

転炉スラグの路盤材への利用について

ON THE STUDIES OF UTILISATION OF CONVERTER FURNACE SLAG IN ROAD BASES

M.R. カルマチャリヤ*・内田一郎**・出光 隆***・高山俊一****

By M.R. KARMACHARYA, Ichiro UCHIDA, Takeshi IDEIMITSU
and Shun-ichi TAKAYAMA

まとめてここに報告する。

1. まえがき

今日、粗鋼生産量は年々増加する一方であり、それに伴って排出されるスラグ量も昭和50年度では、高炉スラグおよび転炉スラグそれぞれおよそ3000万t, 1000万tにのぼっている。

高炉スラグは、1930年代からすでに路盤材として利用されており、最近では単なるバラスとしてではなく、その潜在水硬性を生かした利用法が盛んに用いられている。

一方、転炉スラグはそれ自身のもつ膨張自壊性、いわゆる“ふけ”の現象のため、一部アスファルトコンクリート骨材として利用されている以外、建設材料としてはほとんど利用されず、その大半が埋立用として、また、若干量が地金回収、焼結原料などとして利用されているにすぎない。

しかしながら、1960年代から製鋼スラグに関する関心が高まり、今日では、国内外を問わず各所で実験的研究がなされている。

著者らは転炉スラグを路盤材として利用することを考えたが、この“ふける”というやっかいな性質のために転炉スラグをそのまま高炉スラグと同様に、路盤材料として利用することはできない。そこで次の2つの方法を考え、数年前から実験的研究を重ねてきた。

- 1) まだふけがほとんど生じていない転炉スラグ（フレッシュ転炉スラグと仮称）を他の材料と混合して、ふけによる膨張を緩和させて利用する方法
- 2) フレッシュ転炉スラグをエージング（ある期間ねかせること）して、十分ふけさせたのち利用する方法

まだ研究続行中であるが、現在まで得られた結果を

2. 製鋼スラグ

製鋼スラグは一般に転炉、平炉、電気炉などによって生産され、おののおののプロセスに応じて異なる成分の製鋼スラグが排出される。このようなスラグには一般に $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, free lime ($f\text{CaO}$), $(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg})\text{O}$ そして $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 \leftrightarrow 2\text{CaO}\cdot2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ の固溶体などが含有されている。この中でもっとも問題になるのは $f\text{CaO}$ である。

わが国では製鋼スラグのうち、転炉スラグが圧倒的に多い。また、転炉スラグの中でも脱酸法の相異によって、リムド鋼スラグ (Rimmed S. Slag), セミキルド鋼スラグ (Semi Killed S. Slag) およびキルド鋼スラグ (Killed S. Slag) の種類がある。本研究は、フレッシュ転炉スラグおよびエージング転炉スラグに関するものであり、前者ではキルド鋼スラグ、後者では上述の3種類のものを用いた。本研究に使用した転炉スラグの化学成分を表-1に示す。同表から明らかなように CaO の含有率は45.6~49.9%である。Parker や Rider¹⁾は高炉スラグでも CaO の含有率が42%以上になると“ふけ”の現象が起きるとしており、また、Knight は安定

Table 1 Chemical Composition (%)

C. Slag	$f\text{CaO}$	CaO	SiO_2	MnO	MgO	FeO	Fe_2O_3	T-Fe	P_2O_5
Killed S.S.(1K)	3.2	49.9	13.4	5.6	6.1	12.9	11.0	17.8	2.0
Killed S.S.(2K)	1.4	45.6	12.2	5.8	5.1	16.7	13.4	22.4	1.9
Rimmed S.S.(1R)	2.1	49.5	13.7	5.1	5.6	9.7	16.7	18.9	1.7

Table 2 Leaching Test Result (ppm)

	T-Hg	Pb	As	Cd	Cr	pH
Converter slag	0.005	0.1	0.05	0.01	0.01	11-12.5
JIS Limit	0.005	3.0	1.5	0.3	1.5	—

* 学生会員 工修 九州大学研究生 工学部土木教室

** 正会員 工博 九州大学教授 工学部土木教室

*** 正会員 工修 九州工業大学助教授 開発土木教室

**** 正会員 工修 九州工業大学助手 開発土木教室

であるためには CaO と SiO_2 の比が 1.3 以下であることを提案している。

したがって、転炉スラグの“ふけ”の原因はこの過剰な CaO にあると考えられる。

転炉スラグはこのほかにマグネサイトやドロマイトの水和によっても膨張するが、 $f.$ CaO による膨張に比べてきわめて小さい。

本研究に使用した転炉スラグの溶出試験結果を表-2 に示す。化学成分(表-1)からみても明らかなように、重金属類は含まれていない。また、同表によると pH 値、T. Hg を除く他の値は、日本産業衛生協会基準値よりはるかに小さくなっている。

3. フレッシュ転炉スラグの路盤材への利用

転炉スラグは CaO の含有率が大きく、そのうち、数パーセントが遊離して膨張を起こし、いわゆる“ふけ”的原因となる。しかしながら、この転炉スラグを水碎スラグと混合すれば、 $f.$ CaO が刺激剤となって水碎スラグのもつ潜在水硬性を十分に発揮させること、また、ボーラスで非結晶質の水碎スラグが転炉スラグの膨張を吸収することなどの相互作用により、路盤材として利用できるものと考えられる。

よって、フレッシュ転炉スラグを水碎スラグおよび他の骨材と混合した路盤材(転炉・水碎混合路盤材)について、その膨張性、強度特性、路盤効果などを調べてみた。

(1) 転炉・水碎混合路盤材の膨張およびきれつ発生に関する実験

a) 試験方法

表-3 に示す 6 種類の配合に対してきれつ発生状況、膨張性を調べるために、円柱供試体($\phi 10 \times 12.7 \text{ cm}$)および CBR 試験用供試体を作製した。円柱供試体は表-4 に従い、CBR 試験用供試体は JIS A 1210 の縮固めに従って作製した。円柱供試体は脱型後室内空中養生を行ったが、雨量の多いわが国の気象条件を考慮して、材令 14 日以後毎週 2 回約 30 分程度水浸した。CBR 試験用供試体は水浸養生を行った。以下、それらの結果について示す。また、表-5 は表-3 に示した混合物の工学的性質である。

b) 試験結果および考察

i) きれつの発生状況

各配合ともそれぞれ 33 本の円柱供試体を作製し実験を行った。

配合 C, E を除いて、A 種は材令 7 日、B 種は 20 日、そして D 種は 30 日できれつ

Table 3 Mix Proportion (wt %)

Types	Fresh Steel Slag	Granulated Slag	Crushed Stone
A	60	40	0
B	50	50	0
C	40	60	0
D	40	40	20
E	30	45	25
F	100	0	0

Table 4 Condition of Manufacturing of Test Pieces

Test Pieces	U.C.S. Test	Bending Test
Rammer { Weight	4.5 kg	4.5 kg
Diameter	5 cm	11 cm
Dropping Height	45 cm	45 cm
No. of layer	3	3
No. of blows per layer	42	250
Mould Size	10 × 12.7 cm	15 × 15 × 55 cm

Table 5 Engineering Properties

Mix	Percentage Passing [wt %]				O.M.C. (%)	r_{dmax} (g/cm ³)
	25 mm	13 mm	2.5 mm	0.074 mm		
A	—	100	57.6	3.0	17	2.000
B	—	100	62.5	2.8	18	1.830
C	—	100	67.4	2.5	19	1.760
D	100	89.2	50.0	2.1	13	2.060
E	100	86.5	50.6	2.1	14	1.940
F	—	100	78.0	2.5	10	2.560

が発生した。材令 100 日におけるそれぞれの供試体の代表的なきれつ発生状況を図-1 に示す。また、フレッシュ転炉スラグ混合率と材令 100 日におけるきれつ発生率(C_p)との関係を図-2 に示す。ここに、

