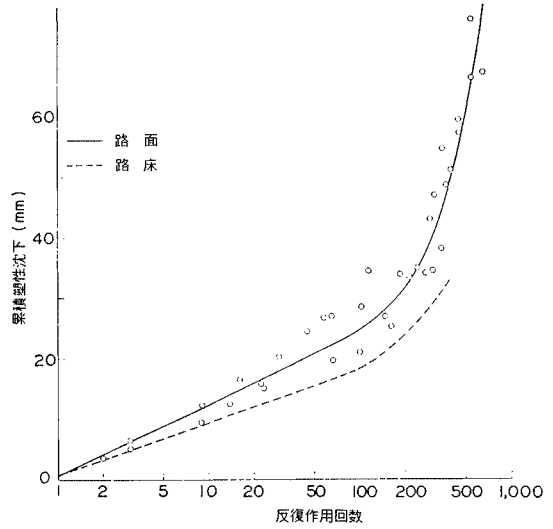


図-8 No. 2 (S-2) 舗装路面・路床の累積塑性沈下

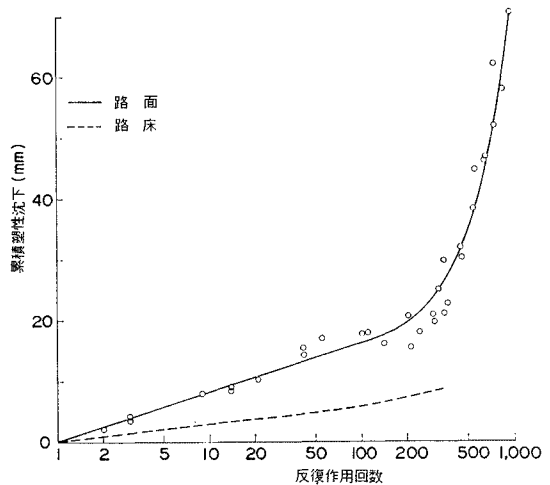


図-9 No. 4 (S-4) 舗装路面・路床の累積塑性沈下

自体の破壊を示すような、局所的な大きい累積塑性沈下や盛り上がり、および材料の粒状化は観察されなかった。セメント系の路盤は、荷重の繰返しにより粒状化し機能が低下してくるといわれている。本試験では表-6のように、大荷重の反復作用回数に比べて、舗装厚がやや薄みであることから、一種の破壊促進試験であったともいえる。しかし試験終了後、リーコンクリート路盤のクラック状況を観察しても、図-15のように粒状化現象は見られなかった。これらのことから、安定処理路盤も含めて、通常の航空機荷重の反復作用回数に対して、規定の材料を使用すれば路盤を舗装全体の破壊原因として考慮する必要はなさそうである。

