

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

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¹⁾。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ていることを既に本誌で報告している²⁾。

本報告では、スラグ骨材を用いた場合の検討結果を紹介する。検討内容は、コンクリート配合³⁾、硬化後の強度⁴⁾、凍結融解抵抗性⁵⁾、スケーリング抵抗性⁶⁾、乾燥収縮特性⁷⁾などの特性のほか、走行安全性の観点からすり減り抵抗性⁸⁾、すべり抵抗性⁹⁾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、それらを確認するための試験方法は、表-1のとおりである。

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の試験が行われているが、粗骨材の品質によって、表面からの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て検討した。すり減り試験とすべり試験は舗装調査・試験法便覧^{11),12)}に示されている。舗装コンクリートは、曲げ疲労強度なども重要であるが、現在実施中であり、本報

告には含まれていない。

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砕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¹³⁾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、スラグ骨材は入手できなかったため20mmで検討した。ただし、砂利Gは40mmを破砕した玉砕25mmである。

骨材品質については、JISに基づく一般的な物理

表-1 舗装コンクリートと粗骨材に求められる性能及び品質と試験方法

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	
強度	曲げ強度	JIS A 1106	密度・吸水率	JIS A 1110
	曲げ疲労強度	舗装調査・試験法便覧 ¹⁰⁾	破砕値	BS 812
走行 安全性	すり減り	舗装調査・試験法便覧 ¹¹⁾	すりへり減量	JIS A 1121
	すべり	舗装調査・試験法便覧 ¹²⁾	ポリッシング (PSV) (実施中)	BS 812
耐久性	凍結融解	JIS A 1148	安定性	JIS A 1122
	スケーリング	ASTM C672	簡易凍結融解	土木研究所資料 第4199号 ¹³⁾
長さ変化	乾燥収縮	JIS A 1129	乾燥収縮	—
	弾性係数	JIS A 1149 曲げ試験時のたわみ	—	—
	線膨張係数	—	—	—

表-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 ³	絶乾密度 g/cm ³	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 ^{注1)} %	乾燥収縮率 ^{注2)} ×10 ⁻⁶	凍結融解損失質量 ^{注3)} %
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	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	9	2.3
碎石	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	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 1) BS812。注 2)、3) 土木研究所資料第 4199 号¹³⁾。ただし 3)は、塩水の濃度 3%、凍結融解 30 サイクルの結果。

表-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 ³)				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

目標スランプ: 5cm、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。

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、破砕値が大きく、使用した際のすりへり抵抗性に懸念がある。また、骨材の吸水率が大きく、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量は比較的小さかった。

SBは、骨材試験の結果、良質な天然骨材と同程度の品質を有していた。SCは、SAと同様にすり減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、破砕値試験も行なった。すりへり減量と破砕値の関係は図-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。

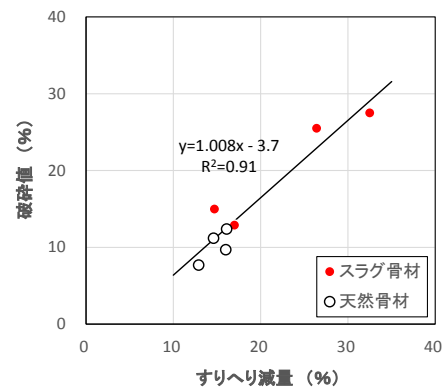


図-1 すりへり減量と破砕値の関係

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-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6.0MPa、スランプ5cm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-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6~7MPaの範囲に入っていた。

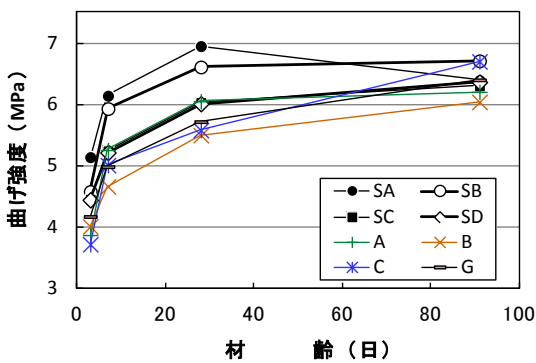


図-2 材齢と曲げ強度の関係

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-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、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が影響したと考えられる。

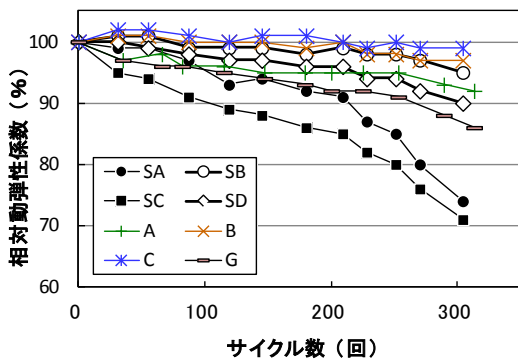


図-3 凍結融解試験の結果

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-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。

