

スラグ骨材を用いた舗装用コンクリートの特性（その2） ～材料分離試験や曲げ疲労試験～

加藤祐哉・森濱和正・古賀裕久

1. はじめに

コンクリート舗装は耐久性が高く、ライフサイクルコスト低減のために普及が期待されているが¹⁾、普及促進には材料面や施工面での自由度を拡大し適用箇所を拡大すること必要である。また、資源の有効活用の観点から、スラグ骨材の適用も期待されている。そこで、筆者らは高炉スラグ、電気炉酸化スラグを含む各種粗骨材を用いた舗装コンクリートについて検討²⁾し、乾燥収縮、スケーリングは改善される可能性があること、骨材によってはすり減り抵抗性が減少する可能性があるが、既存の骨材試験でスラグ骨材も評価できることなどを報告している³⁾。

本報告では、スラグ骨材を用いた場合の材料分離抵抗性⁴⁾、曲げ疲労強度⁵⁾に関する検討結果を報告する。

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、それらを確保するための試験方法を表-1に整理した。

施工性に関して、一部のスラグ骨材のように天然骨材と比較して密度が大きいものを用いると骨材の沈降による材料分離の懸念があることから、材料分離抵抗性に関する検討を行った。

また、舗装コンクリートの強度特性として、曲げ強度が指標とされる場合が多いが、車両等による繰返し载荷を受けることから曲げ疲労強度も重要な性能である。そこで、スラグ骨材等を用いた場合の曲げ疲労強度に及ぼす影響について、今回、試験を行って検討した。

3. 使用した骨材

使用した粗骨材は、表-2及び写真-1に示すものを用いた。スラグ骨材は、JIS A 5011（コンクリート用スラグ骨材）に合致したものであるが、高炉スラグのSA20及びSC20は多孔質であり、吸水率がコンクリート用砕石の規定（3.0%以下）より大きい。また、電気炉酸化スラグのSD20は密度が一般的な天然骨材と比較して著しく大きい。このようにスラグ骨材を用いた場合の影響を明らかにするために、

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	
	求められる性能	試験方法	項目	試験方法
施工性	締固め性・充填性	JSCE-F 501 JIS A 1101 フローテーブルによる 締固め・変形性試験 ⁶⁾	最大寸法、粒度	JIS A 1102 JIS A 1103 JIS A 1104 JIS A 1110
	ダレ抵抗性	ダレ試験 ⁷⁾		
	材料分離抵抗性	材料分離試験	密度、吸水率	
強度特性	曲げ強度	JIS A 1106	密度、吸水率、 骨材強度（破砕値）、最大寸法	JIS A 1110 BS 812-110 JIS A 1102
	弾性係数	JIS A 1149 曲げ試験による弾性係数試験		
	曲げ疲労強度	舗装調査・試験法便覧B070T		
	引張軟化特性	JCI S 001		
体積変化	線膨張係数	線膨張係数試験	熱膨張特性	—
	長さ変化（乾燥収縮）	JIS A 1129	乾燥収縮特性	土木研究所資料第4199号 ⁸⁾
	自己収縮	JCI-SAS2	—	—
走行安全性	すべり抵抗性	舗装調査・試験法便覧S021	PSV	BS 812-114
	すり減り抵抗性	舗装調査・試験法便覧B002	すりへり減量 破砕値	JIS A 1121 BS 812-110
耐久性	凍結融解抵抗性	JIS A 1148	吸水率 安定性	JIS A 1110 JIS A 1122
	スケーリング抵抗性	ASTM C 672	凍結融解抵抗性	土木研究所資料第4199号 ⁸⁾ 参考

※ゴシック体：本報告で記述する項目 斜体：前報告³⁾で記述した項目

表-2 粗骨材の種類と品質試験結果

骨材の種類	記号	粒度範囲 (mm)	表乾	絶乾	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/L)	実積率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
			密度 (g/cm ³)	密度 (g/cm ³)					
高炉スラグ	SA20	20~5	2.54	2.42	4.76	1.397	57.7	6.88	1.6
	SC20		2.66	2.58	3.17	1.507	58.5	6.33	0.6
電気炉酸化スラグ	SD20		3.73	3.70	0.92	2.106	57.8	6.55	0.2
硬質砂岩砕石	A20		2.68	2.66	0.40	1.610	60.4	6.67	1.1
	A40	40~5	2.68	2.67	0.34	1.632	61.1	7.28	1.2
砂利	G25	25~5	2.64	2.61	1.32	1.594	61.2	6.83	0.1
	G40	40~5	2.64	2.61	1.20	1.646	63.2	7.41	0.2