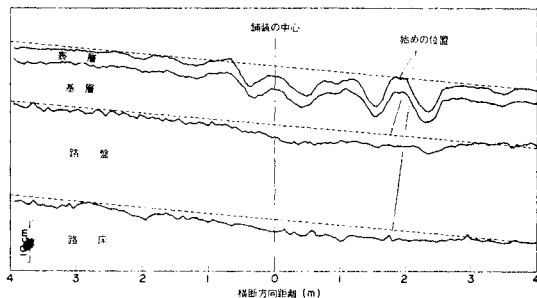


図-10 No. 2 (S-2) 舗装の解体断面図

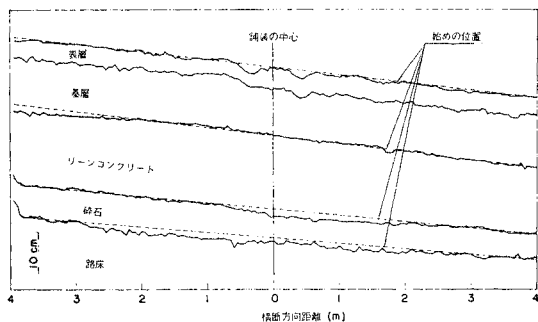


図-14 No. 15-1 (LC-1) 舗装の解体断面図

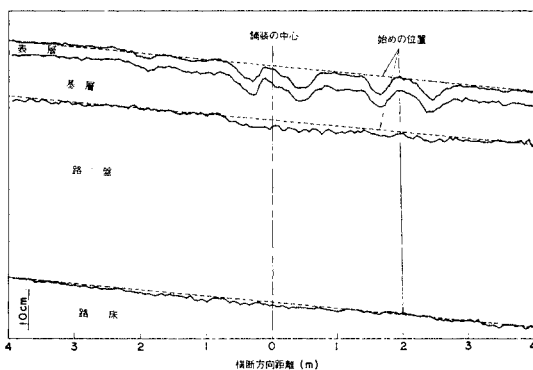


図-11 No. 4 (S-4) 舗装の解体断面図

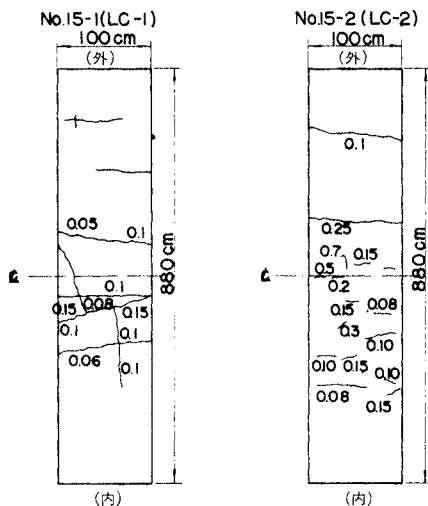


図-15 リーンコンクリート路盤のクラック状況図

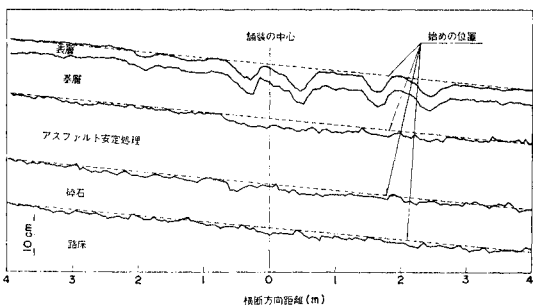


図-12 No. 6-1 (AC-3) 舗装の解体断面図

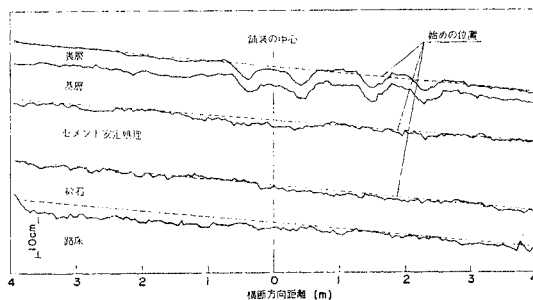


図-13 No. 7-1 (SC-5) 舗装の解体断面図

(5) 表層・基層の挙動

表層や基層の破壊には、材料のはく離、ひびわれ、わだち掘れなどが考えられる。はく離などについては材料学的な問題なのでここでは触れない。表層・基層のひびわれの原因は、主として荷重による繰返し曲げひずみといわれている。そこで表層・基層中のひずみを測定したが、その一部を図-16~19 (配輪は走行線1の静的載荷) に示す。いずれも車輪直下のひずみが最大であり、またアスファルトコンクリートの温度は 20°~30°C であった。弾性理論では 700 μ 程度の引張ひずみに対し、実測値は 1000 μ から 3000 μ にも達している。航空機荷重のもとでは、圧縮ひずみも見られず、実験も静止荷重であることから、たぶんアスファルトコンクリートの塑性流動があったものと考えられる。走行荷重に対するひずみは静止荷重の 1/2~1/3 程度に減少している。また、路盤と表層・基層材の付着の影響で、引張ひずみは必ずしも基層下面で最大とはなっていない。しかしいずれにしても、この引張ひずみ量は、Pell らの実験⁷⁾を参

考にするならば、航空機荷重の通常の反復作用回数(5000~10000回)に対して、限界値付近かそれ以上に達していると思われる。ところが走行実験の結果では、図-10~14のように、路面に深いわだち掘れができていにもかかわらず、ひびわれは観察されなかった。これは走行実験中の温度が高かったこと以外に、表層・基層材のアスファルト量が多く、フローも比較的大きい材料を使用したことによるものと考えられる。走行実験では、車輪が同一箇所を繰返して通過したため、図-10~14のように、路面に深いわだち掘れが生じた。この原因としては、大荷重の集中走行、表層・基層材の塑性流動、夏場における大荷重の走行などが考えられる。荷重車の車庫の前は、No. 2と同一舗装であるにもかかわらず、極端なわだち掘れは見られなかった。すなわち、荷重が万遍なく通過する場所では、極端なわだち掘れはない。しかし誘導路やエプロンでは、荷重が集中して通過する可能性は大きいので、表層・基層は、わだち掘れの面から見て、破壊状態に近いと考えてもよさそうである。

(6) 試験舗装の破壊基準

以上の考察から、本試験舗装は、路盤を除いては、破壊または破壊に近い状態であることが判明した。等価値を、舗装の破壊時点で定めるものとすれば、以上の考察はまだ定量的でない。そこで等価値が、荷重の反復作用回数で変化するかどうかを、路面の累積塑性沈下から求めた等価値でもって検討する。路面の累積塑性沈下と、反復作用回数の相関を詳しくみると、軽荷重 A・B の場合は、今回設置した全路盤とも、反復作用回数の対数に対して、路面の累積塑性沈下は直線的に変化しているの、等価値は反復作用回数に関係なくほぼ一定である。標準荷重の場合は、図-20のように、安定処理路盤の等価値は、反復作用回数が増すと、やや増加する傾向にある。これは路面の累積塑性沈下に対して、粒度調整碎石路盤よりも、安定処理路盤の耐久性がすぐれていることを示している。しかし、等価値の増加率が小さいことから、やや安全側であるにしても、実用上の範囲内で

