共 同 研 究 報 告 書

整 理 番 号 第　483　号

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

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 年 3 月

国立研究開発法人土木研究所
学校法人東京農業大学
一般社団法人セメント協会
太平洋セメント株式会社
日本道路株式会社

Copyright © (2016) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書

第 483 号 2016年 3月

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

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

材料資源研究グループ	グループ長	渡辺　博志
	上席研究員	古賀　裕久
	総括主任研究員	森濱　和正
	研究員	加藤　祐哉
	交流研究員	勝畑　敏幸*
東京農業大学	教授	小梁川　雅
(一社)セメント協会	舗装技術専門委員会 適用性評価 WG リーダー	小林　哲夫
	リーダー	佐藤　智泰
	サブグループリーダー	吉本　徹
	サブグループリーダー	島崎　泰
	研究員	瀧波　勇人
太平洋セメント(株)	リーダー	梶尾　聡
	主任研究員	石田　征男
日本道路(株)	室長	中原　大磯
	主任研究員	加藤　学
	副主任研究員	常松　直志

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、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、砕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。

本報告は、舗装コンクリートの要求性能と，それに対する粗骨材品質の影響について整理し，舗装コンクリートおよび粗骨材の品質管理試験方法を提案した。

キーワード：舗装コンクリート，石灰石骨材，スラグ骨材，品質管理試験方法，施工性，設計用値，走行安全性，耐久性

＊　2014 年 12 月まで交流研究員（元，BASF ジャパン(株)）

目　次

１．　まえがき　1

２．　本研究の目的と検討内容　4
2.1　研究目的　4
2.2　検討内容　4

３．　粗骨材に求められる品質と管理試験方法の提案　9
3.1　概要　9
3.2　破砕値試験　10
3.3　粗骨材の凍結融解試験　13
3.4　粗骨材の乾燥収縮率試験　19
3.5　粗骨材のすべり試験　23

４．　舗装コンクリートに求められる性能と管理試験方法の提案　25
4.1　概要　25
4.2　施工性（ワーカビリティー）　26
4.2.1　概要　26
4.2.2　粗骨材の種類と配合への影響　26
4.2.3　フローテーブルによる締固め性・変形性試験　30
4.2.4　材料分離抵抗性試験　33
4.2.5　ダレ試験　37
4.3　設計用値　41
4.3.1　概要　41
4.3.2　曲げ強度　41
4.3.3　曲げ疲労強度　43
4.3.4　引張軟化特性　45
4.3.5　弾性係数　49
4.3.6　線膨張係数　51
4.3.7　乾燥収縮　52
4.3.8　自己収縮　53

4.4 走行安全性 55
4.4.1 概要 55
4.4.2 すべり抵抗性 55
4.4.3 すり減り抵抗性 59
4.5 耐久性 62
4.5.1 概要 62
4.5.2 凍結融解抵抗性 62
4.5.3 スケーリング抵抗性 68
4.6 強度の管理・検査の合理化 78
4.6.1 強度管理・検査合理化の必要性 78
4.6.2 規基準に示されている強度管理・検査方法とその問題点 78
4.6.3 圧縮強度による強度管理を行なう場合の考え方 78

５． まとめ 92
5.1 粗骨材の種類に関する留意点 92
5.2 粗骨材の最大寸法について 92
5.3 舗装コンクリートの施工性について 93
5.4 評価試験方法の提案 93
5.5 舗装コンクリートの強度の管理・検査について 94

６． 関連発表リスト 95

共同研究参加者名簿 98

1．まえがき

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く、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などの長所もあり [2)]、その普及が期待されている。

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（Gmax）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 Gmax は 40mm が一般的である。しかし、最近は Gmax 20mm または 25mm（以下、20/25 と表記）の粗骨材しか有していない生コン工場も多い。また、コンクリートの収縮低減を目的に石灰石の使用が増えてきている。さらに、資源の有効活用の観点からは、スラグ骨材の使用も求められている。今後、コンクリート舗装を普及するには、これらの粗骨材を使用した場合の性能を明らかにし、利用技術を確立することが必要である。

コンクリート舗装では、スランプ 2.5 cm のコンクリートを使用することが多い。このような硬練りコンクリートの運搬にはダンプトラックが用いられるなど、コンクリートの製造・運搬の面で制約を受けるので、アジテータ車が使用可能な範囲で硬練りの検討が必要である。

また、コンクリート強度は曲げ強度によって管理されており、供試体が重く、曲げ強度試験用の装置が必要なことなどから、労力が大きいことが課題になっている。

このような背景のもと、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として、2012 年度より土木研究所と東京農業大学、(一社)セメント協会、太平洋セメント(株)、日本道路(株)の 5 機関による共同研究を開始した。

これまでの実験結果を、**表 1.1** のとおり 4 冊の共同研究報告書に取りまとめている。以下、共同研究報告書 I (1)から順番に第 1 報 [3)]、第 2 報 [4)]、第 3 報 [5)]、第 4 報 [6)]と呼ぶ。

表 1.1 実験結果を取りまとめた共同研究報告書

番号		サブタイトル	号数	年月
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	第 455 号	2014.03
	(2)	舗装コンクリートの耐久性試験	第 462 号	2015.03
	(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	第 477 号	2016.01
	(4)	舗装コンクリートの曲げ疲労試験	第 482 号	2016.03

第 1 報では、実験に使用した各種粗骨材の物性試験結果およびコンクリートの配合および強度試験結果について報告した。骨材試験では、JIS に規定されている一般的な試験のほか、破砕値試験、点載荷試験を行

なった。配合試験では、一般的な舗装コンクリートである粗骨材の Gmax 40mm、スランプ 2.5cm に対して、Gmax 20/25mm、スランプ 5cm とした場合の単位水量、単位粗骨材かさ容積（以下、かさ容積という）が配合、強度に及ぼす影響などの検討を行なった。強度試験では、曲げ強度試験のほか、圧縮、割裂引張強度試験を行うとともに、曲げおよび圧縮の弾性係数などの測定も行なった。また、配合および強度試験結果より、第 2 報以降で検討するためのベースとなる配合を設定した。

第 2 報では、第 1 報の骨材の物性試験結果に加え、粗骨材自体の凍結融解試験を実施した。舗装コンクリートの耐久性試験については、曲げ強度 6MPa に相当する配合を中心に、各種粗骨材を用いた舗装コンクリートの凍結融解、スケーリング、乾燥収縮、自己収縮、線膨張係数、すり減り、すべり抵抗性試験を行なった。

第 3 報では、粗骨材の追加試験、フレッシュコンクリートの施工性試験、硬化コンクリートのすり減り、すべり抵抗性試験などの追加実験を行なった。粗骨材の追加試験では、粗骨材自体の乾燥収縮率試験、すべり（PSV）試験を行なった。フレッシュコンクリートの施工性試験では、単位粗骨材かさ容積（*s/a*）、スランプを変化させた場合のフレッシュコンクリートを、フローテーブルなどによって施工性を評価する方法について検討した。硬化コンクリートの追加実験では、第 2 報に対して配合などが異なる場合のすり減り、すべり、スケーリング試験などを行なった。

第 4 報では、粗骨材種類の異なる舗装コンクリートの曲げ疲労試験結果を取りまとめた。粗骨材の種類は、砂岩、砂利、石灰石 4 種類、高炉スラグ、電気炉酸化スラグの 8 種類である。粗骨材の最大寸法は、スラグ骨材は 20mm のみ、そのほかは 20 または 25mm と 40mm の 2 種類であり、総計 14 種類について試験した。コンクリートの配合は、曲げ強度 6MPa に相当する配合とした。

本報告は、第 1 報～第 4 報の結果より、舗装コンクリートの要求性能に対して、粗骨材の品質が舗装コンクリートに及ぼす影響などについて骨材の品質と、施工性の改善のため単位粗骨材かさ容積（細骨材率）、スランプを変化させた場合のフレッシュコンクリートの性状，硬化コンクリートのすり減り，すべり性状などについて検討し、石灰石およびスラグ骨材の舗装コンクリートに適用するにあたっての長所や注意すべき点などについて取りまとめた。その上で、舗装コンクリートとして要求される性能に対して現在実施されている性能確認試験の代替試験あるいは追加したほうがよいと考えられる試験方法について提案した。また、骨材の品質についても同様に提案した。

なお、本報告書で提案する内容は、第1～第4報で報告した実験に基づいたものであり、限られた骨材の種類による、室内実験の結果をもとにしたものである。特に舗装コンクリートについては、試験施工などにより、コンクリート舗装として使用された場合にも同様の結果が得られるのかを確認するなど、さらなる検討が必要と考えている。

1章の参考文献

1) (社)日本道路協会：コンクリート舗装に関する技術資料，p.2，2009.8
2) 前掲書 1)，pp.7-12
3) (独)土木研究所、(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)：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、(1) 骨材試験、コンクリートの配合および強度試験、共同研究報告書第455号、2014.3
4) (独)土木研究所、(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)：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、2015.3
5) (国研)土木研究所、(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)：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、(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、共同研究報告書第477号、2016.1
6) (国研)土木研究所、(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)：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、2016.3

2．本研究の目的と検討内容

2.1 研究目的

本研究の目的は、舗装コンクリートの要求性能を明確にし、それらを満足するために粗骨材に求められる品質と、それらを確認するための試験方法を提案することである。本研究で対象とする主な検討目的は次のとおりである。

(1) 粗骨材の種類

粗骨材の種類に関しては、砂利、砕石の天然骨材に対して、環境保全などの観点から主にスラグ骨材、石灰石骨材を舗装コンクリートに積極的に利用できるようにする。

(2) 粗骨材の最大寸法

粗骨材の最大寸法は、通常 40mm に対して、20mm または 25mm も積極的に利用できるようにする。

(3) 舗装コンクリートの施工性

舗装コンクリートのスランプは、通常 2.5cm に対して、施工条件などに応じて選定しやすくできるようにする。

(4) 評価試験方法に関する検討

舗装コンクリートに関連する性能・品質の評価試験方法には課題のあるもの、試験方法自体のないものがあるため、適切な評価試験方法を整備する。

(5) 舗装コンクリート強度の管理・検査

舗装コンクリート強度の管理・検査は、曲げ強度に対して、圧縮強度等で行うことができるようにする。

これらの目的に対して、舗装コンクリートの要求性能、粗骨材の要求品質ごとに本研究で検討した内容を、**2.2 節**に整理した。

2.2 検討内容

舗装コンクリートの要求性能、粗骨材の要求品質を舗装標準示方書（土木学会）[1)]に従って整理すると**表 2.2.1** のようになる。**2.1** の**(1)～(4)**の目的ごとに検討した内容は、次のとおりである。

(1) 粗骨材の種類に関する検討

スラグ、石灰石骨材を舗装コンクリートに積極的に利用できるようにするためには、基準類[2)~4)]などに規定されている密度、吸水率、粒度など一般的な粗骨材の品質のほか、粗骨材の種類ごとに**表 2.2.2** に示す項目が重要な検討課題である。

すり減り抵抗性については、スラグと石灰石骨材は天然骨材に比べ硬さが劣る場合があり、すり減り抵抗性が小さいといわれている。粗骨材とコンクリートのすり減り抵抗性の関係を把握し、粗骨材のすり減り抵抗性からコンクリートのすり減り量が予測できるようになることが

表 2.2.1 本研究で実施した検討内容の一覧

項目	舗装コンクリートに求められる性能など[a]			舗装コンクリートの性能評価手法		粗骨材の品質評価手法		検討の必要性・検討内容
				配合要因など	検討した試験[b]	舗装コンクリートの性能に影響を与えうる粗骨材の要因	検討した試験[b]	
フレッシュコンクリート	施工性（ワーカビリティー）		締固め・充填性	単位水量（沈下度、スランプ） かさ容積	**フローテーブルによる締固め性・変形性試験**	最大寸法 粒度	ふるい分け試験 微粒分量試験 単位容積質量及び実積率試験 密度及び吸水率試験	施工に応じたワーカビリティーと、適切な締固めエネルギーを評価するための、振動台式コンシステンシー試験（沈下度）に代わる試験方法の検討
			ダレ抵抗性*		**ダレ試験**			スランプ増大によるダレ抵抗性の検討
			材料分離抵抗性		**材料分離試験**	密度		密度の大きい骨材、スランプ増大の場合の材料分離抵抗性の検討
硬化コンクリート	設計用値	強度特性	強度	W/C	曲げ強度試験	最大寸法 骨材の強度	点載荷試験 **破砕値試験**	骨材の種類、最大寸法と強度の検討
			弾性係数	コンクリート強度 かさ容積	**曲げ試験による弾性係数試験** 圧縮試験による弾性係数試験			舗装標準示方書では、曲げ試験による荷重ーたわみ関係から求めることが記述されており、圧縮と曲げ試験時の弾性係数を測定
			曲げ疲労強度		曲げ疲労強度試験			骨材の種類、最大寸法と曲げ疲労強度の検討
			引張軟化特性*		破壊エネルギー試験			
		体積変化	線膨張係数	骨材の熱膨張特性	線膨張係数試験	熱膨張特性	―	骨材の種類と線膨張係数の検討
			長さ変化	単位水量	長さ変化試験	乾燥収縮特性	**粗骨材の乾燥収縮率試験**	骨材の種類と長さ変化の検討
			自己収縮*	W/C	自己収縮試験	―	―	骨材の種類と自己収縮の検討
	走行安全性		すべり抵抗性	かさ容積 単位セメント量	**ラベリング試験機を用いたすべり試験**	すべり特性	すべり（PSV）試験	コンクリートの簡易なすべり試験の検討
			すり減り抵抗性	かさ容積 コンクリート強度	スパイクチェーンによるラベリング試験	すり減り特性	ロサンゼルス試験機によるすりへり試験 **破砕値試験**	骨材の種類、各種配合要因とすり減り抵抗性の検討
	耐久性		凍結融解抵抗性		凍結融解試験	吸水率 安定性 凍結融解 NaCl の影響	密度及び吸水率試験 安定性試験 **粗骨材の凍結融解試験**	舗装面の初期は打設面が路面、長期間使用するとすり減りにより粗骨材が露出するような状態の凍結融解・スケーリングおよび積雪寒冷地域の凍結防止剤の影響の検討
			スケーリング抵抗性*	W/C、空気量 打設面、切断面 NaCl の影響	**スケーリング試験**			
	強度の管理・検査の合理化			―	**圧縮強度試験による管理・検査の検討**	―	―	曲げ試験の大変さ、型枠、試験設備の実態などから圧縮または引張強度による管理・検査の検討

a) 要求性能に「*」のついている項目は、舗装標準示方書では要求されていない項目。

b) 本研究で提案した試験を**ゴシック体**で示す。

表 2.2.2 骨材の種類と主な検討項目

要求性能	スラグ骨材	石灰石骨材	天然骨材
すり減り抵抗性	○	○	△
すべり抵抗性	△	○	△
凍結融解抵抗性	○	△	△
乾燥収縮率	△	△	○
線膨張係数	○	△	○
材料分離抵抗性	○（電気炉酸化スラグ）	△	△

○：特に検討を要すると考えられる項目、△：舗装コンクリートへの影響が比較的小さいと考えられる項目

表 2.2.3 粗骨材の最大寸法を小さくすることにより考えられる短所、長所

短　　所	長　　所
単位水量が増え、乾燥収縮が大きくなる	伸び能力が大きくなり、ひび割れは発生しにくい [5)]
	材料分離抵抗性が大きくなる
	曲げ強度を得やすい

望まれる。

石灰石を粗骨材に使用する場合、すべりやすいといわれており、粗骨材自体のすべりと、舗装コンクリートに用いた場合のすべりの関係を把握することが必要である。

スラグ骨材は、吸水率が比較的大きいものが多く、凍結融解抵抗性が懸念される。特に舗装コンクリートは、直接気象作用を受けるとともに、交通に伴うすり減りを受けるなど厳しい条件にさらされていることから、通常の凍結融解抵抗性のほか、スケーリング抵抗性についても検討した。粗骨材については、凍結融解抵抗性と関連する指標である吸水率、安定性のほか、粗骨材自体の凍結融解試験も実施した。

スラグ骨材または石灰石骨材を使用した場合の長所と考えられることに、骨材自体の乾燥収縮が小さく、コンクリートの乾燥収縮も抑制できることが考えられる。石灰石は、温度による線膨張係数も小さくなるといわれており、温度変化によるそりの繰返しによる疲労の影響が小さくなることが期待されることから、コンクリートの乾燥収縮率試験、線膨張係数試験と、粗骨材の乾燥収縮率試験を行なった。

粗骨材の影響が大きい項目に、材料分離抵抗性も考えられる。今回用いた電気炉酸化スラグは、一般的な粗骨材に対して密度が極めて大きいことから、材料分離を生じやすいことが考えられる。後述のスランプの影響と併せ、材料分離抵抗性についても検討した。

(2) 粗骨材の最大寸法に関する検討

粗骨材の最大寸法は、通常 40mm に対して、20mm または 25mm を積極的に利用する場合の短所、長所を整理すると、**表 2.2.3** のようになる。一般には、単位水量が増え、乾燥収縮が大きくなるが、材料分離抵抗性は大きくなるといわれている。また、粗骨材の最大寸法を小さくすれば乾燥収縮は大きくなる一方で、伸び能力は大きくなり、ひび割れは発生しにくいといわ

れている[5]ことから、本研究の最大寸法に関する検討は、曲げ強度、曲げ疲労強度、曲げ破壊に影響を及ぼすと考えられる破壊エネルギーについて行なった。

(3) 舗装コンクリートの施工性に関する検討

フレッシュコンクリートのコンシステンシー試験方法についても検討対象とした。その理由は、舗装コンクリートの配合設計は、施工時の振動締固めを考慮し、振動台式コンシステンシー試験による沈下度 30 秒がベースになっている配合参考表[6),7)]を用いて行われるのが一般的である。そのときのスランプは 2.5cm 程度といわれており、現場における管理ではスランプ試験が用いられている。舗装コンクリートのコンシステンシーの評価は、振動台式コンシステンシー試験がベースであり、本来、配合設計時には振動台式コンシステンシー試験が用いられるべきであるが、この試験装置がほとんど普及していないため、配合設計時においてもスランプ試験が行われているのが現状である。このようなことから、振動台式コンシステンシー試験に代え、振動締固めによる締固め性、充填性などを評価する方法として、フローテーブルを用いる方法について検討した。

舗装コンクリートのスランプについては、上記のとおり、通常 2.5cm であるが、トンネル内などのようにダンプトラックで荷下ろしのできない現場での施工など、スランプ 2.5cm のコンクリートが適用できない場合もあるため、施工条件に応じてスランプを選定しやすくできるようにしておくことも重要である。スランプの大きなコンクリートを用いる場合、材料分離抵抗性が小さくなることが考えられる。また、道路の線形勾配が大きい場合には、表面仕上げ後に表面の変形（ダレ）を生じやすくなることが考えられることから、材料分離抵抗性とダレ抵抗性について検討した。

(4) 評価試験方法に関する検討

舗装コンクリートの性能や用いる粗骨材の品質を評価する試験方法には種々のものがあるが、課題のあるものや評価試験方法自体が確立されていないものもある。そのため、**(1)～(3)** に対して**表 2.2.1** のゴシック体で示した試験方法について検討した。

(5) 舗装コンクリートの強度の管理・検査に関する検討

舗装コンクリート強度の管理・検査は、通常曲げ強度で行われている。しかし、曲げ強度試験を行うには、労力が大きい、型枠や適したレンジの試験機を所有する施設が限られるなどの課題があることから、圧縮強度による管理・検査方法について検討した。

(6) そのほかの検討項目

曲げ強度試験、圧縮強度試験時には弾性係数も測定した。また、体積変化の観点から自己収縮についても測定した。

粗骨材の要求品質に対する代替または新しい試験方法について検討した結果を**３章**に、舗装コンクリートに対する要求性能に関する課題とその解決のための代替または新しい試験方法について検討した結果を**４章**に記述する。

2章の参考文献

1) (公社)土木学会：舗装標準示方書、pp.23～25、2014
2) (公社)土木学会：舗装標準示方書、施工性の照査pp.200～201、設計用値pp.29～38、曲げ疲労ひび割れに対する照査pp.150～153、走行安全性能照査pp.155～156、凍結融解に対する照査pp.165～166、2014
3) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針、pp.109～113、2006
4) (社)日本道路協会：舗装施工便覧、pp.135～149、2006
5) 河野広隆、森濱和正、源厚：舗装用コンクリートの諸特性に関する検討、セメント・コンクリート論文集、No.50、pp.256-261、1996
6) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針、p.252、2006
7) (社)日本道路協会：舗装施工便覧、p.139、2006

3．粗骨材に求められる品質と管理試験方法の提案

3.1 概要

コンクリートに用いられる粗骨材に求められる品質と管理試験方法は、JIS A 5308の附属書Aには**表3.1.1**のように規定されている。これらの試験方法に対して、本研究では、すり減り抵抗性は、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方法）に対して、破砕値試験でも評価の可能性を見出した。同様に、スケーリング抵抗性は粗骨材の凍結融解試験、乾燥収縮は粗骨材の乾燥収縮率試験、すべり抵抗性はポリッシング（すべり）試験（PSV：Polished Stone Value）によって評価の可能性を見出しており、それらの試験方法を次節以降で提案する。

表3.1.1 粗骨材に求められる品質と試験方法

粗骨材に求められる品質の分類		JIS A 5308附属書Aに記載されている試験		代替または追加試験	
		品質項目	試験方法規格	代替または追加試験項目	試験方法の参考規格
品質（強度、耐久性）配合設計に必要な値		絶乾密度	JIS A 1110	－	－
		吸水率	JIS A 1110	－	－
		最大寸法（ふるい分け試験）	JIS A 1102	－	－
		単位容積質量、実積率	JIS A 1104	－	－
不純物など		粘土塊量	JIS A 1137	－	－
		微粒分量	JIS A 1103	－	－
		軟らかい石片	JIS A 1126	－	－
		密度1.95 g/cm^{3}の液体に浮くもの	JIS A 1141	－	－
耐久性	凍結融解スケーリング	安定性	JIS A 1122	粗骨材の凍結融解試験	土木研究所資料第4199号
		吸水率	JIS A 1110		
	すり減り	すりへり減量	JIS A 1121	破砕値試験	BS 812-110
乾燥収縮		－	－	粗骨材の乾燥収縮率試験	土木研究所資料第4199号
すべり		－	－	すべり（PSV）試験	BS 812-114

検討に用いた粗骨材の種類は、**表3.1.2**のとおりである。

表3.1.2 検討に用いた粗骨材の種類

骨材の種類		ロット / 最大寸法 / 記号	ロット1		ロット2	
			20mm	40mm	20mm	40mm
天然骨材	硬質砂岩	A	○	○	○	○
		B	○	○	－	－
	安山岩	C	○	○	－	－
	玉砕	G	25mm	－	－	－
	砂利＋玉砕		－	○	－	－
石灰石		LA	○	○	－	－
		LB	○	○	－	－
		LC	○	○	－	－
		LD	○	○	○	－
スラグ	高炉	SA	○	－	－	－
		SB	○	－	－	－
		SC	○	－	○	－
	電気炉酸化	SD	○	－	○	－

3.2 破砕値試験

(1) 概要

舗装コンクリートに用いる粗骨材は、堅硬で、すり減り抵抗性が高いことが要求されている。粗骨材の硬さ（強度）に関する試験は、間接的には密度・吸水率試験JIS A 1110がある。粗骨材のすり減り抵抗性を評価するための試験方法に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方法）があるが、次項のような問題があり、強度およびすり減り抵抗性を１つの試験方法で評価できれば、骨材の品質管理の合理化につながるものと考えられる。そのような試験方法の候補として、BS 812-110の破砕値試験がある。

(2) 試験方法の問題点

コンクリート舗装は、コンクリートの曲げ強度によって設計されており、粗骨材の強度は重要である。しかし、粗骨材の強度を直接的に評価する試験は行われていない。

粗骨材のすり減り抵抗性に関する試験はJIS A 1121によって実施されている。しかし、この試験は、JIS A 5308では舗装コンクリートの場合に要求されるが、それ以外のコンクリートには要求されていないため、実施されない場合もある。また、この試験を行うには次のような問題がある。比較的大きな試験機を必要とする、試料の調整にかかる労力が大きい、骨材の粒度によって試料の粒度区分が異なるため、相対比較を行うことができない。粗骨材のすり減り抵抗性も骨材強度に関する指標の１つと考えられることから、粗骨材強度の直接的な評価とともにすり減り抵抗性も評価できれば、舗装用粗骨材の品質評価に役立つものと考えられる。

(3) 破砕値試験の検討結果

粗骨材の強度試験には、骨材からコアを採取して実施する強度試験、点載荷試験などがあるが、これらの試験を実施するのはかなり大変である。BS 812-110の破砕値試験は、骨材を容器に詰めて荷重を加え、骨材どうしの接触により破砕される率を測定するものであり、点載荷試験に近い試験であり、簡易に強度を表す指標が得られるものと考えられる。そこで、粗骨材の破砕値試験、点載荷試験およびすりへり試験、コンクリートのすり減り試験を実施した。

破砕値と点載荷試験の結果は**図3.2.1**のとおりであり、両者には相関関係があり、破砕値は粗骨材の強度を表す指標といえる。

粗骨材のすりへり減量と破砕値の関係は**図3.2.2**のとおり、両者にも良い相関関係があり、破砕値はすり減り抵抗性を評価できる指標になり得ることが期待される。

それを確認するため、コンクリートのすり減り試験（ラベリング試験）を実施し（**4. 4. 3項**）、粗骨材のすりへり減量または破砕値と、ラベリング試験によるすり減り量の関係を比較したのが**図3.2.3**である。コンクリートのすり減り量は、粗骨材のすりへり減量または破砕値との関係は良好であり、コンクリート舗装版のすり減り抵抗性を粗骨材のすりへり減量のほか破砕値でも評価可能である。

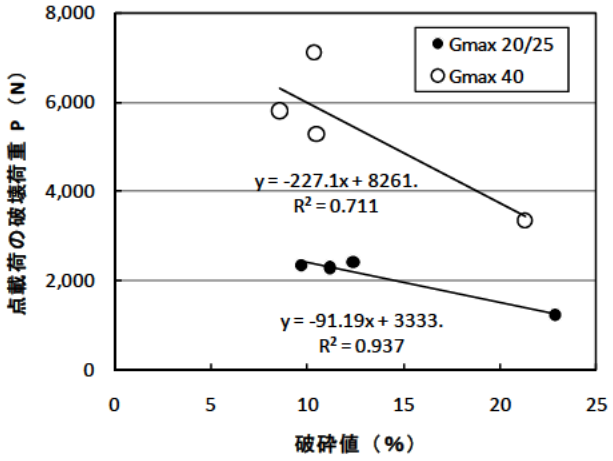


図3.2.1 粗骨材の破砕値と点載荷試験による破壊荷重の関係[第1報]

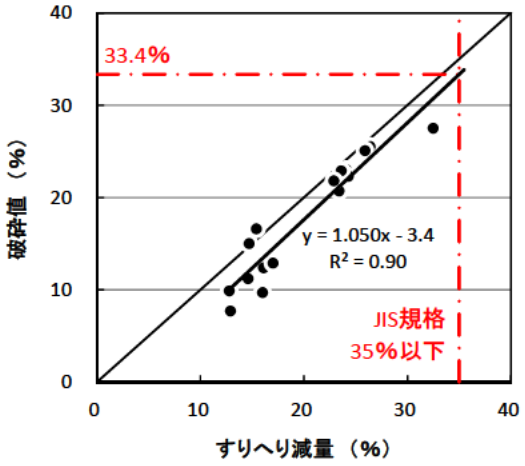


図3.2.2 粗骨材のすりへり減量と破砕値の関係[第3報]

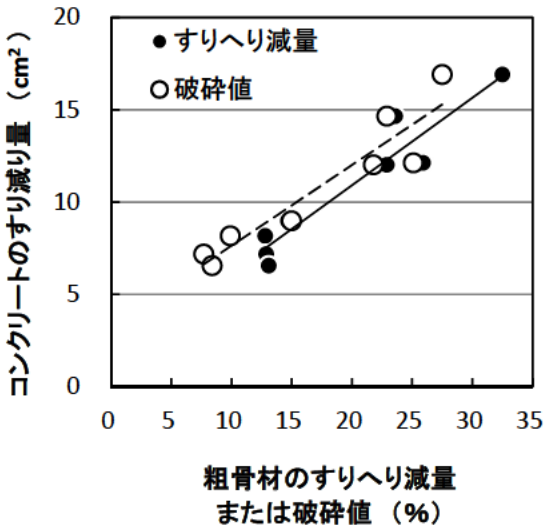


図3.2.3 粗骨材のすりへり減量または破砕値とコンクリートのすり減り量の関係[第3報]

(4) 試験方法の提案

以上の検討結果より、粗骨材の強度、すり減り抵抗性の評価試験として破砕値試験を提案する。その方法の概要は次のとおりである。

a) 主な器具および装置

鋼製円筒（内径154mm、高さ140mm、厚さ16mm）、プランジャー（直径152mm、高さ110mm）、底板（一辺210mm、厚さ6mm）、試料計量容器（内径115mm、深さ180mm）、圧縮試験機（容量400kN以上）

b) 試料の準備

試料は、呼び寸法15mmのふるいを通過し、10mmにとどまる粗骨材とする。1回の試験に用いる試料の量は、試料計量容器に3層で25回ずつ突き固め、容器内に試料を満たす。そのときの試料の質量（A）を測定す

る。

c) 試験の手順

b)で計量した試料を鋼製円筒に3層で25回ずつ突き固め、プランジャーを載せ、載荷速度40kN／分で400kN載荷する。

除荷後、2.5mmふるいでふるい分け、ふるいを通過した破砕粒の質量（*B* ）を計量する。

d) 破砕値

破砕値を次式によって求める。

$$破砕値＝B／A×100（\%）$$

ここに、*A*：試料計量容器を満たした試料の質量

B：2.5mmふるいを通過した破砕粒の質量

(5) 破砕値の判定基準

破砕値によりコンクリートの強度、すり減り抵抗性を評価し、粗骨材使用の可否を判断するためには、破砕値の規格値が必要になる。

図3.2.2の粗骨材のすりへり減量と破砕値の関係より、図中に回帰式を示す。粗骨材のすりへり減量の規格値は35%以下であり、その値を**図3.2.2**の回帰式に代入すると、破砕値は33.4%となる。また、破砕値の標準偏差は2.0%であった。今回の実験結果より、安全側に丸めると、破砕値の規格値は30%以下に設定すればいいものと考えられる。

3. 2節の参考文献

第1報 (独)土木研究所、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)：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、(1) 骨材試験、コンクリートの配合および強度試験、共同研究報告書第455号、2014.3

第3報 (独)土木研究所、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)：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、(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、共同研究報告書第477号、2015.12

3.3 粗骨材の凍結融解試験

(1) 概要

コンクリートの凍害は、モルタルなどがはく離するスケーリングと、粗骨材の凍結膨張によるポップアウト、ひび割れなどを生じる場合がある。

粗骨材の凍結融解抵抗性を評価するための試験方法には、JIS A 1122（硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法）と、間接的にはJIS A 1110（粗骨材の密度及び吸水率試験方法）がある。しかし、舗装コンクリートを考慮した場合、JIS A 1122には次項のような問題がある。

(2) 安定性試験の問題点

舗装コンクリートの表面（路面）は露出しており、気象作用を直接受け、気温の変化のほか、積雪などを伴う。そのため、積雪寒冷地では、塩化ナトリウムNaCl、塩化カルシウム$CaCl_2$が散布されることから、これらが水に溶解し、コンクリートに浸透して劣化を生じる恐れがある。また、供用初期の表面はモルタルに覆われているが、長期間供用されると表面は摩耗して粗骨材が露出し、直接凍結融解作用などを受けるようになる。

しかし、JIS A 1122の硫酸ナトリウムによる安定性試験は、硫酸ナトリウムの結晶圧による骨材の破壊であり、水あるいは塩化ナトリウムなどが溶解した溶液の凍結による膨張圧と硫酸ナトリウムの結晶圧は異なるという問題がある[1)]。また、硫酸ナトリウムという薬品を用いること、硫酸ナトリウムを溶解させなければならないなど、試験が大変であることから、舗装コンクリートに用いられる骨材の試験に適した方法を検討する必要がある。

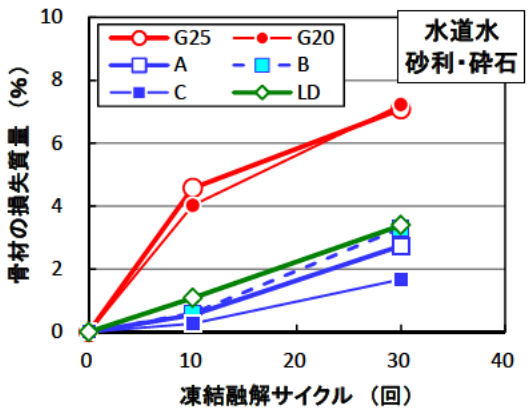
(3) 粗骨材の凍結融解試験の検討結果

そこで、粗骨材の凍結融解抵抗性を評価する試験方法について、文献1)の簡易凍結融解試験を参考に、塩化ナトリウムNaClを溶解した溶液を用いる試験方法について検討した。

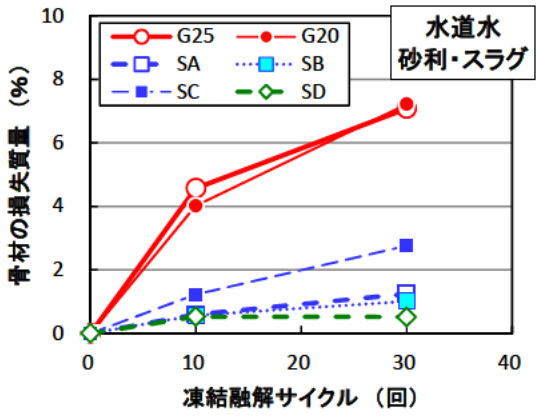
粗骨材10種類（砂利GのGmax 20、25mmと、いずれもGmax 20mmの砂岩砕石A、B、安山岩砕石C、石灰岩LD、スラグ骨材SA～SD）を、水道水およびNaCl 3%溶液（塩水）に浸し、－18℃ 16時間、20℃ 8時間を1サイクルとした骨材の凍結融解試験を行い、3サイクル、10サイクル、30サイクルで損失質量を測定した。

