

# スラグ骨材を用いた舗装用コンクリートの特性

森 濱 和 正・加 藤 祐 哉・古 賀 裕 久

コンクリート舗装にスラグ骨材を用いた場合の強度, 耐久性など一般的な特性のほか, 舗装にとって重要なすり減り抵抗性, すべり抵抗性について検討した。その結果, スラグ骨材を用いることにより, 乾燥収縮は改善されることなどが明らかになった。

キーワード: スラグ骨材, 舗装コンクリート, スケーリング, 乾燥収縮, すり減り, すべり

## 1. はじめに

コンクリート舗装は耐久性が高く, アスファルト舗装よりもライフサイクルコストを低く抑えることができるので, 普及が期待されている<sup>1)</sup>。また, 資源の有効利用の観点から, 金属系スラグ骨材(以下「スラグ骨材」という。)などのコンクリート舗装への適用も期待されていることから, 現在各種骨材の舗装への適用に関して検討した。そのうち本報告では, 主にスラグ骨材を用いた場合の検討結果について紹介する。検討した内容は, 舗装コンクリートに欠かすことのできない特性として, 曲げ強度, 走行安全性の観点からすり減り抵抗性, すべり抵抗性である。耐久性などについては, 凍結融解抵抗性, スケーリング抵抗性, 乾燥収縮特性である。なお, 本文は, 文献2)を加筆修正したものである。

## 2. 舗装コンクリートの性能と粗骨材の品質

舗装コンクリートに求められる性能と, それを確保するために粗骨材に求められる品質について, 検討した内容は表1のとおりであり, そのうち本文で紹介している項目はゴシックで示している。

コンクリートの曲げ強度, 凍結融解, 乾燥収縮の各試験方法はJISに, スケーリング試験はASTMに規定されている。一般に, 凍結融解抵抗性を評価するに当たってはJIS A 1148による試験が行われているが, 粗骨材の品質によっては, 凍結時に表面付近の骨材が割れて剥がれ落ちるポップアウト等が生じやすくなるおそれもあり, ここではスケーリング試験も行った。すり減り試験とすべり試験は舗装調査・試験

法便覧<sup>5), 6)</sup>に示されている。

粗骨材の密度・吸水率, すりへり減量, 安定性, そのほか3章に示す一般的な物理試験方法はJISに規定されている。粗骨材の強度の指標となる破碎値試験とすべり試験はイギリス規格であるBS 812に規定されている。また, 粗骨材自体の凍結融解, 乾燥収縮試験は一般的には行なわれていない試験方法であるが, ここではスラグ骨材の品質を詳細に評価するために, 土木研究所が提案している方法<sup>7)</sup>により試験を行なった。

## 3. 使用した粗骨材の種類と試験結果

使用したスラグ骨材は, 産出された製鉄所の異なる3種類の高炉スラグ粗骨材(ここでは, これをSA, SB, SCとする)および電気炉酸化スラグ粗骨材SDの4種類である。比較用の天然骨材は, 2種類の砂岩碎石A, B, 安山岩碎石C, 砂利Gの4種類である。舗装コンクリートに用いる粗骨材の最大寸法は, 一般的には40mmであるが, スラグ骨材は粒径の大きいものを入手できなかったため20mmで検討した。砂利Gは40mmを破碎した玉砕25mmである。

骨材品質については, JISに基づく一般的な物理試験のほか, 表1に示す試験項目と方法によって実施した。表2に粗骨材の種類と試験結果を示す。

SAは, すりへり減量, 破碎値が大きく, 使用した際のすり減り抵抗性に懸念がある。また, 骨材の吸水率が4%以上であり, JIS A 5011-1による区分はL(低品質)であり, 凍結融解抵抗性にも懸念がある。ただし, 骨材単味での凍結融解損失質量は比較的小さかった。

