

# 溶銑・造塊スラグの路盤材への利用に関する研究

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

高山俊一\*・杉 正法\*\*・橋本 透\*\*\*・徳原英利\*\*\*\*

by Shunichi TAKAYAMA, Masanori SUGI, Tohru HASHIMOTO and Hidetoshi TOKUHARA

## 1. まえがき

製鉄所から副産物として生産されるスラグは、水硬性を有し、しかも堅固であるためリサイクル資源として利用されることが望ましいものと考えられる。したがって、高炉スラグは以前から使用され、最近では水砕化率が進みほぼ100%が利用されている。一方、製鋼スラグ(本論文では、電気炉スラグを除く)は高炉スラグと同様に水硬性を有しているが、遊離石灰による膨張のため利用が遅れていた。しかしながら、製鋼スラグ中の転炉スラグは約100℃の蒸気でエージング処理をすることで膨張問題が解決<sup>1)2)</sup>、約10年前から上層路盤材として使用されている。しかしながら、製鋼スラグの中の溶銑予備処理スラグや造塊スラグの利用が未だ遅れている。そこで著者らは、3~4年前から、両スラグの利用を図るべき実験を行ってきた<sup>3)</sup>。

脱Sおよび脱P工程で発生するスラグの混合したもので、特に脱P、脱Sスラグは、室内に放置していると遊離石灰に起因する自然崩壊で粉状となるスラグである。したがって、各スラグの混合比率により、品質のばらつきが大きいスラグである。

(2) 造塊スラグは、転炉出鋼後、溶鋼に脱S、脱Pおよび脱ガス工程で発生するスラグで、蒸気処理後の遊離石灰反応物が、転炉スラグより多く見られるスラグである。

各製鉄所で若干異なるが、製鋼スラグ中での溶銑スラグおよび造塊スラグの産出量は30~40%であり、残りの60~70%が転炉スラグと考えられる。溶銑および造塊両スラグの安定性を調べるために蒸気エージングを行なった。蒸気エージング時間は6、24および48時間とした。水浸膨張試験はJIS A 5015

## 2. スラグの種類および実験方法

図1にスラグの生成工程と種類を示す。溶銑予備処理スラグ(以下、溶銑スラグと略す)と造塊スラグの生成工程と特徴を示す。

(1) 溶銑スラグは、溶銑を転炉装入前の脱Si、

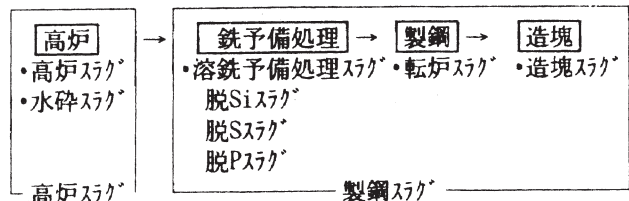


表1 各スラグの化学成分(%)

図1 スラグの生成工程と種類

材料\成分	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	FeO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	f-CaO
転炉スラグ	51.0	15.5	3.8	2.0	6.7	0.57	14.8	1.71	0.411	2.91
造塊スラグ	48.5	14.0	7.5	12.3	6.1	0.37	8.8	0.64	0.461	2.46
溶銑スラグ	31.5	15.0	2.1	3.7	12.6	0.89	28.2	1.76	0.284	2.24

表2 スラグの物理的性質

	比重		吸水率(%)		単位容積質量(kg/l)
	粗骨材	細骨材	粗骨材	細骨材	
転炉スラグ	3.40	2.92	1.53	6.21	2.17
溶銑予備処理スラグ	3.68	2.87	4.65	7.61	1.97
造塊スラグ	3.01	2.74	3.03	6.41	2.02

\* 九州共立大学教授 工学部土木工学科(〒807-8585 北九州市八幡西区自由が丘1-8) \*\* 住金リコテック(株)マテリアル事業部 生産二部開発試験課長 \*\*\* 住友金属工業(株)小倉製鉄所 総務部安全環境室参事補 \*\*\*\* 太平工業(株) 八幡支店生産部長