凍結融解サイクルと骨材の損失質量の関係は**図3.3.1**（水道水）および**3.3.2**（塩水）のとおりである。**図3.3.1**の縦軸は上限が10%に対し、**図3.3.2**は40%である。また、(a)図は砂利および砕石、石灰石の結果、(b)図は砂利およびスラグ骨材の結果である。**図3.3.1**と**図3.3.2**を比較すると、水道水よりも塩水のほうが、損失がかなり大きく、NaClが溶解している場合、凍害を受けやすいことがわかる。ただし、粗骨材の種類によってその影響はかなり異なり、水道水の30サイクルの場合、砂利の損失質量は7%程度に対し、そのほかは4%以下であった。特に安山岩Cと、スラグ骨材のSC以外は2%以下であった。

塩水の場合、4種類のスラグ骨材と砂岩A、石灰岩LDは良好であるが、砂岩B、Cと砂利Gは凍結融解サイクルとともに損失質量も増加し、30サイクルで砂岩Bは砂利Gと同程度、安山岩Cは砂利Gよりも大きくなっている。

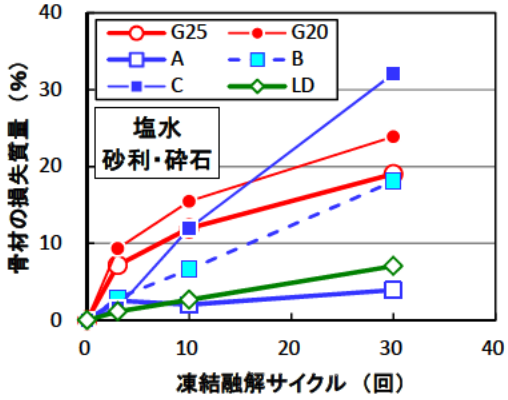


(a) 砂利・砕石の結果

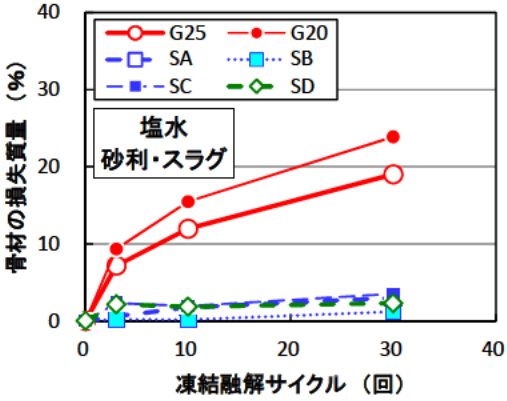


(b) 砂利・スラグ骨材の結果

図 3.3.1 水道水による凍結融解試験の結果



(a) 砂利・砕石の結果



(b) 砂利・スラグ骨材の結果

図 3.3.2 塩水による凍結融解試験の結果

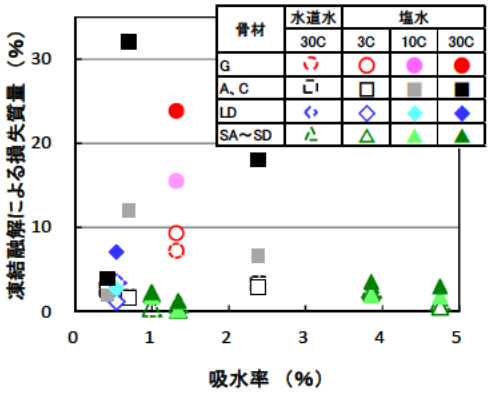


図3.3.3 粗骨材の吸水率と凍結融解試験結果の関係

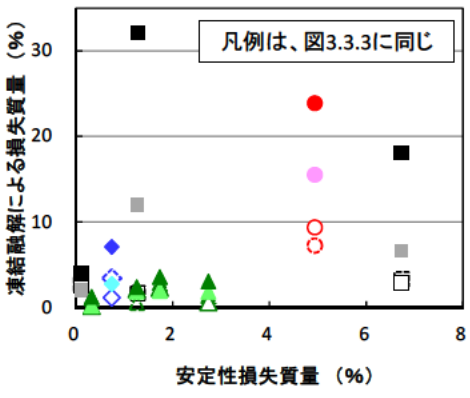


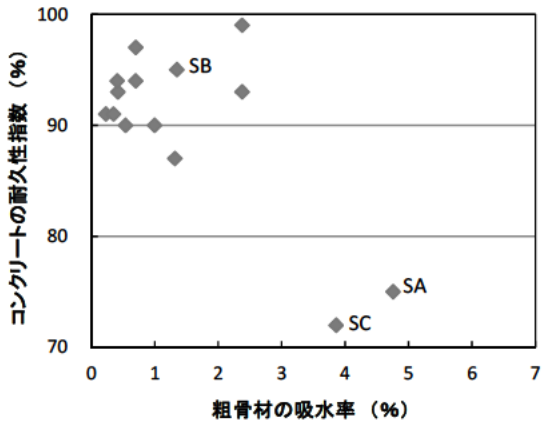
図3.3.4 粗骨材の安定性損失質量と凍結融解試験結果の関係

粗骨材の凍結融解試験の結果と、粗骨材の吸水率、安定性試験の結果を比較した。それが**図3.3.3**および**図3.3.4**である。水道水は30サイクル、塩水は3サイクル、10サイクル、30サイクルの結果である。これらの相関性は認められない。

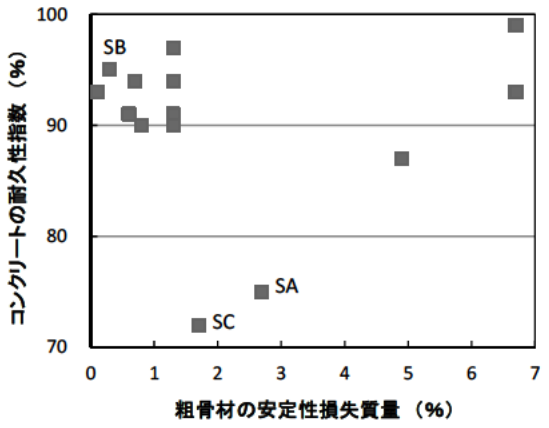
次に、粗骨材の各種指標（吸水率、安定性と凍結融解試験による損失質量）と、コンクリートの凍結融解抵抗性やスケーリング抵抗性との関係を確認するために、コンクリートの凍結融解試験による耐久性指数（詳細は**4. 5. 2項**）、スケーリング試験によるスケーリング量（詳細は**4. 5. 3項**）の関係について検討する。**図3.3.5**は粗骨材の各種指標とコンクリートの凍結融解試験による耐久性指数の関係、**図3.3.6**は粗骨材の各種指標とコンクリート切断面のスケーリング試験（100サイクル）によるスケーリング量の関係である。

図3.3.5は、いずれも大きく分けて２つの集団に分かれるグラフが描けた。**図3.3.5(b)**および**(c)**を見ると、安定性損失質量が大きい粗骨材でも必ずしも劣化していない場合もあるなど、粗骨材の安定性損失質量、凍結融解損失質量とコンクリートの耐久性指数の関係は不明瞭であった。一方で**図3.3.5(a)**によると、吸水率が大きい粗骨材２種類ではコンクリートの耐久性指数が小さくなった。ただし、吸水率が2.5%～4%付近の粗骨材のデータがないことから、本研究の結果からは両者の関係についてははっきりしないが、既往の試験結果[1)]によれば、粗骨材（砕石）の吸水率とコンクリートの耐久性指数は比較的良好な対応関係を示していたことから、本研究の吸水率についても、それなりの関係が認められる可能性はあると考えられる。

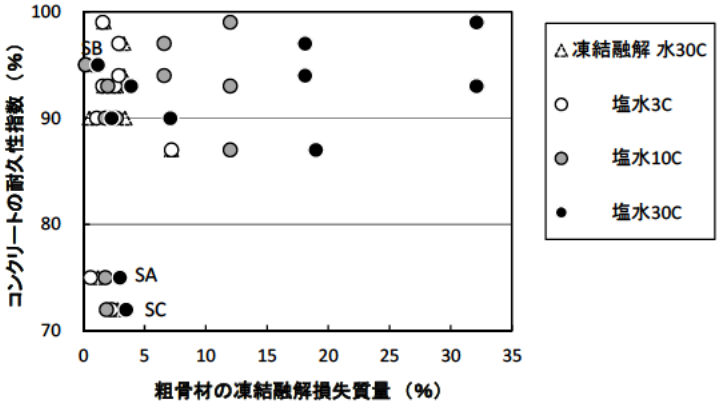
図3.3.6は、粗骨材の吸水率とコンクリートのスケーリング量の間に関係は認められないが、安定性と凍結融解損失質量(10サイクルおよび30サイクルの結果)はコンクリートのスケーリング量と関係が認められた。



(a) 粗骨材の吸水率との関係

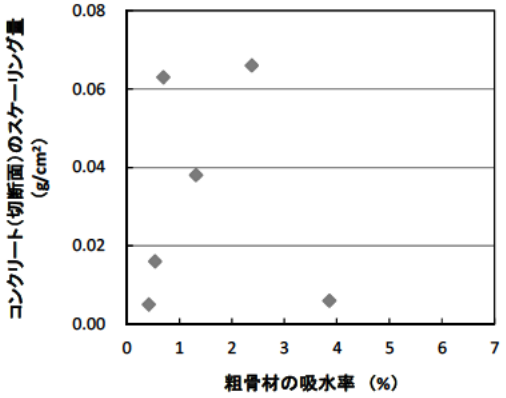


(b) 粗骨材の安定性損失質量との関係

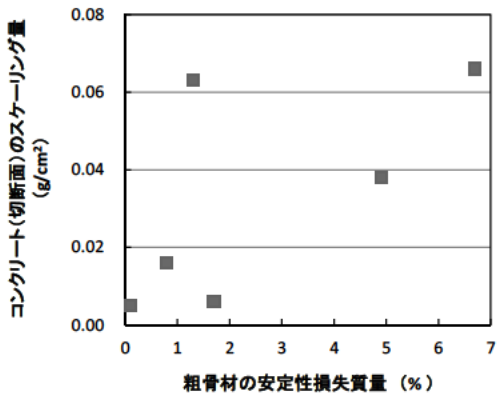


(c) 粗骨材の凍結融解損失質量との関係

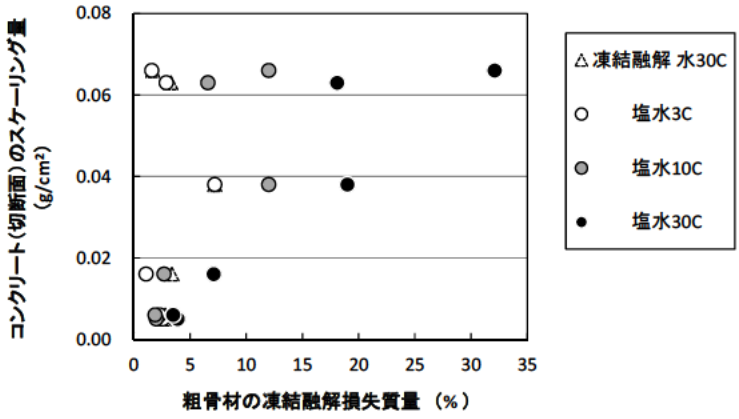
図3.3.5 粗骨材の各種指標とコンクリートの耐久性指数の関係



(a) 粗骨材の吸水率との関係



(b) 粗骨材の安定性損失質量との関係



(c) 粗骨材の凍結融解損失率との関係

図3.3.6 粗骨材の各種指標とコンクリート（切断面）のスケーリング量（100サイクル）の関係

表3.3.1 粗骨材の吸水率とコンクリートの耐久性指数（図3.3.5）の回帰結果

試験項目	条　　件	傾き a	切片 b	r^2
吸水率		-3.911	95.8	0.510

表3.3.2 粗骨材の各種指標とコンクリート（切断面）のスケーリング量（100サイクル）（図3.3.6）の回帰結果

試験項目	条　　件	傾き a	切片 b	r^2
安定性		0.00680	0.0147	0.416
凍結融解	塩水 10 サイクル	0.00450	0.0042	0.626
	塩水 30 サイクル	0.00230	0.0007	0.851

図3.3.5および**図3.3.6**について、比較的関係が認められる、または認められると推測される項目について、一次式で回帰した場合の結果を**表3.3.1**および**表3.3.2**に示す。

表3.3.1より、コンクリートの凍結融解試験から求めた耐久性指数と粗骨材の吸水率については、本研究で得られたデータで回帰直線を引けば、決定係数r^2は0.5程度となった。

表3.3.2より、コンクリート切断面のスケーリング試験から求めたスケーリング量と粗骨材の各種指標の関

係は、安定性との決定係数r^2は0.4程度であった。粗骨材の凍結融解との関係は、塩水で試験回数を増やすほど決定係数が高くなり、決定係数r^2は10サイクルで0.6程度、30サイクルでは0.8程度となった。

以上のとおり、コンクリートの凍結融解試験と、従来からいわれているように粗骨材の吸水率との関係はある程度認められると考えられるが、安定性については今回使用した粗骨材には安定性が極端に悪いものはなかったため、それほど明確な関係は認められなかったものと考えられる。それに対して、コンクリート舗装のすり減りを考慮してコンクリート切断面のスケーリング試験を実施した結果、粗骨材自体の塩水による凍結融解試験による損失質量とスケーリング量には良好な関係が認められ、粗骨材のスケーリング抵抗性を評価するための重要な指標になることが示唆された。

(4) 粗骨材の凍結融解試験方法の提案

舗装コンクリートに用いる粗骨材の凍結融解抵抗性、特にスケーリング抵抗性を評価する方法に、粗骨材自体の塩水による凍結融解試験を提案する。

舗装コンクリートに用いる粗骨材の凍結融解試験方法を、文献1)を参考に提案するが、適用範囲などが異なるので、両方法を対比して**表3.3.3**に示す。

(5) 粗骨材の凍結融解試験による質量減少率の判定基準

粗骨材の塩水による凍結融解試験結果とコンクリート（切断面）のスケーリング試験結果には良い相関があることがわかった。その要因の１つは、凍結融解試験による質量減少率が大きい粗骨材は、粗骨材自体がはく離しやすいためと推定された。なお、スケーリング量の判定基準を決めるには、さらに検討が必要である。

3.3節の参考文献

1) 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
2) 例えば、遠藤裕丈、田口史雄、嶋田久俊：塩化物水溶液による長期凍結融解作用を受けたコンクリートのスケーリング特性、土木学会論文集、No.725、V-58、pp.227-244、2003.2

表3.3.3 粗骨材の凍結融解試験方法

項　　目	文献1)の簡易凍結融解試験方法(案)	舗装コンクリート用粗骨材の凍結融解試験方法（案）
適用範囲	砂利（Gmax 25mm以下）	Gmax 25mm以下の砂利、砕石、石灰石、スラグ骨材
主な機器	ポリプロピレン製容器（容積1 L程度） 冷凍庫（－18℃以下） 水槽（20℃） ふるい（呼び寸法4.75、9.5、16、19、26.5mm）	同左
試験手順	(1) 粗骨材を4.75～9mm、9～16mm、16～19mm、19～26.5mmにふるい分け、Gmax 20mmの場合、下位の粒子群9～16mmと、上位の粒子群16～19mm、Gmax 25mmの場合も同様に16～19mmと、19～26.5mmを1kg以上準備し、2つの粒子群を試料とする。 (2) 粒子群ごとに試料を容器にできるだけ詰め込み、試料質量を0.1g単位で測定する。	同左
	(3) 容器に水、または塩水（NaCl 1wt%）を満たし、蓋をする。	NaCl 3wt%の塩水を用いる。
	(4) 容器の一つの中心部に温度計を設置し、温度を測定する。 (5) 容器を冷凍庫に入れ、温度が－18℃になるまで冷凍する。冷凍時間は16時間とする。 (6) 容器を冷凍庫から取り出し、水槽に入れ、完全に融解させる。融解時間は8時間とする。 (7) 1日1サイクルで(5)と(6)を繰り返す。	同左
	(8) 試験終了は水の場合30サイクル、塩水の場合3サイクルとする。	30サイクルまで繰り返す。
	(9) 凍結融解終了後の試料を、試料準備時に用いたふるいでふるい、ふるいにとどまった試料の質量と、通過した試料の質量を0.1gまで測定する。	同左
損失質量の求め方	(1) 各粒子群の損失質量分率 次式によって算出し、小数点以下1けたに丸める。 $P_a = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \times 100$ ここに、P_a：各粒子群の損失質量分率（%） m_1：試験後にふるいにとどまった試料の質量（g） m_2：試験後にふるいを通過した試料の質量（g） (2) 骨材の損失質量分率 次式によって算出する。 $P_b = \frac{P_{a1} \times b_1 + P_{a2} \times b_2}{b_1 + b_2} \times 100$ ここに、P_b：骨材の損失率（%） P_{a1}：上位の粒子群の損失質量分率（%） P_{a2}：下位の粒子群の損失質量分率（%） b_1：上位の粒子群の質量分率（%） b_2：下位の粒子群の質量分率（%）	同左

3.4 粗骨材の乾燥収縮率試験

(1) 概要

コンクリートの乾燥収縮率には骨材物性の影響が大きいことが知られており[1)]、土木研究所においてもコンクリートの乾燥収縮率に及ぼす粗骨材の影響について検討が行われている[2)]。また、最近では、粗骨材の乾燥収縮率がコンクリートの乾燥収縮率に及ぼす影響が大きいことが明らかになっており[3)]、粗骨材の乾燥収縮率を測定した研究結果も複数報告されている[2)~5)]。共同研究では、粗骨材の乾燥収縮試験を行い、舗装コンクリートの乾燥収縮率に及ぼす粗骨材の種類および品質の影響について検討した。

(2) 問題点

粗骨材の乾燥収縮率は、種々の方法によって測定されているが[2)~5)]、標準的な測定方法の確立には至っておらず、安定的な測定方法の確立が望まれている。

(3) 乾燥収縮率試験の結果

共同研究では、土木研究所が提案する「ひずみゲージによる粗骨材の乾燥収縮率試験方法（案）」[2)]に従って、砂岩砕石（2種類）、安山岩砕石、砂利、石灰石砕石（4種類）およびスラグ骨材（高炉スラグ骨材3種類、電気炉酸化スラグ骨材1種類）の乾燥収縮率を測定した。

乾燥期間7日までの主な粗骨材の乾燥収縮率測定結果を**図3.4.1**～**図3.4.4**に示す。砂利の測定結果は、他の粗骨材と比較してばらつきが大きい結果であった。砂利は、今回試験を実施した他の粗骨材とは異なり、骨材中に品質の異なる様々な岩種が混在していることが考えられ、岩種によって乾燥収縮率が大きく異なったものと推察される。この結果より、砂利のように複数の岩種が混在する粗骨材の場合は、骨材を分類し、構成比率に応じて平均を求める必要がある。

各粗骨材の乾燥収縮率の平均値を**図3.4.5**に示す。石灰石骨材およびスラグ骨材はいずれも乾燥収縮率が小さい結果となったが、砂岩砕石、安山岩砕石および砂利の乾燥収縮率は大きく、骨材種類の影響を確認することができた。

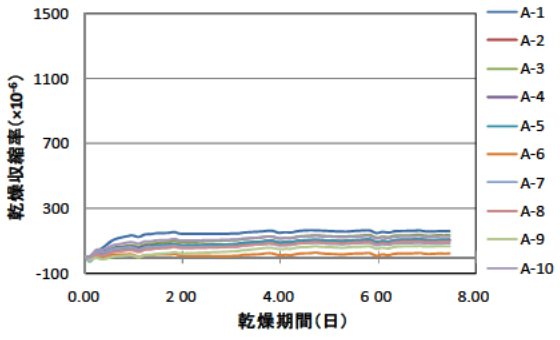


図3.4.1 乾燥収縮率試験結果（砂岩A）

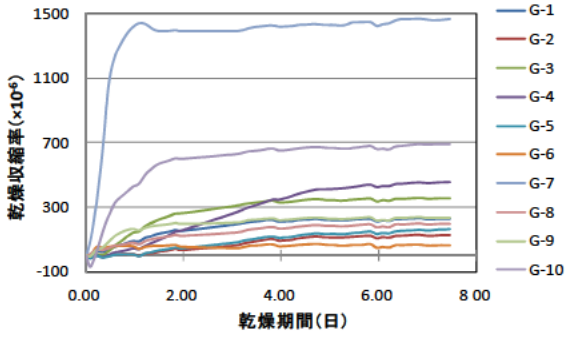


図3.4.2 乾燥収縮率試験結果（砂利G）

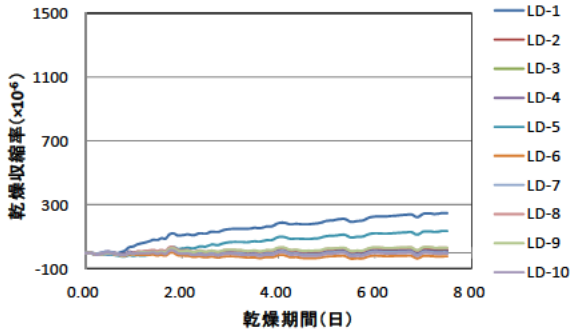


図3.4.3 乾燥収縮率試験結果(石灰石LD)

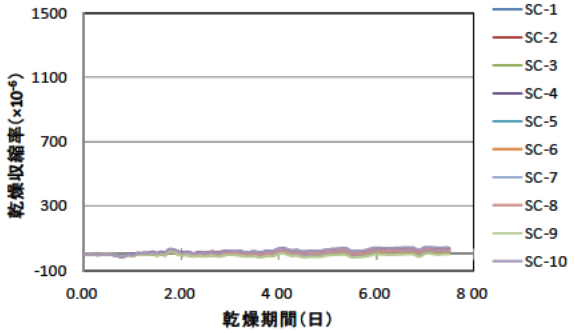


図3.4.4 乾燥収縮率試験結果(高炉スラグSC)

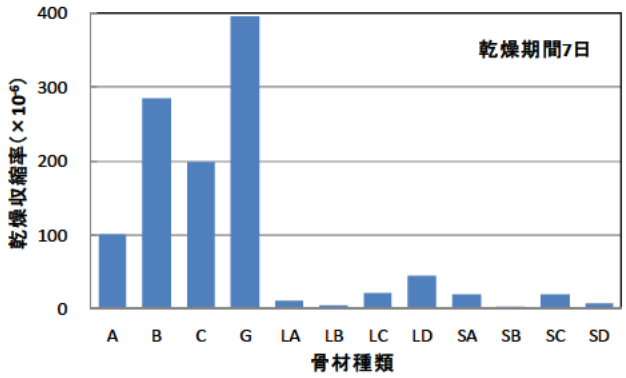


図3.4.5 粗骨材の乾燥収縮率

(4) 試験方法の提案

骨材の乾燥収縮試験方法として、土木研究所資料[2)] に示される方法を提案する。その手順を以下に示す。なお、試験に供する骨材の個数は各10個とし、様々な岩種で構成されている砂利については目視で大まかに分類して採取した10個を用いることとする。

a)骨材の加工、ゲージの貼付け(写真3.4.1)

手順1　粗骨材をコンクリートカッターで切断し、切断面を研磨して平滑化した。

手順2　切断面をアセトンで脱脂し、接着剤を塗布する。接着剤の塗布は2回行う。

手順3　接着剤塗布面に、骨材に塗布したものと同一の接着剤を使用してひずみゲージを貼り付ける。

手順4　室温で24時間乾燥後、ひずみゲージをコーティングテープで被覆する。

手順5　コーティングテープ上にシール材を重ねて貼り付ける。

手順6　大気中にて24時間乾燥させる。

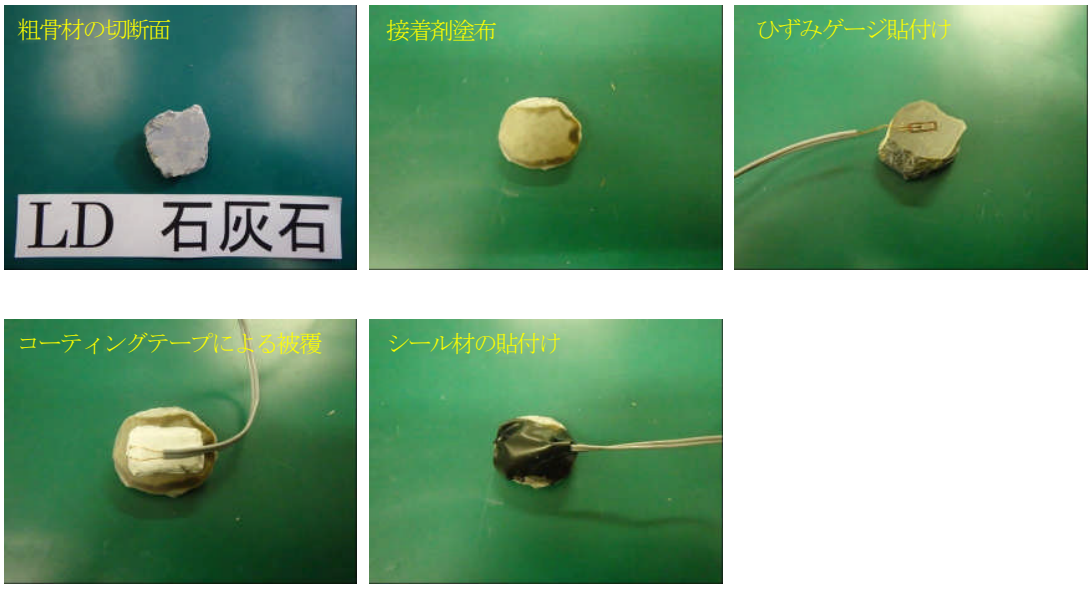


写真 3.4.1 粗骨材の加工状況

b)乾燥収縮率の測定（写真3.4.2）

手順1　粗骨材が浸漬するまで、バット内に蒸留水を投入する。

手順2　粗骨材および水を投入したバットを恒温恒湿室（温度20℃/相対湿度95%）内に静置する。

手順3　ひずみが安定した段階（恒温恒湿室内に静置後5日）に蒸留水を除去し、引き続き恒温恒湿槽（温度20℃/相対湿度60%）内に静置する。

手順4　水を除去後、ひずみが安定した段階（乾燥開始後7日、ひずみの変化量　1.9～3.8×10^{-6}/hr）に測定を終了する。

写真 3.4.2 粗骨材の設置状況

(5) 判定基準

既往の検討[4]などと同様に、ひずみゲージによって粗骨材の乾燥収縮率を測定することは可能と考えられるものの、現段階では骨材の乾燥収縮率がコンクリートの乾燥収縮率に及ぼす影響の度合いについては明らかになっていない。したがって、現状は、相対比較によりコンクリートの乾燥収縮率に及ぼす骨材の影響を評価することとし、今後測定データを蓄積し、コンクリートの乾燥収縮への影響が明らかになった段階で、粗骨材の乾燥収縮率の評価指標を設けることが望ましいと考える。

3.4節の参考文献

1)（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、p.84、2012.8
2) 独立行政法人土木研究所 : 土木研究所資料4199　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、2011.3
3) 兵頭彦次、谷村充、井坂幸俊、杉山真悟 : コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材物性の影響評価、セメント・コンクリート、No.777、pp.24-29、2011.10
4) 山田宏、片平博、渡辺博志：粗骨材の収縮特性の評価に関する検討、土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造)、Vol.68、No.1、pp.63-71、2012
5) 後藤幸正、藤原忠司：乾湿に伴う骨材の体積変化、土木学会論文報告集、第247号、pp.97-108、1976.3

3.5 粗骨材のすべり試験

(1) 検討概要

舗装コンクリートに用いる粗骨材は、すべり抵抗性を有していることが必要となる。しかし粗骨材のすべり抵抗性を評価する試験方法が少なく、検討もあまり行なわれていないのが実情である。ここでは評価方法の例としてPSV試験の試験方法の概略を述べる。試験方法の詳細は、舗装調査・試験法便覧A006（粗骨材の促進研磨試験方法）[1)]やBS812-114（Method for Determination of the Polished-Stone Value）を参考にされたい。

(2) 試験方法

1) 測定対象骨材１種につき、**写真 3.5.1** に示すような供試体を４枚作製する。
2) 促進研磨試験機（**写真 3.5.2**）の回転ドラムに供試体を 14 枚設置する。
3) 所定の温度（20±5℃）で水と研磨材を散布しながら 3 時間±5 分研磨を行う。この研磨は研磨材の種類を変えて、２回行なう。
4) 研磨終了後の供試体を所定の温度（20±2℃）[1)]で、ポータブルスキッドレジスタンステスタを用いて測定する。このとき使用するゴムスライダは幅約 32mm の PSV 試験用のものを用い、読み値は PSV 試験用のスケールを設置してその目盛りを使用する。スケールを使用しない場合は測定値の 1.67 倍を読み値とする。
5) ４枚の供試体から得られたすべり抵抗値のデータは整数に丸め、４枚の平均値をもって「室内 PSV（Polished Stone Value）」とする。

写真 3.5.1 PSV 試験用供試体

写真 3.5.2 促進研磨試験機

(3) 試験結果

各種粗骨材のPSV試験結果を**表3.5.1**に示す。石灰石のLC20が他の骨材と比較して室内PSVが低く、単体ではすべりやすい傾向が見られたが、**4.4.2項**に後述するとおり、舗装コンクリート供試体ですべり抵抗性を評価すると、粗骨材の種類によるBPNの差は認められなかった。

表 3.5.1 室内 PSV の結果

骨材の種類	室内PSV				
	1	2	3	4	平均
A20	48	49	48	49	49
LC20	28	31	30	27	29
SC20	45	43	41	45	44
SD20	48	46	48	47	47

(4) 問題点と課題

粗骨材のすべり抵抗性は、コンクリートのすべり抵抗性に影響を与えていると考えられる。しかし細骨材などもコンクリートのすべり抵抗性に影響を与えていると考えられるので、コンクリートのすべり抵抗性を、粗骨材のすべり抵抗性を評価することで、どの程度説明できるかは不明である。

また、BS812-114 では、基準供試体（Leicestershire 州 Enderby 産の骨材を使用）の PSV が 48～54 の範囲にあることを確認することによって、試験の許容精度を判断している。ある試験結果を他の試験期間の結果と比較するためには、基準供試体を取り寄せるか、何らかの比較試験を実施する必要があり、PSV の絶対値をもって粗骨材のすべり抵抗性を評価することは現状では難しい。

さらに促進研磨試験機は、日本ではあまり導入されていないため、一般的な試験方法として扱うことにも難点があると考えられる。

3.5節の参考文献

1) (公社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧[第2分冊]、A006 粗骨材の促進研磨試験方法、pp.[2]-31～[2]-40、2007.6

4．舗装コンクリートに求められる性能と管理試験方法の提案

4.1 概要

舗装コンクリートに求められる性能と管理試験方法について、本研究で実施した内容をまとめると、**表4.1.1**のようになる。次節以降において、求められる性能項目ごとに通常用いられている砕石、砂利のほか、主に石灰石骨材、スラグ骨材を用いた場合の舗装コンクリートについて検討した結果や、現在実施されている試験方法に代わる試験方法・求められる性能に応じた新しい試験方法について検討した結果をとりまとめ、提案する。

表4.1.1 舗装コンクリートに求められる性能と試験方法

項目	舗装コンクリートに求められる性能など			試験方法規格		**代替または追加試験の提案**	
				性能試験項目	試験方法規格[a)]	試験項目[b)]	試験方法[a)]
フレッシュコンクリート	施工性（ワーカビリティー）		締固め・充填性	振動台式コンシステンシー試験	JSCE-F 501 便覧B046	**フローテーブルによる締固め・変形性試験**	第3報
				スランプ試験	JIS A 1101	－	－
			材料分離抵抗性	－	－	**材料分離試験**	第3報
			ダレ抵抗性	－	－	**ダレ試験**	第3報
硬化コンクリート	設計用値	強度特性	強度	曲げ強度試験	JIS A 1106	－	－
			曲げ疲労強度	曲げ疲労強度試験	便覧B070T	－	－
			引張軟化特性	破壊エネルギー試験	JCI-S-001	－	－
			弾性係数	曲げ強度試験結果から弾性係数を算出	(舗装標準示方書)	**曲げ試験による弾性係数試験**	第1報 JIS A 1149
		体積変化	線膨張係数	－	－	線膨張係数試験	第2報
			長さ変化	長さ変化試験	JIS A 1129	－	－
			自己収縮	自己収縮試験	JCI-SAS2	－	－
	走行安全性		すべり抵抗性	すべり試験	便覧S021	**ラベリング試験機を用いたすべり試験**	第3報
			すり減り抵抗性	スパイクチェーンによるラベリング試験	便覧B002	－	－
	耐久性		凍結融解抵抗性	凍結融解試験	JIS A 1148	－	－
			スケーリング抵抗性	スケーリング試験	ASTM C672	**スケーリング試験**	第2, 3報
	強度の管理・検査の合理化		曲げ強度に代え、圧縮強度による管理・検査			**圧縮強度試験による管理・検査の検討**	
						圧縮強度	JIS A 1108

a) 試験方法のJIS以外の規格略号　JSCE：土木学会規準、便覧：舗装調査・試験法便覧（日本道路協会）、JCI：日本コンクリート工学会規準、ASTM（American Society for Testing and Materials）：米国試験材料協会規格

b) 本研究で提案した試験項目を**ゴシック体**で示す。

4.2 施工性（ワーカビリティー）

4.2.1 概要

舗装コンクリートの配合設計は、舗装設計施工指針（以下、単に指針と呼ぶ）の配合参考表[1)]を用いることが一般的である。配合参考表は、施工時の振動締固めを考慮して振動台式コンシステンシー試験による沈下度をベースに作成されている[2)]が、文献2)は50年前のものである。各種粗骨材を用いた場合について、配合参考表を用いて配合設計が可能かについて検討した。その結果を**4.2.2項**に取りまとめた。

舗装コンクリートを配合設計するにあたって、振動台式コンシステンシー試験による配合参考表が用いられることについては前述したとおりである。しかし、振動台式コンシステンシー試験装置はほとんど普及していないことなどから、現場における管理はもちろん、配合設計においてもスランプ試験が用いられているのが現状である。そのため、振動締固めに対する評価は行われていない。そこで、振動台式コンシステンシー試験に代わる試験方法について検討した。この検討結果と試験方法の提案は、**4.2.3項**のとおりである。

