

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

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 24～平 27

担当チーム：基礎材料チーム

研究担当者：渡辺 博志、森濱 和正

【要旨】

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が低減できるため、その普及が期待されている。コンクリートの主要材料である粗骨材は、天然砂利が減少し、碎石や石灰石骨材が増えている。また、産業廃棄物削減を目的に各種スラグ骨材の有効利用が求められるなど、骨材資源が多様化している。そこで、各種粗骨材の舗装コンクリートへの適用性を明らかにすることを目的に研究を行なっている。

25年度は、各種骨材を用いた舗装コンクリートの強度試験、ラベリング試験、凍結融解試験、長さ変化試験などを行なった。その結果、それらの特性は骨材物性によって評価できる可能性があることが明らかになった。

キーワード：石灰石骨材、スラグ骨材、強度試験、ラベリング試験、凍結融解試験、長さ変化試験

1. はじめに

我が国の道路舗装に占めるコンクリート舗装のシェアは 5%程度であり、ほとんどはアスファルト舗装である¹⁾。しかし、コンクリート舗装は耐久性が高いこと、そのためライフサイクルコストがアスファルト舗装よりも低く抑えられることなどの長所もあり²⁾、見直されてきている。

コンクリート舗装の普及促進に向けては、根拠が不明確なまま残されている仕様規定を改め、性能規定化を進めることにより、舗装コンクリートの高い耐久性を確保した上で、材料面や施工面での自由度を拡大してゆくことが非常に重要となる。

例えば、粗骨材については、最大寸法と骨材の種類の問題が考えられる。舗装に用いる粗骨材の最大寸法（Gmax）は 40mm が一般的である。しかし、生コンプラントが使用している粗骨材は、最近では Gmax 20mm または 25mm（以下、20/25 と表記）の場合がほとんどである。このため、舗装用コンクリートに用いる粗骨材の仕様を Gmax 40mm で決定した場合、生コンプラントでは粗骨材を入れ替えるなどの対応が発生し、コンクリートの調達に支障が生じることとなる。このような問題を回避するためには、Gmax 20/25mm の粗骨材でも要求性能を満足する舗装コンクリートが製造できることを示す必要がある。また、最近では、コンクリートの収縮低減を重視するあまり石灰石の使用が増えてきている。しかし、資源の有効活用の観点からは、スラグ骨材の使

用が求められている。

次に、舗装コンクリートのワーカビリティについては、現在、スランプ 2.5 cm、振動台式コンシステンシー試験³⁾による沈下度 30 秒として仕様を定めることが一般的である。しかし、このような硬練りのコンクリートを運搬するためには、通常のトラックアジテータではなく、ダンプトラックを用いることとなる。ダンプトラックにより運搬をすると、トラックアジテータの休業補償が必要になるなど大幅なコストアップにつながる問題も発生する。舗装としての要求性能を満足できる範囲でワーカビリティを改善し、トラックアジテータによる運搬を可能にするなど、一般のコンクリート製造設備でも製造・供給できるようにする必要がある。

また、コンクリートの強度管理は曲げ強度試験が行われている。供試体が重く、曲げ試験装置が必要なことなどから、大変な労力が必要である。

このような背景のもとに、平成 24 年度より、(学)東京農業大学、(一社)セメント協会、太平洋セメント(株)、日本道路(株)の 4 機関との共同研究により、各種骨材を舗装コンクリートとして用いる場合の、骨材に要求される品質を明確にすること、施工、強度管理の合理化を目的に研究を開始した。

平成 24 年度に、通常用いられている砂利と碎石 4 種類と、産地の異なる石灰石 4 種類の Gmax 40mm と 20/25mm、製造所の異なるスラグ骨材 Gmax 20mm を 4 種類、合計 20 種類を集め、骨材の各種物理試験

と、舗装コンクリートの配合を決定した⁴⁾。

平成 25 年度は、前年度に決定した配合のコンクリートについて強度試験、ラベリング試験、凍結融解試験、長さ変化試験などを行い、強度管理の合理化、骨材品質と舗装コンクリートのすり減り量の評価などについて検討した。

2. 骨材の種類と物性試験⁴⁾

2. 1 骨材の種類

粗骨材は、表 1 に示すように、砂利が 1 種類、砕石が 7 種類、スラグ骨材が 4 種類の合計 12 種類である。生コン工場で一般に使用されている砂利 G と硬質砂岩 A、B と安山岩 C、今後使用の増加が見込まれる石灰石骨材 LA~LD の 4 種類、スラグ骨材 SA~SD の 4 種類である。スラグ骨材の Gmax は 20mm のみとし、そのほかの粗骨材は 20/25mm と 40mm である。

粒度範囲が 25~5mm (以下、2505 のように表記) の砂利 G は、Gmax 40mm の砂利を破碎したもの(玉砕)である。また、Gmax 40mm の砂利は、粒度範囲 40/25 の砂利と、2505 の玉砕を混合したものである。石灰石骨材は、産地が異なる 4 種類を使用した。スラグ骨材のうち、SA~SC は製鉄所の異なる高炉スラグであり、SD は電気炉酸化スラグである。

細骨材は、川砂である。

表 1 骨材の種類

骨材の種類		記号		粒度範囲 (mm)	
粗骨材	砂利	玉砕	G	G25	2505
		砂利+玉砕	G	G40	4005
	砕石	硬質砂岩	A	A20	2005
				A40	4005
			B	B20	2005
				B40	4005
		安山岩	C	C20	2005
				C40	4005
	石灰石	LA	LA20	2005	
			LA40	4005	
		LB	LB20	2005	
			LB40	4005	
LC		LC20	2005		
		LC40	4005		
LD	LD20	2005			
	LD40	4005			
スラグ骨材	高炉スラグ	SA	SA20	2005	
		SB	SB20	2005	
		SC	SC20	2005	
	電気炉酸化スラグ	SD	SD20	2005	
細骨材	川砂		—	—	—

2. 2 試験項目と試験方法

試験した項目と試験方法は、表 2 のとおりである。すりへり試験時の粒度区分は、Gmax 40mm は A、20/25mm は C とした。

表 2 骨材の試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
骨材のふるい分け試験	JIS A 1102
骨材の微粒分量試験	JIS A 1103
骨材の単位容積質量及び実積率試験	JIS A 1104
細骨材・粗骨材の密度及び吸水率試験	JIS A 1109, 10
ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験	JIS A 1121
硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験	JIS A 1122
骨材破碎値試験	BS 812

2. 3 試験結果

骨材の試験結果は、表 3 のとおりである。

密度と吸水率の関係を図 1、吸水率と安定性損失質量の関係を図 2、安定性損失質量と破碎値の関係を図 3、すりへり減量と破碎値の関係を図 4 に示す。

図 1 より、密度が大きくなれば吸水率が小さくなるという一般的な傾向を示している。スラグ骨材とそのほかの骨材では傾向が異なり、スラグは密度に対して吸水率が大きい。石灰石 LA~LD は、密度 2.7g/cm³ あたりに一固まりになっており、今回使用した 4 種類はほぼ同じ品質と考えられる。石灰石、砕石(硬質砂岩 A、B、安山岩 C) および砂利 G の Gmax 20/25mm と 40mm では大きな違いはない。スラグ骨材の SB は良質であるが、SA は吸水率が 4%以上であり、JIS A 5011-1 では区分 L に分類される。SC は区分 N であるが、吸水率は 4%に近い。

図 2 も、スラグ骨材はその他の骨材とは異なった傾向を示しており、吸水率が大きくても安定性損失質量は小さい。

図 3 より、砂利、砕石は安定性損失質量の変化に対して破碎値の変化はわずかであるが、スラグ骨材の破碎値の変化は大きい。安定性試験は内部からの膨張圧、破碎値試験は外部からの圧縮力による割裂強度の指標と考えられるが、骨材の種類によってその破壊機構は異なっているのかもしれない。

図 4 より、すりへり減量と破碎値の間には、骨材の種類にかかわらず、高い相関関係がある。試験の煩雑などを考慮すると、破碎値試験はすりへり試験の代替になり得る可能性がある。