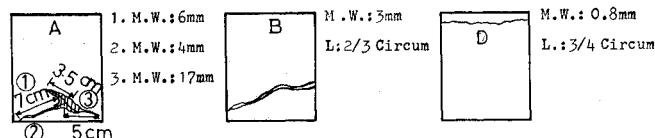
$$\text{きれつ発生率} (C_p) = \frac{\text{きれつの入った供試体本数}}{\text{全供試体本数}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (1)$$

同図からフレッシュ転炉スラグ混合率が 40% 以下では問題はないが、それ以上になるときれつが発生し、その発生率は転炉スラグの混合率に比例して増大している。

ii) 膨張性試験

各種配合の CBR 供試体に対する膨張量と材令の関係を表-6 に示す。膨張量はきれつ発生状況とほぼ類似しており、F, D, A, B, C, E の順に小さくなっている。

材令 91 日における、フレッシュ転炉スラグ混合率と膨張量との関係を示すと図-3 のようになる。膨張量は水碎スラグの混合割合が増加するに従って小さくなる傾



A ~ D : Mix Proportion, M.W.: Maximum Width
L.: Length of Crack

Fig. 1 Outline of the Crack Pattern

向にあり、 $F(0) \rightarrow D(40) \rightarrow A(40) \rightarrow C(60) \rightarrow E(45)$ の順に減少している。なお、()の中は水碎スラグの混合割合(%)である。

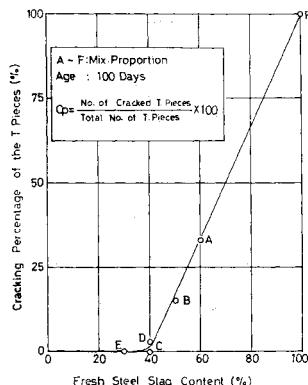


Fig. 2 Effect of F.S. Slag
on C_p

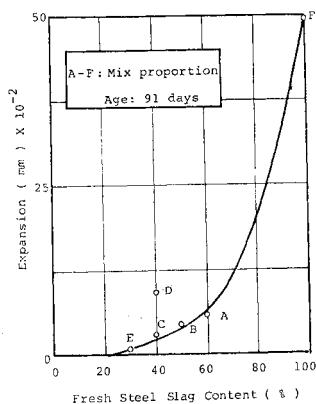


Fig. 3 Effect of F.S. Slag on Expansion

Table 6 Expansion in CBR Test ($\text{mm} \times 10^{-2}$)

Mix Prop.	A	B	C	D	E	F
Age Days						
1	0.5	0.6	0	1.2	0	0.6
4	2.5	2.2	0.5	3.5	0	4.3
7	3.0	2.6	0.9	4.1	0.5	8.7
14	3.2	3.6	1.6	4.8	0.5	15.8
28	3.3	2.5	2.7	5.5	-0.7	32.2
42	3.8	2.3	3.2	6.2	-0.4	41.1
56	3.9	2.6	3.2	6.3	-0.4	45.0
70	4.7	3.8	3.6	8.1	0.5	47.5
91	5.3	4.4	3.3	9.1	1.1	49.8
105	5.4	4.7	3.3	8.9	1.1	48.0
119	5.5	4.7	3.3	9.0	1.1	47.8

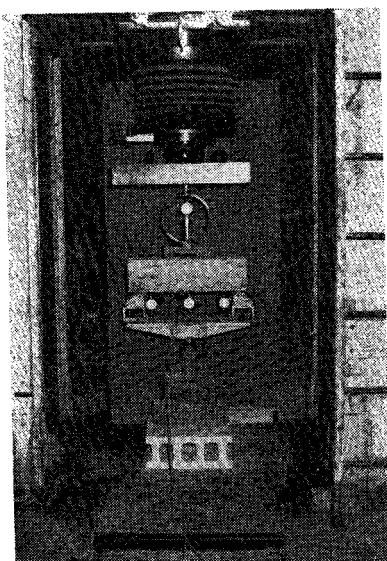


Photo 1. Outline of Bending Test

(2) 転炉・水碎混合路盤材の強度特性

a) 試験方法

強度試験としては一軸圧縮および曲げ試験を行った。供試体は表-4に示す条件で作製し、試験日まで被覆せず室内空中養生した。ただし2週目から、週2回およそ30分程度水浸した。曲げ試験は写真-1に示す2点載荷方式で行った。その際、変形係数を求めるため各荷重段階ごとにダイヤルゲージでたわみを測定した。

b) 試験結果および考察

一軸圧縮強度 (σ_c) および変形係数 (E_c) と材令との関係を図-4～5に、また、曲げ強度 (σ_b) および曲げ変形係数 (E_b) と材令との関係を図-6～7に示す。ただし、これらの結果は各3個の試験値の平均である。

一軸圧縮試験による変形係数 (E_c) と曲げ試験による変形係数 (E_b) との間にはかなりの相違がみられるが、両者の間には図-8に示すような関係があり、次のような式が成立つ。

転炉・水碎混合路盤の場合、 A , B はそれぞれ 8.6 および 5700 となり、相関係数は 0.953 となった。

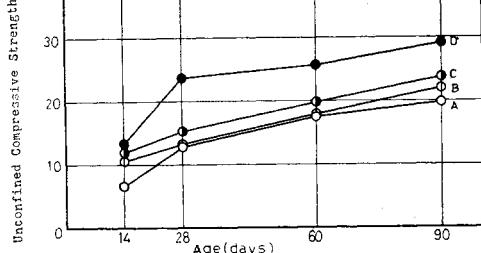


Fig. 4 Effect of Age on U.C.S.

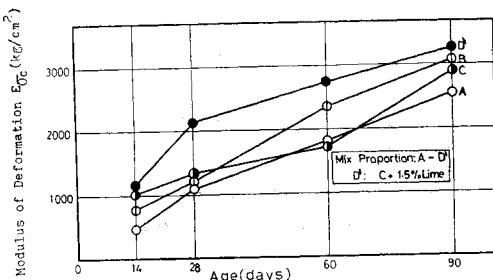


Fig. 5 Effect of Age on Modulus of Deformation (Compression Test)

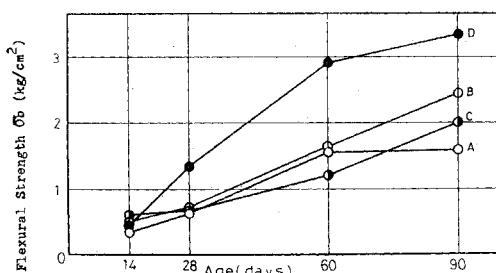


Fig. 6 Effect of Age on Flexural Strength

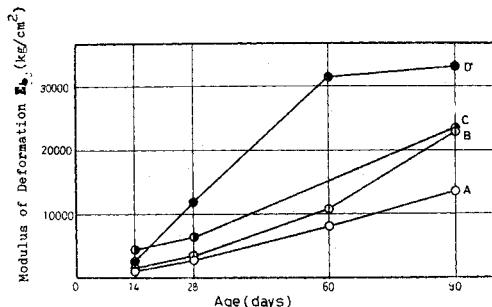


Fig. 7 Effect of Age on Modulus of Deformation (Bending Test)