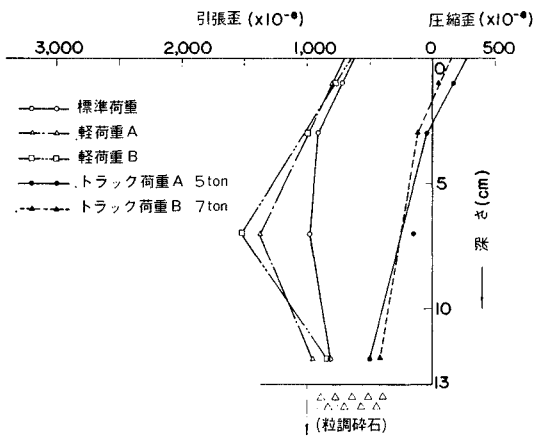


図-16 No. 4 (S-4) 舗装表層・基層のひずみ

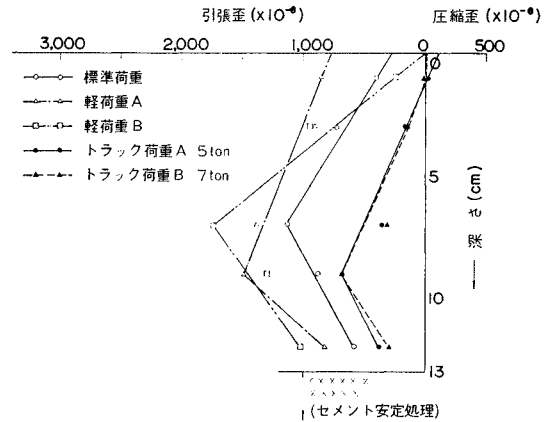


図-18 No. 7-1 (SC-5) 舗装表層・基層のひずみ

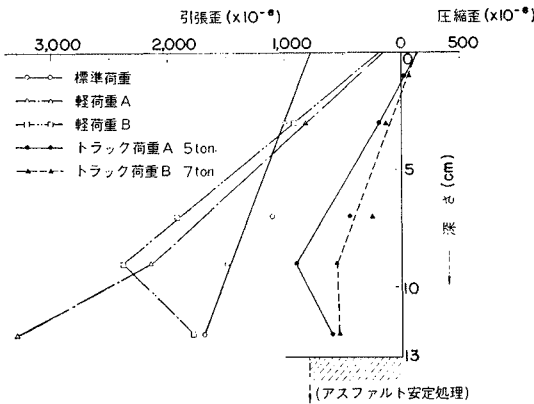


図-17 No. 6-2 (AC-4) 舗装表層・基層のひずみ

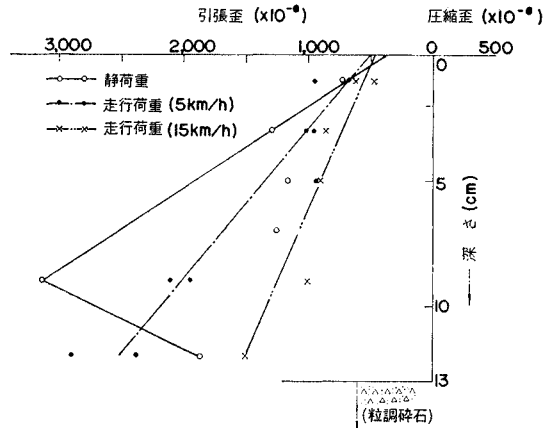


図-19 No. 2 (S-2) 舗装表層・基層のひずみ

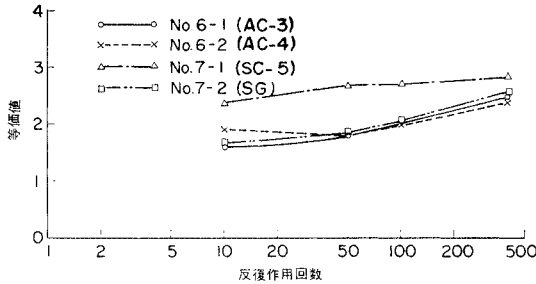


図-20 路面の累積塑性沈下の等価値と反復作用回数

は、走行試験より得られた等価値は、十分に信頼性があるものと考えられる。

4. 試験舗装の各種路盤の等価値

(1) 等価値の求めかた

舗装の構造的破壊は、主として舗装各層や路床の各種沈下によって生じる。そこで、走行試験の結果得られた、試験舗装や路床の各種沈下や、沈下要因などに対する路盤の等価値を求め、その中の最小値を等価値と見なせば、舗装の構造破壊に対して安全な等価値と考えてよさそうである。等価値を求める際に基準となる舗装は、図-1中の No. 1~No. 4 舗装であって、それぞれ粒度調整碎石の路盤厚が異なっているので、路盤厚の増減に対して、路床の応力・沈下、路面の沈下、表層・基層中のひずみの大きさの変化の度を、相関図として求めることができる。一方、No. 5~No. 8 舗装は、基準舗装と等厚の表層・基層を有している安定処理路盤なので、基準舗装の相関図と、これらの舗装の沈下・応力・ひずみなどを比較することによって、その安定処理路盤が、粒度調整碎石路盤の何 cm 厚に相当するか、つまり

