

# 路盤材としての鉄鋼スラグの基礎的性質と力学的特性

## SOME BASIC AND MECHANICAL PROPERTIES OF IRON AND STEEL SLAGS AS BASE-COURSE MATERIALS

西 勝\*・河端 薫\*\*

By Masaru NISHI and Kaoru KAWABATA

The ultimate purpose of the present study is to evaluate the performance of asphalt pavements containing iron and steel slag base courses. As the first step of the purpose, this paper describes some basic and mechanical properties of slag materials. In the former description, the major emphasis is placed on the introduction of a newly proposed compound slag, namely, a mixture of 50% by weight of steel-making slag, 30% by weight of blast-furnace slag and 20% by weight of granulated slag. This compound slag exhibited more improved hydraulic setting behavior, especially at early curing ages, than the blast-furnace slag itself. In the latter, resilient constants, accumulative plastic strains and fatigue properties of the compound slag specimens are discussed by comparing with those of each reference material, being blast-furnace slag or crushed stone. The regressed equations for these characterization data, regarding some of the number of stress application, stress state and curing age, were verified through the comparison between observed and computed results for each corresponding behavior in pavements.

*Keywords* : slag, base-course material, basic properties, resilience, rutting, fatigue

### 1. ま え が き

経済成長に伴ってわが国の建設工事は増大の一途にある。幹線道路における走行車両はますます増加し、かつ重量化の傾向にあり、種々の破壊形態が発生し、その補修費用は莫大な額となっている。このため、舗装寿命の延長等舗装技術に対する要求は高度化し、品質の高い舗装材料の研究が望まれている。

一方、石油ショックを経験して以来、多種多様の産業廃棄物の再利用がクローズアップされ、積極的に取り組まれている。特に鉄鋼産業から副生する鉄鋼スラグ（高炉スラグと製鋼スラグの合計で年間約3600万トン）は省資源・省エネルギーの観点から有効な材料として着目され、高炉スラグを中心に主として土木建築の分野において使用されている<sup>1)</sup>。

その用途の1つは路盤材であり、比較的緩慢に水硬性を発揮し、施工後長期にわたって支持能力が向上する面からきわめて有用な材料だと認められている。しかし、硬化特性は施工条件や気温等外的条件によって大きく変

動するため、その評価方法は単純ではない。今までの研究はほとんどが一軸圧縮試験に基準をおくもので<sup>2)</sup>、このような静的荷重のもとでの材料特性だけでは舗装体の挙動を説明できると思われず、その特性については今後究明されるべき問題が多い。

本研究の究極的な目的は鉄鋼スラグの路盤材としての特性を明確にし、その供用性を定量的に評価することである。このためには実路において交通荷重下の舗装体の挙動調査を行うのが最適であるが、長期にわたる大規模な調査となり実行困難である。したがって、現地状況を極力再現した円形走行試験路で実車試験を行い、舗装体の挙動を観測する研究法を採用してきた<sup>3)</sup>。

一方、不十分な試験および観測結果を補完するには、各層構成材料の性状評価およびこれらに影響を及ぼす外的因子の効果を定量的に取り入れた構造解析法の確立が必要である。研究の流れとしては、上記の目的を達成するために各種試験を実施して材料特性を把握し、円形走行試験結果を対象とした舗装の構造解析、疲労寿命の算定、わだち掘れの算定を行い、それらの解析結果に基づく鉄鋼スラグの等値換算係数の推定まで一貫した研究を実施してきた。試行錯誤を重ねた結果、合理的な研究成果を得ることができたので、本研究は、その一部として、鉄鋼スラグの基礎的性質と力学的特性について詳述する

\* 正会員 工博 神戸大学教授 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 神戸市中央区脇浜町1)

ものである。

そのために2.において鉄鋼スラグの種類、組成と水硬性、利用状況を、3.において鉄鋼スラグの路盤材としての基礎的性質と転炉スラグに高炉徐冷スラグと水砕スラグを混合した路盤材（以下複合スラグと称する）の開発とその基礎的性質について述べる。4.では鉄鋼スラグを用いた路盤材の力学的特性として復元変形特性、残留変形特性、疲労特性について述べ、最後に5.で以上の結果を要約し、6.において本研究に関する問題点を言及する。

## 2. 鉄鋼スラグの概要

鉄鋼スラグには鉄鉱石を還元して銑鉄を製造する高炉より副生される「高炉スラグ」と、銑鉄より鋼を精錬する製鋼炉（以下転炉と称する）で副生される「転炉スラグ」とがある<sup>4)</sup>。他に、スクラップを主原料にして再溶解し、精錬する電気炉より副生される「電気炉スラグ」（その特性は転炉スラグとはほぼ類似）があるが本論文では割愛する。

### (1) 鉄鋼スラグの種類

#### a) 高炉スラグ

高炉では鉄鉱石（ $Fe_2O_3$ 、 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ が主体）、コークス、石灰石の主原料を装入して、約1500°Cの熱風を炉内に吹き込みコークスを燃焼させる。熱と還元ガスによって酸化鉄は銑鉄に、また脈石成分は石灰石やコークス中の灰分と反応してスラグになり、両者は比重の差により分離され炉外に排出される。銑鉄1トン当たり平均300kgの高炉スラグが副生されるが、熔融状態のスラグをドライピットまたは冷却ヤードに流し込み、自然の空冷と適当な散水冷却により結晶質、岩石状とする「高炉徐冷スラグ」と、熔融状態のスラグに大量の圧力水を噴射して急冷させガラス質、砂状とする「水砕スラグ」とがある。

#### b) 転炉スラグ

熔融銑鉄は、生石灰、ドロマイト、合金鉄などとともに転炉に装入され、純酸素にてC、Si、P、S等不要成分を酸化燃焼させてのち鋼とスラグになり、両者は比重差で分離されて炉外に排出される。転炉スラグは鋼1トン当たり約120~150kg副生されるが、冷却方式は自然空冷と適当な散水が大勢を占め、冷却後は結晶質、岩石状となる。

