

排水性舗装発生材から再生した骨材の コンクリート舗装への適用性

APPLICABILITY FOR CONCRETE PAVEMENT USING RECYCLED AGGREGATES
FROM DRAINAGE ASPHALT PAVEMENT

清水準市*・東山浩士**・佐野正典***・藤森章記****

By Junichi SIMIZU, Hiroshi HIGASHIYAMA, Masanori SANO and Akinori FUJIMORI

1. はじめに

排水性舗装は、高粘度アスファルトを使用したポーラスアスファルト混合物を表層あるいは表層および基層に設けることにより、降雨時の走行安全性の向上、道路交通騒音の低減効果などを有している。このことから、排水性舗装の適用が平成7年度頃から増加してきた¹⁾。アスファルト舗装の寿命は比較的短年度であることから、近い将来、排水性舗装発生材の増大が見込まれ、早急な対応策の検討が必要である。

一方、良質な天然骨材の枯渇化、環境保全に関わる採取制限といった建設用骨材に関わる問題が顕在化している。循環型社会の形成を目指す観点から、建設副産物の再生化とその用途拡大は重要な課題であり、フライアッシュ、各種スラグなどの副産物、廃棄物に関しても建設用骨材としての有効利用が進められている。

排水性舗装発生材（以下、発生材）を加熱式骨材再生化手法²⁾により再資源化された骨材（以下、再生骨材）には、高粘度アスファルトが薄膜状に付着している。この再生骨材のうち、再生粗骨材については、再び排水性舗装へ再利用する試み³⁾がなされているが、現時点では本格的な運用には至っていない。また、再生骨材には粗骨材のほかに粒径5mm未満の細粒アスファルト材（以下、再生細骨材）が多く含まれており、この再生細骨材の有効利用も検討する必要がある。そのため著者らは、再生骨材のコンクリート用骨材への適用性について検討してきた^{4)~6)}。その結果、天然骨材を用いたコンクリートとの比較において、圧縮強度、割裂引張強度は30~50%程度の低下が見られた。しかし、曲げ強度の低下は

見られず、天然骨材と同等の性能を発揮することが確認できた。

他方、近年、建設副産物の有効利用やヒートアイランド対策などの環境負荷低減として、コンクリート舗装の普及拡大の努力がセメント・コンクリート分野で精力的に行われている⁷⁾。例えば、建設副産物等を用いた舗装用コンクリートの適用性に関する研究が挙げられる^{8)~10)}。コンクリート舗装の設計基準強度は曲げ強度で管理されており、コンクリート舗装版厚は交通荷重による輪荷重応力と温度変化による温度応力による合成応力に対する版の曲げ疲労強度により設計される^{11),12)}。したがって、再生骨材のような使用実績の少ない骨材をコンクリート舗装に用いる場合には、曲げ疲労特性を明確にしておく必要がある。

このような背景から、本研究では、排水性舗装発生材から再生化した骨材の用途拡大に向け、コンクリート舗装用骨材への適用性について検討することを目的に、まず、再生骨材を用いたコンクリートおよびそれを短繊維により補強したコンクリートの疲労強度特性を明らかにした。次に、コンクリート舗装版厚の設計を行うことにより、その適用性について天然骨材を用いたコンクリートとの比較から検討した。

2. 排水性舗装発生材の再生化手法

加熱式骨材再生化手法²⁾を図1に示す。手順として、加熱溶解した発生材に添加材である水砕スラグ（粗粒率：2.5）を1:1の比率（質量比）で投入し、再生ドライヤー内にて適正温度（160~180℃）のもとで攪拌する。発生材に付着、充填していた高粘度アスファルトの大半は、攪拌によって添加材にほぼ均等に付着する。そして、発生材はアスファルト混合物としての団結能力を失い、個々に分離独立した骨材と砂粒状態の細粒アスファルト材として排出される。ここからふるい分け

*近畿大学大学院総合理工学研究科博士前期課程（〒577-8502 東大阪市小若江）、**近畿大学講師 理工学部社会環境工学科、***近畿大学教授 理工学部社会環境工学科、****奥村組土木興業(株)環境開発本部技術部第一技術課

を行い、粒径 5mm 以上を再生粗骨材、5mm 未満を再生細骨材として再資源化する。それぞれの骨材を写真 1 および写真 2 に示す。また、これらの骨材表面には薄膜状のアスファルトもしくはアスファルトファイラーが残留付着した状態である。この残留アスファルト付着率は、骨材質量に対して再生粗骨材が 0.8%、再生細骨材が 2.0%であった。

