

蒸気エージングした転炉スラグの上層路盤材としての利用に関する研究

高山俊一¹・出光隆²・会田憲義³・杉正法⁴・徳原英利⁵

¹正会員 工博 九州共立大学教授 工学部土木工学科 (〒807 北九州市八幡西区自由が丘1-8)

²正会員 工博 九州工業大学教授 工学部設計生産工学科

³北九州市建設局主幹 総務部

⁴正会員 住金小倉鉱化(株) 課長 技術開発部

⁵太平工業(株) 部長 八幡支店 生産部

鉄鋼産業から副産されるスラグのうちほぼ100%が利用されている高炉スラグに対し、転炉スラグは遊離石灰(f・CaO)の膨張作用が原因で、未だ十分に利用されていない。そこで転炉スラグに蒸気エージング処理を施し、遊離石灰の膨張促進を行うことで、転炉スラグが安定した品質となることを確認した。この蒸気エージング処理を行った転炉スラグを道路用新複合路盤材として利用するための配合および新複合路盤材の諸性質を調べた。また、コンクリート再生材を転炉スラグと混合した新複合路盤材についても検討した。

Key Words : slag, aging, recycling material, base

1. まえがき

快適な地球環境を保持するためには、人類は早急に資源、エネルギーの浪費を改め、循環型社会を構築しなければならない。そのためには資源の有効利用の見地から、産業廃棄物のリサイクルシステムを確立し、リサイクル材料の積極的な利用を図る必要がある。このような背景から、我が国では、平成3年4月「再生資源の利用に関する法律」、いわゆる「リサイクル法」が制定された。同法には、特に再生利用を促進すべき「指定副産物」として、鉄鋼スラグ、石炭灰および土砂・コンクリート塊・アスファルト塊などが指定されている。

スラグの有効利用については、すでに戦前から産・官・学の技術者が取り組んで来た。それらの技術の蓄積と省エネルギーへの社会状況の変化とが相まって、高炉スラグについては水砕化率が向上し、現在ではその利用率はほぼ100%に達している。これまで高炉スラグは徐冷スラグとして道路用路盤材に多く利用されてきた¹⁾が、高炉スラグのセメントへの利用が大きくなるにつれ、路盤材としての高炉スラグが不足するようになってきている。

年間約1000万トン排出される製鋼スラグは、精錬過程で溶融しないまま残る遊離石灰(f・CaO)が原因で膨張、崩壊が生じるため²⁾、未だ有効に利用されていない。この遊離石灰の膨張、崩壊作用を使用前に進行させておく方法として、自然放置によるエージング処理が行なわれている。しかし、屋外に放置する自然エー

表-1 製鋼スラグの種類と化学組成例 (単位: %)

種類\組成	CaO	SiO ₂	T・Fe	P ₂ O ₅	S	MnO	F-CaO	水浸膨張比
転炉スラグ	47	15	14	2	0.2	6	3	2~5
脱硫スラグ	68	11	7	0.2	2	2	8	推定5~10
脱珪スラグ	15	16	35	2	0.03	12	-	-
脱リンスラグ	65	12	8	5	0.3	3	7	推定5~10
スロビ ³⁾ スラグ	40	14	13	2	0.3	7	3	2~4
蒸気スラグ	酸化	38	19	15	-	0.4	6	-
還元	51	27	1.5	-	0.5	1	-	-

ング処理は少なくとも約6ヶ月間を要し^{3), 4)}、そのために広い空地が必要となる。また、遊離石灰の含有量が高いスラグでは遊離石灰による膨張が問題となる。そこで著者らは、迅速かつ確実なエージング処理といわれている蒸気エージングに着目し、その実用性を検討することとした⁵⁾。また、資源の乏しい我国では、路盤材に製鋼スラグを積極的に利用することがリサイクル材料の大量使用になり、極めて大切なことである。

もう一つの指定副産物であるコンクリート塊も、年々その量が増加しており、有効利用の方法が鋭意検討されている。コンクリート廃材はアルカリ性を有し、スラグと混合するとアルカリ刺激材としての効果があるため、優れた路盤材になることが予想される。そこで製鋼スラグに加え、コンクリート再生材の路盤材への利用も同時に検討することとした。

2. 転炉スラグの路盤材としての利用状況

(1) 製鋼スラグの種類

製鋼スラグの種類は表-1に示す5種類に分けられる。

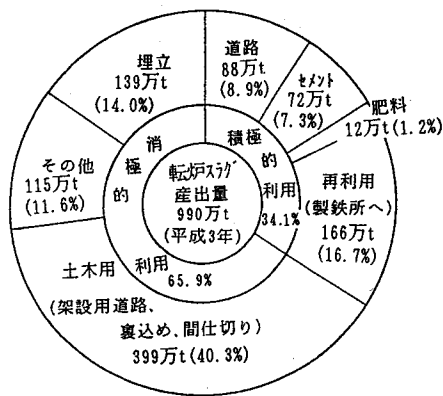


図-1 転炉スラグの利用状況

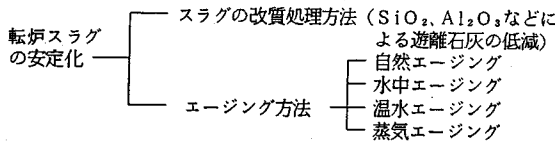


図-2 転炉スラグの安定化方法

同表には化学組成の概略値も併示している。製鋼スラグの中では、転炉スラグの排出量が最も多く、製鋼スラグの大半（ある工場では約60%と報告されている）を占める。脱硫スラグは脱硫のためにホタル石、生石灰を添加した後、排出されるものである。その他、脱珪処理のために焼結鉄（FeO）を添加した後には排出される脱珪スラグ、さらに脱りん処理で排出される脱りんスラグなどがある。転炉スラグ以外のスラグは排出量が比較的小なく、また水浸膨張比が大きいために、本研究では対象外とした。以下、本論文では転炉スラグについて考察を行った。

(2) 転炉スラグの安定化と利用状況

平成3年度の転炉スラグの排出量は約990万tである。その利用状況を図-1に示す。この中で、転炉スラグを製品として販売し、利用した項目は、道路、セメント、肥料および再利用の合計約34%と考えられる。これに対して、残りの約66%は多量のスラグを取りあえず埋め立て用土砂として処理しようとする消極的な利用法である。このように、積極的な利用が遅れている理由は前記した膨張崩壊作用にある。