### (2) 鉄鋼スラグの組成と水硬性

#### a) 化学組成

鉄鋼スラグは表-1に示すとおり $SiO_2$ 、 $CaO$ 、 $MgO$ が主成分で、高炉スラグには $Al_2O_3$ が、転炉スラグには $FeO$ 等金属酸化物が含まれ、それぞれ含有量は異なるが、含有成分は自然砕石にもまた水硬性を有するポルト

表-1 鉄鋼スラグおよび岩石等の化学組成（例）（単位：%）

成分	$SiO_2$	$CaO$	$MgO$	$FeO$	$Al_2O_3$
高炉スラグ	30~41	35~45	3~7	0.3~1.7	12~20
転炉スラグ	9~20	37~59	0~8	5~20	0.1~2.5
安山岩	59.95	5.80	2.75	3.13	17.31
ポルトランドセメント	22.0	64.2	1.5	—	5.5

ランドセメントにも類似している。

#### b) 鉱物相と水硬性

「高炉徐冷スラグ」はゲーレンナイト（ $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ ）とアケルマナイト（ $2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$ ）との固溶体のメリライトとシリケートから成っているが、シリケートはヴォラストナイト（ $CaO \cdot SiO_2$ ）と $\beta$ -ダイカルシウムシリケート（ $\beta$ - $2CaO \cdot SiO_2$ ）が主体である<sup>5)</sup>。結晶化したスラグは水和活性を示さないが、微少な急冷されたガラス質成分を有するので、ダイカルシウムシリケートの溶出成分がガラス質成分に刺激剤として作用し、反応は遅延性であるけれどもかなりの自硬性を有する。

「水砕スラグ」は高石灰アルミノシリケートガラス質であるために強い潜在水硬性を有している<sup>5)</sup>。 $Ca(OH)_2$ のようなアルカリ性物質が共存すると水砕スラグに $OH^-$ が吸着され、ガラス構造を破壊して $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $MgO$ の溶出を促進させ、液相中の各イオン濃度を高めカルシウムシリケート、カルシウムアルミネート等の水和物を継続して析出させる。この現象については、スラグ- $Ca(OH)_2$ -水系の反応としての水和熱量およびモルタル硬化体の圧縮強さとして試験結果を報告している<sup>5)</sup>。

「転炉スラグ」の主要鉱物は $\beta$ -ダイカルシウムシリケートであり、塩基度（ $CaO/SiO_2$ ）が高い場合にはトリカルシウムシリケート（ $3CaO \cdot SiO_2$ ）やライム〔 $Ca(Mg, Mn, Fe)O$ 〕が観察される<sup>5)</sup>。ダイカルシウムシリケートにはPが固溶されて安定化されているために水和反応は非常に遅延である。

### (3) 鉄鋼スラグの利用状況

鉄鋼スラグが資源として本格的に利用され始めたのは昭和40年代からで、鉄鋼産業の成長とともにスラグの

表-2 鉄鋼スラグの用途（1988年度）

スラグの種類	用途（*水硬性活用）	割合
鉄鋼スラグ 3,623万t	徐冷スラグ	
	路盤材、土工用材	26%
	セメント原料	8
	コンクリート骨材	2
	その他	10
	水砕スラグ	
	セメント原料、炭和材	44
	土工用材、地盤改良材	2
	路盤材	1
	コンクリート骨材	4
肥料用、その他	3	
	T00	
転炉スラグ 1,170万t	運搬用材	12%
	土工用材、地盤改良材	3
	セメント原料	7
	肥料用	14
	その他	2
「内訳」転炉スラグ 920万t 電気炉スラグ 250万t	肥料用、その他	T00

量も増大し、主にセメント用材・路盤材として利用されている。現在わが国の鉄鋼スラグの利用状況は表-2に示すとおりである<sup>7)</sup>。水硬性を活用した用途は高炉スラグでは72%となるが、転炉スラグでは45%と低く、有効活用の早急な検討が望まれている。

3. 路盤材としての鉄鋼スラグの基礎的性質

高炉徐冷スラグは従来から路盤材として利用され、その性能は知られているが、水砕スラグや転炉スラグもその組成・性質をよく理解し、混合して活用することにより、高品質な路盤材特性を得ることが可能である。以下に各鉄鋼スラグの素材としての性質と、それらを混合した複合スラグの基礎的性質について概説する。

(1) 各鉄鋼スラグの基礎的性質

「高炉徐冷スラグ」は、硫黄(S)を大気エージングによって安定化させ、溶出水の呈色(黄色)や硫化水素臭の発生を防止したエージング完了材である。メリライトを主な鉱物とし、被破砕性に富み、粒子の付着凝集性が大きく、締固め特性に優れている。

「水砕スラグ」は、砂粒状で非塑性であるため水による影響を受けにくく、かつ粒子のかみ合わせがよいため、他のスラグと混合される場合締固め特性を向上させることが期待できる。また、転炉スラグや高炉徐冷スラグ等のアルカリ性溶出液による刺激を受けて長期にわたる水硬性を発現する。

「転炉スラグ」は、金属系酸化物を多く含有して硬質緻密であり、被破砕性が悪く、細粒分が不足し、転圧性が劣る傾向にある。構成鉱物の少量のライム(遊離石灰)は膨脹崩壊することがあるため、その解決策としてエージングが行われている。エージングとは、大気および水中に暴露し、反応性のライムをあらかじめ安定化する方法であり、安定化状態は80°C温水による水浸膨脹試験で評価されている<sup>8)</sup>。図-1にエージングによる安定化試験の一例を示す。

上述した各鉄鋼スラグの基礎的性質を表-3および表-4に要約する。

表-3 鉄鋼スラグの粒度分布および特性値(例)