(道路用製鋼スラグ)に順じ、80℃で一日6時間の保持で10日および20日まで行なった。また、エージング時間の短縮を図るため加圧蒸気処理槽による加圧蒸気エージングについても行なった。加圧蒸気処理槽は、直径30cm、深さ40cmの鋼製容器で容積約20リットルで、10kgf/cm<sup>2</sup>の圧力が可能である。実験は3および6気圧についてエージングを行なった。

エージング後の試料について水浸膨張比、修正CBRおよび一軸圧縮強度を調べた。さらに、実路試験を行い、路面性状を調べた。

### 3. 溶銑・造塊スラグの物理的性質および分析結果

スラグの化学分析結果を表1に示す。各スラグの遊離石灰量がほぼ同程度のものを試料とした。同表によると、転炉および溶銑の両スラグのFeO成分量が造塊スラグに対して著しく大きい。また、造塊スラグのAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>成分の量は12.3%と他のスラグに比べて大きくなっている。エージング処理後のスラグの物理的性質を表2に示す。5mmふるいによって通過するスラグを細骨材、留まるスラグを粗骨材とした。比重は粗骨材が粒度の細かい細骨材に比べ、大きく

なっている。また、粗骨材の吸水率も細骨材のそれに比べかなり小さくなっている。鉄分などが多く、硬いスラグほど破碎されずに大きな粒度となるものと考えられる。表3に各スラグの混合配合を示す。配合6および11は、溶銑・造塊スラグと転炉スラグの他に、水硬性に優れた高炉スラグおよび水砕スラグを混合し、大きな強度を得るようにしたものである。

### 4. 溶銑・造塊スラグの安定性および路盤としての強度

図2は溶銑および造塊両スラグの水浸膨張比を示す。比較のために転炉スラグの膨張比の測定結果も示す。JIS規格は10日後の水浸膨張比が1.5%以下である。同図によると、エージング処理を実施していないスラグの膨張比は、経過日数5日以降に1%以上となり、膨張量が大きくなることが認められる。しかしながら、蒸気エージングを48時間および加圧(6kgf/cm<sup>2</sup>)エージングを8時間実施した場合、全てのスラグの膨張比は経過日数が20日でも1%以下であった。特に、造塊スラグはエージング処理を行なわなかった場合、膨張比が4~4.5%に達してい

表3 混合配合

項目/NO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
配	転炉スラグ	100	90	70	50		52.5	90	70	50		52.5
	溶銑スラグ							10	30	50	100	22.5
合	造塊スラグ		10	30	50	100	22.5					
	高炉スラグ						20					20
	水砕スラグ						5					5

