

転炉スラグのアスファルト混合物への利用に関する研究

A STUDY ON THE UTILIZATION OF STEEL SLAG FOR ASPHALT MIXTURES

飯島 尚*・小島 逸平**・原 富男***・石神 公一****

By Takashi IJIMA, Ippei KOJIMA, Tomio HARA and Koichi ISHIGAMI

We investigate the utilization of steel slag for road construction materials, mainly for asphalt mixtures. This report consists of two parts. Part one; the general character of steel slag aggregate and asphalt mixture with steel slag that have completed 3~6 month aging. Part two; the character of asphalt mixture respect to the aging. According to the result of this study, We can conclude that the material that have completed over 3 months aging has stable character for pavement of anti-plastic flow and anti-abrasion.

1. まえがき

昨今、環境保全等の観点から、骨材の採取が困難な場合が多くなっており、特に良質な骨材の人手はますます困難な状況にある。このため、道路建設において、現地産材料の有効利用、新しい骨材資源の開発等の必要性が高まってきている。

ところで、わが国における鉄鋼生産の規模は、今やアメリカ、ソ連と並び、これに伴って高炉スラグ、製鋼スラグ等のスラグが約4000万トンも生産されている状況にある¹⁾。これらのスラグのうち、高炉スラグは品質規格がJIS化され、アスファルト舗装要綱に取り入れられたことから、かなりの規模で利用されている現状である。しかし、製鋼スラグはいわゆるフリーライム（遊離石灰）を含むという鉱物組成の違いから膨張崩壊性があり、これを改善する方策として数か月間屋外に放置し膨

張崩壊を促進させるという方法（これをエージングという）があるものの、製品の出荷管理体制が高炉スラグほど整っていないことから、これまで主として埋立て等の土地造成に利用されていることが多く、定まった方向づけがなされていない現状である。

しかし、前述のように、現地産材料の有効利用の一環として、製鋼スラグを道路用材料に利用する試みがなされ、路盤材料、あるいはアスファルトコンクリート用の骨材としての利用も報告されるに至っている^{2)~14)}。

このような状況を背景に、昭和54年度から建設省土木研究所、(財)土木研究センター、および鉄鋼スラグ協会の3機関からなる共同研究として“製鋼スラグの道路用材への利用に関する研究”を取り上げ、主としてアスファルト混合物用の骨材としての利用を中心に広く道路用材に利用するための調査研究を行った¹⁵⁾。

本論文はこれらの研究のうち、製鋼スラグを用いたアスファルト混合物の一般的特徴、およびエージング期間のアスファルト混合物への影響についての実験結果をとりまとめたものである。なお、本論文では成果のいくつかを述べるものであり、詳細なデータについては参考文献に譲る¹⁵⁾。

まず最初に完全にエージングが行われた骨材の物理性状、およびその材料を用いたアスファルト混合物の一般

* 正会員 国土開発技術研究センター研究第2部長
(〒105 港区虎ノ門2-8-10)

** 正会員 熊谷道路(株)技術研究所第1研究部長
(〒302-02 茨城県筑波郡谷和原村小網216-1)

*** 正会員 福田道路(株)技術研究所長
(〒950-11 新潟県西蒲原郡黒崎町山田3039)

**** 正会員 日本钢管(株)事業開発部プロジェクトチーム
E室長
(〒100 千代田区丸の内1-1-2)

的性状を述べる。次にスラグのエージング期間とアスファルト混合物の特性値の変化について述べる。

これらの試験結果より、製鋼スラグを用いたアスファルト混合物は耐流動性がよく、しかも耐摩耗性の高い混合物であり、骨材性状を安定化させるためのエージングは通常3か月以上実施すればよいことがわかった。

2. 製鋼スラグの物理試験およびアスファルト混合物の基礎的性状

(1) 使用した骨材および配合の組合せ

製鋼スラグの品質性状とアスファルト混合物の物性を明らかにするために、転炉スラグと電気炉酸化スラグの代表サンプルによる各種室内試験を実施した。なお選定した製鋼スラグは、全国の製造工場別の統計量、ならびに後述する水浸膨張特性の範囲を代表すること等の条件を考慮して選定したものである。

表-1 使用材料

種別	製造所及び产地	記号	材 料 名
転炉スラグ	神戸製鋼所(加古川)	Sk	5号・6号・7号・スクリーニングス
	日本钢管(福山)	Sf	5号・6号・7号・スクリーニングス
	新日本製鐵(八幡)	Sy	5号・6号・7号・スクリーニングス
電気炉酸化スラグ	大同特殊鋼(知多)	Sd	5号・6号・7号・スクリーニングス
石灰岩碎石	田政鉱業(板木)	T	5号・6号・7号・スクリーニングス
天然砂	今市	T	粗 砂
	霞ヶ浦	T	細 砂
フィラー	美光石灰工業(秩父)	-	炭酸カルシウム
アスファルト	日本石油(根岸製油所)	-	60-80・ストレートアスファルト