粗骨材の種類が施工性に及ぼす影響に関しては、電気炉酸化スラグのように密度が極めて大きい粗骨材は、沈降しやすく材料分離しやすいことが考えられる。そのため、材料分離抵抗性を評価する方法について検討した。また、舗装コンクリートのワーカビリティーは、沈下度30秒（スランプ2.5cm）が標準とされているが、施工条件などによってはスランプを大きくせざるを得ない場合もある。そのような場合に考えられる問題に、線形勾配が大きくなった場合の表層の変形（ダレ）が考えられる。そのため、ダレ試験についても検討した。これらの検討結果と試験方法の提案は、**4.2.4項**、**4.2.5項**のとおりである。

4.2.2 粗骨材の種類と配合への影響

(1) 検討概要

粗骨材の最大寸法20mmまたは25mmの12種類（石灰石4種類、高炉スラグ3種類、電気炉酸化スラグ1種類、砕石3種類、砂利1種類）と、最大寸法40mmについてはスラグ骨材を除く8種類、合計20種類の粗骨材について、単位粗骨材かさ容積、単位水量、水セメント比を変化させ、沈下度のほか、現場の管理に用いられているスランプを測定し、配合参考表が適用可能かどうかについて検討した。

(2) 結果の概要

a) 単位粗骨材かさ容積と沈下度

舗装コンクリートは、施工できる範囲で粗骨材が多く、単位水量が少なくなるように配合設計する。そのため、振動台式コンシステンシー試験による沈下度が最小になるときの単位粗骨材かさ容積（最適単位粗骨材かさ容積）を求める。一例を**図4.2.2.1**に示す。

各粗骨材の最適単位粗骨材かさ容積を次のように求めた。**図4.2.2.1**のような結果を二次曲線によって回帰して沈下度の最小値を求め、そのときの単位粗骨材かさ容積を求めた。**表4.2.2.1**に配合参考表の値[1)]と、実験で得られた結果の範囲を示す。

砕石の最大寸法40mmの最適単位粗骨材かさ容積は、0.72～0.76の範囲にあり、配合参考表の値0.73とほぼ同じかそれ以上である。最大寸法20mmの場合は、砕石（砂岩、安山岩）、石灰石は0.71～0.73、スラグ骨材は0.70～0.73であり、配合参考表の値と同程度かやや小さい値であった。

砂利の場合は、今回使用したのは、粒度範囲25～5mmは砂利40～25mmを破砕した玉石砕石（玉砕）であり、最大寸法25mmは玉砕のみである。最大寸法40mmmの場合、25mm以下は玉砕である。そのため、実験値はカッコ書きとしている。最大寸法25mmは玉砕のみであることから、配合参考表の砕石の値とほぼ一致している。最大寸法40mmは、40～25mm の砂利と25～5mmの玉砕を混合したものであるが、配合参考表の砂利の値より若干大きな値を示した。

以上のとおり、今回の実験結果は、砕石および玉砕は配合参考表の砕石の場合とほぼ一致し、玉砕と砂利の混合物については、配合参考表の砂利の場合に近い値を示した。

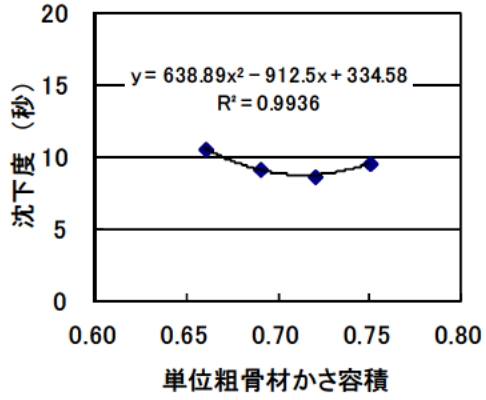


図4.2.2.1 単位粗骨材かさ容積と沈下度の関係（A20の場合）

表4.2.2.1 最適単位粗骨材かさ容積の配合参考表の値と実験結果

粗骨材の最大寸法（mm）	砂利コンクリート		砕石コンクリート		
	配合参考表の値	実験結果	配合参考表の値	実験結果	
40	0.76	(0.78)	0.73	0.72～0.77	
20または25		(0.73)		砕石、石灰石	0.71～0.73
				スラグ骨材	0.70～0.73

b) 単位水量と沈下度の関係

粗骨材の最大寸法20mmまたは25mmと40mmについて、単位水量を変化させて沈下度を求めた結果の一例が**図4.2.2.2**である。沈下度は対数で表している。各骨材についてこの関係を求め、沈下度30秒の時の単位水量を求めると、**図4.2.2.3**のとおりである。

表4.2.2.2に配合参考表の値[1)]と、実験結果を示す。砕石の場合は、最大寸法40mmと20mmとも、実験結果は参考表の値よりやや低い程度の値となった（C20、LB20、B40が低い値であった）。砂利の場合、最大寸法25mmは玉砕であり、参考表の砕石の値に近かった。最大寸法40mmmの場合、40～25mmは玉石であるが、25～5mmは玉砕であり、参考表の40mmと20mmのほぼ中間の値になっている。

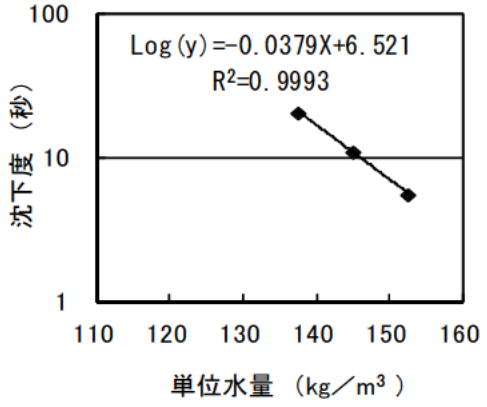
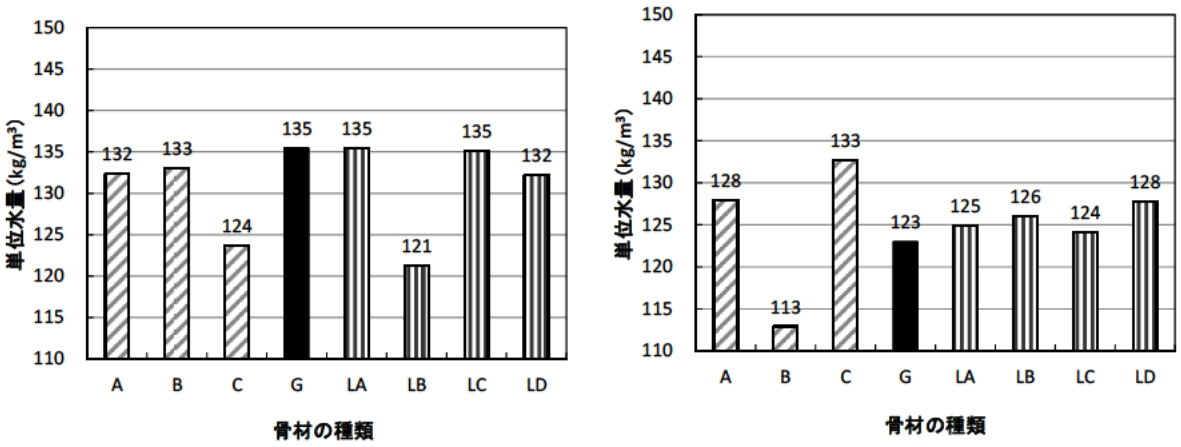


図4.2.2.2 単位水量と沈下度の関係(A20の場合)



(a) 粗骨材の最大寸法20または25mm　　**(b) 粗骨材の最大寸法40mm**

図4.2.2.3 沈下度30秒の時の単位水量

表4.2.2.2 沈下度30秒の時の単位水量　　(単位：kg/m^3)

粗骨材の最大寸法 (mm)	砂利コンクリート		砕石コンクリート	
	参考表の値	実験結果	参考表の値	実験結果
40	115	(123)	130	約125
20または25	125	(135)	140	約133

次に、試験練りの結果から単位水量を補正するためには、沈下度の結果に対して単位水量をどの程度補正しなければならないかも示す必要がある。そのため、沈下度を10秒変化させるためには単位水量を何kg/m^{3}補正する必要があるかを求めた（**表4.2.2.3**）。

参考表の値に対して、今回の結果は1.5～1.7倍であった。この原因は、単位水量を目標スランプ5cm（沈下度20秒程度）の時に設定し、その前後で単位水量を増減させたことにより、沈下度が10～30秒程度であり、しかも単位水量の範囲と沈下度の範囲が狭い結果を回帰して、配合参考表で示されている沈下度30秒、50秒、80秒のときの単位水量を外挿したことによるものと考えられる。

表4.2.2.3 沈下度10秒の変化に要する単位水量 （単位:kg/m^3）

沈下度 (秒)	参考表の値	Gmax（mm）	
		20または25	40
30	2.5	4.3	4.1
50	1.5	2.6	2.4
80	1.0	1.6	1.5

c) 沈下度とスランプの関係

振動台式コンシステンシー試験装置は普及していないため、舗装コンクリートのコンシステンシー試験は、現場管理だけでなく配合設計においても通常はスランプ試験が行われており、沈下度とスランプの関係についても求めておく必要がある。

図4.2.2.4に、5種類の骨材についてスランプ2.5cmから8cmまで変化させた場合のスランプと沈下度の関係を示す。指針では沈下度30秒の時、スランプは2.5cm程度になるといわれており、**図4.2.2.4**の関係を回帰し、スランプ2.5cmのときの沈下度を求めると35秒であり、指針の関係に近い結果が得られた。

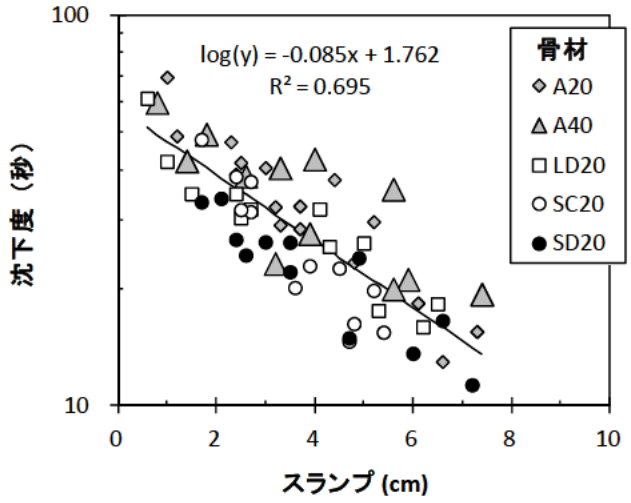


図4.2.2.4 スランプと沈下度の関係

以上の結果は、指針の配合参考表の値とほぼ一致しており、今後も舗装コンクリートの配合設計を行う際、初期値の設定などに配合参考表を利用することができることがわかった。

4.2.3 フローテーブルによる締固め・変形性試験

(1) 検討概要

4.2.2項で使用した粗骨材のうち、最大寸法20mmの石灰石1種類、高炉スラグ1種類、電気炉酸化スラグ、砕石1種類と、最大寸法40mmの砕石1種類の5種類を用いて、フローテーブルによる締固め性・変形性試験が振動台式コンシステンシー試験の代替試験として使用可能か検討した。

(2) スランプ試験の問題点

振動台式コンシステンシー試験装置はほとんど普及していない。そのため、舗装コンクリートの配合設計を行う場合においてもスランプ試験を用いているのが実態であるが、スランプ試験は振動による締め固まり状態を確認することができない。また、スランプ試験はスランプ8cm程度のワーカブルなコンクリートの評価には適しているが、舗装コンクリートは通常スランプ2.5cmの硬練りであり、このようなコンクリートのワーカビリティーの評価には適していない。

このようなことから、振動台式コンシステンシー試験に代わる方法として、文献3)に提案されている方法を参考に、フローテーブルを用いた締固め性・変形性試験について検討した。

(3) フローテーブルを用いた締固め性・変形性試験の検討結果

a) 試験手順

フローテーブルを用いた締固め性・変形性試験の試験手順は次のとおりである。

① フローテーブルに CBR 供試体作製用モールド（φ150×175mm）とカラー（約 φ150×55mm）を載せる。

② 試料が 100%締め固まったとき（締固め率 100%）、試料上面がモールドの高さとなるような量を計量し、モールドに 6 層に分けて、各層を均しながら詰める。

③ 締固め性試験：フローテーブルにより打撃を 5、10、20、40、60、80 回加え、打撃回数ごとに試料の沈下量を測定する。

④ 変形性試験：締固め性試験終了後、モールドを脱型し、試料の高さと広がりを測定する。その後フローテーブルにより試料が崩れるまで打撃を 5、10、20、30、40 回加え、打撃回数ごとに試料の高さと広がりを測定する。なお、打撃 40 回に達する前に試料が崩れた場合は、そこで測定を終了する。変形性の評価は、打撃回数と広がりの関係を回帰し、その傾きを「広がり易さ」と定義し、これを用いることとする。

b) 締固め性に関する結果

締固め率100%に達する打撃回数と沈下度、スランプの関係は、**図4.2.3.1**と**図4.2.3.2**のとおりである。締固め率100%に達する打撃回数で比較したのは、沈下度もモルタルが浮き上がり、アクリル板全面に接した時（締固め率100%）の時間と考え、締固め率が同じ場合の締固めエネルギーの評価と考えたことによる。なお、本研究ではスランプ10.5cm程度の配合については沈下度の測定を行なわなかったことから、そのときの沈下度を**図4.2.2.4**に示す回帰式より推測値を求め、赤色のプロットで表現している。

粗骨材の種類ごとでは、沈下度が大きくなるほど、またスランプが小さくなるほど、すなわちコンクリートが硬くなるほど打撃回数は増えており、締固め性を示している。しかし、沈下度30秒以上、スランプ2.5cm以下になると打撃回数が急に増える場合があり、この試験方法による評価は難しいことを示している。

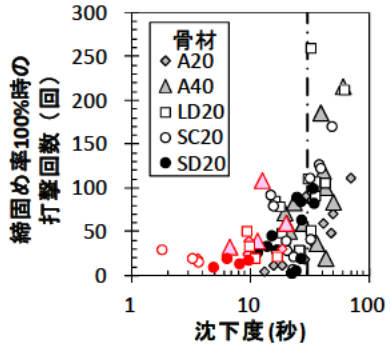


図 4.2.3.1　沈下度と締固め率 100%時の打撃回数の関係

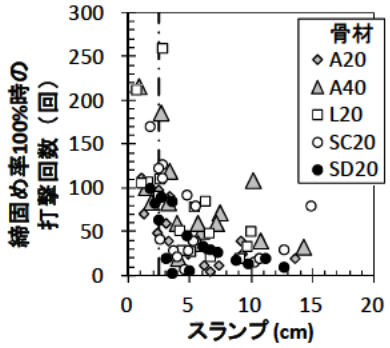


図 4.2.3.2　スランプと締固め率 100%時の打撃回数の関係

c)　変形性（広がり易さ）に関する結果

広がり易さと沈下度、スランプの関係を**図4.2.3.3**と**図4.2.3.4**に示す。

広がり易さについても、粗骨材の種類ごとに比較すると、沈下度が小さくなるほど、またスランプが大きくなるほど、すなわちコンクリートが軟らかくなるほど広がり易さは大きくなっており、変形のしやすさを示している。ただし、沈下度10秒以下、スランプ8cm以上になると広がり易さのばらつきが大きくなる傾向があり、この試験方法による評価は難しいことを示している。

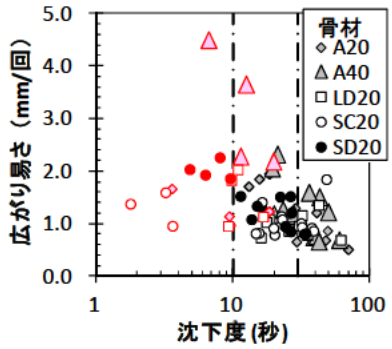


図 4.2.3.3　沈下度と広がり易さの関係

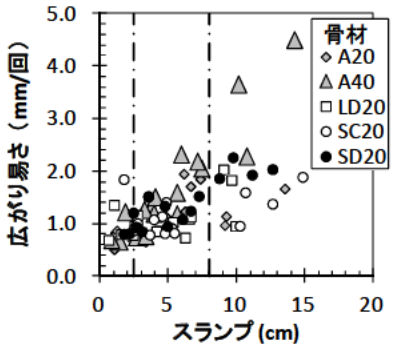


図 4.2.3.4　スランプと広がり易さの関係

d)　最適単位粗骨材かさ容積に関する結果

単位粗骨材かさ容積を変化させ、締固め率100%の時の打撃回数、広がり易さの関係を求め、打撃回数が最小、広がり易さが最大になるときの単位粗骨材かさ容積を求め、沈下度による最適単位粗骨材かさ容積と比較した（**表4.2.3.1**）。

沈下度と締固め率100%の時の打撃回数から求めた最適単位粗骨材かさ容積はほぼ一致しており、この試験方法でも沈下度と同様に締固め性を評価できるものと考えられる。

広がり易さについては、最適単位粗骨材かさ容積を求められる場合が少なかった。広がり易さは変形性の指標であり、沈下度のように締固め性の指標とは異なることから、最適単位粗骨材かさ容積を求めることは難しいものと考えられる。

表4.2.3.1 最適単位粗骨材かさ容積の比較

骨材	単位水量 (kg/m^3)	最適単位粗骨材かさ容積		
		沈下度	締固め率 100% 時の打撃回数	広がり易さ
A20	144	0.71	0.74	0.70
	146	0.69	0.74	－
	152	0.70	0.70	0.74
A40	133	0.73	0.69	－
	140	－	0.72	－
LD20	138	0.72	－	0.70
	143	0.74	0.74	－
SC20	150	－	0.74	－
	157	0.74	0.70	0.68
SD20	153	0.71	0.71	－
	159	0.76	0.73	－

e) フローテーブルを用いた締固め性・変形性試験のまとめ

以上の結果より、フローテーブルを用いた締固め性・変形性試験は、沈下度10～30秒（スランプ2.5～8cm）程度の硬めのコンクリートの施工性の評価に適用できる可能性がある。

ただし、評価指標と考えられる締固め率100%時の打撃回数、広がり易さの数値の設定については、今後も検討が必要である。

(4) 試験方法の提案

以上の検討結果より、舗装コンクリート（沈下度10～30秒（スランプ2.5～8cm）程度）のフローテーブルを用いた締固め性・変形性試験は次のように実施すればいいものと考えられる。

a) 主な器具および装置

CBR供試体作製用モールド（φ150×175mm）とカラー（φ150×55mm）、鋼板（φ148mm×厚さ1.5mm）、ノギス、フローテーブル

b) 試験の手順

① 試料が 100%締め固まったとき（締固め率 100%）、試料上面がモールドの高さとなる量の試料を計量する。

② フローテーブルに CBR 供試体作製用モールドとカラーを載せる。

③ 試料を、モールド内に 6 層に分けて、各層を均しながら詰める。

④ 締固め性試験：試料上面に鋼板を載せ、フローテーブルにより打撃を 5、10、20、40、60、80 回加え、打撃回数ごとに試料の沈下量を測定し、打撃回数と締固め率の関係を求める。

⑤ 変形性試験：締固め性試験終了後、モールドを抜き取り、試料の高さと広がりを測定する。その後フローテーブルにより試料が崩れるまで打撃を5、10、20、30、40回加え、打撃回数ごとに試料の高さと広がりを測定し、打撃回数と広がりの関係を求める。なお、打撃40回に達する前に試料が崩れた場合は、そこで終了とする。

c) 締固め性・変形性の求め方

締固め性は、締固め率100%のときの打撃回数を求める。

変形性は、打撃回数と広がりの関係を回帰することにより、傾き（広がり易さ（mm／回））を求める。

(5) 今後の検討課題

本試験方法を舗装コンクリートの締固め性・変形性の評価に用いて、配合設計を行う場合の基準値は、今後、試験施工などを行い、舗装版の仕上がり状態などとの関係を求めて決める必要がある。

4.2.4 材料分離抵抗性試験

(1) 概要

電気炉酸化スラグのように密度が極めて大きい粗骨材は、沈降しやすく、材料分離しやすいと考えられる。このような粗骨材を使用する場合を想定し、材料分離抵抗性を評価する方法について検討した。

(2) 材料分離抵抗性試験の検討方法

材料分離抵抗性を確保する方法に、粗骨材量を増やし変形性を抑制する方法が考えられる。一方、材料分離が生じやすくなるのは、流動性が大きく変形しやすい場合と、振動締固め時間が長い場合であり、これらの要因について検討した。

検討方法は、スランプ、締固め時間を変化させて曲げ供試体を作製し、硬化後に供試体を切断し、切断面の粗骨材分布を確認する方法とした。

(3) 検討結果

電気炉酸化スラグSDの単位粗骨材かさ容積0.72の場合の断面写真を**表4.2.4.1**に示す。このような断面写真結果から、打設面近くに粗骨材が残っている状態に応じて分類した結果が**表4.2.4.2**～**表4.2.4.6**である。

表4.2.4.2～**表4.2.4.6**の締固め時間は、バイブレータによる振動締固めを行い、気泡がほぼ出なくなった時間を基準（締固め時間1）に、2はその2倍、3は3倍または4倍とした。分離状況の評価は、打設面近傍の粗骨材の量によって、○は打設面近くまで粗骨材がある、△は粗骨材が少ない、または小さい、×は粗骨材がほとんどない、と分類した。

実験結果より、通常の粗骨材を使用し、単位粗骨材かさ容積を配合参考表に示されている値程度確保しておけば、スランプ10cm程度でも、曲げ供試体の締固めに必要な時間だけバイブレータによる振動を加えても、粗骨材の分離はわずかであった。しかし、電気炉酸化スラグの場合は、単位粗骨材かさ容積を配合参考表程度確保し、スランプは2.5cm程度で、曲げ供試体の締固めに必要な時間だけバイブレータによる振動を加えた場合のみ、粗骨材の分離はわずかであったが、それ以外の条件では分離が大きかった。

以上の結果より、密度が大きい粗骨材を使用する場合は、施工時に材料分離を生じていることを確認することが難しいため、事前に、配合設計時には単位粗骨材かさ容積、スランプの制限などの設定のため検討に役立つものと考えられる。また、施工時には、単位水量の調整や、振動レベルに応じた締め固まり状態を判断するための参考になるものと考えられる。

表4.2.4.1　材料分離試験の断面写真（骨材SDの単位粗骨材かさ容積0.72の場合）

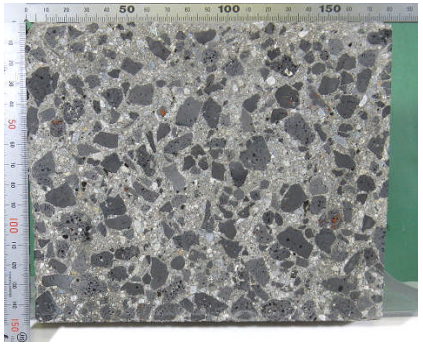
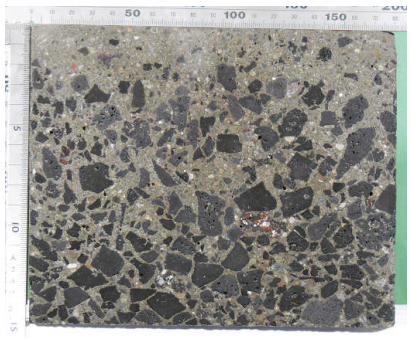
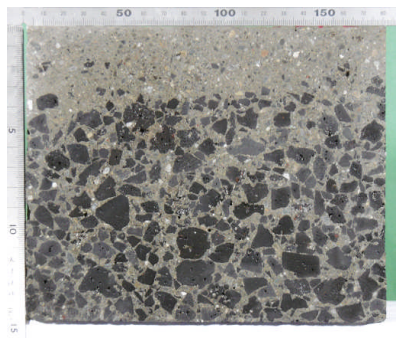
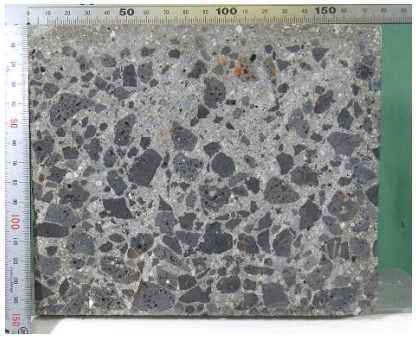
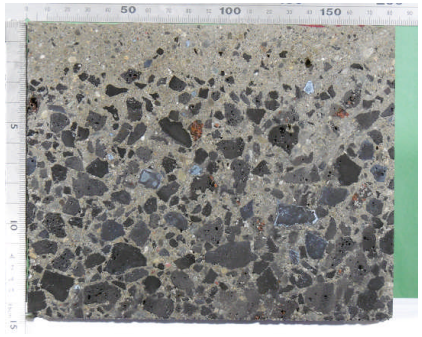
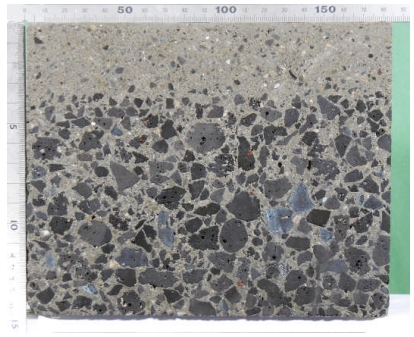
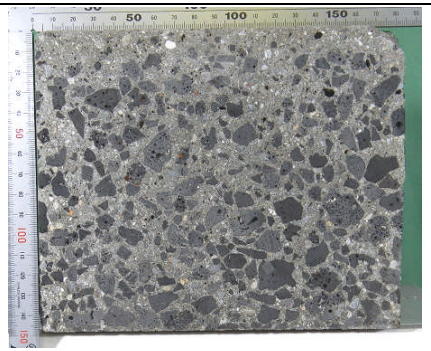
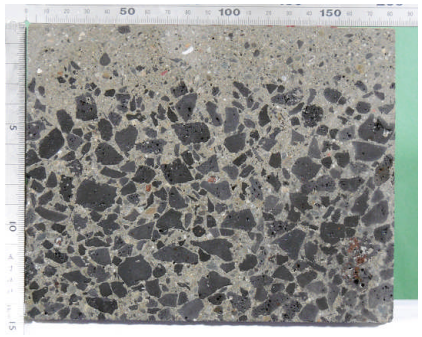
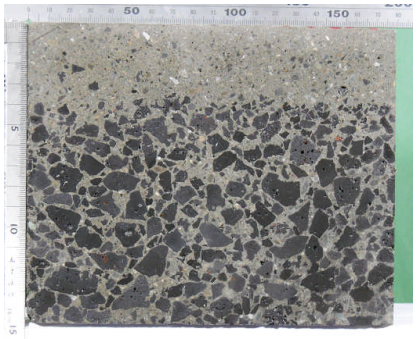
骨材	SD	単位粗骨材かさ容積（s/a，左から目標スランプ2.5，6.5，10.5cm）	0.72（41.5，40.2，38.7%）
目標スランプ	締固め時間		
	1	2	3
2.5cm			
6.5cm			
10.5cm			

表 4.2.4.2 分離状況の評価（A20）

骨材		A20														
かさ容積		0.62				0.67				0.72				0.76			
締固め時間		ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	1	2	3	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	1	2	3	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	1	2	3	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	1	2	3
目標スランプ（cm）	2.5	1.8	○	○	△	3.5	○	○	△	2.7	○	○	△	4.0	○	○	△
	6.5	2.5	○	○	△	3.7	○	○	△	5.2	○	○	△	4.4	○	○	△
	10.5	6.2	○	△	×	9.2	○	△	×	9.1	○	△	×	13.5	○	△	×
目標スランプ（cm）SP 添加	2.5									2.7	○	○	△				
	6.5									5.3	○	○	△				
	10.5									9.2	○	△	△				

締固め時間は、気泡がほぼ出なくなった時間を基準（締固め時間 1）に、2 はその 2 倍、3 は 3 倍または 4 倍。

分離状況の評価は、打設面近傍の粗骨材の量によって、○は打設面近くまで粗骨材がある、△は粗骨材が少ない、または小さい、×は粗骨材がほとんどない。

以下同じ。

表 4.2.4.3 分離状況の評価（A40）

骨材		A40														
かさ容積		0.62				0.67				0.72				0.76			
締固め時間		ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	1	2	3	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	1	2	3	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	1	2	3	ｽﾗﾝﾌﾟ (cm)	1	2	3
目標スランプ（cm）	2.5	0.8	○	○	△	1.4	○	○	△	3 3	○	○	△	2.6	○	△	×
	6.5	3 2	○	△	×	5.6	○	△	×	5.6	○	△	×	7.4	○	×	×
	10 5	7.1	○	×	×	10.1	○	×	×	10.7	○	×	×	14.2	△	×	×
目標スランプ（cm）SP 添加	2.5									3 3	○	○	△				
	6.5									6.4	○	△	△				
	10 5									10 9	○	△	×				

表 4.2.4.4 分離状況の評価(LD)

骨材		LD														
かさ容積		0.62				0.67				0.72				0.76			
締固め時間		スランプ (cm)	1	2	3	スランプ (cm)	1	2	3	スランプ (cm)	1	2	3	スランプ (cm)	1	2	3
目標スランプ (cm)	2.5	0.6	○	○	△	1.5	○	○	△	2.4	○	○	△	2.7	○	△	△
	6.5	2.5	○	○	△	5.3	○	○	△	6.2	○	○	×	6.5	○	△	△
	10.5	6.6	○	△	×	9.6	○	△	×	9.0	○	○	×	9.9	○	△	×
目標スランプ (cm) SP 添加	2.5									2.4	○	○	△				
	6.5									5.7	○	○	△				
	10.5									12.3	○	△	×				

表 4.2.4.5 分離状況の評価(SC)

骨材		SC															
かさ容積		0.62				0.67				0.72				0.76			
締固め時間		スランプ (cm)	1	2	3	スランプ (cm)	1	2	3	スランプ (cm)	1	2	3	スランプ (cm)	1	2	3
目標スランプ (cm)	2.5	1.7	○	○	○	2.4	○	○	○	2.7	○	○	○	2.7	○	○	○
	6.5	4.7	○	○	○	5.4	○	○	△	5.2	○	○	△	4.8	○	○	△
	10.5	10.6	○	○	△	14.8	○	○	△	10.2	○	△	×	12.6	△	△	×
目標スランプ (cm) SP 添加	2.5									2.7	○	○	△				
	6.5									7.8	○	○	△				
	10.5									10.6	○	△	×				

表 4.2.4.6 分離状況の評価(SD)

骨材		SD															
かさ容積		0.62				0.67				0.72				0.76			
締固め時間		スランプ (cm)	1	2	3	スランプ (cm)	1	2	3	スランプ (cm)	1	2	3	スランプ (cm)	1	2	3
目標スランプ (cm)	2 5	1.7	○	△	×	2.6	○	×	×	2.4	○	×	×	3.5	○	×	×
	6 5	4.7	○	×	×	7.2	△	×	×	6.6	△	×	×	6.0	△	×	×
	10 5	8.7	△	×	×	12.6	×	×	×	9.7	×	×	×	11.1	×	×	×
目標スランプ (cm) SP 添加	2 5									2.4	○	×	×				
	6 5									7 3	△	×	×				
	10 5									12.0	×	×	×				

(4) 粗骨材の分離抵抗性試験の提案

電気炉酸化スラグのように極めて密度が大きい粗骨材を使用する場合に、材料分離抵抗性を確保するために、配合設計時においては単位粗骨材かさ容積やスランプ値など設定するための検討に、施工時においては単位水量の調整などのために、次の材料分離抵抗性試験を提案する。

a) 主な器具および装置

曲げ供試体用型枠（150×150×530mm）とカラー、バイブレータ、コンクリートカッター

b) 試験の手順

① 試料が 100%締め固まったとき（締固め率 100%）、試料上面が曲げ型枠の高さとなる量の試料を計量する。

② 曲げ型枠にカラーを載せ、試料を入れる。

③ 設定された条件により、バイブレータによる締固め位置・回数、締固め時間の締固めを行い、表面を仕上げる。

④ 硬化後、供試体を切断し、粗骨材の分布状況を観察する。

(5) 今後の検討課題

今回の検討では曲げ供試体を用いたが、この供試体は大きい、高さが150mmしかないなどの問題がある。この対応策としてφ150mm×300mmの円柱供試体を用いることが考えられる。ただし、断面寸法が小さくなり、側面により変形を拘束する影響が大きくなる可能性が考えられる。

振動締固めに関しては、室内では棒状バイブレータを使用したが、実際に使用される施工機械の振動とはかなり性能が異なるので、モルタルの粘性と振動レベル、締固め時間などの関係を把握し、締固め位置・回数、締固め時間などの条件を適切に設定することが重要である。

今回は、密度の大きい骨材を100%使用した場合について検討したが、密度が大きい場合の材料分離抵抗性に対する対策として密度の小さい骨材との混合などが考えられる。このような場合の材料分離抵抗性の改善効果などについての検討にも適用できるものと考えられる。

4.2.5 ダレ試験

(1) 概要

施工条件などから、スランプの大きいコンクリートを使用する必要がある場合で、線形勾配が大きい場合、仕上げ面のダレが心配される。このような場合、文献4)を参考にダレに対する抵抗性を評価する試験（ダレ試験）方法を提案する。

(2) ダレ試験の検討

ダレ試験は、曲げ供試体を作製し、供試体の片側を高くして傾斜をつけ、硬化後に表面の変形を測定して変形した角度を求めた。供試体表面の仕上げは、型枠面からの変形を測定するため、型枠面と同一になるように入念に行なった。傾斜させた時間は、現場における表面仕上げまでの時間を考慮し、コンクリート練り上がりから 1 時間後とした。傾斜角度は、道路構造令による最大勾配 12%を考慮し、傾斜角度 4 度（勾配 7%）と、8 度（14%）とした。

評価はダレ角度で行なった。ダレ角度は、硬化後に打設面の高さを**図 4.2.5.1** のように測定し、型枠より 50mm 内側の測定結果を回帰して傾きを算出し（**図 4.2.5.2**）、角度に換算した。