等価値を求めることができる。

No. 14~No. 17 舗装は、基準舗装と表層・基層厚が異なるので、No. 5~No. 8 舗装の路盤のように、直接等価値を求めることはできない。この場合にはまず、基準舗装と同じ材料を用いた路盤ではあるが、基層の厚さが基準舗装と異なる No. 9~No. 13 舗装を、基準舗装の相関図と比較することによって、基層アスファルトコンクリートの等価値を求める（実際は3.0が得られた）。No. 14~No. 17 舗装の基層厚は、基準舗装の基層厚よりも5cm厚いので、この部分は等価値3.0の路盤に相当するものと考えて、No. 5~No. 8 舗装の場合と同じような方法で、安定処理路盤の等価値を求めてみた。しかし以上の操作は、路床の鉛直応力や弾性沈下に対する等価値を求める際にはほぼ適用できるものであろうが、路面の累積塑性沈下に対する等価値を求めるには適さない。この場合には、No. 7-1 から求められたソイルセメントの等価値を、No. 17-1 に適用し、No. 17-1 と基層厚の等しい No. 15-1, No. 15-2 を比較して、リーコンクリート路盤の等価値を求めてみた（表-13 参照）。なお、表層・基層内の引張ひずみに対する等価値は、基準舗装と、No. 5~No. 8 舗装の表層・基層中の最大引張ひずみを比較することによって求めたが、測定値にばらつきがあるため、得られた結果にもかなりの幅が生じた。

(2) 路床の破壊に対する等価値

路床のせん断破壊を支配するせん断応力を、近似的に路床面における鉛直応力で代表させることにする。路床の鉛直応力は、表-8、図-7 などのように得られたが、(1)において述べた方法によって、表-9 のような等価値が得られた。同じように、沈下測定の結果から、路床の全沈下に対する等価値が表-10 のように得られた。

表-9 路床面の鉛直応力に対する等価値

材 種	試験区画	路盤厚 (cm)	材 料 条 件	トラック荷重		原形走行荷重車			平均 (走行荷重 車による 結果のみ)	備 考
				輪荷重 (5 t)	輪荷重 (7 t)	標準荷重	軽荷重A	軽荷重B		
基 層 アスファルト コンクリート	No. 9	—	—	—	—	3.8	(5.3)	(4.8)	全平均 3.2 () を除 く平均 2.9	
	No. 10	—	—	—	—	3.5	2.0	(1.5)		
	No. 11	—	—	—	—	2.5	2.8	2.5		
アスファルト 安定処理	No. 5-1	10	マージアル安定度 435 kg	1.4	1.4	1.6	1.5	1.6	1.6	
	No. 5-2	10	” 520 kg	1.3	1.5	1.9	1.7	1.6	1.7	
	No. 6-2	15	” 435 kg	1.4	1.4	1.7	1.5	1.6	1.6	
セメント 安定処理	No. 7-1	15	$\sigma_1 = 18.6 \text{ kg/cm}^2$	1.8	1.6	1.5	1.6	1.5	1.5	} 基層用アス ゴンの等価 値を 3.0 と して求めた 値
	No. 16-2	15	$\sigma_1 = 9.3 \text{ kg/cm}^2$	—	—	1.4	1.2	1.1	1.2	
	No. 17-2	15	$\sigma_1 = 35.6 \text{ kg/cm}^2$	—	—	1.9	1.5	1.4	1.6	
リー コンクリート	No. 14-1	10	$\sigma_1 = 35 \text{ kg/cm}^2$	—	—	2.6	2.2	1.9	2.2	
	No. 15-1	15	$\sigma_1 = 93 \text{ kg/cm}^2$	—	—	3.9	4.6	4.9	4.5	
	No. 15-2	15	$\sigma_1 = 35 \text{ kg/cm}^2$	—	—	2.0	—	1.5	1.8	
浸透式 マカダム	No. 8	15	—	1.4	1.4	1.7	1.4	1.2	1.4	

表—10 路床の全沈下に対する等価値

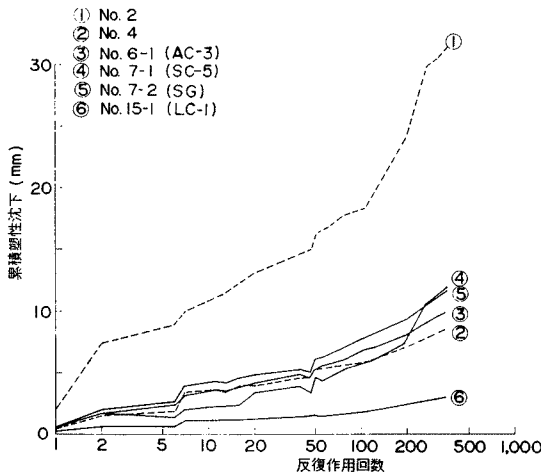
材種	試験区画	路盤厚 (cm)	材料条件	トラック荷重		原型走行荷重車			備考：全沈下量 (mm)		
				輪荷重 (5t)	輪荷重 (7t)	標準荷重	軽荷重A	軽荷重B	トラック荷重*	軽荷重B	標準荷重
アスファルト安定処理	No. 6-1	15	マーシャル安定度 305 kg	1.9	1.9	2.0	2.0	—	0.44	1.47	2.06
セメント安定処理	No. 7-1	15	$\sigma_7=18.6 \text{ kg/cm}^2$	2.3	2.1	2.0	2.0	1.9	0.34	1.33	2.12
スラッグ	No. 7-2	15	—	1.9	1.7	1.7	1.9	—	0.45	1.49	2.98
リコンクリート	No. 15-1	15	$\sigma_7=93 \text{ kg/cm}^2$	—	—	—	—	—	0.15	0.75	1.05