スラグ	ふるい目(mm)	通過重量百分率(%)							締固め度		修正CBR(%)
		30	25	13	.5	2.5	0.4	0.074	0.4	rdmax	
転炉スラグ	100	97.1	54.7	24.4	17.2	4.3	1.6	8.8	2.599	140	
高炉徐冷スラグ	100	98.6	70.7	56.3	41.3	18.6	7.3	9.8	2.323	170	
水砕スラグ	100	100	100	100	97.0	23.0	1.0	20.0	1.530	—	
複合スラグ	100	100	72.2	48.2	38.5	14.9	3.6	8.7	2.310	216	

表-4 鉄鋼スラグの物理的性質(例)

項目	粗骨材(≧5mm)			細骨材(≦5mm)			80°C法水浸膨脹比(%)
	比重		吸水率(%)	比重		吸水率(%)	
	表乾	かさ		表乾	かさ		
転炉スラグ	3.34	3.30	1.43	2.95	2.78	6.10	4.1
高炉徐冷スラグ	2.61	2.50	4.21	2.65	2.50	6.07	0
水砕スラグ	—	—	—	2.68	2.62	2.56	—
複合スラグ	3.07	3.03	2.48	2.77	2.67	5.11	0.1

(2) 複合スラグの開発とその基礎的性質

著者らは長年にわたって、未活用資源である転炉スラグの有効利用を目標に、転炉スラグの配合率を多くした複合スラグの開発を検討している。したがって、鉄鋼スラグという総称に当然含まれるべきものではあるが、節をあらためて、複合スラグの開発とその基礎的性質を紹介することにする。

各スラグの配合比(重量比)に関しては、まず粒度分布および施工の面より細粒分を確保すべく10~20%の水砕スラグ配合率を設定し、次に強度特性、膨脹崩壊の可能性および経済性を配慮して転炉スラグの最大配合率を50%と設定した(残りの配合率は高炉徐冷スラグである)。この配合条件のもとで得られる複合スラグの粒度分布と一軸圧縮強さ(JIS A 5015)の試験結果を、それぞれ図-2、図-3に示す。これらの図より、水砕スラグの配合率が大きいほど、粒度分布は良好となり、一軸圧縮強さも増大することが認められる。さらに敷設試験での施工性も加味して、水砕スラグの配合率は20%と決定した。したがって、本論文で対象とする複合スラグ

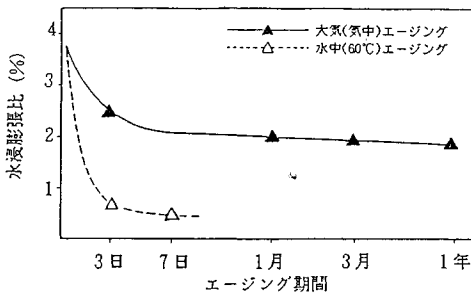


図-1 エージングによる転炉スラグの安定化(例)

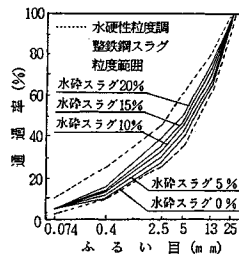


図-2 粒度加積曲線(転炉スラグ50%)

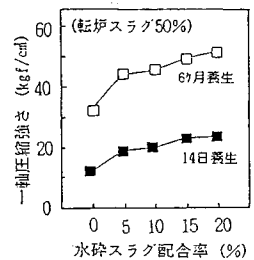
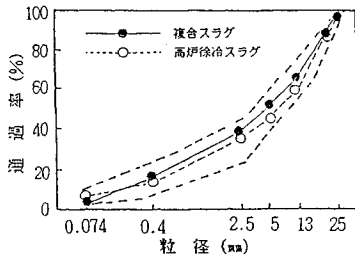
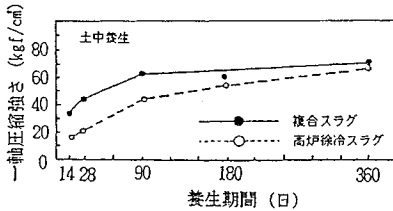


図-3 一軸圧縮強さと水砕スラグ配合率の関係



図—4 粒径加積曲線



図—5 一軸圧縮強さの経時変化

グは、転炉スラグ 50%，高炉徐冷スラグ 30% および水砕スラグ 20% の混合スラグを意味するものである。

この複合スラグについての基礎的性質の一部を表—3、表—4 に併記したが、修正 CBR を除いては、それぞれ混合物としての中間値を示している。次に複合スラグの粒度分布と一軸圧縮強さの経時変化についての試験結果を高炉徐冷スラグの結果と比較して、それぞれ図—4、図—5 に示す。粒度分布には明確な差異は認められないが、一軸圧縮強さの経時変化については、その養生初期において相当の差異が認められる。これは、CBR 値の場合と同様で、複合スラグにおけるアルカリ効果の寄与が大きく早強性を示したためと思われる。なお、図—5 の土中養生とは供試体のゴムスリーブに等間隔に穴を開け、水分の発散を自由にし、深さ約 30 cm の土中に埋設する方法である。

4. 路盤材としての鉄鋼スラグの力学的特性

舗装材料の構成式は荷重条件変数、環境変数、施工変数の関数となるため、異なった実路状況のもとで長期にわたる大規模な現地調査を実施しない限り汎用的な関数式を得ることは不可能である。このような方法は時間、経費、労力の消費の面から実行が困難であり、かつ現地測定値に対する解析方法も十分でないなどの欠点を有している。そこで、環境変数および施工変数のある特定な組合せを想定し、諸種の応力状態を組み合わせた室内試験によって舗装材料の力学的特性の究明を試みることにした。本章では、舗装体の挙動を解明するうえで重要な要素となる復元変形特性、残留変形特性、割裂疲労特性について、その適用例を含めて論述する。