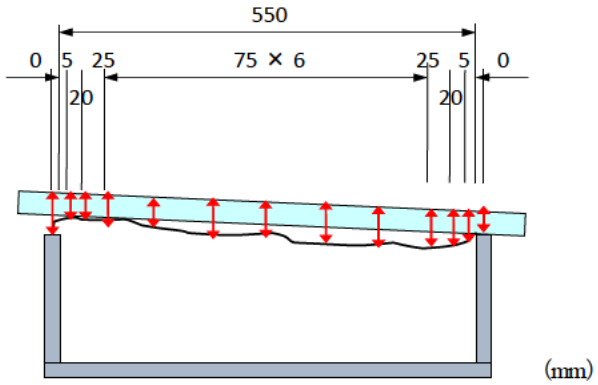


図 4.2.5.1 ダレの測定方法

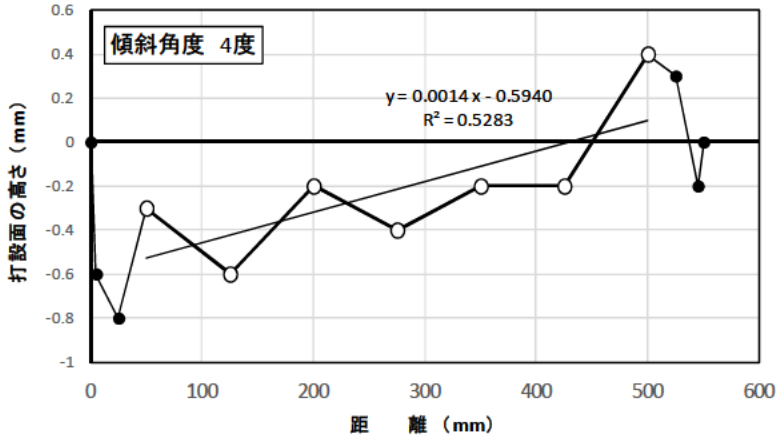


図 4.2.5.2 ダレ角度の求め方

(3) ダレ試験の結果

スランプの実測値とダレ角度の結果は、**図 4.2.5.3** のとおりである。スランプが大きいほどダレ角度は小さくなる傾向があり、一般的に考えられる傾向と異なる結果となっている。

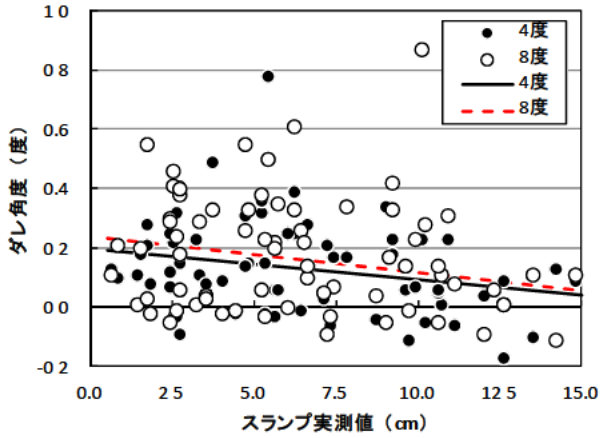


図 4.2.5.3 スランプとダレ角度の関係

そこで、単位粗骨材かさ容積ごとに、ダレ角度の平均値と標準偏差を求めた。その結果が図 **4.2.5.4** である。単位粗骨材かさ容積が大きいほどダレ角度は小さくなっている。なお、単位粗骨材かさ容積 0.62 のダレ角度が小さくなっているのは、この実験に用いたコンクリートの単位水量を、単位粗骨材かさ容積 0.72 のときに目標スランプとなるように設定したため、単位粗骨材かさ容積が小さくなるほど細骨材量が増え、スランプが小さくなったためである。

この結果より、単位粗骨材かさ容積が大きくなるほど粗骨材量が増え、モルタル量が減ること、そのため粗骨材間の空隙を充填するモルタルと、粗骨材の周りのモルタル以外の余分なモルタルが減ることにより、表層の変形しやすいモルタル層が薄くなること、粗骨材によって全体の変形が拘束されやすくなったことによるものと考えられる。

単位粗骨材かさ容積を確保することは、ダレに対する抵抗性を確保するためにも重要である。

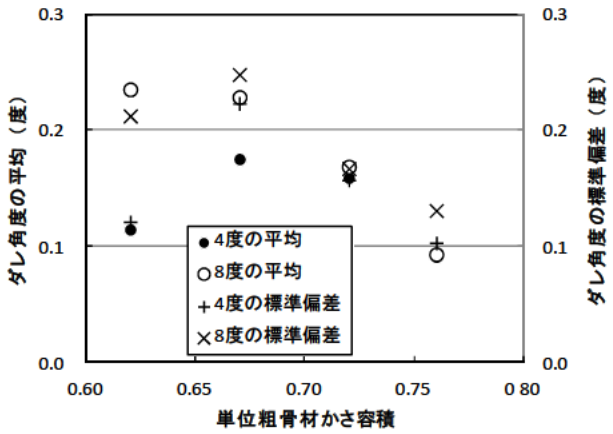


図 4.2.5.4　単位粗骨材かさ容積とダレ角度の関係

(4)　ダレ試験方法の提案

スランプが大きい舗装コンクリートを、線形勾配が大きい現場に適用するような場合に、ダレ試験を提案する。

a)　主な器具および装置

曲げ供試体用型枠（150×150×530mm）とカラー、バイブレータ、定規、ノギスまたはデプスゲージ

b)　試験の手順

①　試料が 100%締め固まったとき（締固め率 100%）、試料上面が曲げ型枠の高さとなる量の試料を計量する。締固め時間によって空気量が減少し、沈下量が異なるため、事前に予備試験によって計量する量を把握しておくとよい。

②　曲げ型枠にカラーを載せ、試料を入れる。

③　設定された条件により、バイブレータによる締固め位置・回数、締固め時間の締固めを行う。

④　実際の施工におけるコンクリート練混ぜから表面仕上げまでの時間を考慮し、表面を仕上げる。表面仕

上げは、試料面が型枠上面と一致するように入念に行う。表面仕上げ直後に表面の高さを測定できる装置がある場合は、型枠長手方向の両端面の型枠面を基準に、コンクリート表面の凹凸を測定しておき、変形後との差を求めるとよい。

⑤ 型枠長手方向の一方を高くし、傾斜をつける。傾斜角度（勾配）は、現場の最大勾配以上とする。

⑥ 硬化後、型枠長手方向の両端面の型枠面を基準に、コンクリート表面の凹凸を測定する。

⑦ 凹凸の測定結果を回帰し、傾きからダレ角度を求める。

(5) 今後の検討課題

本試験方法を舗装コンクリートのダレの評価に用いる場合、その基準値が必要になる。ダレの基準値は、今後、試験施工などを行い、舗装版の表面の変形状態などから設定する必要がある。

4.2節の参考文献

1) (社)日本道路協会：舗装設計施工指針、p.252、2006.2
2) 伊東茂冨、磯崎正晴、養王田栄一：舗装用コンクリートの細骨材率および単位水量に関する参考表の提案、土木技術資料、Vol.7、No.10、pp.451-454、1965.10
3) 佐藤聡明、鎌田修、坂本康文：舗装用スリップフォームコンクリートの施工性を考慮したフレッシュ性状評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.1、pp.1253-1258、2011.7
4) (社)セメント協会 舗装技術専門委員会：早期交通開放型コンクリート舗装 1DAY PAVEの概要、セメントコンクリート、No.763、pp.2-7、2010.9

4.3 設計用値

4.3.1 概要

コンクリート舗装の設計には、曲げ強度、曲げ疲労強度や弾性係数などの設計用値が必要である。粗骨材に石灰石、スラグ骨材を用いた場合の、これらの研究は多くはないため、それらの実験結果をとりまとめた。また、弾性係数試験方法については、圧縮試験による静弾性係数試験方法がJIS A 1149に規定されているが、舗装標準示方書には曲げ試験における荷重ーたわみ関係から算出することになっているが、その方法の詳細は示されていないため、その方法について提案する。

4.3.2 曲げ強度

(1) 概要

コンクリート舗装は、曲げ強度によって設計されているため、曲げ強度は最も基本的な設計用値である。曲げ強度は、曲げ引張ひび割れの発生によって決まるため、コンクリート中の半分程度を占める粗骨材の品質の影響は大きいことが予想されることから、曲げ強度と粗骨材品質の関係について検討した。

(2) 曲げ強度の検討内容

粗骨材の最大寸法20mmまたは25mmの12種類（石灰石4種類、高炉スラグ3種類、電気炉酸化スラグ1種類、砕石3種類、砂利1種類）と、最大寸法40mmについてはスラグ骨材を除く8種類、合計20種類の粗骨材について、水セメント比を40、45、50、55%の4水準変化させて曲げ強度試験を行い、粗骨材の吸水率、破砕値との関係を求めた。

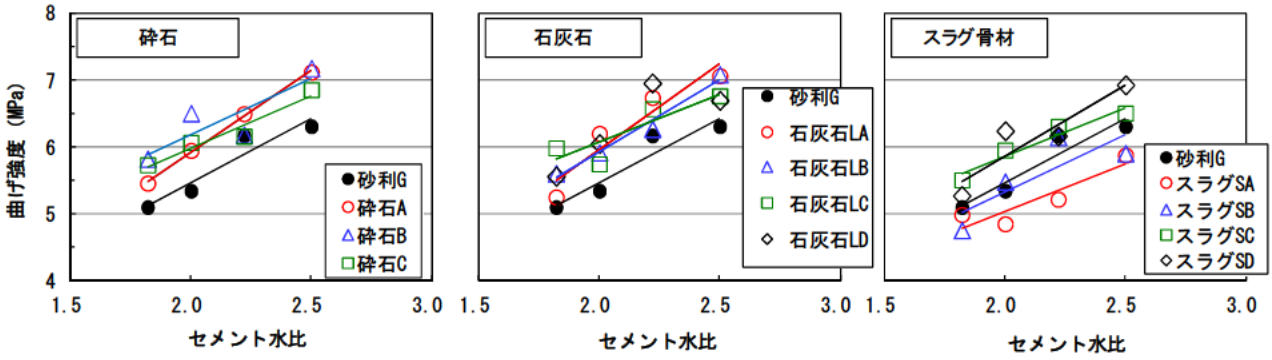


図4.3.2.1 セメント水比と曲げ強度の関係（最大寸法 20または25mm）

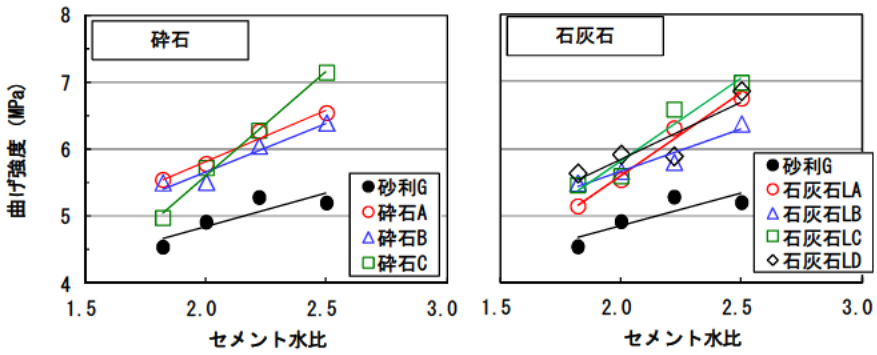


図4.3.2.2 セメント水比と曲げ強度の関係（最大寸法 40mm）

(3) 曲げ強度試験結果

砂利に対して砕石、石灰石、スラグ骨材ごとにセメント水比と曲げ強度の関係を**図4.3.2.1**と**図4.3.2.2**に示す。

図4.3.2.1と**図4.3.2.2**の結果より、砂利の場合と比較して砕石と石灰石は、同じセメント水比であれば、強度は大きく、スラグは砂利と同程度であり、粗骨材の種類によって強度性状は多少異なるようである。

次に、最大寸法について比較すると、**図4.3.2.3**のように最大寸法20または25mmのほうが40mmよりも曲げ強度が大きくなる傾向がある。同じ強度を得るには、最大寸法40mmの場合は20または25mmの場合よりも水セメント比を小さくする必要がある。

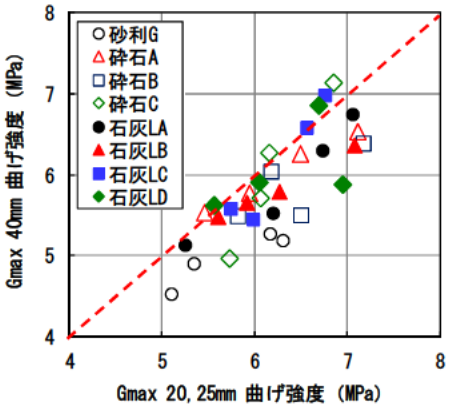


図4.3.2.3 最大寸法 40mmと20または25mmの曲げ強度の比較

粗骨材の吸水率、破砕値と曲げ強度の関係を**図4.3.2.4**と**図4.3.2.5**に示す。両者には明確な関係は見られない。粗骨材品質がかなり低下している場合、コンクリート強度への影響も考えられるが、今回使用した粗骨材は、高炉スラグの1種類の吸水率が区分Lに分類される結果であったが、そのほかの品質はJISの規格値を満足するものであったことから、これらが曲げ強度に及ぼす影響はほとんどなかったものと考えられる。

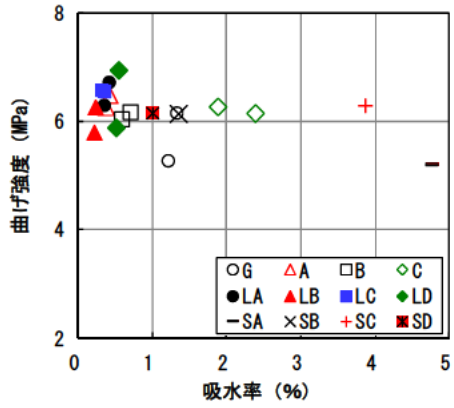


図4.3.2.4 粗骨材の吸水率と曲げ強度の関係

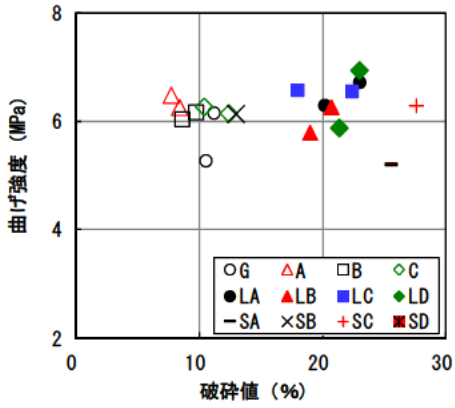


図4.3.2.5 粗骨材の破砕値と曲げ強度の関係

(4) 曲げ強度の確保

舗装コンクリートの設計基準曲げ強度は4.5MPa（すべての舗装計画交通量）と決められており、生コンプ

ラントの変動係数によって配合強度が設定される。JIS規格を満足する品質の粗骨材であれば、配合強度は、その強度が得られる水セメント比によって設定できる。

4.3.3 曲げ疲労強度

(1) 検討概要

コンクリート舗装は、コンクリートに曲げ繰返し荷重が作用する構造物であり、設計において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。よって、コンクリートの疲労特性は重要な性能の一つである。本検討では、岩種、産地、最大寸法が異なる 14 種類の粗骨材を用いた舗装用コンクリートの曲げ疲労試験を行い、骨材種類や物性がコンクリートの曲げ疲労特性に及ぼす影響について検討した。試験は、150×150×530mm の矩形供試体を成形し、材齢 91 日以降に三等分点載荷によって 5Hz のサイン波で応力レベル 0.9、0.8、0.7 の繰返し荷重を与え行なった。供試体は試験まで標準水中養生し、試験中は供試体の乾燥を防ぐためにグリスとフィルムにて封緘した。

(2) 検討結果

種々の骨材種類や最大寸法２水準（20mm と 40mm）で曲げ疲労試験を行なった結果を**図 4.3.3.1** に示す。その結果、使用した骨材種類間に有意差は認められず、粗骨材最大寸法や骨材物性の疲労特性への影響も認められなかった。

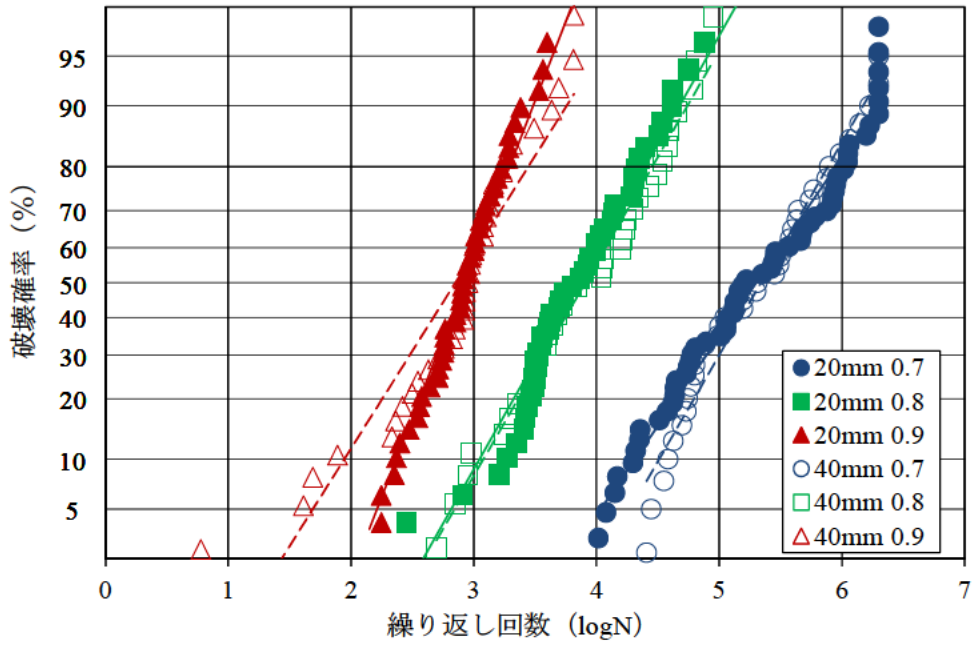


図 4.3.3.1 粗骨材最大寸法別の繰返し載荷数と破壊確率の関係（全試験結果より）

また、既往の試験結果と比較したところ、載荷治具が異なる文献 1)とは有意差が認められたが、同等の試験条件であった文献 2)とは認められなかった。そこで、本試験結果及び文献 2)の結果より、疲労曲線を下記の式（4.3.3.1）の形式で算出し既往（舗装標準示方書やセメントコンクリート舗装要綱）の疲労曲線と比較

した。結果を**図 4.3.3.2** 及び**表 4.3.3.1** に示す。

$$Sr = b - a \cdot \log N \qquad (4.3.3.1)$$

ここに　Sr　：応力レベル

N　：疲労破壊時の繰返し載荷数

a/b　：試験により求まる係数

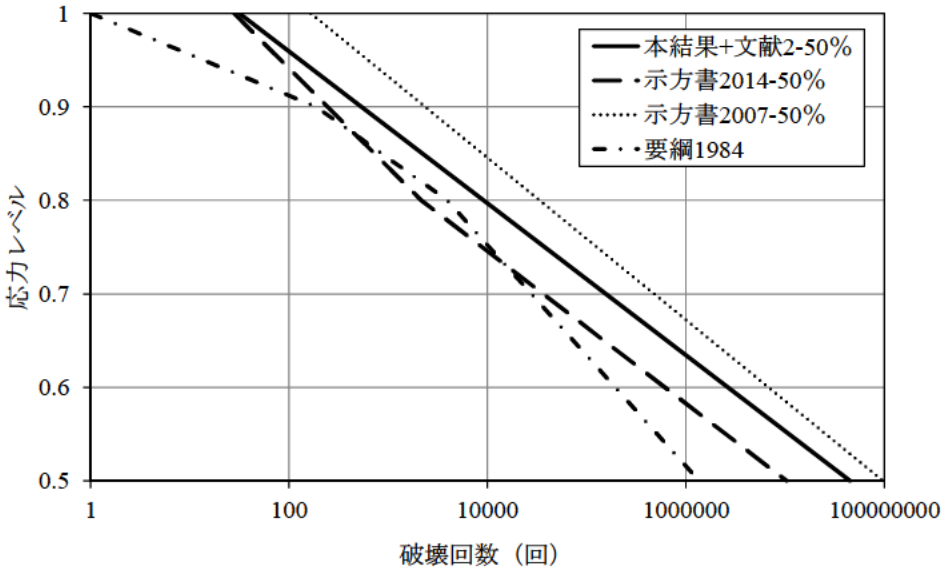


図 4.3.3.2　各疲労曲線

表 4.3.3.1　本結果及び文献 2)の結果より得られた疲労曲線式の係数

破壊確率（%）	a	b
10	0.0868	1.0694
20	0.0849	1.0883
30	0.0835	1.1014
40	0.0823	1.1121
50	0.0812	1.1218
60	0.0802	1.1313
70	0.0790	1.1410
80	0.0778	1.1521
90	0.0760	1.1667

結果として、得られた疲労曲線は舗装標準示方書 2014 と 2007 に記載された疲労曲線に挟まれるように位置し、既往の疲労曲線と大きく異なることはなかった。以上の結果より、コンクリート舗装の理論的設計においては、最新版の舗装標準示方書 2014 に示されている疲労曲線を用いればよいと考えられる。

4.3.3 項の参考文献

1) 小梁川雅、米谷裕、福田正：確率特性を考慮したコンクリート舗装版の曲げ疲労設計曲線、土木学会論文集、No.426、pp151-157、1991.2

2) 吉本徹、佐藤良一：舗装用コンクリートの曲げ強度と曲げ疲労強度の寸法効果に関する研究、土木学会論文集 E2、Vol67、No.2、pp181-188、2011

4.3.4 引張軟化特性

(1) 破壊エネルギー試験結果について

破壊エネルギー試験は、骨材の種類および粗骨材最大寸法（Gmax）をパラメータに実施した。すなわち、破砕値の小さい硬質砂岩骨材（A）と破砕値の大きい石灰石骨材（LC）、および粗骨材最大寸法 40mm および 20mm の骨材を用いた舗装用コンクリートを対象に試験を実施した。破壊エネルギーG_Fの試験結果は**図 4.3.4.1** に示すとおりであり、骨材の種類により大きく異なることが分かった。破砕値が大きく相対的に軟らかい LC を使用したコンクリートの破壊エネルギーG_Fは、破砕値の小さい A を使用したそれに比べ、1.82 倍（Gmax：20mm の場合）～1.89 倍（Gmax：40mm）大きくなり、粗骨材種類の影響は大きい。また、Gmax：40mm と Gmax：20mm との比較においては Gmax：40mm の方が Gmax：20mm よりも 1.05（LC）～1.08 倍（A）大きかった。ここでは、これらパラメータごとの破壊エネルギーの差異が舗装用コンクリートの強度特性に及ぼす影響を検討した。

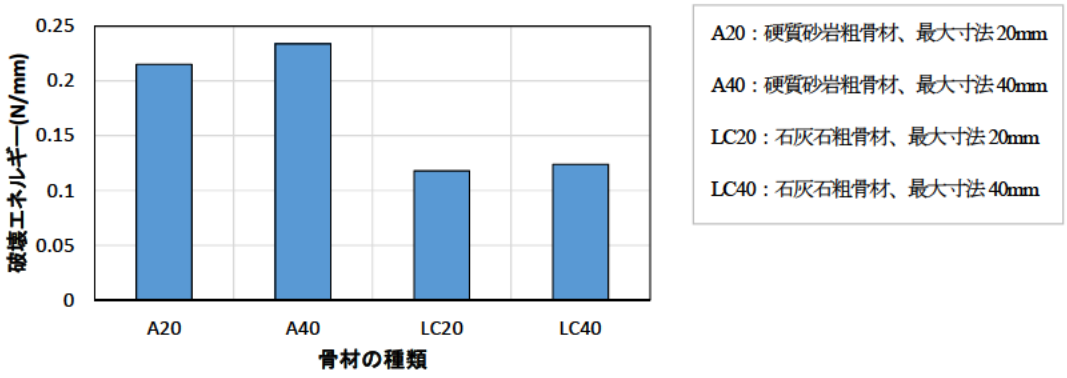


図 4.3.4.1 破壊エネルギー試験結果

(2) 引張軟化特性に及ぼす粗骨材の種類の影響および粗骨材最大寸法の影響について

曲げ強度の寸法効果は、引張軟化特性を用いた破壊力学による解析手法により解明されており、それによれば、曲げ強度は寸法の増大に伴って低下し、引張強度に漸近することが示されている。ここでは、骨材ごとに求めた材齢 91 日での破壊エネルギーG_F、ヤング係数 E_c、割裂引張強度 f_tの実験値を用いて、コンクリートの引張軟化特性を表す特性長さ l_{ch} を式（4.3.4.1）[1)]により求めた。

$$l_{ch} = \frac{G_F \cdot E_c}{f_t^2} \tag{4.3.4.1}$$

ここに、 G_F ：破壊エネルギー（N/mm）

E_c ：ヤング係数（GPa）

f_t ：割裂引張強度（引張試験）（MPa）

特性長さ l_{ch} の計算に用いた各種強度を**表 4.3.4.1** に、またその計算結果を**図 4.3.4.2** に示す。

表 4.3.4.1 特性長さの計算に用いた各種強度

骨材種類	A20 硬質砂岩粗骨材、 最大寸法 20mm	A40 硬質砂岩粗骨材、 最大寸法 40mm	LC20 石灰石粗骨材、 最大寸法 20mm	LC40 石灰石粗骨材、 最大寸法 40mm
破壊エネルギーG_F (N/mm)	0.215	0.234	0.118	0.124
ヤング係数 Ec (GPa)	38.3	39.1	35.6	40.0
引張強度f_t (MPa)	3.34	3.99	4.21	4.20

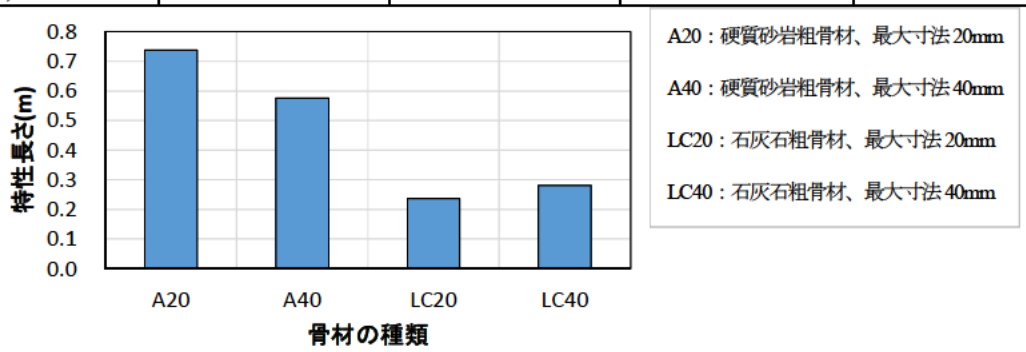


図 4.3.4.2 特性長さの計算結果

図 4.3.4.2 から、A を用いた場合の特性長さは 0.58m～0.74m であり、LC の場合の 0.24m～0.28m に比べて著しく大きく、粗骨材の種類による影響は大きいことがわかった。

一方、粗骨材の最大寸法に着目すると、A の場合は A20 を用いた場合のコンクリートの特性長さは A40 を用いた場合のそれよりも大きいが、LC の場合は、LC40 を用いた方が LC20 を用いた場合よりも大きかった。ここで、A の結果に着目すると、A40 の破壊エネルギーは A20 よりも大きかったが、特性長さは A40 の方が小さくなった。これは A20 の引張強度が A40 のそれよりも 19%も小さいためであり、石灰石である LC20 と LC40 を用いた場合の引張強度がほぼ同じ値であったこと、引張試験時の骨材界面の付着力の大小と骨材寸法との関係を考慮すれば、A20 と A40 の引張強度の差異の原因は判然としない。参考ではあるが、A20 の引張強度が A40 のそれと同じ 3.99MPa であったとすると、特性長さは 0.517m、曲げ強度の計算値は 5.84MPa となり、実測値の 94%となる。

これらより本実験の範囲では、特性長さに与える影響は、骨材種類の違いが大きいことが明らかになった。

また、粗骨材の最大寸法の影響はほとんどないことがわかった。

(3) 特性長さの違いによる舗装用コンクリートへの影響について

特性長さは、破壊の脆性度の指標であり、特性長さが小さいほど急激に破壊する。逆に言えば、特性長さの大きいコンクリートは、引張強度を超えたひび割れ発生後のひび割れ進展の抵抗が大きいため、曲げ強度／引張強度の比が大きくなる。したがって、引張強度が同じであれば、特性長さが大きいコンクリートの方が曲げ強度が大きくなるため、曲げ強度で設計するコンクリート舗装では、特性長さが大きい方が有利であるといえる。

そこで、曲げ強度f_bと引張強度f_tの比（強度比）と特性長さの関係を示した式（4.3.4.2）[1)]により、骨材ごとの強度比を推定した。

$$\frac{f_b}{f_t} = 1 + \frac{1}{0.85 + 4.5(h / l_{ch})} \qquad (4.3.4.2)$$

ここに、h：はり高さ（m）

はり高さhを強度用供試体の高さである0.15mとした場合の骨材種類ごとの曲げ強度f_bと引張強度f_tの比（強度比）の計算結果を**図 4.3.4.3** に示す。この図からわかるように、強度比はAを用いた場合は1.49～1.57の範囲であり、LC を用いた場合は1.27～1.31 の範囲であった。これより、骨材種類の違いは、コンクリートの強度特性（曲げ強度と引張強度の比）に影響を及ぼすことがわかった。

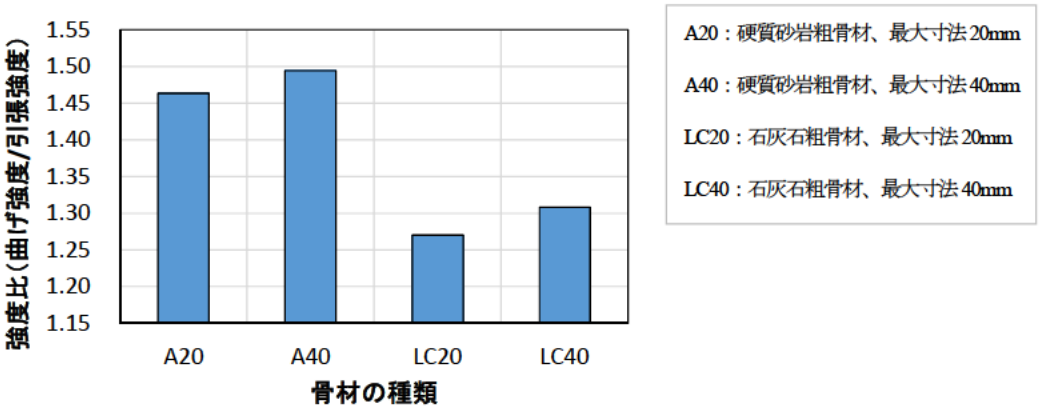


図 4.3.4.3 骨材の種類ごとの強度比の計算結果（h=0.15m）

また、この強度比と実測した引張強度を用いて曲げ強度の計算値を求め、曲げ強度の実測値と比較した図が**図 4.3.4.4** である。骨材ごとの計算値は、それぞれの実測値よりも小さい値を示し、A40 の計算値は実測値の99%と実測値とほぼ一致したが、A20 は84%、LC20 は91%、LC40 は90%となり計算値の方が小さい値となる結果であった。これは、水中養生したコンクリートによる破壊エネルギーは気中養生した場合よりも小さくなる[2)]傾向があることが一因と考えられるが、今後の課題である。また、A20 の場合は、上述の通り

原因は不明であるが、A20 の引張強度が A40 のそれよりも 19%小さいことも一因であると思われる。

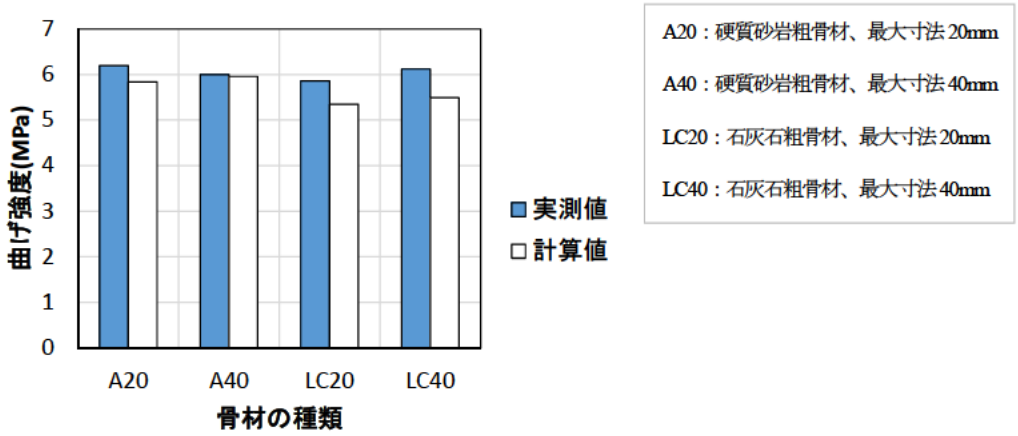


図 4.3.4.4　骨材の種類ごとの曲げ強度の実測値と計算値の比較

次に、曲げ強度の寸法効果に及ぼす骨材種類の影響をみるために、式(4.3.4.2)のはり高さ h を 0.15m～0.40m まで変化させたときの強度比 f_b/f_t を求め、h=0.15m 時の曲げ強度を 4.5MPa とした場合の曲げ強度と版厚（=はり高さ）の関係を**図 4.3.4.5** に示した。また、比較のため 2014 年制定舗装標準示方書（以下、示方書）の曲げ強度の寸法効果式[3)]を合わせて示した。

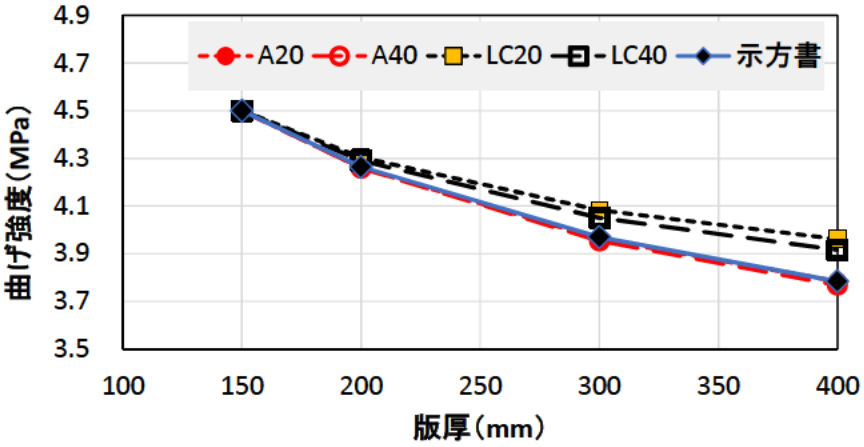


図4.3.4.5　計算による曲げ強度の寸法効果（曲げ強度–版厚関係）の推定

この図からわかるように、LC を用いた場合は、A の場合に比べて、版厚増大に伴う強度の低下が小さいことがわかる。これは LC を用いた場合の特性長さが A を用いた場合よりも小さいため、引張軟化域が相対的に小さく、曲げ強度と引張強度の強度比が小さいためである。また、示方書の寸法効果式による曲げ強度と版厚の関係は、本実験による A の場合の計算結果とほぼ一致した。これは、示方書の寸法効果式が砂岩砕石（Gmax は 40mm）を使用した実験から誘導した実験式であるためである。