SBは, 良質な天然骨材と同程度の品質を有してい

表一 1 検討内容

		舗装コンクリートの性能		粗骨材の品質	
		項目	試験方法	項目	試験方法
フレッシュ コンクリート	施工性	締固め・充填性	便覧 <sup>3)</sup> フローテーブル	最大寸法・粒度, 実積率	JIS A 1102, 1104
		材料分離抵抗性	材料分離試験	密度	JIS A 1110
		仕上げ面の変形 (ダレ) 抵抗性	ダレ試験	-	-
硬化コンク リート	強度特性	曲げ強度	JIS A 1106	破砕値 点載荷試験	BS 812-110 JGS 3421
		弾性係数	曲げ-たわみ 圧縮 JIS A 1149		
		曲げ疲労強度	便覧 <sup>4)</sup>		
		引張軟化特性	JCI-S-001		
	走行 安全性	すり減り	便覧 <sup>5)</sup>	すりへり減量	JIS A 1121
		すべり	便覧 <sup>6)</sup>	ポリッシング (PSV)	BS 812-114
	耐久性	凍結融解	JIS A 1148	安定性, 吸水率	JIS A 1122, 1110
		スケーリング	ASTM C672	凍結融解	土木研究所資料 第 4199 号 <sup>7)</sup>
	長さ変化	乾燥収縮	JIS A 1129	乾燥収縮	-
		自己収縮	JCI-SAS2	-	-
線膨張係数		-	-	-	
	圧縮強度による管理・検査	JIS A 1108	-	-	

本文で報告している試験項目をゴシックにしている。

試験方法の JIS 以外の略称は、便覧：舗装調査・試験法便覧（日本道路協会）、JCI：コンクリート工学会規格、ASTM（American Society for Testing and Materials）：米国試験材料協会規格、BS：イギリス規格、JGS：地盤工学会基準。

表一 2 粗骨材の種類と試験結果

骨材の種類		記号	粒度 範囲 mm	表乾 密度 g/cm <sup>3</sup>	絶乾 密度 g/cm <sup>3</sup>	吸水率 %	単位 容積 質量 kg/L	実積率 %	粗粒率 %	微粒 分量 %	安定性 損失 質量 %	すり へり 減量 %	破砕値 <sup>a)</sup> %	PSV <sup>b)</sup>	乾燥 収縮率 <sup>c)</sup> ×10 <sup>-6</sup>	凍結融 解損失 質量 <sup>d)</sup> %
スラグ 骨材	高炉	SA	20~5	2.536	2.421	4.76	1.397	57.7	6.88	1.6	2.7	26.4	25.5	-	20	3.0
		SB		2.762	2.725	1.35	1.659	60.9	6.67	0.7	0.3	17.0	12.9	-	4	1.2
		SC		2.635	2.537	3.86	1.498	59.0	6.52	1.0	1.7	32.5	27.5	44	21	3.5
	電気炉 酸化	SD		3.735	3.698	1.00	2.114	57.2	6.86	0.3	1.3	14.7	15.0	47	9	2.3
砕石	硬質 砂岩	A	2.676	2.665	0.42	1.609	60.4	6.63	1.1	0.1	12.9	7.7	49	101	3.9	
		B	2.648	2.629	0.70	1.651	62.8	6.70	0.5	1.3	16.0	9.7	-	284	18.1	
	安山岩	C	2.628	2.567	2.38	1.552	60.5	6.68	0.1	6.7	16.1	12.4	-	199	32.1	
砂利 (玉砕)	G	25~5	2.639	2.605	1.32	1.594	61.2	6.83	0.1	4.9	14.6	11.2	-	396	23.9	

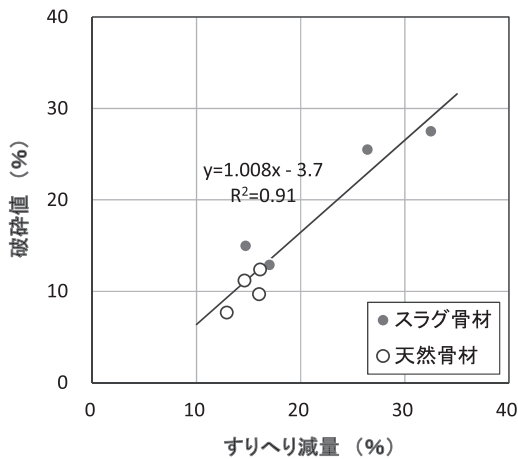
注 a) BS812-110。b) BS812-114。c), d) 土木研究所資料第 4199 号<sup>7)</sup>。ただし d) は、塩水の濃度 3%、凍結融解 30 サイクルの結果。