表-2 骨材配合率

配合率	10	20	30	40	50	60	70	80	90 (%)
配合	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sk+Sk	粗骨材=57(5号=23, 6号=22, 7号=12)	Scr=14	天然砂=24(粗=14 細=10)	F1=5					
Sf+Sf	“=57(5号=23, 6号=16, 7号=18)	“=14	“=24(粗=20 細=4)	“					
Sy+Sy	“=57(5号=18, 6号=26, 7号=13)	“=14	“=24(粗=16 細=8)	“					
Sk+T	“=57(5号=25, 6号=20, 7号=12)	6	天然砂=32(粗=24 細=8)	“					
Sf+T	“=57(5号=24, 6号=25, 7号=8)	6	“=32(粗=25 細=7)	“					
Sy+T	“=57(5号=19, 6号=22, 7号=16)	6	“=32(粗=22 細=10)	“					
Sd+T	“=57(5号=24, 6号=27, 7号=6)	6	“=32(粗=28 細=4)	“					
T+Sk	“=57(5号=21, 6号=26, 7号=10)	14	“=24(粗=14 細=10)	“					
T+Sf	“=57(5号=23, 6号=22, 7号=12)	14	“=24(粗=11 細=13)	“					
T+Sy	“=57(5号=21, 6号=26, 7号=10)	14	“=24(粗=16 細=8)	“					
T+T	“=57(5号=20, 6号=26, 7号=11)	6	天然砂=32(粗=21 細=11)	“					
配合率	10	20	30	40	50	60	70	80	90 (%)

試験に使用した骨材およびアスファルトの種類は表-1のとおりである。取り上げた転炉スラグ3種および電気炉酸化スラグ1種はいずれも、スラグ中に含まれるフリーライム(CaO)の化学反応による変質を防ぐために3~6か月間エージングして安定化したものを用いた。さらに比較のため、天然碎石骨材の一例として石灰岩碎石を取り上げた。

アスファルト混合物の試験は、製鋼スラグを粗骨材および細骨材として利用した場合の影響を調べるために、次のような組合せによる混合物を作成した。

(1) S+S スラグ粗骨材+スラグスクリーニングス

(2) S+T スラグ粗骨材+天然スクリーニングス

(3) T+S 石灰岩粗骨材+スラグスクリーニングス

(4) T+T 石灰岩粗骨材+天然スクリーニングス

アスファルト混合物の粒度は密粒度アスファルトコンクリート(20)とし、配合は合成粒度が予定粒度よりも大きく変わらない範囲で骨材配合率が一定になるように決めた。ただし、スラグスクリーニングスは天然スクリーニングスほど粒度が一定ではないので細粒分の予定粒度に近づけられるように量を決めて、S+S, T+Sの組合せは一定とした。一方S+T, T+Tについても同様の理由からほぼ半分の量で一定にしたものである。この結果、粗骨材は57%, スラグスクリーニングスは14%, 天然スクリーニングス(以下スクリーニングスをScrと記す)は6%, フィラー(以下Fと記す)5%の配合となり、残りは天然砂で調節した。表-2はそれぞれの組合せの骨材配合率である。いずれの組合せもほぼ密粒の粒度範囲の中央値となっている。

(2) 骨材の一般的特性

今回使用した各骨材の一般的な特性は次のとおりである。製鋼スラグの比重は、表乾比重で3.078~3.533、かさ比重で2.916~3.485、見掛け比重で3.476~3.724の範囲にあり、石灰岩に比べ見掛け比重は1.26~1.35倍となり、比重が非常に大きいことがわかった。

吸水量は、粒径による相違はあるが、1.01~5.33%と石灰岩に比べて1.5~4.2倍になった。特に比表面積の大きい細粒部分の吸水量が大きい結果になった。またスラグの観察から、(イ) ち密なものとポーラスなものが混入している。(ロ) 表面に微粉末が付着している、などが観察され、さらに、これらの微粉末は水洗いしても簡単には除去できないことが明らかになった。このような微粉末

の付着とボーラスな骨材が混ざっていること

が吸水量を大きくしている原因と思われた。

そこでち密なものと、ボーラスなものを分級し、それぞれの比重、吸水量試験を行った結果、両者の間には、表乾比重で約 0.55、吸水量で約 1.8 % の差があることがわかった。ボーラスなものが混入する理由は、製鋼スラグの製造過程の相違が挙げられるので、ボーラスなものとち密なものが偏在しないようにするためにには製造工程の管理が重要である。

次に、表面付着物の影響を調べるために、物理的および化学的方法によって微粉末を除去したものの比重、吸水量試験を行った。

ブラシや研磨材を用いて物理的に除去したものは、凹部に多少の付着物が残り、若干丸味を帯びる状態が認められた。一方、酢酸を利用して化学的に除去したものは、スラグ表面が酸によって化学反応を起こしている（酢酸カルシウムになる）ことが分析の結果確認された。さらに表面付着物の X 線回折の結果、微粉末の組成は炭酸カルシウム (CaCO_3) が主体で、部分的に消石灰 (Ca(OH)_2) が認められた。比重が小さいこれらカルシウム塩微粉末を除去したスラグの比重は付着しているものより大きくなる結果となった。

すりへり減量は 13.0~18.3 % の範囲にあり、Sk が小さく、Sd が大きい。しかし、大きいものでも石灰岩の値より小さいこと、および過去の調査データを参考にすれば、製鋼スラグは、すりへりにくい骨材であるといえる^[16]。はく離性状は、アスファルト舗装要綱による試験では Sf が 5 % 以下で他はすべて 5 % 以上となった。一方、石油学会法^[17]のパターン分類法では前述の 5 % 以上と評価されたものではく離のパターンに差が認められ、Sk, Sd のはく離が大きく、これらは、表面付着粉の少ないものであった。