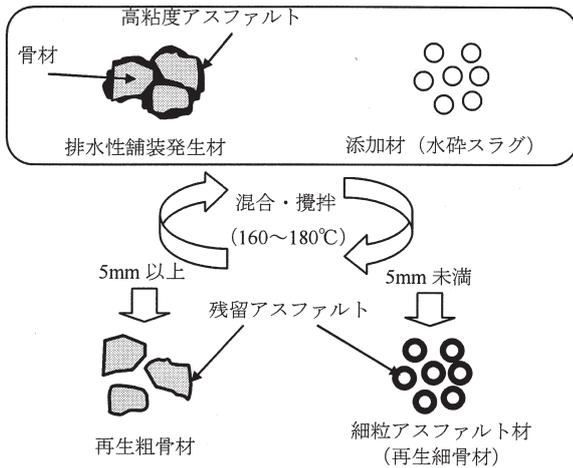


写真 1 再生粗骨材

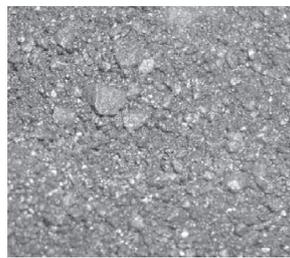


写真 2 再生細骨材

3. 既往の強度試験結果^{4),5)}

3.1 圧縮強度およびヤング係数

圧縮強度とセメント水比 (C/W) の関係を図 2 に示す。圧縮強度と C/W との関係は直線で表わされるが、普通コンクリート (N) の圧縮強度に比して、粗骨材に再生骨材を用いた場合 (RG) は約 30%、粗・細骨材に再生骨材を用いた場合 (RGS) は約 50%低下する。圧縮強度の低下原因としては、骨材に付着している残留アスファルトのヤング係数が低く、圧縮応力下において、残留アスファルトが変形する。よって骨材近傍におけるセメントペースト部分の応力が増大し、局所的な破壊が生じることにより圧縮強度の低下が引き起こされると考えられる。