た。SC は、SA と同様にすりへり減量や吸水率が大きかった。SD は、密度が極めて大きいほかは、良質な天然骨材と同程度の品質を有していた。

スラグ粗骨材の乾燥収縮率は、4 種類とも極めて小さく、コンクリートの乾燥収縮の抑制が期待される。

一方、比較用の天然骨材のうち、A は全ての試験結果が良好なものである。B, C, G は、骨材の凍結融解損失質量、乾燥収縮率が大きく、凍結融解抵抗性、乾燥収縮に懸念がある。

粗骨材のすりへり試験は、通常、JIS A 1121 のロサンゼルス試験機を用いる方法によるが、比較的大きい試験装置が必要であること、試料の調整が大変であることなどの問題がある。強度の指標となる破砕値がすりへり抵抗性の指標にも使用できれば、試験の合理化につながる可能性があることから、破砕値試験も行った。すりへり減量と破砕値の関係は図一 1 のとおりであった。両者は良い相関関係があり、すりへり抵抗性の評価を破砕値で代替できる可能性がある。



図一 1 すりへり減量と破碎値の関係

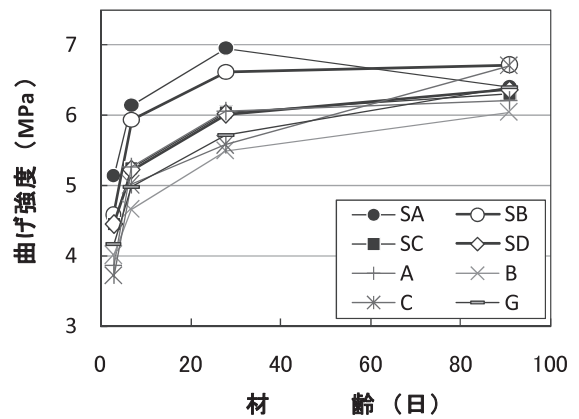
粗骨材のすべり (PSV) 試験を実施したのは SC, SD, A の 3 種類であるが、ほぼ同等であった。

#### 4. コンクリートの配合と曲げ強度試験

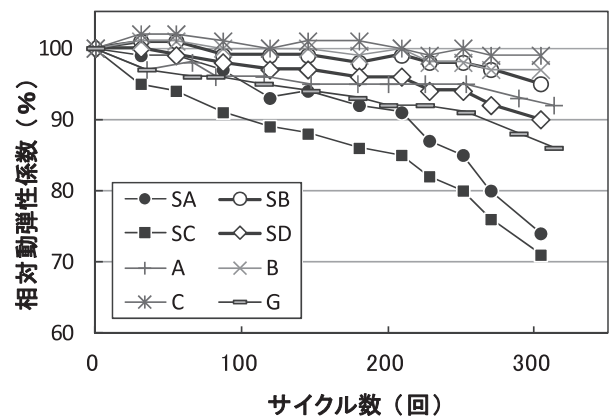
実験に用いたコンクリートの配合は表一 3 のとおりである。単位粗骨材かさ容積を 0.72 で統一し、曲げ強度 6.0 MPa, スランプ 5 cm を目標として、試験練りを行なって単位水量及び水セメント比 ( $W/C$ ) を決定した。材齢と曲げ強度の関係は図一 2 のとおりである。材齢 28 日の強度は粗骨材によって多少異なっているが、材齢 91 日での曲げ強度は 6 ~ 7 MPa の範囲に入っていた。

#### 5. 凍結融解試験

JIS A 1148 によるコンクリートの凍結融解試験 (A 法) を実施した結果を図一 3 に示す。SA, SC は 300 サイクルで相対動弾性係数が 70% 程度まで低下した。それ以外の骨材は 90% 程度以上で健全であった。一般に、