表3 骨材試験結果

骨材の種類		記号	粒度範囲	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 (%)		
粗骨材	砂利(玉砕)	G	2505	2.639	2.605	1.32	1.594	61.2	6.83	0.1	4.9	14.6	11.2		
			4005	2.638	2.606	1.20	1.646	63.2	7.41	0.2	5.9	17.6	10.5		
	硬質砂岩	A	2005	2.676	2.665	0.42	1.609	60.4	6.63	1.1	0.1	12.9	7.7		
			4005	2.682	2.672	0.37	1.619	60.6	7.26	1.2	0.6	13.1	8.4		
		B	2005	2.648	2.629	0.70	1.651	62.8	6.70	0.5	1.3	16.0	9.7		
			4005	2.655	2.639	0.58	1.655	62.7	7.35	0.6	1.9	16.6	8.6		
		安山岩	C	2005	2.628	2.567	2.38	1.552	60.5	6.68	0.1	6.7	16.1	12.4	
				4005	2.634	2.586	1.88	1.543	59.7	7.30	0.3	3.5	17.7	10.4	
	石灰石	LA	2005	2.699	2.688	0.41	1.574	58.5	6.63	2.0	0.7	24.1	23.0		
			4005	2.702	2.693	0.34	1.647	61.2	7.29	0.9	1.9	28.5	20.1		
		LB	2005	2.709	2.703	0.23	1.681	62.3	7.16	2.3	0.6	23.4	20.7		
			4005	2.711	2.705	0.21	1.637	60.5	7.37	1.1	0.6	27.7	18.9		
		LC	2005	2.703	2.694	0.35	1.564	58.1	6.80	0.9	1.3	24.3	22.3		
			4005	2.704	2.696	0.31	1.594	59.1	7.14	0.3	0.6	27.8	17.9		
		LD	2005	2.691	2.677	0.54	1.559	58.3	6.70	1.2	0.8	23.6	22.9		
			4005	2.697	2.683	0.51	1.602	59.7	7.36	0.3	0.9	27.2	21.3		
		スラグ骨材	高炉スラグ	SA	2005	2.536	2.421	4.76	1.397	57.7	6.88	1.6	2.7	26.4	25.5
				SB	2005	2.762	2.725	1.35	1.659	60.9	6.67	0.7	0.3	17.0	12.9
	SC			2005	2.635	2.537	3.86	1.498	59.0	6.52	1.0	1.7	32.5	27.5	
	電気炉酸化スラグ		SD	2005	3.735	3.698	1.00	2.114	57.2	6.86	0.3	1.3	14.7	15.0	
細骨材	川砂		2.566	2.515	2.04	1.702	67.7	2.82	0.9	2.2	-	-			

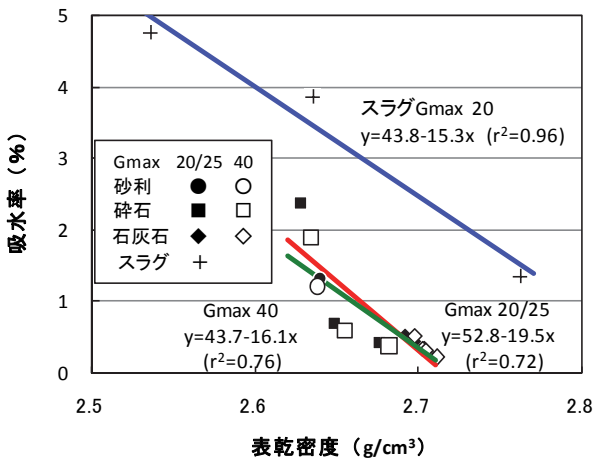


図1 密度と吸水率の関係

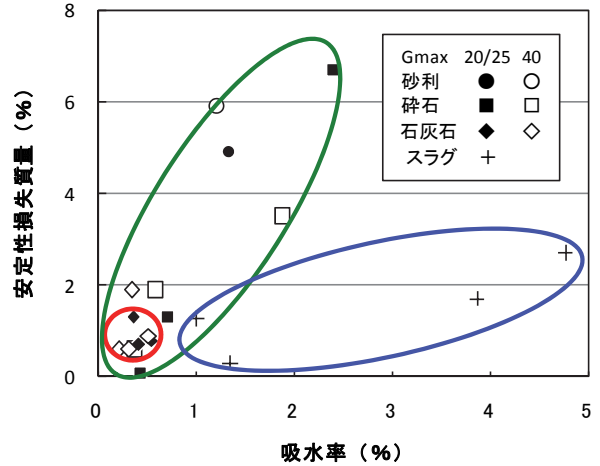


図2 吸水率と安定性損失質量の関係

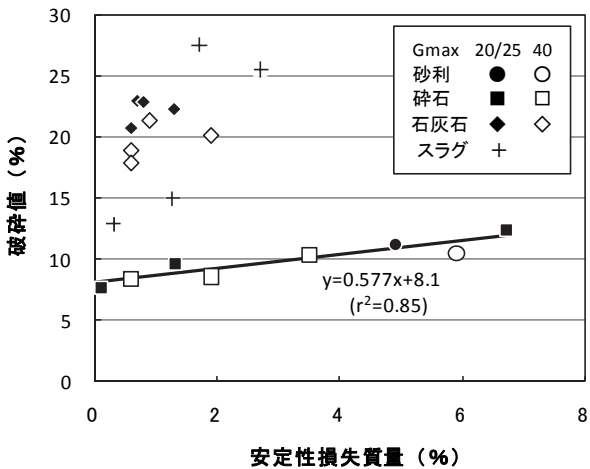


図3 安定性損失質量と破砕値の関係

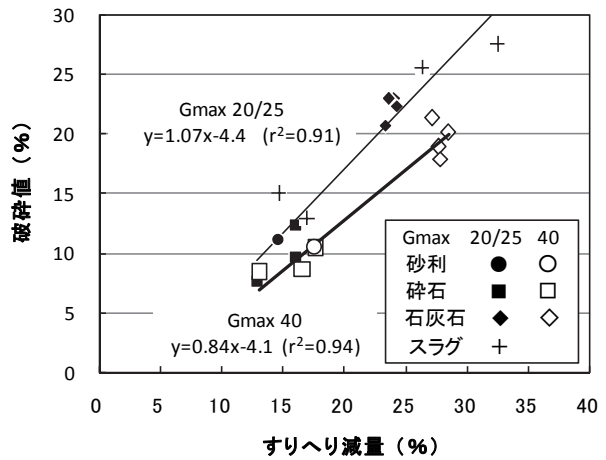


図4 すりへり減量と破砕値の関係

3. 舗装コンクリートの使用材料および配合⁴⁾

3. 1 使用材料

骨材以外の使用材料は、セメントは、普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm³、ブレン比表面積3380cm²/g）を使用した。

混和剤は、主成分をリグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体とする AE 減水剤標準形（I 種）の高機能タイプを使用した。標準使用量は単位セメント量の1.0%であり、試し練りにより0.6~1.5%の範囲で調整可能というものである。また、目標空気量を得るために主成分を変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤とする AE 剤（I 種）を用いて調整した。

3. 2 配合

舗装コンクリートの配合は、20種類の骨材について、単位水量、混和剤量、単位粗骨材かさ容積（以下、単にかさ容積と呼ぶ）を3~4水準変化させて試験練りを行い、スランプ5cm、空気量4.5%になる単位水量、混和剤量、かさ容積を決定した。単位水量は表4のとおりである。かさ容積は、Gmax 20/25mm はほぼ0.72であった。Gmax 40mm は0.72またはそれ以上であった。ラベリング試験などはかさ容積の影響が大きいことから、0.72一定とした。

表4 スランプ5.0cmを得るための単位水量

骨材の種類	Gmax	
	20/25 mm	40 mm
G	145	128
A、B、C、LA、LC、LD	145	135
LB	135	128
SA、SC、SD	160	—
SB	153	—

また、水セメント比 W/C を4水準変化させ曲げ、圧縮および割裂引張強度試験を行なった。以後の実験の W/C は、曲げ強度が6 N/mm²の時の W/C を求めた。その結果が表5である。

表5 曲げ強度6.0N/mm²時の水セメント比(%)

骨材の種類		Gmax	
		20/25mm	40mm
砂利	G	43.9	38.4
碎石	A	49.2	47.3
	B	52.9	44.8
	C	49.8	47.0
石灰石	LA	49.6	46.2
	LB	49.1	44.0
	LC	51.2	48.2
	LD	50.9	47.8
スラグ	SA	37.2	—
	SB	41.8	—
	SC	47.8	—
	SD	48.4	—

4. 舗装コンクリートの強度試験^{5),6),7),8)}

4. 1 強度試験の概要

強度試験の項目、試験方法、骨材、試験材齢、供試体寸法は、表6のとおりである。曲げ、圧縮および割裂引張強度の3種類について行なった。曲げ強度試験はJIS A 1106により、材齢3日、7日、28日、91日に実施した。供試体は150×150×530mmである。一部の骨材については、密度の違いによる材料分離の影響を確認するために、引張面を底面または打設面にした場合についても実施した。圧縮強度試験はJIS A 1108により、材齢7日、28日、91日に実施した。供試体はφ125×250mmである。割裂引張強度試験はJIS A 1113により、材齢7日、28日に実施した。供試体の径はφ125mm、長さは試験機の圧

表6 強度試験の概要

試験項目		試験方法	骨材	試験材齢	供試体寸法
曲げ強度	材齢	JIS A 1106	全骨材	3、7、28、91日	150×150×530mm
	引張面	JIS A 1106 引張面を底面、打設面	A20、A40、LC20、 SC20、SD20	28日	
圧縮強度	材齢	JIS A 1108	全骨材	7、28、91日	φ125×250mm
割裂引張強度	材齢 供試体長さ	JIS A 1113		7、28日	φ125×250mm φ125×125mm
曲げ弾性係数	曲げ、圧縮 強度の材齢	たわみ JCI-SF4 中央点 舗装示方書 I -3.3.4 解説		28、91日	150×150×530mm
圧縮弾性係数	の供試体	JIS A 1149 コンプレッサマ		28、91日	φ125×250mm
破壊エネルギー		JCI-S-001	A20、A40、C20、C40、 LC20、LC40、SC20、SD20	91日	150×150×530mm