次に、ヤング係数と圧縮強度の関係を図 3 に示す。図中の実線は日本建築学会¹³⁾による関係式である。再生骨材を用いたコンクリート (RGS) のヤング係数

はいずれの水セメント比においても関係式に比して約 30%低下する。

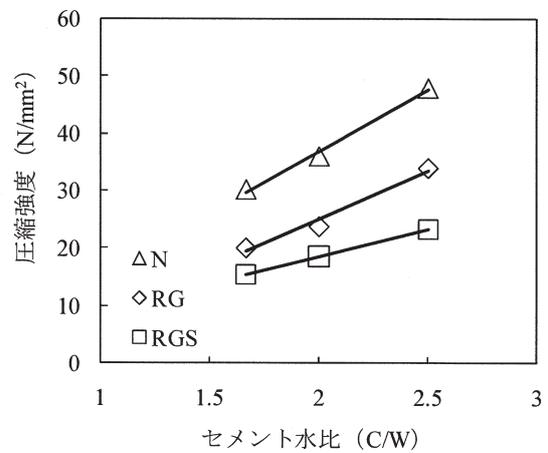


図 2 圧縮強度—セメント水比 (C/W) の関係

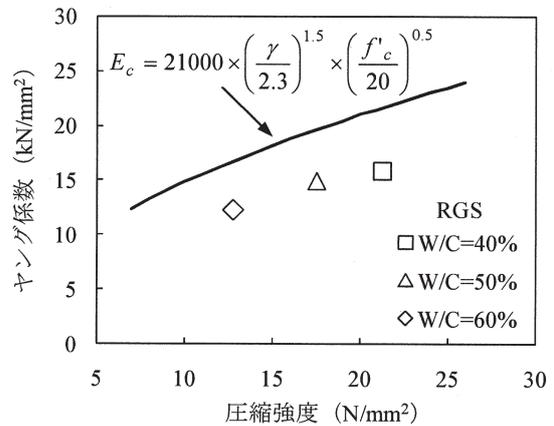


図 3 ヤング係数—圧縮強度の関係

3.2 曲げ強度

曲げ強度と圧縮強度の関係を図 4 に示す。図中の実線は、CEB-FIP Model Code 1990¹⁴⁾の関係式で

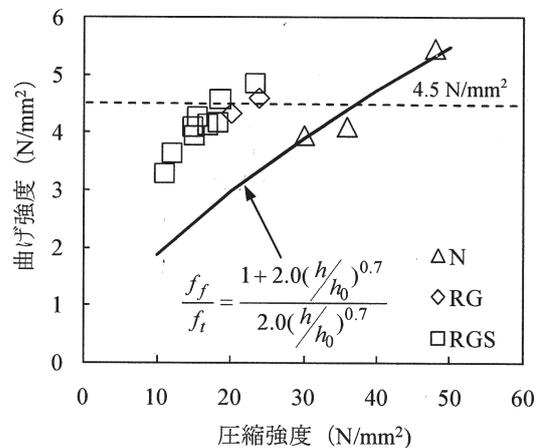


図 4 曲げ強度—圧縮強度の関係

表 1 材料物性値

材料	タイプ	物性
セメント	早強ポルトランドセメント (C)	密度 : 3.13(g/cm ³), ブレーン値 : 4370(cm ² /g)
粗骨材	再生粗骨材 (G)	密度 : 2.61(g/cm ³), 吸水率 : 0.37%, 粗粒率 : 6.19
細骨材	再生細骨材 (S)	密度 : 2.40(g/cm ³), 吸水率 : 0.67%, 粗粒率 : 2.97
混和剤	AE減水剤 (AE)	リグニンスルホン酸化物ポリオール複合体
	高性能AE減水剤 (SP)	ポリカルボン酸エーテル系化合物
PVA繊維	ポリビニールアルコール繊維	繊維径 : 660(μm), 繊維径 : 30(mm), 密度 : 1.3(g/cm ³) 引張強度 : 880(N/mm ²), 弾性係数 : 28(kN/mm ²)

表 2 配合表

試験体	W/C (%)	s/a (%)	単位体積質量(kg/m ³)						V _f (%)
			W	C	S	G	AE	SP	
R	50	52	200	400	790	793	4	0	0
RF-0.5		46	190	380	725	930	0	7.6	0.5
RF-1.0									1.0

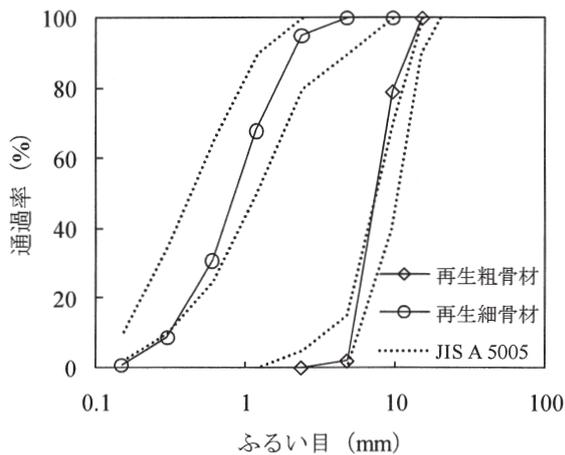


図 5 再生骨材粒度分布



写真 3 試験状況

ある。圧縮強度の低下により見かけ上、曲げ強度が増大したと見ることができ、実際には曲げ強度の低下が見られない。すなわち、普通コンクリートの曲げ強度と同等の値を保持できることが分かる。また、配合によっては、コンクリート舗装の設計基準強度である 4.5N/mm²を確保することができる。

4. 試験概要

4.1 使用材料および配合

使用材料は、早強ポルトランドセメント、再生粗骨材、再生細骨材、ポリビニールアルコール (PVA) 繊維、AE 減水剤、高性能 AE 減水剤である。使用材料の物性値を表 1 に、再生骨材の粒度分布を図 5 に示す。

再生骨材の粗粒率は、粗骨材で 6.19、細骨材で 2.97 であり、一般のコンクリートに用いられる骨材

の粗粒率(粗骨材 : 6.0~8.0, 細骨材 : 2.6~3.1)と同じであり、粒度分布もほぼ「JIS A 5005 コンクリート用砕石・砕砂」に記されている標準粒度分布の範囲内にある。

繊維補強コンクリートを舗装版へ適用するための研究^(例えば 15), 16)は数多く発表されているが、本研究で対象とした PVA 繊維についての研究は少ない。PVA 繊維は、原料に OH 基を含むために親水性が大きいことから、他の繊維補強材と異なり表面加工をせずともセメントペーストとの付着力が高く、ワーカビリティの低下が少ない。再生骨材は残留アスファルトの疎水性から吸水率が低く、ワーカビリティの低下が著しい。従って、繊維の選定についてはスランプロスが少ない PVA 繊維を採用した。

コンクリートの配合を表 2 に示す。W/C は 50%

PVA 繊維の混入率は、コンクリート体積に対して 0% (R), 0.5% (RF-0.5), 1.0% (RF-1.0) の 3 水準とした。

コンクリートの練り混ぜには、2 軸強制練りミキサーを用いた。ミキサーに再生粗骨材、セメント、再生細骨材の順に投入し、60 秒間の空練りの後、練り混ぜ水（水+混和剤）を投入し、180 秒間練り混ぜを行った。その後、RF-0.5, RF-1.0 については繊維を投入し、さらに 3 分間練り混ぜた。