図一 2 材齢と曲げ強度の関係



図一 3 凍結融解試験の結果

300 サイクル経過後の相対動弾性係数が 60% 以上であれば、凍害に対して十分な抵抗性を有していると評価されるので、SA, SC の耐凍害性が不足しているとまではいえない。粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響については、通常、吸水率、安定性損失質量を指標としている。SA, SC は他の粗骨材よりも吸水率が高いことから、従来から行われている骨材試験により、スラグ骨材のうち比較的凍結融解抵抗性に劣るものを抽出することも可能と考えられる。

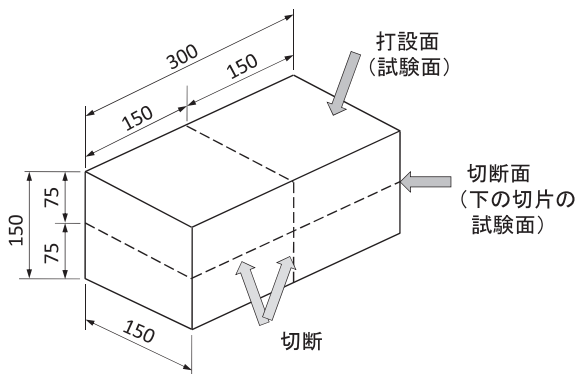
表一 3 コンクリートの配合

粗骨材の種類	粗骨材最大寸法 (mm)	W/C (%)	単位粗骨材かさ容積	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				28 日曲げ強度 (MPa)	空気量 (%)
					W	C	S	G		
SA	20	37.2	0.72	39.8	160	430	673	1006	6.95	4.8
SB		41.8		36.9	153	366	652	1194	6.61	4.8
SC		47.8		40.6	160	335	719	1079	6.03	4.6
SD		48.4		40.9	160	331	727	1522	6.01	4.5
A		49.2		39.6	145	295	729	1158	6.05	4.6
B		52.9		37.9	145	274	705	1189	5.50	4.9
C		49.8		40.7	145	291	752	1117	5.58	5.4
G	25	43.9		38.3	145	330	695	1148	5.72	4.6

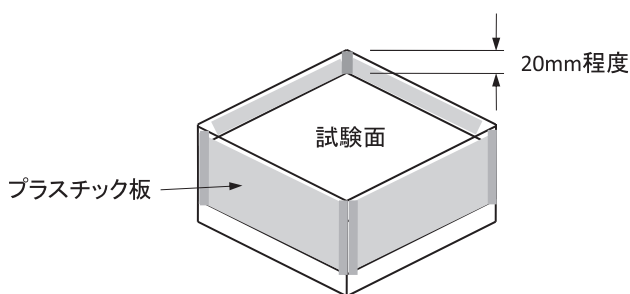
目標スランプ : 5 cm, 目標空気量 : 4.5 %, 混和剤は AE 減水剤を標準量 (C × 0.6 %) とした。

### 6. スケーリング試験

舗装は、打設面が直接気象作用を受けるため、その面のスケーリング試験(表面の凍結融解試験)を行なった。また、舗装表面がすり減ってくれば粗骨材も露出することから、切断面のスケーリング試験も行なった。図一4のように150×150×300mmの供試体を切断して、打設面、切断面を試験面とした。各供試体側面には図一5のようにプラスチック板を貼り付け、塩水が溜められるようにした。



図一4 スケーリング供試体



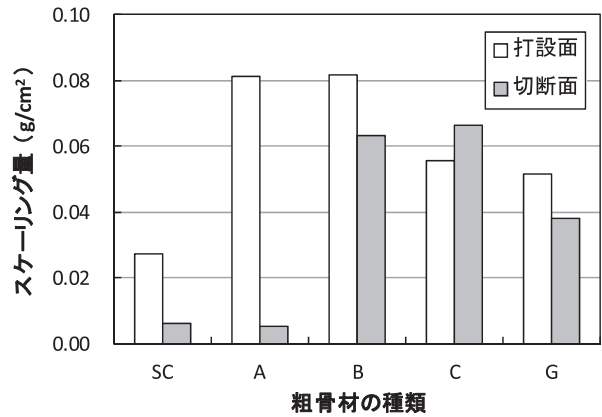
図一5 スケーリング試験 (水を溜める囲い)