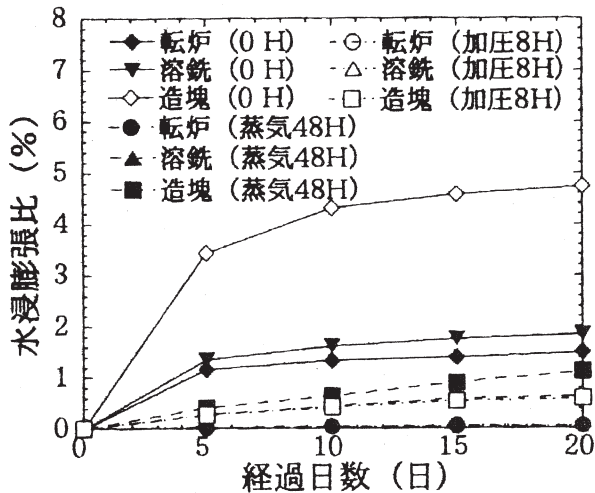


図2 水浸膨張比と経過日数

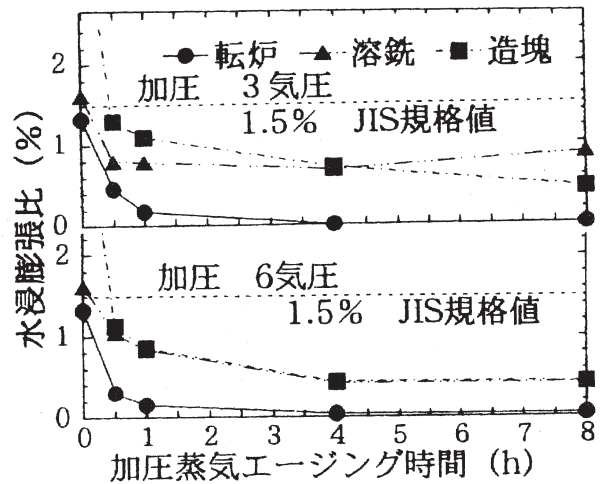


図3 水浸膨張比と加圧蒸気エージング時間の関係

るが、蒸気エージングを行なうことによって0.5～1.0%となり、わずかに1/4以下に減少している。図3は加圧エージングを行なった場合の水浸膨張比の結果を示す。同図によると、溶銑および造塊両スラグの3気圧のエージングによる膨張比は、4時間のエージングで約0.8%であるが、同一条件で6気圧の場合、膨張比が約0.5%に減少している。したがって、加圧エージングは加圧力が大きいほど、エージング効果が著しいものと考えられる。また、加圧エージング1時間で溶銑造塊両スラグの膨張比が1%以下になり、エージング時間を著しく短縮できることが分かった。しかしながら、大量のスラグを加圧エージングすることは、気圧を保持できる精巧な設備が要求されるが、この優れた利点を活かすため、実際に、和歌山製鉄所では5気圧で加圧エージングが行われている。各スラグと転炉スラグの混合配合の水浸膨張量を測定した。混合配合の水浸膨張比(20日後)を

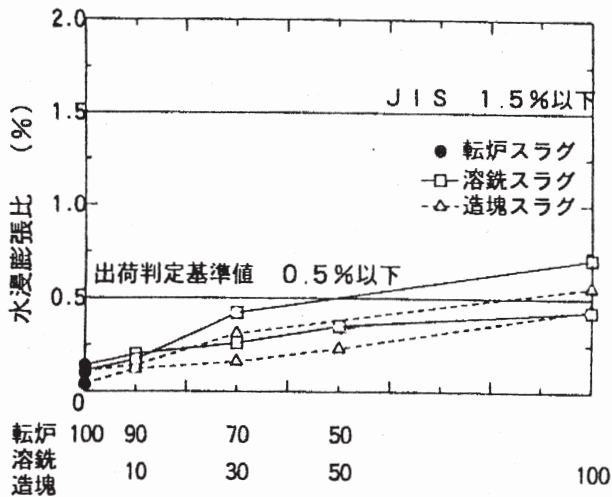


図4 各スラグと転炉スラグの混合配合と水浸膨張比

図4に示す。同図によると、溶銑および造塊の両スラグ単味での膨張比が約0.5%に達しているが、転炉スラグとの混合配合でのそれは0.5%以下となり、より安定した材料となることが認められ、最適な混合量は造塊および溶銑スラグが50%以下であることが望ましいものと考えられる。

スラグの混合比別の圧縮強度と材齢の関係を図5に示す。同図によると転炉スラグを中心とし、造塊および溶銑の両スラグ、高炉スラグを混合した場合(配合6と11)の圧縮強度がJISの規格値(材齢14日)の12kgf/cm<sup>2</sup>を上回っている。したがって、単味スラグのみでJISの規格値を満足しない場合でも他のスラグと混合することによって、互いの長所を發揮し、より良い材料となることが確認されたものとする。図6は修正CBRと混合配合の関係を示す。同図によると、造塊スラグは転炉スラグを50～70%混合することにより、修正CBRが向上していることが認

