

# 電気炉スラグのアスファルト骨材への適用

市原 明恵\*<sup>1</sup>

Application of electric arc furnace slag for asphalt aggregate  
Akie Ichihara

Synopsis: In order to utilize the electric arc furnace slag (EF slag) for the asphalt aggregate, its quality as both the aggregate and the asphalt mixture was investigated. Slag modification process by mixing slags to control the slag expansion was also studied.

The road aggregate of the EF slag of Sanyo showed uniform quality and met the standard for road materials. Moreover, the modified EF slag had the improved expansion characteristic. Consequently, the slag can be a substitute of natural aggregate for road materials with better dynamic stability as the asphalt mixture.

It was also demonstrated that the asphalt mixture with the EF slag met the performance standard of the pavement. The pavement test in the premises of Sanyo plant was carried out to verify its performance. The paved road has been in excellent conditions for over 12 months. The road aggregate of the EF slag of Sanyo was successfully adopted to the public paving in Himeji City through those activities. It was the first public application of steelmaking slag for pavement.

key words: Steelmaking slag, Electric arc furnace slag, Asphalt aggregate, Expansion, free lime, CaO, Pavement, Natural aggregate, Dynamic stability, MCI, roughness, Marshall stability, Dissolution test, Aging

## 1. 緒言

電気炉スラグは、電気炉を用いた製鋼工程で副次的に生成する熔融固化物で、当社では粗鋼生産量のおよそ10%程度発生する。当社の副産物は、電気炉スラグの他、汚泥、スケール、ダスト、煉瓦屑、廃油等があるが、電気炉スラグはこれら副産物発生量の50%近くを占めている。

現在当社では、電気炉スラグの全量を、路盤材を始めとする土木用途にて再利用している。しかし近年、新空港建設等の電気炉スラグを大量消費する大型プロジェクトが終了し、路盤材の用途である道路舗装に関しても、インフラ整備の充足により道路の新設が減少し、補修工事も公共工事費用の縮小により、路盤は施工せず、アスファルト面のみの打ち替えが主となり、路盤材の需要は減少している。更に、建設リサイクル法による建設廃材の路盤材化や、下水汚泥熔融スラグ等、様々な廃棄物を路盤材化する試みがあり、路盤材用途の材料は、ますます供給過多となることが見込まれる。このため、電気炉スラグの新規用途の開発が必要となり、アスファルト骨材への適用を検討した。

アスファルト骨材用に供される鉄鋼スラグは、JIS A5015「道路用鉄鋼スラグ」としてJIS規格があるほか、社団法人 日本道路協会発行の種々の刊行物<sup>1~4)</sup>にも鉄鋼

スラグに関する各種規定・測定方法が記載されており、規格面では整備がなされている。また、鉄鋼スラグ混入アスファルト混合物は、自然環境の保護及び破砕加工時に使用される化石燃料削減と二酸化炭素削減に資する物質として、平成14年度に公共工事向けグリーン購入法対象製品<sup>5)</sup>に登録されており、官公庁における使用が推奨される物質でもある。

電気炉スラグの主成分は、カルシウム、アルミニウム、珪素や鉄など天然に多く存在する元素の酸化物で、1500℃以上の高温で熔融した状態から冷却固化する。これら成分のうち、電気炉スラグのカルシウム源であるCaOが未熔融のまま残存すると、道路舗装材などに使用した際に水和反応によって膨張し<sup>6~11)</sup>、路面性状の悪化を招くことがある。このため、路盤材や骨材として使用する際、エージングという風化安定処理<sup>10~15)</sup>を行っており、JIS A5015「道路用鉄鋼スラグ」にもその期間が規定されている。しかし、膨張への懸念が根強く、種々の規格があるにも関わらず、使用に消極的であるのが現状である。

当社では、電気炉スラグのアスファルト骨材としての使用可能性について、骨材品質の規格適合性および安定性や、アスファルト混合物状態での特性調査、スラグの改質処理による膨張特性の改善効果を検討し、当社の電気炉スラグ

\*1 環境管理部環境技術グループ 兼 研究・開発センター プロセス開発グループ

混入アスファルト混合物が、舗装の性能基準を満足することを検証した。また、施工実績を確立するため、構内試験舗装を実施し、供用12ヶ月までの追跡調査を実施した。これらの取り組みにより、鉄鋼スラグとしては初めて、姫路市の資源循環型舗装のアスファルト骨材として採用された。以上を取りまとめ、本報にて報告する。

## 2. 電気炉スラグの発生・処理工程

当社で発生する電気炉スラグのうち、約8割が酸化スラグであり、残る2割の還元スラグを、電気炉出鋼後の後続チャージの取鍋へ移注することにより、電気炉スラグの改質を行っている<sup>16)</sup>。この工程により、還元スラグの大半は改質された「混合スラグ」となる。当社の電気炉スラグの内訳は、電気炉の酸化精錬から発生する酸化スラグ、改質処理できない場合に発生する還元スラグ、および改質によって発生する混合スラグの3種類である。現状では、これらの電気炉スラグは、ノ口畑にて凝固・地金回収された後、最適粒度に破碎され、大気エージングを行った後に、路盤材をはじめとする土木用途に供される。

## 3. 求められる性能と測定方法

### 3・1 骨材の試験

アスファルト混合物の材料は、骨材と瀝青材料に大別でき、骨材はアスファルト混合物の大半を占める。このため、骨材の性質がアスファルト混合物の性質に及ぼす影響は大きく、一般的に、骨材には、適切な粒度であること、凍結融解等に対して耐久性があること、耐摩耗性に優れすべり抵抗が大きいこと、等種々の項目が要求される<sup>2~4)</sup>。これらの条件を考慮して、アスファルト舗装便覧<sup>2)</sup>や、JIS A5001「道路用碎石」、JIS A5015「道路用鉄鋼スラグ」では、アスファルト混合物用骨材について、様々な品質規格を設けている。今回測定を行った骨材品質規格に関する試験概要を以下にまとめる。

#### 3・1・1 比重・吸水率

骨材の比重および水分を吸収する度合いを表わす吸水率は、JIS A1110「粗骨材の比重及び吸水率試験方法」にて測定を実施した。測定方法の概要は、所定量の骨材を採取し、20±2℃の水中で24時間吸水させた後、試料を水から取り出し、吸水性の布の上で目に見える水膜をぬぐい取り、表乾質量を計量する。その後試料を金属かごに入れ、20±2℃の静水中にて水中質量を計量する。水中から取り出した試料をバットに移し変え、100~110℃で一定質量となるまで乾燥した後、室温まで冷やし絶乾質量を測定する。得られた各質量より、表乾比重、見掛比重式、吸水率を式(1)~式(3)から求める。

$$\text{表乾比重} = \frac{\text{表乾質量}}{\text{表乾質量} - \text{水中質量}} \cdots (1)$$

$$\text{見掛比重} = \frac{\text{絶乾質量}}{\text{絶乾質量} - \text{水中質量}} \cdots (2)$$

$$\text{吸水率} = \frac{\text{表乾質量} - \text{絶乾質量}}{\text{絶乾質量}} \cdots (3)$$

#### 3・1・2 すりへり減量

耐摩耗性や耐久性の指標であるすりへり減量は、JIS A1121「ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験方法」にて行った。測定の概略は、鋼製円筒の装置内に粒度を調整した骨材約5kgと粒度区分に応じて規定された鋼球を入れ、30~33回/分で規定の回数回転させる。回転後、試料を試験機から取り出し、1.7mm以下に破碎、摩耗した骨材比率を求める。なお、本測定においては、電気炉スラグの粒度を6号碎石粒度である4.75~13.2mmにて測定した。