試験体は、コンクリート打設後、24 時間以内に脱型し、その後、強度が安定するまで実験室内で水中養生を経て試験を行った。

4.2 試験方法

試験状況を写真 3 に示す。試験体は、100×100×400mm の角柱とし、試験は、3 等分点曲げ載荷とした。曲げ疲労試験は、油圧サーボ式疲労試験機（容量：200kN）を用いて載荷速度 5Hz の正弦波形にて行った。載荷荷重の上限値は、あらかじめ静的試験から得た曲げ強度の 40～80% の範囲で数水準を選び、下限値は 10% とした。なお、試験は 2008 年 10 月～2009 年 1 月の期間に実施した。

5. 試験結果

5.1 静的曲げ試験

疲労試験の開始直前に各試験体の静的曲げ試験を 3 体ずつ行うこととし、任意に選んだ 3 体を抜き取り実施した。静的曲げ試験結果を表 3 に、RF-0.5, RF-1.0 の試験時に測定した荷重-たわみ曲線を図 6 に示す。繊維無混入の場合には、ひび割れ発生と同時に荷重が急激に低下して破壊に至るのに対し、RF-0.5, RF-1.0 の繊維補強コンクリートは、ひび割れ発生以降も荷重を保持しながら、除々に低下して

表 3 静的曲げ試験結果

試験体	No.	曲げ強度	曲げじん性係数
		(N/mm ²)	(N/mm ²)
R	1	4.03	—
	2	4.18	—
	3	4.16	—
	平均	4.12	—
RF-0.5	1	3.55	1.77
	2	3.88	2.13
	3	3.45	1.62
	平均	3.63	1.84
RF-1.0	1	4.00	2.36
	2	3.90	3.25
	3	3.89	3.37
	平均	3.95	2.99