盤の大きさによっては試験できない場合が考えられることから、JIS の上限（径の 2 倍 250mm）と下限（径の 1 倍 125mm）について試験した。養生は、いずれの供試体も強度試験直前まで 20℃の水中養生とした。

材齢 28 日、91 日の曲げ強度試験および圧縮強度試験時には、弾性係数を求めるための変位も測定した。一部の骨材については破壊エネルギー試験も行った。

4. 2 強度試験結果

材齢と強度の関係の一例を図 5 に示す。28 日の曲げ強度が 6 N/mm² になるように W/C を決めており、ほぼそのとおりの強度が得られている。

全骨材について曲げ、圧縮および割裂引張強度試験を行い、強度発現特性を確認するために 28 日強度に対する 7 日強度比と、91 日強度比をまとめたのが表 7 である。

材齢 28 日に対する 7 日の曲げ強度比と割裂引張強度比は 84～89% に対し、圧縮強度はほぼ 80% であり、初期の曲げ強度、割裂引張強度の発現は圧縮強度よりも大きい。

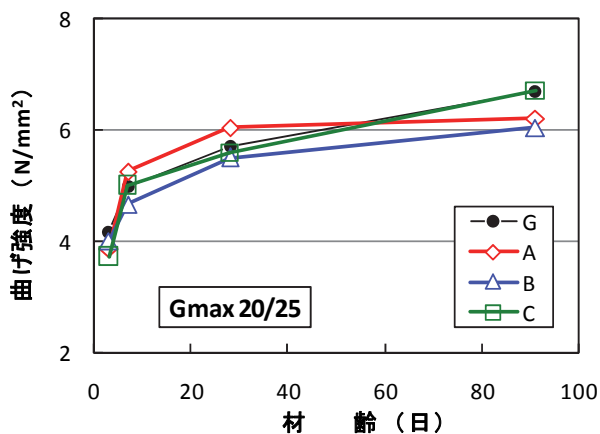


図 5 材齢と曲げ強度の関係 (Gmax 20/25 の場合)

しかし、材齢 28 日に対する 91 日の曲げ強度比は、Gmax 20/25mm の場合 108% に対し圧縮強度は 119%、Gmax 40mm の場合 101% に対し圧縮強度は 105% であり、長期の強度発現は曲げ強度よりも圧縮強度のほうが大きい。曲げ強度は、圧縮強度と比較して早期の強度発現は大きい、長期はわずかである。

4. 3 曲げ強度に及ぼす引張面の影響

曲げ強度試験は、通常、側面が引張面になるように供試体を設置する。しかし、スラグ骨材 SD のように密度の極めて大きい骨材は沈降しやすく、底面に骨材が偏在しやすいことが考えられる場合、引張面を変えて曲げ強度試験を行うと、強度が異なることが考えられる。このようなことから、一部の骨材について、側面を引張面にして載荷する通常の曲げ強度試験に対して、底面または打設面を引張面にした場合の曲げ強度試験を実施した。

側面強度に対する底面強度、打設面強度の比を図 6 に示す。SD20 の底面強度以外は側面強度に対して ±5% 程度以内であり、ばらつきの範囲内といえる。SD20 の底面強度は側面強度より 12% 大きくなっており、明らかに強度が大きくなっている。

供試体の切断面は、写真 1 のとおりである。写真の上が打設面、下が底面である。A は、ほぼ均一に骨材が分布しているが、SD は明らかに打設面付近

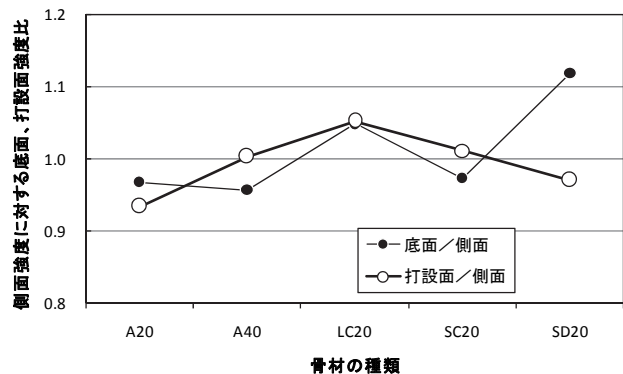
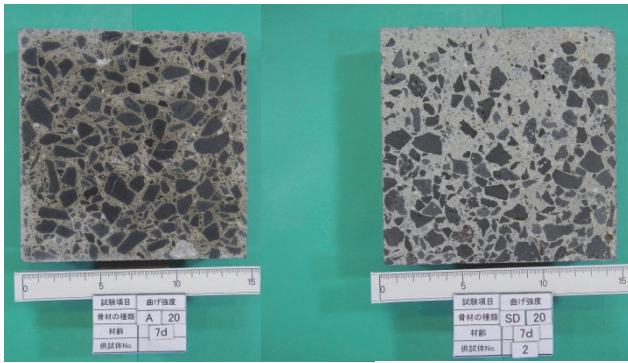


図 6 側面強度に対する底面、打設面強度比

表 7 材齢 28 日に対する 7 日、91 日の曲げ、圧縮、割裂引張強度比 (%)

強度試験		Gmax		Gmax 20/25				Gmax 40	
		材齢		7 日		91 日		7 日	91 日
		骨材の範囲		A~LD	A~SD	A~LD	A~SD	A~LD	A~LD
曲げ強度				85.2	86.1	108.0	105.7	88.8	101.4
圧縮強度				79.0	79.8	119.0	118.0	79.4	105.4
割裂引張強度	供試体長さ	250mm		85.0	86.5	—	—	84.2	—
		125mm		86.9	88.7	—	—	86.5	—



(a) 骨材 A (b) 骨材 SD

写真1 供試体切断面

は少なく、底面付近に骨材が集中している。SDは、密度がかなり大きいことから、骨材が底面に沈降してよく締め固まっており、強度が大きくなったものと考えられる。打設面の強度低下はほとんどなく問題ないものと考えられるが、モルタル分が多いため、すり減り、すべりなどの検討が重要と考えられる。

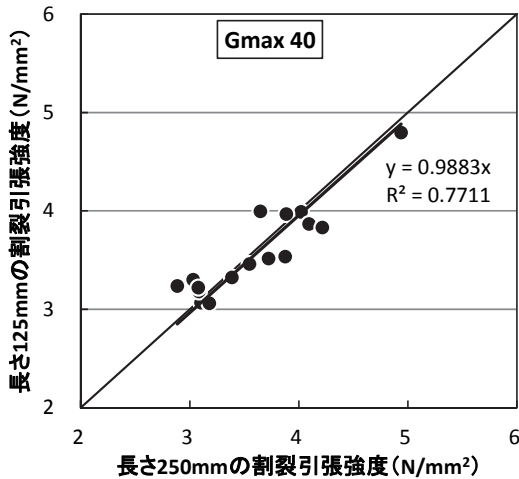
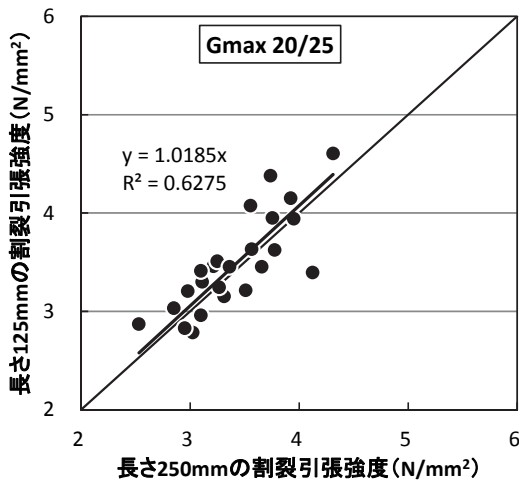


図7 供試体の長さの影響

4.4 割裂引張強度に及ぼす供試体長さの影響

全骨材について、供試体長さ 250mm と 125mm の割裂引張強度の試験結果を対比した結果が図7である。図中には、原点を通る直線で回帰した結果も示している。両者の結果はよく一致しており、供試体長さが JIS の範囲内であれば、割裂引張強度に及ぼす影響を考慮することなく取り扱うことができると考えられる。

4.5 曲げ強度と圧縮強度の関係

曲げ強度と圧縮強度の関係を図8 (Gmax 20/25mm) および図9 (Gmax 40mm) に示す。図中にはコンクリート標準示方書⁹⁾ (以下、RC 示方書という) に示されている両者の関係を一点鎖線で示している。曲げ強度と圧縮強度の関係は、RC 示方書の式(1)から式(2)が得られる。また、図中には全試験結果を RC 示方書と同じ指数関数 $f_c = \alpha f_b^\beta$ で回帰した結果を実線で示している。

