

円形走行試験におけるアスファルト舗装の挙動とその解析

BEHAVIOR OF ASPHALT PAVEMENTS IN CIRCULAR ROAD TESTS AND ITS ANALYSES

西 勝*・河端 薫**・飯田 幸男***

By Masaru NISHI, Kaoru KAWABATA and Yukio IIDA

In order to evaluate the performance of asphalt pavement with a slag base, truck tests were conducted on a 12 m radii circular test road consisting of various pavement sections. The new slag base material tested was a compound slag (mixture of 50% by weight of steel-making slag, 30% of blast-furnace slag, and 20% of granulated slag), and the reference materials utilized were a blast-furnace slag, crushed stone, and asphalt concrete. Through five series of truck tests, the data of performance such as deflection, cracking, and rutting were periodically collected and compared to evaluate relative performance. Moreover, for the purpose of generalizing the performance data observed, three theoretical procedures regarding structure analysis, fatigue prediction, and rutting prediction were proposed and examined through the observation data. This paper describes the performance data observed and discusses the applicability of the analytical methods proposed.

Keywords: asphalt pavement, slag, base material, performance, model test, analysis

1. ま え が き

昭和63年版のアスファルト舗装要綱の刊行¹⁾を機にして、路盤材料としての「スラグ」はすべて「鉄鋼スラグ」と明記されることになった。これは、従来の高炉徐冷スラグ（製鉄スラグ）に関する規定に準じて、製鋼スラグ（転炉スラグおよび電気炉スラグ）もその採用が認められるようになったことを意味している。本研究は、規定の拡大に先立って実施したもので、鉄鋼スラグの一種である複合スラグ（転炉スラグ50%、高炉徐冷スラグ30%および水砕スラグ20%を混合した粒度調整鉄鋼スラグ）の基準化、すなわち等値換算係数の設定を試みた基礎的研究である。したがって、その目的には、水硬性粒度調整鉄鋼スラグの等値換算係数(0.55)¹⁾についての位置付けを明確にするだけでなく、新しい舗装材料の基準化に関する試験方法を紹介することも含まれている。

新しい舗装材料を基準化する最適の方法は、新材料と

標準材料とを含む舗装体の現地挙動を同一条件のもとで比較し、新しい舗装体の相対的な供用性を評価することだと思われる。しかしながら、実路を対象とする試験は汎用的な評価を得るのに莫大な費用と時間を要し、その遂行が困難である。したがって、本研究では、現地状況を極力再現した円形走行試験路での実車試験²⁾を実施し、各種試験断面の破壊に至る舗装挙動を観測・比較することにした。

さらに、円形走行試験で得られた結果を汎用化するには、対象とする舗装挙動に適合した解析法の確立が必要である。ここでは、材料特性の応力依存性を考慮した構造解析法(Duncan *et al.*の解析法³⁾に準ずる)と、その結果に基づく疲労解析法(Kasianchuk *et al.*の解析法⁴⁾に準ずる)およびわだち堀れ解析法(Quasi-Elastic Approach⁵⁾に準ずる)の採用を提案し、得られた観測結果に基づいてそれらの適用性を検証することにした。

上記の研究内容を詳述するために、2.では各試験舗装体の供用性評価に採用した円形走行試験の概要とその観測結果を示し、3.では円形走行試験で観測されたたわみ、ひびわれ、わだち堀れの各舗装挙動を対象とする解析法を提案し、それぞれの観測結果に基づいてその適用性を検証する。4.では等価復元変形係数を用いた疲労挙動の再解析⁶⁾を実施し、過酷な交通载荷のもとでの

* 正会員 工博 神戸大教授 工学部付属土地造成工学研究施設 (〒657 神戸市灘区六甲台町1)

** 正会員 (株)神戸製鋼所スラグ・建材部副部長 (〒651 神戸市中央区協浜町1丁目)

*** 正会員 工博 神戸大助教授 工学部土木工学科 (同上)

スラグ路盤における劣化現象の可能性を論ずる。最後に5. では上記の結果を要約し、6. では今後の研究が必要となるいくつかの問題を指摘する。

なお、本論文はその一部を既に文献6)~10) で発表しており、新しいデータと知見を加えて統合したものであることを付記しておく。

2. 円形走行試験の概要とその観測結果

円形走行試験は、実路試験に比較して、交通、環境等の諸条件に普遍性を欠くが、任意の舗装断面に対する供用性評価を短期間で与えるという利点を有している。本研究で実施した円形走行試験の概要とその観測結果を以下に述べる。

(1) 円形走行試験の概要

(株)神戸製鋼所協浜工場内に敷設された円形走行路の中心半径および幅員は、それぞれ12 m、4 mであり、交通荷重としては、2台の荷重車を中央駆動部(55 kW モーター)よりアームを介して5~12 km/h の走行速度で回転させた。荷重車の後輪軸重はアスファルト舗装要綱の設計軸荷重に合致するように10 000 kgfとした。後輪(複輪)内側タイヤの接地形状を円形と仮定すると、実測した接地面積からその接地半径および接地圧は、それぞれ14.83 cm、3.62 kgf/cm²と算定された。本試験装置の概要と荷重車の諸元を表-1に示す。

現在5回の走行試験を終了しており、採用した各試験舗装断面の配置図と構造寸法を図-1に示す。図には各試験ごとの試験期間および走行回数も略記した。

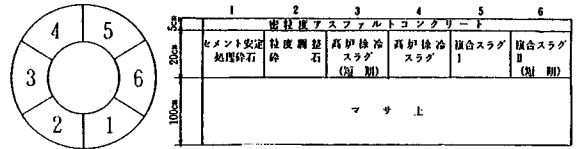
図に示すように、試験舗装断面の表層・基層材としては密粒度アスファルトコンクリートあるいは粗粒度アスファルトコンクリートを用い、上層路盤材としては粒度調整砕石(以下、粒調砕石と記す)、セメント安定処理砕石、高炉徐冷スラグ、複合スラグⅠ(転炉スラグ50%、高炉徐冷スラグ30%、水砕スラグ20%)、複合スラグⅡ(転炉スラグ30%、高炉徐冷スラグ50%、水砕スラグ20%)およびアスファルト安定処理砕石の6種類を、それぞれ採用した。複合スラグ以外の上層路盤材は

表-1 試験装置概要および荷重車の諸元

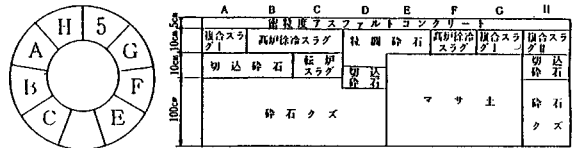
項 目	諸 元	
	1号車	2号車
荷重車 総重量 kgf	15,000	
前輪(シングルタイヤ) kgf	2,500	
後輪(ダブルタイヤ) kgf	5,000	
ホイールベース mm	4300	4250
トレッド 前 輪 mm	1965	2000
後 輪 mm	1820	1825
走行速度 km/h	5~12	
タイヤ空気圧 kgf/cm ²	6.5	
曲率半径 m	12	
幅 員 m	4	