(3) 模型路盤の載荷試験

a) 試験方法

路盤効果を確認するため、正方形断面を有するコンクリートピットを作り、その中に模型路盤を舗設し、平板載荷試験、CBR試験などを行った。

コンクリートピットと載荷装置の概略を図-9に示す。ただし、ピットの底面にはコンクリートを打設せず、自然土(砂質土、PI=NP、含水比22%、 $r_d=1.58 \text{ g/cm}^3$)を締固めて路床とした。下層路盤には砕石:砂=7:3のものを用い層厚を20cmとした。上層路盤材には表-7に示す2種類の配合のものを使用した。路盤の締固めは重量35kgのランマーを用いて行い、現場密度はそれぞれ最大乾燥密度(スラグのJIS案に基づく)の91~94%であった。舗設後、約5cmの湿砂を上面に敷いて養生した。

b) 試験結果および考察

i) 平板載荷試験およびCBR試験結果

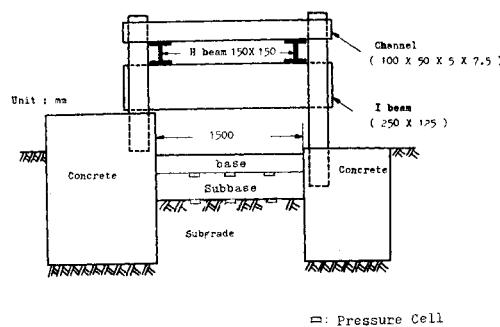


Fig. 9 Outline of the Test Pit

Table 7 Mix Proportion of the Base Used for Pit Test

Types	Fresh C. Slag	Granulated Slag	Crushed Stone
A	60	40	0
G	30	30	40

Table 8 Effect of Age on k_{30} and CBR

Days	14		28		56	
	Types	k_{30}	CBR	Types	k_{30}	CBR
A	9.9	20.1	15.7	29.0	20.9	52.7
G	17.8	44.4	36.5	70.7	62.0	125.0

Table 9 Comparison of Modulus of Deformation (kg/cm²)

Days	14			28			56			
	Bases	$E_{k_{30}}$	E_b	E_c	$E_{k_{30}}$	E_b	E_c	$E_{k_{30}}$	E_b	E_c
A	290	1 663	860	1 040	6 109	1 380	2 480	6 537	1 430	—
G	3 500	12 094	2 080	26 500	29 280	4 090	130 000	48 346	6 320	—

上層路盤上の k_{30} 値および CBR 値の経日変化を表-8 に示す。いずれの場合も 1か月以後、急上昇している。Nascimento らの方法²⁾を拡張した植下³⁾の方法に基づいて上層路盤の変形係数 ($E_{k_{30}}$) を算出し、その結果を表-9 に示す。

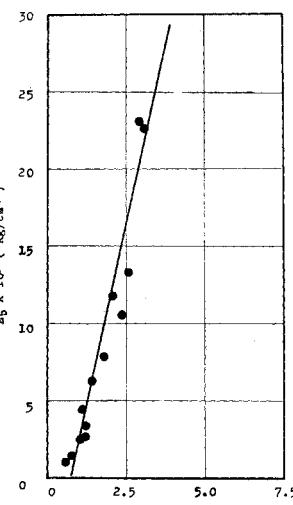
同表には、圧縮、曲げによる変形係数も併記している。通常使用されている程度の路盤材(配合 G、材令 28 日)では平板載荷試験から求めた $E_{k_{30}}$ は曲げ試験から求めた E_b にかなり近い値を示すことがわかる。

締固め効果が不足であるにもかかわらず k_{30} 値は材令 28 日で、CBR 値は 56 日で満足している。実際の路盤では十分な転圧効果が得られ、さらに大きい k_{30} 値および CBR 値が期待できるものと考えられる。

次に、下層路盤上に埋設した土圧計により測定した鉛直土圧を図-10 に示す。この結果から、材令とともに路盤の応力伝達特性が上昇していることがわかる。

ii) 繰り返し載荷試験結果

残留および弾性沈下量と繰り返し回数 (N) の関係をそれぞれ 図-11~12 に示す。

Fig. 8 Relationship between E_b and E_c

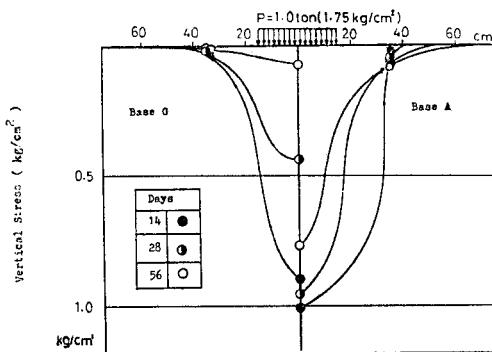


Fig. 10 Effect of Age on Vertical Stress Distribution Beneath the Bases

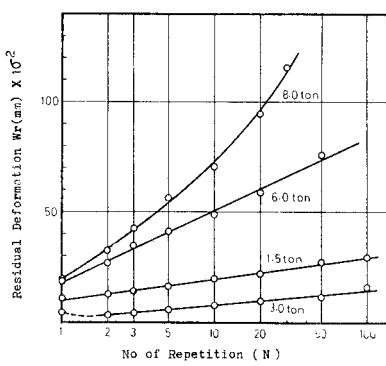


Fig. 11 Effect of N on W_r

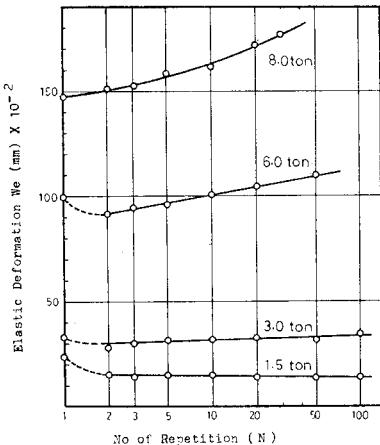


Fig. 12 Effect of N on W_e

最大載荷荷重が 8 t 以上の場合には残留沈下量が片対数グラフ上で放物線状に伸びているようである。また、荷重の大きいときの弾性沈下量は片対数グラフ上で若干右上りの直線となっている。1.5 t, 3.0 t では、残留沈下量はゆるやかな勾配で直線的に伸びており、弾性沈下量はほとんど一定となっている。

4. エージング転炉スラグの路盤材への利用

前述したように転炉スラグは“ふける”性質を有するため、今まで建設材料としての利用は困難であった。

しかしながらエージングすることによって、問題になる“ふけ”の現象をほとんど終了させ、転炉スラグを安定した材料にすることができる。このように転炉スラグをエージングして利用するためには、その効果的な方法および期間を把握する必要がある。現在エージング効果を確かめる確立した方法がないため、ここでは種々の性質の変化を調べて総合的に判断する。

(1) エージング試験

北九州市若松区の洞海湾岸において、長さ 23 m、幅 15 m の突堤を築き、その中に試料をつめた穴あきポリバケツを埋設し、空中および海中エージングを行った。転炉スラグ中の f. CaO, MgO, ドロマイ特は水に接することにより、早期にふけさせることができると考え、水中(海中)エージングを試み、通常の空中エージングと比較した。また、試料の転炉スラグには鋼種別に発生するキルド鋼スラグ 1K, 2K およびリムド鋼スラグ 1R の 3 種類を用いた。

エージング期間は 1 年とし、その期間における各転炉スラグの諸性質の変化を調べた。以下、各試験項目についてその結果を示す。

a) 試験結果および考察

i) 粒 度

おのおのの種類の転炉スラグについてそれぞれ 45~0 mm, 45~25 mm, 25~10 mm および 10~0 mm の粒度のものを準備し、各期間エージングした後ふるい分けして、粗粒率を計算した。その結果を図-13 に示す。