(1) 復元変形特性

舗装体の構造解析を行うには、まず舗装材料の材料定数（復元変数係数および復元ポアソン比）の決定が必要である。従来より、著者の 1 人は、現地応力状態を再現するものとして広く採用されている繰返し三軸圧縮試験により、粒状路盤材料と粘性路床土の材料特性化を試みている<sup>9)</sup>。その結果、1 個の供試体を用いて繰返し偏差応力を漸減的に減少させる方法（偏差応力減少試験）の有効性を確認するとともに、復元変形係数については、粒状材は平均主応力、粘性土は偏差応力の影響を受けること、復元ポアソン比については、両材料とも応力比の影響を受けることを報告している。ここでは、これらの研究成果に基づいて、複合スラグと高炉徐冷スラグの復元変形特性を究明する。

a) 実験概要

本実験で用いた繰返し三軸圧縮試験装置は、二重セル式で体積変化の測定が可能であり、空気圧式加圧シリンダーを使用し、供試体に繰返し偏差応力を与えるものである<sup>10)</sup>。対象とした試験試料は複合スラグおよび高炉徐冷スラグであり、それらの締固め特性値は円形走行試験の場合と同一（複合スラグ： $w_{opt}=9.1\%$ 、 $\rho_{d,max}=2.47\text{ g/cm}^3$ 、高炉徐冷スラグ： $w_{opt}=8.9\%$ 、 $\rho_{d,max}=2.23\text{ g/cm}^3$ ）とした。供試体は直径 10 cm、高さ 20 cm の円柱形で、養生期間は 14 日、1 か月、3 か月、6 か月、1 年とした。また、養生条件としては、いくつかの養生方法による結果の比較より土中養生が現地状態を良く再現していると判断し<sup>11)</sup>、円形走行試験の施工時期と同一の時期で土中養生を行った。

繰返し三軸試験では、載荷前に実験で用いる側圧で供試体を等方的に圧密したのち、所定の偏差応力で繰返し載荷試験を行い、つづいて載荷時の平均主応力が一定となるように側圧を調整していく偏差応力減少試験を採用した。各載荷段階での載荷回数は、復元軸ひずみがほぼ一定の値に落ち着くまで 5000~10000 回とした。なお、最終段階の載荷終了後、供試体の復元変形係数の下限値を求めるため、一軸状態のもとでの載荷試験（載荷回数は 50 回程度）も実施した。載荷条件の要約を表—5 に示す。

b) 実験結果と考察

① 復元軸ひずみと載荷回数

図—6 に、一例として、複合スラグと高炉徐冷スラグの養生期間 6 か月、平均主応力  $p=0.8\text{ kgf/cm}^2$  にお

表—5 復元変形特性に関する載荷条件

載荷回数 (回)	載荷時間 (S)	繰返し偏差応力 q (kgf/cm <sup>2</sup> )	平均主応力 p (kgf/cm <sup>2</sup> )
5000~10000	0.3	0.3~3.6	0.8, 1.6, 2.4

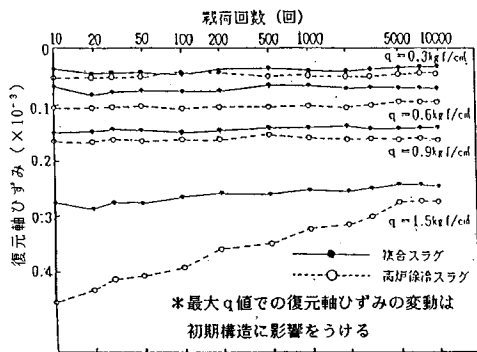


図-6 復元軸ひずみと载荷回数との関係

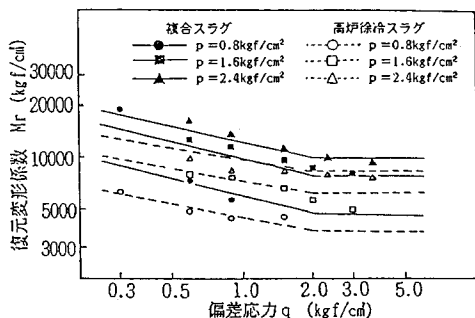


図-7 復元変形係数と偏差応力の関係

る復元軸ひずみと载荷回数との関係を示す。図より、粒状土の場合と同様に<sup>9)</sup>、両スラグの場合においても、偏差応力減少試験を採用することにより供試体初期構造の影響が消失することが確認される。

② 復元変形係数

復元変形係数は  $M_r = q / \epsilon_a$  ( $M_r$ : 復元変形係数 (kgf/cm<sup>2</sup>),  $q$ : 偏差応力 (kgf/cm<sup>2</sup>),  $\epsilon_a$ : 復元軸ひずみ) の関係より求めた。図-7に、一例として、複合スラグと高炉徐冷スラグの3か月養生供試体に関する復元変形係数と偏差応力の関係を、平均主応力をパラメータとして示す。図より、両スラグとも偏差応力の影響を受け、偏差応力が約2.0 kgf/cm<sup>2</sup>付近までは、偏差応力の増加とともに復元変形係数は減少する傾向にあり、偏差応力がそれよりも大きい範囲では、復元変形係数はほぼ一定になることが認められる。これはスラグの硬化現象により粘着力に類似した結合力が発生し、粘性土に近い挙動<sup>12)</sup>を呈したためと考えられる。また、平均主応力の増加とともに復元変形係数が増加する傾向も認められる。

図-8は、この平均主応力の影響を調べるために、復元変形係数と平均主応力の関係を図示したもので、復元変形係数が  $q = 2.0$  kgf/cm<sup>2</sup> 以上で一定であるという関係より求めたものである。図より、復元変形係数は平均主応力の増加とともに直線的に増加することが認められ

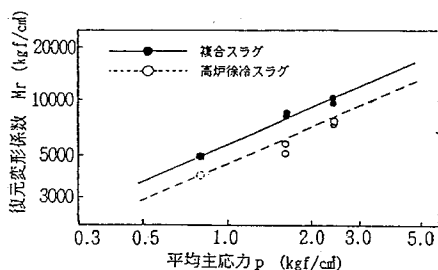


図-8 復元変形係数と平均主応力の関係

る。これは粒状土の復元変形係数が平均主応力に依存すること<sup>9)</sup>を考えれば当然のことと思われる。図は省略するが、以上のような傾向は他の養生期間での結果においても認められた。