#### 3・1・3 損失質量百分率

損失質量百分率(以下、損失量)とは、粗骨材、細骨材の凍結融解等に対する耐久性を判定する指標で、骨材内部の空孔等に、硫酸ナトリウムの結晶を析出させ、この内圧による破壊に対する抵抗性をJIS A1122「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」により測定した。本試験は粒度を調整した骨材を、飽和硫酸ナトリウム水溶液に所定の時間浸漬後、乾燥する操作を5回繰返し、粒度残存率によって硫酸ナトリウム結晶の析出圧による破壊に対する抵抗性を測定する。

#### 3・1・4 鉄鋼スラグの水浸膨張性試験

本試験方法は、鉄鋼スラグの水浸膨張性を評価する試験方法で、JIS A5015「道路用鉄鋼スラグ 附属書2. 鉄鋼スラグの水浸膨張試験方法」にて測定した。本測定方法は、鉄鋼スラグの膨張特性を測定することを目的としており、所定の標準粒度分布に粒度調整した電気炉スラグを最適含水比にて、金属容器中に突き固め、養生装置に浸漬する。養生装置内で80±3℃の6時間保持した後、放冷する操作を1回/日、10日間繰返し、供試体の膨張を測定する。

### 3・2 配合試験

配合試験とは、アスファルト混合物の配合設計に関する試験である。「アスファルト舗装要綱」<sup>2)</sup>では、アスファルト混合物に必要な性能として、安定性や耐久性が高く、交通荷重による流動や摩耗、せん断が起こりにくいこと、平坦ですべり抵抗性が高いことが要求される。また、施工にあたっては混合、敷きならし、締固めおよび表面仕上げの各作業が容易に行える必要がある。アスファルト混合物の配合設計はこれらの要求に対し、所要の品質の材料を用い最適な瀝青材料と骨材の配合を選定することである。以下に、今回測定を行った配合試験の概要をまとめる。

#### 3・2・1 マーシャル安定度試験

マーシャル安定度試験は、加熱アスファルト混合物の配

合設計と品質管理を目的とし、マーシャル安定度等を測定する試験方法で、円筒形供試体に、規定温度（60±1℃）、規定載荷速度により荷重を加え、供試体が破壊するまでに示す最大荷重（安定度kg）とそれに対する変形量（フロー値1/100cm）を測定する。アスファルト混合物の剥離現象に対する抵抗性を評価する場合は、60±1℃の水槽中に48時間水浸させた後の安定度を測定し、低下割合により残留安定度を算出する。本試験は、舗装試験法便覧<sup>1)</sup>「3-7-1 マーシャル安定度試験方法」にて測定した。

### 3・2・2 ホイールトラッキング試験

ホイールトラッキング試験とは、アスファルト混合物の耐流動性を評価する試験であり、舗装試験法便覧<sup>1)</sup>「3-7-3 ホイールトラッキング試験方法」にて測定した。試験の概要は、供試体上を載荷した小型のゴム車輪を60℃にて、規定の速度で繰り返し往復走行させるもので、単位時間あたりの変形量から動的安定度DS（Dynamic Stability）：（回/mm）を求める。

### 3・3 路面の調査

施工の品質管理、検査および維持修繕計画の立案、また試験舗装の調査等を目的として路面性状の測定が行われる。試験舗装の追跡調査のため、すべり抵抗性、きめ深さ、わだち掘れ、平坦性、ひび割れ率の測定を行い、これら測定結果より、電気炉スラグ骨材の供用性能を評価した。

#### 3・3・1 すべり抵抗性

すべり抵抗性とは、舗装面と自動車のタイヤ等との間に発生する摩擦抵抗値のことで、大きいほどスリップしにくくなる。舗装路面のすべり抵抗性は、舗装試験法便覧<sup>1)</sup>「6-5 舗装路面のすべり抵抗の測定方法」に準拠する、振子式スキッドレジスタンステスター（Skid Resistance Tester）を使用する方法及び、ASTM E1911-98に規定のDFテスター（Dynamic Friction Tester）を用いる方法にて測定した。

振子式スキッドレジスタンステスターは、タイヤゴムを装着した振子式のスライダーを落下させ、接地後にどこまで振れるかによって、BPN（British Pendulum (Tester) Number）を測定する。DFテスターは、底面の円盤の回転速度が一定値に到達後、円盤に取りつけられたタイヤゴムピースが路面と接触し、舗装路面の動的摩擦係数 $\mu$ を測定する。

#### 3・3・2 きめ深さ

きめ深さとは、路面粗さのおおよその目安となる指標であり、本調査においてはASTM E2157-01のCTメータ（Circular Texture Meter）による方法にて測定した。CTメータは、CCDレーザー変位センサーを使用した路面粗さ計で、表面粗さをMPD（Mean Profile Depth）としてあらわす。きめ深さは数値が高いほど路面が粗い。

#### 3・3・3 わだち掘れ

舗装路面の摩耗、地盤の沈下、アスファルト混合物の流

動等によって、車輪の走行位置に発生するわだち掘れ量を、舗装試験法便覧<sup>1)</sup>「6-3 舗装路面のわだち掘れ量測定方法」の水糸法にて測定した。本方法は、水糸を基準線として張り、横方向の凹凸を20cm間隔で測定することにより行う。数値が高いほどわだち掘れが大きい。

#### 3・3・4 平坦性

試験舗装路面の平坦性は、舗装試験法便覧<sup>1)</sup>「6-2 舗装路面の平坦性測定方法」より行った。路面の平坦性は、車両の走行時における乗心地に影響する、道路の縦断方向の凹凸度合いを測定することを目的としており、本測定においては、3mプロファイルメータにより測定を行った。平坦性は記録紙に記録された波形から1.5m間隔で波高を読み取り、その標準偏差を平坦性の測定値とする。数値が大きいほど凹凸が大きい。

#### 3・3・5 ひびわれ率

ひび割れ率は舗装試験法便覧<sup>1)</sup>「6-4 舗装路面のひび割れ測定方法」のスケッチ法により測定した。これは、観測者が路面に生じたひび割れを写生して、面積率によりひび割れ率を測定する方法で、数値が大きいほどひびわれが多い。

#### 3・3・6 維持管理指数（MCI）

舗装の供用性とは、ある期間に交通を供しうる能力であり、時間と共に変化する。供用性を評価する方法としては、PSI（供用性指数）やMCI（維持管理指数）があり、わだち掘れ量、平坦性、浸透水量、すべり抵抗値、段差量などのうち、いくつかの項目を組合わせて作成した評価方式によって算出する。

