

コンクリート再生骨材も舗装への活用に関する研究

APPLICABILITY OF CEMENT AND ASPHALT CONCRETE
WITH RECYCLED AGGREGATE TO THE PAVEMENT

小林良太*・浜田純夫**

by Ryota KOBAYASHI and Sumio HAMADA

1. はじめに

わが国では、住宅をはじめとする構築物や社会資本が更新期に差し掛かっており、今後とも建設副産物の排出量の増大が予想されている。そのため、社会・経済の変化を先取りし、建設事業における環境創造や地球環境問題の解決を推進するために「建設副産物対策行動計画（リサイクルプラン21）」が平成6年に策定された。リサイクルプラン21では、平成12年度（2000年度）の建設副産物・廃棄物合計のリサイクル率として80%を目標に掲げており、発注者と受注者が一体となってその目標達成に向けて取り組んでいるが、残された時間はわずかである。

表1¹⁾は、各種建設副産物・廃棄物の搬出状況とリサイクルプラン21の目標達成状況を示したものであるが、目標達成状況は副産物の種類によって大きく異なっている。表から、コンクリート塊およびアスファルト塊に着目してみると、1990年度で約40%であった再利用率が1995年度には65%と81%になり、これらの分野ではリサイクル市場は順調に整備されつつあるようにみえる。ところが、コンクリート塊のリサイクルの実態は、アスファルト塊の多くがアスファルト混合物に再生利用されているのに比べ、ほとんどが路盤材、裏込め材、埋戻し材としての再利用であり、有効にリサイクルされているとはいえず、より付加価値の高い用途開発が広く望まれているのが現状である。

コンクリート塊の道路での高付加価値なリサイクルとしては、舗装用コンクリートあるいはアスファルト混合物の骨材への利用があげられる。しかし、一般にコンクリート塊より製造したコンクリート再生骨材（以下、再生骨材）は骨材表面に多量のモルタルが付着しているために、これをそのまま用いると混合物の品質性状に悪影響をおよぼすことが懸念

表1 建設副産物・廃棄物の再利用率¹⁾（単位：%）

種類	1990(実績)	1995(実績)	2000(目標)
建設廃棄物全体	42	58	80
アスファルト塊	50	81	90
コンクリート塊	48	65	90
建設汚泥	21	14	35
建設混合廃棄物	31	11	50
建設発生木材	56	40	90
建設発生土	36	32	70

表2 コンクリート再生骨材の性状

項目	1種再生骨材		2種再生骨材	
	20~5mm	5~0mm	20~5mm	5~0mm
絶乾比重	2.46	2.18	2.38	2.15
吸水率(%)	2.99	7.56	4.07	8.76
安定性(%)	5.8	7.0	14.9	9.7
すりへり減量(%)	19.0	—	22.2	—
塊付着量(%)	16.8	—	23.5	—
アスコン混入率(%)	6.5	—	9.2	—
粗粒率	—	3.37	—	3.19

されている。さらに、再生骨材のような使用実績の乏しい骨材を舗装用コンクリートやアスファルト混合物へ使用するためには、その特性を明確にしておくことが不可欠である。

そこで筆者らは、コンクリート塊からモルタル付着量の少ない良好な性状の再生骨材を製造し、これを骨材として使用した舗装用コンクリートとアスファルト混合物の特性について研究を行い、両者の舗装への適用性を検討した。本文は、これらの研究の中から、再生骨材を使用した舗装用コンクリートの曲げ疲労特性に関する研究結果とアスファルト混合物への適用に関する研究結果を報告するものである。

2. 再生骨材の性状

表2は、使用した再生骨材の性状を示したものである。この再生骨材は、建設副産物として発生したコンクリート塊にジョークラッシュとインパクトクラッシュによる一般的な一次・二次再生処理を施し

*前田道路(株)技術研究所 試験研究室長
(〒243-0414 神奈川県海老名市杉久保279)