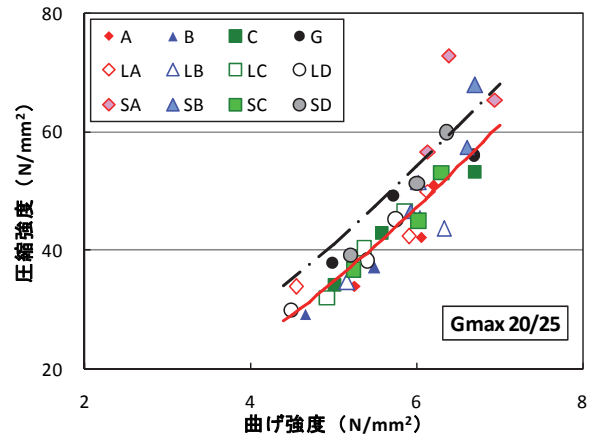


図8 曲げ強度と圧縮強度の関係 (Gmax 20/25mm)

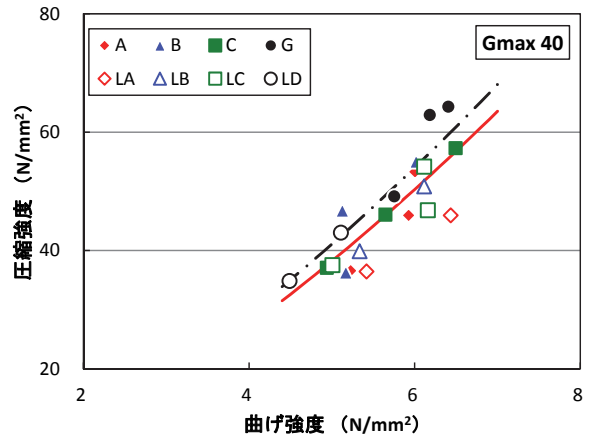


図9 曲げ強度と圧縮強度の関係 (Gmax 40mm)

圧縮強度と曲げ強度の関係 $f_b = 0.42f_c^{2/3}$ (1)

曲げ強度と圧縮強度の関係 $f_c = 3.67f_b^{3/2}$ (2)

ここに、 f_b ：曲げ強度、 f_c ：圧縮強度である。

Gmax 20/25mm と 40mm の回帰係数を表 8 に示す。全骨材の回帰結果と、個々の骨材を回帰した係数の範囲を示している。全骨材の回帰結果は、Gmax 20/25mm と 40mm はほぼ同じであった。RC 示方書から得られた式(2)と比較すると、 α は小さく、 β は大きくなっている。個々の骨材の回帰係数はかなりばらついている。ただし、決定係数はほとんど 0.9 以上であった。

この結果より、強度の管理を、曲げ強度に代えて圧縮強度を用いることを検討するにあたっては、骨材ごとに判定基準などを設定することによる可能性はあると考えられるが、各種骨材を一つの基準で適用することは難しいものと考えられる⁷⁾。

表 8 曲げ強度と圧縮強度の関係の回帰係数

Gmax	骨材	α	β	r^2
20/25	全骨材	2.55	1.63	0.86
	個々の骨材	0.42~5.92	1.14~2.63	—
40	全骨材	2.69	1.64	0.69
	個々の骨材	0.50~5.59	1.23~2.63	—

4. 6 曲げ強度と割裂引張強度の関係

4.5 の圧縮強度の場合と同様に、割裂引張強度との関係について図 10 (Gmax 20/25mm) および図 11 (Gmax 40mm) に示す。図中には RC 示方書⁹⁾に示されている両者の関係を一点鎖線で示している。RC 示方書の曲げ強度と圧縮強度の関係は式(1)、圧縮強度と割裂引張強度の関係は式(3)であり、割裂引張強度と曲げ強度の関係は両式から式(4)が得られる。

圧縮強度と割裂引張強度の関係 $f_t = 0.23f_c^{2/3}$ (3)

割裂引張強度と曲げ強度の関係 $f_t = 0.55f_b$ (4)

ここに、 f_t ：割裂引張強度である。

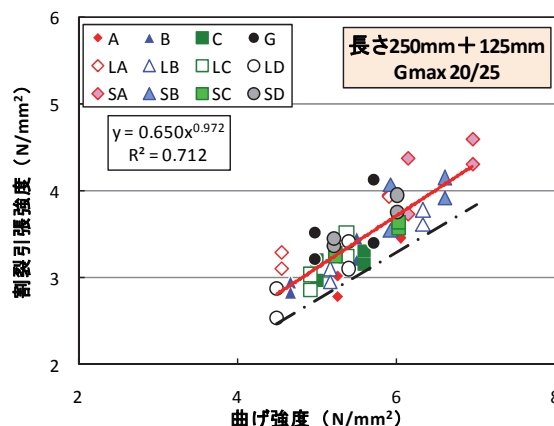


図 10 曲げ強度と割裂引張強度の関係 (Gmax 20/25mm)

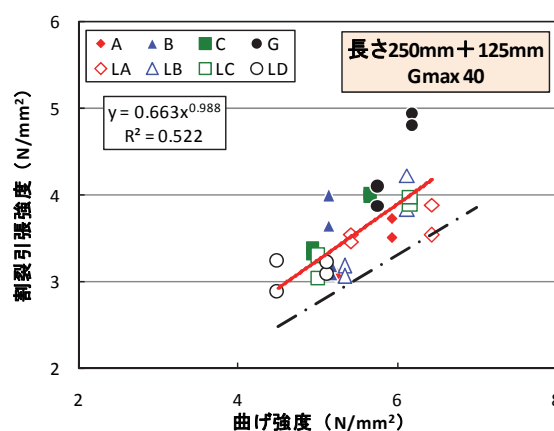


図 11 曲げ強度と割裂引張強度の関係 (Gmax 20/25mm)

Gmax ごとの回帰係数を表 9 に示す。個々の骨材の割裂引張強度は材齢 7 日、28 日の 2 点しかないため、回帰していない。回帰結果は、Gmax 20/25 mm と 40mm ではほぼ同様であった。RC 示方書から得られた式(4)と比べると、 α は、RC 示方書 0.55 に対し、Gmax 20/25mm は 0.65、Gmax 40mm は 0.66 であり、約 2/3 であった。 β は、RC 示方書 1.0 に対し、ほぼ同じであった。個々の骨材については、回帰していないが、圧縮強度の場合と同じようにばらついている。

この結果より、強度の管理を、曲げ強度に代えて割裂引張強度を用いる場合も、骨材ごとに判定基準を設定する必要がある⁷⁾。

表 9 曲げ強度と割裂引張強度の関係の回帰係数

Gmax	骨材	α	β	r^2
20/25	全骨材	0.65	0.97	0.71
40	全骨材	0.66	0.99	0.52

4.7 弾性係数⁸⁾

コンクリート舗装の理論的設計において、コンクリートの弾性係数が疲労度や版厚の計算結果に与える影響は非常に大きい。舗装標準示方書（以下、舗装示方書）によると、コンクリートの弾性係数は、曲げ試験から得る方法を原則としている。しかし、実際に曲げ試験による弾性係数の測定はほとんど行われておらず、円柱供試体によって JIS A 1149（コンクリートの静弾性係数試験方法）で測定されている。このことから、曲げ試験から得られる曲げ弾性係数と圧縮試験から得られる圧縮弾性係数を比較検討した。

弾性係数を求めるための変位の測定は、圧縮強度試験時には、JIS A 1149 に基づきコンプレッソメータを用いた。曲げ強度試験時には、**図 12** のように中央部のたわみを測定した。測定は、材齢 28 日および 91 日の試験時である。

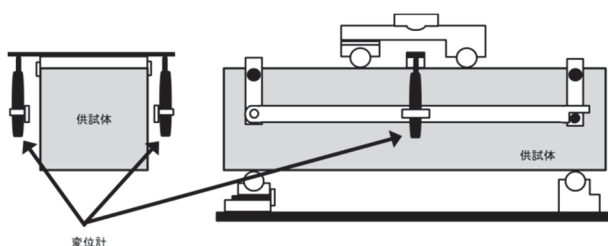


図 12 たわみ測定装置

曲げ弾性係数は舗装示方書に従い、150×150×530 mm の角柱供試体を用いて JIS A 1106 に準じて曲げ強度試験を行い、曲げ強度の 1/2 におけるたわみから逆算した。たわみは式(5)によって算出できる。よって、弾性係数は式(6)によって求められる。ただし、本検討では、荷重-たわみ曲線（**図 13**）の载荷初期の影響を除くために、たわみ量 5μm の時の荷重から最大荷重の 1/2 までの荷重-たわみ曲線の傾き（P/δ）を求め、弾性係数を算出した。試験は材齢 28 日および 91 日において実施した。

$$\delta = (23 \times P \times L^3) / (648 \times E \times I) \dots (5)$$

$$E = (P / \delta \times (23 \times L)^3) / (648 \times I) \dots (6)$$

ここに、P/δ：荷重-たわみ曲線の傾き（N/mm）、L：スパン（mm）、I：供試体の断面 2 次モーメント（mm⁴）、E：弾性係数（GPa）である。

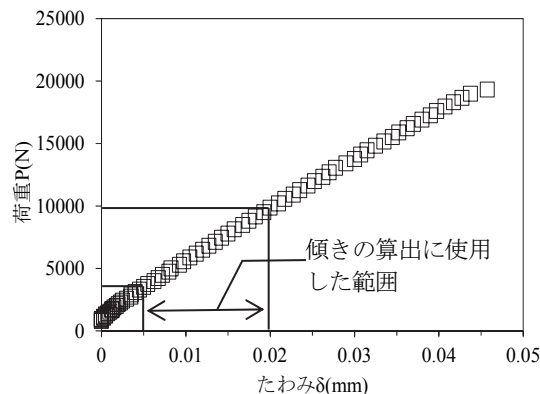


図 13 荷重-たわみ曲線の例

圧縮弾性係数と曲げ弾性係数の関係は**図 14** のとおりである。図中の破線は 1:1 のラインを表している。材齢に関わらず曲げ弾性係数と圧縮弾性係数は高い相関を示し、曲げ弾性係数は圧縮弾性係数よりもわずかに小さい傾向が認められた。