代表的な評価式には、ASSHO（アメリカ道路協会）のPSIや、AASHO道路試験の成果を取り入れ、道路維持修繕要綱（昭和53年版）にて採用された道路維持修繕要綱のPSIのほか、維持管理指数と呼ばれるMCIがある。MCIは、PSIによる路面性状評価が実態と合わない面が出てきたため、建設省（現国土交通省）が直轄国道調査結果を基に開発した舗装の供用性の評価指数で、式（4）により算出する<sup>1)</sup>。MCIの評価式は、全国の直轄国道を道路管理者がTable1の5段階で評価した得点を目的変数とし、路面性状値を説明変数とした重回帰式である。

$$MCI = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2} \dots (4)$$

C：ひびわれ率（%）

D：轍ぼれ深さの平均（mm）

$\sigma$ ：平坦性（mm）

## 4. 測定結果

### 4・1 アスファルト骨材としての品質

当社電気炉スラグの成分例をTable2に、アスファルト骨材としての物性をTable3に、重金属の溶出試験結果をTable4に示す。電気炉スラグの成分は、酸化・還元・混

Table1. Rating for MCI

| Rating | Content  | MCI |
|--------|--|-----|
| A      | No defect  | 10  |
| B      | Excellent though it is somewhat defective.                 | 8   |
| C      | Mending is not required though there are a lot of defects. | 6   |
| D      | An easy mending is required.                               | 4   |
| E      | A large-scale mending is required.                         | 2   |

Table2. Examples of chemical compositions of EF slag and natural aggregate (mass%)

|                   | CaO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO  | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO  | T-Fe  |
|-------------------|-------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|-------|
| EF slag           | 36.37 | 13.52            | 10.65                          | 4.38 | 2.41                           | 5.38 | 25.71 |
| Natural aggregate | 1.96  | 60.19            | 20.52                          | 1.97 | 0.02                           | 0.35 | 6.77  |

Table3. Properties of aggregate in asphalt mixture

|   | EF slag | Natural aggregate | Criteria |
|---|---------|-------------------|----------|
| Density in saturated surface-dry condition (g/cm <sup>3</sup> ) | 3.33    | 2.72              | ≥ 2.45   |
| Apparent specific density (g/cm <sup>3</sup> )                  | 3.44    | 2.75              | —        |
| Coefficient of water absorption (%)                             | 1.40    | 0.58              | ≥ 3.0    |
| Abrasion value (%)  | 14.63   | 15.8              | ≤ 30     |
| Soundness of aggregate (%)                                      | 3.58    | 2.3               | ≤ 12     |
| Expansion stability of steel slag (%)                           | 0.026   | —                 | ≤ 2.0    |

Table4. Dissolution test results of heavy metals on the EF slag

| Material                     | Contents (mg/l) |
|------------------------------|-----------------|
| Mercury and/or its compound  | < 0.0005        |
| Cadmium and/or its compound  | < 0.001         |
| Lead and/or its compound     | < 0.005         |
| Hexavalent chromium compound | < 0.01          |
| Arsenic and/or its compound  | < 0.005         |
| Selenium and/or its compound | < 0.01          |

合スラグが物理的に混在した骨材状態での値である。天然砕石は、約60%のSiO<sub>2</sub>と約20%のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を主成分とし、CaOは微量でT-Feが7%程度である。これに対し、電気炉スラグはCaOおよびT-Feが高く、特にFeをはじめとする金属元素を多く含むことから、天然砕石に比べ表乾比重、見掛比重が1.2倍程度大きい。

アスファルト骨材用の鉄鋼スラグは、JIS A5015「道路用鉄鋼スラグ」の単粒度製鋼スラグに該当し、比重の他、吸水率、すりへり減量等、Table3の規格があるが、当社電気炉スラグはこれらを全て満足しており、最も懸念される水浸膨張率もJIS規格の100分の1程度と十分に低い。また、重金属の溶出については、Table4の溶出試験の結果、全て検出限界以下であり、重金属の溶出は確認されな

かった。

#### 4・2 電気炉スラグ骨材の均一性

アスファルト骨材としては、規格値を満足すると同時に、製造の時期、ロットなどによらず、比重や吸水率等の骨材性状が安定している必要がある。骨材が規格を満足していても、ロット毎に比重や吸水率がばらつく場合、品質が安定しないため、アスファルト混合物の配合をロット毎に設計せねばならず、製品としての利用が困難となる。

当社はおよそ1ヶ月を1サイクルとして、様々な鋼種を製造している。製鋼副生成物である電気炉スラグの骨材性状が鋼の製造サイクルに依存するかを調査するため、1ヶ月間定期的に試料を採取し、比重および吸水率を測定した。その結果をFig.1に示す。

当社の電気炉スラグは表乾比重、吸水率共に規格値を満足し、ばらつきが小さい。特に比重の均一性が高く、製造の時期、ロット等によらず骨材として安定していることが確認された。

#### 4・3 アスファルト混合物の特性

電気炉スラグ骨材を使用したアスファルト混合物の特性を、アスファルト混合物の代表的な試験方法であるマーシャル安定度試験にて測定した。測定はアスファルト混合物中の骨材のうち、6号(4.75~13.2mm)のみ、5号(13.2~19.0mm)及び6号、5, 6, 7号(2.36~4.75mm)をスラグ骨材に置き換えたアスファルト混合物供試体にて実施し、天然砕石のみのアスファルト混合物と

比較した。使用したアスファルト混合物は、骨材の最大粒径が20mmである密粒度アスファルト混合物(20)とした。

アスファルト混合物の剥離現象に対する抵抗性を評価する残留安定度は、規定浸漬時間である48時間のほか、製鋼スラグアスファルト混合物の水浸膨張性試験方法<sup>1)</sup>である72時間浸漬も実施し、目視による破壊を確認した後、同供試体のマーシャル安定度を測定することにより、外観上の破壊だけでなく、内部の欠陥についても調査した。マーシャル安定度試験結果をTable5に、電気炉スラグの配合率によるマーシャル安定度及びフロー値の変化をFig.2に示す。