これらより、石灰石粗骨材を用いた舗装用コンクリートは、硬質砂岩粗骨材を用いたそれよりも寸法効果による強度低下は小さいことが、破壊エネルギー試験などの引張軟化特性を表す各種実験結果より明らかに

なった。また、粗骨材の最大寸法の違いによる影響は、本実験の範囲ではほとんどないことが明らかになった。

4.3.4 項の参考文献

1) 内田裕市、六郷恵哲、小柳洽 : コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討、土木学会論文集 No.442/V-16、pp.101-107、1992.2
2) 吉本徹、佐藤良一 : 舗装用コンクリートの曲げ強度と曲げ疲労強度の寸法効果に関する研究、土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）、 No.67、No.2、pp.181-188、2011
3) 舗装標準示方書 2014 年度制定版、土木学会、2015.9

4.3.5 弾性係数

(1) 検討概要

コンクリートの弾性係数は、コンクリート舗装の理論的設計法において設計用値として用いられ、輪荷重応力、温度応力の算出に必要である。特に温度応力に対する影響は大きく、弾性係数の増減に対して温度応力は直線的に変化する。

コンクリートの弾性係数試験方法は、JIS A 1149に円柱供試体による圧縮試験から求める方法が規定されている。しかし、舗装標準示方書では、舗装用コンクリートの弾性係数は原則、曲げ試験による荷重ーたわみ関係から算出するように記述されている。また、圧縮試験による測定および参考表を用いる方法が解説に記載されている。ところが、曲げ弾性係数を測定する具体的な方法は示されていないことから、**(2)**に示す曲げ弾性係数試験方法による曲げ弾性係数と圧縮弾性係数の関係を求めた。また、参考表の値は普通コンクリートの圧縮弾性係数の結果を示しており、舗装コンクリートに適用することの妥当性を検討した。

そこで、同じ配合のコンクリートから円柱供試体と曲げ供試体を作製し、JIS A 1149による方法より圧縮弾性係数を、曲げ試験による方法から曲げ弾性係数を求めた。また、同時に静的な曲げおよび圧縮強度を測定し、示方書参考表との関係について検討した。

(2) 曲げ弾性係数の測定方法

曲げ弾性係数の測定は、JIS A 1106 による曲げ強度試験時にたわみを測定して、たわみと荷重の関係から求めた。供試体は 150×150×530mm の曲げ供試体であり、3 等分 2 点載荷にて曲げ試験を行い（N=3）、供試体中央のたわみを測定した。たわみの測定方法の概略を**図 4.3.5.1** に、供試体に器具を装着した状況を**写真 4.3.5.1** に示すとおり、たわみ測定装置を供試体に取り付けることにより測定できる。

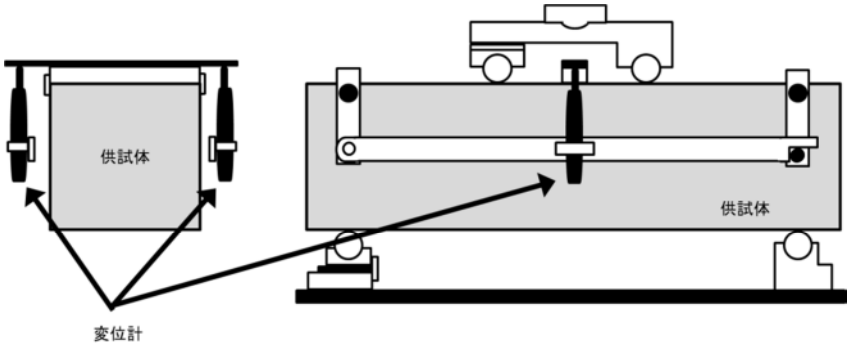


図4.3.5.1 たわみの測定方法の概略

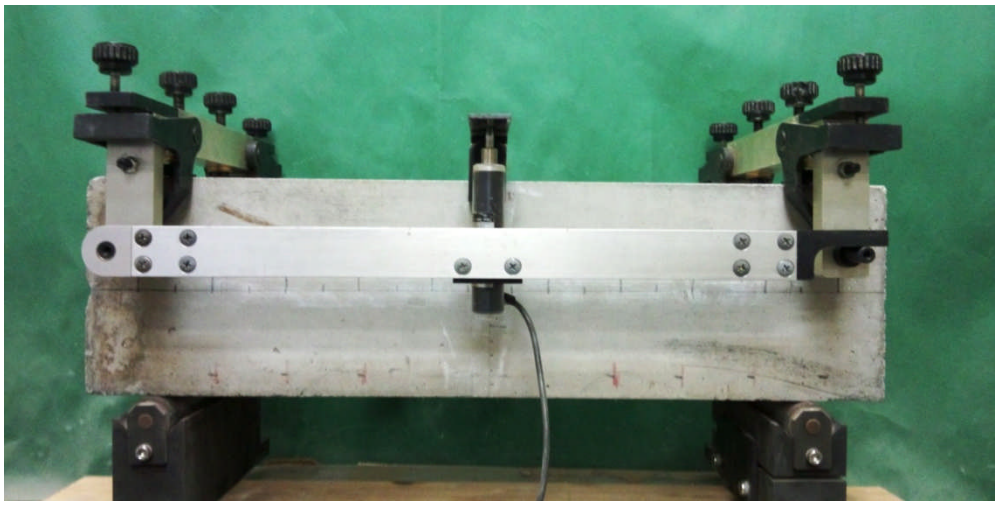


写真4.3.5.1 曲げ供試体にたわみ測定器具を装着した状態

舗装標準示方書によると曲げ弾性係数は、曲げ強度の1/2におけるたわみから求めると規定している。今回は、載荷開始時のイニシャル値が不安定であったことより、たわみ量を5μmから最大荷重の1/2までのたわみ量とし、この範囲の荷重-たわみ量関係を1次回帰し、その傾きP/δを用いて式（4.3.5.1）より弾性係数を算出した。

$$E = \frac{\frac{P}{\delta}\left(23 \times L^3\right)}{648 \times I} \qquad (4.3.5.1)$$

ここに、 P/δ ： 荷重-たわみ曲線の傾き（N/mm）

L ： 供試体長さ（mm）

I ： 供試体の断面 2 次モーメント（mm^4）

E ： 弾性係数（MPa）

(3) 検討結果

検討結果を下記の**図 4.3.5.2**～**図 4.3.5.3** に示す。**図 4.3.5.2** に示すように、曲げ弾性係数と圧縮弾性係数は強い相関を示し、原点を通るように回帰すると曲げ弾性係数の方が 5%程度小さい傾向が示された。また、示方書の参考表はコンクリートの曲げもしくは圧縮強度と弾性係数の関係が示されている。そこで本研究結果の曲げ弾性係数と曲げ強度との関係を**図 4.3.5.3** に示す。結果として、ばらつきは大きいが本試験結果の近似曲線と示方書の参考表の値は似た傾向を示した。

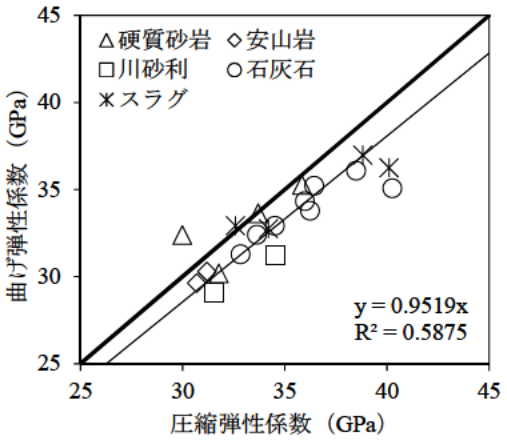


図 4.3.5.2 曲げ弾性係数と圧縮弾性係数の関係

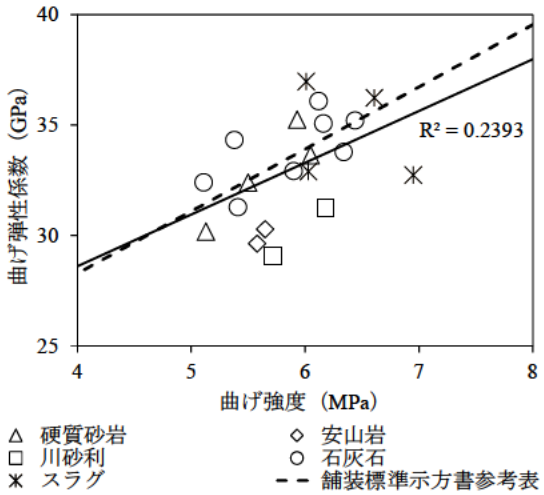


図 4.3.5.3 曲げ弾性係数と曲げ強度の関係

以上の結果から、曲げ弾性係数は圧縮弾性係数と比較して小さいため、設計においては安全側である。よって、JIS A 1149 による圧縮弾性係数試験の他、曲げ試験による荷重ーたわみ関係から算出することを原則とする舗装標準示方書の記述を受けて本研究で提案した曲げ試験による弾性係数試験方法の測定も可能であることが確認された。

4.3.6 線膨張係数

(1) 検討概要

線膨張係数はコンクリートの温度変化による体積変化の大小を表す指標であり、コンクリート舗装の設計においては、理論的設計において設計用値として使用する。線膨張係数は温度応力の算定に使用し、弾性係数と同様に線膨張係数の増減に対して温度応力は直線的に変化する。舗装標準示方書では普通セメントを使用した場合 10×10^{-6}/℃、高炉セメント B 種を使用した場合は 12×10^{-6}/℃として良いとされおり、セメント種類によって線膨張係数が変化することが示されている。本検討では、舗装用コンクリートに用いる粗骨材が異なる場合の線膨張係数への影響を評価するため、各種粗骨材を用いた舗装用コンクリートの線膨張係数試験を実施した。試験では、自己収縮試験終了後の供試体を用い、封緘した供試体に 20℃～60℃の温度履歴を与え各温度におけるひずみを測定し直線近似し線膨張係数を求めた。

(2) 検討結果

試験結果を**表4.3.6.1**に示す。舗装用コンクリートの線膨張係数は使用する粗骨材によって異なり、石灰石

は8×10^{-6}/℃程度、その他はおおよそ10～12×10^{-6}/℃であった。理論的設計を行なう場合、本検討では普通セメントを使用しているため、示方書では参考値として10×10^{-6}/℃が示されているが、石灰石はそれよりも小さい値を示しており、温度応力に対して有利である。なお、10×10^{-6}/℃よりも大きい結果が示された場合もあり、実務にあたっては注意する必要がある。

表4.3.6.1 各コンクリートの線膨張係数

骨材種類	線膨張係数（×10^{-6}/℃）
A20	11.5
B20	10.0
C20	10.0
G25	11.6
LA20	8.5
LB20	8.0
LC20	8.0
LD20	8.4
SA20	10.1
SB20	11.4
SC20	10.8
SD20	11.5
A40	12.3
LA40	8.7

4.3.7 乾燥収縮

(1) 検討概要

3.4節で述べた通り、粗骨材は種類によって乾燥収縮率が異なり、これは、コンクリートの乾燥収縮率にも影響すると考えられる。コンクリートの乾燥収縮ひずみはJIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」に定められているが、舗装用コンクリートで乾燥収縮を測定した例は少ない。そこで、JIS A 1129-2に準じコンクリートの乾燥収縮率の測定を行い、使用した骨材種類との関係について検討した。

(2) 検討結果

舗装用コンクリートの乾燥収縮率測定結果を**図4.3.7.1**に示す。結果として、乾燥期間26週におけるコンクリートの乾燥収縮率は、骨材の乾燥収縮率が小さかった石灰石およびスラグ骨材で小さくなった。また、骨材の乾燥収縮率（**3.4節**）とコンクリートの乾燥収縮率の関係を**図4.3.7.2**に示す。骨材とコンクリートの乾燥収縮率は強い相関を示した。しかし、骨材の乾燥収縮率の差に対して、コンクリートとなったときの乾燥収縮率の差は小さく、骨材の乾燥収縮率は最大で約100倍の差があったが、コンクリートは最大でも1.5倍であった。

コンクリート舗装の設計においてコンクリートの乾燥収縮率は連続鉄筋コンクリートのひび割れ幅の照査に使用されるが、照査で必要となるのは実際の舗装版における乾燥収縮率であるため、今後は試験の結果と

実物の舗装版の乾燥収縮率の関係性について評価していく必要がある。

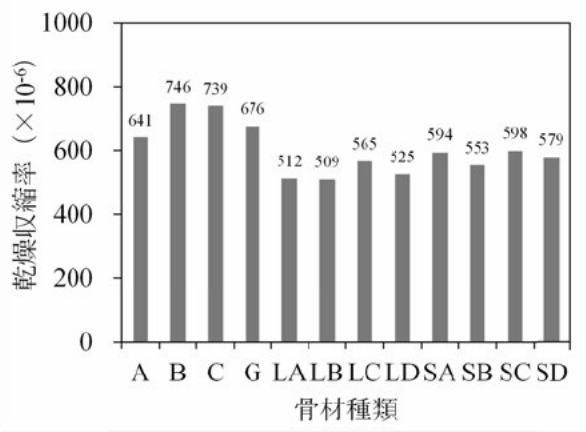


図 4.3.7.1 各コンクリートの乾燥収縮率（乾燥期間 26 週）

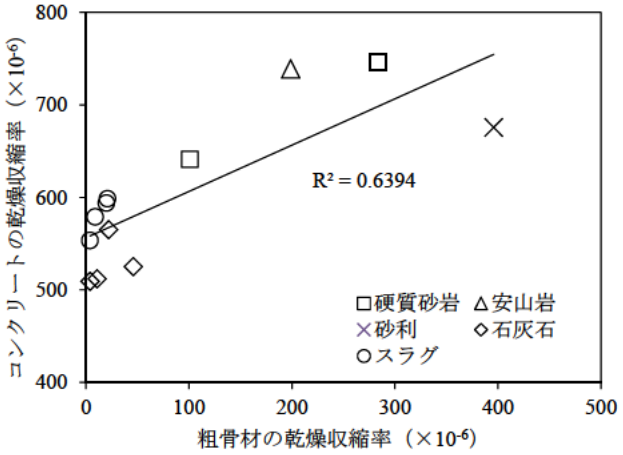


図 4.3.7.2 コンクリートと骨材の乾燥収縮率の関係

4.3.8 自己収縮

(1) 検 概要

自己収縮とは、セメント系材料においてセメントの水和により凝結過程および凝結以後に巨視的に生じる体積減少のことであり、自己収縮には物質（主として水分）の侵入や逸散、温度変化、外力や外部拘束により発生する自己応力に起因する変形は含まない。これは、W/Cの低い高強度コンクリートにおいて問題となっている。舗装用コンクリートも一般的なW/Cは42%と低いものが用いられており[1)]、自己収縮の発生が懸念される。そこで、本検討では舗装用コンクリートの自己収縮率の測定を行なった。自己収縮試験はJCI-SAS2-2（セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法）を参考に行った。ただし、自己収縮ひずみの測定は埋め込み式のひずみゲージを用いて測定した。

(2) 検討結果

試験結果を**表4.3.8.1**に示す。結果として、今回の検討の範囲では舗装用コンクリートに自己収縮の発生はほとんど確認できなかった。よって、舗装コンクリートの施工においては自己収縮を考慮する必要は無いと言える。ただし、本検討で用いた舗装用コンクリートは粗骨材単位かさ容積が0.72と、粗骨材が多い配合であり、粗骨材が少ない配合の場合は別途検討する必要がある。

表4.3.8.1 各コンクリートの自己収縮ひずみ

骨材種類	自己収縮ひずみ（$\times 10^{-6}$）
A20	-16
B20	-22
C20	-5
G25	-14
LA20	5
LB20	1
LC20	-5
LD20	8
SA20	11
SB20	11
SC20	31
SD20	8
A40	-14
LA40	0

4.3.8 項の参考文献

1)（社）セメント協会：舗装技術専門委員会報告 R12　レディーミクストコンクリートの舗装工事への適用拡大に関する検討、p6、2000.2

4.4 走行安全性

4.4.1 概要

舗装コンクリートは、打設面を自動車等が走行することから、その耐用期間中は走行安全性が十分確保されていなければならない。走行安全性には、舗装面のすべり抵抗性と平坦性が大きく関わると考えられるが、このうち平坦性は、わだち掘れや段差の発生によって低下するため [1]、走行回数によるすり減り抵抗性の確保と目地やひび割れ部への繰返し載荷による段差の発生抑制が重要である。このうち、段差については目地部においては構造に起因するため本研究では検討を行なっていない。また、ひび割れについては**4.3.3 項**の曲げ疲労強度と関連すると考えられる。

これらのことから、本研究ではすべり抵抗性とすり減り抵抗性について検討を行なった。すべり抵抗性に関する検討内容および結果を**4.4.2 項**に、すり減り抵抗性に関する検討内容および結果を**4.4.3 項**に示す。

4.4.2 すべり抵抗性

(1) 検討概要

コンクリート舗装は、打設面が交通の要に供されることから、表層のすべり抵抗性が重要な要求性能となる。本検討では、すべり抵抗性を評価するために回転ラベリング試験機を用いた試験を行い、石灰石骨材とスラグ骨材を用いたコンクリートのすべり抵抗性に関する評価を試みた。その試験方法と試験結果について記述する。

(2) 試験方法

コンクリートのすべり抵抗性の評価は回転ラベリング試験機（**写真 4.4.2.1**）を用いて促進摩耗試験を行い、BPN で評価した。回転ラベリング試験機は室内で供試体上にタイヤの通過を再現し、舗装のすり減り量を評価する試験機である。コンクリート舗装のすべり抵抗性は、ノーマルタイヤの通過により減少することが既往の研究により報告されているため、本検討ではノーマルタイヤを用いて試験を実施した。試験条件を**表 4.4.2.1** に、試験手順を**図 4.4.2.1** に示す。試験では、舗装コンクリートのすべり抵抗性におよぼす粗骨材の影響を把握するために、ネオエメリー（B 粒）（以下、エメリー砂）または、ショットブラスト（新東工業製、マイブラスト MY-30E）を用いて表面研磨を行い、試験面に粗骨材を露出させた状態で促進摩耗試験を実施した。使用したエメリー砂の骨材性状は**表 4.4.2.2** に示すとおりで、ショットブラストでは直径 200μm のスチールボールを用いて研磨処理を実施した。試験終了の判断は、**図 4.4.2.1** の③から⑨を繰り返し実施し、同じ BPN の値が繰り返し出てきた時点とした。また、追加試験として供試体の打設面から深さ方向に 1cm 切断し、粗骨材の露出部分をより大きくした状態でノーマルタイヤを走行させ、BPN を測定した。なお、骨材を露出させた状態を定量的に評価するために、画像解析により骨材露出率を算出した。

写真 4.4.2.1　回転ラベリング試験機

表 4.4.2.1　促進摩耗試験条件

試験条件	設定値
タイヤの種類	ノーマルタイヤ(145/80/13R)
輪荷重	1.2kN
タイヤ回転速度	30km/h
供試体回転速度	25km/h
散水量	2L/min
試験温度	20℃

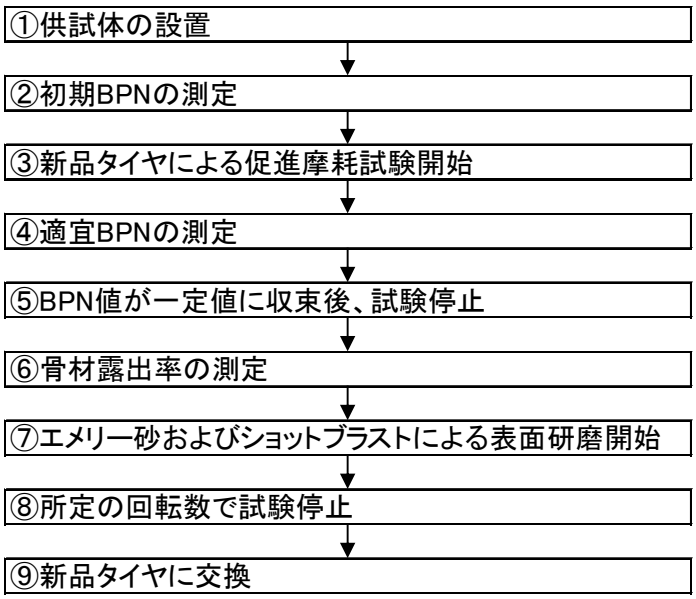


図 4.4.2.1　試験手順

表 4.4.2.2 エメリー砂の骨材性状

試験名	試験方法	標準値	測定値
表乾密度（g/cm^3）	JIS A1109	3.10～3.50	3.18
吸水率（%）	JIS A1110	2.0 以下	0.96
すりへり減量（%）	JIS A1121	15.0 以下	12.3
モース硬度計による硬さ試験			8～9

(3) 結果の概要

走行回数ごとの BPN の測定結果の関係を**図 4.4.2.2** に、BPN と骨材露出率の関係を**図 4.4.2.3** に示す。

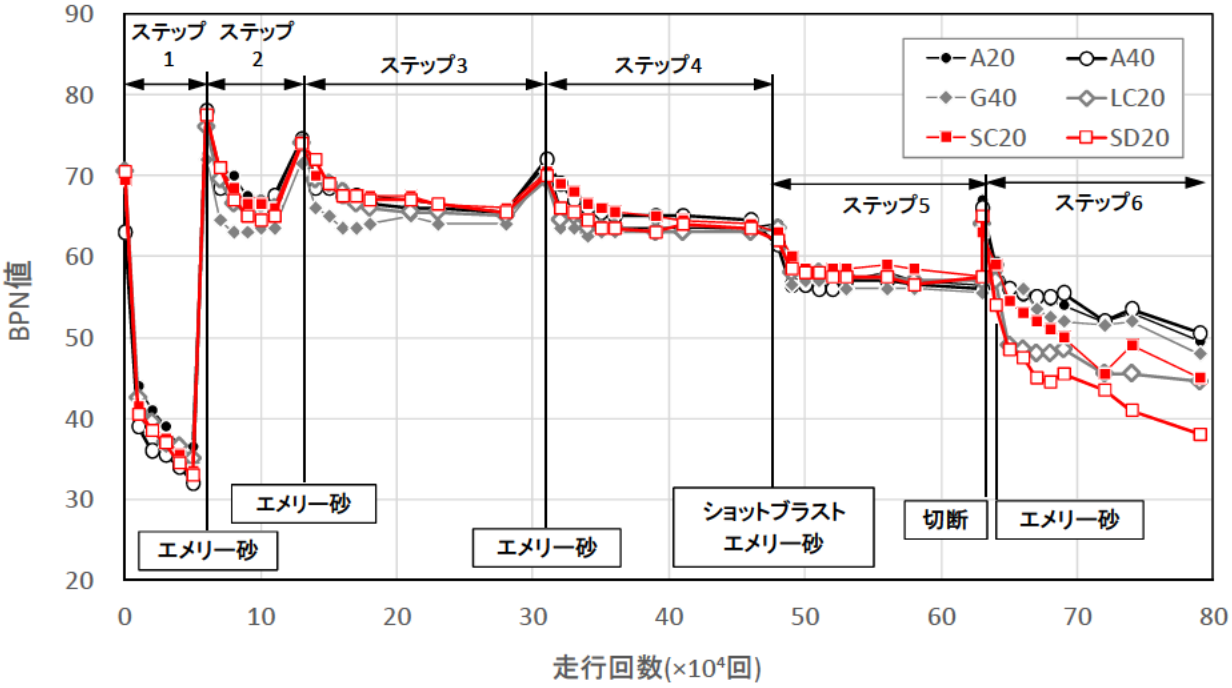


図 4.4.2.2 走行回数と BPN の測定結果

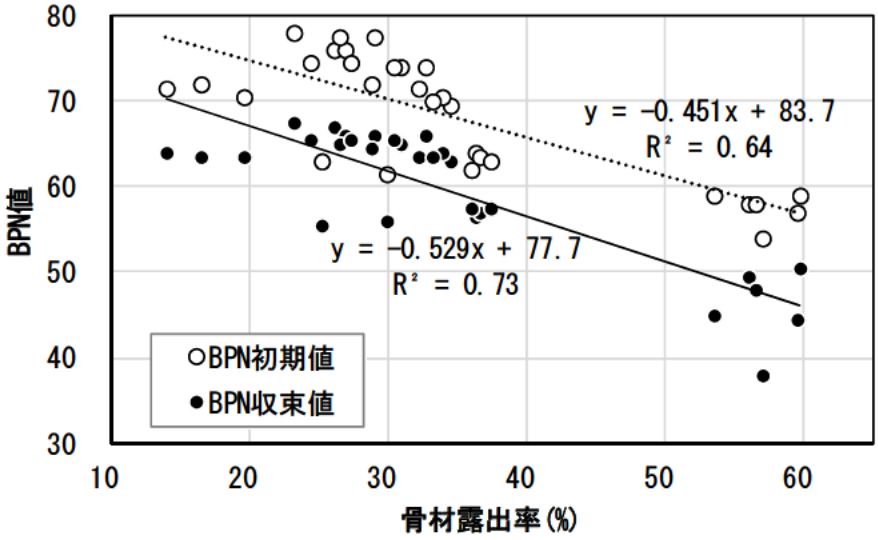


図 4.4.2.3 骨材露出率と BPN の関係

主な傾向は以下のとおりであった。

1. 粗骨材が露出していない状態（モルタル部）では、粗骨材の種類に関わらず、タイヤによるすり磨き作用によって BPN 値が 70 から 35 程度まで低下する傾向が見られた。
2. 表面研磨をした結果、すべり抵抗性が回復し、その後タイヤのすり磨き作用による BPN の大きな低下は見られず、粗骨材の種類による BPN の差も認められなかった。
3. 供試体切断後においては、タイヤによるすり磨き作用により、石灰石粗骨材（LC20）およびスラグ粗骨材（SC20、SD20）の BPN 値は、砂岩（A20）および砂利（G40）と比較すると、若干低い結果となった。
4. 全ての粗骨材において、骨材露出率と BPN の初期値の間には高い相関性が見られ、骨材露出率が大きくなるほど、BPN 値が低下する傾向が見られた。
5. BPN の収束値と粗骨材のすりへり減量および、破砕値、単位セメント量、圧縮強度との間には、相関性は確認されなかった。

(4) 今後の検討課題

骨材の種類によるすべり抵抗性には明確な差が見られなかった。今回の試験方法では、エメリー砂がモース硬度で 8～9 と硬いものを使用したが、そのために比較的硬い砕石も軟らかい砕石も同じように研磨された可能性がある。PSV 試験と同様に、研磨用の砂の粒度を２種類使用するなどエメリー砂の硬度と粒径については検討の余地があるものと考えられる。

また、研磨量の大きな骨材は、露出面がモルタル部よりも低くなった可能性も有り、BPN ではうまく評価できなかった可能性もある。

4.4.3 すり減り抵抗性

(1) 検討概要

舗装コンクリートにおいては、舗装表面を交通車両が通過するため、すり減り抵抗性は性能として重要である。本検討では、舗装コンクリートのすり減り抵抗性に及ぼす要因について，回転ラベリング試験を行うことにより、コンクリートのすり減り抵抗性に及ぼすコンクリートの配合、圧縮強度および粗骨材の品質について検討を行なった。その試験方法と試験結果について記述する。

(2) 試験方法

コンクリートのすり減り抵抗性の評価は、回転スパイクチェーン型ラベリング試験を行い、すり減り量で評価した。試験方法は、「舗装調査・試験法便覧」に準じて**表 4.4.3.1** に示す条件で行い[2)]、供試体の形状は、台形（上底:21cm、下底：32cm、高さ：20cm、厚さ：5cm）とし、一水準につき供試体を 2 枚作製した。また、供試体は試験開始まで水中（20℃）養生を行った。

ラベリング試験では、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 千回転プレロード走行を行った。その後、タイヤチェーンをタイヤに装着し、5 千回転、1 万回転、その後は 1 万回転ごとに 5 万回転まで実施し、供試体 3 断面で摩耗深さをレーザー変位計によって測定し、コンクリートのすり減り量を求めた。

表 4.4.3.1 ラベリング試験条件

試験温度	20℃	輪荷重	1.47kN
供試体回転速度	20km/h	供試体個数	12 個
プレロードタイヤ	145/80/13R	タイヤ空気圧	157kPa
タイヤ回転速度	20km/h	タイヤキャンバー角	1.5 度
タイヤシフト幅	±20mm	タイヤシフト速度	20mm/min
スパイクピン数	54 本	散水量	2L/min

(3) 結果の概要

骨材の種類とコンクリートのすり減り量の関係を**図 4.4.3.1** に、骨材の破砕値およびすりへり減量とコンクリートのすり減り量の関係を**図 4.4.3.2** に、コンクリートのスランプおよび圧縮強度とすり減り量の関係を**図 4.4.3.3** に示す。

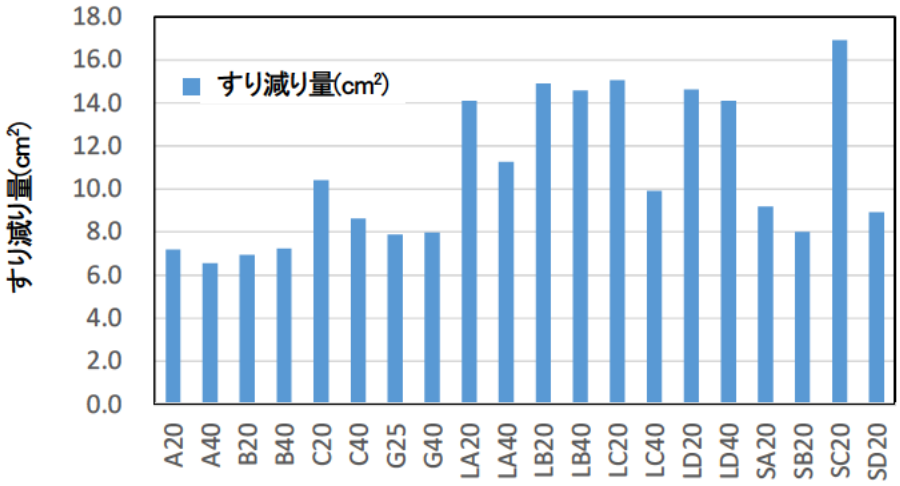
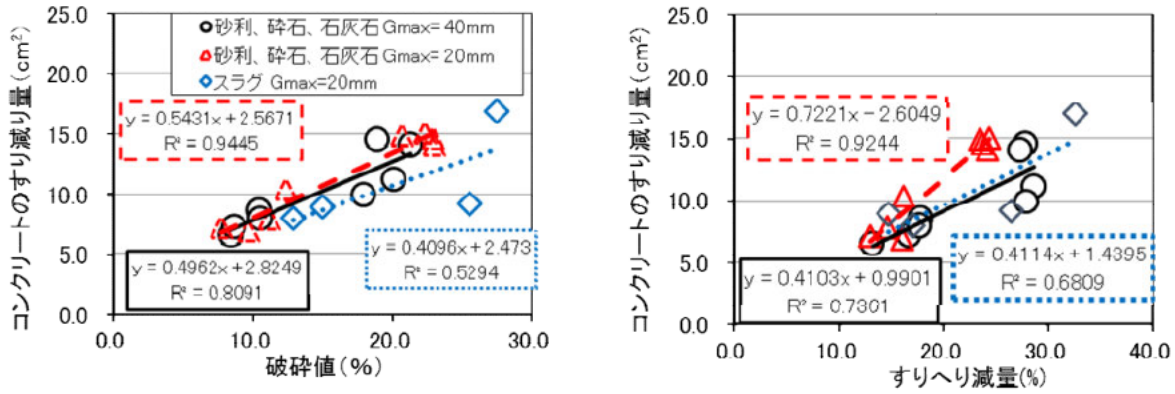
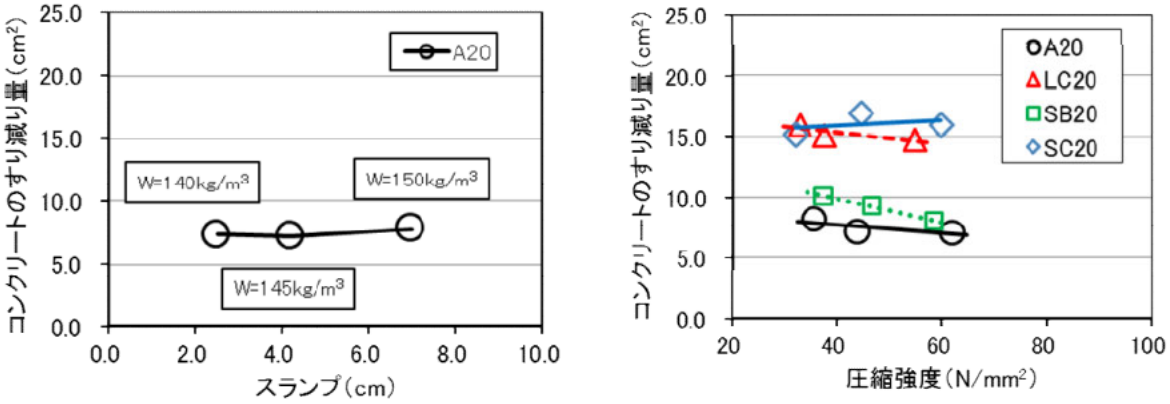