材齢 28 日における曲げ強度と曲げ弾性係数の関係を**図 15** に示す。図中の点線は舗装示方書の値を表している。舗装示方書の値と実測値の傾向はおおよそ同じであった。また、曲げ弾性係数、圧縮弾性係数ともに材齢 28 日より 91 日の方が大きくなり、平均すると曲げ弾性係数で 1.6GPa、圧縮弾性係数で 2.6GPa それぞれ増加した。

骨材の物性との関係では、**図 16** に破砕値との関係を示す。砕石（3種）、石灰砕石（4種）およびスラグ骨材（4種）で区別した場合、破砕値の増加に伴って曲げ弾性係数は小さくなる傾向が認められた。粗骨材の種類が同じであれば最大寸法の大きい方が、曲げおよび圧縮弾性係数はわずかに大きくなる傾向が認められた（**図 17**）。

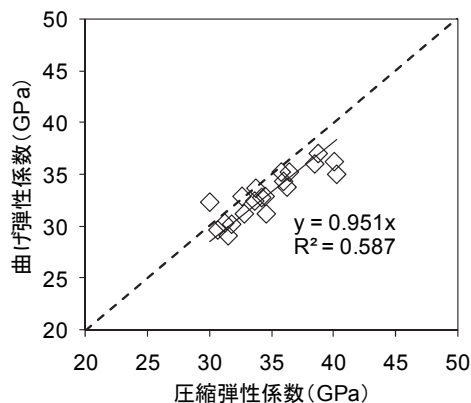


図 14 圧縮と曲げ弾性係数の関係（材齢 28 日）

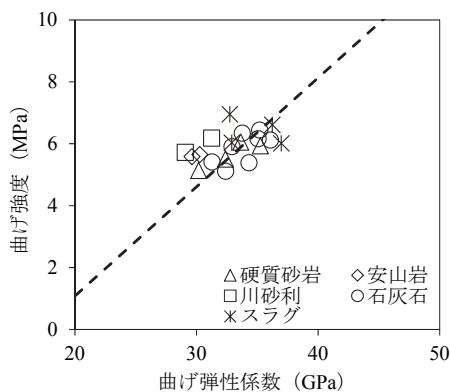


図 15 曲げ強度と曲げ弾性係数の関係

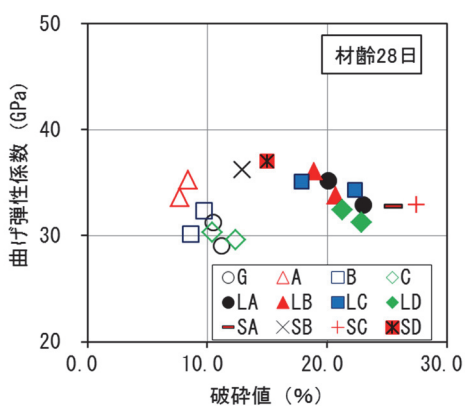


図 16 破砕値と曲げ弾性係数の関係

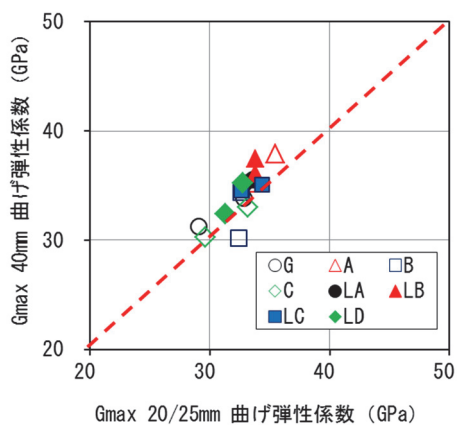


図 17 Gmax 20/25 と 40mm の曲げ弾性係数の比較

5. ラベリング試験^{5),10),11)}

5.1 試験の概要

コンクリートのすり減り抵抗性に関する実験をラベリング試験で行なった。試験方法は、舗装・調査試験法便覧¹²⁾に準じて、表 10 に示す条件で実施した。供試体の形状は、台形(上底:21cm、下底:32cm、

高さ:20cm)とし、その厚さを5.0cmとした。供試体は、試験開始時まで水中(20℃)養生を行い試験に供した。コンクリートのすり減り量は、レーザー変位計で測定した供試体3断面の摩耗深さから算出した。ラベリング試験は材齢28~47日の期間内に試験を開始した。試験開始時に、同じ養生をしていた円柱供試体(φ125×250mm)の圧縮強度試験も行った。

表 10 ラベリング試験条件

プレロード および ラベリング	試験温度	20℃	輪荷重	1.47 kN	
	テーブル	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

試験を行なった種類は、強度試験と同じく全種類の骨材について、同じ配合のものほか、一部の骨材について、W/C(強度)、スランプ(単位水量)、試験面の影響についても検討した。試験面は、通常、打設面で試験するが、骨材の沈降の影響を確認するために底面についても実施した。試験の組み合わせは表 11 の4シリーズである。

表 11 ラベリング試験の組み合わせ

シリーズ	骨材	スランプ cm	W kg/m ³	W/C %	試験面
I	全骨材	5	表 4	表 5	打設面
II	A20				SD20
III	LC20	SB20	表 4	表 5	40
					60
IV	A20	2.5	140	表 5	打設面 底面
		5	145		
		8	150		

5.2 試験結果

(1) 回転数とすり減り量の関係

タイヤの回転数と摩耗深さの関係は図 18 のとおりである。この結果から摩耗した面積を求め、すり減り量(cm²)とした。

回転数とすり減り量の関係を図 19 に示す。5千回転または1万回転までのすり減り量は大きい、その後はほぼ直線的に増加している。初期は打設面の

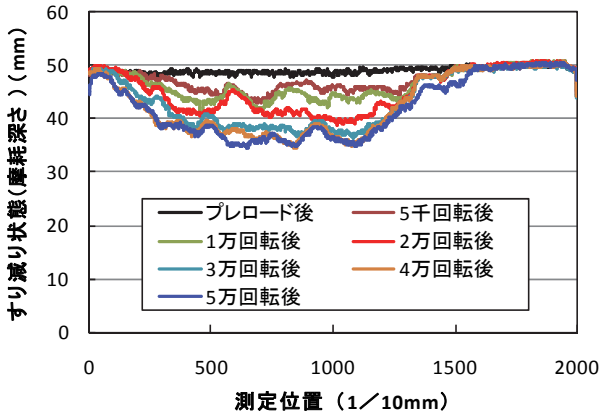


図 18 回転数ごとの摩耗深さの結果 (A20 の場合)

モルタルがすり減りに影響を与えているものと考えられる。

この結果より、以下の検討に当たってすり減り量は、5万回転のすり減り量と1万回転のすり減り量の差を用いることとする。

(2) 骨材のすりへり減量、破砕値とコンクリートのすり減り量の関係

シリーズ I の結果より、コンクリートのすり減り抵抗性と、粗骨材の品質の関係を把握するため、骨材のすりへり減量、破砕値との関係を求めた。図 20 が粗骨材のすりへり減量との関係、図 21 が粗骨材の破砕値との関係である。

粗骨材のすりへり減量、破砕値と、コンクリートのすり減り量には高い相関関係がある。粗骨材のこれらの物理試験結果によってコンクリートのすり減り量を評価できる可能性がある。

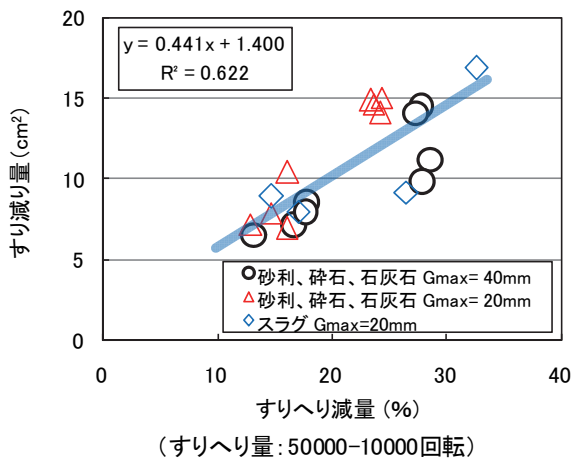


図 20 粗骨材のすりへり減量とコンクリートのすり減り量の関係

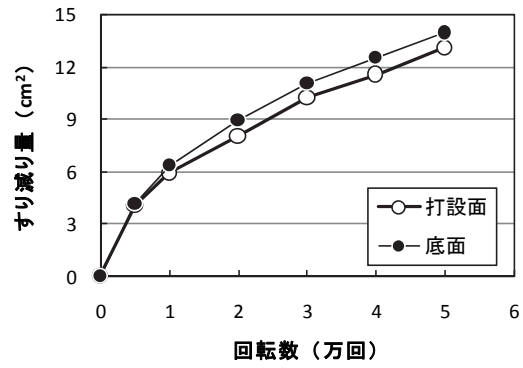


図 19 回転数とすり減り量の関係 (A20 の場合)