骨材の研磨特性を表わす指標である PSV は^[18]、61~67 の範囲にあり、石灰岩の 58 より高い値であることから、製鋼スラグは研磨抵抗性の高い石質であることがうかがえる。

煮沸安定性減量（沸騰水の中で骨材の膨張崩壊性を測定する試験）は、3.0~5.4 % の範囲にある^[19]。比較材に取り上げた石灰岩が 2.0 % であることから両者には差があることは明らかである。

(3) アスファルト混合物試験結果

a) マーシャル特性値

マーシャル安定度試験における配合試験結果および最適アスファルト (OAC) におけるマーシャル性状を表-3 に示した。

密度は、粗骨材と細骨材の組合せによって異なる値

表-3 マーシャル特性値

組合せ	アスファルト共通範囲 (%)	OAC (%)		OACにおけるマーシャル性状					
		重量法	容積法	密 度 (g/cm³)	空けき率 (%)	VMA (%)	安定度 (kgf)	フロー値 10^{-2} cm	S/F $\text{kgf}/10^{-2} \text{ cm}$
Sk + Sk	4.25~5.05	4.7	13.2	2.910	3.8	17.1	1560	34	46
Sf + Sf	4.15~4.90	4.5	12.6	2.901	4.0	16.6	1680	30	56
Sy + Sy	4.50~5.25	4.9	13.5	2.856	3.8	17.4	1620	33	49
Sk + T	4.10~4.80	4.5	12.3	2.829	3.8	16.1	1620	29	56
Sf + T	4.35~4.95	4.7	12.8	2.817	3.5	16.5	1980	34	58
Sy + T	4.25~4.95	4.6	12.4	2.792	3.9	16.4	1760	29	61
Sd + T	4.20~4.75	4.5	12.4	2.839	3.9	16.2	1760	35	50
T + Sk	4.80~5.55	5.2	12.7	2.518	3.8	16.5	1440	31	47
T + Sf	4.45~5.05	4.8	11.8	2.536	3.7	15.5	1600	30	53
T + Sy	4.95~5.90	5.4	13.0	2.490	4.0	17.1	1580	32	49
T + T	4.75~5.55	5.2	12.2	2.430	3.5	15.7	1360	29	47

を示した。それぞれの組合せの OAC における密度の平均値は $S+S=2.889 \text{ g/cm}^3$, $S+T=2.813 \text{ g/cm}^3$, $T+S=2.515 \text{ g/cm}^3$ となり、 $T+T$ を 1 とすれば、 $S+S$ は約 1.2 倍になる。これは当然ながら、骨材比重の違いが影響しているものといえる。

骨材間隙率 (VMA) はすべて、 $T+T$ の組合せのものより大きな値となった。混合物の安定性を確保するためには VMA を極端に小さくしないことが望ましい。しかし、逆に VMA が大きいことは、混合物がよく締め固められていないか、あるいは締め固まらないような混合物であることを表わすので適切な範囲にあることがよい。スラグを配合した混合物は 16 % 前後の値を示しており、中でも $S+S$ が若干高い値となっている。

安定度は、骨材の組合せ別に平均すると $S+S=1620 \text{ kgf}$, $S+T=1790 \text{ kgf}$, $T+S=1540 \text{ kgf}$ となり、 $T+T$

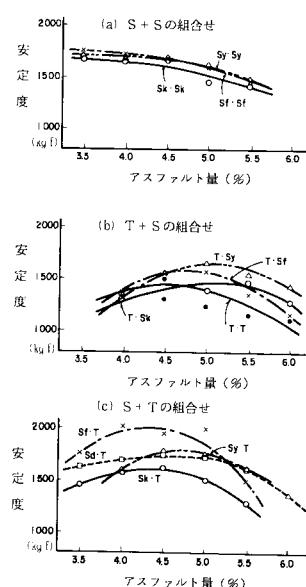


図-1 組合せ別マーシャル安定度

に対して1.1~1.3倍の関係にあることから、製鋼スラグアスコンは安定度の高い混合物であると考えられる。

アスファルト量と安定度の関係を図-1に示した。これによれば、S+Sの場合は、他の組合せよりも、アスファルト量の変化に対して安定度の変化が少ないという特徴がうかがえる。

マーシャル安定度をフロー値で割った値(S/F)はマーシャルスチフネスとよばれ、混合物の硬さを示す指標として利用されている。一般地域では20~50の範囲、耐流動対策の混合物には25以上が望ましいがスラグを使用したものは、50以上となるものが多いことがわかる。

しかし、天然碎石を使用したものではこれまでの経験から S/F が50以上の混合物は、ひびわれの危険性があるとされているので、製鋼スラグアスコンについて、この値を参考にひびわれ発生についても検討したが、その後の実績ではひびわれ発生の傾向は現れていない。