図-2に転炉スラグの安定化方法を示す。そのうち、スラグの熔融状態での改質処理方法、長期間の自然エージング方法が各々試みられてきた。改質処理方法は、処理コストが高く、また鋼の生産性・品質性が優先されるため実験段階に留まっている。自然エージング処理は、わが国ばかりでなく、欧米においても広く行われている最も一般的な方法である。しかしながら、膨張が安定するまでには約6ヶ月を要し、遊離石灰の量が多い場合、さらに長期間を要することもある。水中および温水の各エー

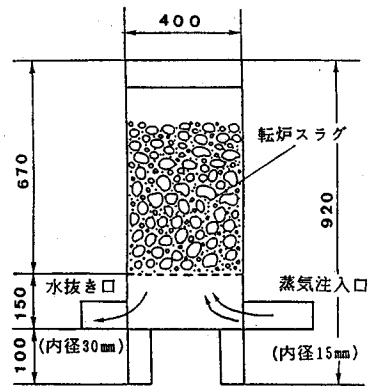


図-3 蒸気エージング槽

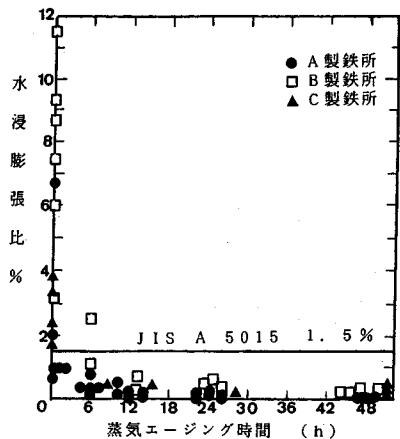


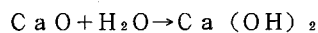
図-4 蒸気エージング時間と水浸膨張比の関係

ジング処理は、自然エージング処理に比べて、期間を著しく短縮できるが、水中エージングはスラグの均質化が難しいなどの問題があり、温水エージングの場合には一部で実施されているのみで広く実用化されるまで至っていない。蒸気エージングについては日本工業規格の解説⁶⁾および桑山らの論文⁷⁾に記されているが、転炉スラグについて実施され、その効果について詳細に記してある論文は少ないものと考えられる。

本研究で蒸気エージングを取り上げた理由の一つは、製鉄所構内では蒸気を比較的手軽に入手でき、コスト低減が可能と考えられるからである。

3. 転炉スラグのエージング

転炉スラグの遊離石灰による膨張は次式の反応によって生じる。



水の存在で遊離石灰（酸化カルシウム）が水酸化カルシウムになる時、その体積は2倍となる。この反応速度は、CaOの状態によって変化する。生石灰（CaO）は石灰石（CaCO₃）を焼成分解して作られるが、この分解温度は900℃である。900℃以上の高温で長時間焼くと収縮して緻密な結晶となる⁸⁾。この状態を硬焼き

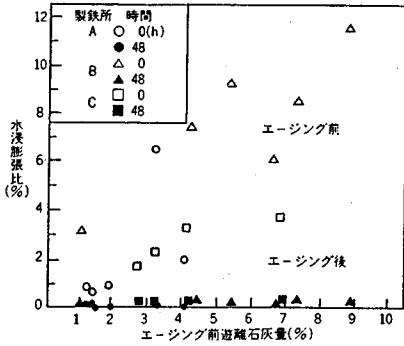


図-5 エージング前遊離石灰量と水浸膨張比の関係

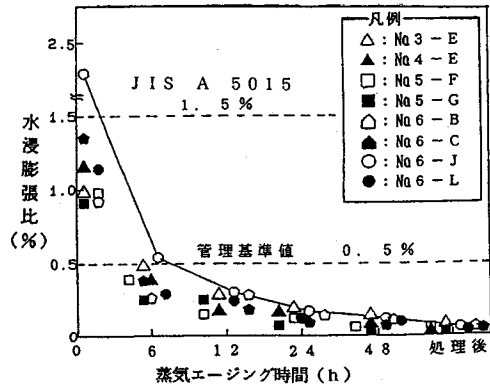


図-7 蒸気エージング時間と水浸膨張比の関係

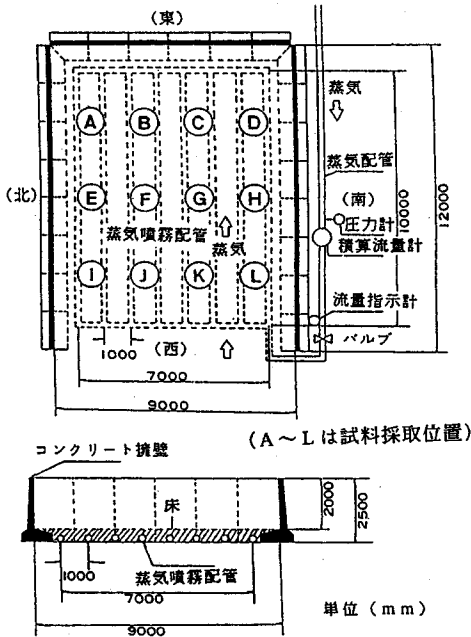


図-6 蒸気エージング設備

生石灰と言ひ、上記した水との反応は遅くなる。製鋼工程では、スラグは1500℃の高温であり、この時活性化していない遊離石灰は冷却したとき硬焼き状態となり、常温の水では反応し難くなっている。また固溶状態の違いにより反応性に差が生じる。しかしながら、硬焼き状態の生石灰は、水の存在下で高温ほど水和反応が促進される⁹⁾と言われている。そこで筆者らは、高温で水分を有する蒸気に着目し、その確認実験を実施した。なお、今回の実験には転炉で鋼の吹錬後に排滓される転炉スラグを使用した。

蒸気が転炉スラグ中の遊離石灰を反応させるに有効か否か、まず小型の蒸気エージング槽で基礎実験を行い、続いて実用化のために、大型の蒸気エージング設備を建設してその効果を検討した。使用した転炉スラグは、製鋼後排出され、ヤードで冷却されたのち破碎設備で破碎粒調された0~25mmのサイズのものとした。

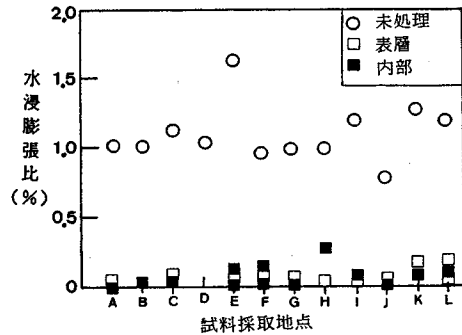


図-8 試料採取地点・採取深さと水浸膨張比

(1) 小型蒸気エージング槽による実験

小型蒸気エージング槽を図-3に示す。1回に150kg程度のスラグが処理できる。この中に転炉スラグを投入し、所定の時間蒸気を通した後、JIS A 5015に準じて水浸膨張試験を実施した。試料数は、A製鉄所6個およびB製鉄所6個、C製鉄所4個の計16個とした。蒸気流量は10リットル/分で6、12、24および48時間通気した。0時間は蒸気エージングしない場合である。