図 4.4.3.1　骨材の種類とすり減り量の関係



(a) 骨材の破砕値とコンクリートのすり減り量　　**(b) 骨材のすりへり減量とコンクリートのすり減り量**

図 4.4.3.2　骨材の破砕値、すり減り減量とコンクリートのすり減り量の関係



(a) スランプとすり減り量　　**(b) 圧縮強度とすり減り量**

図 4.4.3.3　スランプ、圧縮強度とすり減り量の関係

主な傾向は以下のとおりであった。

1.　舗装用コンクリートのすり減り抵抗性は、粗骨材のすりへり減量、あるいは破砕値に大きく影響を受け

る。

2. すり減り抵抗性に及ぼすコンクリートのスランプ、圧縮強度などコンクリートの配合の影響は、粗骨材の品質特性と比べ、小さい傾向にあった。
3. 今回の試験では、一部の石灰石骨材とスラグを用いたコンクリートで、摩耗抵抗性が小さい傾向が見られた。

(4) 今後の検討課題

回転スパイクチェーン型ラベリング試験のすり減り量の結果は、粗骨材のすり減り減量や破砕値と高い相関関係が見られた。一方圧縮強度や単位粗骨材かさ容積との関係は明確ではなかった。

また、試験方法としてスパイクチェーンを使用してコンクリート表面を摩耗させているが、積雪寒冷地域以外でのすり減り抵抗性の評価方法として適切であるかどうか、検討の余地があるものと考えられる。

4.4節の参考文献

1)（公社）土木学会：舗装標準示方書、pp.155-157、2014.12
2)（社）日本道路協会：舗装調査・試験法便覧第3分冊B002、pp.17-38、2007

4.5 耐久性

4.5.1 概要

舗装コンクリートは、打設面が直接交通荷重を受けるとともに、外気にさらされ、特に積雪寒冷地等では凍結防止剤が散布されるなど、厳しい環境で供用されている。そのため、舗装コンクリートの凍結融解抵抗性やスケーリング抵抗性の確保および評価は重要と考えられる。そこで、舗装コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす骨材品質の影響について検討を行い、その検討内容および結果については、**4.5.2項**に示す。また、舗装コンクリートのスケーリング抵抗性についても検討を行ない、その検討内容および結果については、**4.5.3項**に示す。

4.5.2 凍結融解抵抗性

(1) 概要

一般に、骨材はコンクリートの体積の多くを占めているため、骨材の品質はコンクリートの諸性状に大きな影響を及ぼすと考えられる。コンクリートの骨材には細骨材と粗骨材があるが、コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす骨材の影響は細骨材よりも粗骨材の大きいことが指摘されている[1)]。土木学会コンクリート標準示方書［施工編］[2)]では、コンクリートの耐凍害性を確保するうえで必要とされる粗骨材の品質として、JIS A 1122の安定性試験の操作を5回繰り返して実施したときの損失質量が12%を超えないことを標準としている。

舗装コンクリートは一般的なコンクリートよりも粗骨材量が多いことを特徴とする。このため、舗装コンクリートは、一般的なコンクリートよりも、粗骨材の性状が凍結融解抵抗性に及ぼす影響を大きく受ける可能性を有しているといえる。共同研究では、種類や産地等が異なる粗骨材を使用した舗装コンクリートの凍結融解試験を実施し、骨材の種類や品質が舗装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した。

(2) 問題点

コンクリートの耐凍害性はJIS A 1148によって判定することが多い。JIS A 1148の試験方法は、使用材料や配合などが異なるコンクリートの凍結融解抵抗性を相互に比較するためのものであるとされており、本研究のように骨材の種類や品質の影響を相対的に評価する場合には適しているといえる。コンクリート標準示方書［設計編］[3)] では、コンクリート構造物が所要の耐凍害性を満足するために必要な凍結融解試験における相対動弾性係数を示しているが、これらの値はコンクリート構造物の耐用年数を示すものではなく、コンクリート構造物の耐凍害性を直接的に評価する方法は確立されていない。

コンクリート表面のスケーリングによる劣化は、外観の変化に対する影響度が大きく、劣化の機構によって構造物の性能に与える影響が異なる場合もある。JIS A 1148による試験方法でも供試体の質量変化量を測定することになっているが、ここで測定される質量変化量はスケーリングによる表層の劣化を定量化するには適していない可能性があることが指摘されている[4)]。文献3)、4)では、コンクリートのスケーリング量の測定あるいはスケーリングに対する抵抗性の試験方法として、ASTM C 672法、RILEM CDF法およびRILEM CDF法を参考にした「けい酸塩系表面含浸材の試験方法（案）（JSCE-K 572-2012）」[5)] の「6.10スケーリングに対

する抵抗性試験」を適用できることを示している。ただし、現在国内ではデータが十分に蓄積されていないことが課題とされており、ASTM C 672法によるスケーリング試験について別途検討した。その結果は**4.5.3項**に記載している。

(3) 検討内容

12種類の粗骨材（砂利GのGmax 25mmと、いずれもGmax 20mmの砂岩砕石A、B、安山岩砕石C、石灰岩LA～LD、スラグ骨材SA～SD）を用いた舗装用コンクリートについて、凍結融解試験を行なった。なお、砂利Gと砕石A～C、石灰岩LA～LDのグループとスラグ骨材SA～SD（比較用にBとC）のグループの２つに分けて実験を行っているため、前者をシリーズI、後者をシリーズIIとした。粗骨材の吸水率、安定性損失質量、すりへり減量、破砕値、**3.3節**で検討した粗骨材の凍結融解試験の損失質量分率は**表4.5.2.1**に示すとおりである。

表4.5.2.1 粗骨材の基本物性

粗骨材の種類	表乾密度 (g/cm^3)	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	安定性損失質量 (%)	すりへり減量 (%)	破砕値 (%)	粗骨材の凍結融解試験の損失質量分率(%)		
							水道水30サイクル	3%塩水10サイクル	3%塩水30サイクル
A	2.68	2.67	0.42	0.1	12.9	7.7	2.7	2.0	3.9
B	2.65	2.63	0.70	1.3	16.0	9.7	3.3	6.6	18.1
C	2.63	2.57	2.38	6.7	16.1	12.4	1.7	12.0	32.1
G	2.64	2.61	1.32	4.9	14.6	11.2	7.1	12.0	19.0
LA	2.70	2.69	0.41	0.7	24.1	23.0	－	－	－
LB	2.71	2.70	0.23	0.6	23.4	20.7	－	－	－
LC	2.70	2.69	0.35	1.3	24.3	22.3	－	－	－
LD	2.69	2.68	0.54	0.8	23.6	22.9	3.4	2.7	7.1
SA	2.54	2.42	4.76	2.7	26.4	25.5	1.2	0.6	3.0
SB	2.76	2.73	1.35	0.3	17.0	12.9	1.0	0.2	1.2
SC	2.64	2.54	3.86	1.7	32.5	27.5	2.8	1.9	3.5
SD	3.74	3.70	1.00	1.3	14.7	15.0	0.5	1.8	2.3

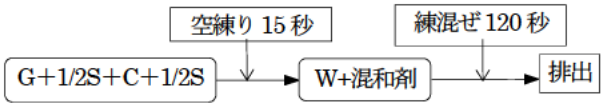
コンクリートの配合は**表4.5.2.2**に示すとおりで、単位粗骨材かさ容積は0.72、単位水量はスランプが約5.0cmとなるように設定し、AE減水剤で微調整を行った。水セメント比は28日曲げ強度が6.0MPaとなるように設定した。空気量は骨材修正係数で補正した値が4.5±1.0%となるようにAE剤で調整した。

表4.5.2.2 粗骨材の種類

区分	記号	W (kg/m³)	W/C (%)	単位粗骨材かさ容積 (m³/m³)	s/a (%)	骨材修正係数 (%)	空気量 (%)	AE減水剤 (C×%)	空気量調整剤 (C×%)	単位量 (kg/m³)			
										W	C	S	G
I	A	145	49.2	0.72	39.6	0.07	4.5±1.0	0.6	0.0065	145	295	729	1158
	B	145	52.9	0.72	37.9	0.12	4.5±1.0	0.7	0.0060	145	274	705	1189
	C	145	49.8	0.72	40.7	0.20	4.5±1.0	0.8	0.0050	145	291	752	1117
	G	145	43.9	0.72	38.3	0.13	4.5±1.0	0.6	0.0045	145	330	695	1148
	LA	145	49.6	0.72	41.5	0.15	4.5±1.0	0.7	0.0055	145	292	765	1133
	LB	135	49.1	0.72	39.0	0.03	4.5±1.0	1.0	0.0095	135	275	735	1210
	LC	145	51.2	0.72	42.1	0.09	4.5±1.0	0.8	0.0050	145	283	781	1126
	LD	145	50.9	0.72	42.0	0.09	4.5±1.0	0.8	0.0050	145	285	778	1122
II	BII	145	52.9	0.72	37.9	0.12	4.5±1.0	0.6	0.0070	145	274	705	1189
	CII	145	49.8	0.72	40.7	0.20	4.5±1.0	0.8	0.0050	145	291	752	1117
	SA	160	37.2	0.72	39.8	1.32	4.5±1.0	0.6	0.0040	160	430	673	1006
	SB	153	41.8	0.72	36.9	0.43	4.5±1.0	0.6	0.0050	153	366	652	1194
	SC	160	47.8	0.72	40.6	1.72	4.5±1.0	0.6	0.0040	160	335	719	1079
	SD	160	48.4	0.72	40.9	1.12	4.5±1.0	0.6	0.0040	160	331	727	1522

コンクリートの練混ぜは、シリーズIとシリーズIIで異なっており、**表4.5.2.3**に示すようにシリーズIでは強制練りミキサ（水平2軸形）、シリーズIIでは強制練りミキサ（パン形）を使用した。

表4.5.2.3 コンクリートの練混ぜ条件

項　目	内　容
試験条件	試験室環境：室温 20±2℃ 骨材の含水状態：表面乾燥飽水状態
ミキサの種類	シリーズⅠ：強制練りミキサ　水平二軸形、公称容量 60L シリーズⅡ：強制練りミキサ　パン形、公称容量 55L
練混ぜ手順	
1 回の練混ぜ量	40L

(4) 試験方法

舗装コンクリートの凍結融解試験は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法（A法）」に準拠して、相対動弾性係数および質量変化率により評価した。

(5) 試験結果

相対動弾性係数の測定結果を**図4.5.2.1**および**図4.5.2.2**に示す。シリーズIでは、300サイクルまでの範囲において、相対動弾性係数は全て85%以上を示した。シリーズIIでは、300サイクルまでの範囲において、SAおよびSCを用いた場合が70%程度まで低下したが、その他は90%以上であった。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、骨材品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響[9]については、**表4.5.2.1**より、高炉スラグのSAおよびSCは他の骨材よりも吸水率が高く、すりへり減量が大きいことから、粗骨材の強度がやや低く、コンクリートの凍結融解抵抗性に影響を及ぼした可能性があると思われる。

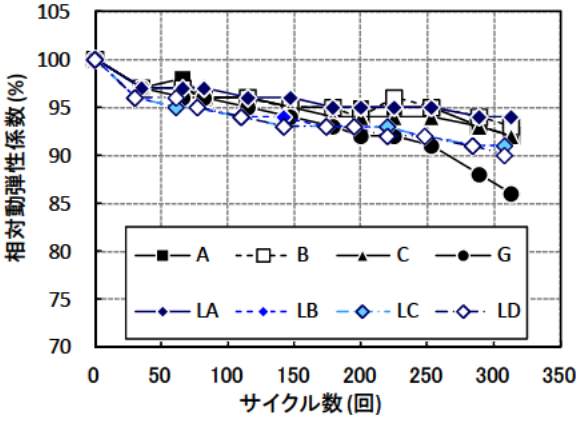


図4.5.2.1　相対動弾性係数（シリーズI）

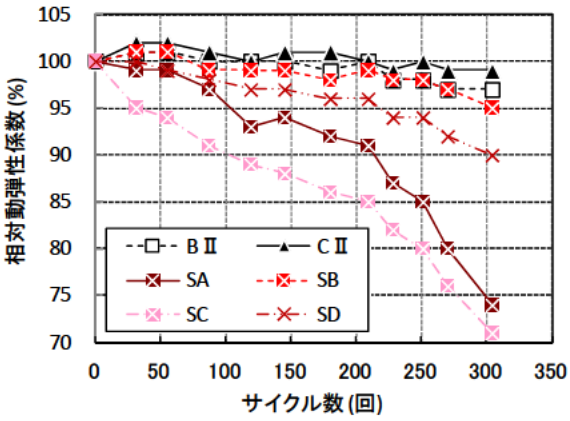


図4.5.2.2　相対動弾性係数（シリーズⅡ）

粗骨材の吸水率とコンクリートの耐久性指数との関係を**図4.5.2.3**に示す。吸水率が大きくなるほど、耐久性指数が小さくなる傾向を示している。また、粗骨材の耐凍害性を評価するための指標である安定性損失質量とコンクリートの耐久性指数との関係を**図4.5.2.4**に示す。他の骨材よりも吸水率が大きく、すりへり減量の大きなSAとSCの2点を除けば、耐久性指数は85%～100%と高い値を示した。本研究で用いた粗骨材の安定性損失質量は7%以下であり、JIS A 5005に示される基準値12%以下を下回っていることからも妥当な結果が得られたものと考えられる。

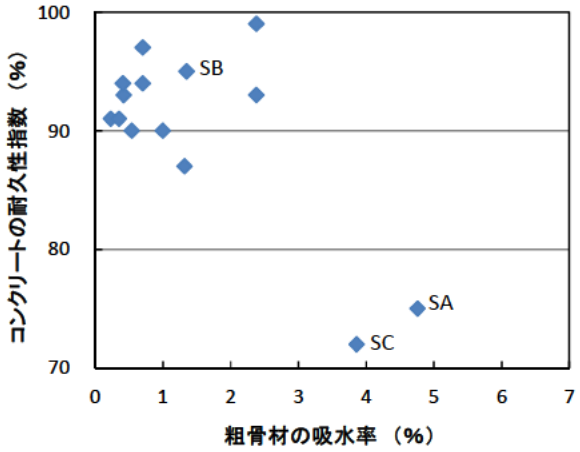


図4.5.2.3　吸水率と耐久性指数の関係

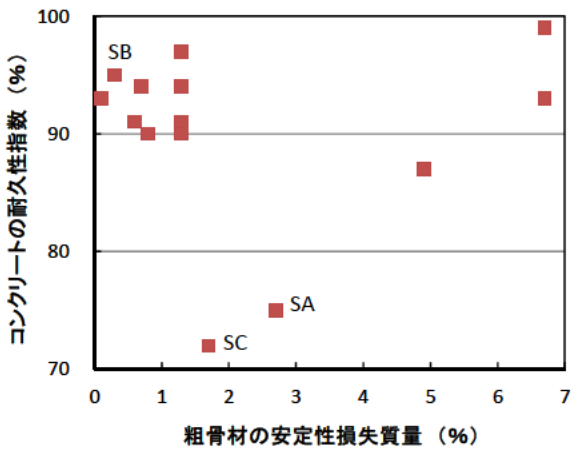


図4.5.2.4　安定性損失質量と耐久性指数の関係

質量減少率の測定結果を**図4.5.2.5**および**図4.5.2.6**に示す。シリーズIについては、**図4.5.2.1**に示す相対動弾性係数とは異なり、Gの質量減少率が1%程度と最も小さく、その他は2～3%程度となった。シリーズⅡについては、質量減少率は2%以下であり、**図4.5.2.2**では相対動弾性係数の低下が大きかったSAは、質量減少率の低下は最も少なかった。

質量減少率は凍結融解作用によるスケーリングに起因するものであり、その要因の１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、所定の曲げ強度となるように水セメント比を決定しているが、質量減少率に及ぼす水セメント比の影響を確認するために、粗骨材Bの質量減少率（300サイクル）を1とした場合の質量減少率比と水セメント比との関係を**図4.5.2.7**に示す。**図4.5.2.7**より、高炉スラグ（SA～SC）を使用した場合の質量減少率は、その他の骨材よりもやや大きかった。また、高炉スラグとその他の粗骨材を分けて評価すると、いずれも水セメント比が大きい程（モルタル部の強度が下がる方向）質量減少率が大きくなった。従って、凍結融解作用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られる。

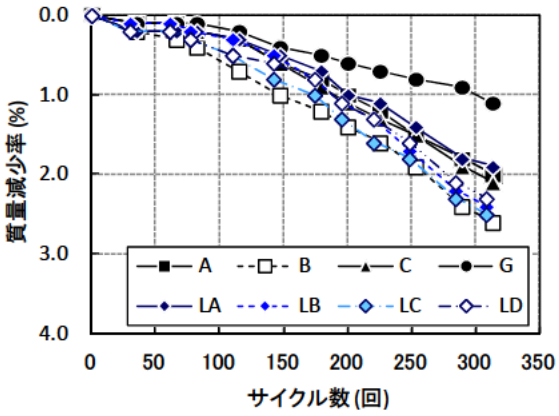


図4.5.2.5　質量減少率（シリーズⅠ）

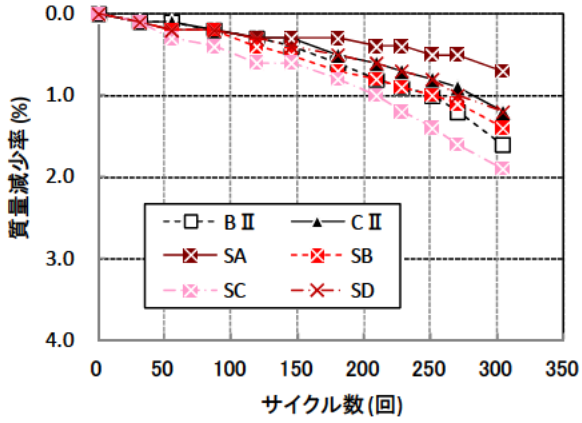


図4.5.2.6　質量減少率（シリーズⅡ）

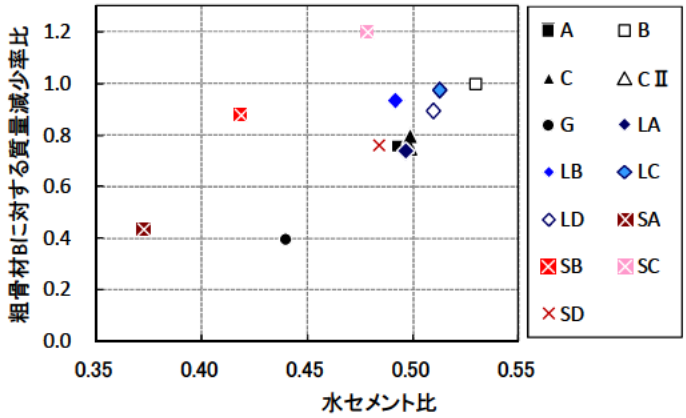


図4.5.2.7　粗骨材B使用時に対する質量減少率比と水セメント比の関係

(6)　舗装コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす粗骨材品質

12種類の粗骨材を用いて、舗装コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす粗骨材品質の影響の評価を行なった結果、次のことが明らかとなった。

①　コンクリートの相対動弾性係数は、粗骨材品質（吸水率やすりへり減量）の影響を受け、良質な粗

骨材を使用することで、凍結融解作用による相対動弾性係数の低減を抑制できる。つまり、凍結融解抵抗性を向上できると考えられる。

② 粗骨材品質のうち、吸水率はコンクリートの耐久性指数と高い相関が見られた。安定性損失質量とコンクリートの耐久性指数との相関については、吸水率の場合に比べて低かった。

③ コンクリートの質量減少率は、水セメント比が増加するほど大きくなる傾向を示す。また、高炉スラグ骨材は、他の骨材に比べてコンクリートの質量減少率が大きい。良質な粗骨材の使用に加え、モルタルの強度を高めることで、凍結融解作用による増加を抑制できる、即ち凍結融解抵抗性を向上できると考えられる。

(7) 今後の検討課題

舗装コンクリートの凍結融解抵抗性については、JIS A 1148に準拠した相対動弾性係数の測定を行うことで内部劣化の評価を行うことは可能であることを示した。しかし、この方法は使用材料や配合などが異なるコンクリートの凍結融解抵抗性を相対比較するためのものであり、コンクリート構造物の耐凍害性を直接評価したり、耐用年数を予測したりするものではないことがJISの条文に明記されている。また、コンクリート標準示方書［設計編］[3)] では、コンクリート構造物が所要の耐凍害性を満足するために必要な相対動弾性係数を示しているが、現段階ではコンクリート舗装は対象外となっている。これらのことから、コンクリート舗装の凍結融解抵抗性をこの方法で直接的に評価していくためには、コンクリート舗装における凍害の実態把握や舗装コンクリートに要求される凍結融解抵抗性などを明らかにするための更なる検討が必要である。

4.5.2項の参考文献

1)（社）日本コンクリート工学協会：コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書、pp.128-137、2008.8

2）土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書　施工編、pp.50-52、2012.3

3）土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書　設計編、pp.157-160、2012.3

4）土木学会：2012年制定　コンクリート標準示方書改訂資料　基本原則編・設計編・施工編、コンクリートライブラリー138、pp.90-92、2012.3

5）土木学会：けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針（案）、コンクリートライブラリー137、2013.7

6) (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

4.5.3 スケーリング抵抗性

(1) 概要

舗装コンクリートは表層部に交通荷重や凍結防止剤散布等の負荷が掛かることから、その凍害は主に表層部のスケーリングであることが考えられる。前項ではJIS A 1148の凍結融解試験で評価を行なったが、より実態に近い表層部のスケーリング抵抗性に関する評価も検討することとした。コンクリート表層部のスケーリング抵抗性を評価する試験方法の１つにASTM C672があるが、本研究ではこれを参考とした方法で評価を行なった。

舗装コンクリートのスケーリング抵抗性が問題となる環境は主に積雪寒冷地域等であり、そのような環境では凍結防止剤（NaCl）が散布されたり、除雪車等のブレードによる表面研磨の影響を受けたりする。また、打設面はブリーディングの影響が考えられること、供用が進むと徐々に粗骨材が表面に露出してくることなどが考えられる。これらを考慮し、各事項が舗装コンクリートのスケーリング抵抗性に及ぼす影響について検討を行なった。

具体的には、まず予備試験で、凍結防止剤および空気量がスケーリング抵抗性に及ぼす影響についても評価するために、水道水や複数の塩分濃度の塩水でスケーリング試験を行なった。次に、品質の異なる数種類の粗骨材を用いた場合のスケーリング試験を行なった。この場合、打設面と、切断面について試験した。切断面の試験の目的は、ブリーディングの影響を排除したモルタルのスケーリング抵抗性、粗骨材が露出した場合に、粗骨材品質がスケーリング抵抗性に及ぼす影響を直接評価するためである。

(2) 検討内容

スケーリング試験は、２回に分けて実施した。１回目は予備試験、２回目は粗骨材の種類の影響を評価するための試験である。

本研究では、スケーリング試験はASTM C672を参考として、次に示す手順で行なった。

① 試験体は、寸法150×150×300mmのコンクリート（2週間水中養生後）を**図4.5.3.1**のように切断し、試験する面ごとに次の寸法の供試体を各2個ずつ成形した。

打設面：150×150×75mm

切断面：150×150×75mm

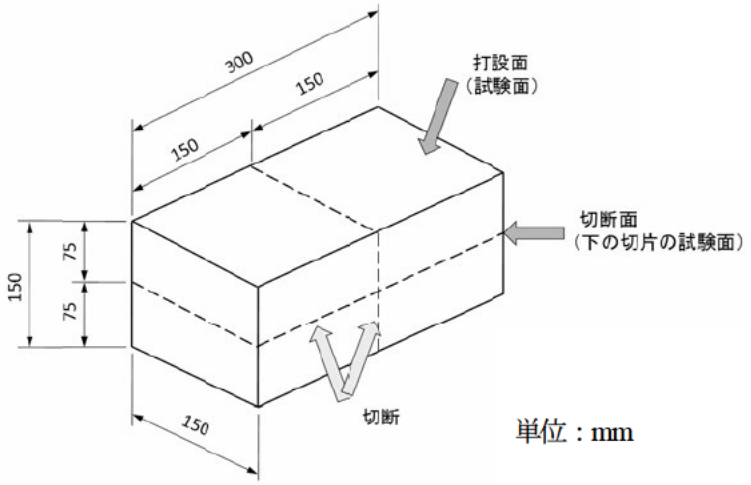


図 4.5.3.1 供試体の成形

② 断後、1日湿空（20℃、85%RH）養生し、試験面 以外（側面および底面）にエポキシ樹脂を2回塗付た。

③ 験面に水または塩水を溜めるため、**図4.5.3.2**に示 ように切断 1週間後に周囲にプラスチック板を り付けた。

④ 験面に水または塩水を入れ、1週間養生した。

⑤ 験開始6時間前に水また は塩水を深さ 5mmまで入 、−20℃±3℃で16時間、20±3℃で8時間のサイク で試験を行なった。

⑥ ケーリング量は、剥離した試料の質 を試験面の 面積で除して求めた。質 は、塩水を用いた場合 塩分を水道 で十分除去し、105℃で十分に乾燥した後に測定した。

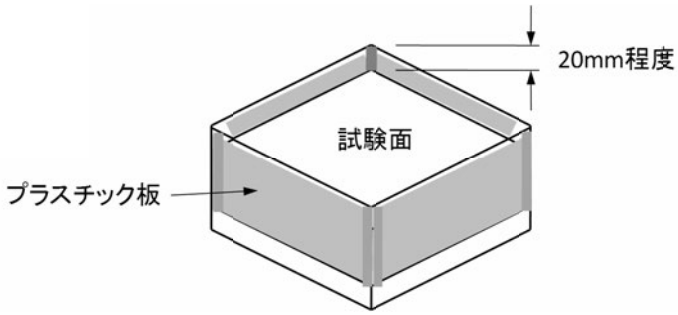


図 4.5.3.2 試験面に水または塩水を湛えるための囲い

(3) 予 試験

予備試験では①試験面の影響、 凍結防止剤の影響、③空気量の影響、の３項目について検討を行なった。

①は打設面と切断面のスケーリングに及ぼ 影響を評価 するために実施した。通常、舗装コンクリートは打設面が試験対象となるが、ブリーディングの影響が考えられたため、ブリーディングの影響を受けないモルタルのスケーリング抵抗性と粗骨材の劣化を直接観察するために、切断面でも試験を行なった。

②は積雪寒冷地域等では凍結防止剤（NaCl）が散布される。そのスケーリングに及ぼす影響を評価するために、空気量を4.5%に固定し、湛水溶液の塩 濃度を0%（水道水）、3%、23.4%（ 飽和溶液）の３水準で試験を実施した。

③は凍結融解抵抗性の向上には空気量が欠 せないこと から、空気量とスケーリングの関係を評価するために、湛水溶液の塩分濃度を3% 固定し、空 気量を1.5%、4.5%、6.0%の３水準で試験を実施し 。

①～③の検討項目を実施するために、**表4.5.3.1**に示す試験条件で予備試験を行なった。供試体の配合は**表4.5.3.2**、 フレッシュ性状は**表4.5.3.3**、材齢30日の単位容積質 および圧縮強度は**表4.5.3.4**および**図4.5.3.3**に示すとおりであった。**図4.5.3.3**より、空気量と圧縮強度および 単位容積質量の関係は、高い相関関係があることが確認できる。予備試験におけるスケーリング試験は、10 サイクル毎にスケーリング量の測定と試験面の観察を行ない、50サイクルまで試験を実施した。

表 4.5.3.1 試験条件

粗骨材の種類	空気量	W/C（%）	測定面	湛水溶液（塩分濃度）		
				0%（水道水）	3%	23.4%
A20	6±0.5%	50	打設面		○	
			切断面			
	4.5±0.5%		打設面	○	○	○
			切断面	○	○	○
	1.5±0.5%		打設面		○	
			切断面			

表 4.5.3.2 コンクリートの配合

粗骨材最大寸法 (mm)	ｽﾗﾝﾌﾟ目標値 (cm)	空気量目標値 (%)	水ｾﾒﾝﾄ比 (%)	単位粗骨材かさ容積	細骨材率 (%)	単位量 (kg／m³)						
						水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤 15SX2 C*%	AE 剤 202 100 倍溶液	消泡剤 404 100 倍溶液
20	6 5	6.0	50.0	0.72	39.7	145	290	733	1159	2 90	2.03	－
		4.5									1.45	－
		1.5									－	1 16

表 4.5.3.3 フレッシュ性状

空気量目標値 (%)	試験結果		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
6.0	5.4	6.2	20.0
4.5	5.3	4.8	19.9
1.5	2.6	1.3	20.0

表 4.5.3.4 圧縮強度および単位容積質量

空気量 (%)	単位容積質量		圧縮強度	
	(kg/m³)	平均	(MPa)	平均
6.2	2336	2337	41 5	42 3
	2337		43.1	
4.8	2360	2357	46 9	46 2
	2355		45.4	
1.3	2440	2436	49.0	51.8
	2432		54.6	

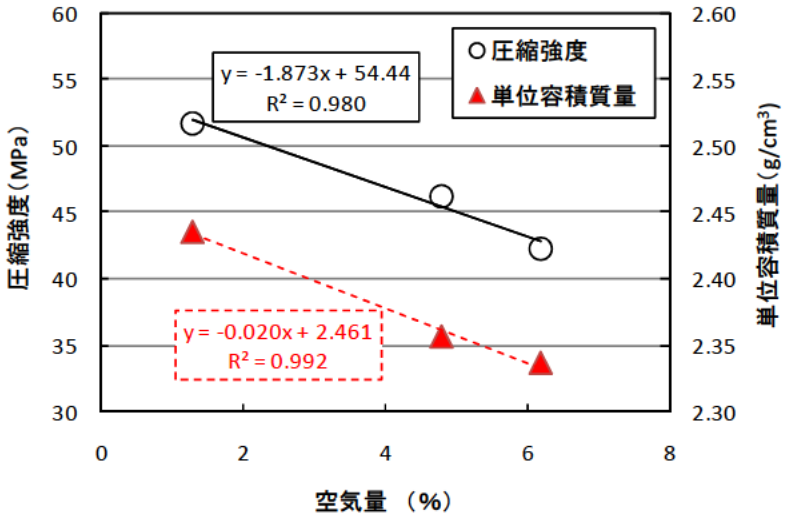
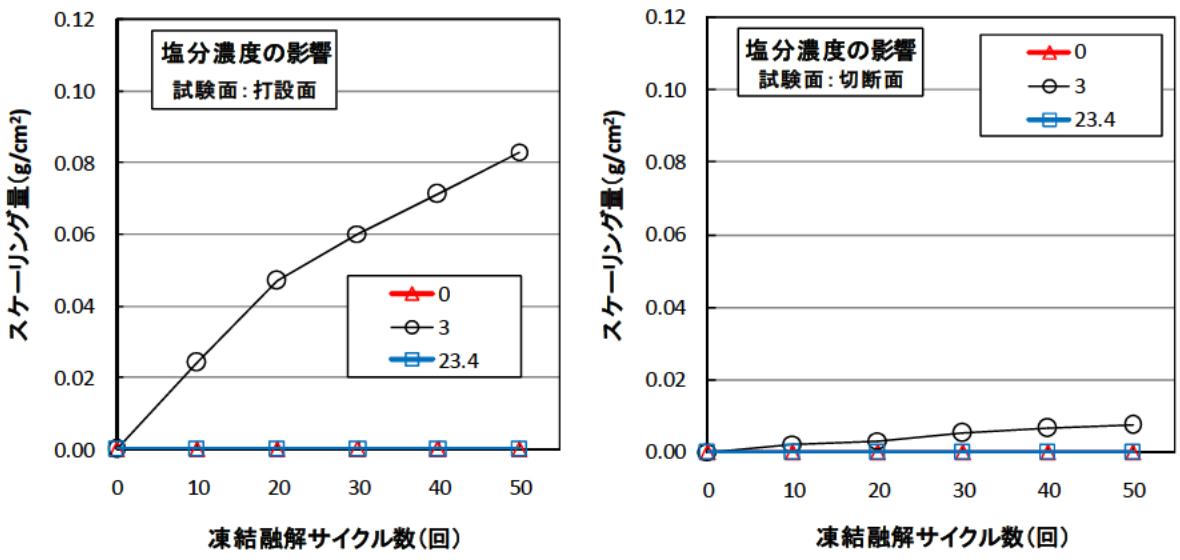


図 4.5.3.3 圧縮強度および単位容積質量

予備試験の結果について、湛水溶液の塩分濃度とスケーリング量の関係を打設面、切断面共に**図4.5.3.4**に示す。

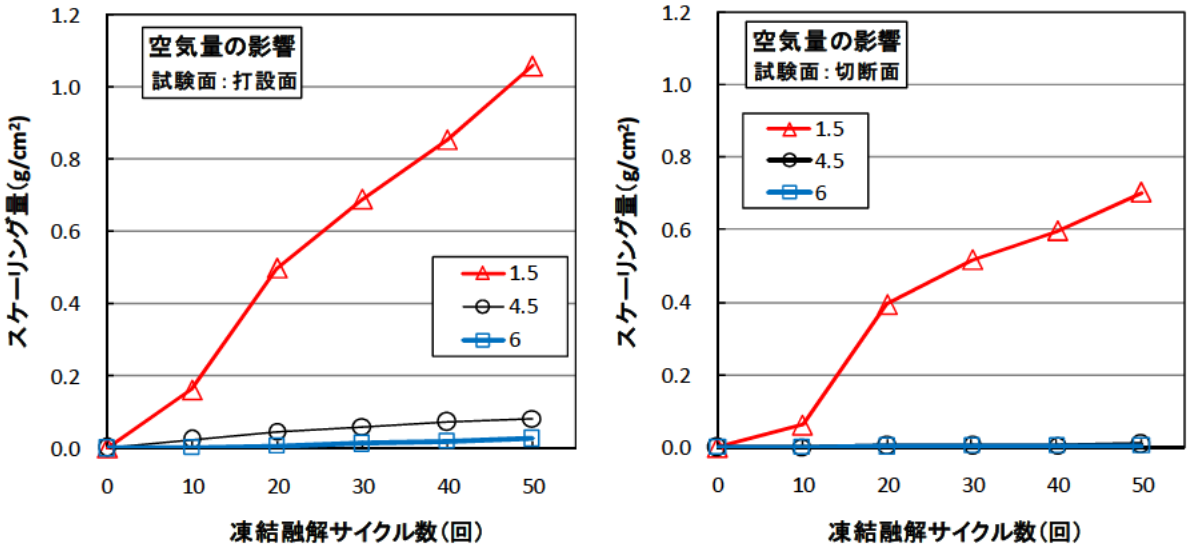


（a）試験面：打設面 **（b）試験面：切断面**

図 4.5.3.4 塩分濃度の影響（空気量 4.5%）

図4.5.3.4より、湛水溶液の塩分濃度が3%の場合のスケーリング量が大きく、その量は打設面が切断面に比べて10倍程度と大きかった。0%（水道水）と23.4%（飽和溶液）の場合は、スケーリング量はほとんど0であった。飽和溶液の場合、凍結温度は−22℃であることから、本試験の条件（−20℃～20℃）では飽和溶液は凍結しなかった。そのため、スケーリングも生じなかったと考えられる。