同図から、エージングの初期において粗粒率が小さくなり、細粒化しているものがかなり多くみうけられるが、この原因はふけによって粒子が崩壊するためと考えられる。しかしながら、エージング期間 6 か月以後では安定しているから、崩壊は 6 か月以内に起きるものと考えられる。また、微粒部分を含まない 45~25 mm を除いて他はすべて 1 年後の粒度は空中より海中エージングの方が粗くなっている。すなわち、海中エージングした転炉スラグでは、潮の影響を受けて、微粒部分の流出があり、そのため実際のものと違った粒度分布が得られたと考えられ、今後は静止した水槽での水中エージングにおける粒度変化の把握が必要であると思われる。

ii) 単位容積重量

エージング期間と単位容積重量の関係を後に 図-17 で示すが、エージングにより、単位容積重量は低下する

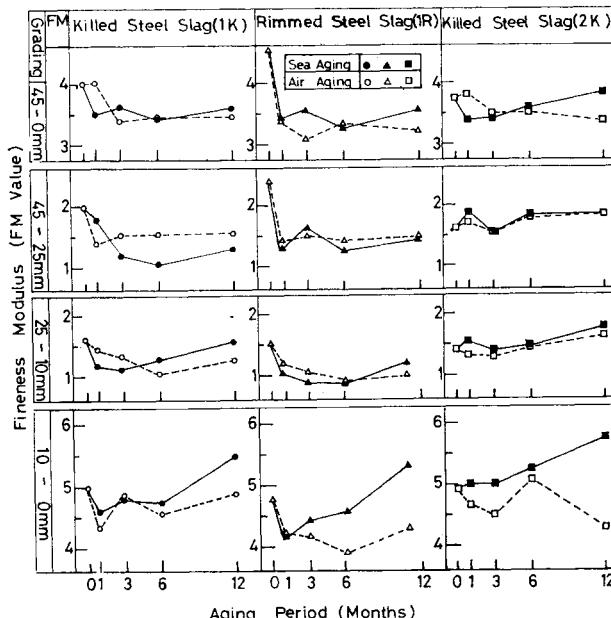


Fig. 13 Effect of Aging on F.M.

傾向がある。この原因は粗粒部分の崩壊により粒度が細粒化し、粒度分布が変化するためと考えられる。なお、海中エージングについては i) で述べたように今後の究明が必要である。

iii) BS 破碎値

BS 破碎値の変化は図-14 に示すとおりである。エージング期間とともに徐々に低下している。なお、BS 破碎値とは骨材の強さを示すものであり、 $1.9 l$ の円筒容器に粒径 $25\sim10 \text{ mm}$ の試料を入れ、プランジャーにより $4 \text{ t}/\text{min}$ の速さで 10 分間加圧し、その後 2.5 mm ふるいを通過した重量を全重量で割って 100 をかけたものである。

iv) 粉化率 (Weight Percentage of Disintegration : f_d)

f. CaO , MgO を含有する転炉スラグのふけの現象を促進させてその度合をみるために、塩基性耐火レンガの風化崩壊の程度を調べるオートクレーブ養生による消化試験を適用してみた。

この試験法は塩基性耐火レンガを水あるいは蒸気の出る場所に長時間保存するとレンガに含まれる f. CaO や MgO が水あるいは蒸気と反応して風化崩壊する性質をどの程度あるかを調べる促進試験法 (JIS R 2211, ASTM C 456-68, ASTM C 151-64) である。

上述の試験法に基づき、i) の粒度試験に用いた粒度別の試料 ($45\sim0 \text{ mm}$ を除く) を 10 気圧、 183°C で 4 時間オートクレーブ養生を行った。なお、養生時間については JIS R 2211, ASTM

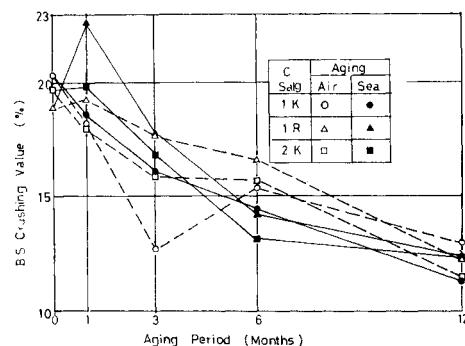


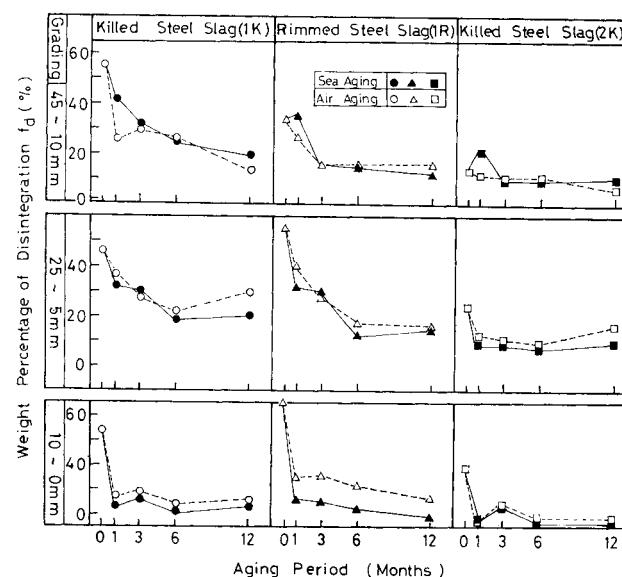
Fig. 14 Effect of Aging on B.S. Crushing Value of S. Slag

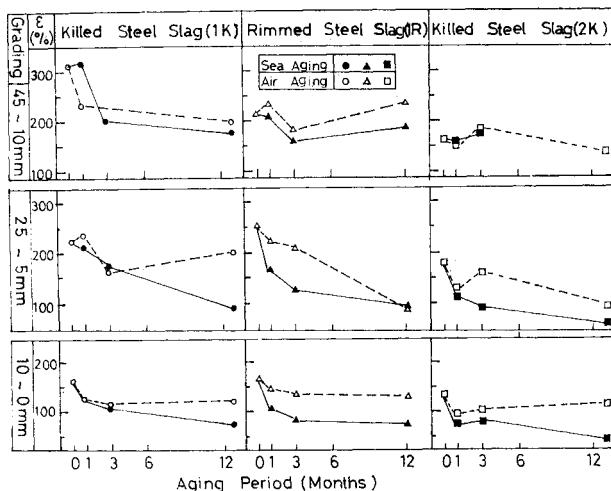
C 151-64 では 3 時間、そして ASTM C 456-68 では 5 時間となっているが、ふけの現象をなお促進させるため JIS R 2211 の養生時間より 1 時間延長して 4 時間とした。

以上のオートクレーブ養生を終った試料に対してふるい分け試験を行い粉化率を求めた。ここに粉化率とは、オートクレーブ養生後粒度 $45\sim25 \text{ mm}$ では 10 mm 以下の重量、 $25\sim10 \text{ mm}$ では 5 mm 以下の重量、そして $10\sim2.5 \text{ mm}$ では 2.5 mm 以下の重料をそれぞれ元の重量で割って 100 をかけたものである。このようにして求めた粉化率とエージング期間との関係を示したもののが図-15 である。

エージング期間 6 か月以後はほぼ安定しており、粉化率の上限値は粒度範囲を問わず一部を除いて約 20% となった。

v) 膨張性指数 (Expansive Index : ϵ)

Fig. 15 Effect of Aging on f_d

Fig. 16 Effect of Aging on Expansive Index (ϵ %)

各期間エージングした転炉スラグを 0.5 mm 以下に粉碎し、220 kg/cm² の圧力で 40 φ × 55 mm の円柱供試体を加圧成型、10 気圧、183°C で 4 時間オートクレーブ養生した。その前後の体積をノギスを用いて求め、膨張性指数 (ϵ) は次式で計算した。

$$\epsilon = \frac{\text{オートクレーブ養生による体積増分}}{\text{成型時の体積}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (3)$$