転炉スラグの水浸膨張比とエージング時間との関係を図-4に示す。6時間でその膨張量は1%以下に急激に減少し、その後、エージング時間を長くすると膨張量は漸減して行く。48時間では0.0~0.38%とほとんど膨張しなくなってくる。特にA製鉄所では0.08%以下でB製鉄所の0.10~0.33%、C製鉄所の0.10~0.38%に比べ著しく低減している。同じ転炉スラグでも多少の原料等の違いで、蒸気エージングの効果に差が生じるものと考えられる。しかしながら、数%あった膨張量が、蒸気エージングによりほとんどなくなっており、蒸気エージングの効果は大きいといえる。同図から、残留膨張量の目標値をいくりに取るかで蒸気エージング時間を設定することができる。JIS A 5015の規格では、一応1.5%以下となっているが、今回は初めての試みであり、安全側に考えほとんど膨張量のなくなる48時間を蒸気エージング時間とすること

とした。将来は経済性も考慮して適切な目標値と蒸気エージング時間を設定すべきと考えられる。図-5に水浸膨張比と遊離石灰量との関係を示す。白印が未エージングの膨張比で遊離石灰分が多いほど膨張比が高く、遊離石灰9%で、膨張比が11.5%となっている。このスラグを48時間蒸気エージングを行った後の膨張比が黒印である。全て0.5%以下に低下しており、顕著なエージング効果が認められる。

以上の結果から、蒸気エージングを行えば、転炉スラグでも安心して道路用路盤材として使用できることが明らかとなった。そこで、次に実用化のため、大型の蒸気エージング設備を建設して同様の実験を実施した。

(2) 大型蒸気エージング設備による実験

a) 大型蒸気エージング設備

図-6に大量の転炉スラグを処理できる大型蒸気エージング設備の概要を示す。幅9m、奥行き12m、高さ2mで1回に280tonのスラグを処理できる。設備の構造は、三方をコンクリート擁壁で囲み、下部に蒸気噴出管を配置し、上をシートで覆うことで転炉スラグ全体に蒸気を行き渡らせるようにしている。また、上部に熱電対を配置して、スラグ温度の管理を行い確実に100℃を48時間維持できるようにしている。

b) 水浸膨張試験結果

時間当たり1tonの蒸気流量で、スラグ全体が100℃に到達するまでに要する時間は11~23時間である。100℃到達後、0.5tonの蒸気流量で保温しエージングを行う。図-7に大型蒸気エージング設備を用いた蒸気エージング時間と水浸膨張比の関係を示す。図中の0時間とは蒸気通気前のサンプルであり、100℃到達後6、12、24および48時間後にサンプリングを行う。処理後とは、48時間で蒸気停止後2日間の冷却期間を取った後、取り出し時にサンプリングしたものである。小型蒸気エージング槽による実験結果と同様に、わずか6時間で膨張比が著しく減少し、蒸気エージングを48時間実施すればすべて0.2%以下となっている。

図-8は280tonの全てのスラグが確実に蒸気エージングされ、膨張量が低減されているかをみるために、各位置でのばらつきを示したものである。A~Lは図-6に示した平面的な位置を指す。表層とはスラグ上面より30cm、内部とは積み上げ高さ2mの中央を示す。白印はエージング前、黒印が蒸気エージング処理後を示す。いずれの地点でも、また表層でも内部でも膨張量は著しく低減しており、280tonのスラグには一様なエージング効果が認められ、大型設備で大量処理が可能であることが確認できた。図-9(a)、(b)にはそれぞれエージング前後の転炉スラグの膨張比のヒストグラムの関係を示す。エージング前には0.5~3%の膨張比を有するスラグが蒸気エージング処理後はほとんど0.1%以下の膨張比となっている。

エージング工程は、スラグの出し入れを含めて図-10

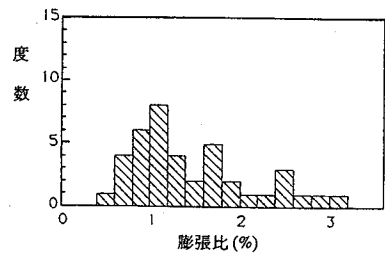


図-9(a) エージング前の水浸膨張比

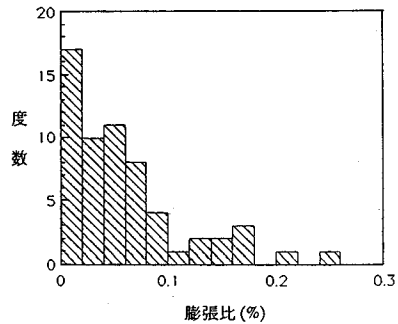


図-9(b) エージング後の水浸膨張比

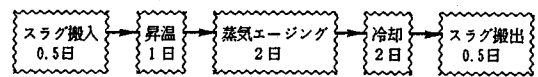


図-10 蒸気エージング工程 合計6日間

に示すように6日間である。転炉スラグ専門委員会¹⁰⁾によると自然エージングで6カ月の水浸膨張比は約1~2%といわれているが、それに比べて著しく低く、期間も1/30に短縮することができた。

以上のように小型蒸気エージング槽での基礎実験に続き、大型設備でも同様に蒸気エージングの効果を確認でき、大量処理が可能となり、実用化の見通しをつけることができた。各社の転炉スラグは各々の特性があると考えられ、蒸気エージングにより今回と同一の値になるとは限らない。しかしながら、蒸気エージングにより確実にその膨張量は低減することから、各々の転炉スラグで蒸気エージング時間と水浸膨張比の関係を調べることで、今回と同様の蒸気エージング工程を組むことができるものと考えられる。

4. 新複合路盤材の種類と特徴

転炉スラグまたはコンクリート再生材を単独で使用した場合の各種材料の特徴と品質を表-2に示す。同表には規格値も併示した。転炉スラグ、コンクリート再生材共に下層路盤材のクラッシュランC-30の規格は満足するものの、上層路盤材である水硬性粒度調整鉄鋼スラグHMS-25の規格を十分には満足していないことが分る。本研究の目的の一つはHMS-25に代わる上層路盤をつくることである。そこでこれらの転炉スラグ、コンクリート再生材に他の材料を混ぜてその弱点を補強し