図 20 の粗骨材のすりへり減量と、図 21 の破砕値の関係を比較すると、破砕値のほうがすりへり減量よりもわずかに相関関係は高くなっており、すり減り抵抗性を評価するにあたっては、JIS A 1121 (ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験) によるすりへり減量のほかに、BS 812 (破砕値試験) による破砕値を用いることができる可能性がある。

(3) 粗骨材の最大寸法の影響

粗骨材最大寸法の影響についてもシリーズ I の結果から検討する。ただし、Gmax 20/25mm と 40mm では W/C が違っていることに注意する必要がある。W/C の影響についてはシリーズ III で検討する。

Gmax 40mm を用いたコンクリートのすり減り量と 20/25mm のすり減り量の関係を図 22 に示す。両者はほぼ一致ないし Gmax 20/25mm のほうがわずかに大きくなっている程度であり、大きな影響はないものと考えられる。

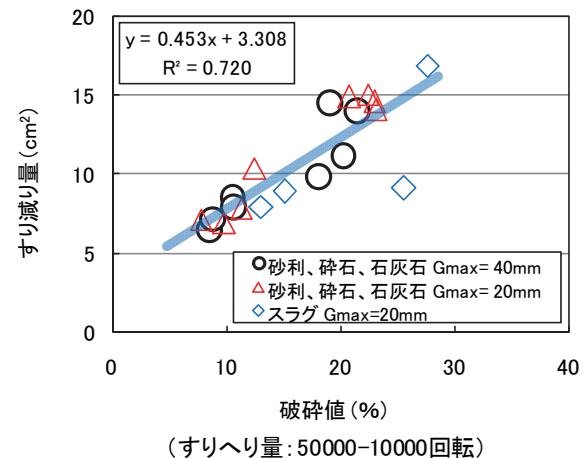


図 21 粗骨材の破砕値とコンクリートのすり減り量の関係

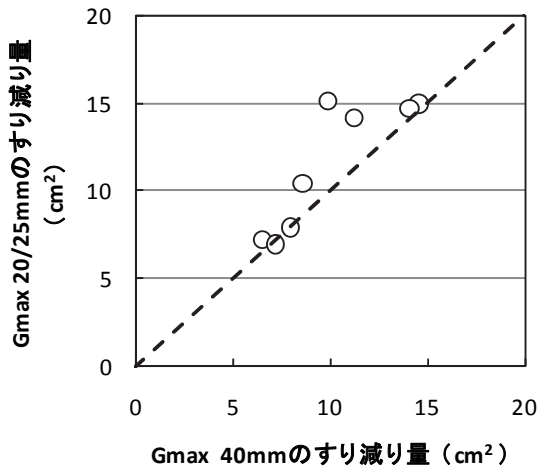


図 22 粗骨材の最大寸法の影響

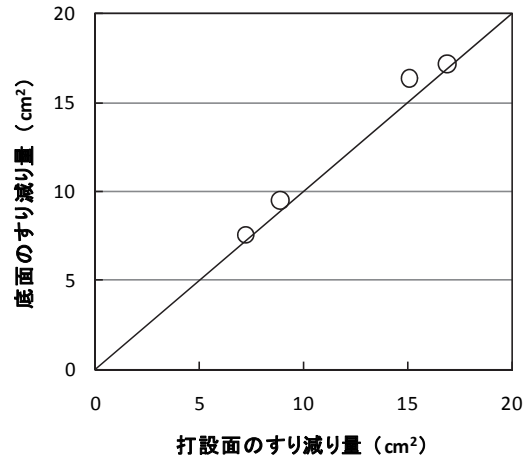


図 23 打設面と底面のする減り量の比較

(4) 試験面の影響

シリーズⅡの打設面と底面で試験した結果を図 23 に示す。スランプと両面の試験結果については、(6)に記述する。図 23 のとおり打設面と底面の違いは、今回の実験ではほとんど影響を確認することが

できなかった。供試体の厚さが 5cm であり、粗骨材の種類にかかわらず骨材の沈降の影響がほとんど現れていないものと考えられる。

(5) 水セメント比 (強度) の影響

シリーズⅢのスランプ 5cm で W/C を変化させた時の結果を図 24 に示す。W/C が大きくなるとすり減り量はわずかに増加する傾向がある。

W/C の影響は、強度の影響と考えられることから、圧縮強度とすり減り量の関係を図 25 に示す。図のとおり、すり減り量は強度が大きくなるとわずかに小さくなる傾向がある。

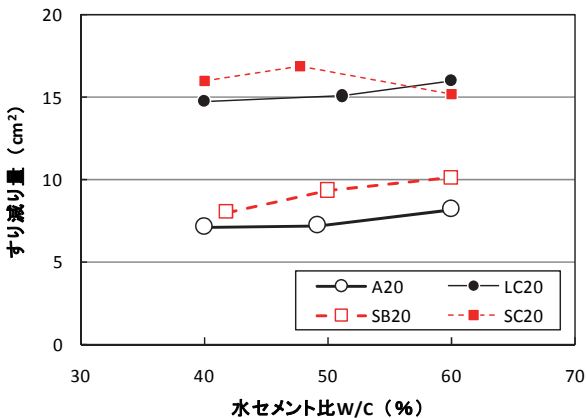


図 24 水セメント比とすり減り量の関係

(6) スランプ (単位水量) および試験面の影響

スランプ 2.5、5、8cm で、打設面と底面で試験した結果を図 26 に示す。スランプが大きくなると、単位水量が増加するため、すり減り量はわずかであるが増加する傾向がある。打設面と底面の違いは、図 23 の結果と同様、ほとんど影響ないようである。

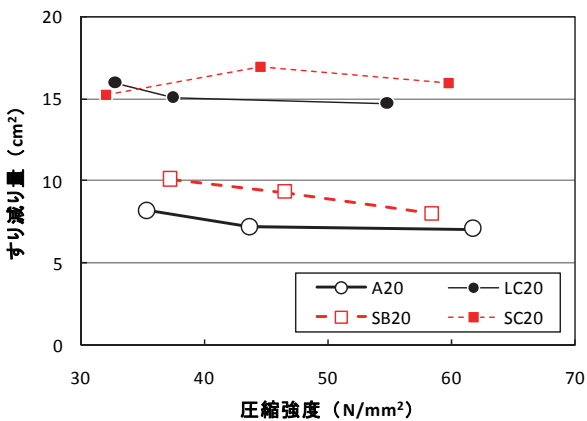


図 25 圧縮強度とすり減り量の関係

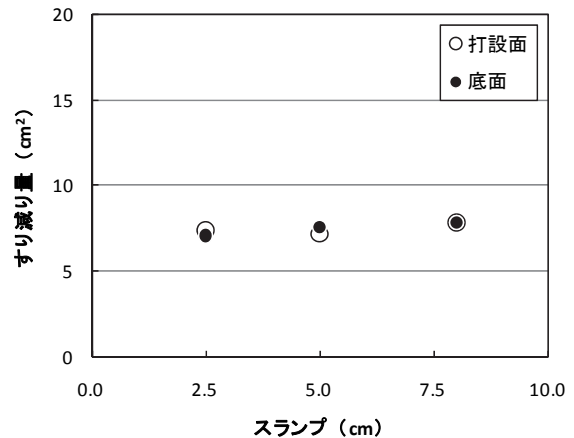


図 26 スランプ、試験面とすり減り量の関係

6. 凍結融解試験¹³⁾

6. 1 試験方法

粗骨材は、Gmax 20/25mm の 12 種類を用いた。

各種砕石もしくは砂利を使用した場合をシリーズ I、高炉スラグ粗骨材もしくは電気炉酸化スラグ粗骨材を使用した場合をシリーズ II とした。また、シリーズ II では、シリーズ I の試験結果と比較する目的で、骨材 B20 も試験に供した。

コンクリートの空気量は、骨材修正係数で補正した値が $4.5 \pm 1.0\%$ となるように、AE 剤により調整した。

コンクリートの練混ぜは、シリーズ I では水平 2 軸形のみキサを、シリーズ II ではパン形のみキサを使用した。

凍結融解試験は、JIS A 1148 の A 法（水中凍結水中融解）により、相対動弾性係数および質量変化率を測定した。

6. 2 試験結果

(1) 相対動弾性係数

相対動弾性係数の測定結果を図 27 および図 28 に示す。シリーズ I の 300 サイクルにおける相対動弾性係数は、G25 を用いた場合にわずかな低下が認められるものの、使用した粗骨材の種類に関わらず 85% 以上であった。