各エージング期間と ϵ の関係を 図-16 に示す。海中エージングの方が膨張が小さく効果的と考えられる。

vi) pH 値

pH 値は空中エージングの場合にはほとんど変化しないが、海中エージングの場合には最初約 12.5 であったものが 12 か月後には約 10.3 に低下した。

以上の諸結果、すなわち、粒度、BS 破碎値、粉化率、膨張性指数などは、6 か月間エージング後においては、初期におけるものよりも変化が少なく、なかにはほとんど一定しているものもあり、したがって、転炉スラグのふけの発生はきわめて少なくなったと考えてよからう。

(2) エージング転炉スラグを混合した粒調混合パラス

a) エージング転炉スラグ混合路盤材の配合決定

エージング転炉スラグは単なるパラス（ただし、pH 値は高い）と考えてさしつかえないから、ここではこれを粒調パラス（高炉スラグによって製造されたパラス）に混合して利用することを考えてみる。

高炉スラグにエージング転炉スラグを混合した粒調パラス（以後粒調混合パラスと略称する）の配合は、玉置らの実験結果⁴⁾に基づいて高炉スラグと転炉スラグの重量比で 7 : 3 に定めた。

粒調混合パラスに対しても転炉スラグのエージングの影響を把握するため、単位容積重量、pH 値および強度特性を調べた。

b) 粒調混合パラスの単位容積重量、最大乾燥密度および pH 値

粒調スラグ（高炉スラグ）、転炉スラグおよび粒調混合パラスのエージングによる単位容積重量の変化を示したものが図-17 である。また、pH 値は転炉スラグと同じように海中エージングの場合にだけ、最初の約 12.5 から 12 か月後に約 10 まで低下した。粒調混合パラスは高炉スラグに比べると pH 値は高いが、転炉スラグ単独の場合よりも低く両者間に入っている。

c) 修正 CBR

エージング 0 か月～1 年までの粒調混合パラスおよび粒調パラス（高炉パラス）の修正 CBR の変化を 図-18 に示す。エージング初期においては、粒調混合パラスの修正 CBR の方が粒調パラスのそれに比

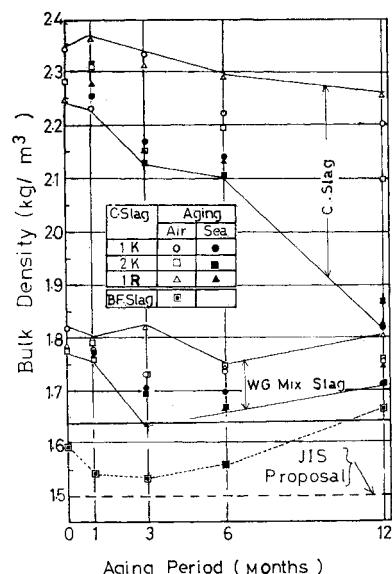


Fig. 17 Effect of Aging on Bulk Density

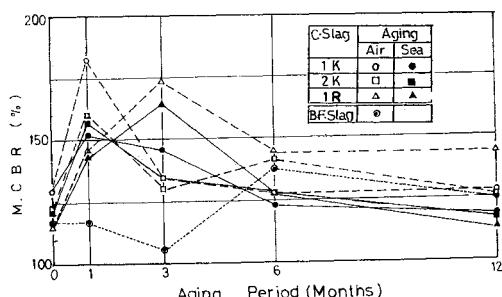


Fig. 18 Effect of Aging on M. CBR

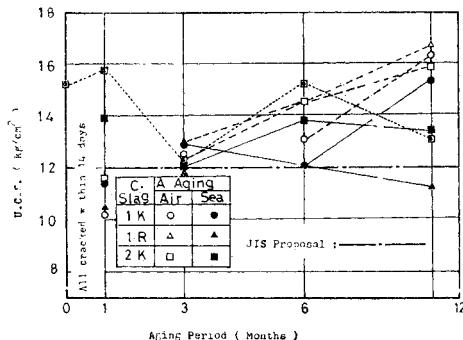


Fig. 19 Effect of Aging on Unconfined Compressive Strength (U.C.S.)

してかなり大きく、エージング期間 6か月以後の転炉スラグを使用した粒調混合パラスでは平均値は、エージング 0か月の粒調パラスと同等かいくらか大きくなっている。よって、粒調パラスと同等に評価してさしつかえないものと考えられる。海水でエージングした転炉スラグを使用した場合も同様な結果が得られている。

d) 一軸圧縮強度

JIS 案として提案されている σ_{14} (材令 14 日における一軸圧縮強度) を求めるため、ある期間エージングした転炉スラグを用いて、粒調混合パラスを製造し、3.(2).a) に述べた方法によって一軸圧縮試験を行った。その結果を図-19 に示す。同図に粒調パラス単独のものも示している。粒調混合パラスにおいては、エージング期間 0か月および 1か月のものは材令 14 日以内にきれつが発生し、3か月以上のものにはきれつは入らなかった。また、エージング期間 0か月のものは圧縮試験を行うことが不可能であった。

エージング期間 3か月以上の転炉スラグを使用した粒調混合パラスの場合は、一部を除いて、 σ_{14} が上昇しており、これは $f\cdot CaO$ が消化して残存している $Ca(OH)_2$ の反応によるものと考えられる。また、海中エージングの場合、 $Ca(OH)_2$ が、潮の干満の影響を受けて洗い流されるため、空中よりも海中エージングの方がやや低い値となっている。

粒調混合パラスの σ_{14} は JIS 案の下限値 $12 \text{ kg}/\text{cm}^2$ をほぼ満たしている。

e) 膨張特性

膨張特性を調べるために、 $\phi 10 \times 12.7 \text{ cm}$ の円柱供試体を室内長期養生したものおよび型枠につめこんだまま周辺拘束した供試体をオートクレーブ養生 (4 気圧, 183°C , 3 時間) したものについて、それぞれの膨張量をノギスで測定した。今回は、オートクレーブ養生試験作業がワンシフト (温度、気圧上昇時間+養生時間+温度、気圧減少時間 = 2+3+2) 内で終えたため、3 時間の養生しかできなかった。養生時間と反応厚さ (粒子の

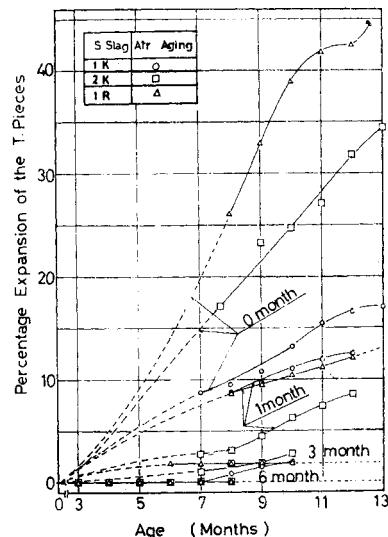


Fig. 20 Effect of Age on E_0

表面から中心方向に反応する長さ)との間には関係があると考えられる。石英の場合、 181°C で 2~6 時間オートクレーブ養生するときにおける反応厚さはそれぞれ $0.7 \sim 1.5 \mu$ であるとされている (5)。これによって求めると 3 時間養生する時の反応厚さは 4 時間養生した時の約 82% 程度であることになる。転炉スラグの場合も同様なものが得られると思われるが、今後、養生時間、気圧などを変化させて、膨張量などに与える影響を究明する必要がある。

i) 円柱供試体の場合

各期間空中エージングの転炉スラグを用いたものに対して得られた体積膨張量と材令との関係を図-20 に示す。同図から 0か月、1か月エージングでは膨張量はかなり大きいが、3か月エージングすればきわめて小さくなり、6か月以上エージングすればほとんど膨張しなくなることがわかる。

ii) 周辺拘束供試体の場合

試験は粉化率がほとんど安定したエージング期間 6か月および 12か月の転炉スラグを使用した粒調混合パラスを用いて行った。その結果を表-10 に示す。

6か月エージング転炉スラグ (1R) 使用のものをオートクレーブ養生によって強制的に膨張させても 2.4%

Table 10 Expansion Due to Autoclave Curing of WG Mix Slag Test Pieces Confined Inside One Way Open Mould (vol %)