これらの結果より、両スラグの復元変形係数は平均主応力と偏差応力の指数関数として次式のように近似することにした。

$$M_r = K \cdot p^M (2.0/q)^N \quad q < 2.0 \dots \dots \dots (1)$$

$$M_r = K \cdot p^M \quad q \geq 2.0 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $M_r$ : 復元変形係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $p$ : 平均主応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $q$ : 偏差応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$K, M, N$ : 実験定数

図-9に平均主応力  $p = 0.8$  kgf/cm<sup>2</sup> における両スラグの復元変形係数と偏差応力の関係を、図-10に偏差

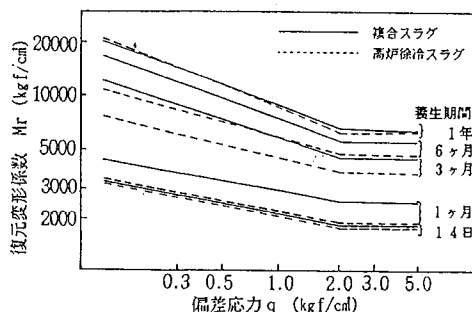


図-9 復元変形係数と偏差応力の関係に及ぼす養生期間の影響

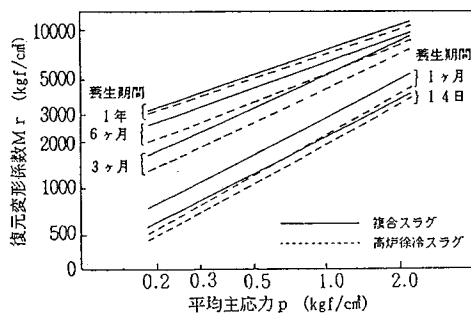


図-10 復元変形係数と平均主応力の関係に及ぼす養生期間の影響

応力  $q=2.0 \text{ kgf/cm}^2$  における両スラグの復元変形係数と平均主応力の関係を、それぞれ養生期間をパラメータとして上述の回帰式の形で示す。図より、両スラグとも養生期間の増加に伴って復元変形係数は増加する傾向が確認される。また、養生期間6か月までは複合スラグの復元変形係数は高炉徐冷スラグの復元変形係数より大きく、養生期間1年ではあまり差がないことが認められる。これは複合スラグが高炉徐冷スラグに比べて早硬性であることを示すもので、ある程度の養生期間が経過すれば、両スラグの復元変形係数はほぼ同じ値に収束するものと考えられる。

以上の結果は他の試験条件においても同様に得られている。それらの全結果より、復元変形係数に関する回帰式(式(1),(2))の実験定数は養生期間の関数として表-6のように設定した。なお、表における実験定数の上、下限値は水硬性の発揮がほぼ完了したと考えられる養生期間1年での供試体の値を基準にしている。

③ 復元ポアソン比

復元ポアソン比は  $\nu_r = -\epsilon_r / \epsilon_a$  ( $\nu_r$ : 復元ポアソン比,  $\epsilon_a$ : 復元軸ひずみ,  $\epsilon_r$ : 復元横ひずみ) の関係より求めた。図-11に両スラグの養生期間1か月と6か月の復元ポアソン比と応力比 ( $p/q$ ) の関係を示す。両スラグのポアソン比と応力比には相関性が認められるので、次式のような2次関数で近似することにした。

$$\nu_r = A_0 + A_1\eta + A_2\eta^2 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\nu_r$ : 復元ポアソン比  
 $\eta$ : 応力比 ( $q/p$ )

$A_0, A_1, A_2$ : 実験定数

図-12に各養生期間における復元ポアソン比の実験結果をこの回帰式の形で示す。なお、養生期間1年については応力比の影響が小さいと考えられるため、実測値の平均値で示した。図より、両スラグともポアソン比は養生期間の進行に伴って小さくなり、その応力比への依存性も減少する傾向が認められる。

これらの結果に他の試験条件での結果を加えて、復元ポアソン比の実験定数は養生期間の関数として表-7のように設定した。表に示した定数の上、下限値は、復元変形係数の場合と同様に養生期間1年での供試体の値を

表-6 復元変形係数に関する実験定数

実験定数	複合スラグ	上限値 下限値	高炉徐冷スラグ	上限値 下限値
K	$\frac{10^3}{-12.6 - 4.60t} + 8870$	7500 —	$\frac{10^3}{-10.7 - 1.39t} + 10850$	7500 —
M	$0.855 - 0.0523t$	— 0.535	$0.909 - 0.0574t$	— 0.535
N	$0.196 + 0.0370t$	0.420 —	$0.197 + 0.0172t$	0.420 —

t: 養生期間(月)

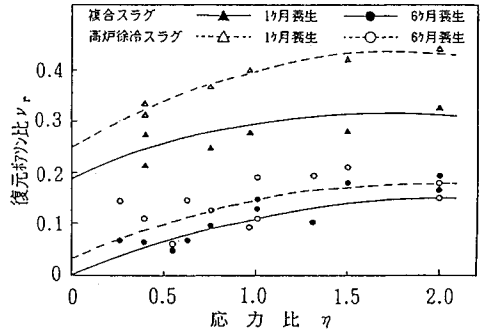


図-11 復元ポアソン比と応力比の関係

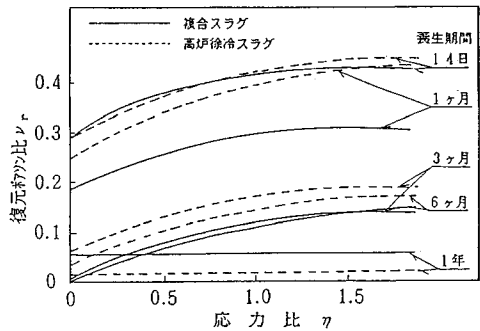


図-12 復元ポアソン比と応力比の関係に及ぼす養生期間の影響

表-7 復元ポアソン比に関する実験定数

実験定数	複合スラグ	上限値 下限値	高炉徐冷スラグ	上限値 下限値
$A_0$	$0.345 - 0.114 t$	— 0.023	$0.340 - 0.092 t$	— 0.036
$A_1$	$0.247 - 0.0206 t$	0.154 0	$0.232 - 0.0193 t$	0.180 0
$A_2$	$-0.0757 + 0.00631 t$	0 -0.0490	$-0.0650 + 0.00542 t$	0 -0.0510

t: 養生期間(月)