スケーリング試験は、ASTM C672を参考に、試験面に濃度3%の塩水を深さ6mm溜め、-20℃±3℃で16時間、20℃±3℃で8時間のサイクルで凍結融解させた。スケーリング量は、はく離した試料の質量を試験面の面積で除して求めた。

試験した粗骨材は、コンクリートに用いた際に凍結融解抵抗性(図一3)が最も低下したSCと、表一2の安定性または骨材の凍結融解損失質量の大きかったB, C, G, いずれも良好であったAの5種類とした。

100サイクル時のスケーリング量は図一6のとおりである。SCはそのほかの粗骨材よりも良好であった。打設面と切断面の結果は、B, C, Gは同程度であるが、SC, Aでは切断面のスケーリング量が小さかった。

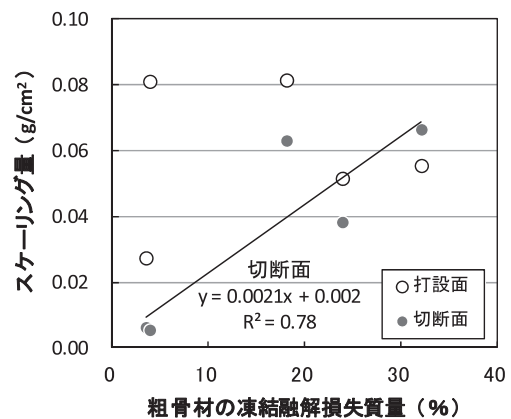
はく離状況を観察すると、打設面はほとんどがモルタルのはく離であった。切断面は、B, C, Gを用い



図一6 スケーリング量 (100 サイクル)

た場合にモルタルとともに粗骨材自体もはく離し、スケーリング量が多くなった。このように、JIS A 1148によるコンクリートの凍結融解試験(A法)とスケーリング試験では、凍結融解時に悪影響を生じさせる骨材が必ずしも一致しなかった。

図一7に粗骨材の凍結融解損失質量とスケーリング量の関係を示す。打設面のスケーリング量と、粗骨材の吸水率、安定性、凍結融解損失質量との関係を求めたが、相関関係は不明瞭であった。打設面は供試体成形時に表面のこて仕上げを行うため、表面にモルタル分が集まりやすく、粗骨材は下に存在し表面に露出することはない。このため、打設面のスケーリング試験を行うと、粗骨材の品質よりは、モルタルの品質の方がスケーリング量に大きな影響を与えやすかったものと考えられる。これに対して、切断面の場合は、切断面に現れる粗骨材も凍結融解作用を受けることとなり、粗骨材の品質の影響も無視し得なくなるものと考えられる。



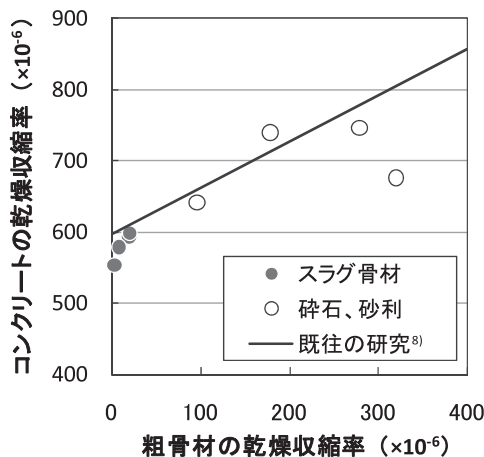
図一7 切断面の粗骨材の凍結融解損失質量とスケーリング量の関係

従って、舗装コンクリートとして、路面に粗骨材がある程度露出する状況を想定すれば、粗骨材の凍結融解損失質量を、舗装コンクリートのスケーリング抵抗

性の指標として考えられる可能性がある。ただし、今回検討した範囲では、切断面のスケーリング量が顕著に大きいものはなかった。粗骨材露出面におけるスケーリング影響への定量的な評価については、今後の検討課題である。