Aging Months	Types of S. Slag	1K		2K		1R		S. Slag Embankment		Average	
		Aging		Aging		Aging		Aging			
		Air	Sea	Air	Sea	Air	Sea	Air	Sea	Air	Sea
6		3.0	2.0	2.2	1.9	2.4	1.9	1.8	1.3	2.35	1.78
12		0.4	0.9	2.3	1.4	0.9	1.2	0.6	0.08	1.04	0.90

の膨張率しか示さなかった。また、図-20よりわかるように6か月エージングの場合、円柱供試体では材令8か月でも膨張率が0%であり、それらの結果を考え合せると、6か月以上エージングすれば舗装体にはほとんど悪影響は生じないものと考えられる。

f) 現場試験舗装

試験舗装はN社構内において昭和47年より行ってきた。なお、転炉スラグを使用した路盤の性状ならびに路盤材としての適正を把握するために追跡試験を約3年間行った。用いた路盤材は、粒調混合バラスのほかに転炉スラグをローカル材（シラス、生ボタなど）と混合したもので表-11に示す12種類である。また、その粒度および工学的性質を表-12に示す。

路盤の断面および平面を図-21に示す。各種路盤の

Table 11 Mix Proportion of the Bases Used in the Test Pavement

Bases	C. Slag	KTR	G. Slag	B.F. Slag	Lime	C.F. Dust	Sirasu	Bota
Group I	No. 1	70	—	—	—	—	30	—
	No. 2	70#	—	25	—	—	5	—
	No. 3	80	—	—	—	—	20	—
	No. 4	70	—	25	—	—	5	—
	No. 5	70	—	—	—	—	—	30
Group II	No. 6	—	—	—	100	—	—	—
	No. 7	30#	—	—	70	—	—	—
	No. 8	30	—	—	70	—	—	—
	No. 9	—	30	—	70	—	—	—
Group III	No. 10	—	20	20	50	10	—	—
	No. 11	—	30	20	40	10	—	—
	No. 12	—	—	20	70	60	4	—

Note : # represent the C. Slag treated with special water (Neutralized slurry water H_2SO_4)

Table 12 Engineering Properties

	Percentage Passings				O.M.C.	$r_{d\max}$	M. CBR	
	25mm	13 mm	2.5 mm	0.074	%	g/cm ³	%	
Group I	No. 1	100	94.5	55.8	6.3	13.5	2.075	71
	No. 2	100	92.7	35.9	2.5	19.0	1.880	117
	No. 3	100	98.6	49.5	6.2	14.0	2.150	130
	No. 4	100	92.7	35.9	2.3	19.0	1.880	117
	No. 5	100	91.9	38.6	4.0	11.0	2.201	124
Group II	No. 6	100	69.0	38.9	3.2	10.9	2.040	104
	No. 7	100	75.3	36.0	2.7	11.0	2.200	104
	No. 8	100	74.6	34.6	2.8	10.5	2.224	112
	No. 9	100	92.7	35.9	2.3	9.9	2.172	101
Group III	No. 10	—	—	—	—	11.0	1.974	150
	No. 11	—	—	—	—	10.8	1.986	92
	No. 12	100	80.0	45.4	6.0	12.3	1.961	237

Table 13 Summary of In-Place Dry Density of Different Bases Used at Test Course

Bases	Group I					Group II					Group III				
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12			
In-place D. D. (g/cm ³)	2.079	1.881	2.379	2.070	1.980	2.142	2.100	2.270	2.364	2.131	2.100	1.943			
In-place D.D./Maximum D.D. $\times 100$	100	100	111	110	90	105	95.5	103	109	108	106	99			

(注意:D.D.=Dry Density)

幅員は8m、延長15mである。

現場試験としては、現場密度試験、平板載荷試験および舗装表面の凹凸量試験などを行った。

i) 現場密度試験

現場密度試験結果を表-13に示す。Group IのNo. 5を除いて、各タイプともJIS A 1210の締固め試験によって求めた最大乾燥密度の95%以上となっている。

ii) 平板載荷試験

各種路盤の k_{30} 値の経日変化を図-22~24に示す。

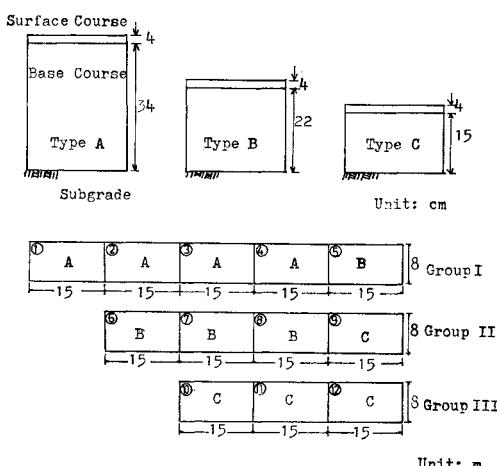


Fig. 21 Cross Section and Plane View of Test Road

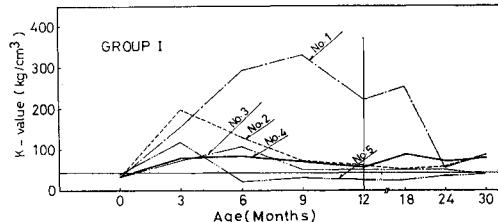


Fig. 22 Effect of Age on k -Value

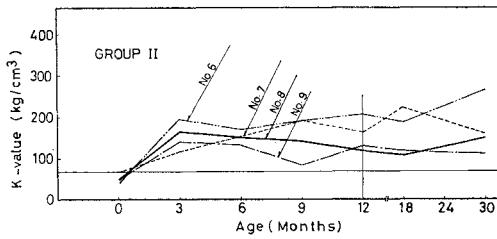
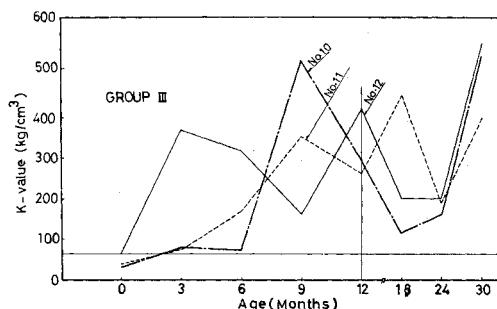


Fig. 23 Effect of Age on k -Value

Fig. 24 Effect of Age on k -Value

シラス 30% を用いた路盤 (No. 1) の場合は、9か月までは著しい伸びを示したが、その後低下していき 24か月では施工直後の値とほとんど等しくなった。

粒調バラス路盤 (No. 6) の k_{30} 値は材令とともに伸びていく傾向を示した。粒調混合バラス (No. 7, 8) も粒調バラス路盤より伸びはやや小さいが類似した傾向を示している。また、転炉粒滓（転炉スラグを特殊な方法で径 5 mm 以下程度の球状に急冷して作ったもの）を混合した場合の k_{30} 値の伸びはもっとも小さい。

粒調バラスに水碎スラグ 20%, 転炉粒滓 20~30%, カバイトダム 6~10% 混合したもの (No. 10, 11) は k_{30} 値の変動が大きい。また、転炉粒滓が入っていないもの (水碎スラグ、石灰などで処理した高炉スラグ路盤: SL 路盤 No. 12) も同様である。各種路盤の変形係数の経日変化を表-14 に示す。

iii) 鋪装表面の凹凸量試験

材令 1 年における各種路盤の凹凸量の測定結果を図-25~27 に示す。ここでは、路盤の中心位置の断面方向の凹凸のみを示している。これらの図からグループ I の路盤は他のグループに比べかなり大きな凹凸を示していることがわかる。