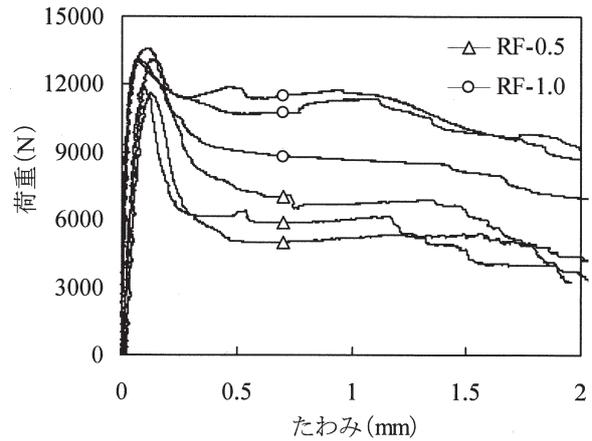


図 6 荷重-たわみ曲線

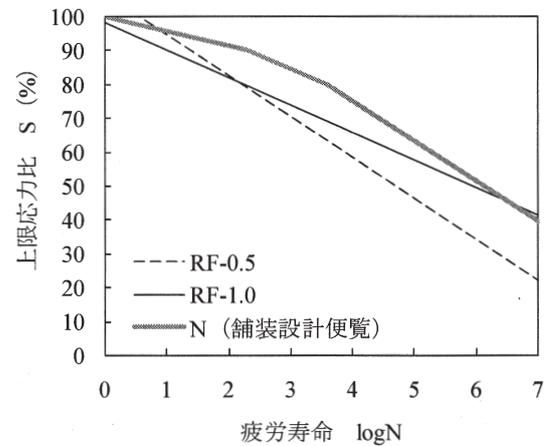
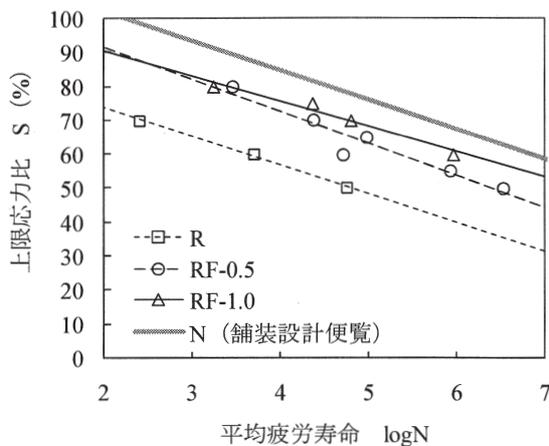
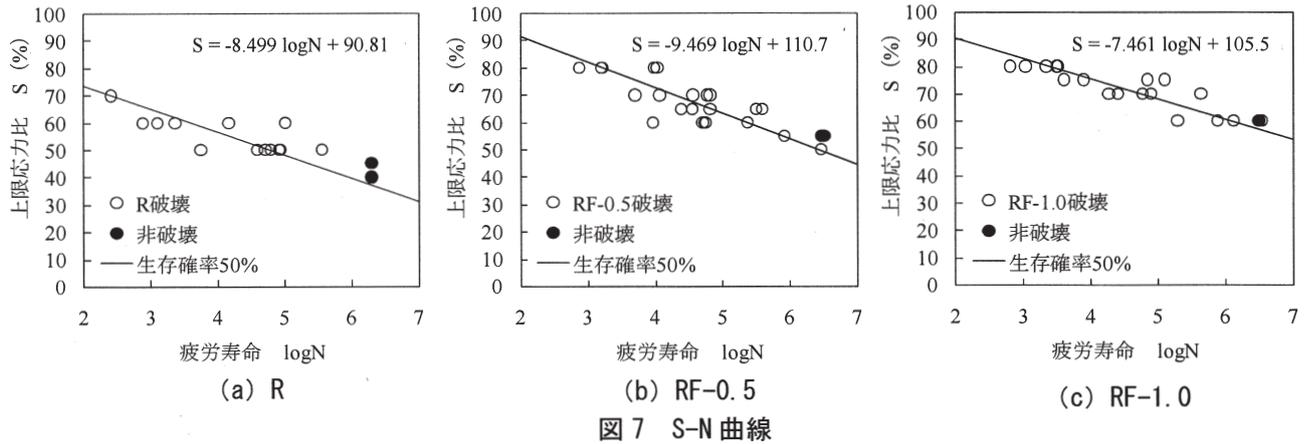
いく傾向にある。また、繊維混入率の増加に伴い、最大荷重以降の低下割合は小さく、RF-1.0 では、RF-0.5 に比して、60%程度大きな曲げじん性係数を示し、残存引張強度の向上が明らかである。

5.2 曲げ疲労試験

曲げ疲労試験結果を表 4 に示す。表より明らか

表 4 曲げ疲労試験結果

R		RF-0.5		RF-1.0	
S	N	S	N	S	N
70	258		768		645
	770		1615		1093
	1254	80	1656	80	2216
60	2320		9785		3213
	14820		10999		3370
	105130		5170		4082
	5646		11944		8035
	39534	70	37087	75	71928
	52219		60356		128836
50	62345		66367		19096
	84000		25062		26196
	87655		36260	70	59856
	365269	65	66226		79792
45	2000000→		323260		446357
40	2000000→		400476		198317
S: 上限応力比			9466		788745
N: 繰返し回数			51952	60	1352800
→: 非破壊		60	56161		3197141→
			56945		3539606
			239842		
			843649		
		55	3017949→		
			3310034→		
		50	3398811		



なように、試験条件が同一であっても疲労寿命は著しくばらつき、結果の整理に際しては何らかの確率統計処理を行う必要がある。井上ら¹⁷⁾は、統計処理の方法として、対数正規分布関数が最も適合性の良いことを明らかにしている。したがって、本研究においても対数正規分布関数により処理したS-N曲線を求めることにした。各試験体のS-N曲線(生存確率50%)を図7に、全てのS-N曲線をまとめたものを図8に示す。また、図8中には、舗装設計便覧¹²⁾に記されている普通コンクリートのS-N曲線も示している。この疲労曲線は破壊確率によって定義されており、図には破壊確率50%(生存確率50%)のものを示している。

図8から、繊維無混入のRは普通コンクリートのS-N曲線に比して、ほぼ同様の傾きを有しているが、疲労強度は大きく低下する。これは、繰返し荷重に対して、骨材に付着したアスファルトの残留ひずみが大きく、累積疲労損傷が大きくなったためであると考えられる。しかし、繊維を混入することにより、疲労抵抗性が増し、繊維補強により疲労強度が改善

される。一例として上限応力比が60%の場合、RF-0.5はRに比して疲労寿命が約50倍となり繊維混入による疲労抵抗性の向上が窺える。RF-1.0については、R、RF-0.5および普通コンクリートに比してS-N曲線の傾きが緩やかになり、RF-1.0とRの比較を行うと約300倍もの疲労寿命の向上が見られた。また、RF-1.0のS-N曲線の傾きから上限応力比の低下に伴って疲労寿命が向上する傾向にあり、上限応力比30%以下であると普通コンクリートの疲労寿命を上回る結果となった。