すべて標準材料として選定したもので、下層路盤材の選定は現地舗装体との対応を考慮したものである。また、路床材としてはマサ土を用い、それによって未処理スラグ埋地地盤(約6 m厚)の表層部約1 mを置換した。なお、砕石くずおよび現地相当土の採用も現地舗装体との対応を考慮したものである。

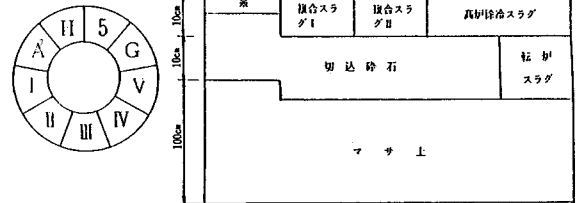
次に、各試験における舗装構造の選定理由は、第1回



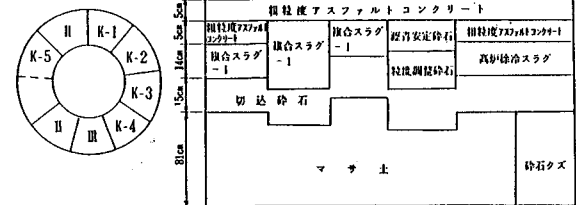
第1回 試験期間('81.9~'84.5) 走行回数(114万回)



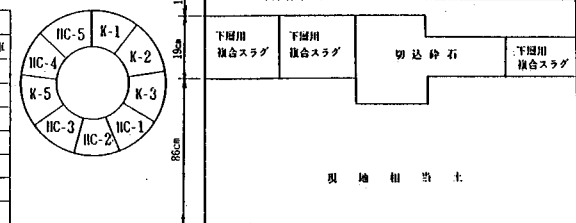
第2回 試験期間('82.8~'87.11) 走行回数(220万回)



第3回 試験期間('83.7~'87.11) 走行回数(190万回)
K-1 K-2 K-3 K-4 K-5



第4回 試験期間('84.12~'88.6) 走行回数(220万回)
HC-1 HC-2 HC-3 HC-4 HC-5



第5回 試験期間('87.4~'88.3) 走行回数(60万回)

図-1 円形走行試験断面

走行試験および第2回走行試験のE, F, G断面では、それぞれ舗装合計厚 $H=25$ cm, 15 cm と、 H 一定のもとでの各舗装体挙動の比較を意図したものである。第2回走行試験のA, B, C, D, H断面および第3回走行試験は、それぞれ $T_A=13$ cm (A交通・設計 $CBR \geq 12\%$), 14 cm (L交通・設計 $CBR=6\%$) と、 T_A 一定のもとでの比較を図ったものである。また、第4回走行試験のK-1およびK-5断面は国道250号線の舗装構造 (C交通・設計 $CBR=8\%$) に対応するもので、他の断面(K-2, K-3, K-4断面)も T_A が等しくなるように選定した。さらに、第5回走行試験は、図に示すように、鉄鋼スラグの水硬性を下層路盤材に活用するべく下層用複合スラグ (転炉スラグ85%, 水砕スラグ15%, 等値換算係数0.35) を用いた舗装体挙動を究明しようとしたものである。

なお、 T_A 値の算定において、複合スラグの等値換算係数は0.55 (第4回走行試験のK-3断面では0.80)、下層路盤材として用いた転炉スラグは0.25と、それぞれ仮定した。

(2) 円形走行試験の観測結果

走行試験の期間中、各試験断面に対して諸種の追跡調査を実施したが、ここでは、供用性の評価に関連するたわみ量、ひびわれ量およびわだち掘れ量の観測結果についてのみ述べる。

a) たわみ量

たわみ量としては、荷重車およびベンケルマンビームを用いて、各舗装体表面での復元たわみ量 (3測点での平均値) を定期的に測定した。得られたたわみ量と走行回数との関係を各走行試験ごとに図-2に示す。なお、図中の矢印は表層ひびわれの発生した走行回数を示している。

図より、同一 H の試験断面の場合 (第1回走行試験および第2回走行試験のE, F, G断面)、たわみ量は粒調碎石断面が最も大きく、高炉徐冷スラグ断面、複合スラグ断面の順に小さくなるのが認められる。同一 T_A の場合を比較してみると、第2回走行試験のA, B, C, D, H断面では、粒調碎石、高炉徐冷スラグ、複合スラグの順にたわみ量は小さく、第3回走行試験でも、複合スラグ断面のたわみ量は高炉徐冷スラグおよびフルデブアスファルト断面の場合より小さくなっている。また、同一 T_A 断面 (K-3断面を除く) のもとで実施した第4回走行試験においても、複合スラグ断面のたわみ量はアスファルト安定処理碎石および高炉徐冷スラグ断面の場合と比較して小さいことが確認される。なお、第1回走行試験の1断面および第3回走行試験のIV断面については施工上不備な点があったため、第5回走行試験については調査目的が異なっていたため、それぞれ結果の記載

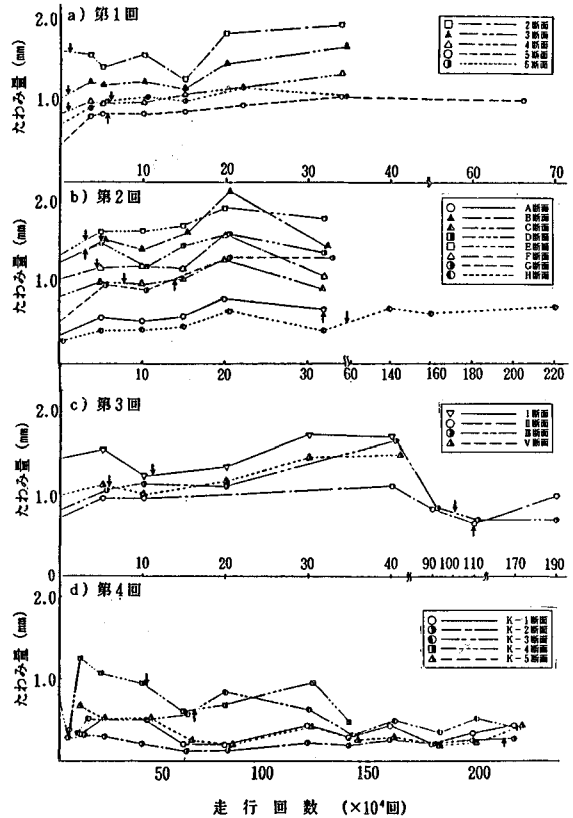


図-2 たわみ量の測定結果

を省略した。

データ数は不十分であるが、上述したたわみ量の観点より推察すれば、高炉徐冷スラグの等値換算係数を0.55と規定すること、そして複合スラグの等値換算係数をその値と同等あるいはそれ以上と評価することの妥当性が認められる。