シラス、ボタなどを用いた路盤においては、舗装表面に大きなきれつならびにしわが入り、ところどころ路盤が露出している。それらの状況を写真-2~3 に示す。

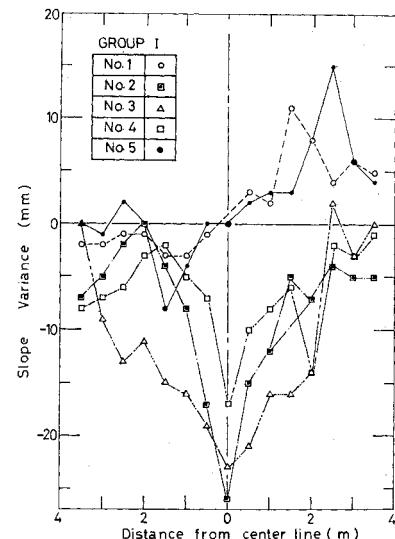


Fig. 25 Comparison of Slope Variance

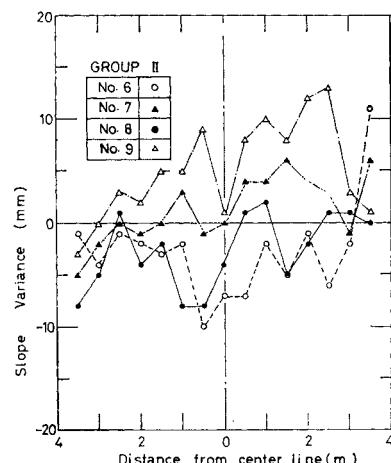


Fig. 26 Comparison of Slope Variance

粒調混合バラスおよびその他の路盤の場合は表面にはほとんどきれつは発生していないかった。

Table 14 Comparison of Modulus of Deformation $E_{k_{30}}$ (kg/cm²)

	Months Bases	0	3	6	9	12	18	24	30
Group I	No. 1	501	14 028	75 150	104 208	37 074	64 128	1 700	4 509
	No. 2	681	38 940	14 018	4 280	2 647	1 791	2 647	6 230
	No. 3	589	3 081	8 156	1 630	1 630	1 630	1 630	952
	No. 4	518	3 770	4 240	2 919	1 930	4 944	4 240	3 770
	No. 5	3 213	42 347	876	2 044	876	876	2 044	2 628
Group II	No. 6	1 699	63 720	45 135	58 410	7 430	54 693	95 580	127 440
	No. 7	2 300	8 814	19 927	33 720	21 459	49 050	33 720	21 459
	No. 8	510	43 839	34 664	31 600	20 390	15 293	24 468	34 664
	No. 9	10 762	203 904	181 248	46 728	164 256	130 270	113 280	107 616
Group III	No. 10	690	11 682	10 089	2 973 600	552 240	39 294	99 270	2 336 400
	No. 11	722	5 777	63 550	476 520	216 648	938 600	81 604	714 940
	No. 12	7 073	995 448	670 618	99 545	1 456 498	178 133	178 133	1 597 956

iv) 現場コア試験

現場コア採取状況およびその一軸圧縮強度を表-15 に示す。SL 路盤、粒調バラス路盤、粒調混合バラス路盤の順にコア採取が早く可能になり、強度もその順になっている。

5. FEM による路盤の応力解析

模型路盤および試験舗装に用いた路盤について、応力、変位

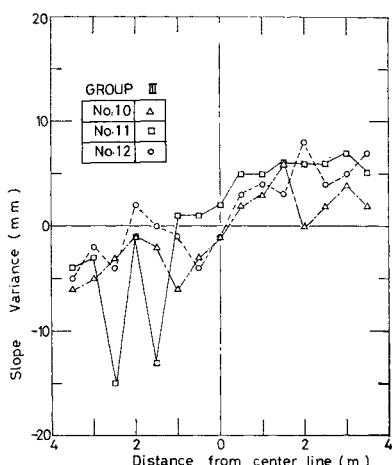
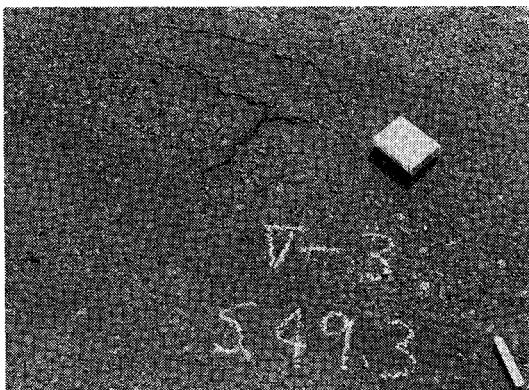


Fig. 27 Comparison of Slope Variance



Group I Age : 15 Months

Photo. 2 Condition of the Pavement With Base No. 4
(Converter Slag : G. Slag : Sirasu=7 : 2.5 : 0.5)



Group I Age : 15 Months

Photo. 3 Condition of the Pavement with Base No. 5
(Converter Slag : Bota=7 : 3)

などに関する検討を行うため、路盤を3層弾性体として解析した。本解析に用いた全節点数287、要素数510、横縦拘束節点数はそれぞれ38および9で、載荷節点数7である。

弹性係数として表-8のG配合(模型路盤)、表-12の配合No.6, No.7, No.10およびNo.11(試験舗

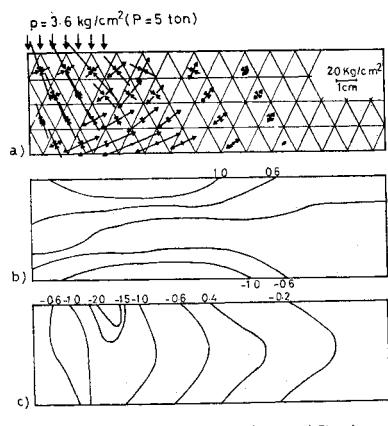
Table 15 Survey of the Core Extraction and Its Strength

Months Bases	3	6	9	12	18	24	30
Group I	No. 1	NP	(4 cm)	(2 cm)	(6 cm)	(5 cm)	NP
	No. 2	NP	(5 cm)	(4 cm)	NP	NP	NP
	No. 3	NP	(5 cm)	NP	NP	(3 cm)	NP
	No. 4	NP	NP	NP	NP	NP	NP
	No. 5	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Group II	No. 6	NP	(5 cm)	NP	NP	39(kg/cm ²)	58(kg/cm ²)
	No. 7	NP	NP	NP	NP	30(kg/cm ²)	(3 cm)
	No. 8	NP	NP	NP	NP	(4 cm)	(4 cm)
	No. 9	NP	NP	NP	NP	NP	NP
Group III	No. 10	NP	NP	60(kg/cm ²)	(8 cm)	39(kg/cm ²)	71(kg/cm ²)
	No. 11	NP	NP	36(kg/cm ²)	(4 cm)	80(kg/cm ²)	66(kg/cm ²)
	No. 12	NP	33(kg/cm ²)	47(kg/cm ²)	56(kg/cm ²)	68(kg/cm ²)	103(kg/cm ²)

a) Unconfined Compressive Strength of the Core (Core Size : 10×20 cm)

b) Length of the Core extracted

NP : Not possible of Core extraction



a):Principal Stress, b):Radial Stress, c):Shearing Stress

Fig. 28 Stress Distribution (Test Road)

装)のものを使用した。また、ポアソン比はいずれの場合も0.4とした。一般に、路盤上の載荷試験は表層を行なうため、輪荷重(5t)は表層から45°で分散して路盤上を伝達される(3.6 kg/cm^2)と仮定した。