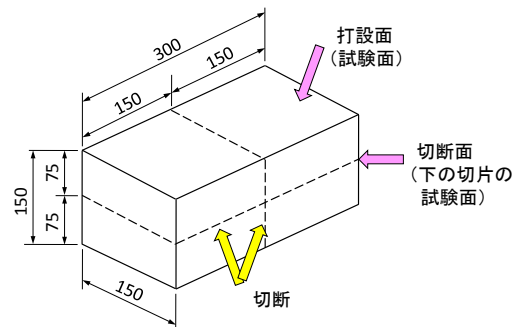


図-4 スケーリング供試体

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、 $-20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ で16時間、 $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 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-3)が最も低下したSCと、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-5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。

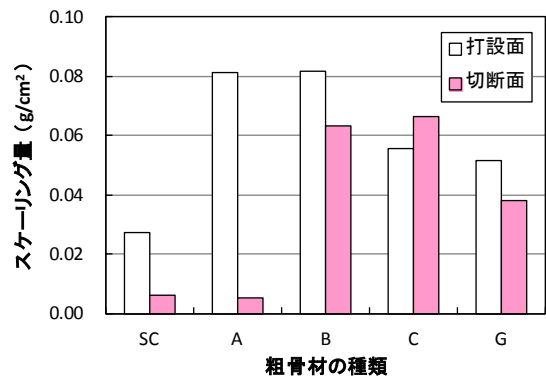


図-5 スケーリング量 (100サイクル)

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-6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い。

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。

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るのであれば、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捉える必要がある。

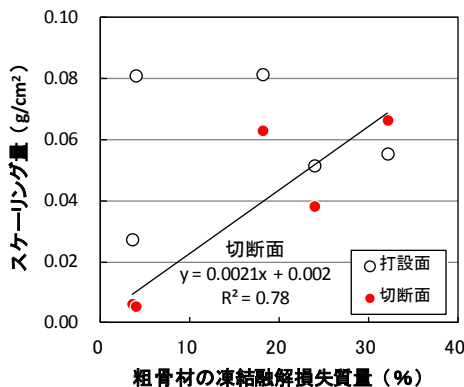


図-6 切断面の粗骨材の凍結融解損失質量とスケーリング量の関係

7. 乾燥収縮率試験

粗骨材の乾燥収縮率試験結果（表-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⁷⁾の関係を図-7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 600×10^{-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）¹⁴⁾とはほぼ一致していた。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。

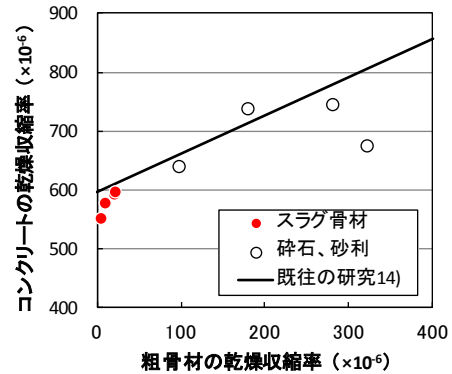


図-7 粗骨材とコンクリートの乾燥収縮率の関係

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11)により行なった。試験条件は表-4のとおりである。

ラベリング供試体は台形であり、上辺21cm、底辺32cm、高さ20cm、厚さ5cm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。

表-4 ラベリング試験の条件

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

スパイクチェーンを用いての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-8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 (cm²) を求めた。

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¹⁵⁾。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-9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-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の破砕値を適用できる可能性がある。

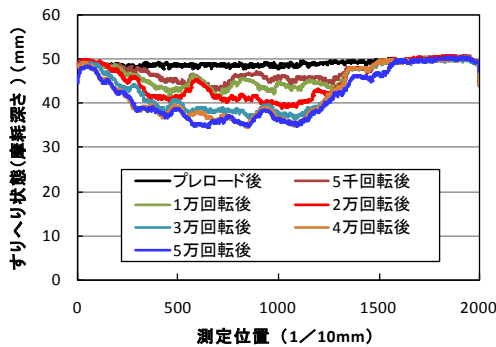


図-8 回転数ごとの摩耗深さの結果 (A の場合)

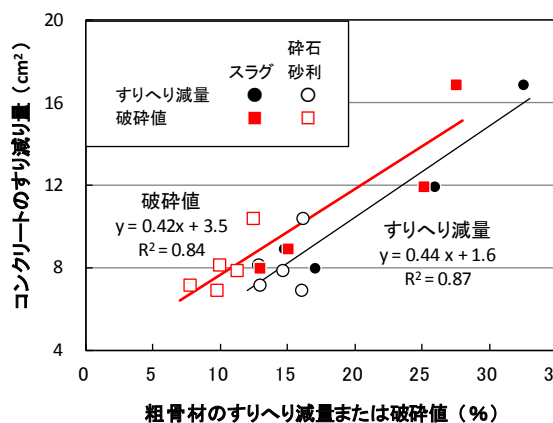


図-9 粗骨材のすりへり減量または破砕値とコンクリートのすり減り量の関係

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-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¹²⁾。