なお、観測時の舗装温度にも左右されるものの、各舗装断面におけるたわみ量の測定値とそのばらつきは走行回数の増加とともに漸増する傾向がある。この傾向は、第4回走行試験の舗装断面については明確ではなく、スラグ路盤の水硬性発現よりも舗装体の劣化現象が卓越していることを示唆するものと思われる。

b) ひびわれ量

一般に、アスファルト舗装では、ひびわれの程度をひびわれ率によって表わす場合が多い。したがって、走行路を一边15 cmの四角形で分割しひびわれの生じた四角形の個数と試験断面内の四角形の総数の比としてひびわれ率を求めることにした。なお、隣接断面の影響を排除するため各試験断面境の四角形はひびわれ率の計算から除外した。

走行試験で得られたひびわれ率の経時変化を各舗装断

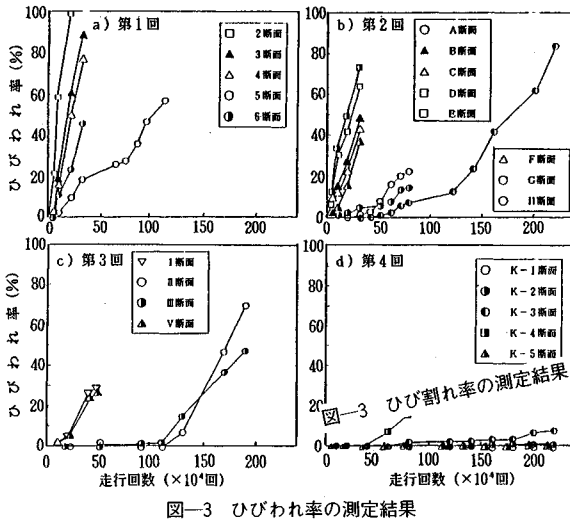


図-3 ひびわれ率の測定結果

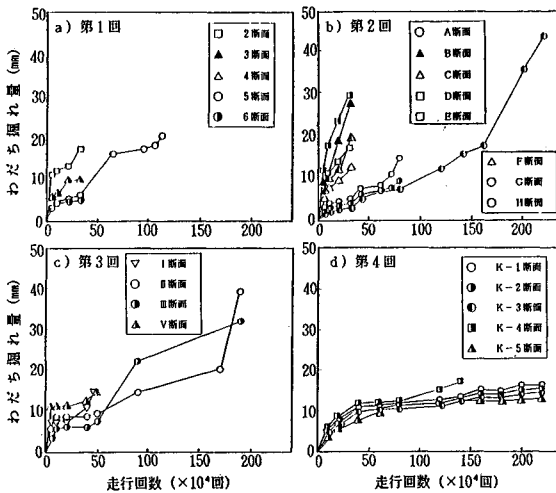


図-4 わだち堀れ量の測定結果

面ごとに図-3に示す。同一H断面および同一T_A断面のいずれの場合にも、複合スラグ断面は他の試験断面に比較して最もひびわれを発生しにくいことが認められる。また、第3回走行試験のI断面とV断面および第4回走行試験のK-1断面とK-5断面において、それぞれひびわれ発生に対する抵抗はほぼ同等であることも認められる。これらの結果は、たわみ量の場合と同様に、高炉徐冷スラグおよび複合スラグの等値換算係数を、それぞれ0.55、0.55以上と評価することの妥当性を示唆している。

なお、ひびわれ率の発生が早い断面はその増加勾配も大きく、発生が遅い断面ほどその勾配も小さくなる傾向が認められる。この傾向は山田らによるAASHO道路試験の解析結果¹¹⁾と一致している。また、ひびわれの進展速度がひびわれ率10%のあたりから急増しているが、

これは、ひびわれから浸透した雨水によって路盤あるいは路床の支持能力が弱められたためと思われる。

c) わだち堀れ量

わだち堀れ量としては、各試験断面とも3横断面についてプロフィールメータによる測定を行い、得られた最大値の平均として求めることにした。これらのわだち堀れ量の経時変化を図-4に示す。前述したひびわれ量の場合と同様に、複合スラグ断面のわだち堀れ量は最も小さく、高炉徐冷スラグ断面のわだち堀れ量はフルデプスアスファルトおよび複合スラグ断面の値とほぼ等しいこと(第3回走行試験および第4回走行試験)が認められる。これらの結果は、わだち堀れ量に関しても、製鋼スラグに規定された等値換算係数の値(0.55)が妥当であることを示唆している。

なお、第4回走行試験と他の走行試験との観測結果を比較すれば、わだち堀れ量の増加傾向に差異のあることが認められる。これは、先述したように、ひびわれ発生の有無に強く関係しているものと思われる。また、走行試験終了後の開削断面より観察してみると、他の試験断面に比較して、複合スラグ断面では路盤自体の残留変形も小さくそれより下の層ではほとんど変形が生じていなかった。

以上、円形走行試験で観測された各種舗装体の挙動をたわみ、ひびわれ、わだち堀れの順に列記するとともに、鉄鋼スラグ路盤の構造評価についても概略的な検討を加えた。しかしながら、円形走行試験では遠心力およびねじりを受ける荷重車が同一軌跡上を走行しているため、試験舗装体が実際の道路よりも過酷な荷重条件下にあったことは留意されるべきである。換言すれば、上述した試験結果は、現地舗装状況に対応した定量的な供用性に関係するものではなく、比較を考慮した相対的な供用性にすぎないものと解釈されるべきであろう。

3. 円形走行試験における舗装挙動の解析

前章で述べた各種舗装体の挙動と鉄鋼スラグ路盤の構造評価は限定された試験時の舗装構造、交通条件および環境条件に対応したものである。この不十分な試験結果を補完し汎用化するには、走行試験を追加するだけでなく、たわみ、ひびわれ、わだち堀れの各挙動を対象とした解析法の確立が必要となる。したがって、本章では、室内試験結果を基本とした各解析法の採用を提案し、さらに得られた舗装挙動を解析することによりその適用性を検証することにした。

(1) 解析法の概要

a) 構造解析法

路床および路盤層の復元定数が応力依存性であることを考慮して、応力、ひずみ、たわみの解析には軸対称の

表—2 路床，路盤材の基本的性質と載荷条件の要約

基本的性質及び載荷条件	マサ土	粒状調整砕石	高炉徐冷スラグ	複合スラグ I
比重	2.649	2.670	2.800	3.150
均等係数	42.30	30.14	17.50	27.36
有効粒径(mm)	0.026	0.16	0.20	0.21
載荷周期(cpm)	20	20	20	20
載荷時間(s)	0.1	0.1	0.3	0.3
繰り返し回数	2000, 6000	2000, 5000	5000~10000	5000~10000
応力層(kgf/cm ²)	q = 0.01, 0.15, 0.30 0.45, 0.60, 0.75 0.90	q = 0.15, 0.30, 0.45 0.60, 0.75, 0.90 1.05, 1.20, 1.50	q = 0.30, 0.60, 0.90, 1.20 1.50, 2.10, 2.40, 3.60	P = 0.80, 1.60, 2.40
	P = 0.30, 0.40, 0.65	P = 0.40, 0.65, 1.10		