### 7. 乾燥収縮率試験

粗骨材の乾燥収縮率試験結果（表一2）と、JIS A 1129-2によるコンクリートの乾燥収縮率試験結果の関係を図一8に示す。スラグ粗骨材の乾燥収縮率は極めて小さく、コンクリートの乾燥収縮率は  $600 \times 10^{-6}$  以下であった。天然骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮率は、粗骨材の乾燥収縮率に応じて増加しており、既往の研究結果（図中の直線）<sup>8)</sup> とほぼ一致していた。スラグ骨材を用いることによりコンクリートの乾燥収縮率を抑制できる可能性がある。



図一8 粗骨材とコンクリートの乾燥収縮率の関係

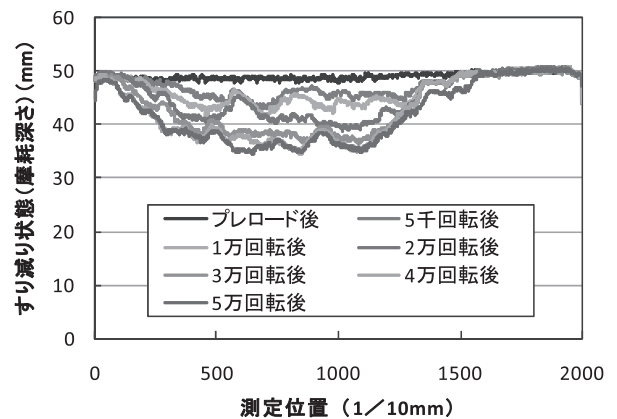
### 8. すり減り試験

コンクリートのすり減り試験として、スパイクチェーンによる回転ラベリング試験を文献<sup>5)</sup>により行なった。試験条件は表一4のとおりである。

ラベリング供試体は台形であり、上辺 21 cm、底辺 32 cm、高さ 20 cm、厚さ 5 cm である。28 日水中養生後に、同一条件の供試体を 2 体ずつ 6 種類、合計 12 体を円形状に並べ、試験を開始した。

スパイクチェーンを用いたラベリング試験前に供試体をなじませるために、テーブルに供試体を設置後にノーマルタイヤで 5 千回転させた（プレロード）。

ラベリング試験は、タイヤにスパイクチェーンを装着し、5 千回転、1 万回転、その後は 1 万回転ごとに摩耗深さを測定しながら、5 万回転まで実施した。摩耗深さは、走行直角方向の 3 断面をレーザー変位計によって測定した。図一9のタイヤの回転数ごとの摩耗深さの測定から摩耗した面積を求め、すり減り量 (cm<sup>2</sup>) を求めた。



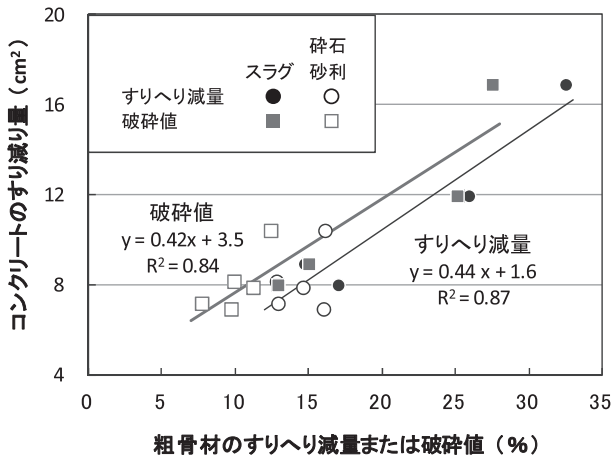
図一9 回転数ごとの摩耗深さの結果 (A20 の場合)

検討に用いたすり減り量は、表面のモルタルのすり減りの影響を取り除くため、5 万回転時と 1 万回転時のすり減り量の差を用いた<sup>9)</sup>。粗骨材のすりへり減量または破砕値とコンクリートのすり減り量の関係を図一10に示す。いずれも良い相関関係があり、粗骨材のすりへり減量または破砕値は、すりへり抵抗性の指標値として有効と考えられる。