(a) SA (高炉スラグ) (b) SC (高炉スラグ) (c) SD (電気炉酸化スラグ)



(d) A (硬質砂岩砕石) (e) G (砂利)

写真-1 粗骨材の種類と外観

表-3 材料分離試験に用いたコンクリートの配合条件

W/C	45%
かさ容積*	0.72
目標スランプ	2.5cm、6.5cm、10.5cm
単位水量	目標スランプとなるように設定
空気量	4.5±1%

*単位粗骨材かさ容積を「かさ容積」と記載

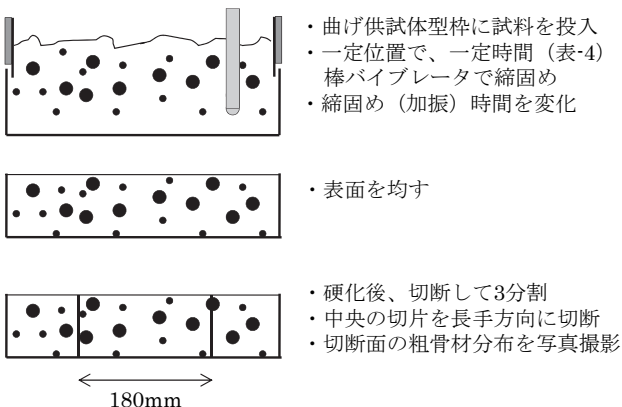


図-1 材料分離試験の手順

表-4 材料分離試験の締固め時間

目標スランプ (cm)	締固め時間(秒)		
	標準	2倍	過剰
2.5	10	20	30
6.5	8	15	30
10.5	5	10	20

天然骨材とは異なる物性を有するものを選定した。比較用に一般的な天然骨材である硬質砂岩砕石のA及び砂利Gも用いた。

4. 材料分離抵抗性

4.1 材料分離抵抗性の評価の必要性

舗装コンクリートは、沈下度30秒程度 (スランプで2.5cm程度) のものが一般的であり、このような硬練りのコンクリートはダンプトラックで運搬されるが、トンネル内のように荷下ろしが困難な場合など、施工条件によってはスランプが大きなコンクリートも用いられる。

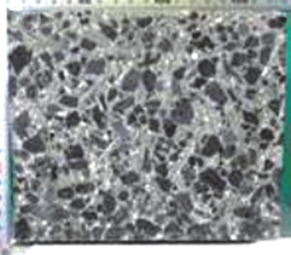
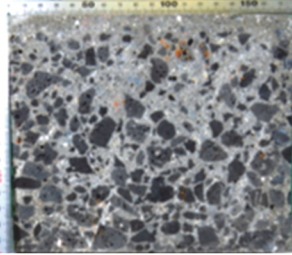
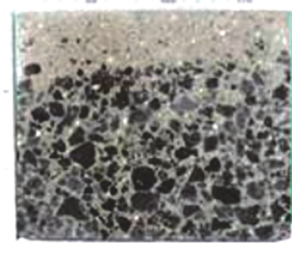
スランプが大きい場合や、密度の大きい粗骨材を利用する場合は、粗骨材の沈降による材料分離が生じやすくなると考えられる。そこで、施工性確保のために、材料分離抵抗性の評価が必要である。

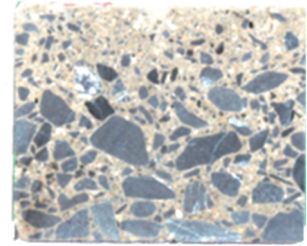
4.2 材料分離試験方法

材料分離抵抗性の評価について、以下の方法で評価を行った。

- (1) 表-2に示す粗骨材のうち、SC20、SD20、A20、A40の4種類の粗骨材を用い、表-3に示す配合条件の舗装コンクリートを練混ぜ、図-1に示す手順で供試体を作製する。
- (2) 締固め時間は、表-4に示すとおり、目標スランプに応じて3水準とした。ここで、気泡がほぼ出なくなる時間を適切な締固めに必要な時間と考え、「標準」とした。また、「2倍」、更に「標準」の3~4倍程度の「過剰」を設定した。
- (3) 硬化後のコンクリート切断面で粗骨材の分布状況を確認し、表-5に示す判定基準を基に、材料分離抵抗性を評価した。(a)は全体に粗骨材が分布し、打設面付近まで粗骨材が確認できることから、「○：分離しなかった」と評価した。(c)は粗骨材が沈降して打設面付近に粗骨材がほとんど確認できないことから、「×：分離した」と評価した。(b)のように、打設面付近は粗骨材が少ないまたは粒径の小さなもののみが確認できるといったものについては、「△：やや分離した」と評価した。