* 輪荷重 7 t

表—11 路床の弾性沈下に対する等価値

材種	試験区画	路盤厚 (cm)	材料条件	原型走行荷重車	
				標準荷重	軽荷重B
アスファルト安定処理	No. 6-1	15	マーシャル安定度 305 kg/cm ²	2.6	2.8
セメント安定処理	No. 7-1	15	$\sigma_7=18.6 \text{ kg/cm}^2$	1.8	2.0
スラッグ	No. 7-2	15	—	—	1.8
リコンクリート*	No. 15-1	15	$\sigma_7=93 \text{ kg/cm}^2$	3.2	2.8

* 基層アスファルトコンクリートの等価値を 3.0 と仮定。



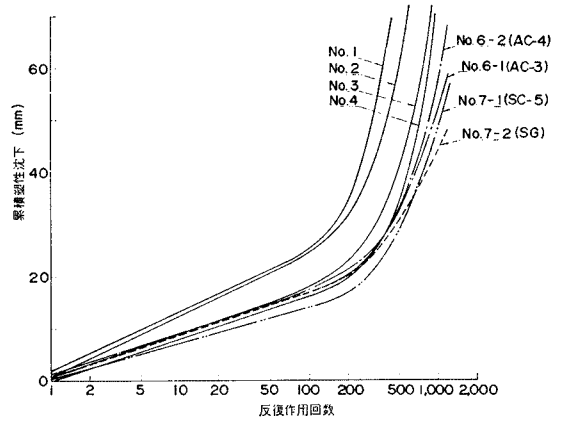
図—21 路床の累積塑性沈下

表—12 路床の累積塑性沈下に対する等価値

材種	試験区画	路盤厚 (cm)	材料条件	標準荷重*
アスファルト安定処理	No. 6-1	15	マーシャル安定度 305 kg	2.3
セメント安定処理	No. 7-1	15	$\sigma_7=9.3 \text{ kg/cm}^2$	2.3
スラッグ	No. 7-2	15	—	2.2

* 反復作用回数 10 回, 100 回, 350 回の平均

表—11 は、路床の弾性沈下に対する等価値を求めたものである。次に、荷重の繰返しに対する路床の耐久性について、路床の累積塑性沈下を測定して等価値を求めた。図—21 は標準荷重に対する測定結果で、これをもとに得られた等価値を表—12 に示す。



図—22 路面の累積塑性沈下

表—13 路面の累積塑性沈下に対する等価値

材種	試験区画	路盤厚 (cm)	材料条件	荷重条件		
				標準荷重	軽荷重A	軽荷重B
アスファルト安定処理	No. 5-1	10	マーシャル安定度 435 kg	1.8	—	1.7
	No. 5-2	10	” 520 kg	2.2	—	2.3
	No. 6-1	15	” 305 kg	1.8	—	1.7
	No. 6-2	15	” 435 kg	1.9	—	1.8
セメント安定処理	No. 7-1	15	$\sigma_7=18.6 \text{ kg/cm}^2$	2.6	2.1	2.5
	No. 14-2	10	$\sigma_7=9.3 \text{ kg/cm}^2$	—	—	—
	No. 16-1	15	$\sigma_7=5.8 \text{ kg/cm}^2$	—	—	—
	No. 16-2	15	$\sigma_7=9.3 \text{ kg/cm}^2$	—	—	—
	No. 17-1	15	$\sigma_7=18.6 \text{ kg/cm}^2$	(2.6)	(2.1)	(2.5)
リコンクリート	No. 14-1	10	$\sigma_7=35 \text{ kg/cm}^2$	—	—	—
	No. 15-1	15	$\sigma_7=93 \text{ kg/cm}^2$	(2.6<)	—	(2.5<)
	No. 15-2	15	$\sigma_7=35 \text{ kg/cm}^2$	(2.6)	—	(2.5<)
スラッグ	No. 7-2	15	—	1.9	2.4	2.6
浸透式マカダム	No. 8	15	—	1.0	—	—

反復作用回数 50, 100, 500, 1 000, 2 000, 3 000 の平均値

(3) 路盤の破壊に対する等価値

走行試験の結果、路盤の破壊は特に見受けられなかった。しかし、路盤の沈下が等価値におよぼす影響も考えられるので、表層・基層厚が等しい各舗装の路面の累積塑性沈下を比較して等価値を求めるならば、これは、路盤以下の層全体の等価値を示すものであって、路盤の良