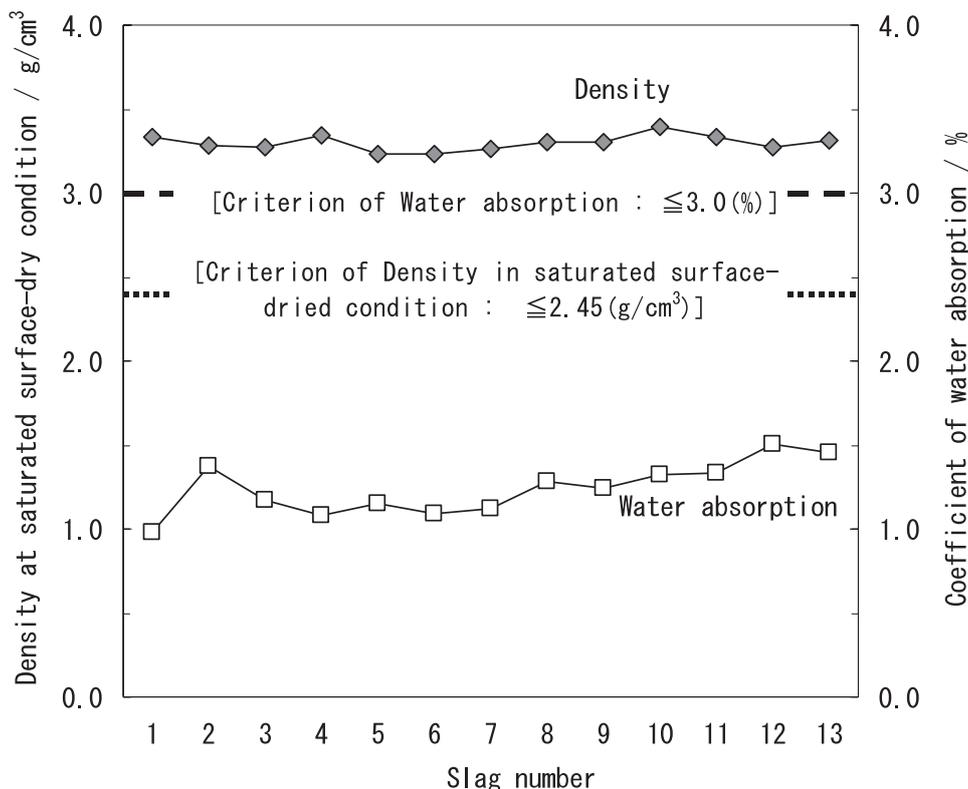


Fig.1 Changes of the Density and Coefficient of water absorption.

Table5. Physical properties of asphalt mixture with EF slag and natural aggregate (Binder : Straight asphalt)

| Type of aggregate             | EF slag      |          | Natural aggregate | Criteria     |              |
|-------------------------------|--------------|----------|-------------------|--------------|--------------|
| Used slag grain size          | No. 6        | No. 5, 6 | No. 5, 6, 7       |              |              |
| Density (g/cm <sup>3</sup> )  | 2.52         | 2.612    | 2.683             | 2.350        | —            |
| Void in total mix (%)         | 3.1          | 3.6      | 3.7               | 4.0          | 3~6          |
| Marshall stability (kN)       | 13.5         | 18.1     | 18.97             | 12.79        | over 4.9     |
| Flow value (1/100cm)          | 32           | 36       | 36                | 32           | 20~40        |
| Retained stability (48hr) (%) | 89.9         | 88.8     | 89.9              | 90.6         | over 75      |
| Retained stability (72hr) (%) | 88.7         | 88.2     | 84.8              | 89.8         | No breakdown |
| Dynamic stability (times/mm)  | No breakdown |          | 2520              | No breakdown | 1750         |

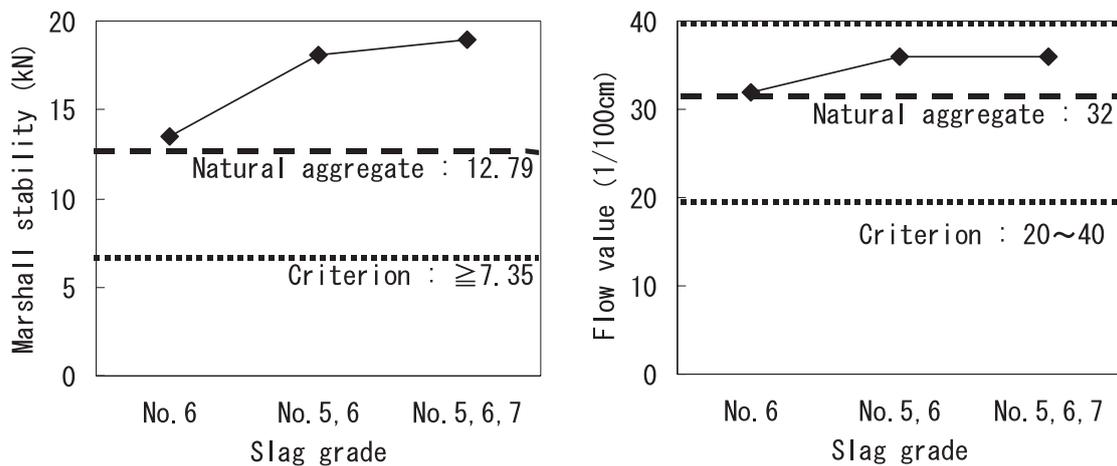


Fig.2 Changes of Marshall stability and flow value on EF slag grade.

Table5より、水浸72時間において供試体の破壊は目視観察されず、48時間、72時間の残留安定度はいずれも天然骨材と同程度だった。これより、電気炉スラグ骨材の剥離抵抗性は天然砕石と遜色がなく、アスファルト混合物状態での電気炉スラグの膨張は、内部・外部ともに確認されなかった。

また、Fig.2より、当社電気炉スラグ使用割合が6号のみの場合、安定度、フロー値は天然骨材と同等で、骨材の違いによる差は見られないが、5号+6号、5号+6号+7号と電気炉スラグの使用比率を上げるにつれ、安定度の増加及びフロー値の微増が確認された。アスファルト混合物中の電気炉スラグ使用比率が増加するに伴って、安定度が増加する原因は、フロー値の増加が安定度の増加に比べ僅かなこと及び、Table5の残留安定度が骨材使用量によらず90%近い良好な値で、剥離抵抗性に变化がみられなかったことから、スラグ形状、すなわち電気炉スラグ表面の凹凸が大きいことや、骨材の比重が大きいこと、噛み合せが良好であることに起因すると考えられる。

また、このマーシャル安定度の増加傾向は、5、6、7号の骨材を電気炉スラグ骨材に置き換えたアスファルト混合物が、耐流動性に優れることを示唆していると考えられるため、アスファルト混合物の耐流動性を評価する、ホイールトラッキング試験を実施した。

ホイールトラッキング試験結果である、動的安定度(Dynamic stability)を、Table5に示す。天然骨材の動的安定度が1750回/mmであるのに対し、5、6、7号砕石に当社電気炉スラグを用いた場合の動的安定度は2520回/mmと向上しており、アスファルト混合物中の電気炉スラグ骨材の割合を増加させることにより、耐流動性が向上することが示された。

#### 4・4 電気炉スラグの改質処理

##### 4・4・1 混合スラグの組成

これまでの調査で、当社の電気炉スラグ骨材は規格を満

足し、かつ均一な品質を有すること、またアスファルト混合物の状態でも耐流動性に富む特性を示す骨材として、天然骨材の代替利用が可能であることが示された。当社電気炉スラグの発生・処理工程については2節で述べたが、一般に酸化スラグに比べて軽量<sup>17)</sup>で、成分や物理性状の異なる還元スラグを含む当社の電気炉スラグ骨材が、均一かつ良好な骨材特性を示す理由として、当社還元スラグの大部分が混合スラグに改質されていることが挙げられる。Fig.3に酸化・還元・混合スラグの組成をCaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>三元系状態図で示す。また、製鋼工程より採取した酸化・還元・混合スラグのX線回折結果をFig.4に示す。

