

コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリートの曲げ疲労特性に関する研究

小林良太¹・浜田純夫²・上田 満³

¹正会員 前田道路(株) 技術研究所 (〒243-04 神奈川県海老名市杉久保279)

²正会員 Ph. D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

³正会員 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

本研究は、コンクリート副産物より製造した再生骨材を用いた転圧コンクリートの曲げ疲労特性を検討したものであり、まず、各応力振幅 S における破壊までの繰り返し回数 N のばらつきを対数正規分布で近似することにより $S-N$ 曲線を求め、これが既存の研究結果より求めた舗装用コンクリートおよび一般の転圧コンクリートの $S-N$ 曲線よりも低い値を示すことを確認した。次に、Weibull分布関数とMcCall分布関数を用いて生存確率 P に関する $S-N$ 曲線すなわち $P-S-N$ 曲線を求め、これらから得られる200万回疲労強度について対数正規分布による解析結果との比較を試みた。さらに、以上の結果をもとに、再生骨材を使用した転圧コンクリートの舗装への適用についても考察を加えた。

Key Words : *fatigue, fatigue probability, recycled aggregate, bending strength, roller compacted concrete*

1. まえがき

近年、都市再開発の活発化に伴い建設事業から発生する副産物が増大し、その適正な処理が大きな課題になっている。建設副産物にはコンクリート塊、アスファルトコンクリート塊、建設汚泥、建設発生木材等多くの種類があるが、これらの中で最も発生量が多いのがコンクリート塊である。

また、コンクリート塊は、1990年度に行われた実態調査¹⁾によると、全発生量の48%が路盤材や埋め戻し材として利用されているものの残りの52%は廃棄されているため、より付加価値の高い再生利用が強く望まれており、建設省からは2000年までに再生利用率を90%まで高める方針が打ち出されている。

コンクリート副産物の付加価値を高めた再生利用方法としては、その素材からしてコンクリート用骨材への利用が当然考えられ、これまで多くの研究が行われている。わが国における代表的な研究は1981～1986年にかけて建設省総合技術開発プロジェクト(以下、総プロという)「建設事業への廃棄物利用技術の開発」²⁾において実施されたものである。この研究では、コンクリート破砕物は高度に処理すればその結果得られる再生骨材の品質を改良することができコンクリート用骨材への利用が可能であるこ

と、コンクリート再生骨材の処理方法として骨材同士をすり合わせて骨材周辺のモルタル分を除去する工程を最終段階に設けるのが効果的であること等を示している。そして、これらの研究結果をもとに、コンクリート副産物より得られた再生骨材をコンクリート用の骨材として使用する場合の品質基準²⁾が発表されているが、当時の社会的ニーズに合わなかったため実際に使用された例は少ない。

このような状況を背景に、コンクリート副産物の付加価値の高い再生利用を普及させるための新しい用途開発が求められており、用途の一つとして転圧コンクリート舗装用の骨材への利用があげられる。コンクリート副産物を再生処理して得られた骨材の粒度分布は連続性を持っているので、締め固め易さが求められる転圧コンクリート舗装用の骨材に適しているといえよう。

転圧コンクリート舗装を含む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り返し繰り返し載荷され、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

表-1 コンクリート再生骨材の性状

項目	粒径(mm)	
	20~5	5~0
絶乾比重	2.46	2.18
吸水率 (%)	2.99	7.56
安定性 (%)	5.8	7.0
すりへり減量 (%)	19.0	—
洗い損失量 (%)	0.3	5.7
モルタル付着量 (%)	16.8	—
アスコン混入率 (%)	6.5	—
粗粒率	—	3.37

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。

コンクリートの圧縮疲労に関しては古くから数多くの研究が行われているが、コンクリート舗装を対象とした曲げ疲労に関する既存の研究は少ない。岩間³⁾は、広範囲の条件下で曲げ疲労試験を実施し疲労寿命の実測値の包絡線すなわち生存確率 100%の曲線をコンクリート舗装版の曲げ疲労曲線として提案した。これはコンクリート舗装要綱の疲労曲線として採用され現在に至っている。小梁川らは一連の研究^{4)・5)・6)}で、曲げ疲労性状に関しては、供試体の含水状態の変化に起因する内部応力が大きな影響を与えること、応力比(載荷上限応力/静的強度)が0.80以上の領域において応力比と粗骨材の最大寸法(40mmと20mm)および静的曲げ強度(40~60 kgf/cm²(3.9~5.9 Mpa))の影響は認められないこと等を示した。これらの研究によりコンクリート舗装版の曲げ疲労特性はかなり解明されてきたが、使用されている骨材の種類やその性状のばらつきがおよぼす影響等について不明な点も残されており、十分とはいえない。