表-2 材料の特徴と品質

項目 材料	特 徴		一軸圧縮強さ(kgf/cm ²)	修正* C B R (%)	単位容積質量(kg/l)
	長 所	短所			
転炉スラグ	潜在水硬性(小) 7%加劇効果 緻密、堅牢	重い 角張り	10~16	140 ~170	1.9 ~2.1
コンクリート再生材	潜在水硬性(中) 軽量・保水性	品質のばらつき	9~19	60 ~160	1.5 ~1.7
高炉スラグ	潜在水硬性(中) 物理的強度(大)	量的確保が困難	16~18	160 ~180	1.6 ~1.8
水砕スラグ	潜在水硬性(大) 軽量・保水性	単粒度	-	-	0.8 ~1.2
HMS規格	JIS A 5015		12以上	80以上	1.5以上
CS 規格	JIS A 5015		-	30以上	-

* 修正CBRはアスファルト舗装要綱による

てHMS-25と同等の路盤材をつくることを試みた。新複合路盤材は大別すると次の2種類に分けられる。一つは蒸気エージングした転炉スラグを多量に混合したもので以下、「転炉スラグ系新複合路盤材」と呼ぶことにする。もう一つはスラグとコンクリート再生材を混合したもので以下、「コンクリート再生材系新複合路盤材」と呼ぶことにする。

(1) 各種材料の特性

a) 転炉スラグ

転炉スラグは重く角ばった形状をしており、単独でも堅牢で物理的強度は高く、修正CBRはHMS-25と同等である。しかしながら微粉量が少なく、スラグ特有の水硬性は高炉スラグに比べて低いため、一軸圧縮強さでHMS-25の規格を満足しないことがある。

b) コンクリート再生材

コンクリート再生材はコンクリートに含まれる未反応セメント分による再硬化およびそのアルカリ分により、スラグの水硬性を促進させる効果がある。しかしながら、コンクリートの強度のばらつきにより骨材としての強度が低い場合があり、一軸圧縮強さ、修正CBRが規格値を下回ることがある。一般にコンクリート廃材には鉄筋や木屑などの異物が混入している。鉄筋については処理・加工プラントに設置した磁選機で完全に除去できる。木屑は受入場、プラントのベルトコンベア上で人による選別をしているが完全に除去することは難しい。その対策として、水浮選式の異物処理装置をプラントの最終工程に設置したところ、木屑量(重量比)は、約1/5に減少した。

c) 高炉スラグ

高炉スラグは高炉で銑鉄と同時に生成される熔融スラグを、ドライピットまたは畑と呼ばれるヤードに流し込み、自然放冷と適度の散水により冷却したもので、結晶質の岩石状となっている。これを破碎、粒度調整したものが物理的、化学的特性に優れたHMS-25の上層路盤材となる。一般的には、次に述べる水砕スラグとこの高炉徐冷スラグを含めて高炉スラグというが、ここでは高炉徐冷スラグを高炉スラグと呼ぶこととする。

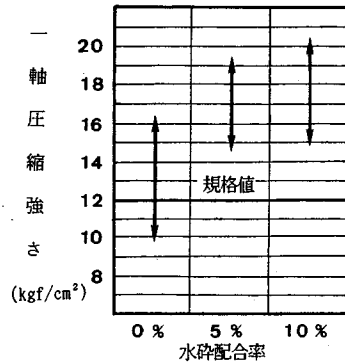


図-1-1 水砕スラグを配合した時の一軸圧縮強さ

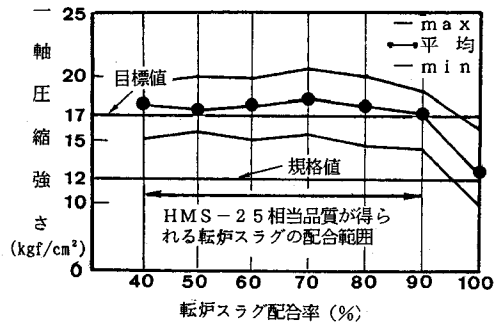


図-1-2 転炉スラグ配合率と一軸圧縮強さ

d) 水砕スラグ

水砕スラグは熔融状態の高炉スラグに、大量の高圧水水を噴射して急冷却したもので、ガラス質の砂状となっている。比重が軽くそれ自体の強度は低い。しかしながら、高炉セメントに使用されるほど水硬性は高い。

(2) 転炉スラグ系新複合路盤材の開発

蒸気エージング処理により異常膨張の心配がなくなった転炉スラグをできるだけ多量に使用し、上層路盤材をつくることを目的として、実験を進めた。

a) 水砕スラグ配合による品質改善

まず、最初に水硬性の優れた水砕スラグを混合して転炉スラグの一軸圧縮強さの向上を図った。図-1-1に水砕スラグの配合比を0、5および10%と変化させたときの一軸圧縮強さの変化を示す(以下の配合比はすべて重量比とする)。水砕スラグを5%混合すれば、一軸圧縮強さは規格値の1.2 kgf/cm²以上となり、品質の向上が顕著に現れている。

b) 高炉スラグ配合による品質の安定化

次に、路盤材の品質をより安定させるため優れた特性を持つ高炉スラグの適正配合を求めた。一般に転炉スラグは角ばった粒形をしており微粒分が少ない。これに対し高炉スラグは、やや柔らかく丸みを持った粒形に破碎され微粒分が多い。これを混合することで粒度改善がなされ、その結果、締固め効果が上がり、ばらつきの小さい品質の安定した材料が得られるものと考えられる。水

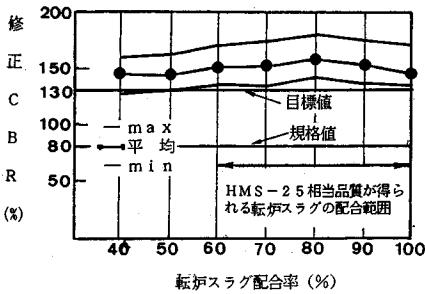


図-13 転炉スラグ配合率と修正CBR

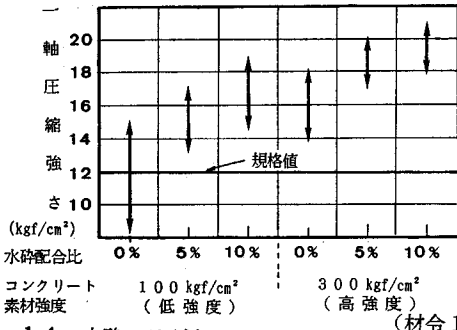


図-14 水砕スラグを配合の強度への影響 (材令14日)