成分表及び三元系状態図より、混合スラグの組成が酸化スラグと還元スラグの間にあることがわかる。また、X線回折より、酸化スラグは2CaO・SiO<sub>2</sub>及びFeO、還元スラグはCaO及び3CaO・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、混合スラグは12CaO・7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、2CaO・SiO<sub>2</sub>、FeO等のピークが確認されるが、混合スラグには、酸化スラグ・還元スラグのいずれにも存在しない12CaO・7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が検出されている。以上より、混合スラグは酸化スラグと還元スラグが単に物理的に混在した状態のものではなく、混合により12CaO・7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が生成し改質されたものであることが確認された。

##### 4・4・2 改質処理による膨張特性の改善

電気炉スラグをアスファルト骨材等の道路用途に供する際、最も問題となるのが、電気炉スラグの膨張による路面の劣化である。未熔融の生石灰である遊離石灰(free Lime、以下f-CaO)が電気炉スラグ中にある場合、そのf-CaOが水と反応[CaO+H<sub>2</sub>O→Ca(OH)<sub>2</sub>]すると体積が2倍になり、アスファルトが下から押され花咲(ポップアウト)を起こす等、路面性状に悪影響を及ぼす。このため事前にf-CaOを水分と反応させて消石灰に変え、体積安定化処理をするエージング処理が一般的に行われている<sup>10~15)</sup>。

エージングには、①破碎後、安定するまでヤードに山積するエージング、②ピットに搬入した電気炉スラグを蒸気

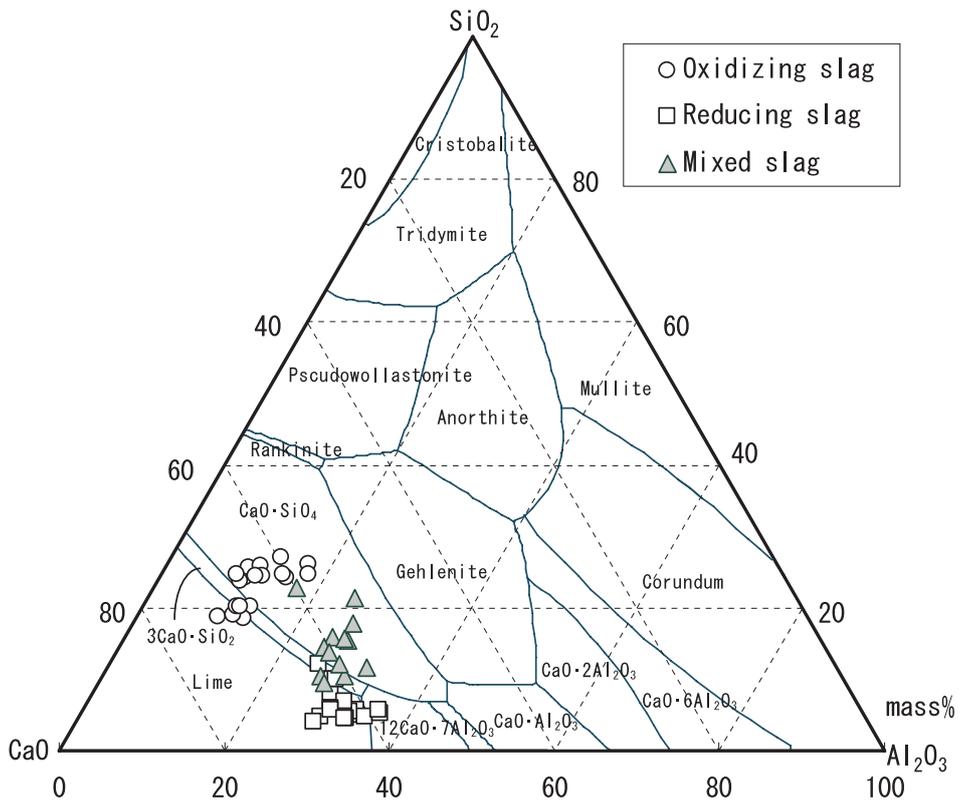


Fig.3 Compositions of oxidizing, reducing, and mixed slags.

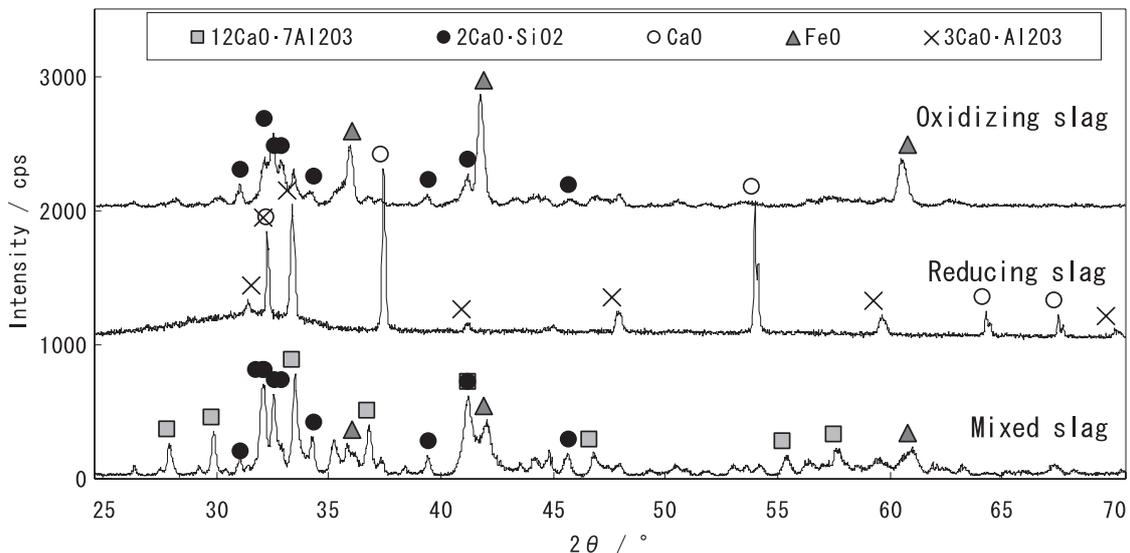


Fig.4 X-ray diffractions of oxidizing, reducing, and mixed slags.