シリーズ II の各種スラグ粗骨材を使用したコンクリートの相対動弾性係数は、SA20 および SC20 を用いた場合に 70% 程度まで低下したものの、その他の水準ではいずれも 90% 以上であった。

これまでも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検討されており、絶乾密度、吸水率、安定性損失率、すりへり減量などを指標として評価されている¹⁴⁾。SA20 および SC20 は、他の粗骨材よりも吸水率が高く、すりへり減量が多いことから、粗骨材の強度がやや低く、凍結融解抵抗性に影響を及ぼした可能性があり、粗骨材の吸水率、安定性損失質量、破砕値と 300 サイクル時の相対動弾性係数の関係を図 29、図 30、および図 31 に示す。SA20 および SC20 を使用した場合、300 サイクル時の相対動弾性係数は 75% 程度であった。砂利が 90% をわずかに下回ったものの、そのほかは 90% 以上であった。吸水率、安定性損失質量および破砕値と相対動弾性係数の関係は、吸水率と破砕値は両者の関係がよく一致していたが、安定性損失質

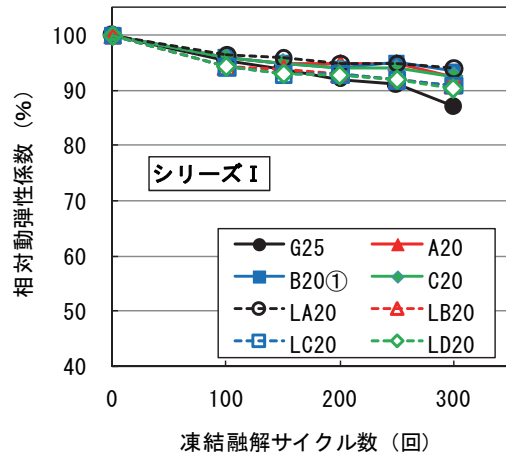


図 27 シリーズ I の相対動弾性係数

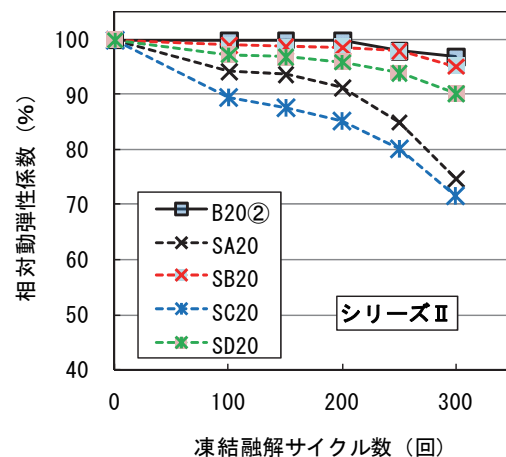


図 28 シリーズ II の相対動弾性係数

量は砂利がやや大きかったにもかかわらず、相対動弾性係数の低下はわずかであり、ほかの骨材の関係とは違っていた。

(2) 質量減少率

質量減少率を図 32 および図 33 に示す。シリーズ I の質量減少率は、相対動弾性係数がやや低くなった G を用いた場合に最も低く、その他の場合は 2~3% 程度であった。

シリーズ II の各種スラグ骨材を使用した場合の質量減少率は 2% 以下であり、中でも相対動弾性係数の低下が認められた SA20 の場合に最も低い値となった。

以上のように、本研究における質量減少率は、相対動弾性係数とは異なる傾向を示す水準があることを確認した。質量減少率は、凍結融解作用によるスケリングに起因するものであり、その要因の一つとしてコンクリート表層部の強度が挙げられる。本研究では、所定の曲げ強度が得られるようにコンク

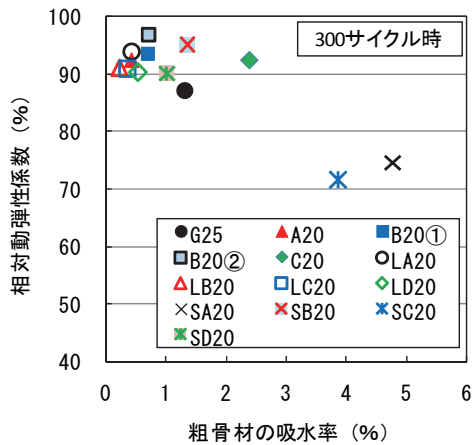


図 29 粗骨材の吸水率と相対動弾性係数の関係

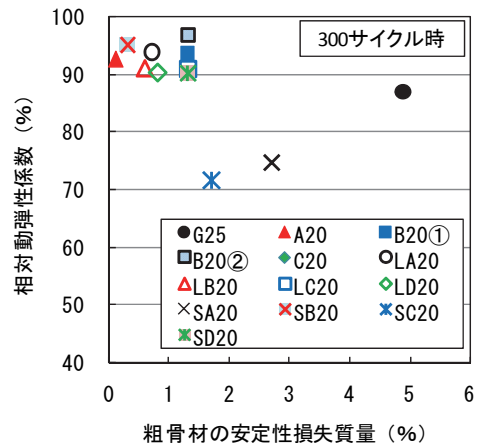


図 30 粗骨材の安定性損失質量と相対動弾性係数の関係

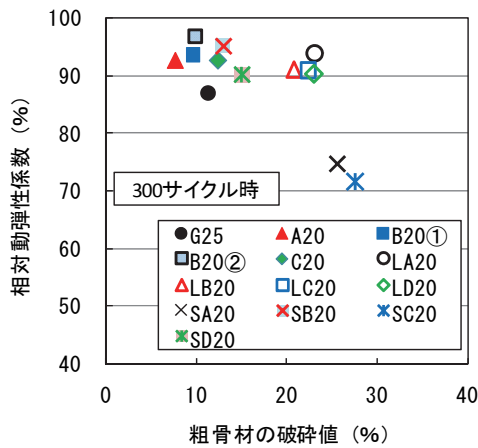


図 31 シリーズ I の質量減少率

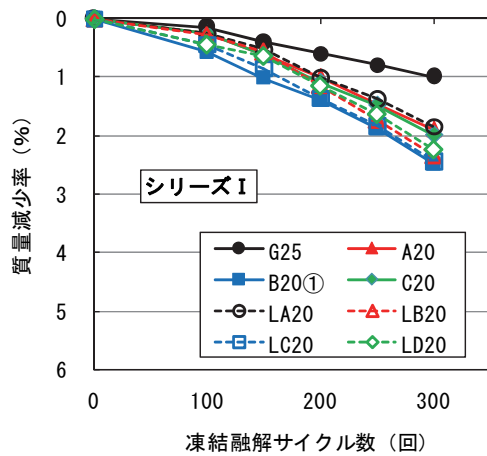


図 32 シリーズ I の質量減少率

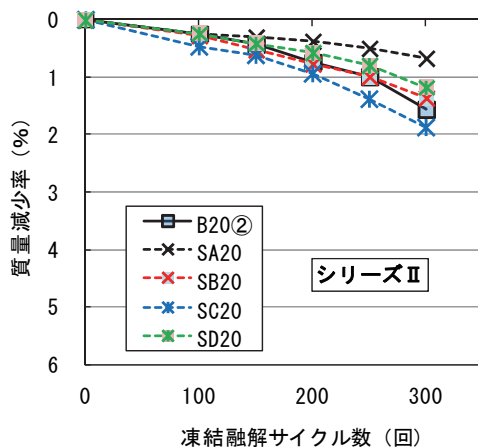


図 33 シリーズ II の質量減少率

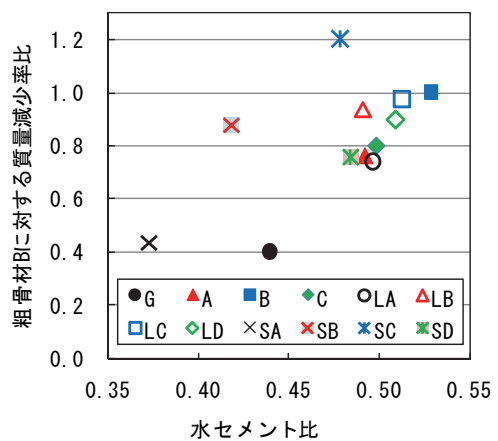


図 34 質量減少率比と水セメント比の関係

リートの水セメント比を定めたため、水準ごとに水セメント比が異なっている。そこで、質量減少率に及ぼす水セメント比の影響を確認した。粗骨材 B 使用時に対する質量減少率比と水セメント比の関係を 図 34 に示す。高炉スラグ粗骨材を使用した場合の

質量減少率は、その他の場合よりもやや高く、いずれも水セメント比が高いほど質量減少率が高くなった。以上より、凍結融解による質量減少率を低減するには、良質な粗骨材を使用することに加え、モルタル部の強度を高めることが必要と考える。