図-2のアスファルト共通範囲は重量百分率で表わした値である。しかし、製鋼スラグのように骨材比重が大きい場合には、アスファルト量を重量%で表わすと相対的に小さな値となること、また骨材の比表面積を考慮すると、アスファルト量は容積百分率で表わした方がより的確であると思われた。そこで両者の比較を行い図-2の右側に示すような結果を得た。重量百分率では、製鋼スラグによる混合物は、石灰岩を使用したものよりアスファルト量が少なくなる。しかし、容積百分率で表わすと、逆にアスファルト量が多く配合された結果になることがわかった。この原因には、スラグが若干ポーラスなものを含んでいること、および、表面に付着している微粉末の影響が挙げられる。そこで、微粉末を除いたものと除かないものを用いて配合試験を行った。これによれば研磨処理²⁾を行うと、密度は約2%大きくなり、安定度が約60%低下することがわかった。安定度が低下する理由には、研磨処理中に骨材が若干丸味を帯びてくること、微粉末除去によってスラグ表面が平滑になる、等が挙げられる。微粉末を除去すれば、混合物は締め固めやすくなり、アスファルト量の少ない配合になる。今回の例では、最適アスファルト量は0.5%少ない配合になった。このようなことから、スラグ骨材の選定は微粉

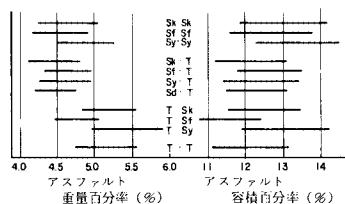


図-2 アスファルト共通範囲

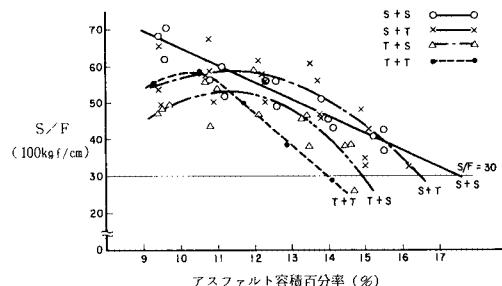


図-3 アスファルト容積百分率と S/F の関係

末の付着状況にも留意すべきであろうと思われた。しかしその後の試験舗装に際して、プラントでの回収ダストの測定等を行った結果、天然碎石のダストの変動のようなことはなく実用上問題のないことが明らかになった¹⁵⁾。

S/F とアスファルト容積百分率の関係を図-3に示した。スラグ主体の配合では、アスファルト量を変えてても S/F の変動は比較的少ない。アスファルト舗装要綱では、耐流動性の混合物の検討には S/F を25以上とすることが示されているので、図-3よりスラグを粗骨材に用いた配合のものがすべて $S/F=30$ 以上が得られていることから、アスファルト量の広い範囲で耐流動性を考慮した配合設計が可能であることが予想される。しかし、50以上のかなり大きな値を示しているものもあるので当面は S/F が極端に大きいものは骨材配合等の検討を行うことが望ましいといえる。

b) 水浸マーシャル特性、はく離特性

水浸マーシャル試験は48時間と96時間水浸のものについて実施した。これらの結果から安定度の変化はアスファルト量が4.0~5.5%の範囲ではS+Sの組合せは、48時間で87.5~98.5%，96時間で77.5~93.5%の残留安定度を示し、石灰岩を用いたものと差がないことが認められた。これより、製鋼スラグアスコンの水浸性状は安定度の絶対値および残留率とも問題がないと判断された。一方骨材とアスファルト被膜の間にはく離現象が相当認められ、製鋼スラグの種類によってはく離性状が異なることから水浸マーシャル試験では残留安定度と合わせて、はく離性状を評価することが製鋼スラグアスコンの評価項目に必要なことといえる。

c) 水浸ホイールトラッキング試験およびホイールトラッキング試験による安定度

OACおよび、OAC±0.3%の範囲でアスファルト量を変化させてホイールトラッキング試験（以下WT試験）を行った。石灰岩を用いた混合物は、アスファルト量を減じた配合（図-4参照）にしても、動的安定度DSが1500回/mm以上が得にくい傾向にある。一方、製鋼スラグを用いた混合物では、アスファルト量がOACより多い場合にはDSが1500回/mmより低い場

合もあるが $Sd + T$, $Sf + Sf$ の組合せ以外はほとんど 1500 回/mm 以上の値が得られた。したがって、図から明らかなようにアスファルト量の増加および種類によっては 1000 を下回ることがあるものの、これに注意すれば製鋼スラグをアスコンの粗骨材に使用したものは、アスファルト量の広い範囲で耐流動性の高い混合物が得られる。製鋼スラグの骨材単体の静的はく離、および水浸マーシャル試験におけるはく離性状等から、この項目の評価が重要であると思われたので、さらに土木研究所式の水浸ホイールトラッキング試験（以下 IWT 試験という²⁰⁾）による検討を進めたところ図-5 に示すような関係を得た。はく離対策の検討には、IWT 試験の場合ではく離率がないことが目安になる。このことを参考になると、 $Sf + Sf$ の組合せのものが耐はく離性があるといえる。これに対して、 Sk を用いたものは、骨材の静的はく離試験や水浸マーシャル試験におけるはく離と同様に、はく離率が高いという結果が得られた。製鋼スラグの種類によって、はく離率が異なることの原因を調べるために、各スラグの粒径別の化学分析を行い、骨材配合率に応じて補正した化学的特性値とはく離率の関係を調べた。この結果、次式で示される塩基度と負の相関関係が認められるようである。すなわち、はく離率が小さい $Sf + Sf$ の塩基度が 4.59, はく離率の大きい $Sk + Sk$ で 2.82, $Sd + T$ で 2.05 という値となった。