**山口大学教授 工学部社会建設工学科
(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2557)

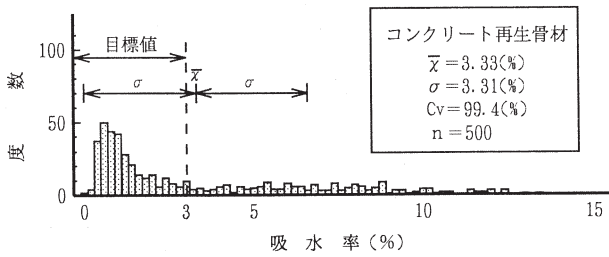


図1 コンクリート再生骨材の吸水率のばらつき
(骨材粒径: 20~13mm)

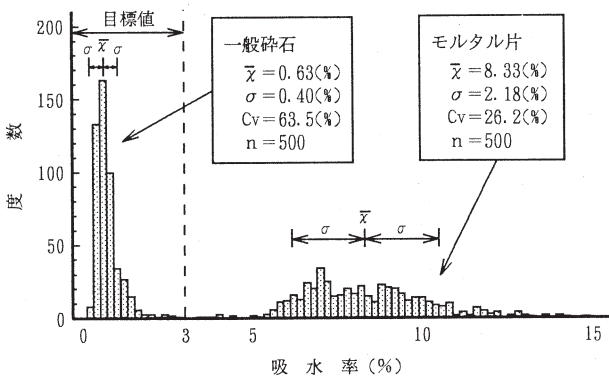


図2 一般砕石とモルタルの吸水率のばらつき
(骨材粒径: 20~13mm)

た後、さらに粗骨材からモルタル分を除去するために三次処理として実験用処理機（軟石除去機）による骨材同士のみみ合わせ作用を加えて製造したものである。しかしながら、再生骨材の周囲には除去できなかったモルタル分が付着しているため、その比重は一般の骨材よりも小さく吸水率は大きくなっている。また、不特定多数の建設副産物を原材料としているため、アスファルトコンクリート片等の異物が若干混入している。

建設省は、品質により再生粗骨材を3種類、再生細骨材を2種類に区分した使用基準(案)²⁾を公表している。今回使用した再生粗骨材の品質は、基準(案)の中で最も品質が良いとされている1種と中間的な品質である2種に相当している。

一方、再生細骨材は、1種および2種の再生粗骨材製造時に得られたものをそのまま1種および2種の再生細骨材と称したものであるが、品質で区分すれば両者とも2種に相当するものである。

再生骨材はコンクリート塊を原材料としているため、その性状のばらつきは一般骨材よりも大きい。図1と図2は、再生粗骨材と一般砕石およびモルタル片について代表的な試料を各々500個サンプリングして、個々の骨材について吸水率を測定した結果

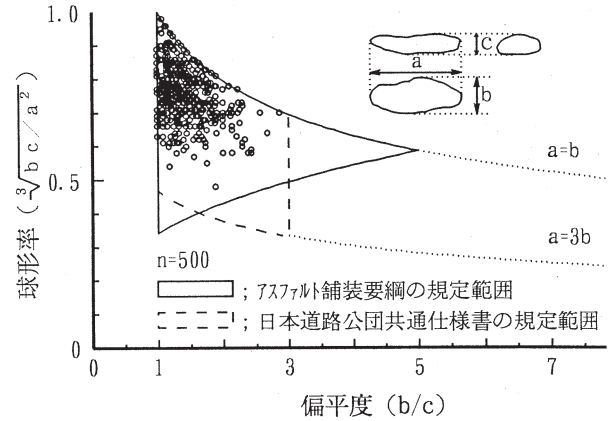


図3 コンクリート再生骨材の形状のばらつき
(骨材粒径: 20~13mm)

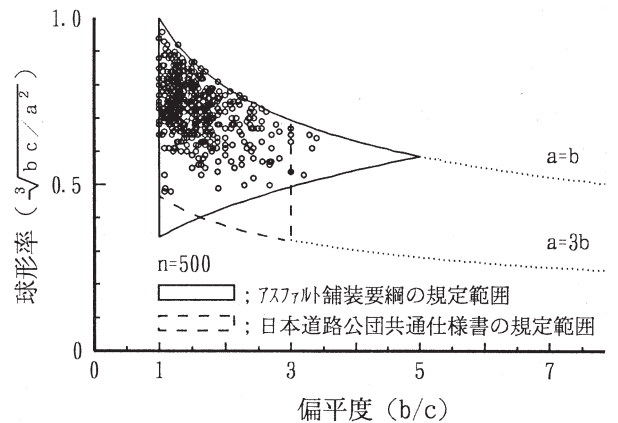


図4 一般砕石の形状のばらつき
(骨材粒径: 20~13mm)