7. 長さ変化試験

7. 1 試験方法

長さ変化試験は、粗骨材 Gmax 20/25mm の 12 種類について行なった。

長さ試験方法は、JIS A 1129 (モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法) により、長さ変化率および質量変化率を測定した。

7. 2 試験結果

16 週までの長さ変化測定結果は図 35 のとおりである。骨材ごとの 16 週時の長さ変化率は図 36 のとおりである。石灰石骨材 LA~LD が最も小さく、次にスラグ骨材 SA~SD であり、砕石 A~C と砂利 G が最も大きくなっている。

粗骨材の吸水率、破砕値と 16 週時の長さ変化率の関係を図 37 および図 38 に示す。吸水率、破砕値は、弾性係数やすり減り抵抗性との相関関係は高かったが、長さ変化については全く違う傾向を示している。特に破砕値は、小さいほどすり減り抵抗性は高かったが、長さ変化は逆の関係になっている。最近いわれているように、骨材を構成している鉱物の組成などに起因しているものと考えられ、コンクリート舗装版のように乾燥収縮の影響を受けやすい構造物にとって石灰石、スラグ骨材は有効と考えられる。

8. まとめ

20 種類の各種粗骨材を用いた舗装コンクリートについて、28 日の曲げ強度が 6 N/mm² になる時の W/C をベースに、強度試験、ラベリング試験、凍結融解試験、長さ変化試験を行い、粗骨材の物性との関係などを求め、次のことが明らかになった。

(1) 強度試験結果

- 強度発現は、曲げおよび割裂引張強度のほうが圧縮強度よりも初期は速いが、長期の増加はわずかである。
- 密度の大きい粗骨材は、材料分離を起こして沈降し、下部の強度は増加する可能性があるが、打設面は粗骨材が少なくなることから、今後はすり減り、すべりなどの検討が必要と考えられる。
- 曲げ強度と圧縮強度、割裂引張強度の関係は、粗骨材によって大きく異なることから、強度管理に圧縮強度または割裂引張強度を代用する場合は、粗骨材ごとに曲げ強度との相関性を考慮するなど

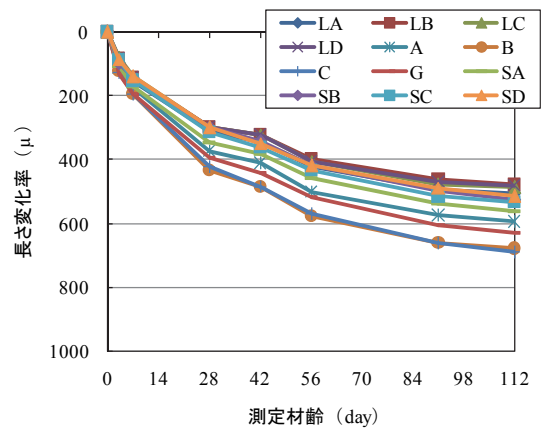


図 35 測定材齢と長さ変化率の関係

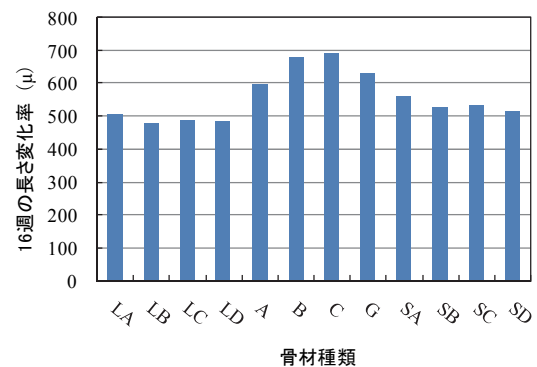


図 36 骨材ごとの 16 週時の長さ変化率

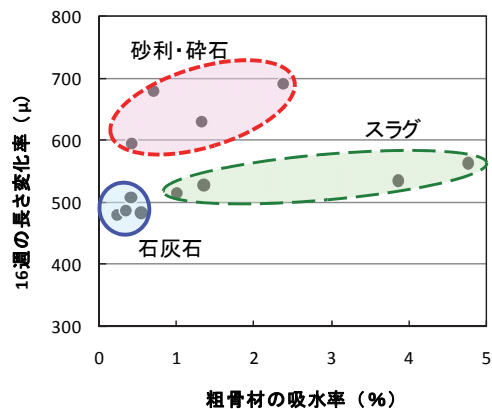


図 37 粗骨材の吸水率と 16 週の長さ変化率の関係

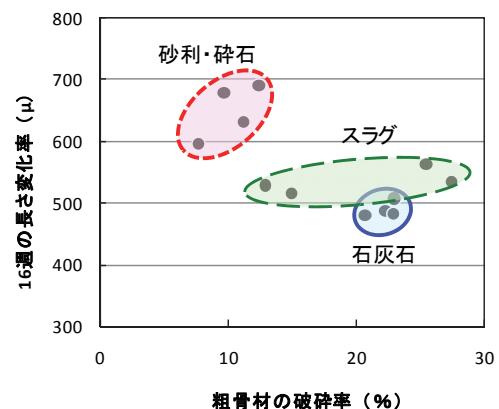


図 38 粗骨材の破砕値と 16 週の長さ変化率の関係

の検討が必要である。

- d) 弾性係数は、曲げ強度試験時にたわみを測定して求めた場合と、JIS A 1149により圧縮強度試験時に求めた場合では、曲げ弾性係数の方がわずかに小さかった。曲げ弾性係数は、舗装標準示方書の値とほぼ一致した。曲げおよび圧縮弾性係数は、粗骨材の破砕値と相関関係があった。
- e) 破壊エネルギーも粗骨材の破砕値と相関関係があった。

(2) ラベリング試験結果

コンクリートのすり減り量は、粗骨材のすりへり減量、破砕値と高い相関関係があったが、破砕値のほうがすりへり減量よりも相関関係が高かった。このような結果から、コンクリートのすり減り抵抗性を骨材の物性によって評価できる可能性があること、その指標としてすりへり減量だけでなく、破砕値も利用できる可能性がある。

(3) 凍結融解試験

吸水率の高い骨材は、凍結融解抵抗性が低下する傾向がある。破砕値も凍結融解抵抗性の評価に使うことができる可能性がある。

(4) 長さ変化試験結果

コンクリートの強度、すり減り、凍結融解などは骨材の強度の指標である吸水率、破砕値と相関関係があったが、長さ変化はむしろ逆の関係にあり、石灰石、スラグ骨材は通常使用されている骨材よりも収縮が低減され、ひび割れ抵抗性が高い可能性がある。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：コンクリート舗装に関する技術資料、pp.2、2009.8
- 2) 前掲書 1)、pp.7-12
- 3) 土木学会：舗装用コンクリートの振動台式コンシステンシー試験方法 (JSCE-F 501-1999)、コンクリート標準示方書規準編 2010 制定、pp.207
- 4) 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.81-86, 2013.12
- 5) 森濱和正ほか：碎石, 砂利を用いた舗装コンクリートの強度, すりへり抵抗性, 第 36 回コンクリート工学年次論文集投稿中、2014.7
- 6) 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

術大会講演概要集投稿中、2014.5

- 7) 森濱和正ほか：コンクリート舗装の圧縮強度による管理・検査に関する一考察、第 69 回年次学術講演会第 V 部投稿中、2014.9
- 8) 瀧波 勇人ほか：舗装コンクリートの曲げ試験による弾性係数に関する一考察、第 69 回年次学術講演会第 V 部投稿中、2014.9
- 9) (社)土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]平成 8 年制定、pp.19, 1996.3
- 10) 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投稿中、2014.5
- 11) 常松直志ほか：各種粗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 69 回年次学術講演会第 V 部投稿中、2014.9
- 12) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧第 3 分冊、pp.17-38, 2007.6
- 13) 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 部投稿中、2014.9
- 14) (社)日本コンクリート工学協会：骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書、pp.148-158, 2007

STUDIES TO ENSURE DURABILITY OF PAVEMENT CONCRETE BY EFFECTIVE USE AGGREGATE RESOURCES

Budget : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2012-2015

Research Team : Materials and Resources Research Group
(Concrete and Metallic Materials Research)

Author : Hiroshi Watanabe

Kazumasa Morihama

Abstract : Wide use of concrete pavement is expected as its excellent durability and reduced life cycle cost. For further use of concrete pavement, introduction of performance based design concept instead of descriptive specification for constituent materials and consistency for concrete is necessary.

Usage of limestone for coarse aggregate of general ready mixed concrete is increasing to reduce drying shrinkage, however application of the limestone aggregate to concrete for pavement is questionable for its performance of skid resistance and abrasion. On the other hand, effective use of slag aggregate is expected from the environmental aspect. Therefore, it is studied with the purpose to clarify the applicability to the pavement concrete of various coarse aggregate.

In 2013, the strength test, raveling test, freezing and thawing test, and length change test of the pavement concrete using various aggregate has been carried out. As a result, it became clear that skid resistance and freezing and thawing resistance performances of pavement concrete are strongly dependent on properties of the aggregates.

Key Word : limestone aggregate, slag aggregate, strength test, raveling test, freezing and thawing test, length change test