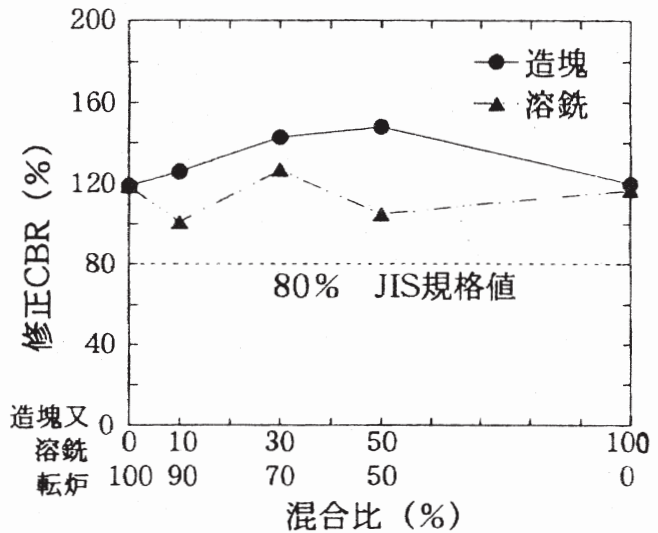


図6 修正CBRと混合比

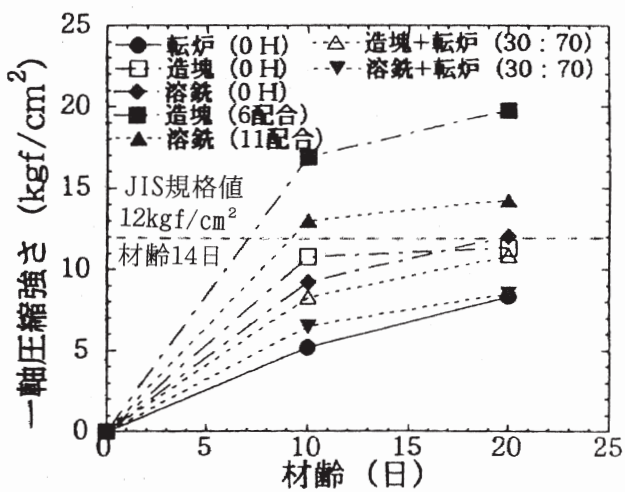


図5 一軸圧縮強度と材齢

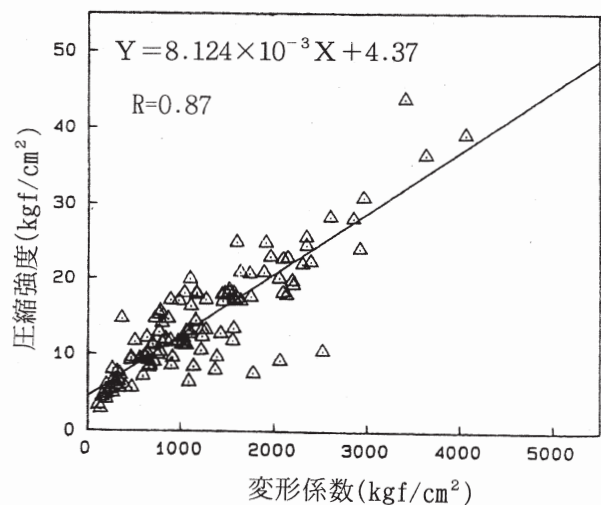


図7 圧縮強度と変形係数

められた。スラグ路盤材の修正CBRのJIS規格値は80%であるため、混合スラグでのそれは約60%も大きくなっていることが分かる。他方、溶銑スラグの場合、修正CBRにばらつきが大きく、明白な傾向は認められなかったが、全ての配合でJIS規格値を十分に上回っていた。圧縮強度と変形係数の関係を図7に示す。同図によると圧縮強度が10kgf/cm<sup>2</sup>の場合、変形係数が約690kgf/cm<sup>2</sup>、強度が20kgf/cm<sup>2</sup>の場合に変形係数約1920kgf/cm<sup>2</sup>を示し、回帰直線の相関係数は0.87であり、圧縮強度と変形係数は強い比例関係があるものと考えられる。

溶銑・造塊両スラグと転炉スラグの混合比は、生産量、安定性および強度から判断し、溶銑および造塊両スラグは30~50%の量が適当であるものと考えられる。

5. 実路への適用試験

造塊および溶銑スラグに蒸気エージングを72時間実施したスラグの室内実験結果より、実用化されている低膨張量の転炉スラグと複合化することで、膨張量を低減できるだけでなく、路盤材品質も向上することが判明し、路盤材へ適用可能なことが確認された。今回、モデル路盤を施工し、18ヶ月を経過した膨張測定結果、さらに転炉スラグに造塊スラグ、溶銑スラグを混合配合した材料を九州共立大学学内