5.3 設計用疲労曲線

実際の設計に用いる疲労曲線は、破壊に対して安全側に設定する必要がある。一般に、設計用疲労曲線は生存確率95%の値が選ばれている¹⁸⁾。したがって、今回の試験結果から生存確率95%の疲労曲線を算定し、再生骨材コンクリートの設計用疲労曲線とした。また、対象とする試験体はRF-0.5、RF-1.0の2種類とした。疲労試験結果を対数正規分布関数にあてはめて求めたRF-0.5、RF-1.0の結果および舗装設計便覧¹²⁾に記されて

表 5 設計条件および交通条件

設計条件			交通条件				
設計期間	20年			輪荷重 (kN)	交通量 (台/日)		
交通量区分	N ₅ , N ₆ , N ₇ 旧 (B, C, D)				N ₅ 交通 (旧B)	N ₆ 交通 (旧C)	N ₇ 交通 (旧D)
コンクリート舗装の種類	普通コンクリート舗装			9.8	6190	13934	19493
	N	RF-0.5	RF-1.0	19.6	816	1855	2967
版厚(cm)	25, 28, 30			29.4	539	1210	1685
曲げ強度 (N/mm ²)	4.5			39.2	260	620	1049
弾性係数 (kN/mm ²)	28	15		49.0	136	335	555
ポアソン比	0.2			58.8	73	208	425
温度膨張係数	10×10 ⁻⁶ /°C			68.6	33	118	327
横収縮目地間隔 (m)	10			78.4	16	59	167
路盤支持力係数(N/mm ²)	K ₇₅ =100			88.2	7	30	75
その他	3車線 幅員3.25m 郊外部			98.0	5	13	25
				舗装計画交通量 (台/日・方向)	250以上 1000未満	1000以上 3000未満	3000以上

いる普通コンクリートの設計用疲労曲線を図 9 に示す。

6. 舗装版厚の設計

5.3 で求めた設計用疲労曲線を用い、再生骨材コンクリートを用いた舗装版厚を普通コンクリートと比較・検討した。疲労設計手順は舗装設計便覧¹²⁾を参考にした。なお、設計対象は普通コンクリート(N)、繊維混入率 0.5%、1.0%の再生骨材コンクリート(RF-0.5, RF-1.0)の3種類とした。

6.1 計算手順

コンクリート舗装の理論的設計法は、交通荷重による輪荷重応力および温度変化に伴う温度応力の繰返しにより、設計期間内に曲げ疲労破壊を生じないよう舗装構造を決定するものである。曲げ疲労破壊の検討にあたっては、輪荷重の走行位置およびコンクリート版の温度差の頻度分布について、それぞれの条件下における曲げ疲労度の総数を計算するものであり、式(1)によって累積曲げ疲労度を算定する。この累積曲げ疲労度が1.0を超えることのないように版厚を決定するものである。

$$FD = \sum_{i=1}^m \frac{N_{si}}{N_{Ai}} \quad (1)$$

ここで、

FD : 累積曲げ疲労度

N_{si} : i 番目の合成応力の作用度数

N_{Ai} : i 番目の合成応力に対する許容輪数

m : 作用する合成応力の数

6.2 設計条件および交通条件

設計条件および想定した交通条件を表 5 に示す。表中の設計条件は一般的な値を用いているが、再生骨材コンクリートのヤング係数は、既往の実験(図 3)を参考に15kN/mm²とした。交通条件は交通量区分 N₅(旧 B)、N₆(旧 C)、N₇(旧 D)の3水準とし、版厚は一般に舗装版に用いられている25、28、30cmの値で計算を行った。輪荷重分布は一般国道における車両重量調査結果¹⁹⁾を参考にしており、交通量区分は49kN換算輪数を指数分布²⁰⁾に近似することにより算定した。

6.3 計算結果

計算結果として、交通量区分ごとの累積曲げ疲労度とコンクリート版厚の関係を図 10 に示す。いずれの交通量区分においても、普通コンクリートに比して、RF-0.5の累積曲げ疲労度はかなり大きな値となり、交通量区分が厳しい条件になるほどその差は顕著となる。これに対して、RF-1.0については、普通コンクリートの累積曲げ疲労度を大きく下回る結果となった。しかし、合成応力は、計算に用いるヤング係数の値に反映される。したがって、RF-0.5、RF-1.0の計算結果は、ヤング係数に実験値(15kN/mm²)を用いていることから、合成応力を危険側に評価している可能性があり、設計を行う際のヤング係数は、普通コンクリートと同じ値を用いる方が安全側になると考えられる。