砕スラグを5%とし、高炉スラグと転炉スラグの3種配合としたときの一軸圧縮強さを図-12に、修正CBRを図-13に示す。高炉スラグの混合により、一軸圧縮強さ、修正CBRともに安定した品質とすることができた。

これらの結果より、転炉スラグを大量に使用した配合の場合、転炉スラグ60~90%、高炉スラグ10~40%の配合が、圧縮強さおよび修正CBRの目標値を越え、HMS-25と同等の品質を安定して確保できる範囲であることが分った。これより転炉スラグ系新複合路盤材の標準配合として転炉スラグ75%、高炉スラグ20%、水砕スラグ5%を定めた。西ら¹¹⁾は路盤用の複合スラグとして、転炉50%、高炉徐冷スラグ30%および水砕スラグ20%を提案し、優れた性質を示している。著者らは転炉スラグを多量に使用することを目的としているため、転炉スラグの使用量を多くした。

(3) コンクリート再生材系新複合路盤材の開発

建設副産物と転炉スラグの有効利用促進のため、コンクリート再生材と転炉スラグをバランス良く混合し、HMS-25と同等の品質を有する路盤材の開発実験を実施した。

a) コンクリート再生材と水砕スラグの混合による品質改善

図-14には、コンクリート再生材と水砕スラグを混合した場合の一軸圧縮強さ試験結果を示す。同図に示すように、コンクリートの素材強度が小さい場合には単独で用いると、規格値を下回るものが約60%程度みられた。しかしながら、水砕スラグを5%以上混合することにより圧縮強さは4~5kgf/cm²程度大きくなり、規格値

表-3 コンクリート再生材・スラグ複合路盤材の配合

材料名	混合率(%)
水砕スラグ	5
高炉スラグ	20
転炉スラグ	30
コンクリート再生材	45

を満足する品質に改善できた。また、コンクリートの素材強度が300kgf/cm²の再生材は、単独でも14kgf/cm²以上の強さが得られることが分った。工場において受入れコンクリートを強度別に分別することは不可能であるが、水砕スラグ配合比を5%以上とすれば、路盤材としての強さは十分に確保されるものと考えられる。しかしながら、水砕は単独では軽量であり、修正CBRが小さくなるという短所を有する。したがって、コンクリート再生材と水砕を混合しただけでは、上層路盤の単位容積質量と修正CBRの規格値を満足しない可能性がある。このことから、比重と骨材強度の大きい高炉スラグと転炉スラグを混合することとした。

b) コンクリート再生材とスラグの混合による品質の安定化

表-3に示すように、水砕スラグの混合比は図-14より5%とし、高炉スラグ量は粒度を考慮して20%と定めた。残りの75%を転炉スラグとコンクリート再生材の配合比とした。そこで両者の比率を決めるために、コンクリート再生材の比率を25%から75%まで10%ずつ変化させて路盤材の一軸圧縮強さ、単位容積質量およびCBR試験を行った。その結果を図-15(a)、図-15(b)および図-15(c)にそれぞれ示す。なお、HMS-25と同程度の路盤材を目標とするために、目標値は、HMS-25の実績値に近いものとした。一軸圧縮強さは、規格値12kgf/cm²を約5kgf/cm²上回る17kgf/cm²が得られた。また、混合材とすることによって配合に関係なく、約17kgf/cm²の安定した強さが得られた。修正CBRおよび単位容積質量は、コンクリート再生材の増加によって減少する傾向がみられた。これは転炉スラグに比較してコンクリート再生材の比重が小さいためと考えられる。この結果およびリサイクル資源の活用であることを考慮し、コンクリート再生材の混合率は35~60%が適当であるものと判断した。以上の結果から、最適配合としてコンクリート再生材の混合率を45%、転炉スラグを30%と定めた。

(4) 新複合路盤材の特性とばらつき

ここでは、新しいタイプの混合路盤材として、(1) 転炉スラグ75%・高炉スラグ20%・水砕スラグ5%のもの、(2) コンクリート再生材45%・転炉スラグ30%・高炉スラグ20%・水砕スラグ5%ものの2つについて、それらの力学的特性とばらつきの程度を検討する。

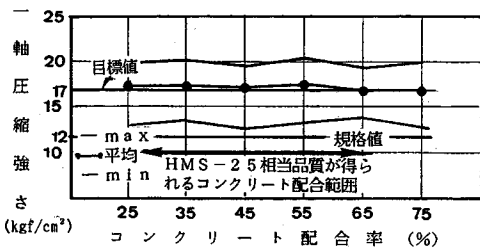


図-15 (a) コンクリート再生材配合率と一軸圧縮強さ (材令14日)

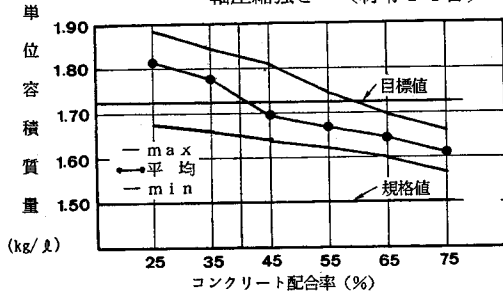


図-15 (b) コンクリート再生材配合率と単位容積質量

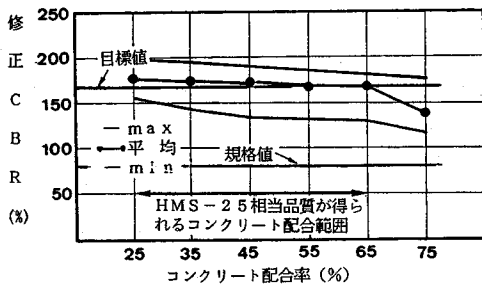


図-15 (c) コンクリート再生材配合率と修正CBR

a) 転炉スラグ系新複合路盤材

転炉スラグ系新複合路盤材の材令と一軸圧縮強さの関係を図-16 (a) に示す。スラグ特有の水硬性を發揮し、約2年間材令と共に強度が増大している。14日強さは規格の 12 kgf/cm^2 を越えて平均 18.4 kgf/cm^2 に達し、1年後には 52.8 kgf/cm^2 まで伸びている。本測定値の結果は、自然エージングを実施した転炉スラグの強度の伸びとほぼ同様な傾向であり⁴⁾、蒸気エージングを実施したために水硬性が減少するとは考えられない。図-17 (a) に一軸圧縮強さと変形係数の関係を示す。両者には正の相関があり、材令180日で一軸圧縮強さ 46.5 kgf/cm^2 に対し、変形係数は 6630 kgf/cm^2 となる。この値より等値換算係数を求めると、竹下式¹²⁾で0.68、建設省土建式¹³⁾で0.56となり、HMS-25の等値換算係数0.5とほぼ同等である。図-18 (a) に最大乾燥密度と含水比との関係を示す。同図にはHMS-25、粒調碎石の結果も併示した。比重が大きく、縮固め特性も良好な転炉スラグを高配合しているので最大乾燥密度は、 2.510 g/cm^3 とHMS-25に比べて重い。最適含水比は、8.1%である。乾燥密度-含水比曲線は、HMS-25