次に、空気量とスケーリング量の関係を打設面、切断面共に**図4.5.3.5**に示す。



(a) 試験面：打設面　　(b) 試験面：切断面

図 4.5.3.5　空気量の影響（塩分濃度 3%）

図4.5.3.5より、打設面では空気量が小さくなる程、スケーリング量が増大していることが分かる。特に、空気量1.5%の場合のスケーリング量は空気量4.5%の場合のスケーリング量の10倍程度を示した。切断面でも空気量1.5%の場合は打設面よりは若干小さいが、スケーリング量の増大が見られた。供試体を観察すると、モルタルのスケーリングが進行している状態であった。空気量4.5%と6%の場合は、ほとんど0であった。

これらの予備試験の結果より、①試験面の影響については、打設面と切断面では異なる挙動を示す、②凍結防止剤（湛水塩分濃度）の影響については、塩分濃度0%（凍結防止剤散布無し）よりも3%（凍結防止剤散布有り）の方がスケーリング量が大きい傾向を示す、③空気量の影響については、空気量が大きい程スケーリング量が小さい傾向を示す、ということが分かった。

(4)　スケーリング抵抗性に及ぼす粗骨材品質の影響

予備試験の結果より、湛水塩分濃度を3%、空気量を4.5%と固定した場合について、粗骨材の種類がスケーリングに及ぼす影響を評価するためにスケーリング試験を行なった。試験は、水セメント比を50%、打設面と切断面の２面について行なった。

試験条件は**表4.5.3.5**に示すとおりであり、6種類の粗骨材（硬質砂岩砕石のAおよびB、安山岩砕石のC、砂利のG、石灰石のLD、高炉スラグ骨材のSC）について試験を行なった。コンクリートの配合は**表4.5.3.6**、フレッシュ性状および材齢28日の圧縮強度は**表4.5.3.7**に示すとおりであった。

ここでのスケーリング試験は、100サイクルまで試験を実施した。

表 4.5.3.5 試験条件

骨材		W/C（%）	空気量（%）	湛水溶液の塩分濃度（%）
A	硬質砂岩砕石	50	4.5±0.5	3
B				
C	安山岩砕石			
G	砂利			
LD	石灰石			
SC	高炉スラグ			

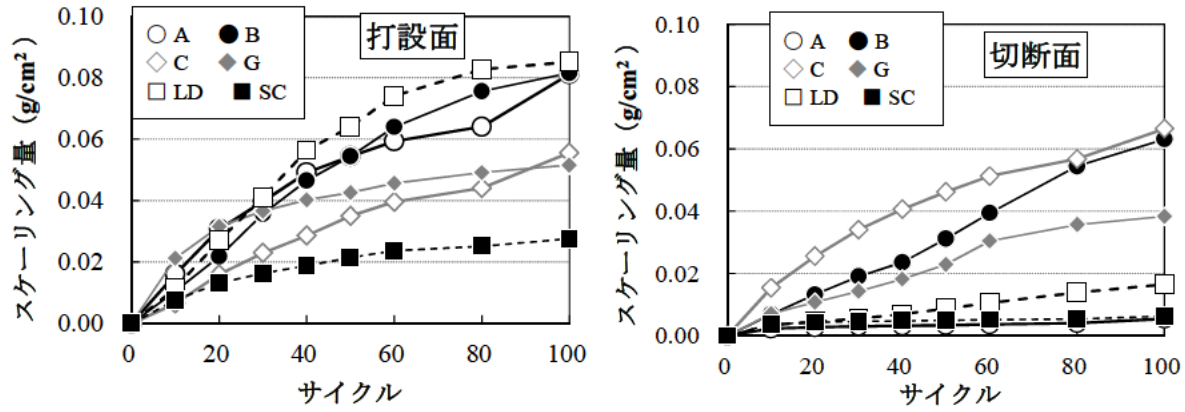
表 4.5.3.6 コンクリートの配合

骨材と最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	スランプ目標値 (cm)	空気量目標値 (%)	単位粗骨材かさ容積	細骨材率 (%)	単位量 (kg／m^3)					
						水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤 15S 100 倍溶液 (C×%)	AE 剤 202 100 倍溶液 (C×%)
A20	50	5.0	4.5	0.72	39.6	145	290	728	1160	2.90（1.0）	1.89（6.50）
B20					37.5		290	690	1189	3.19（1.1）	1.02（3.50）
C20					42.0		290	750	1117	3.48（1.2）	0.94（3.25）
G25					39.4		290	725	1148	2.32（0.8）	1.23（4.25）
LD20					41.9		290	771	1122	2.47（0.85）	1.09（3.75）
SC20					41.0	160	320	728	1079	2.24（0.7）	1.68（5.25）

表 4.5.3.7 フレッシュ性状および圧縮強度

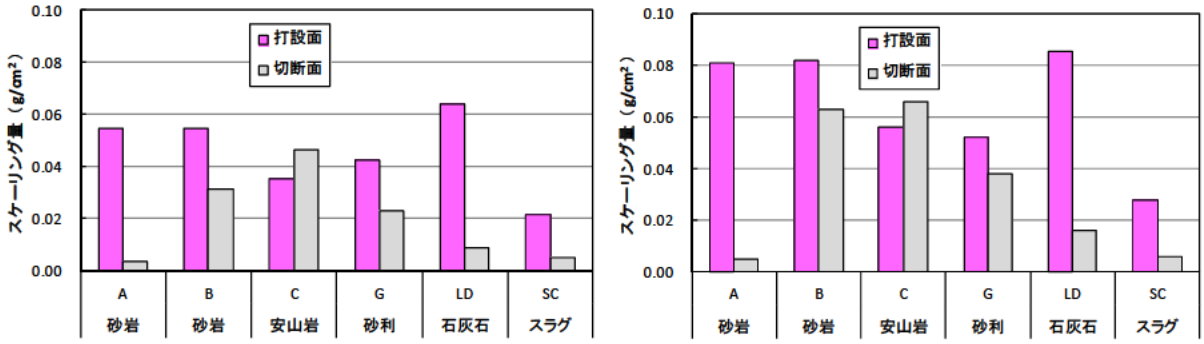
骨材と最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	フレッシュ性状			圧縮強度 (MPa)
		スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	
A20	50	3.6	4.1	22.1	41.1
B20		6.6	4.0	23.5	45.9
C20		4.6	4.0	22.3	42.3
G25		3.2	4.2	23.6	46.0
LD20		5.0	4.4	23.6	47.3
SC20		7.4	4.3	22.5	38.4

粗骨材の種類がスケーリングに及ぼす影響について、水セメント比を50%とした場合のスケーリング試験結果を**図4.5.3.6**に示す。また、50サイクル、100サイクルのスケーリング量を**図4.5.3.7**に示す。凍結融解の繰り返し回数とともにスケーリング量も増えている。粗骨材Bを用いた場合は、打設面、切断面共にスケーリング量が比較的大きかった。粗骨材SCを用いた場合は、打設面、切断面共にスケーリング量が小さかった。粗骨材AとLDを用いた場合は、打設面ではスケーリング量が大きかったが、切断面では小さかった。このように、骨材の種類や打設面・切断面によって傾向が異なる結果となった。



(a)打設面　　(b)切断面

図 4.5.3.6　粗骨材の種類ごとの繰返し回数とスケーリング量の関係

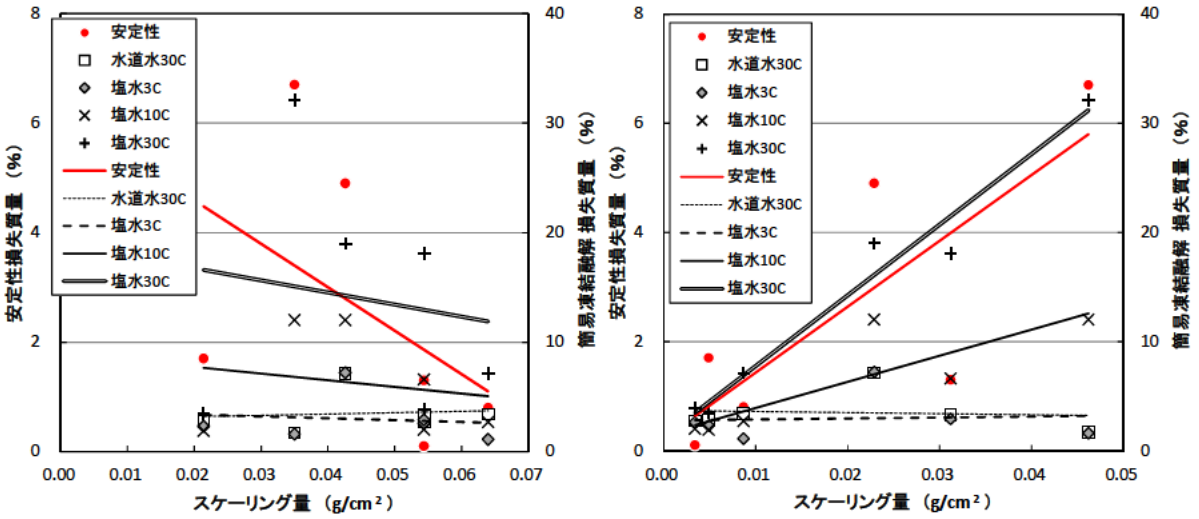


(a) 50 サイクル　　(b) 100 サイクル

図 4.5.3.7　粗骨材の種類ごと(W/C＝50%)の 50 サイクル、100 サイクル時のスケーリング量

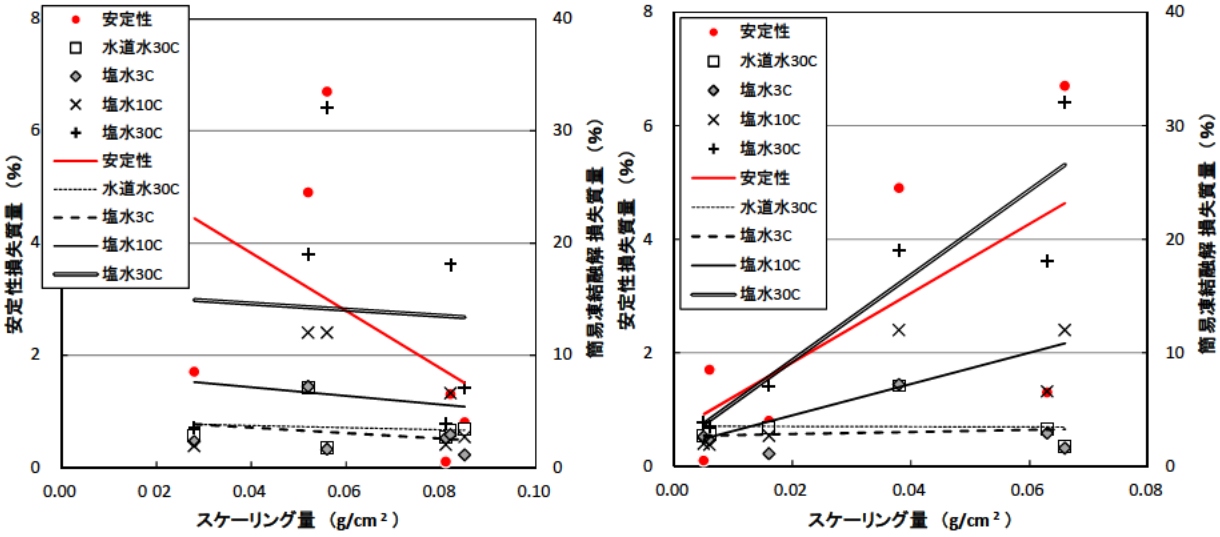
スケーリングの状況を観察した結果、打設面の場合は、スケーリングの大小に関わらず、主にモルタル分が剥離することによるものであった。切断面の場合は、打設面よりモルタルの剥離はわずかであり、粗骨材の種類によっては粗骨材自体が薄く剥離するものがあり、スケーリングが進行するとモルタルとの界面から粗骨材が脱落する状態が確認された。従って、コンクリート舗装では表層モルタル部分からスケーリングが生じるが、粗骨材が露出する状態となると、粗骨材自体のスケーリング抵抗性も重要になってくるものと推測された。

表 4.5.2.1 に示す粗骨材の安定性損失質量や粗骨材の凍結融解試験結果（水道水 30 サイクルと、塩水 3 サイクル、10 サイクル、30 サイクル）と、打設面および切断面のスケーリング量との関係を**図 4.5.3.8**（50 サイクル）と**図 4.5.3.9**（100 サイクル）に示す。また、一次式（y=a+b･x）による回帰結果を**表 4.5.3.8** に示す。



（a）打設面　　（b）切断面

図 4.5.3.8　骨材の凍結融解抵抗性に関する指標とスケーリング量の関係（50 サイクル）



（a）打設面　　（b）切断面

図 4.5.3.9　骨材の凍結融解抵抗性に関する指標とスケーリング量の関係（100 サイクル）

表 4.5.3.8 スケーリング量と粗骨材の凍結融解抵抗性に関する指標

（図 4.5.3.8 および図 4.5.3.9）の回帰結果

試験面	試験方法		50 サイクル			100 サイクル		
			a	b	r^2	a	b	r^2
打設面	安定性損失質量		6.17	-79.32	0.221	5.88	-51.49	0.199
	粗骨材の凍結融解	水道水 30C	2.95	12.15	0.010	4.07	-8.95	0.012
		塩水 10C	8.94	-60.56	0.038	8.67	-38.66	0.033
		塩水 30C	18.96	-110.52	0.023	15.69	-27.21	0.003
切断面	安定性損失質量		0.23	120.60	0.619	0.61	61.01	0.416
	粗骨材の凍結融解	水道水 30C	3.69	-9.64	0.008	3.54	-1.15	0.000
		塩水 10C	1.52	239.57	0.719	1.74	137.83	0.626
		塩水 30C	1.30	647.22	0.966	1.84	374.66	0.851

表4.5.3.8より、舗装コンクリートの打設面のスケーリング量は、粗骨材の各指標との関係は認められなかった。打設面のスケーリング状況は、主にモルタル分のスケーリングであったことから、粗骨材の各指標とは直接的な関係はないものと考えられる。一方、切断面のスケーリング量については、安定性損失質量と塩水10サイクルの決定係数は0.4～0.7程度（黄色の網掛け）であり、やや良好な関係が認められた。また、塩水30サイクルの決定係数は0.8～0.9程度（ピンクの網掛け）であり、良好な相関関係が認められた。このように、舗装コンクリートの切断面におけるスケーリング量は、粗骨材の安定性損失質量、粗骨材の凍結融解試験（塩水10サイクル、30サイクル）の損失質量分率と相関があることから、従来から実施されている安定性試験や、塩水による粗骨材の凍結融解試験は、コンクリートのスケーリング試験の繰り返し回数を検討することにより、粗骨材が表面に露出した状態のスケーリング抵抗性の評価に適用できる可能性があることが分かった。

(5) スケーリング抵抗性に及ぼす各種要因

舗装コンクリートのスケーリング抵抗性について、試験面の影響、凍結防止剤（塩分濃度）の影響、空気量の影響、粗骨材品質の影響について検討した結果、次のことが明らかとなった。

① 塩分濃度が0%（真水）の場合に比べて、塩分濃度が3%の場合の方がスケーリング量が大きくなり、凍結防止剤が散布される環境下ではスケーリング量が増大する傾向を示した。なお、塩分濃度が飽和状態となった場合は、本研究で実施したスケーリング試験では凍結温度に達しないため、スケーリングはほとんど0であった。

② 空気量が大きくなるほど、スケーリング量が小さくなる傾向を示した。舗装コンクリートの空気量が適切であれば、スケーリングによる被害を抑制できると考えられる。

③ 打設面と切断面のスケーリング量を比較すると、打設面の方がスケーリング量が大きい傾向を示した。表面を観察した結果、打設面は主にモルタル分のスケーリングによるものであったが、切断面のモルタルのスケーリングはわずかであり、粗骨材自体の剥離も生じていた。凍結融解サイクルが進行すると粗骨材とモルタルの界面から粗骨材が脱落する現象が見られた。

④ 粗骨材品質の中で、塩水による凍結融解試験30サイクルの損失質量と切断面におけるコンクリートのス

ケーリング量の間に関係が認められ、粗骨材の凍結融解試験は骨材が表面に露出した状態の舗装コンクリートのスケーリング抵抗性評価に適用できる可能性がある。本研究では、粗骨材の凍結融解試験10サイクルの損失質量、安定性損失質量の間の決定係数が次いで高く、これらも粗骨材が露出した状態の舗装コンクリートのスケーリング抵抗性評価に適用できる可能性がある。

4.6 強度の管理・検査の合理化

4.6.1 強度の管理・検査合理化の必要性

舗装コンクリートは曲げ強度で設計されているため、管理・検査も曲げ強度で行なうことが望ましい。

しかし、曲げ強度試験は、供試体が重く大変なことなどから、以前から圧縮または引張強度試験で代用できないかの検討が行われている [1)]。重量については、労働安全衛生法に基づく厚生労働省からの通達（職場における腰痛予防対策指針、平成25年6月18日）によると、一人で扱えるのは体重のおおむね40%以下となるように努めることが示されており、体重60kg程度とすれば一人で扱えるのは25kg程度となる。曲げ供試体は30kg近くあるので、強度試験時など供試体のみを扱う時はもちろんであるが、供試体作製時は型枠と併せて50～60kgにもなるため、常に二人で作業に当たらなければならず、管理・検査の合理化を図るためには一人で実施することができる圧縮強度または引張強度に代えることを検討する必要がある。

さらには、最近は、コンクリート舗装が少なくなって久しいことから、曲げ供試体用の型枠を保有しているプラントも少なくなってきている。また、高強度コンクリートの使用実績も増えていることから、強度試験機を更新する際、最大容量が1,000kNから2,000kNの試験機に入れ替わってきており、最小目盛りが曲げ試験にとって大まか過ぎるなど、設備面からも曲げ強度試験を実施することが難しくなってきており、強度の管理・検査は曲げ強度から圧縮強度または引張強度に代えていかなければならない必要性が高まっている。

このような理由から、舗装コンクリート強度の日常的な管理・検査は、圧縮強度または引張強度が望まれている。

4.6.2 規基準に示されている強度管理・検査方法とその問題点

コンクリート舗装の基準類（土木学会：舗装標準示方書、日本道路協会：舗装設計施工指針、舗装施工便覧）には、管理・検査に圧縮または引張強度を用いることができるように記述されている。しかし、それらの強度を用いる場合、管理基準、判定基準が示されていない。そのため、管理・検査に圧縮または引張強度を用いる場合は、管理基準、判定基準を設定する必要があるため、簡単には代えることができない。

日本道路協会の舗装設計施工指針以前に使用されていたセメントコンクリート舗装要綱には、圧縮強度を管理に用いる場合、曲げ強度と圧縮強度の関係を線形回帰し、圧縮強度をその標準偏差だけ増加させた値を管理に用いる方法が示されていた。この方法は、曲げ強度と圧縮強度の試験結果を多数組用意できる場合には良いが、実際には、試験結果を多数組用意することは、試験に要する時間やコストの面から難しい。しかし、回帰分析に用いる試験結果の数が限られる場合には、推定した標準偏差の大きさが適当か信頼性に不安がある。

4.6.3 圧縮強度による強度管理を行なう場合の考え方

上記検討のように、舗装コンクリートの強度管理や検査の合理化の必要性が高まっている。しかし、従来曲げ強度で管理していた強度を、圧縮強度または引張強度に変更した際に生じる種々の不確かさに対する考え方について、確立したものがなかった。また、各種強度試験の結果には一定のばらつきが生じることが避

けられないが、その大きさをレディーミクストコンクリート工場ごとに定めるのは、試験に要するコスト等から現実的ではないと考えた。

そこで、多数回の試験結果が収録されている既往の調査結果[2),第3報]から舗装コンクリートの圧縮強度や曲げ強度の試験結果のばらつきを分析し、避けられない誤差の程度を明らかにした。また、舗装コンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係を得るための試験の条件等を定めた。これらの結果を整理して、次ページ以降に示す「舗装コンクリートの圧縮強度による強度管理を行なう場合の考え方（案)」としてまとめた。

4.6 節の参考文献

1) 河野広隆、國府勝郎、鈴木一雄、森濱和正：舗装用コンクリートの曲げ強度と引張強度の関係、セメントコンクリート、No.584、pp.50-57、1995.10

2) 河野広隆、森濱和正：舗装用コンクリートの品質に関する調査，土木研究所資料第 3427 号、1996.2

第 3 報 (国研)土木研究所、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)：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 (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、共同研究報告書第 477 号、2016.1

舗装コンクリートの圧縮強度による強度管理を行なう場合の考え方（案）

１．適用範囲

この「舗装コンクリートの圧縮強度による強度管理を行なう場合の考え方（案）」（以下、圧縮強度による強度管理（案）、という）では、設計基準曲げ強度が 4.5MPa 程度の舗装コンクリートの品質管理に、曲げ強度に替えて圧縮強度を用いる場合の考え方を示す。

・この圧縮強度による強度管理（案）では、圧縮強度による舗装コンクリートの強度管理を行なう場合の留意点を説明した。

・発注者側の職員が確認すべき主な点は、圧縮強度と曲げ強度の関係式が適切に設定されているか、圧縮強度の試験結果から曲げ強度が適切に推定されているか、の二点と考えられる。その概要を示す。

・この圧縮強度による強度管理（案）を作成するにあたっては、舗装コンクリートの設計基準曲げ強度が 4.5MPa 程度であることを想定し、これに適合する舗装コンクリートを模擬した供試体の試験結果等を用いて行った。コンクリートの曲げ強度としては 4～7MPa 程度の場合が多かった。管理する舗装コンクリートの曲げ強度がこの範囲から外れる場合は、強度的性質が異なり、この圧縮強度による強度管理（案）の記述があてはまらない場合もあると考えられるので、別途検討する必要がある。

２．基本的な考え方

（1）舗装コンクリートの品質管理に、曲げ強度に替えて圧縮強度を用いる場合は、あらかじめ圧縮強度の試験結果から曲げ強度を推定する方法を適切に定める。

（2）圧縮強度の試験結果から曲げ強度を推定して強度管理を行なう場合は、推定に伴う種々の誤差を適切に考慮する。

（3）定期的に圧縮強度の試験結果から曲げ強度を推定する方法の妥当性を確認しなければならない。使用する骨材の産地が変更された場合、その他必要な場合は、推定方法を再検討する。

（1）について

・使用する材料等によって、圧縮強度と曲げ強度の関係は異なると考えられるので、圧縮強度の試験結果から曲げ強度を推定する場合には、その関係をあらかじめ使用するコンクリートを用いて把握しておく必要がある。

（3）について

・圧縮強度と曲げ強度の関係は、使用する骨材が異なると変化するおそれがあるので、骨材の産地が変わった場合などには見直す必要がある。また、産地が変わらない場合でも、採取する箇所によって骨材の品質に変化が生じるおそれがあるので、定期的に確認する必要がある。

３．圧縮強度から曲げ強度を推定する関係式の作成

（1）圧縮強度から曲げ強度を推定する関係式を作成する際には、使用するコンクリートについて、曲げ強度試験結果及び圧縮強度試験結果を適切に収集し、適切な方法で関係式を求めなければならない。

（2）（3）から（10）の規定に従う場合は、（1）を満たしていると見なす。

（3）使用する材料や舗装コンクリートのフレッシュ性状ごとに関係式を作成する。

（4）関係式の作成には、同一材料を用いた強度の異なる 4 種類以上の配合のコンクリートを用いることを原則とする。

（5）関係式の作成に用いるコンクリートの配合は、関係式を適用する強度の範囲を包含するように定める。

（6）各配合のコンクリートから曲げ強度試験用供試体と、圧縮強度試験用供試体を同時に作製する。

（7）曲げ強度試験用供試体と圧縮強度試験用供試体の数は、同一条件に対してそれぞれ 6 本以上とする。

（8）供試体の作製方法及び養生方法は JIS A 1132 による。

（9）所定の材齢において、作製した曲げ強度試験用供試体及び圧縮強度試験用供試体の強度を、それぞれ JIS A 1106、JIS A 1108 により試験する。

（10）曲げ強度及び圧縮強度の試験結果から、両者の関係を最小二乗法により回帰分析し、次式の回帰係数（α、β）を求める。なお、曲げ強度と圧縮強度の相関係数が 0.9 未満のときは、再試験を行なう。

$$f_{bi} = \alpha \cdot f_{ci} + \beta$$

ここに、f_{bi} ：関係式を作成するために求めた曲げ強度の平均値（MPa）

f_{ci} ：関係式を作成するために求めた圧縮強度の平均値（MPa）

α 、β ：回帰係数

（3）について

・舗装コンクリートには、施工方法によって様々なフレッシュ性状のコンクリートが用いられる。そこで、使用する材料が同一で、目標スランプが 2.5cm、6.5cm、10.5cm と異なるコンクリートの試験結果を検討したところ、粗骨材の最大寸法や、使用した化学混和剤が異なる場合には、圧縮強度と曲げ強度の関係が異なりうることがわかった。

・一方で、使用する材料が同一である場合については、フレッシュ性状の違いがスランプで 4cm 程度の範囲であれば、同一の関係式を用いても良いと考えられた。詳細については、＜参考１＞を参照されたい。

（4）（5）（6）について

・圧縮強度から曲げ強度を推定する関係式を適用する際に、関係式を外挿して用いることは望ましくない。このため、コンクリートの曲げ強度の範囲がおおよそ 4、5、6、7MPa 程度のコンクリートのデータを得る

ことを想定し、4 種類以上の配合を用いることが適当と考えた。

・関係式を求めるための配合水準の具体的な設定方法は使用材料によっても異なりうると考えられるので、この圧縮強度による強度管理（案）では、具体的には規定しなかった。なお、日本道路協会のセメントコンクリート舗装要綱では、このような関係式を作成する際に水セメント比が 50%以上及び 40%以下の配合を含むように計画することを求めている。また、一般的には、用いようとする舗装コンクリートの配合（配合曲げ強度で 5～6MPa 程度と考えられる）を定めた上で、単位粗骨材かさ容積を固定し、単位水量及び単位セメント量を適切に変化させて、より強度が低い／高いコンクリートを製造するのが良いと考えられる。その際、目標スランプ及び目標空気量は一定とするのが適当と考えられる。使用する化学混和剤の種類を大きく変更すると圧縮強度と曲げ強度の関係が変化するおそれがあるので注意を要する。

・強度試験の材齢は一定とすることが望ましいが、材齢を固定すると、使用材料によっては、水セメント比をある程度変化させた配合を用いても、曲げ強度の範囲を十分大きくできないことも考えられる。その場合は、材齢を 2 水準以上設定し、3 種類以上の配合を用いて検討すると良い。

・関係式を求めるための試験練りや供試体作製は、試験時のばらつきをなるべく小さくするためには、同一日に行なうことが望ましい。しかし、設備等の関係からやむを得ない場合は、複数日にわたって行っても良い。その際は、骨材等の使用材料に変化が生じないように、材料の管理には特に留意するとともに、供試体作製日の間隔がなるべく小さくなるように計画するものとする。

（7）について

・既往の研究結果から、同一条件の供試体を用いた場合の圧縮強度試験結果の変動係数は概ね 3.5%であると推定された。このとき 6 体の供試体の強度試験結果の平均値を用いれば、圧縮強度を十分精度良く測定でき、試験結果の誤差は無視できると考えた。詳細については、＜参考２＞を参照されたい。

・既往の研究結果から、同一条件の供試体を用いた場合の曲げ強度試験結果の変動係数は概ね 5.0%と圧縮強度試験よりやや大きいと推定された。曲げ強度試験の供試体数を大きくすると試験に要する労力が大きくなることも踏まえ、供試体数は圧縮強度と同じ 6 本とした。曲げ強度試験結果には若干の誤差が見込まれるが、それは圧縮強度から曲げ強度を推定する際に考慮することとした。

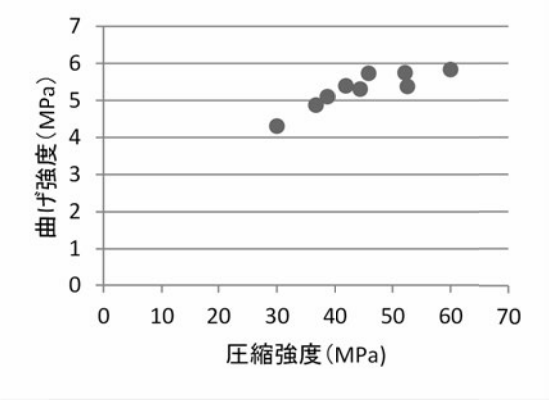
・同一条件の供試体は、同一バッチのコンクリートから採取することが望ましい。しかし、設備等の関係からやむを得ない場合は、複数バッチのコンクリートから採取しても良い。その場合は、バッチによる品質の差が試験結果に影響を与えないように、適切に計画するものとする。

（10）について

・圧縮強度から曲げ強度を推定する関係式は、圧縮強度を説明変数として曲げ強度を回帰分析した結果を用いることにした。既往の研究から、この方法で関係式を求めた場合、相関係数は 0.9 以上となると予想される。相関係数がこれより小さい場合は、何らかの原因で取得した強度試験結果が適切でないおそれがある。また、日本道路協会のセメントコンクリート舗装要綱でも曲げ強度と圧縮強度の相関係数が 0.9 未満のときは、曲げ強度を圧縮強度に置き換えて設計基準強度、配合強度を定めることができないとしていることも参考にした。

・圧縮強度と曲げ強度の関係は、一般に線形回帰分析を適用できると考えられるが、使用する材料によって

は、図－１に示すように、強度が高くなると両者の関係が変化している事例もあった。そのような場合には、試験結果の一部を除外して回帰分析を行っても良い。ただし、回帰分析には少なくとも 3 組の強度試験結果を用いる。



※この図では、材齢が 7、28、91 日と異なる試験結果を含む。

図－１　圧縮強度と曲げ強度の関係の例

４．圧縮強度からの曲げ強度の推定

（１）　圧縮強度から曲げ強度を推定して強度管理を行なう場合は、強度試験の誤差や推定に伴う不確かさについて適切に考慮しなければならない。

（２）（３）から（６）の規定に従う場合は、（１）を満足しているとみなす。

（３）　曲げ強度の推定に用いる圧縮強度試験用供試体は、JIS A 1132 によって作製する。供試体の数は、3 本以上とする。

（４）　圧縮強度試験用供試体の強度を、 JIS A 1108 により試験する。

（５）　次の式によって推定最小曲げ強度を算出し、四捨五入によって小数点以下 2 けたに丸める。

$$f'_{b\min} = \alpha \cdot f_c + \beta - 0.30$$

ここに、$f'_{b\min}$ ：推定最小曲げ強度（MPa）

f_c ：曲げ強度を推定するために求めた圧縮強度の平均値（MPa）

α 、β ：3.で求めた回帰係数

（６）　曲げ強度を曲げ強度試験によって求めた場合の値に替えて、推定最小曲げ強度を用いる。

（５）について

・圧縮強度から曲げ強度を推定して強度管理を行なう場合は、強度試験結果や推定に伴う不確かさについて検討する必要があるが、その項目には、次のものがある。

1)　曲げ強度を推定するために求めた圧縮強度の不確かさ

2) 圧縮強度から曲げ強度を推定することの不確かさ

3) 圧縮強度と曲げ強度の関係式を求めた際に用いた曲げ強度の不確かさ

・1)については、圧縮強度が 40MPa 程度の場合、既往の研究結果から、圧縮強度としては±1.6MPa 程度と考えられる。これを曲げ強度に換算した場合、±0.2MPa 程度と考えられる。詳細については、＜参考２＞を参照されたい。

・3)については、曲げ強度が 5.0MPa 程度の場合、既往の研究結果から、±0.2MPa 程度と考えられる。詳細については、＜参考２＞を参照されたい。

・2)については、既往の研究でも十分に明らかにされているとは言い難いが、適切な方法で圧縮強度と曲げ強度の関係式が作成されている場合は、無視できる程度と考えられる。詳細については、＜参考３＞を参照されたい。

・1)と 3)の事象はそれぞれ独立と考えられるので、これらを併せて考えると、圧縮強度から曲げ強度を推定する際の推定結果の誤差は、±0.3MPa 程度と考えた。よって、圧縮強度から推定される曲げ強度を 0.30MPa 減じた値を用いれば、十分安全側と考えた。なお、強度試験結果の変動係数は、今回検討した範囲では強度によらず概ね一定であったので、曲げ強度が 4.50MPa よりかなり大きいコンクリートでは推定結果の誤差が上記の試算よりも大きくなることが考えられる。しかし、その場合は、舗装コンクリートに必要な強度が得られていることが自明なので、ここでは簡易な確認手法として、強度によらず一定の値を減じてよいものとした。

５．圧縮強度の試験結果から曲げ強度を推定する方法の確認

（１）圧縮強度から曲げ強度を推定する際に用いる関係式は、必要に応じて適切に見直さなければならない。

（２）（３）から（４）の規定に従う場合は、（１）を満たしていると見なす。

（３）使用する材料や使用する骨材の産地を変更した場合は、新たに関係式を作成する。

（４）舗装コンクリートを用いている期間中に、１ヶ月に１回、圧縮強度試験と同時に曲げ強度試験を行い、両者の関係を比較する。その結果、圧縮強度と曲げ強度の関係が変化していると考えられる場合は、新たに関係式を作成する。

（３）について

・使用する材料や骨材によって舗装コンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係が異なる場合があるので、これらを変更した場合は、関係式を見直す必要がある。

（４）について

・骨材の産地を変更しない場合でも、採取する原石山等での採取位置の違いによって品質が変化する場合があることが知られている。したがって、定期的に関係式が適切であることを確認する必要がある。