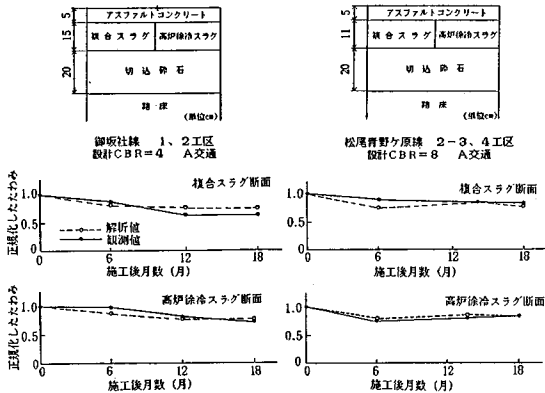
基準にしている。

c) 実路でのベンケルマンビーム試験結果による検証

上述した復元定数の回帰式を用いて、鉄鋼スラグ路盤を含む現地舗装のベンケルマンビームたわみ量を反復有限要素法で解析した結果を、その測定結果とともに図-13に示す。解析手法については文献13)等に詳述しているので、ここでは簡略を期して省略する。図にみられるように、測定したたわみ量の経時変化は解析結果と比較的良好に対応しており、実験結果より設定したスラグ路盤材の材料定数の妥当性が確認される。なお、図において解析結果および測定結果は、比較を容易にするため、それぞれの初期値を基準として正規化されている。

(2) 残留変形特性

アスファルト舗装のわだち掘れ算定には、2つの基本



図—13 たわみ量に関する解析結果と測定結果との比較

的な算定法がある。1つは弾性論に基づく方法で、他の1つは粘弾性論に基づくものである。ここでは、舗装構成材料の材料特性と弾性構造解析法を組み合わせた前者の方法を用いる一過程として、前述した繰返し三軸圧縮試験により、鉄鋼スラグ供試体の残留変形と荷回数、応力状態および養生期間の関係を探明する。

a) 実験概要

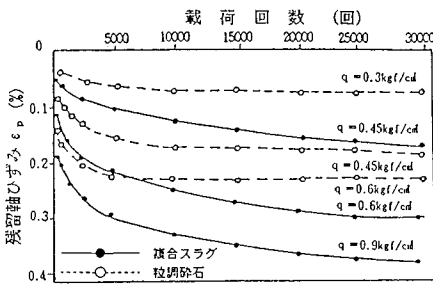
実験方法としては前節の場合と同様に繰返し三軸圧縮試験を採用したが、前節の実験との重複を配慮して、装置の都合で供試体寸法は直径5cm、高さ10cmとした。なお供試体の直径を考慮して試料の最大粒径は9.52mmに調整した。また、長時間を要するため試験試料は複合スラグのみとし、比較のための標準材としては粒度調整砕石を採用した。養生期間は、0日、14日、1か月、3か月、6か月とし、養生方法は前述の土中養生とした。荷回数条件の要約は表—8に示すとおりである。

b) 実験結果と考察

① 残留軸ひずみと荷回数

表—8 残留変形特性に関する荷回数条件

荷回数 (回)	荷時間 (S)	繰返し偏差応力 q (kgf/cm <sup>2</sup> )	平均主応力 p (kgf/cm <sup>2</sup> )
20000~80000	0.2	0.3~0.9	0.4, 0.65, 1.1



図—14 残留軸ひずみと荷回数の関係

図—14は、複合スラグの14日養生供試体および粒調砕石供試体についての  $p=0.65 \text{ kgf/cm}^2$  における実験結果を示したものである。図から明らかのように、残留軸ひずみは荷初期の段階(約1000回まで)で急増し、それ以後は徐々に増加を続けている。なお、供試体の設置誤差を考慮して、荷回数10回までの測定値は省略した。

これらの残留軸ひずみと荷回数の関係を回帰するために、次のような双曲線関数を採用することにした。

$$\epsilon_p = \epsilon_{p,0} + \frac{N - N_0}{a + b(N - N_0)} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\epsilon_p$  :  $N=N$  での残留軸ひずみ

$\epsilon_{p,0}$  :  $N=N_0$  での残留軸ひずみ

$N$  : 荷回数

$N_0$  : 式(4)を適用する最初の荷回数

$a, b$  : 実験定数

この式を適用して得られた実験定数を表—9に示す。

② 終局残留軸ひずみ

荷回数が無限大になったときの最終的な残留軸ひずみ  $\epsilon_{p,ult}$  は式(4)において  $N \rightarrow \infty$  とした次式で表わされる。

$$\epsilon_{p,ult} = \epsilon_{p,0} + \frac{1}{b} \dots \dots \dots (5)$$

図—15に複合スラグの14日養生供試体で得られた終局残留軸ひずみと繰返し偏差応力の関係を、平均主応力をパラメーターとして示す。図より両値の関係は線形ではなく、しかも平均主応力に大きく影響されることが認められる。この傾向は他の試験条件の場合についても同様に認められた。

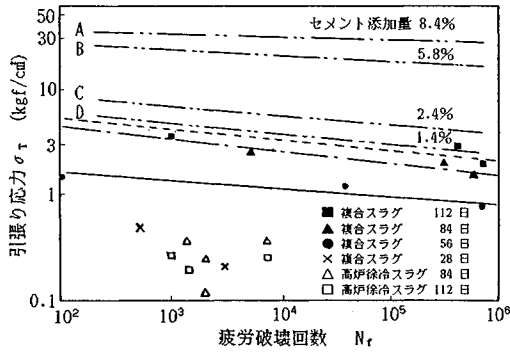
Barksdaleは、諸種の粒状材料を使った膨大な繰返し三軸試験の結果に基づいて、ある試料に対するこのよう