転炉スラグ系新複合路盤材

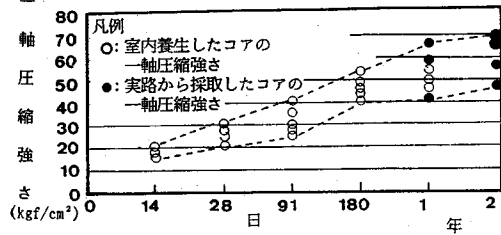


図-16 (a) 材令と一軸圧縮強さ

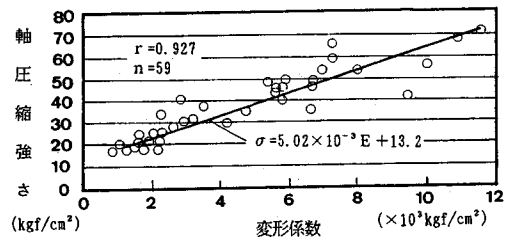


図-17 (a) 一軸圧縮強さと変形係数

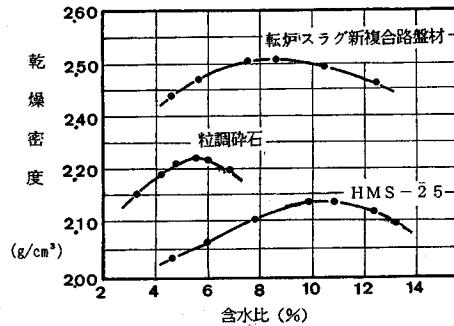


図-18 (a) 乾燥密度-含水比曲線

と同様にならからであり、所定の縮固め度を得るための含水比の範囲が広く、施工時の含水比管理が容易である。また、この新複合路盤材は3種類の材料の複合品であるため、路盤材として使用するとき材料の偏在がおきていると、路盤材としての性能が落ちることが心配される。そのため複合路盤材を製造する際に、確実に所定の配合比となるようにプラント混合を実施し、出荷の際には、ヤードでの2次混合を実施している。配合比で水砕スラグは5%と少ない量であるが、水砕スラグは単位容積質量で約 1.0 kg/リットル と軽く、他の配合品に比べ容量としては2倍の、10%程度に相当し、確実にかつ均一に混合される。図-19 (a) に製造日ごとの単位容積質量のばらつき、図-20 (a) に一軸圧縮強さのばらつきを示す。比重の大きな転炉スラグを多く混合しているため、単位重量はHMS-25より若干大きくなっている。一軸圧縮強さの変動係数は9%程度であり、複合材料でも十分に均一な混合がなされていることが分かる。

b) コンクリート再生材系新複合路盤材

図-16 (b) に新複合路盤材の材令と一軸圧縮強さの関係、図-17 (b) に一軸圧縮強さと変形係数の関係および図-18 (b) に縮固め試験結果をそれぞれ示す。

コンクリート再生材系新複合路盤材

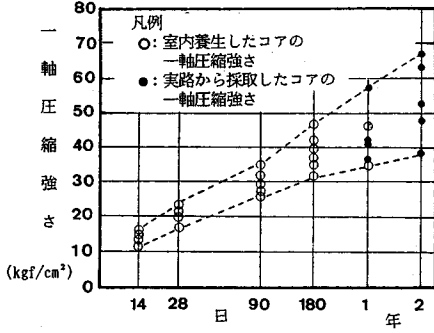


図-16 (b) 材令と一軸圧縮強さ

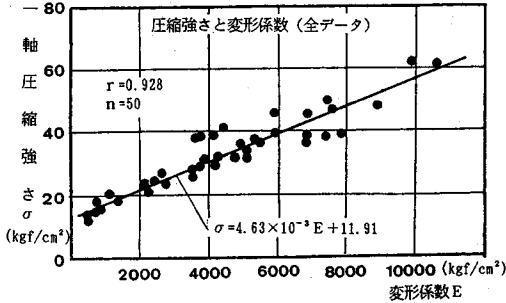


図-17 (b) 一軸圧縮強さと変形係数

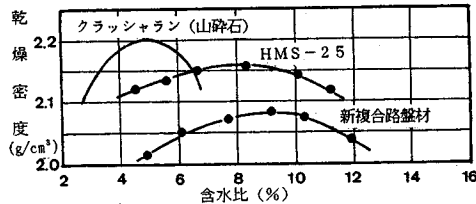


図-18 (b) 乾燥密度-含水比曲線

また、図-19 (b) は単位容積質量のばらつきを、図-20 (b) は一軸圧縮強さ (材令14日) のばらつきを示す。図-16 (b) の測定結果は、それぞれ材令14日から1年までは室内養生した供試体、1年および2年は実路から採取した供試体による圧縮強さである。同図によると、材令と強度は比例関係にあり、材令180日での一軸圧縮強さは30 kgf/cm²以上を示し、材令14日に比較して約2.5倍と著しく高い強度発現がみられた。

図-17 (b) は材令14日から2年までの圧縮強さと変形係数の関係を示す。変形係数は強度と比例関係にあり、圧縮強さ40 kgf/cm²の場合、変形係数は約6000 kgf/cm²となっている。新複合路盤材の材令180日における平均一軸圧縮強さが43.7 kgf/cm²となり、実験式から変形係数を推定すると6867 kgf/cm²となった。この値を用いて、竹下式と建設省土研式により等値換算係数を求めると、それぞれ0.69、0.56となりHMS-25の等値換算係数0.55とほぼ同等といえる。図-18 (b) によると新複合路盤材の乾燥密度-含水比曲線はHMS-25と同様にならぬかである。このことから施工時の水分管理は容易であるものと考えられる。図-19 (b) に単位容積質量のばらつきを示す。測定