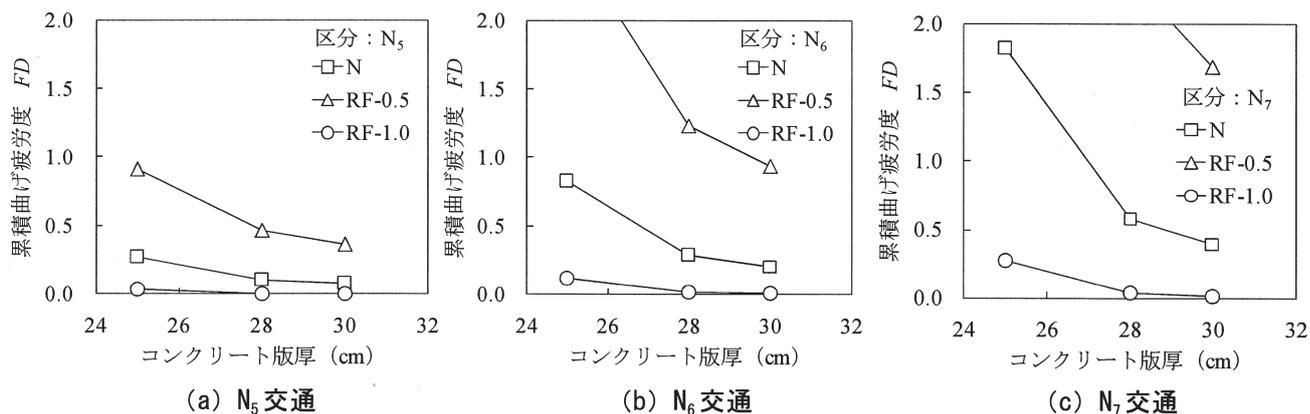


図10 累積曲げ疲労度-コンクリート版厚の関係

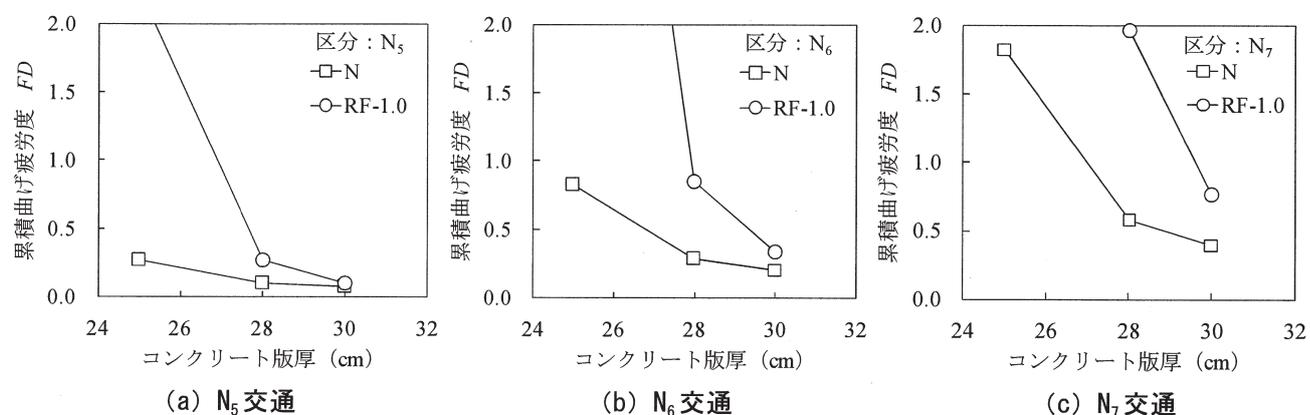


図11 累積曲げ疲労度-コンクリート版厚の関係 (ヤング係数 28kN/mm²)

そこで、対象とする試験体を普通コンクリートとRF-1.0の2種類とし、ヤング係数を普通コンクリートと同一の28kN/mm²として計算した結果を図11に示す。その結果、RF-1.0の累積曲げ疲労度は、普通コンクリートに比して、大きな値を示す結果となり、交通量区分に関わらず版厚が薄くなるほどその差は顕著となる。しかし、いずれの交通量区分においても版厚を2~3cmの増厚、または曲げ強度を0.1~0.5N/mm²程度増加させることにより、普通コンクリートの累積曲げ疲労度と同等となる。

ただし、本研究に用いた再生骨材の表面には高粘度アスファルトが薄膜上に付着しているため、温度変化や疲労試験における载荷速度が強度に及ぼす影響など明らかにできていない点もあり、これらについては今後の課題としたい。