表—9 鉄鋼スラグ路盤材の残留軸ひずみに関する実験定数

材料	養生日数	0.9			0.6			0.45			0.3		
		$\epsilon_{p,0}$ $\times 10^{-3}$	$a$ $\times 10^{-2}$	$b$	$\epsilon_{p,0}$ $\times 10^{-3}$	$a$ $\times 10^{-2}$	$b$	$\epsilon_{p,0}$ $\times 10^{-3}$	$a$ $\times 10^{-2}$	$b$	$\epsilon_{p,0}$ $\times 10^{-3}$	$a$ $\times 10^{-2}$	$b$
粒調砕石	0日	3.62	3.80	1234.0	2.03	6.30	1389.0	1.02	11.90	3084.0			
	14日	3.28	4.42	384.1	2.08	5.45	814.6	1.04	10.04	597.2			
	1ヶ月	2.47	9.25	730.8	1.67	6.67	954.4	0.70	10.24	986.4			
	3ヶ月	1.32	8.01	1323.0	1.26	10.48	1169.0	0.52	12.16	2463.0			
	6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	19.83	1724.0	0.85	12.14	2148.0	0.42	37.63	5789.0			
複合スラグ	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	10.68	696.5			
	1ヶ月	2.34	3.74	670.6	1.87	8.42	1223.0	1.42	6.93	1148.0			
	3ヶ月	1.85	5.04	849.5	2.39	5.35	1044.0	1.22	7.28	1255.0			
	6ヶ月	1.09	8.12	1238.0	1.00	10.65	769.6	0.89	9.54	1027.0			
	6ヶ月	1.06	17.89	1599.0	0.57	2.65	1002.0	0.50	31.77	2484.0			
複合スラグ	0日	1.45	8.90	3327.0	1.26	12.00	2640.0	0.27	3.23	3250.0			
	14日	2.22	5.92	719.9	1.65	13.49	1884.0	0.69	10.10	1482.0			
	1ヶ月	1.63	7.37	690.4	0.91	11.35	2028.0	0.55	16.94	1518.0			
	3ヶ月	1.56	6.70	1009.0	0.79	13.97	1555.0	0.43	13.84	1254.0			
	6ヶ月	1.17	7.42	1088.0	1.02	9.03	2140.0	0.29	11.69	1665.0			
	6ヶ月	0.66	7.26	2469.0	0.63	3.35	1484.0	0.60	12.80	3718.0			







図一17 引張り応力と疲労破壊回数の関係

表一12 疲労曲線に関する実験定数

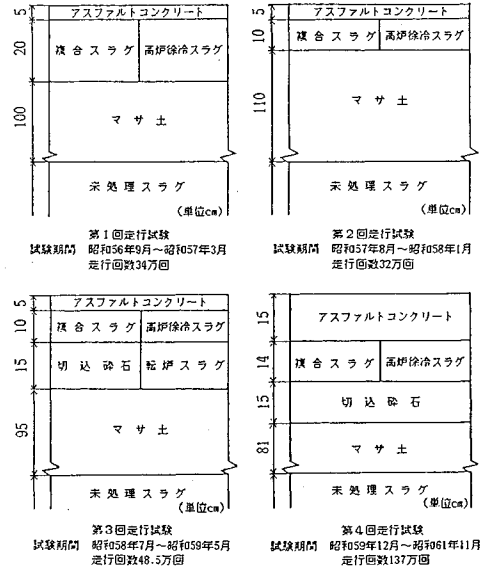
実験定数	養生期間 3 6 日	養生期間 8 4 日	養生期間 1 1 2 日	直線 A	直線 B	直線 C	直線 D
m	$6.89 \times 10^4$	$3.62 \times 10^4$	$7.89 \times 10^{11}$	$1.96 \times 10^{11}$	$6.85 \times 10^{11}$	$4.11 \times 10^{11}$	$6.7 \times 10^9$
n	13.256	8.867	9.311	38.4	18.2	11.5	10.1

ここで、 $N_f$ : 疲労破壊回数 (回)  
 $\sigma_T$ : 引張り応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 m, n: 実験定数

図中の破線は菅原らのセメント安定処理路盤材の水中養生に関する実験結果<sup>12)</sup>を示したものであるが、その結果と比較すると、複合スラグの疲労曲線はセメント添加量の少ない場合に対応することが認められる。表一12に本実験で得られた実験定数を示す。

c) 円形走行試験の鉄鋼スラグ路盤層における疲労破壊の検証

前項で得られた疲労曲線に反復有限要素法による構造解析の結果を適用することにより、円形走行試験におけるスラグ路盤層の疲労破壊の可能性を検証した<sup>3)</sup>。図一18に解析の対象とした舗装断面を各走行試験ごとに示す。表一13はこれらの舗装断面に対して、第1分割区分(疲労寿命の算定区分)での解析条件と解析結果を要約したものである。各舗装断面に対する疲労破壊回数の算定値(路盤底面での最大引張り応力の解析値を図の回帰式に代入して算定)と解析条件での走行回数を比較することにより、複合スラグ断面については、第4回走行試験を除くすべての舗装断面において、路盤自体にすでに疲労破壊が発生していることが予想される。また、高炉徐冷スラグ断面については疲労曲線が得られていないので厳密な検証を行うことはできないが、第1回および第2回走行試験において疲労破壊の発生していることが容易に予想できる。これらの疲労破壊の発生は、疲労に基づく舗装体寿命の解析結果<sup>3)</sup>と走行試験後の開削結果によって、その可能性が確認されている。しかしながら、現地交通条件のもとでのスラグ路盤層では交通の影響を受けずに水硬性を發揮することが確認されており<sup>19)</sup>(そ