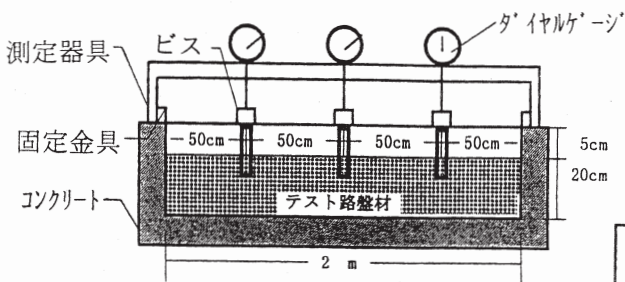


図8 モデル路盤の断面と膨張量の測定方法

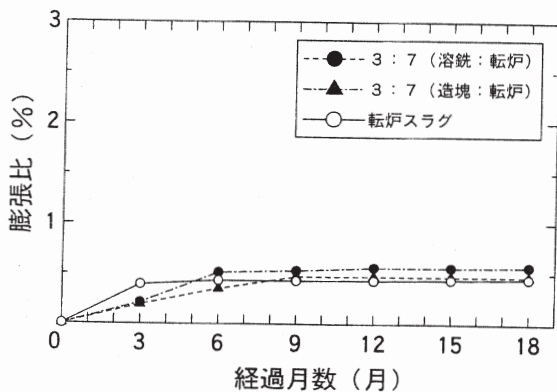


図9 膨張比と経過月数の関係

の道路に試験舗装し、施工性、供用性および膨張特性などについて2年間の追跡調査をスタートした。現在、1.5年までの結果が判明したが、良好な状態で推移している。以下、その概要について報告する。

5. 1 モデル路盤概要

モデル路盤の構造は、1工区 1.5m×2mの広さで路盤の厚みを20cm、アスファルトの舗装厚5cm、水の通り易い粗粒を使用し、膨張の出やすい雰囲気とした。各テスト材料の配合は、転炉スラグに造塊、溶銑スラグを各10%、30%および100%とし、計6種類とした。

図8にモデル路盤の断面と膨張量測定方法を示す。舗装面にビスを1工区につき6点固定し、ダイヤルゲージ3個を取り付けた器具にて測定し、両サイドには固定金具を設置し、測定誤差を小さくする工夫をした。膨張量の測定値は、各工区6点の平均値である。

5. 2 モデル路盤の実験結果

図9に各配合の膨張比と経過月数の関係を示す。現在、実用化されている転炉スラグの膨張比は3ヶ月以降ほぼ一定の膨張比に対し、転炉スラグに造塊スラグ、溶銑スラグ30%配合した試料は、約6ヶ月で安定している。18ヶ月経過では、造塊スラグ混合した配合で0.47%、溶銑スラグ混合した配合で0.57%であり、ともに転炉スラグの0.45%とほぼ同等の膨張比であった。以上の結果より転炉スラグに造塊スラグ、溶銑スラグを30%配合した試料の膨張比は、実用化されている転炉スラグの膨張比と同等であることが確認された。

表4 実験材料の配合と室内試験結果

項目	工区	実験材料			比較材料	
		A工区	B工区	C工区	M工区	H工区
配合比 %	造塊スラグ		30	30		
	溶銑スラグ	30				
	転炉スラグ	70	70			75
	再生コンクリート			70		
	高炉スラグ					20
	水砕スラグ					5
						100
最大乾燥密度 g/cm <sup>3</sup>		2.572	2.612	2.122	2.110	2.511
最適含水比 %		7.8	6.1	9.5	6.4	6.9
修正CBR %		111	140	120	98	141
一軸圧縮強さ kgf/cm <sup>2</sup>	14日	10.2	12.1	11.9	-	16.9
	28日	13.2	15.6	15.9	-	22.3
水浸膨張比 %		0.32	0.11	0.12	-	0.06
現場密度 %		96.4	98.5	96.1	98.8	98.7