のばらつきを示したものである。一般砕石は八王子産の硬質砂岩であり、モルタル片は再生骨材中から目視により選別したものである。これらの図からわかるように、再生骨材の吸水率は、一般砕石の領域からモルタル片の領域まで幅広くばらついている。このことは、個々の再生骨材に付着しているモルタルの量がそれぞれ異なっていることを示しており、再生骨材を使用した混合物の品質のばらつきにも影響をおよぼすことが懸念される。

一方、図3と図4は、同様試料について Heywood の偏平度³⁾とKrumbein の球形率⁴⁾を用い、個々の骨材形状を測定した結果のばらつきを示したものである。図中には、舗装用砕石の有害骨材粒形に関するアスファルト舗装要綱と日本道路公団土木工事共通仕様書の2種類の規定範囲も示している。再生骨材の形状は、一般砕石よりも製造時における処理過程が多いためにばらつきが少なく立方体に近い形状を示しており、2種類の規定を十分に満足している。

着目してみると、使用骨材が一般骨材から1種再生骨材さらに2種再生骨材に代わり、骨材に付着しているモルタル量が増加すると、S-N曲線は傾きが減少しながら全体的に低下している。この結果より、再生骨材を用いたコンクリート版の疲労強度は骨材に付着しているモルタルの影響を受けて低下するものと推測される。

一方、1種再生骨材を用いたNCとRCCのS-N曲線に着目すると、両者はほぼ一致しているが200万回疲労強度でみればRCCの方がわずかに低い。同様に一般骨材使用の場合もRCCの方が低いことから、骨材の種類が同一の場合、RCCの疲労強度はNCのそれと比較すれば同等かあるいは小さくなると推測される。

(2) 版厚の設計

これまで検討してきた各種コンクリートを用いた舗装版について版厚の比較を試みる。アスファルト舗装要綱では、表4に示すように、舗装の構造設計に用いる設計交通量を大型車交通量により5段階に区分しているが、このうちのA、B、C交通を検討対象とした。版厚設計の際に使用するS-N曲線としては、 $P(N)=0.98$ のS-N曲線を採用し、設計条件および交通条件⁷⁾は標準的なものを用いた。

版厚の選定では、数種類の版厚について20年間の輪荷重応力と温度応力の合成応力を算出しこれに対する疲労抵抗をそれぞれのS-N曲線より求め、疲労抵抗の合計が0.4~0.6になるような版厚を求めた。

表5は、以上のようにして求めた各種コンクリート舗装版の版厚を示したものである。表からわかるように、NC版の場合においては交通量区分の違いにかかわらず、使用骨材が一般骨材から1種再生骨材さらに2種再生骨材に変わるにより、版厚はそれぞれ3~5cm増加している。NCとRCCを比較すると各交通量においてRCCの版厚の方が一般骨材で5~8cm、1種再生骨材で1~2cm厚くなっている。

コンクリート舗装において30cm以上の版厚を採用することは一般的でないことから、本結果によれば1種再生骨材はNCの場合にB交通以下、RCCの場合にA交通以下の場所に適用すべきであり、2種再生骨材はNCの場合にA交通よりも交通量の少ない場所に適用するのが妥当であろう。

4. 再生骨材のアスファルト混合物への利用

4.1 背景

再生骨材は、これまでアスファルト混合物の骨材として使用された例がほとんどなかった。これは、

表4 設計交通量の区分

設計交通量の区分	大型車交通量(台/日・方向)の範囲	
L交通	100未満	
A交通	100以上	250未満
B交通	250以上	1,000未満
C交通	1,000以上	3,000未満
D交通	3,000以上	

表5 P(N)=0.98 のときのコンクリート舗装版厚(cm)