・関係式の確認方法は、例えば、次の 1)～6)の手順で行なうと良い。

1) 品質管理用の圧縮強度試験用供試体 3 本以上を作製する際に、同時に曲げ強度試験用供試体 3 本以上

を採取する。

2) 供試体の作製方法及び養生方法はJIS A 1132 による。

3) 所定の材齢において、作製した曲げ強度試験用供試体及び圧縮強度試験用供試体の強度を、それぞれJIS A 1106、JIS A 1108 により試験する。

4) 圧縮強度と曲げ強度の関係式（３．参照）を用いて、圧縮強度試験結果から曲げ強度を推定する。

5) 4)で求めた推定曲げ強度と、試験で求めた曲げ強度の差を求める。その絶対値が、推定圧縮強度の 7.5%以上の場合は、圧縮強度と曲げ強度の関係が変化しているものと判断し、関係式を見直す（信頼係数 0.99 として 3 本の供試体による曲げ強度試験結果の平均値を区間推定すると、信頼区間は平均値の±7.4%と推定される。詳細は＜参考２＞参照)。

6) 差の絶対値が 7.5%以下の場合は、圧縮強度と曲げ強度の関係が変化していると直ちには判断できないが、試験結果の傾向を見て、必要に応じて関係式を見直すと良い。特に、推定曲げ強度と曲げ強度の試験結果が 0.30MPa を超える場合や、推定曲げ強度が試験結果よりも常に大きい／小さい場合は、骨材の品質等に変化がないか確認するのが良い。

＜参考１＞フレッシュ性状の違いが圧縮強度と曲げ強度の関係に与える影響

フレッシュ性状の異なるコンクリートで、圧縮強度と曲げ強度の関係を比較できるデータとして、土木研究所で行った実験（土木研究所資料第3427号に収録されている第2実験）の結果を再整理した。

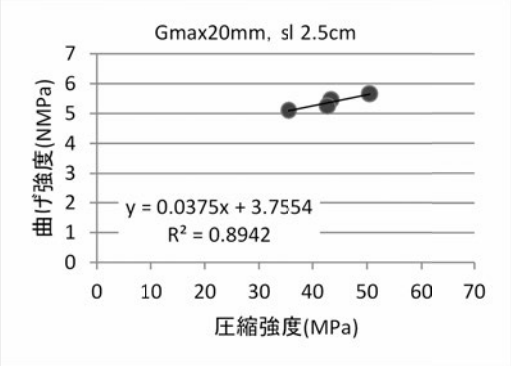
ここで、検討したデータは、合計28組（配合が14通りで、強度試験の材齢が7日または28日）である。コンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法（20mm または 40mm）、目標スランプ（2.5cm、6.5cm、10.5cm）が異なっており、目標スランプに応じて単位水量や単位セメント量、化学混和剤の種類・使用量などが異なる。目標空気量は明記されていなかったが、AE 助剤や消泡剤が用いられていることから、一定の範囲内に制御されているものと推察される。圧縮強度試験及び曲げ強度試験は、それぞれ3本1組の供試体で行われている。

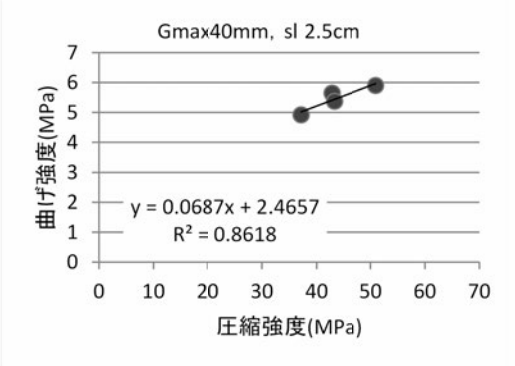
ここで、粗骨材の最大寸法と目標スランプに着目し、圧縮強度と曲げ強度の関係を整理して参考図－１に示す。その結果、目標スランプ2.5cmと10.5cmの場合には、両者の関係が相関係数で0.9（図中の決定係数では0.81）以上か、これに近い値であったのに対し、目標スランプ6.5cmの場合は、両者の関係がやや不明瞭であった。

配合条件を確認したところ、目標スランプ2.5cmの場合は全てがAE減水剤を使用しているのに対し、目標スランプ6.5cmの場合は、AE減水剤を使用したものと高性能AE減水剤を使用したものが同数ずつあり、化学混和剤の違いが圧縮強度と曲げ強度の関係に影響を与えているおそれがあった。

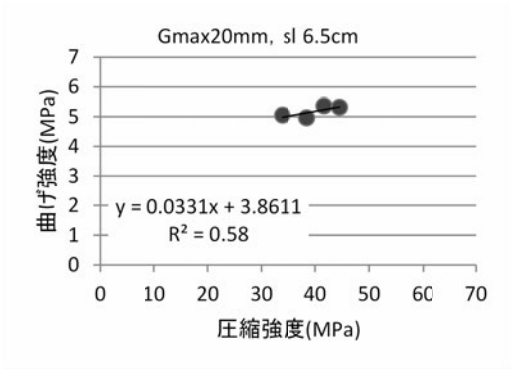
そこで、AE減水剤を使用した目標スランプ2.5cmまたは6.5cmのデータ、高性能AE減水剤を使用した目標スランプ6.5cmまたは10.5cmのデータをそれぞれまとめて参考図－２に示す。この場合は、目標スランプ6.5cmのデータを含めても、目標スランプ2.5cmまたは10.5cm単独で整理した場合と遜色なく整理できた。ただし、AE減水剤を用いた場合について、目標スランプ2.5cmから10.5cmまでの全てのデータを説明しようとすると、相関係数が低下した。

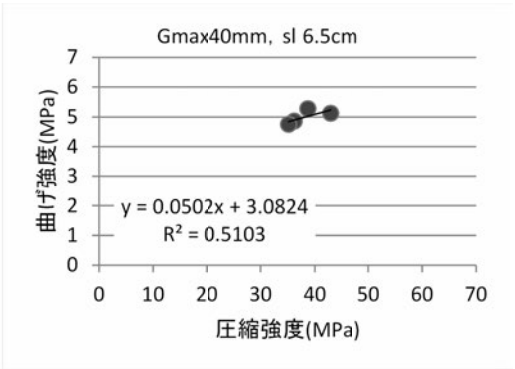
以上の検討から、スランプの違いが圧縮強度と曲げ強度の関係に与える影響は、その違いが4cm程度までの範囲では大きくないと考えることができる。一方で、使用する化学混和剤の種類が異なると、スランプが同じでも関係が異なるおそれがある。



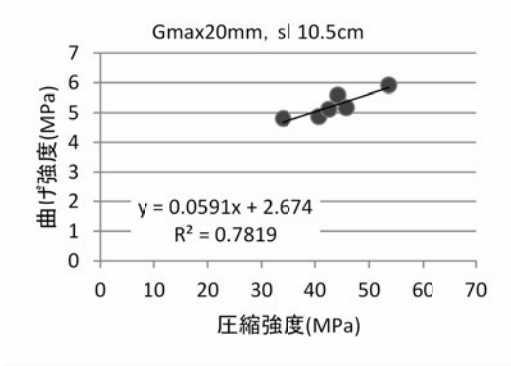


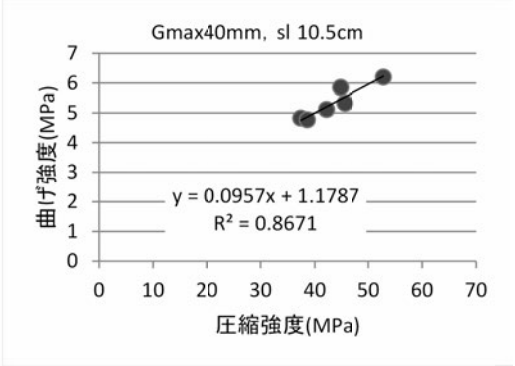
目標スラ ンプ 2.5cm（粗骨材の最大寸法 20mm（左）、40mm（右））





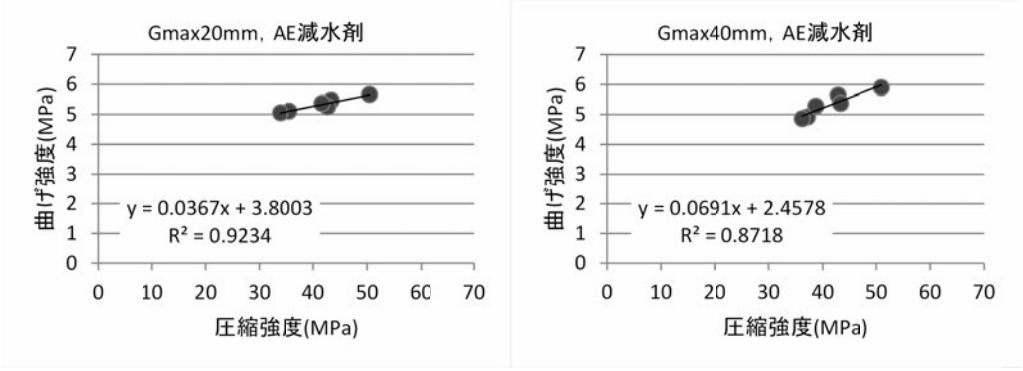
目標スラ ンプ 6.5cm（粗骨材の最大寸法 20mm（左）、40mm（右））



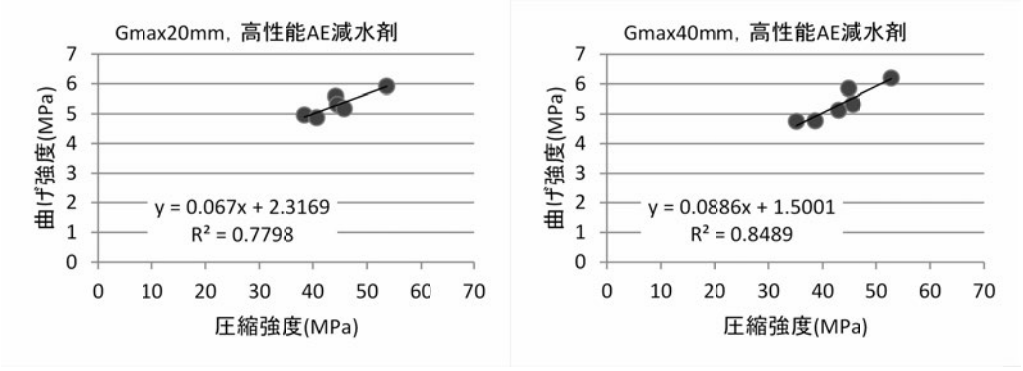


目標スラ プ 10.5cm（粗骨材の最大寸法 20mm（左）、40mm（右））

参考図－１　粗骨材の最大寸法とスランプが異なるコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係



AE 減水剤使用で目標スランプ 2.5 または 6 5cm（粗骨材の最大寸法 20mm（左）、40mm（右））



高性能 AE 減水剤使用で目標スランプ 6.5 :たは 10.5cm（粗骨材の最大寸法 20mm（左）、40mm（右））

参考図－２　使用した化学混和剤が異なるコンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係

＜参考２＞強度試験結果のばらつきについて

舗装コンクリートに関する既往の検討例として、レディーミクストコンクリート工場 10 工場で行われた共同実験（土木研究所資料 3427 号に収録されている共同実験）の結果を再整理した。それによると、同時に作製された供試体の強度試験を 3 本 1 組で行った結果の変動係数の平均値は以下の通りであった。なお、強度のばらつきは、正規分布に従うものと仮定した。

圧縮強度の変動係数　3.2%（実験ケース数 120 の平均値）

曲げ強度の変動係数　4.9%（実験ケース数 120 の平均値）

※強度試験結果の変動係数には水セメント比（50.0%、42.1%、36.4%）の違いによる影響は明確には認められなかった。

※粗骨材の最大寸法は 40mm で、スランプ 2.5cm±1.0%、空気量 4.5%±0.5%であった。

これらの結果から、同時に作製された供試体を試験したときの強度試験結果そのもののばらつき（その要因としては、荷重の読み取りの誤差、供試体寸法の測定誤差などが考えられる）は変動係数で、次の程度であると仮定してよいものと考える。

圧縮強度の変動係数　3.50%（実績に基づく仮定値）

曲げ強度の変動係数　5.00%（実績に基づく仮定値）

ここで、

圧縮強度の平均値が 40.0MPa

曲げ強度の平均値が 5.00MPa

であったと仮定する。

このときｎ本の供試体を作製して、強度試験を行なう場合の信頼区間は以下の式で表される。

$$\overline{X} - Z_{\alpha/2} \cdot \sigma / \sqrt{n}, \overline{X} + Z_{\alpha/2} \cdot \sigma / \sqrt{n}$$

ここで信頼係数 0.95 として、信頼区間の大きさを具体的に求めると、圧縮強度については供試体が

3 本のとき　　1.96×（40.0×0.0350／√3）＝1.58　から±1.6MPa

6 本のとき　　1.96×（40.0×0.0350／√6）＝1.12　から±1.1MPa

9 本のとき　　1.96×（40.0×0.0350／√9）＝0.91　から±0.9MPa

となる。供試体を増やすと信頼区間が減少するが、その効果は供試体数の増加とともに低減すること、圧縮強度で±1.1MPa の変動は、曲げ強度に換算すると±0.1MPa 程度と小さいことから、供試体数としては 6 本程度でも十分と考えた。

次に、曲げ強度の信頼区間については供試体が

3 本のとき　　1.96×（5.00×0.0500／√3）＝0.283　から±0.28MPa

6 本のとき　　1.96×（5.00×0.0500／√6）＝0.200　から±0.20MPa

9 本のとき　　1.96×（5.00×0.0500／√9）＝0.163　から±0.16MPa

となる。曲げ強度の方が圧縮強度よりも強度試験結果のばらつきが大きいので信頼区間の幅も大きくなる。

なお、信頼係数を 0.99 として曲げ強度の信頼区間を求めると、供試体が

3 本のとき　　2.58×（5.00×0.0500／√3）＝0.372　から±0.37MPa

となり、曲げ強度の 7.4%である。この値は、関係式の適否を検討する際に参考にする。

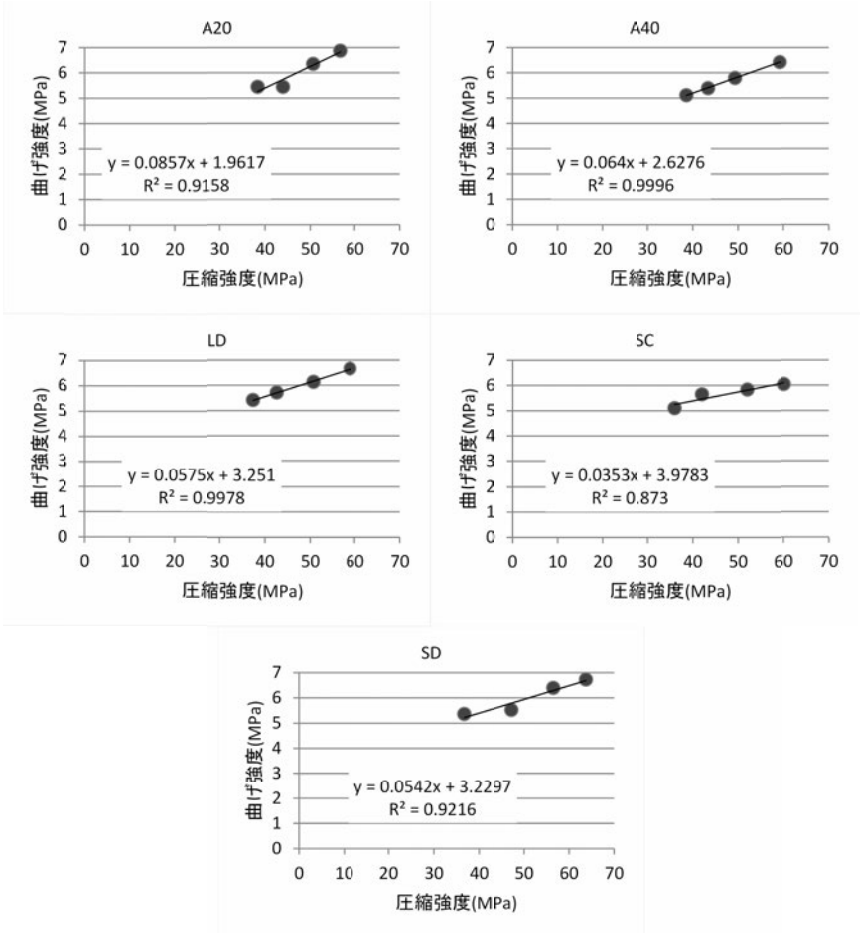
＜参考３＞圧縮強度から曲げ強度を推定する際の不確かさに関する検討

舗装コンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係について、粗骨材の異なる 5 種類のコンクリートの試験結果（共同研究報告書 477 号に収録）を用いて検討した。粗骨材ごとに、水セメント比が 40、45、50、55%と異なる配合のコンクリートが作製されている。粗骨材の最大寸法は 1 種類（40mm）を除き 20mm である。

曲げ強度試験は 150×150×530mm の供試体で行われ、供試体数は 3 本である。圧縮強度試験はφ125×250mm の供試体で行なわれ、供試体数は 3 本である。

試験結果から、骨材ごとに曲げ強度と圧縮強度の関係を図示すると、参考図－３の通りであった。

ここで、骨材ごとに圧縮強度から曲げ強度を推定する際の推定値の標準誤差を求めると 0.01～0.25MPa であった。この標準誤差には、圧縮強度から曲げ強度を推定することに起因する誤差と 3 本 1 組で行った曲げ強度試験結果の誤差が含まれるが、その大きさは＜参考２＞で検討した曲げ強度試験結果の不確かさと大差なかった。したがって、圧縮強度から曲げ強度を推定することの不確かさについては、実用上これを無視できる程度と考えた。



参考図－３　圧縮強度と曲げ強度の関係の検討

5．まとめ

本研究は、コンクリート舗装の普及を図るため、要求性能を整理して性能規定化を図ることにより高い耐久性を確保できるように品質管理試験を提案すること、また、資源の有効利用などの観点からスラグ骨材、石灰石骨材の利用技術を確立することを目的に各種検討を行なった。その結果、スラグ骨材、石灰石骨材利用上の留意点、提案した品質管理試験などまとめると、次のとおりとなった。

5.1 粗骨材の種類に関する留意点

スラグ骨材、石灰石骨材を舗装コンクリートに適用するにあたっての長所と短所、短所に対する留意点をまとめると**表 5.1.1** のとおりである。両骨材とも、配合、曲げ強度、弾性係数、曲げ疲労強度などに及ぼす影響については、砂利、砕石などの天然骨材と同様である。また、乾燥収縮が小さいなど、長所も多い。石灰石は線膨張係数が小さいので、温度応力に対して有利である。

一方で、舗装コンクリートに適用する場合、コンクリート舗装版がそのまま車両が通行する路面となるため、すり減り抵抗性、すべり抵抗性が求められる。また、気象作用などに対する抵抗性も求められることから、**表 5.1.1** のように留意すべき点がある。

表 5.1.1 スラグ骨材、石灰石骨材の舗装コンクリートへの適用にあたっての長所、短所、留意点

粗骨材	長　　所	短　　所	留 意 点
スラグ骨材	・収縮が小さい ・スケーリング抵抗性が高い	・すり減り抵抗性の小さいものがある	・路面（表層部）に適用する場合、すべり抵抗性などに注意しながら水セメント比を小さくするなどの対策をとる ・コンポジット舗装などに適用し、路面（表層部）に適用しなければ、問題ない
		・吸水率の大きいものは凍結融解抵抗性が低下する	
		・密度の大きいものは材料分離しやすい	・単位粗骨材かさ容積、スランプ、締固め時間などの制限が必要
石灰石骨材	・収縮が小さい ・線膨張係数が小さい	・すべり抵抗性が小さいものがある ・すり減り抵抗性が小さい	・すべりについては、細骨材に石灰石砕砂以外を用いるなど適正に選定すれば、すべり抵抗性を確保できる可能性がある（長期供用後のすべり抵抗性については検討が必要） ・コンポジット舗装などに適用し、路面（表層部）に適用しなければ、問題ない

5.2 粗骨材の最大寸法について

舗装コンクリートに用いられる粗骨材の最大寸法については、単位水量を減らすために最大寸法 40mm のものがよく用いられているが、最近は良質な最大寸法 40mm の粗骨材が枯渇してきていること、単位水量を減らすことができるものの材料分離抵抗性が低下するなど、必ずしも良いことばかりではない。それに対し、最大寸法 20mm または 25mm は、40mm よりも単位水量は増えるものの、曲げ強度が得られやすい（第 1 報または本報 **4.3.2 項**参照）、材料分離抵抗性が大きくなる、単位水量が増えるので乾燥収縮は増えるものの、

伸び能力は増加し、ひび割れを生じにくいなどの長所もあり[1)]、最大寸法 40mm に限定する必要はないと考えられる[2)]。

5.3 舗装コンクリートの施工性について

舗装コンクリートは、一般にはスランプ 2.5cm のものが使用され、ダンプトラックによって運搬されている。しかし、施工条件などからスランプ 2.5cm では施工できない場合がある。例えば、ダンプトラックで荷卸しするには、ダンプアップが必要であるが、トンネル内ではダンプアップできない場合がある。文献 2)では、施工条件に応じてスランプ 3～8cm が示されている。スランプを大きくした場合に、材料分離や勾配が大きい道路では、表面仕上げ後の表面の変形（ダレ）の心配がある。このような場合を想定し、材料分離抵抗性試験、ダレ試験を提案した。

5.4 評価試験方法の提案

舗装コンクリートの要求性能から必要と考えられる評価試験方法、または現在実施されている試験方法に問題があり、変えたほうが良いと考えられる試験方法は**表 5.4.1** のとおりである。

表 5.4.1 コンクリートの性能・粗骨材の品質評価試験

項目	舗装コンクリートに求められる性能など			コンクリート		粗骨材	
				現在実施されている試験方法	追加・提案する試験方法	現在実施されている試験方法	追加・提案する試験方法
フレッシュコンクリート	施工性（ワーカビリティー）		締固め・充填性	便覧 B046 JSCE-F 501 振動台式コンシステンシー試験	フローテーブルによる締固め性・変形性試験	ふるい分け試験 微粒分量試験 単位容積質量及び実積率試験 吸水率試験	－
			ダレ抵抗性	なし	ダレ試験		
			材料分離抵抗性	なし	材料分離試験	密度試験	－
硬化コンクリート	設計用値	強度特性	弾性係数	JIS A1149 圧縮試験による弾性係数試験	曲げ試験による弾性係数試験	なし	破砕値試験
		体積変化	長さ変化	JIS A 1148 長さ変化試験	－	なし	粗骨材の乾燥収縮率試験
	走行安全性		すべり抵抗性	便覧 S021 すべり試験	ラベリング試験機を用いたすべり試験	すべり（PSV）試験	－
			すり減り抵抗性	便覧 B002 ラベリング試験	－	ロサンゼルス試験機によるすりへり試験	破砕値試験
	耐久性		凍結融解抵抗性 スケーリング抵抗性	JIS A 1148 凍結融解試験	スケーリング試験	吸水率試験 安定性試験	粗骨材の凍結融解試験
	強度の管理・検査の合理化			JIS A1106 曲げ強度試験	圧縮強度試験による管理・検査	－	－

便覧：舗装調査・試験法便覧　　JSCE：土木学会規準　　JCI：日本コンクリート工学会規準

今回の検討の結果、例えば、粗骨材のすり減り抵抗性を評価する試験方法については、スラグ骨材や石灰石骨材を用いた場合でも、すりへり試験によって舗装用コンクリートとした場合のすり減り抵抗性を評価できることが明らかとなった。

ただし、従来から行われているロサンゼルス試験機によるすりへり試験は、比較的大きな試験機を要し、試料の調整にかかる労力が大きく、また、骨材の粒度によって試料の粒度区分が異なるため、試料間の相対比較が行なえないなどの問題があった。労力の少ない破砕値試験でもすり減り抵抗性を適切に評価できることが明らかとなったことから、破砕値試験を代替試験方法として提案した。

また、スラグ系骨材、特に密度の大きな電気炉酸化スラグ粗骨材を用いる場合は、粗骨材沈下による材料分離が懸念されるため、材料分離抵抗性を評価・管理できる材料分離試験も提案した。

5.5 舗装コンクリートの強度の管理・検査について

舗装コンクリートの強度の管理・検査は、通常、曲げ強度で行われているが、曲げ強度試験は供試体が 50～60kg になるなど労力が大きく、型枠や適した試験機を保有するプラントの減少など、課題があることから、圧縮強度または引張強度による日常的な管理・検査が望まれている。

コンクリート舗装の基準類には、圧縮または引張強度を用いる場合の管理基準、判定基準が示されていない。また、舗装設計施工指針以前に使用されていたセメントコンクリート舗装要綱には、圧縮強度を管理に用いる場合、曲げ強度と圧縮強度の関係を線形回帰し、圧縮強度をその標準偏差だけ増加させた値を管理に用いる方法が示されていたが、曲げ強度と圧縮強度の試験結果を多数組用意できない場合は、推定した標準偏差の大きさが適当か信頼性に懸念があった。

そこで、多数回の試験結果が収録されている既往の調査結果[3),第3報]から舗装コンクリートの圧縮強度や曲げ強度の試験結果のばらつきを分析し、避けられない誤差の程度を明らかにして舗装コンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係を得るための試験の条件等を定めた。これらの結果を整理して、「舗装コンクリートの圧縮強度による強度管理を行なう場合の考え方（案）」としてまとめた。

5 章の参考文献

1) 森濱和正、河野広隆、源厚：舗装用コンクリートの諸特性に関する検討、セメント・コンクリート論文集、No.50、pp.256-261、1996.12

2) (公社)日本道路協会：コンクリート舗装ガイドブック、pp.96-105、2016.3

3) 河野広隆、森濱和正：舗装用コンクリートの品質に関する調査，土木研究所資料第 3427 号、1996.2

第 3 報 (国研)土木研究所、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)：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 (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、共同研究報告書第 477 号、2016.1

６．関連発表リスト

【2013 年度】

1) 森濱　和正、島崎　泰、瀧波　勇人、石田　征男：石灰石骨材を用いた舗装コンクリートの配合に関する検討、第 67 回セメント技術大会講演要旨、pp.86-87、2013.5
2) 森濱　和正、渡辺　博志、石田　征男、瀧波　勇人：粗骨材の最大寸法 20mm，スランプ 5cm の舗装コンクリートの配合に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.1363-1368、2013.7
3) 森濱　和正、島崎　泰、石田　征男：舗装コンクリートに使用する各種骨材の試験結果、土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部、pp.915-916、2013.9
4) 勝畑　俊幸、森濱　和正、石田　征男、瀧波　勇人：各種スラグ粗骨材を用いた舗装コンクリートの配合に関する検討、土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部、pp.917-918、2013.9
5) 瀧波　勇人、森濱　和正、小梁川　雅、石田　征男：各種粗骨材を用いた舗装コンクリートの曲げおよび圧縮強度試験結果、土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部、pp.919-920、2013.9
6) 森濱　和正、小梁川　雅、島崎　泰、石田　征男、瀧波　勇人：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
7) (独)土木研究所、(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)：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　(1)骨材試験、コンクリートの配合および強度試験、共同研究報告書第 455 号、2014.3

【2014 年度】

1) 森濱　和正、渡辺　博志、勝畑　俊幸：スラグ粗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要旨、pp.70-71、2014.5
2) 森濱　和正、勝畑　俊幸、加藤　学、常松　直志：スラグ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 68 回セメント技術大会講演要旨、pp.72-73、2014.5
3) 森濱　和正、勝畑　俊幸、加藤　学、常松　直志：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
4) 石田　征男、梶尾　聡、森濱　和正、勝畑　俊幸、中原　大磯：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、土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部、pp.991-992、2014.9
5) 常松　直志、森濱　和正、勝畑　俊幸、加藤　学、石田　征男、瀧波　勇人：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、土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部、pp.1163-1164、2014.9
6) 森濱　和正、勝畑　俊幸：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、土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部、pp.1165-1166、2014.9
7) 瀧波　勇人、森濱　和正、吉本　徹、勝畑　俊幸：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検討、土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部、pp.1167-1168、2014.9

8) 瀧波　勇人、小梁川　雅、森濱　和正、常松　直志、石田　征男：各種粗骨材を用いた舗装コンクリートの強度特性及び耐摩耗性に関する研究、土木学会論文集 E1（舗装工学）、Vol.70、No.3、pp. Ⅰ_107- Ⅰ_113、2014.12
9) 渡辺　博志、森濱　和正、勝畑　敏幸：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、Vol.57、No.3、pp.50-51、2015.3
10) (独)土木研究所、(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)：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、2015.3

【2015 年度】

1) 森濱　和正、勝畑　敏幸、石田　征男、常松　直志：スラグ粗骨材を用いた舗装コンクリートの特性、舗装、Vol.50、No.5、pp.17-21、2015.5
2) 森濱　和正、勝畑　敏幸、渡辺　博志：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要旨、pp.198-199、2015.5
3) 常松　直志、森濱　和正、勝畑　敏幸、加藤　学、石田　征男、瀧波　勇人：各種粗骨材を用いた舗装コンクリートの耐摩耗性に関する検討、土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集、第Ⅴ部、pp.727-728、2015.9
4) 加藤　学、常松　直志、森濱　和正：各種粗骨材を用いた舗装コンクリートのすべ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
5) 森濱　和正、加藤　祐哉、古賀　裕久：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
6) (国研)土木研究所、(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)：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　(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、共同研究報告書第 477 号、2016.1
7) 加藤　学、常松　直志、中原　大磯、森濱　和正：各種粗骨材を用いた舗装コンクリートの摩耗抵抗性に関する研究、舗装、Vol.51、No.3、pp.19-23、2016.3
8) (国研)土木研究所、(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)：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、2016.3

【2016 年度】

1) 加藤　祐哉、森濱　和正、古賀　裕久、勝畑　敏幸：粗骨材の異なる舗装コンクリートのスケーリングに関する検討、第 70 回セメント技術大会講演要旨、pp.200-201、2016.5
2) 森濱　和正、古賀　裕久：舗装コンクリートの圧縮強度による管理・検査に関する考察、第 70 回セメン

ト技術大会講演要旨、pp.204-205、2016.5
3) 加藤　祐哉、森濱　和正、古賀　裕久、勝畑　敏幸：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、第 38 回コンクリート工学年次論文集、Vol.38、pp.1665-1670、2016.7
4) 森濱　和正、加藤　祐哉、古賀　裕久：スラグ骨材を用いた舗装用コンクリートの特性、建設機械施工、Vol.68、No.7、投稿中、2016.7
5) 加藤　祐哉、森濱　和正、古賀　裕久、勝畑　敏幸：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、第 V 部、投稿中、2016.9
6) 森濱　和正、加藤　祐哉、勝畑　敏幸、古賀　裕久：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、第 V 部、投稿中、2016.9

共同研究参加者名簿

機　関	氏　　名	所属・役職	参加期間
(国研)土木研究所	渡辺　博志	材料資源研究グループ　グループ長	2012.4～16.3
	古賀　裕久	材料資源研究グループ　上席研究員	2015.4～16.3
	森濱　和正	材料資源研究グループ　総括主任研究員	2012.4～16.3
	加藤　祐哉	材料資源研究グループ　研究員	2015.4～16.3
	勝畑　敏幸	材料資源研究グループ 基礎材料チーム 交流研究員（BASF ジャパン(株)）	2013.1～14.12
(学)東京農業大学	小梁川　雅	地域環境科学部 生産環境工学科 教授	2012.4～16.3
(一社)セメント協会舗装技術専門委員会	小梁川　雅	東京農業大学 地域環境科学部 生産環境工学科 教授	2012.4～16.3
	小林　哲夫	住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 副所長	2012.4～16.3
	上野　　敦	首都大学東京 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 土木材料研究室 准教授	2012.4～16.3
	高橋　茂樹	(株)高速道路総合技術研究所 道後研究部 舗装研究室 室長	2015.4～16.3
	佐藤　正和	(株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 舗装研究室 室長	2012.4～15.3
	辻井　　豪	大成ロテック(株) 事業本部 技術研究所 参事	2012.4～16.3
	白井　　悠	(株)NIPPO　総合技術部　技術研究所　研究第二グループ 副主任研究員	2013.5～16.3
	石垣　　勉	(株)NIPPO 研究開発本部 技術研究所 研究第一グループ 主任研究員	2012.4～13.4
	伊藤　清志	鹿島道路(株) 生産技術本部 技術部 技術課 係長	2012.4～16.3
	入江　一次	全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所	2015.4～16.3
	原田　修輔	全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所　所長	2014.8～15.3
	辻本　一志	全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所 主席研究員	2012.4～14.7
	吉田 浩一郎	宇部興産(株) 建設資材カンパニー 技術開発研究所 コンクリート開発部コンクリート開発グループ 主席部員	2012.4～16.3
	玉野　茂昭	(株)トクヤマ セメント企画グループ	2012.4～16.3
	石田　征男	太平洋セメント(株) 中央研究所 第 2 研究部 コンクリート舗装技術チーム　主任研究員	2014.4～16.3
	梶尾　　聡	太平洋セメント(株) 中央研究所 第 2 研究部 コンクリート舗装技術チーム　リーダー	2012.4～14.3
	中山　英明	三菱マテリアル(株) セメント事業カンパニー 生産部 セメント研究所 コンクリートグループ グループリーダー	2014.9～16.3
	高尾　　昇	三菱マテリアル(株) セメント事業カンパニー 生産部 セメント研究所 コンクリートグループ 主任研究員	2012.4～14.10
(一社)セメント協会研究所	佐藤　智泰	コンクリート研究グループ グループリーダー	2012.4～16.3
	吉本　　徹	コンクリート研究グループ サブグループリーダー	2012.4～16.3
	島崎　　泰	コンクリート研究グループ サブグループリーダー	2012.4～16.3
	瀧波　勇人	コンクリート研究グループ 研究員	2013.4～16.3

太平洋セメント(株)	梶尾　聡	中央研究所 第2研究部 コンクリート舗装技術チーム リーダー	2012.4～16.3
	石田　征男	中央研究所 第2研究部 コンクリート舗装技術チーム 主任研究員	2012.4～16.3
	岸良　竜	中央研究所 第2研究部 コンクリート舗装技術チーム 副主任研究員	2012.4～16.3
	松本　健一	中央研究所 第2研究部 コンクリート舗装技術チーム 副主任研究員	2012.4～15.3
日本道路(株)	中原　大磯	技術研究所 第一研究室長	2012.4～16.3
	加藤　学	技術研究所 主任研究員	2013.4～16.3
	常松　直志	技術研究所 副主任研究員	2013.4～16.3

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No. 483　March 2016

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305－8516 茨城県つくば市南原1－6 電話029－879－6754