反復有限要素法³⁾を採用することにした。この構造解析法の概要を材料特性の設定と解析条件および入力データとに分けて以下に述べる。

①材料特性の設定

本研究でこの設定を行った舗装構成材料は未処理スラグ(路体)，マサ土(路床)，3種類の粒状材(路盤)および密粒度アスファルトコンクリート(表層)の計6種類である。

路床および路盤の材料特性化試験は繰返し三軸圧縮試験装置を用いて実施した。供試体の寸法は，マサ土および粒調整砕石についてはφ5cm×10cm，スラグ材(高炉徐冷スラグ，複合スラグI)についてはφ10cm×20cmとした。これらの特性化試験で採用した載荷条件の要約を各構成材料の基本的性質と併記して表—2に示す。

表層材のスティフネスは日本舗道(株)の研究室において繰返し曲げ試験装置を用いて決定された。ビーム供試体は試験初期の現地舗装断面から切り出され，その寸法は4cm×4cm×40cmとされた。試験は400μm/mのひずみ制御のもとで，試験温度を0，15，20および30°Cとして実施された。また，周期荷重の載荷時間および載荷周期はそれぞれ0.1秒，300cpmであった。

以上の試験結果に基づいて各構成層の復元定数を次のように設定した。

マサ土路床に対して⁸⁾，

$$M_r = 960 p^{0.42} \quad (500 \text{ kgf/cm}^2 \text{ 以上}) \dots\dots\dots (1)$$

$$\nu_r = 0.106 + 0.350 \eta - 0.126 \eta^2 \quad (0.05 \sim 0.45) \quad (2)$$

粒調整砕石路盤層に対して⁸⁾，

$$M_r = 1250 p^{0.68} \quad (400 \text{ kgf/cm}^2 \text{ 以上}) \dots\dots\dots (3)$$

$$\nu_r = 0.345 \eta - 0.090 \eta^2 \quad (0.05 \sim 0.45) \dots\dots\dots (4)$$

スラグ路盤層に対して¹⁰⁾，

$$M_r = K \cdot p^m \cdot (2.0/q)^n \quad q < 2.0 \dots\dots\dots (5-a)$$

$$M_r = K \cdot p^m \quad q \geq 2.0 \dots\dots\dots (5-b)$$

(いずれも 400 kgf/cm² 以上)

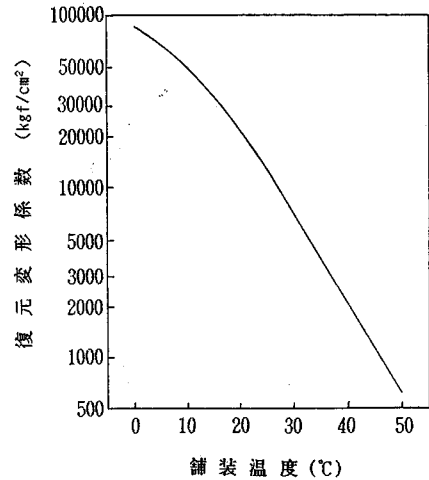
$$\nu_r = A_0 + A_1 \eta + A_2 \eta^2 \dots\dots\dots (6)$$

表層に対して⁸⁾，

$$M_r = \text{図—5に示す試験結果より決定} \dots\dots\dots (7)$$

$$\nu_r = 0.40 \quad (\text{仮定}) \dots\dots\dots (8)$$

ここで， M_r ：各構成層の復元変形係数 (kgf/cm²)



図—5 表層材のスティフネス—温度関係

表—3 スラグ路盤材の復元係数に関する実験定数

実験定数	高炉徐冷スラグ	上限値 下限値	複合スラグ I	上限値 下限値
K	10^5 -10.7-1.39Ct	7500	10^5 -12.6-4.60Ct	7500
M	0.909-0.0574Ct	0.535	0.855-0.0523Ct	0.535
N	0.197+0.172Ct	0.420	0.196+0.0370Ct	0.420
A ₀	0.340-0.092Ct	0.036	0.345-0.114Ct	0.023
A ₁	0.232-0.0193Ct	0.180	0.247-0.0206Ct	0.154
A ₂	-0.0650+0.00542Ct	0	-0.0757+0.00631Ct	0
		-0.0510		-0.0490

Ct: 養生期間(月)

ν_r ：各構成層の復元ポアソン比

p：平均主応力 (kgf/cm²)

q：偏差応力 (kgf/cm²)

K, M, N, A₀, A₁, A₂：実験定数(表—3参照)

なお，路体に対しては，玉石および転石の含有率が高いため，その表面で実施した繰返し平板載荷試験の結果に基づいて近似的に $M_r = 1050 \text{ kgf/cm}^2$ および $\nu_r = 0.35$ を設定した。

②解析条件および入力データ

各試験断面に対応する解析断面は，半径140cm，深さ400cmの断面寸法(周面ローラ支承，底面固定支承)を仮定し，節点数291，要素数84の四辺形要素に分割した。また，後輪軸重10000kgfの試験車荷重については，先述のとおり，接地半径14.83cm，等分布接地圧3.62kgf/cm²の円形載荷が得られるように節点荷重を設定した。この場合，車輪中心間隔32cmの複輪荷重を設定し，重ね合わせ則を適用した。なお，反復計算においては，7~8回程度で比較的良好な収束が得られるので反復回数はすべて8回とした。たわみ量の解析における表層の舗装温度としては，第1回~第3回走行試験の舗装断面については表層表面での測定温度を，第4回走行試験の舗装断面については表面下5cmでの測定温

表—4 たわみ量解析に関する入力データ

第1回						
経過期間(月)	4.0	4.5	4.75	5.25	8.0	
走行回数(×10 ⁴)	5.0	10.0	15.0	22.0	34.0	
舗装温度(°C)	22.0	18.0	13.0	11.0	21.0	
第2回						
経過期間(月)	5.0	5.5	6.0	6.5	8.0	
走行回数(×10 ⁴)	5.0	10.0	15.0	20.0	32.0	
舗装温度(°C)	43.0	32.0	32.0	25.0	12.0	
第3回						
経過期間(月)	5.0	6.0	8.0	9.0	10.0	
走行回数(×10 ⁴)	5.0	10.0	20.0	30.0	40.0	
舗装温度(°C)	24.0	12.0	2.0	12.0	27.0	
第4回						
経過期間(月)	4.0	7.5	9.0	10.5	16.0	18.0
走行回数(×10 ⁴)	5.0	10.0	20.0	40.0	65.0	83.0
舗装温度(°C)	8.0	39.5	34.5	40.0	13.5	12.0
経過期間(月)	19.0	23.0	32.0	36.0	39.0	42.0
走行回数(×10 ⁴)	120.0	140.0	160.0	180.0	200.0	220.0
舗装温度(°C)	40.0	28.0	34.0	12.0	11.0	25.0