コンクリート版の種類	使用骨材の種類	交通量区分		
		A交通	B交通	C交通
NC版	一般骨材	22	25	31
	1種再生骨材	26	30	36
	2種再生骨材	31	34	39
RCC版	一般骨材	27	32	40
	1種再生骨材	27	31	38

表面に付着しているモルタルの影響で、再生骨材が表・基層アスファルト混合物用の砕石としては基準値の一部を満足できないことや、鉄輪ローラによる転圧で破砕されやすいためアスファルト舗装に適さないことなどが経験的に知られていたからである。また、これまでは安くて良質な天然骨材が容易に入手可能であったことから、あえてコンクリート塊を再生利用する必然性に欠けていたことも普及しなかった要因の一つとしてあげられる。

ところが、再生処理方法の検討・改善⁹⁾により前述の表2に示したような良質な再生骨材の製造とこれをアスファルト混合物へ適用することが可能であることがわかってきた。さらに、同様の検討が平成4年度から5年間かけて実施された建設省総合技術開発プロジェクト「建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発」⁹⁾においても取り上げられたことから、この用途への再利用にも期待が高まっている。

4-2. 混合物の特性

再生粗骨材と再生細骨材は、それぞれの粒度と性状を考慮すると、粒径20~13mmおよび13~5mmの再生粗骨材は砕石5号および6号の代替品として、また再生細骨材はスクリーニングスの代替品としてアスファルト混合物に適用可能であることが、筆者らの研究^{9),10)}により明らかとなっている。

表6は、最大粒径20mmの密粒度アスファルト混合物において、6号砕石を再生骨材で置換した場合の混合物性状をマーシャル試験結果により示したものである。再生骨材を使用することにより、最適アスファルト量が0~0.1%増加し密度が若干低下しているが、空隙率や安定度等の性状はほぼ同等でアスファルト舗装要綱の基準値を満足している。

3. 再生骨材のコンクリート舗装版への利用

3. 1 検討手法

わが国のコンクリート舗装の設計法は、コンクリート舗装版に交通荷重による応力と温度変化による応力の合成応力が繰返し載荷され、それによって曲げ疲労破壊が生じることを設計原理としたものである。したがって、この設計法においてコンクリート舗装版の曲げ疲労特性はコンクリート舗装の供用寿命を予測する重要な役割を担っており、特に新しい材料を使用したコンクリートの場合はその疲労特性を明確にしておかなければならない。

そこで筆者らは、モルタル付着量の異なる2種類の再生骨材を用いた普通コンクリート（以下、NC）と転圧コンクリート（以下、RCC）について疲労試験を実施するとともに、既存の研究結果^{5), 6)}より一般骨材を使用したNCとRCCの疲労特性を求め、これらを比較検討することにより再生骨材を使用したコンクリートの疲労特性を明らかにした。さらに、得られた疲労曲線を基にしてコンクリート舗装版の版厚の比較を試みた。

3. 2 試験条件

NCとRCCの配合は表3に示したとおりであり、練混ぜバッチごとに静的曲げ強度試験用と曲げ疲労試験用の供試体(15×15×53cm)を作製した。試験における載荷方法はスパンが45cmの3等分2点載荷であり、疲労試験の応力は周波数5Hzの正弦曲線変化である。

疲労試験に先立って練混ぜバッチごとに静的強度を測定し、これを同一バッチから作製した疲労試験用供試体の基準強度とみなして、上限応力を基準強度の80~55%の範囲で6段階に設定して疲労試験を実施した。下限応力は全ての供試体について基準強度の10%とした。

疲労試験における応力は、応力振幅（繰返し応力の上限応力-下限応力）/静的強度)で表示した。また、200万回の繰返し回数で供試体が破壊しない場合は、試験を途中打ち切りとした。

3. 3 試験結果と考察

(1) S-N曲線

図5は、疲労試験結果の代表事例として、NCの疲労曲線（S-N曲線）と全測点についてN軸方向のばらつきを標準偏差σ(S-N)を求め、±1σ(S-N)と±2σ(S-N)の範囲を示したものである。このS-N曲線は、各応力レベルでのデータが疲労現象特有のばらつきを示しているため順序統計量の理論を用いて解析を行い、その結果を基に各応力振幅Sにおける