(高温・水分多)で処理する方法、③オートクレーブに搬入した電気炉スラグを高圧蒸気(高圧・高温・蒸気)で処理する方法<sup>15)</sup>の3種類が主に実用化されており、②、③の方法は促進エージングと呼ばれる<sup>15)</sup>。当社においては、現在、①の大気エージング処理を行っている。

**(1) f-CaO含有量の低減**

当社の電気炉スラグを代表するよう、1ヶ月間定期的に採取した電気炉スラグ骨材および、ノ口畑から採取した酸

化・還元・混合スラグを最長6ヶ月まで大気エージングし、電気炉スラグの膨張の要因とされるf-CaOの減少を測定した。Fig.5にその結果を示す。ここで、電気炉スラグ骨材は酸化・還元・混合スラグが物理的に混在しており、酸化スラグ、還元スラグ、混合スラグはノ口畑にて採取後、アスファルト骨材向け電気炉スラグと同等の粒度に破碎し、大気エージング試験を行った。

Fig.5より、還元スラグ>>混合スラグ>酸化スラグの順

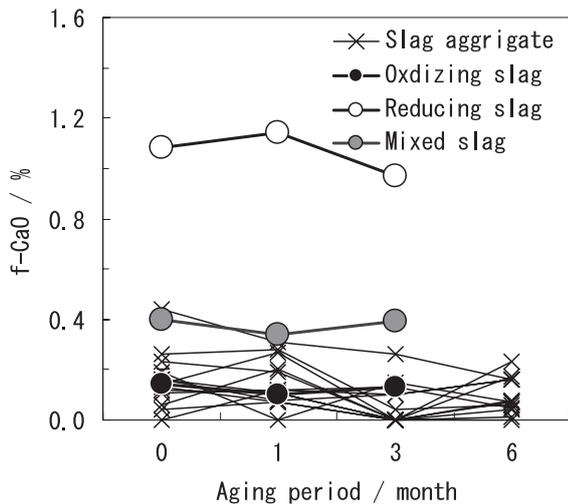


Fig.5 Relation between aging period and f-CaO%.

にf-CaO含有量が高く、混合スラグでは、還元スラグの約1/3程度までf-CaO含有量が減少していることがわかる。電気炉スラグ骨材のf-CaO含有量は混合スラグと同等以下であり、大気エージングによりf-CaOの減衰が確認できる。還元スラグも大気エージングによりf-CaOの減衰が確認できるが、その割合は0.2%程度である。一方、改質により発生する混合スラグのf-CaO含有量は還元スラグに比べ0.8%程度低い。これらのf-CaOの減少傾向から、電気炉スラグの改質によるf-CaOの低減効果は、3ヶ月間の大気エージングによる低減効果よりも大きいことがわかる。

## (2) 水浸膨張率の改善

当社の電気炉スラグ骨材及び大気エージングを行っていない酸化スラグ、混合スラグの水浸膨張試験結果を、電気炉スラグのエージング期間と水浸膨張率の関係を示した文献図<sup>18)</sup>上に示す (Fig.6)。図中破線は文献値の存在範囲を示しており、エージング期間により水浸膨張率は減少している。

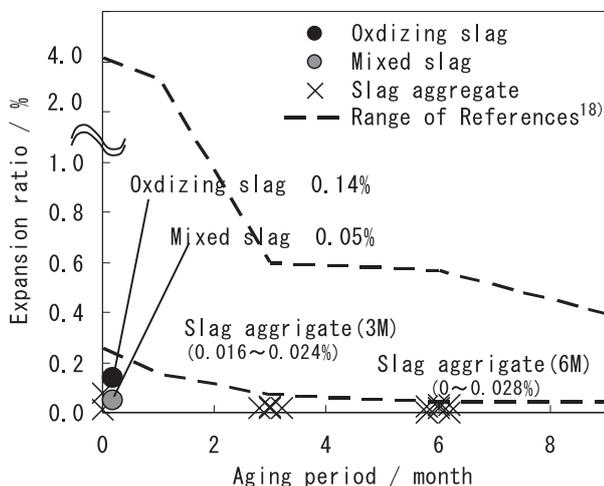


Fig.6 Relation between the expansion ratio and the aging period for EF slags.

当社の電気炉スラグ骨材の水浸膨張率は、エージング処理を行う以前から文献値に比べて十分低い。3ヶ月以上エージングを行った電気炉スラグ骨材の膨張率は最大で0.028%で、JIS規格値2.0%の100分の1程度だった。また、酸化スラグと、改質処理によって得られた混合スラグについて、エージングを行う前の水浸膨張率を測定した結果、酸化スラグは0.14%、混合スラグは0.05%というJIS規格を十分満足する低い膨張率が得られ、電気炉スラグの改質により膨張特性が改善されていることがわかった。

## 5. 試験舗装結果

以上より、当社電気炉スラグがアスファルト骨材として使用可能な物性を有することが明らかとなったので、当社の電気炉スラグ混入アスファルト混合物が舗装の性能基準を満足することを検証し、施工実績を得るため、平成17年1月に構内にて試験舗装を実施した。試験舗装の概要をFig.7に、舗装材料をTable6に示す。

### 5・1 試験舗装場所の交通状況

施工場所は、スクラップや副産物を積載した、20 t車程度の大型トラックが約80台/日、30km/h以下の低速にて走行する、港への通用門前道路であり、通用門付近の図中1工区にて示される区間は、緩やかな上り坂及びカーブで、極めて負荷の高い道路である。また、原料倉庫に面しているため、図中2、3工区は倉庫に出入りする重機によるねじり作用がかかる。このため、舗装破損が早期に生じ、当社電気炉スラグの供用性が早期に評価できる重車両走行道路である。なお、事前に路床のCBR試験を実施し、施工場所の路床が十分な支持力を有していることを確認している。

### 5・2 舗装の材料及び構成

試験舗装は既設舗装の破損状況及び、当社電気炉スラグのアスファルト骨材としての供用性評価の観点から、舗装区間を3区間に分けて施工を実施した。

1工区は高負荷の坂道+カーブ部で、既設舗装は多数の亀甲割れや最大16cmわだち掘れが生じているなど、路床まで破損が進行していたため、5、6、7号電気炉スラグ骨材を用いたアスファルト舗装と100%電気炉スラグの路盤工をおこなった。この工区では、電気炉スラグ路盤の供用性評価と、坂道+カーブという高負荷条件による電気炉スラグ骨材の耐久性が評価できる。2工区、3工区は電気炉スラグ骨材と天然骨材を比較する為の工区であり、既設路盤の上に2工区は5、6、7号電気炉スラグ骨材、3工区は天然骨材にて施工を行った。今回のアスファルト舗装に用いた電気炉スラグ骨材アスファルト混合物は、2mm以上の碎石を全て電気炉スラグに置き換えたもので、電気炉スラグを最大量使用することにより、電気炉スラグ骨材の特性を最大限評価できる仕様とした。