7. まとめ

本研究は、排水性舗装発生材から再生した骨材を用いたコンクリートの曲げ疲労特性を明らかにし、コンクリート舗装への適用性について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 再生骨材を用いたコンクリートは普通コンクリートのS-N曲線に比して、ほぼ同様の傾きを有しているが、疲労強度には大きな低下が見られた。しかし、繊維混入率を1.0%とした場合、普通コンクリートに比して、S-N曲線の傾きが緩やかになり、上限応力比が30%以下であれば疲労寿命が逆転する結果となった。
- (2) 版厚設計を行う際に再生骨材コンクリートのヤング係数を実験値とした場合、合成応力を危険側に評価する可能性があり、設計を行う際のヤング係数の値については、普通コンクリートと同じ値を用いる方が安全側の評価になると考えられる。
- (3) ヤング係数を普通コンクリートと同一とした場合、繊維混入率1.0%の再生骨材コンクリートの累積曲げ疲労度は、版厚2~3cmの増厚、または曲げ強度を0.1~0.5N/mm²程度増加させることにより、普通コンクリートと同等となる。ただし、温度変化や疲労試験における载荷速度の影響については明らかにな

っていない。

謝辞

本研究は、新都市社会技術融合創造研究会「排水性舗装混合物のリサイクル技術の研究」プロジェクト（プロジェクトリーダー：山田 優 大阪市立大学名誉教授）における研究成果の一部であります。関係各位に甚大なる謝意を表します。また、本研究を遂行するにあたり、近畿大学理工学部 社会環境工学科 複合構造学研究室の学部学生に多大なご協力を得ました。感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：排水性舗装発生材の再利用技術確立に向けた直轄国道試験施工の中間報告，2006.
- 2) 佐野正典，山田 優，加藤俊昌，辻森和美：排水性舗装発生材のリサイクルと骨材特性，舗装，Vol. 40，No. 10，pp. 12-16，2006.
- 3) 木下考樹，加藤俊昌，木戸一善：排水性舗装発生材の再生利用～再生排水性舗装の試験舗装～，第 27 回日本道路会議論文集，2007.
- 4) 東山浩士，佐野正典，麓 隆行，藤森章記：アスファルト舗装発生材から回収したリサイクル骨材を用いたコンクリートの強度特性，土木学会第 62 回学術講演会講演概要集，V-137，Vol. 62，2007.
- 5) 清水準市，東山浩士，佐野正典：排水性舗装発生材からリサイクルした骨材を用いたコンクリートの強度特性，第 27 回日本道路会議論文集，2007.
- 6) 藤森章記，佐野正典，東山浩士，山田 優，荒木誠：排水性舗装発生材から回収した細粒状再生骨材の有効活用方法について，建設用原材料，Vol. 16，No. 1，pp. 9-15，2008.
- 7) 國府勝郎：社会要請に応えるコンクリート舗装，コンクリート工学，Vol. 41，No. 1，2003.
- 8) 鳥居和之，川村満紀，竹本邦夫，柳場重正：再生骨材の舗装コンクリート用骨材としての適用性，第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 85-88，1984.
- 9) 加藤康弘，浜田純夫，市岡孝夫，小林良太：フライアッシュを大量使用した舗装コンクリートの長期強度と版厚設計に対する提案，土木学会論文集 F，Vol. 63，No. 1，pp. 66-71，2007.
- 10) 樋野和俊，小林良太，松尾栄治，浜田純夫：細骨材を石炭灰に全量置換した転圧コンクリートの表面性状と現場施工，土木学会論文集，No. 798/IV-68，pp. 41-49，2005.
- 11) 岩間 滋：コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究，土木学会論文集，第 111 号，pp. 16-46，1964.
- 12) (社) 日本道路協会：舗装設計便覧，2006.
- 13) (社) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 許容応力度設計法，1999.
- 14) CEB-FIP：“CEB-FIP Model Code for Concrete 1990”，Bulletin d’ Information，1993.
- 15) 加賀谷誠，鈴木徹，國分修一，徳田 弘：鋼繊維補強舗装用転圧コンクリートの配合と基礎物性の検討，土木学会論文集，No. 669/V-50，pp. 253-266，2001.
- 16) 岡本 直，小林是則，末吉正二：ポリエチレン繊維補強コンクリートによる試験舗装に関する研究，第 4 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 169-172，1982.
- 17) 井上正一，西村新蔵，吉野 公：コンクリートの圧縮疲労特性と疲労強度の特性値に関する研究，土木学会論文集，No. 451/V-17，pp. 59-67，1992.
- 18) 岸谷孝一，西澤紀昭 他編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 疲労，技報堂出版，1987.
- 19) 飯島 尚，今井 博：車両重量調査結果の解析，道路，pp. 42-48，1982.
- 20) (社) 日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説，2001.

(2009 年 3 月 25 日受付 2010 年 1 月 13 日受理)