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-4のスパイクチェーンを用いなかったこと以外は同じ条件で実施した。



写真-1 すべり試験の状況

試験手順は次のとおりである。

- ① コテ仕上げした供試体表面の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)。
- ⑤ ③、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1mm)。
- ⑥ ショットブラストを行なって、研磨量を表面か

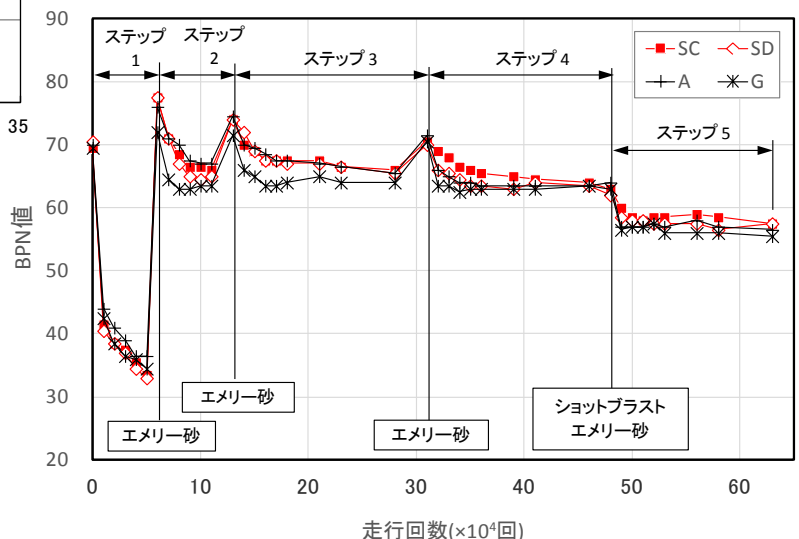


図-10 すべり試験結果

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-10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、ノーマルタイヤによる擦り磨きの影響が考えられる。

表面を徐々に削ること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-11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。

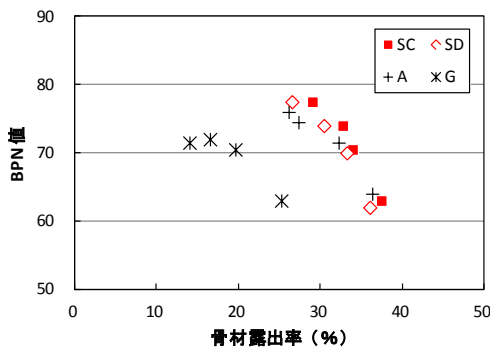


図-11 骨材露出率とBPNの関係

10. まとめ

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。一方で、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こと、その程度については、粗骨材のすりへり減量または破砕値から推測できることなどが明らかになった。

今後、得られたデータを取りまとめてスラグ骨材を用いる場合の品質管理項目等を示す予定である。

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。

参考文献

- (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
- 渡辺博志ほか：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研究、土木技術資料、第57巻、第3号、pp.50～51、2015
- 森濱和正ほか：各種骨材を用いた舗装コンクリートの配合試験、土木学会論文集E1（舗装工学）、Vol.69、No.3、pp. I -81～I -86、2013.12
- 森濱和正ほか：スラグ骨材を用いた舗装コンクリートの強度に関する検討、第68回セメント技術大会講演概要集、pp.70～71、2014.5
- 石田征男ほか：各種粗骨材を用いた舗装コンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究、第69回年次学術講演会第V部、pp.991～992、2014.9
- 森濱和正ほか：舗装コンクリートのスケーリング抵抗性に関する実験的検討、第69回セメント技術大会講演概要集、pp.198～199、2015.5
- 渡辺博志ほか：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 I 各種粗骨材の舗装コンクリートへの適用性(2)舗装コンクリートの耐久性試験、共同研究報告書第462号、pp.27～30、2015.3
- 勝畑敏幸ほか：スラグ骨材を用いた舗装コンクリートのすり減り抵抗性に関する検討、第68回セメント技術大会講演概要集、pp.72～73、2014.5
- 加藤学ほか：各種粗骨材を用いた舗装コンクリートのすり抵抗性に関する検討、第31回日本道路会議舗装部門、3097、2015.10
- (公社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧第3分冊、pp.269～276、2007.6
- 前掲書10) 第3分冊、pp.17～38
- 前掲書10) 第1分冊、pp.92～97
- 渡辺博志、片平博、伊佐見和大、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
- (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
- 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

森濱和正



土木研究所先端材料資源研究センター 総括主任研究員
Kazumasa MORIHAMA

加藤祐哉



土木研究所先端材料資源研究センター 研究員
Yuya KATO

古賀裕久



土木研究所先端材料資源研究センター 上席研究員
Hirohisa KOGA