否の度合もこれに含まれていると考えてよいであろう。標準荷重の下での路面の累積塑性沈下の一例を図-22に示す。今回の試験が一種の破壊促進試験であるにもかかわらず、安定処理路盤が繰返し荷重によって劣悪化した事実は認められない。これらの結果をもとにして、等価値を求めると表-13 のようになる。この値は、図-20のように、等価値が反復作用回数に対して大きな変化はないので、各回数に対する値を平均したものである。

(4) 表層・基層の破壊に対する等価値

表-14 表層・基層の引張ひずみに対する等価値

材種	試験区画	路盤厚 (cm)	材料条件	トラック荷重	原型走行荷重車
アスファルト安定処理	No. 5-1	10	マーシャル安定度 435 kg	2.0~3.0	3.0
	No. 5-2	10	〃 520 kg	2.0~3.0	3.0
	No. 6-1	15	〃 305 kg	1.7~2.3	1.0~1.7
	No. 6-2	15	〃 435 kg	1.7~2.3	1.0~1.7
セメント安定処理	No. 7-1	15	$\sigma_t = 18.6 \text{ kg/cm}^2$	1.7~2.3	1.7~2.3
スラゲ	No. 7-2	15	—	1.7~2.3	1.7~2.3
浸透式マカダム	No. 8	15	—	1.0~1.7	1.0~1.7

表-16 路面の弾性沈下に対する等価値

材種	試験区画	路盤厚 (cm)	材料条件	原型走行荷重車		備考：弾性沈下量 (mm)	
				標準荷重	軽荷重B	標準荷重	軽荷重B
アスファルト安定処理	No. 6-1	15	マーシャル安定度 305 kg/cm ²	2.3	2.3	3.3	2.5
セメント安定処理	No. 7-1	15	$\sigma_t = 18.6 \text{ kg/cm}^2$	2.8	—	2.9	1.7
スラゲ	No. 7-2	15	—	2.5	2.2	3.0	2.7

表層・基層のひびわれは、層中に生じる引張ひずみの大きさに左右されることが多いとされている。そこで、図-16~19 に示したような測定結果をもとに、安定処理路盤の等価値を求めてみると、表-14 のようになる。しかしアスファルト混合物の塑性流動などの影響もあって精度はよくない。むしろ、路面の全沈下や弾性沈下から求めた等価値のほうが、信頼性がありそうである。表-15 は路面の全沈下の測定結果から、また表-16 は路面の弾性沈下からそれぞれ求めた等価値である。

以上述べてきた種々の等価値をまとめると表-17 のようになる。

表-15 路面の全沈下に対する等価値

材種	試験区画	路盤厚 (cm)	材料条件	トラック荷重		原型走行荷重車			備考：全沈下量 (mm)		
				輪荷重 (5t)	輪荷重 (7t)	標準荷重	軽荷重A	軽荷重B	トラック荷重*	軽荷重B	標準荷重
アスファルト安定処理	No. 6-1	15	マーシャル安定度 305 kg	2.7	2.1	2.2	2.2	—	1.04	3.75	4.84
セメント安定処理	No. 7-1	15	$\sigma_t = 18.6 \text{ kg/cm}^2$	3.2	2.7	2.7	2.5	—	0.81	2.24	3.15
スラゲ	No. 7-2	15	—	2.7	2.6	2.4	2.3	—	0.82	3.47	4.14
リコンクリート	No. 15-1	15	$\sigma_t = 93 \text{ kg/cm}^2$	—	—	—	—	—	0.36	2.20	2.55