表-5 切断面の粗骨材分布状況と材料分離抵抗性の評価判定例 (SD20)

○:分離しなかった	△:やや分離した	×:分離した
		
(a)粗骨材SD20, 目標スランプ2.5cm, 締固め時間「標準」	(b)粗骨材SD20, 目標スランプ6.5cm, 締固め時間「標準」	(c)粗骨材SD20, 目標スランプ2.5cm, 締固め時間「過剰」



粗骨材A40, スランプ10.5cm, 締固め時間「2倍」

写真-2 切断面の粗骨材分布

表-6 材料分離試験の結果

	使用粗骨材		目標スランプ (cm)	締固め時間		
	表乾密度 (g/cm ³)	最大寸法 (mm)		標準	2倍	過剰
SC20 (高炉スラグ)	2.66	20	2.5	○	○	○
			6.5	○	○	△
			10.5	○	△	×
SD20 (電気炉酸化スラグ)	3.72	20	2.5	○	×	×
			6.5	△	×	×
			10.5	×	×	×
A20 (硬質砂岩 碎石)	2.67	20	2.5	○	○	△
			6.5	○	○	△
			10.5	○	△	×
A40 (硬質砂岩 碎石)	2.68	40	2.5	○	○	△
			6.5	○	△	×
			10.5	○	×	×

凡例: ○:分離しなかった △:やや分離した ×:分離した

表-7 曲げ疲労試験に用いたコンクリートの配合条件・基本性状

粗骨材の種類	W/C (%)	かさ容積	単位水量 (kg/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	曲げ強度 (MPa)
SA20	37.2	0.72	160	8.0	4.4	6.72
SD20	48.4		160	3.9	4.6	6.10
A20	49.2		145	4.0	4.4	6.06
A40	47.3		135	6.0	4.3	6.09
G25	43.9		145	4.0	4.6	6.16
G40	38.4		128	7.0	5.1	6.03

4.3 材料分離抵抗性の検討結果

分離状況の一覧を表-6に示す。

まず、締固め時間が「標準」の場合について見ると、密度の大きなSD20を用いた場合は、目標スランプが2.5cmでは分離しなかったが、それよりスランプが大きい配合では分離が生じた。SD20以外の粗骨材を用いた配合では、分離は生じなかった。

次に、締固め時間が「2倍」の場合、SD20の配合は全て分離が生じた。このように、粗骨材の密度が天然骨材と大きく異なる骨材 (SD20) については、配合選定や締固め時間に特に留意が必要であることが確認された。

一方、A20とA40を比較すると、最大寸法の大きなA40の方が分離しやすい傾向を示し、D20に次い

で分離しやすい結果となった。ここで、断面写真 (写真-2) によると、粒径の大きな粗骨材はほぼ沈降しており、最大粗骨材寸法が大きい場合は小さい場合よりも、沈降による材料分離に留意が必要と考えられる。

5. 曲げ疲労特性

5.1 概要

コンクリート舗装は曲げ荷重が繰返し作用する構造物であり、設計の際は輪荷重応力と温度応力の繰返し作用に対して照査を行うなど、疲労特性は重要な性能である。本章では、スラグ骨材などが舗装コンクリートの曲げ疲労特性に及ぼす影響を評価した結果について報告する。

5.2 試験条件

曲げ疲労試験には、表-2に示す粗骨材のうち、SA20、SD20、A20、A40、G25、G40の6種類の粗骨材を用い、表-7に示す配合条件の舗装コンクリートを用いた。なお、同時期に8種類の石灰石粗骨材を用いた曲げ疲労試験も実施したが、本報告では割愛する。また、この配合のスランプ、空気量、曲げ強度 (静的) は表-7に示す通りであり、曲げ強度はおおよそ6MPaであった。