のことから実験個数に限りあるものの、はく離性状を考慮した骨材の選定には塩基度の大きいスラグを選ぶ

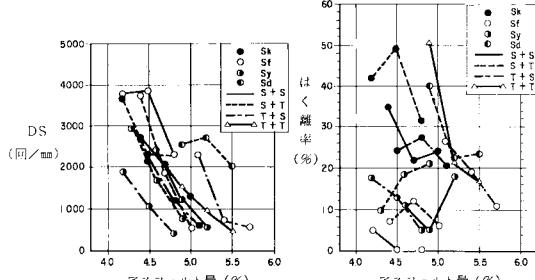


図-4 製鋼スラグアスコンの DS
図-5 製鋼スラグアスコンのはく離率

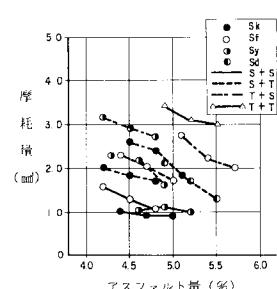


図-6 製鋼スラグアスコンの摩耗量

ことが望ましいように思われる。

$$\text{塩基度} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$$

d) 摩耗特性

土木研究所式の回転式ラベリング試験によって、タイヤチェーンによる摩耗量を調べ図-6 の結果を得た。 $T + T$ が最も摩耗量が大きく、逆に小さいものは $Sk + Sk$ の組合せである。 $T + T$ の摩耗量を 1 とすれば $Sk + Sk$ は 1/3 以下であり、耐摩耗性に優れている性状がうかがえる。

(4) 骨材および混合物の一般的性状のまとめ

製鋼スラグの代表サンプルを用いてアスファルト混合物用の骨材として利用するために、各種室内試験を行った。その結果、次のような特徴が明らかになった。

(1) 骨材の比重が非常に大きく、石灰岩と比較すると 1.3~1.4 倍となる。

(2) 骨材には、ポーラスなものとち密なものが混入しており、かなりのばらつきがみられる。

(3) 骨材表面にはカルシウムを主体とした微粉末が付着しており、その量および質などはポーラスな性状と相まって、骨材の比重、吸水量やアスファルト量、はく離性状等のアスファルト混合物の性状に影響を与えていく。

(4) アスファルト混合物の密度は、石灰岩によるものより約 19 % 重く、使用アスファルト量は容積百分率の検討の結果約 7 % 多い。

(5) マーシャル試験における S/F 、およびホイールトラッキング試験における DS が高く、また摩耗量も小さい。

このようなことから、エージング完了後の製鋼スラグはアスコン用骨材として使用することができる。

3. エージング期間がアスファルト混合物の特性に与える影響

(1) 試験方法および使用骨材

スラグの膨張崩壊を安定化させる措置としてエージング処置を行うのが一般的であるが、この場合のエージング期間がアスファルト混合物の力学的特性に与える影響を調査するために、エージング期間の異なったスラグを用いて表-4 に示す骨材性状およびアスコンの力学試験を行いエージング効果の評価を行った。

試験材料は、膨張比の異なる転炉スラグ 3 種類（水浸膨張比 A=4.4 %, B=3.1 %, C=1.7 % 以下 A 材, B 材, C 材という）を選定し、エージング期間は、それぞれ 0, 1, 3, 6, 9 か月とした。さらにこれらと比較するため、石灰岩碎石を取り上げた。

エージング方法は、30~0 mm に破碎した転炉スラグ

表-4 試験項目と試験方法

項	目	方 法
骨材物性	ふるい分け	JIS A 1104 に準拠
	比重・吸水量	JIS A 1109, 1110 に準拠
	すりへり減量	JIS A 1121 に準拠
	静的ひずみ	アスファルト舗装要綱法
	表面粉量と物性	ワイヤーブラシによる採取、X線回折法
水浸膨張 鉱物組成	水浸膨張	鉄道暫定法(案) (80°C水浸)
	鉱物組成	X線回折法
アスファルト 混 合 物	マーシュ安定度	アスファルト舗装要綱法
	ホイルトラッキング	アスファルト舗装要綱法
	水浸ホイルトラッキング	土研式
	単純曲げ	万能試験機による速度 8.3×10^{-3} sec の中央 1 点載荷 空中(20°C), 水中(20°C), 温水(60°C)屋外(自然状態)における膨張。供試体観察
混合物経時変化	混合物経時変化	