度を、それぞれ入力することにした。試験時のこれらの舗装温度は接触型表面温度計および熱電対を用いて測定した。各走行試験ごとに入力した舗装温度を、走行回数、経過期間(養生期間)と併記して表—4に示す。

b) 疲労解析法

本研究では、観測されたひびわれの発生が表層材の疲労現象に起因するものと仮定して、各試験断面の疲労寿命を算定することにした。アスファルト舗装の疲労破壊に関しては諸種の解析手法が提案されているが、ここでは次の運用手段に従う疲労解析法⁷⁾を採用することにした。

①材料特性の設定

アスファルト表層材の疲労特性を究明するために、先述した繰返し曲げ試験は供試体に疲労現象が確認されるまで継続された。しかしながら、測定データが不十分であったため有効な疲労破壊基準を確立するには至らなかった。したがって、解析の予備段階として、ここでは次式で示されるWitczakの疲労破壊基準¹²⁾を採用することにした。

$$N_s = a b^{T_m} (1/\epsilon_r)^c \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 N_s : 供用寿命(回)

T : 舗装温度(°F)

ϵ_r : 表層下縁での引張ひずみ

$$a = 1.86351 \times 10^{-17}, b = 1.01996, d_1 = 1.45$$

$$c = 4.995$$

②構造解析および疲労寿命の算定

解析区分での経過期間、走行回数および舗装温度(表層底面温度)のもとで、各試験断面に対する構造解析を実施し、その表層下縁での引張ひずみの分布を求めた。それらの入力データを各走行試験ごとに表—5に示す。つづいて、式(9)の疲労破壊基準によって各ひずみ分布に対応する供用寿命の分布を求め、最後に、次式のMiner則¹³⁾を適用することにより、各試験断面に対する疲労寿命を算定した。

表—5 疲労解析およびわだち堀れ解析に関する入力データ

第1回							
経過期間(月)	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	10.0	13.5
走行回数(×10 ⁴)	0~2	2~10	10~22	22~26	26~34	34~39	39~49
舗装温度(°C)	34.0	20.7	16.0	20.7	34.0	34.5	24.0
経過期間(月)	15.0	22.0	29.0	30.5	31.5	32.5	
走行回数(×10 ⁴)	49~66	66~76	76~88	88~98	98~108	108~114	
舗装温度(°C)	15.0	33.4	9.8	11.0	16.5	27.0	
第2回							
経過期間(月)	4.5	5.5	7.0	14.0	21.0	22.5	23.5
走行回数(×10 ⁴)	0~5	5~15	15~32	32~42	42~52	52~67	67~72
舗装温度(°C)	34.5	24.0	15.0	33.4	9.8	11.0	16.5
経過期間(月)	24.5						
走行回数(×10 ⁴)	72~80						
舗装温度(°C)	27.0						
第3回							
経過期間(月)	5.0	5.5	7.0	8.5	9.5	10.5	17.5
走行回数(×10 ⁴)	0~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~48	48~52
舗装温度(°C)	36.0	21.5	9.8	11.0	16.5	27.0	9.5
経過期間(月)	20.0	22.0	24.0	28.5	31.5	35.0	39.0
走行回数(×10 ⁴)	53~58	58~68	68~88	88~103	103~131	131~166	166~185
舗装温度(°C)	15.5	31.0	39.0	22.5	9.5	30.5	29.5
第4回							
経過期間(月)	3.3	4.7	6.7	8.3	9.8	12.3	14.8
走行回数(×10 ⁴)	0~5	5~8	8~10	10~20	20~40	40~55	55~65
舗装温度(°C)	10.0	10.5	23.0	28.5	37.0	28.5	12.5
経過期間(月)	16.0	18.0	19.5	21.0	27.5	34.0	37.5
走行回数(×10 ⁴)	65~83	83~100	100~118	118~137	137~160	160~180	180~200
舗装温度(°C)	10.5	23.5	34.0	28.5	30.5	18.5	10.5
経過期間(月)	40.5						
走行回数(×10 ⁴)	200~220						
舗装温度(°C)	16.5						

表—6 載荷条件の要約

基本的性質 及び載荷条件	マサ土	粒度調整碎石	複合スラグI
載荷周期(cpm)	60	30	60
載荷時間(s)	0.2	0.3, 1.0, 10.0	0.2
繰返し回数	20000~30000	10000~50000	20000~80000
応力幅(kgf/cm ²)	q = 0.15, 0.3 0.45, 0.6 p = 0.3, 0.4, 0.65	q = 0.3, 0.45, 0.6 p = 0.4, 0.45, 1.1	q = 0.3, 0.45 0.6, 0.9 p = 0.4, 0.65, 1.1

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1 \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 n_i : ひずみレベル i での走行回数(回)

N_i : ひずみレベル i での供用寿命(回)

c) わだち堀れ解析法

測定されたわだち堀れ量が試験車通過による残留変位の累積に等しいという前提のもとに、2, 3の解析を試みることにした。累積残留変位の算定には弾性論に基づく次のわだち堀れ解析法⁹⁾を採用した。

①材料特性の設定

この設定には長期間を要するので、マサ土、粒調碎石および複合スラグIの3試料のみを試験の対象とした。特性化試験は復元特性の場合と同様に繰返し三軸圧縮試験装置を用いて実施し、供試体の寸法はφ5cm×10cmとした。これらの試験で採用した載荷条件の要約を表—6に示す。

実験結果に基づいて、材料特性を次のように設定した。マサ土の残留軸ひずみと載荷回数の関係式⁹⁾として

$$\epsilon_p = AN^B \dots\dots\dots (11)$$

粒調碎石および複合スラグIの関係式^{9), 10)}として

表一七 マサ土の残留軸ひずみに関する実験定数

p	0.6		0.45	
	A (×10 ⁻⁴)	B	A (×10 ⁻⁴)	B
0.3	-----	-----	3.350	0.1689
0.4	2.523	0.2109	2.472	0.2042
0.65	1.327	0.2612	1.337	0.2271
p	0.3		0.15	
	A (×10 ⁻⁴)	B	A (×10 ⁻⁴)	B
0.3	1.600	0.2163	1.109	0.2411
0.4	1.514	0.2190	1.442	0.1798
0.65	0.953	0.2378	-----	-----

表一八 終局残留軸ひずみに関する実験定数

		k × 10 ⁻³	u	v
マサ土		3.580	0.5562	0.3202
粒度調整碎石		5.396	1.6775	0.6733
複合スラグ I	0日	3.623	1.0754	1.0137
	14日	3.298	1.1410	0.8180
	1ヶ月	3.187	1.1091	0.3741
	3ヶ月	2.159	0.7661	0.6177
	6ヶ月	1.670	0.8417	0.2725