また、図一1の粗骨材のすりへり減量と破砕値の相関関係だけでなく、粗骨材の破砕値とコンクリート

表一4 ラベリング試験の条件

プレロード および ラベリング	テーブル	試験温度	20℃	輪荷重	1.47 kN
		速度	20 km/h	供試体個数	12 個
	タイヤ	種類	145/80 R13	空気圧	157 kPa
		速度	20 km/h	キャンバー角	1.5 度
		シフト幅	± 20 mm	シフト速度	20 mm/min
ラベリング	スパイクチェーン	ピン数	54 本	散水量	2 L/min



図一 10 粗骨材のすりへり減量または破砕値とコンクリートのすり減り量の関係

のすり減り量の関係も良好であったことから、JIS A 1121 のロサンゼルス試験機によるすりへり減量の代替として BS 812-110 の破砕値を適用できる可能性は高い。

### 9. すべり試験

粗骨材の露出がすべりに及ぼす影響を確認するため、徐々にコンクリート表面を削り骨材露出面積を増やしながらすべり (BPN) を測定する方法ですべり試験を行なった (写真一 1)。BPN は、振り子式スキッドレジスタンステスタによる値 (British Pendulum Number) である<sup>6)</sup>。

粗骨材を露出させるため、すり減り試験と同じラベリング試験装置を用いて表面を削っていった。ラベリング試験条件は、表一 4 のスパイクチェーンを用い



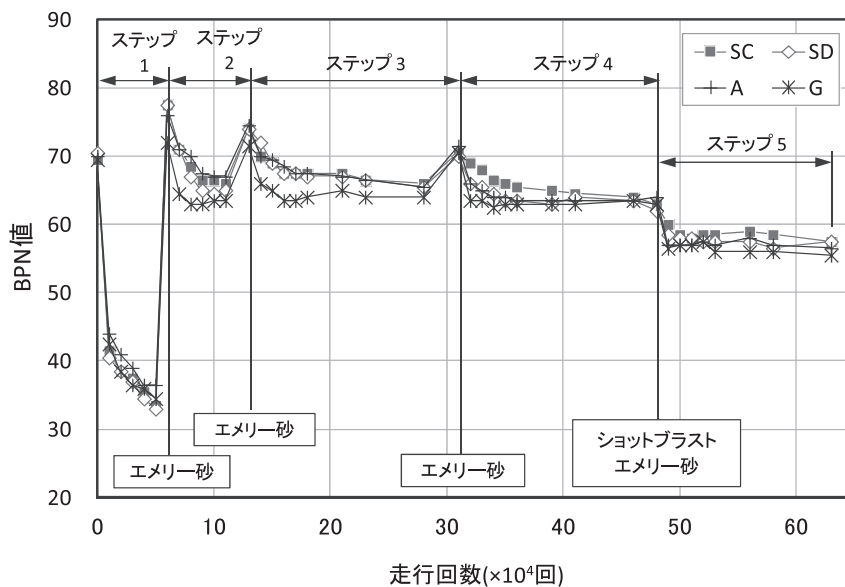
写真一 1 すべり試験の状況

なかつたこと以外は同じ条件で実施した。

試験手順は次のとおりである。

- ①こて仕上げた供試体表面の BPN を測定した。
- ②ノーマルタイヤを走行させ、BPN を 1 万回ごとに測定した (ステップ 1)。
- ③砂 (エメリー砂) を散布しながら 1 万回走行させ表面を研磨した。
- ④骨材露出率 (コンクリート面積に対する粗骨材面積の比率) 測定後、BPN を測定し、②を実施した (ステップ 2)。
- ⑤③、④をさらに 2 回実施した (ステップ 3、4、研磨量は表面から約 1 mm)。
- ⑥ショットブラストを行なって、研磨量を表面から数 mm 増やした後、③、④を実施した (ステップ 5)。

すべり試験結果を図一 11 に示す。ステップ 1 の BPN 値が小さい理由としては、コテ仕上げで供試体を仕上げたため表面に集まったペーストの影響と、



図一 11 すべり試験結果

ノーマルタイヤによる擦り磨きの影響が考えられる。

表面を徐々に削るにより骨材露出率を増加させており、ステップ2～ステップ5までの骨材露出率とBPN値の関係を図-12に示す。スラグ骨材SC、SDと砂岩Aの骨材露出率とBPN値の関係はほぼ同じであり、今回の実験ではスラグ骨材を用いてもすべり試験結果に顕著な影響はなかった。なお、砂利GのBPN値は、ほかの粗骨材よりもわずかに小さくなっている。この原因は、砂利の表面が滑らかなため、わずかに表面のモルタルが削られることによって、滑らかな表面が露出してすべりやすくなったものと考えられる。