* 輪荷重 7 t

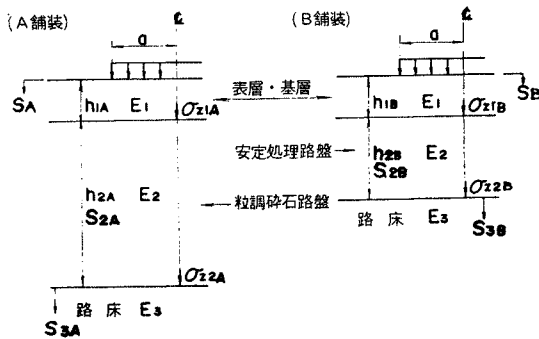
表-17 各種の等価値一覧

材種	試験区画	路盤厚 (cm)	材料条件	路床				路盤	表層・基層			
				路床直応力	路全沈下	路弾性沈下	路床累積塑性沈下		路面累積塑性沈下	表層・基層内水平ひずみ	路面全沈下	路面弾性沈下
アスファルト安定処理	No. 5-1	10	マーシャル安定度 435 kg	1.6	—	—	—	1.8	2.3~3.0	—	—	
	No. 5-2	10	〃 520 kg	1.7	—	—	—	2.3	2.0~3.0	—	—	
	No. 6-1	15	〃 305 kg	—	2.0	2.7	2.3	1.8	1.7	2.2	2.3	
	No. 6-2	15	〃 435 kg	1.6	—	—	—	1.9	1.7	—	—	
セメント安定処理	No. 7-1	15	$\sigma_t = 18.6 \text{ kg/cm}^2$	1.5	2.0	1.9	2.3	2.4	1.7~2.3	2.6	2.8	
	No. 16-2	15	$\sigma_t = 9.3 \text{ kg/cm}^2$	1.2	—	—	—	—	—	—	—	
	No. 17-2	15	$\sigma_t = 35.6 \text{ kg/cm}^2$	1.6	—	—	—	—	—	—	—	
リコンクリート	No. 14-1	10	$\sigma_t = 35 \text{ kg/cm}^2$	2.2	—	—	—	—	—	—	—	
	No. 15-1	15	$\sigma_t = 93 \text{ kg/cm}^2$	4.5	—	3.0	—	—	—	—	—	
	No. 15-2	15	$\sigma_t = 35 \text{ kg/cm}^2$	1.8	—	—	—	—	—	—	—	
スラゲ	No. 7-2	15	—	—	1.8	1.8	2.2	2.3	1.7~2.3	2.4	2.3	
浸透式マカダム	No. 8	15	—	1.4	—	—	—	1.0	1.0~1.7	—	—	

5. 等価値の普遍化の検討

(1) 等価値の選択

表一七でまとめた等価値をみると、路床の鉛直応力から求めた値と、路面の累積塑性沈下から求めたものが、他の等価値に比べて低目である。空港舗装の破壊が、主として路床のせん断破壊や沈下、路面の繰返し荷重による沈下累積などによって生じることを考えるならば、これらの測定結果から得られた低目の等価値を、相互に比較して使用するのが妥当であろう。したがって、路床の鉛直応力から求められた等価値 (E_{q0} とする) と路面の累積塑性沈下から求められた等価値 (E_{qs} とする) との間にどのような関係があるかを調べることにする。



図一23 A・B 舗装の比較図

いま、図一23のように、粒度調整碎石路盤を有するA舗装と、安定処理路盤を有するB舗装を考える。A・B舗装の路面の沈下量 S および表層・基層厚は等しいものとする。この両舗装の路床面鉛直応力 σ_{22} には、3つの場合が考えられる。

- ① $\sigma_{22B} > \sigma_{22A} \therefore S_{3B} > S_{3A} \therefore S_{2B} < S_{2A}$
- ② $\sigma_{22B} < \sigma_{22A} \therefore S_{3B} < S_{3A} \therefore S_{2B} > S_{2A}$
- ③ $\sigma_{22B} = \sigma_{22A} \therefore S_{3B} = S_{3A} \therefore S_{2B} = S_{2A}$

(S_3 : 路床の沈下量, S_2 : 路盤の沈下量)

① の場合は $E_{qs} > E_{q0}$, ② の場合は $E_{qs} < E_{q0}$, ③ の場合は $E_{qs} = E_{q0}$ となる。すなわち, σ_{22} の大きいかんによって E_{qs} と E_{q0} は異なってくる。次に、路面の沈下量がほとんど路床の沈下量で占められる場合には, E_{qs} は σ_{22} に支配されるであろうから, ①, ②, ③のいずれも, $E_{qs} \doteq E_{q0}$ となるであろう。一方, 路面の沈下量のほとんどが路床以外の舗装部分で占められる場合を考える。① のケースでは, 3層弾性理論⁹⁾の助けを借りるならば σ_{21} は, 路床の強弱の影響をほとんど受けないので, $S_{2A} > S_{2B}$ の傾向は変わらないであろう。路

床は堅くてほとんど沈下しないのであるから, $S_A > S_B$ となる。このことは, E_{qs} をもっと大きく取れることを意味する。② の場合は逆に $S_A < S_B$ となるから, E_{qs} はもっと小さくとらなければならない。③ のケースは路床に関係なく等価値は一定である。これをまとめると次のようになる。

- ① の場合 E_{qs} 大 $\xleftarrow{\text{路床沈下小}} E_{qs} \xrightarrow{\text{路床沈下大}} E_{qs}$ 小 ($=E_{q0}$)
- ② の場合 E_{qs} 小 $\xleftarrow{\text{路床沈下小}} E_{qs} \xrightarrow{\text{路床沈下大}} E_{qs}$ 大 ($=E_{q0}$)
- ③ の場合 $E_{qs} = E_{q0} = \text{一定}$

本試験舗装は, 浸透式マカダムを除いて, 路床・路盤の沈下や路床応力などから, ① のケースであることが判明した。したがって, E_{qs} は, 最小の E_{qs} よりもやや大き目に算定されているきらいがある。舗装の破壊が, 舗装各層・路床のいずれによっても生じる可能性のあることから, 等価値は最小のものを採用したほうが無難であろう。ゆえに, 本試験舗装で求められた E_{q0} を路盤の等価値として採用することは妥当な線であろう。

(2) 路床の強弱と E_{q0}

3層弾性理論での計算結果では, ある路床で 図一23 に示す A・B 両舗装の路床面鉛直応力と水平応力が等しければ, 路床が変化してもこれらの応力はほぼ等しくなる。すなわち, 路床の種類が変わっても E_{q0} は変動しないものと考えられる。