(1) 計算結果および考察

本解析によって求めた路盤内の主応力、円周方向応力およびせん断応力の分布を図-28に示す。

主応力分布図より、最大引張り応力の生じる部分は上層路盤下面中心より、載荷板の半径に相当する距離である。

きれつに対して安全か否かは路盤に生じるせん断応力

Table 16 Comparison of FEM and Test Results

Model P/T Test	H (cm)	Types of Bases	$E_{k_{30}}$ (kg/cm ²)	Deflection $\times 10^{-2}$ (mm)		Maximum Tensile Stress (kg/cm ²)	Maximum Shearing Stress (kg/cm ²)	U.C.S. (kg/cm ²)	Flexural Strength (kg/cm ²)	Safety Factor
				Measured	FEM					
Test Pavement	16	G	3 500	73.4	39.0	1.00	-0.42	17.2	0.74	3.1
	16	G	26 500	33.1	6.5	1.30	-0.41	28.1	4.08	
	16	G	130 000	22.1	1.4	1.39	-0.42	46.0	8.43	
Test Pavement	22	No. 6	95 580	16.0	6.8	3.42	-1.92	58.0	9.67	2.81
	22	No. 6	127 440	12.0	5.6	3.47	-1.92	60.0	10.00	2.9
	22	No. 7	33 720	20.0	16.0	2.91	-1.96	30.0	5.00	1.7
	15	No. 10	99 270	19.0	8.0	5.44	-4.68	71.0	10.83	2.2
	15	No. 11	81 604	18.0	9.4	5.24	-4.69	66.0	11.00	2.1
	15	No. 11	714 940	9.2	1.2	5.71	-2.37	90.0	15.00	2.6

よりも下面に生じる引張り応力が問題になるようである。

計算に用いた弾性係数、実測沈下量、計算結果より求めた最大たわみ量、最大引張り応力、最大せん断応力、一軸圧縮強度、曲げ強度、引張り応力に対する安全率(曲げ強度／最大引張り応力)などを表-16に示す。ただし、実際の路盤の一軸圧縮強度は現場コアにより求め、また、曲げ強度は模型路盤の場合の結果に合わせて一軸圧縮強度の1/6とした。この表から明らかなように引張り応力によるきれつ発生に対する安全率(f_s)は上層路盤の弾性係数が増すにつれて大きくなることがわかる。

沈下量については、表-16から明らかなように、実測値が計算値に近いものもあったが一般に実測値が計算値よりかなり大きな値を示している。しかし、通常のアスファルト舗装の許容沈下量を2.5 mm⁶⁾と考えると、実測値、計算値ともにこの値よりはるかに小さい。

舗装の耐久性に対しては単に沈下量だけでなく舗装下縁(路盤下面)に生じる最大引張り応力の大きさが大きく影響を与えるものと考えられる。よって、曲げ引張り強度の大きいスラグ路盤は耐久性にすぐれていると考えてよからう。

6. まとめ

以上フレッシュ転炉スラグおよびエージング転炉スラグの路盤材への利用に関する基礎的な研究結果を述べてきた。要約すれば次のとおりである。

(1) フレッシュ転炉スラグを併用した転炉・水碎混合路盤材の配合は、きれつ、膨張試験結果から転炉スラグ:水碎スラグ:高炉スラグまたは砕石=3:3:4が最適と考えられ、転炉スラグの遊離石灰分が水碎スラグをアルカリ刺激する結果、圧縮および曲げ強度は材令とともに増加し、本実験で用いた養生方法で、14日で圧縮強度は約15~20 kg/cm²に達する。また、その後も強度は増加し、3か月で約40 kg/cm²に達する。

Table 17 Properties of Converter Slag and WG Mix Slag (Aging for 6 months)

Converter Slag		1K		2K		1R	
		Aging		Aging		Aging	
		Air	Sea	Air	Sea	Air	Sea
wt% of Disintegration (%)		25~22	26~22	19~11	16~9	30~15	22~14
Expansive Index (%)	245 115	190 95	170 105	160 70	210 130	195 75	
T. Fe (%)	20.40	16.10	24.03	24.57	17.80	20.17	
T. CaO (%)	44.63	46.34	41.98	40.02	44.04	45.64	
f. CaO (%)	0.33 0.16	1.40 0.60	0.17 0.17	1.50 0.69	0.51 0.23	3.30 1.67	
Bulk Density (kg/l)	2.221	2.138	2.143	2.104	2.291	2.128	
BS Crushing Value (%)	16.40	14.40	15.60	13.10	16.60	14.28	
pH-Value	12.50	11.80	12.70	13.90	12.60	11.98	
Modified CBR (%)	138	138					
U.C.S. (kg/cm ²)	15.20	15.20					
BS Crushing Value (%)	35.70	35.70					
pH-Value	9.20	9.22					
Bulk Density (kg/l)	1.558	1.558					
Expansion Autoclave (%)	3.00	2.00	2.20	1.90	2.40	1.90	

Well Graded Mix Slag (WG Mix Slag)	No difference were found in mixing with 1K, 2K and 1R			
	U.C.S. (kg/cm ²)	BS Crushing Value (%)	pH-Value	Bulk Density (kg/l)
U.C.S. (kg/cm ²)	15.20	35.70	9.20	1.558
BS Crushing Value (%)	15.20	35.70	9.22	1.558

Note : U.C.S. represents the unconfined compressive strength

(2) 模型路盤でも k_{30} 値およびCBR値は材令とともに増加し、特に1か月~3か月の間に著しい増加を示している。なお、模型路盤上きれつ、凹凸などはなんら認められなかった。

(3) エージングによる諸性質は、エージング期間6か月以上では安定するようである。表-17にエージング期間6か月における試験結果をまとめて示す。同表には6か月エージングした転炉スラグを用いた粒調混合バラスの結果もあわせて示す。このように転炉スラグを6か月エージングして用いれば、安定した路盤材として十分使用できるものと考えられる。

(4) 粒調混合バラス（高炉スラグ：転炉スラグ = 7 : 3）の修正 CBR は、粒調バラス（高炉スラグ）とほぼ同じ値を示し、また、材令 14 日における一軸圧縮強度は JIS 案の下限値 12 kg/cm^2 をほぼ満たしていた。また、試験舗装においては、舗装表面にきれつ、凹凸がほとんどみられず、転炉スラグをシラス、ボタなどと混合した路盤に比べて著しくすぐれていた。

重交通の増えつつある今日の舗装には、SL 路盤材⁷⁾、粒調スラグバラスなどを用いた半剛性的な路盤はもっとも適していると考えられる。このような路盤は載荷荷重によるたわみ量を小さくするとともに下層路盤および路床へ荷重を広く分散させるなどの利点をもっている。

以上述べてきた結果から、フレッシュ転炉スラグおよびエージング転炉スラグを用いた混合材も、現在、市販されている粒調バラスと同じように路盤材として使用してよかろう。

謝 辞：本研究に対してご協力をいただいた新日本製鉄の芳賀信豪、山本孝雄の両氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Parker and Ryder : Investigation on "Folling" of Blast Furnace Slag, Jour. of Iron and Steel Institute, Vol. 146, No. 1, 1942.
- 2) Nascimento et al. : A Method of Designing for Road and Airports, Proc. 5th. Int. Conf. SMFE.
- 3) 植下：平板載荷試験による舗装各層の変形係数の求め方、舗装、Vol. 6, No. 1, 1971.
- 4) 玉置、ほか：転炉スラグの有効利用に関する研究（第1報）新日本製鉄報告書。
- 5) 永井彰一郎：新工業材料の科学、金原出版（株）。昭和 42 年。
- 6) 井月・井彬、ほか：特殊石灰処理土による舗装構造その特性、土と基礎、195 号、Vol. 122, No. 5, 1974.5.
- 7) 内田・カルマチャリヤほか：高炉スラグを使用した路盤材について、土と基礎、Vol. 210, No. 883, 1975.8.

（1977.9.16・受付）