表3 コンクリートの配合

コンクリートの種類	骨材の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	S	G	Ad1*	Ad2*
NC	1種再生	45.0	41.2	145	322	730	1053	1.61	0.02
	2種再生	41.4	42.8	145	350	746	991	1.40	0.02
RCC	1種再生	27.9	42.0	95	340	793	1170	5.10	—

配合曲げ強度 σ_{b28} : 5.1MPa
 セメントの種類 : 普通ポルトランドセメント, G_{max} : 20 mm
 NCの単位粗骨材容積 : 0.73, スラック : 2.5cm, 空気量 : 4.5%
 * NCの混和剤 Ad1 : AE減水剤, Ad2 : 空気連行剤 (ℓ/m³)
 * RCCの混和剤 Ad1 : 超硬練り用遅延剤 (ℓ/m³)

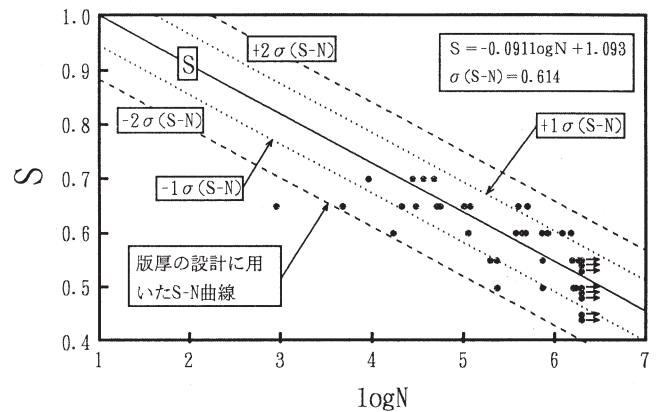


図5 1種再生骨材を使用したNCの疲労寿命のばらつきとS-N曲線

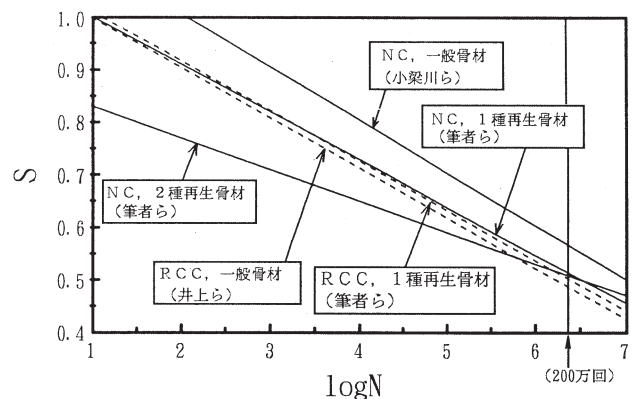


図6 本研究および他研究者のS-N曲線

破壊までの繰返し回数Nのばらつきを対数正規分布関数で近似することによりを求めたものである。なお、全測点の分散を対数正規分布とみなしても差しつかえないので、-1σ(S-N)と-2σ(S-N)の曲線は生存確率P(N)が0.86と0.98のS-N曲線に相当することになる。

図6は、本試験結果とともに小梁川ら⁵⁾および井上ら⁶⁾の研究結果から筆者らの実験条件に近いデータを選定して同様の解析を行い求めた各種コンクリートのS-N曲線を示したものである。図からNCに

表6 アスファルト混合物のマーシャル性状

項目	配合の種類		100% 置換配合	基準値
	標準配合	50% 置換配合		
最適アスファルト量 %	5.0	5.0	5.1	5~7
密度 g/cm ³	2.390	2.385	2.370	—
空隙率 %	3.6	3.5	3.5	3~6
飽和度 %	76	77	77	70~85
安定度 kN	10.29	10.49	10.29	7.35以上
フロー値 1/100cm	27	26	26	20~40

さらに、耐流動性やひびわれ抵抗性および摩耗抵抗性についても試験を行ったが、通常混合物と同程度の結果が得られたことから、当該混合物は室内性状においては舗装へ適用可能であることが確認できた。