表一八 路盤材の残留軸ひずみに関する実験定数

p	材料	0.9			0.6			0.45			0.3			
		ε _{r,0} × 10 ⁻³	a × 10 ⁻⁴	b	ε _{r,0} × 10 ⁻³	a × 10 ⁻⁴	b	ε _{r,0} × 10 ⁻³	a × 10 ⁻⁴	b	ε _{r,0} × 10 ⁻³	a × 10 ⁻⁴	b	
0.4	粒度調整碎石	0日	3.62	3.80	1224.0	2.03	6.30	1389.0	1.02	11.90	3084.0			
		14日	2.47	9.25	730.8	1.67	6.67	964.4	0.70	10.24	986.4			
		1ヶ月	1.32	8.01	1323.0	1.26	10.48	1169.0	0.52	12.16	2463.0			
		3ヶ月	1.67	6.52	879.2	1.09	8.33	1057.0	0.55	13.61	1246.0			
		6ヶ月	0.83	19.93	1724.0	0.85	12.14	2148.0	0.42	37.63	5789.0			
0.65	粒度調整碎石	0日	1.91	6.00	1270.0	1.08	7.40	1292.0	0.45	16.10	3971.0			
		14日	2.41	3.79	551.8	1.82	5.95	608.4	0.79	10.58	696.5			
		1ヶ月	2.31	3.74	610.6	1.87	8.12	1223.0	1.42	6.93	1148.0			
		3ヶ月	1.85	5.04	819.5	2.39	5.35	1044.0	1.22	7.28	1255.0			
		6ヶ月	1.09	8.12	1238.0	1.00	10.05	769.6	0.89	9.54	1027.0			
1.1	複合スラグ I	0日	1.06	17.09	1589.0	0.57	2.65	1002.0	0.50	31.77	2484.0			
		14日	1.45	8.90	3227.0	1.26	12.00	2640.0	0.27	3.23	3860.0			
		1ヶ月	2.22	5.92	719.9	1.65	13.49	1684.0	0.69	10.10	1482.0			
		3ヶ月	1.63	7.37	600.4	0.91	11.35	2026.0	0.55	16.94	1518.0			
		6ヶ月	1.56	6.70	1009.0	0.79	13.97	1555.0	0.43	13.81	1254.0			
1.1	複合スラグ I	0日	1.17	7.42	1002.0	1.02	9.03	2140.0	0.29	11.69	1665.0			
		14日	0.60	7.26	2169.0	0.63	3.35	1484.0	0.60	12.80	3718.0			

$$\epsilon_p = \epsilon_{p0} + \frac{N - N_0}{a + b(N - N_0)} \dots\dots\dots(12)$$

さらに、3試料について、載荷回数が無限大になるときの終局残留ひずみと応力状態の関係式^{9),10)}として

$$\epsilon_{p,ult} = k \frac{q^u}{p^v} \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 $\epsilon_p : N = N$ での残留軸ひずみ
 $\epsilon_{p0} : N = N_0$ での残留軸ひずみ
 $\epsilon_{p,ult} : N \rightarrow \infty$ での終局残留軸ひずみ
 N : 載荷回数
 N_0 : (12)式を適用する最初の載荷回数

A, B, a, b, k, u, v : 実験定数 (表一七~九 参照)

なお、マサ土の終局残留軸ひずみとしては、第1回走行試験終了時の載荷回数(34万回)に対応する値を採用することにした。

②構造解析およびわだち掘れ量の算定

まず、疲労解析と同一入力データのもとで構造解析を実施し、舗装内の応力分布を決定した。次に、舗装構成層のj番目の層を適当な厚さ(Δz_j)で分割し、各分割層の平均的な応力状態(換言すれば、平均的な残留軸ひずみ(ε_j⁰)を決定することにより、その構成層の残留変位(δ_j⁰)をε_j⁰とΔz_jの積の和として求めた。この操作

を各構成層に対して実施することにより、ある解析区分での全残留変位(δ₀⁰)を

$$\delta_0^0 = \sum_{j=1}^n \delta_j^0 \dots\dots\dots(14)$$

として算定した。さらに、各解析区分の全残留変位を式(11)および(12)に基づく平均的な減少率で処理し、ひずみ硬化則¹⁴⁾を適用することによってわだち掘れ量を解析した。なお、解析は片側車輪中心軸にそって実施し、表層の残留変位は無視できるものと仮定した。

(2) 解析結果および考察

各舗装挙動の解析は、全試験断面を対象とするのではなく、構成層の材料特性がすべて設定されている断面についてのみに行った。しかし、第1回走行試験における短期養生のスラグ路盤を含む試験断面(3断面および6断面)、第4回走行試験における舗装構成を変えた試験断面(K-2断面およびK-3断面)については解析を省略した。

a) たわみ量

この解析を実施した試験断面を要約すると、第1回走行試験では2, 4, 5断面、第2回走行試験ではE, F, G断面、第3回走行試験ではI, II, V断面、第4回走行試験ではK-1, K-5断面となる。なお、粗粒度アスファルトコンクリートおよび切込み碎石の復元定数は、それぞれ密粒度アスファルトコンクリート、マサ土の復元定数に等しく、転炉スラグの復元定数はM_r = 3500 p^{0.68} kgf/cm²(水砕スラグを混入しており高炉冷スラグの6割程度を期待)、ν_r = 0.20と仮定した。

解析結果と観測結果の比較を図-6に示す。図より、第1回~第3回走行試験の初期段階では、水硬性を早く発現する複合スラグ断面の場合に、両結果の差異が比較的大きくなることが認められる。この差異は、主として、ベンケルマンビームによるたわみ測定誤差¹⁵⁾に起因したものである。つづいて、走行試験が進行した段階では、II断面を除くすべての断面で、両結果の差異は走行回数の増加とともに漸増する傾向が認められる。この傾向はひびわれ発生率にも関連しており、先述した舗装体の劣化現象を実証するものと思われる。一方、第4回走行試験では、解析値と観測値の経時変化は類似しているが、両値の間にはかなり大きな差異が認められる。これ