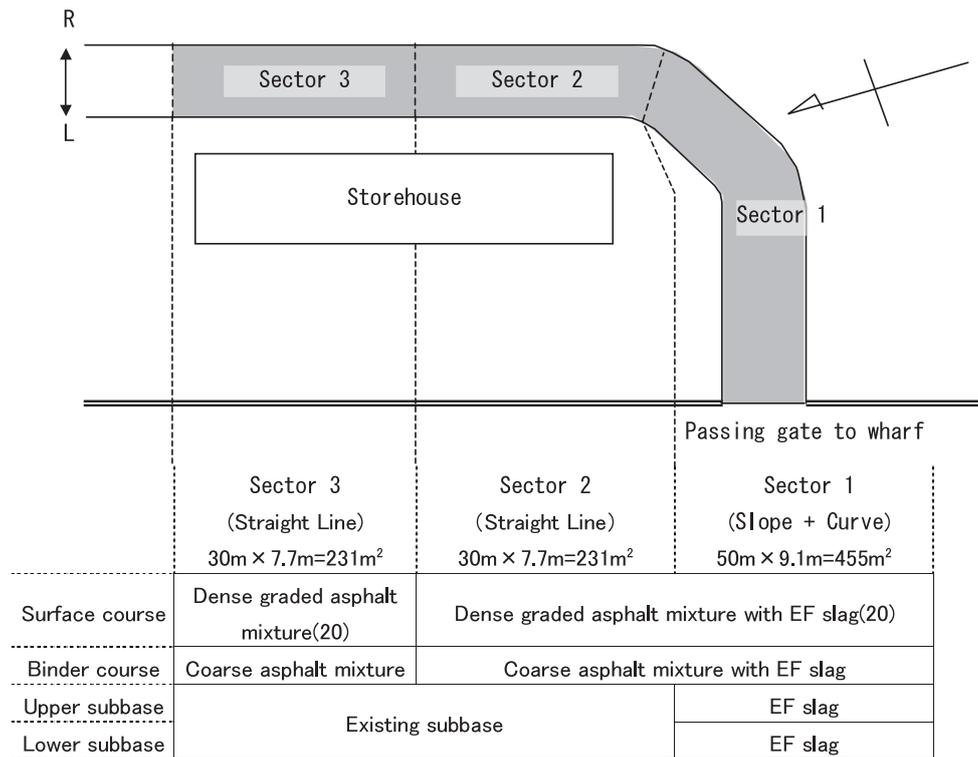


Fig.7 Outline of test paving.

Table6. Materials used in the test paving

| Material                                    | Contents  |
|---|---|
| Dense graded asphalt mixture with slag (20) | Aggregate : No.5,6,7 slags  |
| Coarse asphalt mixture with slag            | - Ratio of EF slag in asphalt mixture:<br>•Dense graded asphalt mix with EF slag (20) : 64.4%<br>•Coarse asphalt mix with EF slag : 77.1% |
| Dense graded asphalt mixture (20)           | Aggregate : Natural stone   |
| Coarse asphalt mixture                      |   |
| Upper subbase                               | 100% slag was used for road construction<br>(Upper subbase grading)   |
| Lower subbase                               | 100% slag was used for road construction (crusher run)  |

### 5・3 舗装後の追跡調査結果

試験舗装の調査を目的として、本報では、施工12ヶ月までの追跡調査を行った。Fig.8に施工12ヶ月後の試験舗装場所の写真を示す。ひびわれは発生しておらず、外観上の劣化は確認されなかった。当該試験場所において、すべり抵抗性、きめ深さ、わだち掘れ、平坦性の路面調査を行った。

すべり抵抗性<sup>19~21</sup>及びすべり抵抗性に影響すると言われる路面のきめ深さ<sup>19, 20</sup>については、天然工区およびスラグ工区で同様の傾向を示す事を確認している。

施工直後から12ヶ月までのわだち掘れ、平坦性の測定結果を以下に示す。

#### 5・3・1 わだち掘れ

わだち掘れの測定結果をFig.9に示す。既設舗装で最も破損が大きかった1工区L側で1mm程度の変化が見られたが、他は天然工区・スラグ工区共に差が見られず、変化量も0.5mm程度と僅かだった。

#### 5・3・2 平坦性

3mプロフィールメーターによる、路面の平坦性の測定結果をFig.10に示す。試験舗装工区は、周囲のヤードの隆起に合わせて作られており、施工直後から平坦ではない。天然工区とスラグ工区を比較するため、施工直後からの変化率に換算し、Fig.11に示した。



Fig.8 Appearance of test paving place after 12 months from paving.

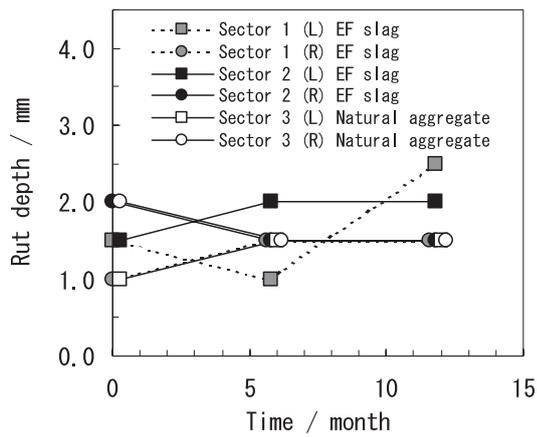


Fig.9 Transition of rut depth of the pavement surface.

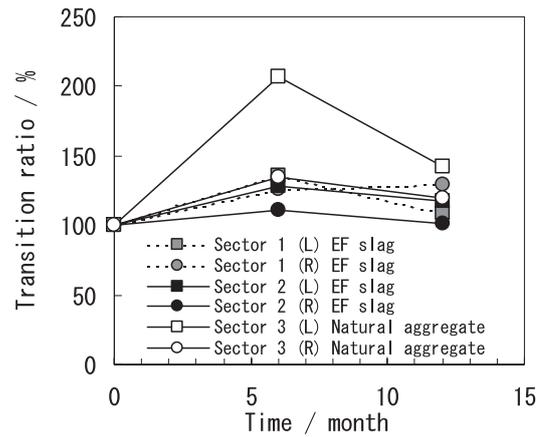


Fig.11 Transition of the pavement surface roughness.

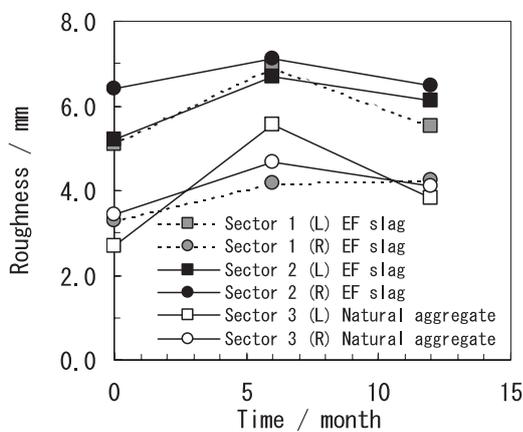


Fig.10 Transition of the pavement surface roughness.

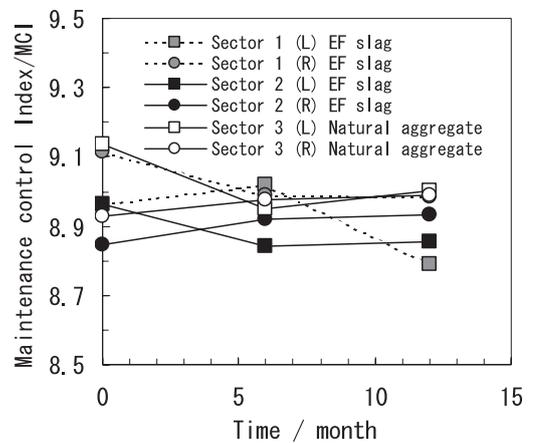


Fig.12 Maintenance control index.