### 5. 3 実路試験概要

#### (1) 実験材料の配合と室内試験結果

表4に実験材料の配合と室内試験結果を示す。転炉スラグに造塊スラグ、溶銑スラグを各30%配合した2種類の他に、リサイクル材料である再生コンクリート70%と造塊スラグ30%を配合した3種類とした。比較材には、既知の路盤材である、上層用の粒度調整砕石(M-25)および、水硬性粒度調整鉄鋼スラグ路盤材(HMS-25)を使用した。このHMS-25は、高炉スラグ、水砕スラグおよび転炉スラグを3種配合した複合材料である。

室内試験結果より、修正CBRは、上層規格の80%以上を全ての材料で満足している。水浸膨張比は、規格の1.5%に対して0.11~0.32%と低い値であった。また、施工時の締固め度は、96.1~98.8%と良好な施工であった。

#### (2) 実路試験の構造

図10に実路の舗装断面を示す。実路の構造は、1工区30m×5.5mの広さで、路盤の厚みは15cm、アスファルトは5cmの舗装厚である。今回の実路テストは、膨張量の検証のため、交通量の少ない場所を設定し実施した。

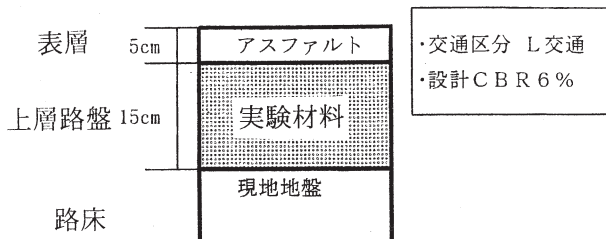


図10 舗装の断面

### 5. 4 実路試験の実験結果<sup>4)</sup>

#### (1) 平板載荷試験

平板載荷試験による $K_{30}$ 値は、路床では30~40

kgf/cm<sup>3</sup>と良好な値である。上層路盤は、粒度調整砕石であるM工区が20kgf/cm<sup>3</sup>、HMS-25ならびに実験材料のスラグ使用工区は、30~40kgf/cm<sup>3</sup>と良好な値を示し、スラグ路盤材は、粒度調整砕石よりも優れた値を示している。

#### (2) たわみ量

たわみ量の推移を図11に示す。路床のたわみ量は0.55~1.13mmであったが、上層、表層を施工することで路盤効果があらわれ、たわみ量が減少している。6ヶ月~1年経過後では、粒度調整砕石のM工区のたわみ量は、施工時の表層での測定値とほぼ同程度であるが、スラグを用いたB、CおよびH工区のたわみ量は施工時より6ヶ月、1年と値が減少傾向にある。これらは、スラグ特有の水硬性の発現による路盤強度の増加と考えられる。

#### (3) 平坦性

平坦性の推移を図12に示す。施工時では、全ての材料が規格の2.4mm以下を満足しており6ヶ月、1年経過後もほとんど変化は見られない。

#### (4) 路面の膨張量

図13に1年経過後の膨張量を示す。舗装面に各工区9点のビスを固定し、トランシットによりビスの高さ変化を測定し、舗装面の膨張量の経時変化を調査した。1年経過後の膨張量は、0~1.0mm程度でありほとんど膨張は認められなかった。また、目視