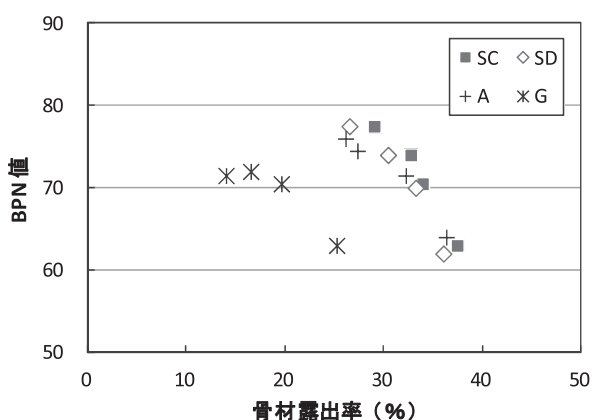


図-12 骨材露出率とBPNの関係

## 10. おわりに

以上の結果より、スラグ骨材を舗装コンクリートに用いた場合、乾燥収縮、スケーリングは改善される可能性がある。スラグ骨材の品質によってはすり減り抵抗性が低下するおそれがあるが、その程度については、粗骨材のすりへり減量または破碎値から推測できることなどが明らかになった。

この研究は、東京農業大学、セメント協会、太平洋セメント、日本道路との共同研究で実施したものである。本文の詳細な結果や表-1に示したそのほかに検討した結果は、文献10)～14)に取りまとめているので、必要に応じて参照願いたい。

JCMA

### 《参考文献》

- 1) (公社)日本道路協会：コンクリート舗装に関する技術資料, pp.7～12, 2009.8
- 2) 森濱和正ほか：スラグ骨材を用いた舗装用コンクリートの特性, 土木技術資料, Vol.57, No.12, pp.20-25, 2015.12
- 3) (公社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧第3分冊, pp.204～206, 2007.6
- 4) 前掲書3)第3分冊, pp.269～276
- 5) 前掲書3)第3分冊, pp.17～38
- 6) 前掲書3)第1分冊, pp.92～97
- 7) 渡辺博志, 片平博, 伊佐見和夫, 山田宏：骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究, 土木研究所資料第4199号, 2011.3
- 8) (公社)日本コンクリート工学会：コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関する調査研究委員会報告書, pp.195～201, 2012.8
- 9) 森濱和正ほか：砕石, 砂利を用いた舗装コンクリートの強度, すりへり抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1624～1629, 2014.7
- 10) 骨材資源を有効活用した舗装用コンクリートの耐久性確保に関する共同研究報告書第455号I各種粗骨材の舗装コンクリートへの適用性 (1)骨材試験, コンクリートの配合および強度試験, 2014.3
- 11) 前掲書10)第462号, (2)舗装コンクリートの耐久性試験, 2015.3
- 12) 前掲書10)第477号, (3)舗装コンクリートの施工性, 走行安全性および耐久性試験, 2016.1
- 13) 前掲書10)第482号, (4)舗装コンクリートの曲げ疲労試験, 2016.3
- 14) 前掲書10)第483号, II舗装コンクリートの要求性能に対する粗骨材品質の影響並びに品質管理試験の提案, 2016.3

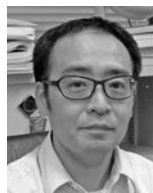
### 【筆者紹介】



森濱 和正 (もりはま かずまさ)  
 (国研) 土木研究所  
 先端材料資源研究センター  
 材料資源研究グループ  
 特任研究員



加藤 祐哉 (かとう ゆうや)  
 (国研) 土木研究所  
 先端材料資源研究センター  
 材料資源研究グループ  
 研究員



古賀 裕久 (こが ひろひさ)  
 (国研) 土木研究所  
 先端材料資源研究センター  
 材料資源研究グループ  
 上席研究員