約 500 t を野外にストックし、所定のエージング期間を経た後に切り崩し、混合し、任意に 3 か所からサンプリングを行った。

(2) エージング期間が異なる骨材の物理試験

a) 骨材の一般的性状の変化

骨材試験結果のうち比重、吸水量の試験結果を図-7 に示した。ここで、それぞれの材料を 5~2.5 mm, 2.5~0 mm のようにふるい分けを行い各材料ごとに分析した。比重は、A, B 材ではエージング期間が長くなるにつれ減少する傾向にある。特に細かい粒度の表乾、かさ比重でその傾向が大きい。しかし、C 材は粗い粒度で少し減少するものの、細かい粒度では傾向が認められない。吸水量は、A, B 材はエージング期間が長くなるにつれ増加する傾向がある。しかし、C 材では明瞭な傾向がない。表面粉量は、スラグの種類によって差はあるものの、エージング期間とともに多くなる傾向があるので、このことが比重や吸水量に影響を与えているものと考えられる。水浸膨張比とエージング期間の関係を図-

8 に示す。これによれば、水浸膨張比は、エージングが長くなるほど減少し、その割合は、3~4か月材までは大きく、いずれも初期膨張比の 60~70% に減少するが、それ以降は平衡状態となり、膨張比の値は一定になるようである。なお、図-8において A, B, C がスラグ種類であり、数字が膨張比、() 内の数字はエージング期間が 0 か月の膨張量に対する相対膨張比を表わし、○、△、×については(4)において述べる。

b) 鉱物組成の変化

化学成分がエージング期間によってどのように変化するかを分析した。

A, B, C 材の鉱物の化学成分は、ほぼ同じようであるが、成分量に差があることから、このことがスラグの種類による比重や、水浸膨張比の差異の原因と思われる。

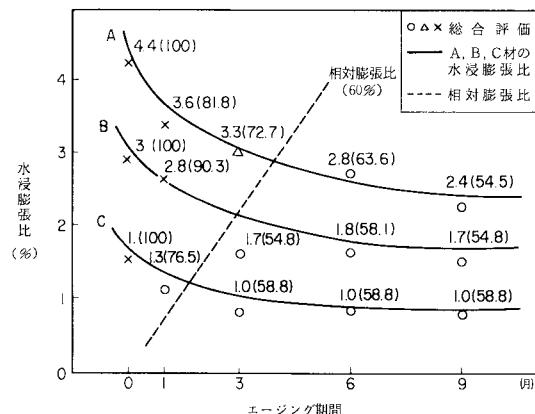


図-8 全体評価と水浸膨張比(80°C)の関係

①骨材のサイズ(mm)

②試験項目

③スラグ種類

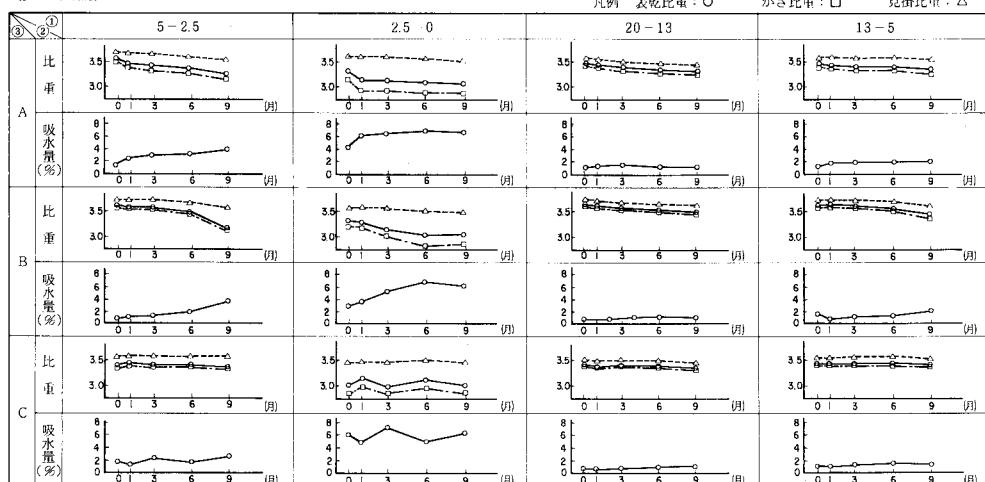


図-7 製鋼スラグ骨材の比重・吸水量試験結果

さらに、エージングによる鉱物組成の変化は、顕著な差がみられなかった。

スラグ表面に析出固着する物質を分析すると $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CaCO_3 が認められた。エージング初期では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が多く、エージングが進むと CaCO_3 が多くなる。これは、遊離石灰等が水和反応して $\text{Ca}(\text{OH})_2$ となりこれがさらに炭酸化して CaCO_3 になっていくことを示唆するものといえる。

また、すりへり減量、静的はく離率等の変化とエージング期間の間には一定の傾向は認められなかった。このようなことから、エージング期間と骨材性状の変化は水浸膨張比によって判断するのが適切であるといえる。

(3) エージング期間が異なる材料を用いたアスファルト混合物の性状

a) マーシャル特性値の変化

マーシャル試験によって、配合試験および最適アスファルト量 (OAC) における特性値の調査を実施した。

OAC はエージングが進むにつれて増加する傾向にある。その傾向は、A 材を用いた混合物では 1か月材で 0.3 % 増加し、その後一定である。B 材を用いた混合物はエージング期間とともに増加し、その量は 6か月材で 0.7 % 増と大きい。C 材を用いた混合物は 1か月材までは変化がなく、3か月および 6か月材で 0.1~0.2 % 増加する。このように OAC が増加する原因是、表面粉量の影響が大きいと推定できるが、その他に骨材表面の微視的凹凸の変化や、骨材自体のボーラス性状が影響しているものと思われる。