(3) 表層・基層の温度変化と E_{q0}

(2) と同じく 3層弾性理論の助けを借りるならば, A・B 両舗装の σ_{22} が最初に等しければ, 表層・基層の弾性係数が変化しても, σ_{22} の増減はほとんど等しい。すなわち, E_{q0} は表層・基層の温度変化の影響をほとんど受けないものと思われる。

(4) 荷重の大小と E_{q0}

(2), (3) と同じ検討法によれば, σ_{22} は荷重の大小に正比例して増減するだけであるから, E_{q0} は変わらない。

(5) 動荷重・静荷重と E_{q0}

σ_{22} の測定結果では, 静荷重による値と, 5~15 km/h の走行荷重の値とはほとんど等しい。実際の空港では誘導路での走行状態がこれに相当していることから, 静荷重より求めた E_{q0} を適用しても支障はなさそうである。

(6) 路盤の厚さと E_{q0}

弾性理論から, 路盤の厚さが E_{q0} に及ぼす影響をみ

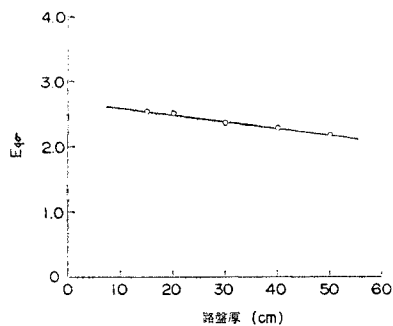


図-24 路盤厚と E_{q0}

ると 図-24 のように、路盤厚が大きくなると E_{q0} はいくぶん小さくなる。しかしこの減少率はわずかであり、通常使用されている路盤厚の範囲内では、試験舗装から得られた E_{q0} を使用してもよさそうである。

(7) 路盤の位置と E_{q0}

いわゆるサンドイッチ舗装^{9), 10)}などのように、安定処理路盤が粒状材の下にくるような場合、 E_{q0} は変化するかどうかを弾性理論上から検討すると、 E_{q0} は不変であるとはいえない。しかし、サンドイッチの拘束効果は大きく、はさまれた層に加わる応力も、上層にあった場合よりも小さくなるであろうから、安定処理路盤としての耐久性は増すと考えられる。したがって、サンドイッチ層にも、本試験で得られた等価値を使用することは安全側であろう。

6. む す び

以上の考察から、空港舗装における路盤の等価値としては、規定の材料を使用し、規定の施工を行なうならば、次の値を採用してもよいであろう。

(1) アスファルト安定処理

マーシャル安定度 (75 回突固め)

300~499 kg では 1.6

500 kg 以上では 1.7

(2) セメント安定処理

(必要最小強度 $\sigma_7 = 30 \text{ kg/cm}^2$)

$30 \text{ kg/cm}^2 \leq \sigma_7 < 50 \text{ kg/cm}^2$ では 1.5

$\sigma_7 \geq 50 \text{ kg/cm}^2$ では 1.6

(3) リーンコンクリート

$50 \text{ kg/cm}^2 \leq \sigma_7 < 80 \text{ kg/cm}^2$ では 2.0

$\sigma_7 \geq 80 \text{ kg/cm}^2$ では 3.0

(4) 浸透式マカダム

沈下が大きいため 1.0

(5) スラグ

十分な養生期間があれば 1.3

おわりに、本研究に対し多大のご援助を頂いた、運輸省航空局、港湾建設局、港湾技術研究所の各位に深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 須田 照：空港瀝青舗装の舗装厚設計法に関する調査研究，港湾技研資料，No. 52，June 1968.
- 2) 運輸省航空局：空港アスファルト舗装構造設計要領，1970.
- 3) Nai C. Yang：Systems of Pavement Design and Analysis，Highway Research Record，No. 239，1968，pp. 25~53.
- 4) Bonner S. Coffman 他：Theoretical Asphaltic Concrete Equivalences，Highway Research Record，No. 239，1968，pp. 95~119.
- 5) Marshall R. Thompson：Lime-Treated Soils for Pavement Construction，Journal of Highway Division，Proc. A.S.C.E.，Vol. 94，No. HW 2，Nov. 1968，pp. 191~217.
- 6) 須田 照：空港瀝青舗装の材料および施工に関する調査研究，港湾技研資料，No. 53，June 1968.
- 7) P. S. Pell 他：Fatigue of Bitumen and Bituminous Mixes，Inst. Jour. of Mech. Sciences，Vol. 3，1961.
- 8) A. Jones：Tables of Stresses in Three-Layer Elastic Systems，H.R.B. Bulletin 342，1962，pp. 176~214.
- 9) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱（改訂版），1968，pp. 19~20.
- 10) T. Yamanouchi：Effect of Sandwich Layer System of Pavement for Subgrades of Low Bearing Capacity by Means of Soil-Cement，Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engr.，Montreal，1965，Vol. 2，pp. 471~472.

(1973.2.8・受付)