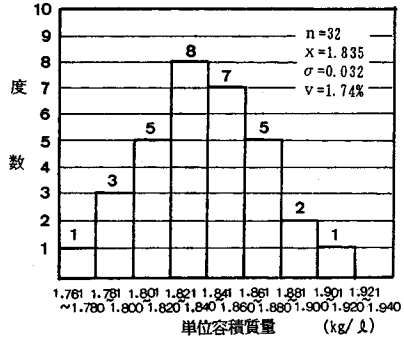


図-19 (a) 単位容積質量のばらつき

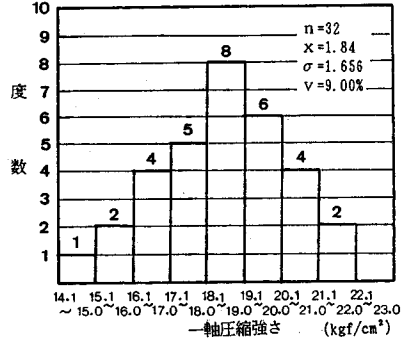


図-20 (a) 一軸圧縮強さのばらつき

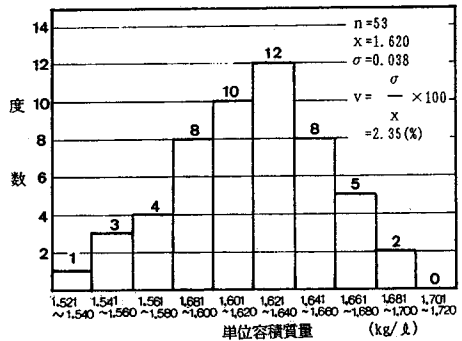


図-19 (b) 単位容積質量のばらつき

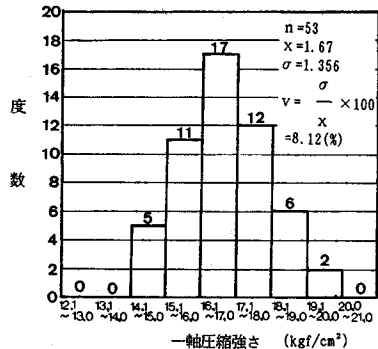


図-20 (b) 一軸圧縮強さのばらつき

数は53個で平均単位容積質量は1.62 kg/L、変動係数は2.35%であった。図-20 (b) に材令14日の強度のばらつきを示す。測定数53個の平均一軸圧縮強さは16.7 kgf/cm²で変動係数は8.12%であった。この結果は、HMS-25のばらつきと同程度であった。

表層	密粒アスフ	密粒アスフ	5 cm
上層路盤	M-25, HMS-25	A, Bシリーズ	15 cm
下層路盤	C-40 (碎石)	C-40 (碎石)	15 cm

路床 比較材 新複合路盤
 (改良材で路床を改良) 交通区分: L交通, 設計CBR: 6%(改良後)

図-21 道路の断面

表-4 新複合路盤材の配合

タイプ	比較材 %		転炉スラグ系 新複合路盤材 % wt			再生コンクリート系 新複合路盤材 % wt		
	HMS-25	M-25	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3
配合								
コンクリート再生材						45	45	45
高炉スラグ	100		20	20		20	10	
水砕スラグ			5	10	10	5	5	5
転炉スラグ			75	70	90	30	40	50
粒調碎石		100						

5. 実路試験

(1) 実路試験概要

新複合路盤材の有用性を確認するため、平成3年5月、北九州市戸畑区の北九州市テクノパークの園内道路に、交通区分のL交通に対する試験道路を設計・施工した。試験道路長は200m、幅員6mで、片方1車線の2車線道路である。1配合につき試験区間は長さ50m、幅3mとした。図-21に示すように、実路の表層厚さを5cm、上層路盤の厚さを15cmとした。

a) 路盤材の配合および実路試験項目

新複合路盤材の配合を表-4に示す。Aシリーズは、A-1が標準配合で、A-2では水砕スラグの配合率を増加させることにより長期強度の伸びを期待し、A-3では高炉スラグの配合をゼロとしたものである。コンクリート再生材系Bシリーズは、B-1が標準配合で、B-2およびB-3では高炉スラグ量を減じて転炉スラグの配合率を増加させたものである。路盤性状を比較するために、6配合の他にHMS-25およびM-25を使用した路盤も舗装した。試験項目を表-5に示す。施工から2年後(平成6年5月)まで、計4回の実路試験を実施したのでその結果を報告する。

(2) 実路試験結果および考察

a) たわみ量

ベンゲルマンビーム試験結果を図-22(a),(b)に示す。同図によると、1年および2年経過後のたわみ量は0.5mm以下となり、AタイプおよびBタイプのいずれも施工時のそれに比べ約1/2となり、時間の経過と共に減少している。これに対して、スラグを使用していないM-25の場合のたわみ量は、施工時に測定した0.7~0.8mmのままで、1~2年後でもほとんど変わらない。新複合路盤材中のスラグおよびコンクリートの水和反応が順調に進行しているものと考えられる。

b) 支持力係数

平板載荷試験(K₃₀)の測定結果を図-23に示す。

表-5 実路試験項目

試験項目	試験法	施工時				追跡調査		
		路床	下層	上層	表層	表層	1年	2年
CBR試験	舗装試験法便覧	○						
現場密度試験	JIS A 1214		○	○				
平板載荷試験	JIS A 1215		○	○				
たわみ量測定	道路維持修繕要綱	○	○	○		○	○	○
わだち掘れ深さ	道路維持修繕要綱				○	○	○	○
平坦性試験	舗装試験法便覧				○	○	○	○
ひびわれ調査	道路維持修繕要綱					○	○	○
開閉調査(平板載荷)	JIS A 1215						○	○
膨張量調査(レベル管理)	レベル計						○	○
備考						H4.11	H.5	H.6