密度は、すべての材料ともエージング期間とともに減少する傾向にある。また、B 材は A, C 材に比べ大きな値となつたが、これは B 材の比重が大きいためである。

マーシャル安定度の変化は、エージングとともに大きくなる傾向を示している。

b) WT 試験による動的安定度の変化

エージングによる動的安定度 (DS) の変化を図-9 に示した。

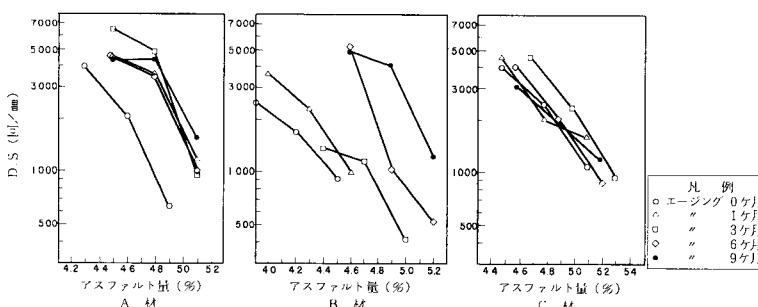


図-9 アスファルト量と動的安定度 (DS) の関係

A 材を用いた混合物はエージング期間が増大するに従い OAC も増加するが、その割合は 0.2 % 増と小さい。また OAC における DS は大きくなっている。B 材は OAC も 9か月エージングでは 0.7 % 増と大きいためにアスファルトが多い混合物となっており、DS のばらつきが大きい。C 材は OAC の増加も 0.2 % 弱と小さく、また DS の変化も小さい値になっている。

c) IWT 試験による性状の変化

IWT 試験を実施し、エージング期間とはく離面積率の変化を図-10 に示した。

膨張量の大きい A, B 材を用いた混合物は未エージング材のはく離面積率が OAC で 3.5~4.7 % と大きいが、6か月材では 0.1~0.3 % と減少しており、エージング効果がうかがえる。このことから、エージングによって析出する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や CaCO_3 は、はく離防止効果があるものと思われる。また、C 材を用いた混合物においては、OAC の場合に 1か月材では減少するものの、6か月材では減少割合が小さい。しかし、OAC ± 0.3 % では、いずれも 0.2~1.8 % と小さくなる。

d) 曲げ性状

製鋼スラグ混合物は前述のようにマーシャルスチフネスが高いことから室内において単純曲げ試験を行い、ひびわれに対する抵抗性を検討した。A, B, C 材についてエージング期間とその時点での曲げ強度を求めた。その結果 A, B, C 材ともほぼ同様の傾向であり、またエージング期間の曲げ強度に与える影響も明確にはできなかった。さらに、石灰岩を用いた混合物と比較してもほぼ同程度であると判断された。このことから製鋼スラグ混合物はマーシャルスチフネスが 50 以上と高いものの、曲げ強度および、破壊ひずみも石灰岩と同程度であると

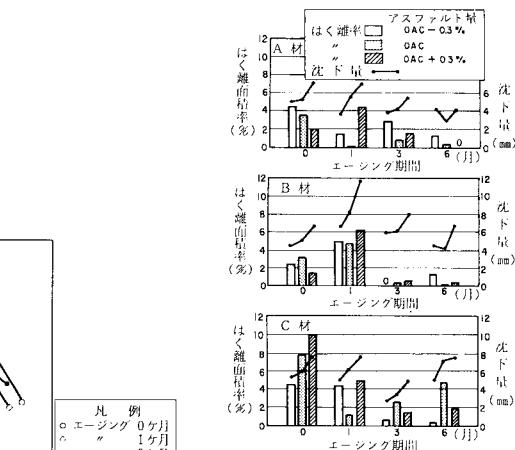


図-10 エージング期間と水浸水イールトラッキングによるはく離面積率および沈下量の関係

表-5 混合物の形状変化の評価

1) フケの定義：突起およびひわれが発生する。
2) 評価基準　温水条件：1週間以内でフケが発生しないもの (○の基準) 水中条件：2ヵ月未満で 空中条件：6ヵ月未満で 屋外条件：6ヵ月未満で
3) 総合評価基準 ○ : 各種条件の評価で○が3個以上 △ : ○が2個 × : ○が1個以下

判断される。

(4) エージング期間の考察

これまでの試験結果によれば、製鋼スラグはエージング処理を行えば、骨材の水浸膨張比が低減する、アスコンの性状が安定化する等の変化が認められるので、エージング処理は骨材として利用する場合必要な処置といえる。そこでこのエージング期間をどのように決めるかということが次の課題といえる。このため、フケ現象の発生日数をもとに、図-8を利用して所要エージング期間および限界の膨張比の推定を試みた。図-8は3.(2), a)で述べた水浸膨張比の異なる骨材A, B, Cのエージング期間と膨張比の関係のグラフ(実線)と同じ材料を用いてアスファルト混合物を作成し、表-5に示す混合物の評価を行って得られた総合評価の結果である○, △, ×をプロットしたものである。ここで表-5の評価はフケに着目して次のように行ったものである(スラグ中の遊離石灰が水および大気と反応して膨張崩壊が発生する現象を一般に“フケ”現象という)。スラグアスコンでは、この現象がないことが望ましい。これらの評価として、イ) 温水(60°C), ロ) 水中(20°C), ハ) 大気中(室内), ニ) 大気中(屋外)に供試体を放置して、それぞれ表-5に示す期間中のフケ現象の発生を調査したものである。