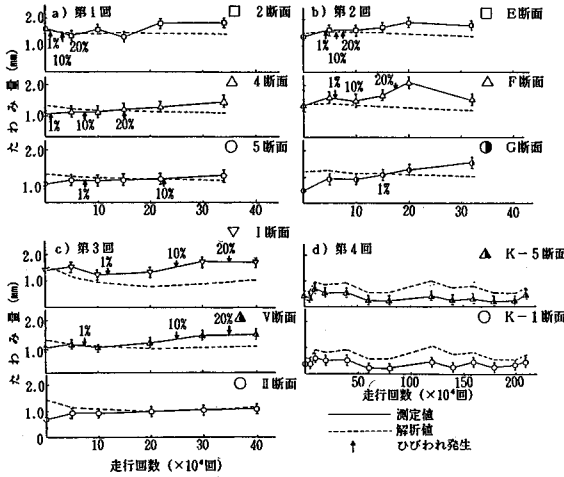


図-6 たわみ量の解析結果

表-10 疲労寿命の算定結果および観測結果

	舗装断面	疲労破壊の観測値 ($\times 10^4$ 回)	疲労寿命の算定値 ($\times 10^4$ 回)
第1回	粒度調整砕石	13	13
	高炉徐冷スラグ	15	250
	複合スラグ I	53	246
第2回	粒度調整砕石	16	17
	高炉徐冷スラグ	12	257
	複合スラグ I	45	289
第3回	フルデブス	19	18
	高炉徐冷スラグ	18	204
	複合スラグ I	127	290
第4回	高炉徐冷スラグ	220以上	275
	複合スラグ I	220以上	277

は、ベンケルマンビーム試験の測定誤差、走行試験の継続により路体および路床部への締め固め効果等に起因したものである。なお、これらの断面に関しては、舗装体の劣化現象は試験期間中に生じなかったものと推察される。

b) ひびわれ量

この解析においては、たわみ量の場合と同じ試験断面を対象として構造解析と疲労寿命の算定を実施した。なお、算定寿命が試験期間中の走行回数を越える場合には、各試験時の解析データを繰返し入力することにした。疲労寿命の算定結果と観測結果の比較を表-10に示す。ここで、疲労寿命の観測値は、粒度調整砕石(第1回走行試験)およびフルデブス断面の算定結果を基準にして、算定値に対応するひびわれ率とひびわれ発生後の伝播率(図-4の直線勾配)とが直線関係にあるという仮定のもとにそれぞれ決定することにした。表より、第4回走行試験(継続中)以外の全スラグ断面において、算定値は観測値を大きく上回っていることが認められる。これ

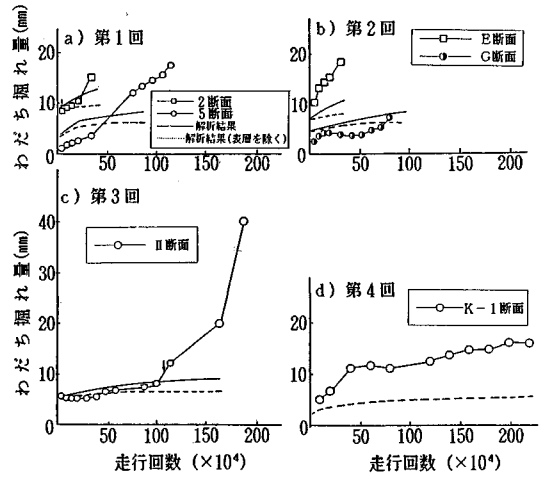


図-7 わだち堀れ量の解析結果

は、ひびわれがある程度発生する以前に、舗装体がすでに劣化現象を受けていたことを示唆するものと思われる。

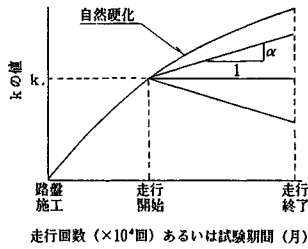
c) わだち堀れ量

この解析を実施した試験断面は、第1回走行試験の2, 5断面, 第2回走行試験のE, G断面, 第3回走行試験のII断面および第4回走行試験のK-1断面である。なお、切込み砕石の残留変形特性はマサ土の特性に準ずるものとした。

図-7にわだち堀れ量の解析結果と測定結果を示す。図中の破線は先述した路盤表面での解析結果を、実線は表層自体の実測値(走行試験終了後の開削断面によって測定)をすりつけた結果を、それぞれ示している。図より、走行試験の初期においては、解析値は測定値に比較的よく追従するが、走行回数の増加とともにその追従性は損なわれることが認められる。これも、ひびわれ発生との関連より判断して、舗装体の劣化現象に起因していることは明らかである。なお、表層厚の厚いK-1断面については、この解析法は適用できないようである。

4. 等価復元変形係数を用いた疲労挙動の再解析

2.において、円形走行試験という過酷な交通荷荷のもとで、第1回~第3回走行試験の舗装体はすべて劣化現象を呈し、破壊に至り、破壊を越えることが観測された。したがって、前章で実施したこれらの断面に対する解析結果は、たわみ量とわだち堀れ量に関してはひびわれの発生とともに観測結果を大きく離反することを、ひびわれ量(疲労挙動)に関してはひびわれの発生以前にスラグ路盤の劣化現象が進行していることを、それぞれ示唆した(走行試験終了後の舗装断面開削調査にて鉄鋼



図一8 等価復元変形係数の模式図

表一11 等価復元変形係数を用いた疲労寿命の算定結果

粒状調整砕石舗装の疲労寿命(×10 ⁴ 回)				
	第1回		第2回	
算定値	13		17	
観測値	13		16	
スラグ舗装の疲労寿命(×10 ⁴ 回)				
等価復元変形係数の設定	第1回		第2回	
	高炉徐冷スラグ	複合スラグ I	高炉徐冷スラグ	複合スラグ I
自然硬化	250	246	257	289
α = +60	81	83	58	128
α = +30	77	83	48	124
α = 0	58	77	43	51
α = -30	51	57	47	47
α = -60	49	53	43	45
α = -90	21	50	26	43
α = -120	15	27	18	42
観測値	15	53	12	45
等価復元変形係数の設定	第3回		第4回	
	高炉徐冷スラグ	複合スラグ I	高炉徐冷スラグ	複合スラグ I
自然硬化	204	290	275	277
α = +60	107	119	138	195
α = +30	18	117	92	194
α = 0	17	108	78	143
α = -30	17	107	73	80
α = -60	16	29	67	73
観測値	18	127	220以上	220以上
フルデブス舗装の疲労寿命(×10 ⁴ 回)				
	第3回			
算定値	18			
観測値	19			

スラグ断面に無数のひびわれを確認した)。前者の解明は連続体力学の範囲を越えるので、本章では、後者の現象のみを等価復元変形係数の仮定のもとで解明(疲労挙動の再解析)することにした。ここで、等価とは、軸対象条件のもとで、交通載荷の影響を受けて劣化現象を呈している部分(後輪軌跡下)とそうでない部分とを同等の一つの値で代表させることを意味している。

劣化現象の過程は不明であるので、鉄鋼スラグ路盤自体の疲労算定結果¹⁰⁾および解析の単純化を考慮して式(5)のK値のみを変動させる等価復元変形係数の設定を仮定した。

$$K = K_0 + \alpha N \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 K_0 : 走行試験開始時のK値(式(5)参照)
 α : 勾配((10⁴回)⁻¹)

N: 走行回数(10⁴回)