4-3. 実用化に向けての検証

本工法の実用化を図るうえでは、現場における検証が不可欠である。そこで、室内試験と同等品質の再生骨材を実際の破砕プラントで製造した。写真1は再生骨材の三次処理に使用した軟石除去機である。

さらに、再生骨材を使用した混合物のアスファルトプラントにおける製造方法について検討を行い、骨材が十分に濡れた状態では乾燥させるのに注意を払う必要があるものの、それ以外では通常混合物と全く同様に製造可能であることを明らかにした。

以上のことを踏まえて、千葉県内の2箇所の一般道で試験舗装を実施し、当該混合物を通常のアスファルト混合物と同様にアスファルトフィニッシャーで敷きならし、鉄輪ローラおよびタイヤローラで締め固めた。その結果、98%以上の締め固め度が得られ、当該混合物の施工性に関しては何ら問題のないことを確認した。これらの現場は追跡調査中であり供用開始後1年以上が経過しているが、現在まで通常混合物と全く同様の供用性状を示している。

5. あとがき

以上述べてきたように、モルタルをある程度まで除去した再生骨材は、舗装用のコンクリートやアスファルト混合物の骨材として十分適用可能であることがわかってきた。

コンクリート副産物は、一般に不特定であるため、これから製造した再生骨材を使用した混合物の品質変動は、一般砕石を使用した場合よりも当然大きいものとなる。本工法の実用化を図るには、品質変動の解析結果を取り入れた設計法や管理手法の確立が不可欠であるため、現在、これらのデータを蓄積しているところである。その結果についても、機会が

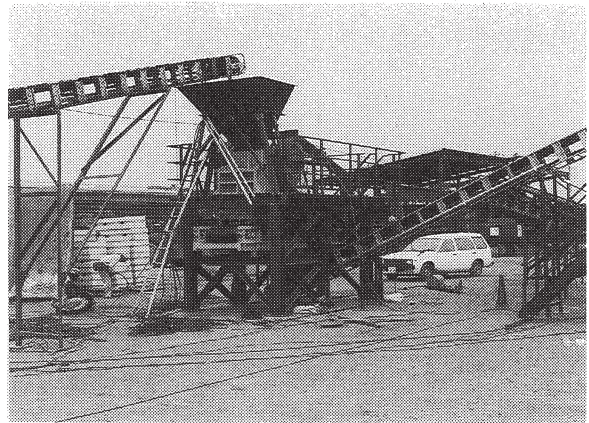


写真1 再生骨材の三次処理に使用した軟石除去機

あれば報告したいと考えている。

参考文献

- 1) 榎野紀元：産業副産物による負荷軽減，コンクリート工学，Vol. 36, No. 3, pp. 26~27, (1998)
- 2) 河野広隆：再生骨材，セメント・コンクリート，No. 618, PP. 64~69, (1998. 8)
- 3) 井伊谷鋼一：粉体工学ハンドブック，朝倉書店，pp. 55
- 4) 岡田 清，六車 熙：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp. 99
- 5) 小梁川 雅，国府勝郎，福田 正：コンクリート舗装版の曲げ疲労に関する基礎的研究，土木学会論文集，第372号/V 5, pp. 131~137, (1986)
- 6) 井上武美，尾本志展：転圧コンクリートの疲労，第42回セメント技術年報，pp. 543~546, (1988)
- 7) 建設省土木研究所道路部舗装研究室：車両重量調査結果の解析（その4），土木研究所資料第3321号，(1995)
- 8) 傳田喜八郎，小林良太，越健太郎：コンクリート再生骨材のモルタル除去装置－良好なコンクリート再生骨材の製造方法と舗装への適用について－，建設機械，Vol. 34, No. 6, pp. 21~24, (1998)
- 9) 建設省土木研究所コンクリート研究室・（財）先端建設技術センター他：一建設副産物の高度処理技術の開発－コンクリート副産物の高度処理・利用技術の開発 平成8年度共同研究報告書，pp. 14~20, (1997)
- 10) 小林良太，中村悟志，江向俊文：コンクリート再生骨材のアスファルト混合物への有効利用，道路建設，PP. 52~65, (1993. 6)

(1999年3月15日受付 6月7日受理)