図-8に示すとおり、スラグのエージング期間と水浸膨張比およびアスコンのフケ現象の総合評価の関係によれば、相対膨張比(エージング材の膨張比/未エージング材の膨張比の比(%))が65%以下の範囲に低減したもの用いたアスコンの総合評価は○となるものが多いことがわかる。したがって、エージング期間としては相対膨張比が65%以下になるまでの時期が1つの目安になると思われる。

(5) まとめ

エージング期間についての試験調査結果をまとめると次のようになる。

(1) 製鋼スラグの膨張比はエージング処理によって減少し、ある時期を過ぎれば平衡状態に達する傾向がある。さらに膨張比に差があるのはスラグの鉱物組成等の差によるものと考えられる。

(3) エージングが進むにつれてアスファルト混合物の最適アスファルト量は増加する傾向がある。この原因

としてはエージング期間中に析出固化する表面粉が影響していると考えられる。

(4) 製鋼スラグを用いたアスファルト混合物の単純曲げ試験による曲げ強度および曲げひずみは石灰岩を用いたものと同程度であると判断される。

(5) 水浸ホイールトラッキング試験によるはく離面積率は、エージング期間の長いものほど小さい。

(6) アスコンによるエージング期間の判定試験として、水中放置におけるフケ現象がない状態をよしとする判定法を用いれば、必要なエージング期間は3~6か月以上となる。

(7) 骨材性状によってエージング期間を判定する試験としては、水浸膨張比の評価が有効である。初期の膨張比と一定期間経過した後の膨張比の相対比が65%程度に低減していれば、これを用いたアスコンは所定期間中もフケが発生せず評価がよい。

謝　　辞：本研究の推進にあたって、製鋼スラグ共同研究委員会(委員長：多田宏行氏)、(財)土木研究センター、および鉄鋼スラグ協会の方々にお世話をなった。ここに深厚の謝意を表わすものである。

参考文献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報、昭和51~57年版。
- 2) 佐藤康文・山田史郎・上田福史：転炉スラグを主体とした複合路盤材、第13回日本道路会議一般論文集、No.421、日本道路協会、昭和54年10月。
- 3) 本間利明・鈴木敬啓・鎌倉隆一・沼田晋一：転炉スラグを用いた路盤の挙動調査、同上、No.422、同上。
- 4) 石神公一・小林延郎・近藤佳宏：転炉スラグを配合した複合路盤の試験舗装、同上、No.423、同上。
- 5) 埼名堅太郎・幸田正裕：電気炉スラグを用いた試験舗装結果、同上、No.426、同上。
- 6) 佐鳥悦久・井上武美：水砂の道路舗装材としての有効利用、同上、No.427、同上。
- 7) 吉川雅三・鎌倉隆一・新田　登・鈴木敬啓：転炉スラグのアスファルト舗装への利用、第14回日本道路会議一般論文集、No.471、同上。
- 8) 牛島公生・山口弘次・下田哲也：転炉スラグアスコンの耐摩耗性について、同上、No.472、同上。
- 9) 野村修司・大橋一公・西　勝：製鋼スラグ路盤材を用いたアスファルト舗装の供用性、第15回日本道路会議一般論文集、同上、No.421、同上。
- 10) 福田　穂・山崎雅弘：転炉スラグアスコンを用いた加熱アスコン、舗装、Vol.13、No.2、1978。
- 11) 上屋雷蔵・上田敏行：電気炉スラグ骨材を利用したアスファルト混合物の耐摩耗性、舗装、Vol.14、No.3、1979。
- 12) 日本鉄鋼連盟スラグ資源化委員会：製鋼スラグの性状、第2回講演会資料。
- 13) 飯島　尚・小島逸平・吉村栄司：製鋼スラグの道路用材への利用、土木技術資料、Vol.23、No.2、1981。

- 14) 飯島 尚・小島逸平・吉村栄司：製鋼スラグの道路用材への利用（その2），土木技術資料，Vol. 24，No. 1，1982.
- 15) 製鋼スラグ共同研究委員会：製鋼スラグの道路用材への利用に関する研究報告書，昭和55年度版，56年度版，57年度版，58年度版，鉄鋼スラグ協会。
- 16) 南雲貞夫・小島逸平・内川 栄：路面のすべりを考慮した骨材の選定，土木技術資料，Vol. 13，No. 10，1971.
- 17) 石油学会アスファルト分科会はくり専門委員会：舗装用アスファルトのはくりに関する共同研究報告書，第6報，昭和55年6月，日本石油学会。
- 18) Determination of Laboratory Determined Polished Stone Value : BS-812, 1967.
- 19) 口舗式煮沸安定性試験法：製鋼スラグ共同研究報告書（昭和55年版）付録。
- 20) 南雲貞夫・小島逸平：水浸ホイールトラッキング試験によるアスファルト混合物のはく離性状，舗装，Vol. 14，No. 10，1979.

(1985.3.8・受付)