図一8の模式図に示すように、 α の値が正であることは交通載荷によって水硬性の発現は抑制されるが硬化現象はなお継続することを、その値が0であることは水硬性の発現と同程度に劣化現象が生じることを、その値が負であることは交通載荷の影響が水硬性の発現を阻止するだけでなく既存の硬化部をも破壊することを、それぞれ意味している。K値の上限および下限には、表一3に示した上限値と粒調砕石の値(式(3))を参考にして、それぞれ7500、1400を設定した。なお、復元ポアソン比に関しては、その解析結果に及ぼす影響が小さいことを考慮して、式(6)の値がそのまま保持されるものと仮定した。

上記の復元定数を用いて得られた疲労再解析の結果を表一11に示す。劣化の程度を解明するために、 α の値としては、+60~-120の範囲で30刻みに選定した。また、比較のために表一10の解析結果と観測結果も同表に併記した。表より、観測結果に対応する α の値は、高炉徐冷スラグ断面に関しては第1回および第2回走行試験で-120以下、第3回走行試験で+30、第4回走行試験で+60以上となり、複合スラグ断面に関しては、第1回および第2回走行試験で-60、第3回および第4回走行試験で+60以上となることが認められる。このことは、前章の検討結果に合致するものであるが、スラグ路盤に生じる劣化現象が舗装構造および水硬性発現の程度(高炉徐冷スラグと複合スラグの差異、走行試験開始までの養生期間の長短)によって大きく左右されることを示唆している。なお、第3回走行試験においては、試験開始直後の装置故障のため走行回数10万回までの交通載荷が比較的緩慢であったことを附記しておく。

参考のために記しておく、現在までの現地舗装結果では第4回走行試験と同様に劣化現象が生じていないことが確認されている¹⁹⁾。

5. まとめ

以上の結果を要約すると次のとおりである。

(1) 同一試験条件のもとで舗装合計厚Hを一定とした場合、走行試験で観測された舗装挙動のすべてにおいて、複合スラグ、高炉徐冷スラグ、粒調砕石の順に路盤材としての優位性が確認された。このことは、アスファルト舗装要綱の規定に従えば、水硬性粒度調整鉄鋼スラグの等値換算係数は少なくとも0.35以上であること、また複合スラグの等値換算係数は0.55以上であることを実証している。

(2) 同一試験条件のもとでT_aを一定とした場合も、上記の優位性の順は保持され、高炉徐冷スラグ断面はフルデブスアスファルト断面およびアスファルト安定

処理碎石断面よりも優れていることが確認された。このことは水硬性粒度調整鉄鋼スラグの等値換算係数が0.55以上であることを実証している。

(3) たわみ量とわだち堀れ量に関する解析結果は、ひびわれ発生率に関連しており、走行回数の増加とともに観測結果を大きく離反した。また、舗装構造が堅固になるほどベンケルマンビームによるたわみ測定誤差は大きくなること、表層厚が増大するほど表層自体の残留変位は無視できなくなること確認された。

(4) ひびわれ量に関する疲労解析の結果は、表層ひびわれの発生以前に、スラグ路盤の劣化現象が進行していることを示唆した。このことは、等価復元変形係数を用いた疲労挙動の再解析を試みることによって、その可能性と進行程度が確認された。

6. あとがき

本研究の試験結果は、円形走行試験という過酷な交通载荷のもとで、鉄鋼スラグ路盤がその硬化特性に抑制を受ける場合があることを示唆した。幸甚にも、現在まで実施した数路線での調査・解析¹⁶⁾によれば、この抑制作用は現地スラグ路盤に生じていないことが確認されている。しかしながら、スラグ路盤の構造評価を左右する重要な要因である以上、この作用については、諸種の現地状態を対象とした今後の究明が必要だと思われる。

また、舗装挙動の解析には観測結果に追従できる基本的な各解析法を採用したが、その運用手順の仮定および入力データの処理には多くの問題点が含まれている。今後、これらの問題点の検討とともに、設計に直結した解析法^{17), 18)}の検証も必要となるであろう。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，1988
- 2) 西 勝，佐藤康文，浦田隆司：走行試験にもとづくスラグ路盤の評価について，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，IV-18，1982
- 3) Duncan, J.M. *et al.* : Finite Element Analyses of Pavements, HRR 228, pp.18~33, 1968
- 4) Kasianchuk, D.A. *et al.* : Asphalt Concrete Pavement Design-A Subsystem to Consider the Fatigue Mode of Distress, HRR 291, pp.159~172, 1969
- 5) Heukelom, W. and A.J.G. Klomp : Consideration of Calculated Strains at Various Depths in Connection with the Stability of Asphalt Pavements, Proc. of the 2nd Int. Conf. on the S.D.A.P., pp.158~168, 1967
- 6) 西 勝，三輪 亨，寺嶋 博：円形走行試験の観測結果に基づく反復有限要素法及び疲労寿命算定法の検証，土地造成工学研究施設報告第4号，pp.1~17，1986
- 7) 西 勝：疲労挙動に基づくアスファルト舗装の供用性評価，舗装 No.11, pp.27~32, 1983
- 8) 西 勝，渡辺泰之：円形走行試験におけるアスファルト舗装の構造解析について，建設工学研究所報告第25号，pp.199~210, 1983
- 9) 西 勝，渡辺泰之：たわみ性舗装におけるわだち堀れの一算定，土地造成工学研究施設報告第2号，pp.1~12, 1984
- 10) 西 勝，河端 薫：路盤材としての鉄鋼スラグの基礎的性質と力学的特性，土木学会論文集第413号，IV-12, 1990
- 11) 山田 優，三瀬 貞：アスファルト舗装の供用性評価に関する一研究，第15回日本道路会議一般論文集，pp.269~270, 1983
- 12) Witczak, M.W. : Design of Full-Depth Asphalt Airfield Pavements, Proc. of the 3rd Int. Conf. on the S.D.A.P., pp.550~567, 1972
- 13) Miner, M.A. : Cumulative Damage in Fatigue, Trans., ASME Vol.66, pp.A 159~A 164, 1945
- 14) Monismith, C.L. *et al.* : Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loading, TRR 537, pp.1~17, 1975
- 15) 三浦裕二，河島克美，内田 弘：アスファルト舗装のたわみに及ぼす温度と構造の影響，土木学会論文報告集第340号，pp.193~200, 1983
- 16) 西 勝，黒田昭一，南方文明：交通条件が複合スラグ路盤の硬化特性に及ぼす影響について，土地造成工学研究施設報告第5号，pp.1~11, 1987
- 17) Claussen, M.W. *et al.* : Asphalt Pavement Design-The Shell Method, Proc. of the 4th Int. Conf. on the S.D.A.P., pp.39~74, 1977
- 18) Santucci, L.E. : Thickness Design Procedure for Asphalt Mixes, Proc. of the 4th Int. Conf. on the S.D.A.P., pp.424~456, 1977
- 19) 西 勝，南方文明，佐藤康文：実路における鉄鋼スラグ路盤材料の硬化特性について，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，V-23, 1988

(1990.3.28・受付)