図一18 疲労破壊を検証した舗装断面

表一13 第1分割区分での疲労破壊の検証

解析条件	第1回走行試験舗装断面	第2回走行試験舗装断面	第3回走行試験舗装断面	第4回走行試験舗装断面	
施工後月数	2~3	4~5	5	2.9~3.7	
走行回数 (×10 <sup>4</sup> 回)	0~2	0~5	0~5	0~5	
舗装温度 (°C)	35.0	36.0	36.0	10.0	
表面σ <sub>T</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	3800	3300	3300	50000	
引張り応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	複合スラグ 高炉徐冷スラグ	1.10 1.30	3.53 3.11	3.35 0.53	0.29 0.21
疲労破壊回数 (×10 <sup>4</sup> 回)	複合スラグ 高炉徐冷スラグ	1.95 0.1 以下	0.626 0.1 以下	0.594	2.12 × 10 <sup>8</sup>

の結果の一部を図一13に示す)、この疲労現象が発生しにくいことは留意されるべきである。

5. まとめ

以上の結果を要約すると次のとおりである。

(1) 鉄鋼スラグには、高炉徐冷スラグのように、それ自体で自硬性と良好な締固め特性を有し路盤材として利用できるものもある。しかし、高炉徐冷スラグ、水砕スラグおよび転炉スラグを適切に混合することによって、より優れた路盤材料としての複合スラグを産出できることが確認された。

(2) 繰返し三軸試験によって求められる複合スラグと高炉徐冷スラグの復元定数およびポアソン比は応力状態と養生期間の関数として回帰される。これらの回帰式の妥当性は、現地舗装のベンケルマンピームたわみ量について、反復有限要素法による解析結果と測定結果を比較することにより確認された。また、復元変形特性の観点からも複合スラグの早硬性が認められた。

(3) 繰返し三軸試験によって求められる複合スラグの残留軸ひずみは、養生期間をパラメーターとして、載荷回数と応力状態の関数として回帰される。これらの回

扁式を適用した円形走行試験路におけるわだち掘れ量の解析結果は、舗装体に劣化現象が生じた場合を除いて、測定結果に比較的良く追従することが認められた。

(4) 繰返し割裂試験によって求められる複合スラグと高炉徐冷スラグの疲労曲線は養生期間をパラメーターとする回帰式によって近似される。これらの疲労曲線の妥当性は、円形走行試験路のスラグ路盤層における疲労破壊の可能性を解析し、その結果を疲労に基づく舗装体寿命の解析結果および走行試験後の開削結果と比較することにより推察された。なお、この疲労特性に関しても複合スラグの優位性が確認された。

## 6. あとがき

本研究で述べた鉄鋼スラグの材料特性は、環境変数および施工変数を固定した条件のもとで、室内繰返し試験によって求めたものである。水硬性材料を対象としてこのような短期特性化を行う場合、荷重条件に加えて、これらの変数をいかに設定するかが重要な問題となるのは論ずるまでもない。次段階の特性化試験としては、とりあえず、供試体養生温度のみを変動させた同種の試験を継続していく予定である。

また、復元定数の応力依存性に関しては、本質的には応力依存性であるとしても、解析手法の近似性を考慮すれば、その是非を早急に結論づけるのは困難だと思われる。線形か非線形か選択の適否は対象とする問題の内容に関係するであろう。ただ、いずれも近似解である以上、粗に走るも密に過ぎるも可としないことは結論できるようである。

## 参 考 文 献

- 1) 小林 正：鉄鋼スラグの舗装への利用について、第13回日本道路会議論文集，No.515，pp.213～215。
- 2) 志賀信豪・河本敬之・大川雄一・溝口郁夫・今野美子雄：道路用材としての鉄鋼スラグの利用，製鉄研究，第302号，pp.66～68，1980。
- 3) 西 勝・木村 豊・寺島 博：円形走行試験における複合スラグ路盤の硬化特性について，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集，V-12，pp.62～63，1987。
- 4) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼のスラグ
- 5) 日本鉄鋼協会特定基礎研究会スラグの有効利用に関する基礎研究部会：鉄鋼スラグの性質と利用，pp.242～243，pp.250～261。
- 6) 河端 薫・佐野栄一・安達則正・浅野駿吉・大森将弘：合成スラグの水和反応性一発熱量と強度特性一，セメント技術年報，No.13，pp.74～77，1984。
- 7) 鉄鋼スラグ協会：1988年度「高炉スラグ需給利用統計」，pp.2，1988年度「製鋼スラグ需給調査表」，pp.4。
- 8) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ路盤設計施工指針，付録-8，pp.65～73，1979。
- 9) 西 勝：たわみ性舗装の力学，土木学会関西支部講習会テキスト，pp.1～34，1979。
- 10) Nishi, M. and Tanimoto, K. : A Consideration in Determining Elastic Properties of Granular Materials under Laboratory Dynamic Loading, Proc. of the 5th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.737～744, 1978.
- 11) 西 勝・三輪 享・遠山俊一：スラグ路盤の水硬性発揮に及ぼす交通条件の影響，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，V-256，pp.511～512，1985。
- 12) Duncan, J.M., Monismith, C.L. and Wilson, E.L. : Finite Element Analysis of Pavement, HRB Record 228, 1968.
- 13) 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.5，pp.27～32，1983。
- 14) Barksdale, R.D. : Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials, Proc. 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, pp.161～174, 1972.
- 15) Heukelom, W. and Klowp, A.J.G. : Consideration of Calculated Strains at Various Depth in Connection with the Stability of Asphalt Pavement, Proceedings, Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, pp.155～168, 1967.
- 16) 西 勝・三輪 享・佐藤康文：鉄鋼スラグ路盤材料の引張り特性について，土木学会関西支部年次学術講演概要，V-9，1987。
- 17) Gonzalez, G., Kennedy, T.W. and Anagnos, J.N. : Evaluation of Resilient Elastic Characteristics of Asphalt Mixtures Using the Indirect Tensile Test, Research Report No.183-6, Center for Highway Research, The University of Texas, Austin, Nov.1975.
- 18) 菅原照雄・小笠幸男・小野田一也：セメント安定処理路盤材料の疲労特性について，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，V-11，pp.21～22，1986。
- 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概要，V-26，1988。

(1989.3.31・受付)