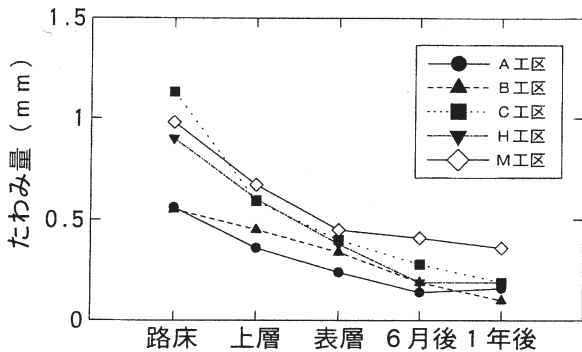


図11 たわみ量の推移

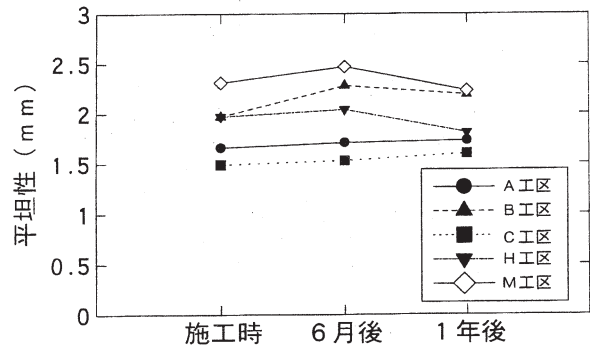


図12 平坦性の推移

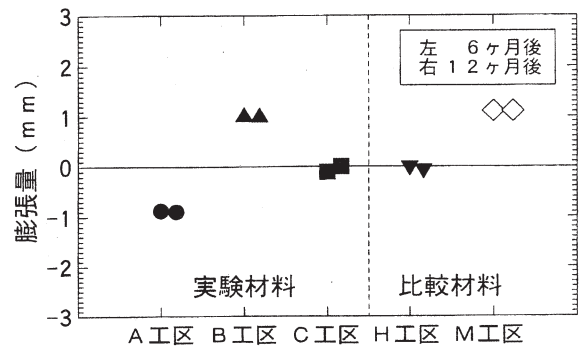


図13 一年経過後の工区別膨張量

観察でもアスファルト面のひび割れもなく良好な路面状況である。

### 5. 5 実路試験での評価

(1) モデル路盤での膨張量を18ヶ月調査したが、転炉スラグに造塊スラグおよび溶銑スラグを30%の混合であれば、現在、実用化している転炉スラグ路盤材と同等の膨張量である。また、舗装面のひび割れもなく良好な路盤である。

(2) 実路試験での1年経過後のたわみ量は、比較材の粒度調整碎石より路盤強度が優れ、小さな値となった。また、膨張も認められず舗装面のひび割れもなく良好な材料である。

(3) モデル路盤、実路試験の結果より蒸気エージングを72時間実施した造塊スラグ、溶銑スラグを転炉スラグに混合した材料は、充分路盤材料として実用可能と考える。

### 6. まとめ

本研究から得られたことをまとめて示す。

(1) 品質のばらつきが大きいため利用が遅れていた溶銑および造塊の両スラグでも、蒸気エージングを48時間以上および6気圧の加圧エージングを4時間以上実施すれば、水浸膨張比が約1.0%以下になり、JIS規格値を十分に満足することが明らかになった。両スラグを30~50%と転炉スラグを50~70%で混合した水浸膨張比は約0.5%以下を示し、溶銑および造塊両スラグが混合することによってより安定した路盤材となることが明らかになった。

(2) 転炉スラグに造塊スラグおよび溶銑スラグを30%程度混合した配合とすれば、圧縮強度および修正CBR値は実用化している転炉スラグ路盤材と同等の値を示し、十分に上層路盤に使用できることが示されたものとする。

(3) 実路での1年経過までのスラグの混合路盤材のたわみ量は、比較材である粒度調整碎石の場合より小さくなった。また、膨張は認められず、舗装面のひびわれも無く良好であった。

### 参考文献

- 1) 高山俊一、出光隆、橋本透、杉正法：蒸気エージングを実施した転炉スラグの有効利用、建設用原材料、Vol. 3、No. 1、pp.26~31(1993)
- 2) 高山俊一、出光隆、会田憲義、杉正法、徳原英利：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、土木学会論文集、No.544、/V-32、pp.177~186(1996.8)
- 3) 高山俊一：リサイクル資源である未使用製鋼スラグの安定化と路盤材として利用するための研究、平成7・8・9年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(B)(1)) 研究成果報告書、1998.3
- 4) 杉正法、北野淳、高山俊一、橋本透：未利用製鋼スラグを用いた路盤材の実路試験、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.106~107(1998)

(1999年2月15日受付 6月30日受理)