Fig.11の3工区（L）は夏季に当たる供用6ヶ月で平坦性の変化が著しいが、12ヶ月には減少している。夏季は路面温度の上昇によりアスファルトが軟化し、路面の流動が起りやすいが、流動した路面が冬季に戻ることは考え難いため、3工区（L）の供用6ヶ月の値は測定誤差によるものと考えられる。

その他の測定結果は、夏季に当たる6ヶ月で微増した変化率が12ヶ月まで維持されていた。天然工区、スラグ工区共に同様の傾向を示したが、天然工区に比べスラグ工区の変化率がやや低かった。4・3節でも電気炉スラグ骨材使用率の高いアスファルト混合物は耐流動性に富む実験結果が得られていることを述べたが、今回の追跡調査結果からも、実路でも電気炉スラグを用いた工区は、平坦性の悪化が小さく、電気炉スラグの優れた耐流動性が実証された。

### 5・3・3 維持管理指数（MCI）

ひびわれ率、わだち掘れ、平坦性の測定結果より算出した、供用12月までの維持管理指数（MCI）をFig.12に示す。MCIの評価はTable1により評価した。

試験舗装の各工区はいずれも、施工直後から供用12月までBの「幾分欠陥があるが良好とみなされる」に該当する。一般的には、3以下は早急に修繕が必要な区間、4以下は修繕が必要な区間、5以上は望ましい管理水準の区間とされるため、天然・スラグ工区共に、良好な状態が維持されているといえる。

### 5・4 姫路市 資源循環型舗装への適用

姫路市では地球環境保全という観点から、「リサイクル」について、各方面での取り組みを行っている。道路舗装の分野においてもアスファルト混合物の骨材として、道路外副産物を利用しようという試みが行われており、“資源循環型公共工事への可能性”をテーマに舗装を推進している。当社においても、上述した当社電気炉スラグ骨材のアスファルト骨材への適用調査結果および試験舗装に関する資料に基づき、姫路市建設局道路整備改善課に働きかけてきた。その結果、平成17年5月の試験舗装を経て、資源循環型舗装のアスファルト骨材として採用され、同年9月および12月に公道にて舗装工事された。5月の試験舗装は約550m<sup>2</sup>の農道の舗装であり、9月の資源循環型舗装では一般道約1800m<sup>2</sup>の、12月は2660m<sup>2</sup>の舗装がなされた。

## 6. 結言

当社電気炉スラグのアスファルト骨材への適用を目的として種々の調査及び試験舗装を行い、以下の知見を得た。

1. 当社電気炉スラグ骨材は、天然砕石に比べ約1.2倍程度高比重で、アスファルト骨材としての品質を満足し、重金属の溶出も無かった。また、鋼種等によらず均一な品質を有していた。
2. アスファルト混合物としても規格を満足していた。マ

ーシャル試験及びホイールトラッキング試験より、アスファルト混合物中の電気炉スラグ含有量が増加すると耐流動性が向上することが示唆された。

3. 当社電気炉スラグ骨材は酸化スラグ、還元スラグ及び還元スラグを改質処理した混合スラグが物理的に混在していた。この還元スラグを含む電気炉スラグ骨材が規格を満足し、かつ安定した性質を有する理由として、還元スラグの大半が改質処理されていることが考えられる。

4. 改質処理により、電気炉スラグの膨張特性が改善された。当社の電気炉スラグ骨材の水浸膨張率は、改質された混合スラグを含め、大気エージング前から基準値に比べて十分に低かった。

5. 当社の電気炉スラグ混入アスファルト混合物を使用して試験舗装した結果、スラグ工区、天然工区共、供用12ヶ月まで良好な状態が維持されていた。すべり抵抗性やきめ深さは、スラグ工区、天然工区とも同様の傾向を示し、いずれの工区でもひびわれは発生していなかった。また、平坦性の変化はスラグ工区が良好な結果が得られ、実路でも電気炉スラグ骨材が耐流動性に富む傾向が得られた。

6. これらの取り組みにより、鉄鋼スラグとしては初めて姫路市の資源循環型舗装のアスファルト骨材として採用された。

## 参考文献

- 1) 舗装試験法便覧,(社)日本道路協会, 丸善, 東京, (1988)
- 2) アスファルト舗装要綱,(社)日本道路協会, 丸善, 東京, (1992)
- 3) 舗装施工便覧,(社)日本道路協会, 丸善, 東京, (2001)
- 4) 舗装設計施工指針,(社)日本道路協会, 丸善, 東京, (2001)
- 5) 国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律（グリーン購入法）,環境省総合環境政策局, 平成12年5月
- 6) 水渡英昭, 横幕豊一, 林田由美子, 高橋愛和: 鉄と鋼, **63**(1977), 2316
- 7) 成田貴一, 尾上俊夫, 高田仁輔: 鉄と鋼, **64**(1978), 1558
- 8) 桑山忠, 山田優, 本田淳裕, 三瀬貞, 小林繁: 材料, **40**(1991), 1545
- 9) 水渡英昭: 製鋼スラグの発生量低減と資源化—鉄鋼スラグの基礎と応用研究会最終報告書—, 日本鉄鋼協会(1997), 85
- 10) 桑山忠, 山田優, 本田淳裕: 建設用原材料, **1**(1991), 29
- 11) 鉄鋼スラグの道路用材への利用, 鉄鋼スラグ協会, (2004)
- 12) 亀井和郎, 門口維人, 伊藤良治, 西川恒明, 中嶋実: 材料とプロセス, **8**(1995), 1103
- 13) 橋本透, 杉正法, 寿崎益夫, 高山俊一, 出光隆: 製鋼スラグの発生量低減と資源化—鉄鋼スラグの基礎と応用研究会最終報告書—, 日本鉄鋼協会, (1997), 235
- 14) 井出秀夫: 製鋼スラグの発生量低減と資源化—鉄鋼スラグの基礎と応用研究会最終報告書—, 日本鉄鋼協会, (1997), 251
- 15) 小出浩: 鉄鋼スラグ協会西日本支部技術グループ第6回技術交流会, 鉄鋼スラグ協会, (1995), 62

- 16) 特許公報第2711779号「アーク炉精錬における還元性スラグの処理方法」
- 17) 桑山忠, 山田優, 本田淳裕: 建設用原材料, 1(1991), 29
- 18) 製鋼スラグ路盤設計施工指針, 鐵鋼スラグ協会, 昭和60年9月
- 19) 佐藤正和, 安部勝義: 土木学会第58回年次学術講演会, (2003), 1347
- 20) 安部勝義, 佐藤正和, 西山茂: 土木学会第59回年次学術講演会, (2004), 1203
- 21) 七五三野茂: 土木学会舗装工学論文集, 4(1999)
- 22) 市原薫, 小野田光之: 路面のすべりとその対策－道路・滑走路・路面・雪氷面－, 技術書院
- 23) 阿部裕也, 亀山修一, 玉井昭典, 笠原篤, 斎藤和夫: 土木学会舗装工学論文集, 4(1999)15

■著者



市原 明恵