曲げ疲労試験は、舗装調査・試験法便覧B070T「コンクリートの曲げ疲労試験方法」を参考として行った。供試体寸法は150mm×150mm×530mmの角柱型とし、骨材分離などの異常が生じないように締固め時間に十分注意して作製した。載荷方法は支点間距離が450mmの三等分点載荷とした。試験は91日以上標準水中養生後に実施し、試験中は供試体が乾燥しないようにグリステフィルムを用いて封緘した状態とした。

載荷は、上限荷重を静的曲げ強度の90%、80%、70% (それぞれ応力レベル0.9、0.8、0.7とよぶ) に相当する荷重、下限荷重を0.27MPaに相当する

表-8 疲労破壊繰返し回数 (平均値)

骨材種類	SA20	SD20	A20	A40	G25	G40	
応力レベル	0.9	604	1,200	873	1,695	2,145	2,435
	0.8	5,174	23,296	19,677	4,337	13,526	35,024
	0.7	57,211	985,591	83,118	362,388	457,549	394,661

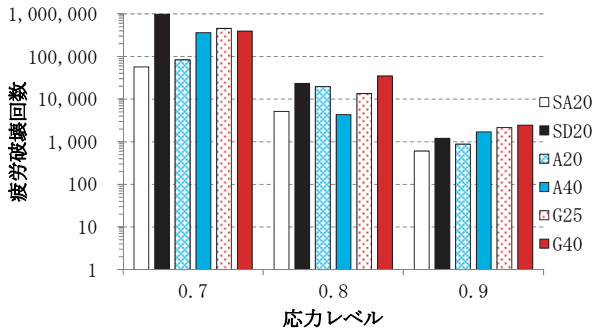


図-2 曲げ疲労試験の結果

2kNとし、5Hzの正弦波で繰返し载荷を行った。供試体数は1つの配合で6本（応力レベル0.7のみ、6～9本）とし、繰返し载荷によって供試体が破壊しない場合は、繰返し回数が200万回となった時点で試験を打ち切った。

5.3 試験結果の整理

曲げ疲労試験の結果（平均値）を表-8及び図-2に示す。疲労破壊回数は、応力レベルにより大きく異なり応力レベル0.9では600～2,500回程度、応力レベル0.7では5万～100万回程度に達した。

ここで、同時期に実施した石灰石粗骨材を用いたコンクリートの結果と合わせて、**チューキー=クレーマー法**※により、応力レベルごとに粗骨材種類間の多重比較検定を行うと、応力レベル0.7のSA20やA20とSD20間のみ1%有意差が認められたが、その他の粗骨材では有意差は認められなかった。応力レベル0.8及び0.9では全ての粗骨材で有意差が認められなかった。今回の実験の範囲では、粗骨材の種類による曲げ疲労強度の差は明確ではなかった。

6. まとめ

スラグ骨材を舗装コンクリートへ適用した結果、次のことが分かった。

- (1) スラグ骨材の中で密度が特に大きな電気炉酸化スラグを用いた場合は、沈降による材料分離が生じやすい傾向を示した。密度が一般的な骨材と大きく異なるものを用いる場合は、スランプや振動締固め時間の適切な管理が必要である。
- (2) 粗骨材の最大寸法が大きい場合も、比較的材料分離が生じやすい傾向を示した。
- (3) 粗骨材の種類を変えて曲げ疲労試験を行った結果、疲労試験結果には有意な違いはほとんど示されなかった。

この研究成果は、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成果である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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、第57巻、第12号、pp.20～25、2015
- 4) 加藤祐哉ほか：各種粗骨材を用いた舗装コンクリートの材料分離抵抗性に関する検討、土木学会第71回年次学術講演会講演概要集、V、pp.37～38、2016
- 5) 土木研究所ほか：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 (4)舗装コンクリートの曲げ疲労試験、共同研究報告書第482号、2016
- 6) 加藤祐哉ほか：舗装コンクリートのフローテーブルによる施工性評価の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、No.1、pp.1665～1670、2016
- 7) 森濱和正ほか：舗装コンクリートのダレ試験に関する検討、土木学会第71回年次学術講演会講演概要集、V、pp.33～34、2016
- 8) 土木研究所：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

加藤祐哉



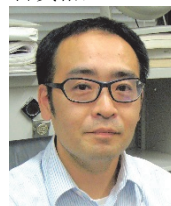
土木研究所先端材料資源研究センター 研究員
Yuya KATO

森濱和正



研究当時 土木研究所先端材料資源研究センター特任研究員
Kazumasa MORIHAMA

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

※土木用語解説：チューキー=クレーマー法