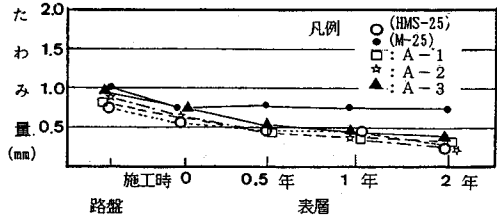


図-22(a) Aタイプのたわみ量

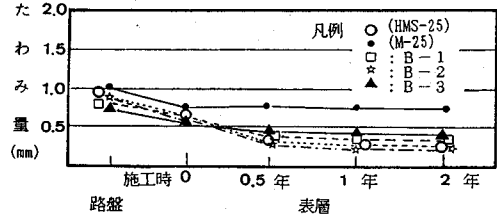


図-22(b) Bタイプのたわみ量

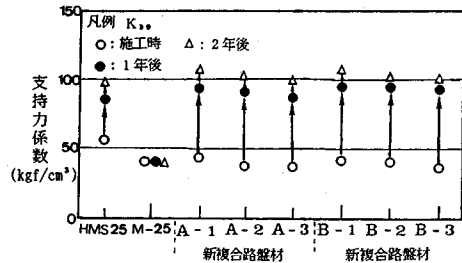


図-23 支持力係数

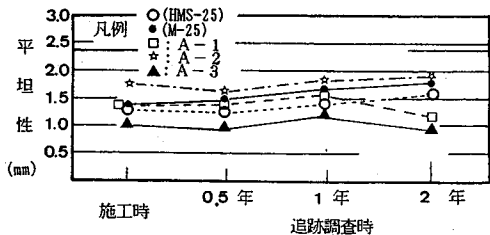


図-24(a) Aタイプの平坦性

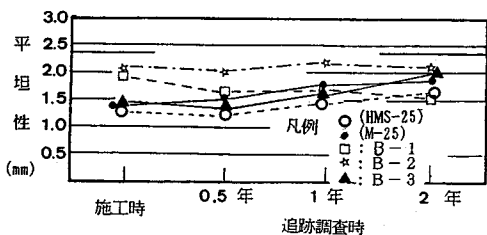


図-24(b) Bタイプの平坦性

路盤材の支持力を表す指標の一つである支持力係数は、碎石を使用したM-25の場合、施工時で44.6 kgf/cm³、材令1年後44.2 kgf/cm³とほとんど変化していない。A、Bシリーズの場合の支持力係数は施工時で約40~45 kgf/cm³であったが、1年後には80~90 kgf/cm³と2倍以上にまで増加している。2年後の新複合路盤材の支持力係数は両者とも約100 kgf/cm³になっている。これは図-17(a),(b)にみられるように、スラグ混合材の場合、材令による変形係数の伸びが著しいため、路盤の支持力も向上したものと考えられる。

c) 平坦性

乗り心地に影響する道路の縦断方向の凹凸の程度を表す平坦性の測定結果を図-24(a),(b)に示す。同図によると、全ての道路の平坦性は、経過年数による低下がほとんどみられない。

わだち堀れ、路面のひびわれについても観察を行なったが、施工直後とほぼ同一であり、路面の変状は何ら認められなかった。転炉スラグを路盤材として用いた場合に、過去によく問題となった路面の膨張・隆起現象は、全く観察されなかった。

6. 結論

本研究から得られた事柄をまとめて列挙する。

(1) 蒸気エージングは、これまで実施された自然エージングと比較し、転炉スラグの膨張崩壊作用が約1/30の短期間で水浸膨張量が0.5%以下となり、確実に安定させることが可能となり、スラグの膨張問題が解決できたものと考えられる。

(2) 本研究で提案した転炉スラグ系新複合路盤材およびコンクリート系新複合路盤材の2種類の新複合路盤材は、材令14日の一軸圧縮強さが材令180日では30~40 kgf/cm²と約2倍になるなど、材令の経過と共に強度・変形係数が増加し、スラグ特有の優れた特徴がみられた。新複合路盤材としての諸性質は、HMS-25と同等か若干上回る良好な測定値が得られた。

(3) 新複合路盤材を用いた実路試験の結果、たわみ量、平坦性およびわだち堀れなどの実路状態は、HMS-25および碎石を用いた道路と何ら変わらない測定値を示した。むしろ、碎石使用道路と比べ、新複合路盤材ではスラグの水和硬化によって、たわみ量および支持力係数について優れた測定値を示した。したがって、蒸気エージングを実施した転炉スラグは、道路用路盤材として十分に使用できることが確認できたものと考えられる。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費(試験研究B, 課題番号. 07555138: 研究代表者 高山俊一)の援助を受けて行われた。

参考文献

- 1) 出光隆, 岡林巧, 猿渡律: 道路用スラグに関する実験的研究, 九州工業大学研究報告(工学), No. 27, pp. 11-19, 1973年6月.
- 2) 佐々木稔, 新井田有文, 大槻孝, 土屋桂, 長尾由一: エージングによる転炉スラグの安定化機構, 鉄と鋼, 68(1982)第6号, pp. 97-104.
- 3) 佐藤康文, 山田史郎, 上村福夫: 転炉スラグを主体にした複合路盤材, 第13回日本道路会議論文集, No. 421, pp. 213-214, 1975年10月.
- 4) M. R. カマチャリ, 内田一郎, 出光隆, 高山俊一: 転炉スラグの路盤への利用について, 土木学会論文報告集, 第282号, pp. 101-113, 1979年2月.
- 5) 高山俊一, 出光隆, 橋本透, 杉正法: 転炉スラグの膨張量と蒸気エージング時間, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp. 70-71, 1992年9月.
- 6) JIS. A. 5015 道路用鉄鋼スラグ 1992, 道路用鉄鋼スラグ解説.
- 7) 桑山忠, 山田優, 本多淳裕: 電気炉スラグの土木材料としての利用, 建設用原材料, Vol. 1, No. 1, pp. 29-35, 1991.
- 8) 石膏石灰工学論, 石膏石灰ハンドブック, pp. 126-127, 1986年2月.
- 9) 松田仁樹, 石津貴, 季寿瑛, 架谷昌信: Ca(OH)₂/CaO可逆熱化学反応を利用した化学蓄熱に関する化学速度論的研究, 化学工学論文集, 第11号, pp. 542-548, 1985.
- 10) 製鋼スラグ専門委員会, (社)日本鉄鋼連盟, 1982年7月調査.
- 11) 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414号, V-12, pp. 89-98, 1990年2月.
- 12) 竹下春見: 舗装厚指数(SN)について, 道路, pp. 907-913, 1965年11月.
- 13) 飯島尚, 小島逸平: 製鋼スラグを用いた路盤の等置換算係数, 土木技術資料, 27-3, pp. 15-20, 1985年.

(1995. 10. 12受付)

THE UTILIZATION OF STEEL MAKING SLAG IMPROVED BY THE METHOD OF STEAM AGING AS UPPER BASE MATERIALS

Shunichi TAKAYAMA, Takashi IDEMITSU, Noriyoshi AIDA, Masanori SUGI and Hidetoshi TOKUHARA

The effective use of converter furnace slag has not been made yet, as it has extraordinary expansive nature due to the hydration of free CaO. In this paper, it has been made clear that the expansive nature is reduced greatly by the method of steam aging and two types of new upper base materials using the improved converter furnace slag have almost the same properties as those of HMS-25, which is the ordinary upper base material made of blast furnace slag. Furthermore, the results (CBR test, plate bearing test and Benkelmann beam test etc.) of the tentative pavement test with the two types of new upper base materials are concerned.