一方、転圧コンクリート舗装は、ようやく試験施工の段階を経て本格的な実用化を迎えようとしている時であり、疲労特性に関する研究は極めて少ない。井上と尾本⁷⁾は、転圧コンクリートの曲げ疲労試験を6段階の応力比において実施し、転圧コンクリートの生存確率50%の疲労曲線は小梁川らが示した舗装用コンクリートの疲労曲線⁵⁾より劣るものの、セメントコンクリート舗装要綱の疲労曲線とほぼ同等であるとしている。Gomez と Scholer⁸⁾は、単位セメント量の等しい転圧コンクリートと普通コンクリートの曲げ疲労試験を4段階の応力比において実施し、転圧コンクリートの疲労曲線は普通コンクリートと同等であり、また、転圧コンクリートの方が静的強度が大きいため同じ応力レベルで比較すると普通コンクリートより疲労寿命が長いとしている。

以上のことを踏まえて、本論文ではコンクリート

表-2 総プロ(土木構造物分科会)の指針案における
コンクリート再生骨材の品質基準²⁾(1993年改訂)

項目	再生粗骨材			再生細骨材		
	1種	2種	3種	1種	2種	
種別	3以下	3以下	5以下	7以下	5以下	10以下
吸水率 (%)	3以下	3以下	5以下	7以下	5以下	10以下
安定性 (%)	12以下	40以下	12以下	—	10以下	—
		(40以下)*				

注)* 凍結融解耐久性を考慮しない場合

表-3 総プロ(土木構造物分科会)の指針案における
再生コンクリートの種類と品質²⁾

再生コンクリートの種類	再生コンクリートの設計基準強度 σ_{ck} (kgf/cm ²)	使用粗骨材	使用細骨材
I	210以上 (鉄筋コンクリート)	再生粗骨材 1種	普通骨材
II	160以上 (無筋コンクリート)	再生粗骨材 2種	普通or再生 細骨材 1種
III	160以下 (捨てコンクリート)	再生粗骨材 3種	再生細骨材 2種

副産物より得られた再生骨材を使用した転圧コンクリートについて曲げ疲労試験を実施し、各応力振幅Sにおける破壊までの繰り返し回数Nのばらつきを対数正規分布で近似し解析することにより疲労曲線(以下、S-N曲線という)を求め、既存の研究結果を利用して舗装用コンクリートおよび一般の転圧コンクリートとの比較を行った。また、Weibull分布関数とMcCall分布関数を用いて生存確率Pに関するS-N曲線すなわちP-S-N曲線を求め、これらから得られる200万回疲労強度について、対数正規分布による解析結果との比較を試みた。さらに、以上の結果をもとに、再生骨材を使用した転圧コンクリートの舗装への適用性についての検討を行った。

2. 実験概要

(1) コンクリート再生骨材の性状

表-1は使用したコンクリート再生骨材の性状を示したものである。このコンクリート再生骨材は、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ャとインパクトクラッシュャによる一般的な一次と二次の再生処理を施した後、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による骨材同士の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、コンクリート再生骨材の周囲には除去できなかったモルタル分が残っているため、その比重は一般の骨材よりも小さく、

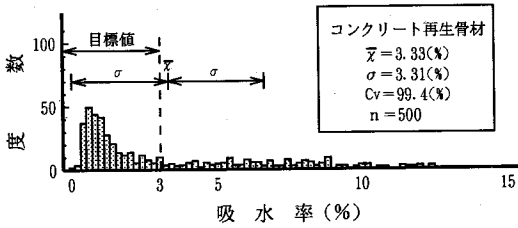


図-1 コンクリート再生骨材の吸水率のばらつき
(骨材粒径: 20~13mm)

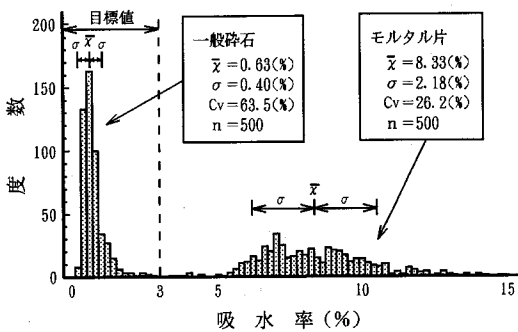


図-2 一般砕石とモルタルの吸水率のばらつき
(骨材粒径: 20~13mm)

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。

なお、建設省は前述の総プロの研究結果²⁾をもとにして、表-2および表-3に示すように、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を発表している。今回使用したコンクリート再生粗骨材の品質は、基準の中で最も品質が良いとされている1種に、また、再生細骨材の品質は2種に相当するものである。

コンクリート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、コンクリート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、モルタル片はコンクリート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、コンクリート再生骨材の吸水率は、一般砕石の領域

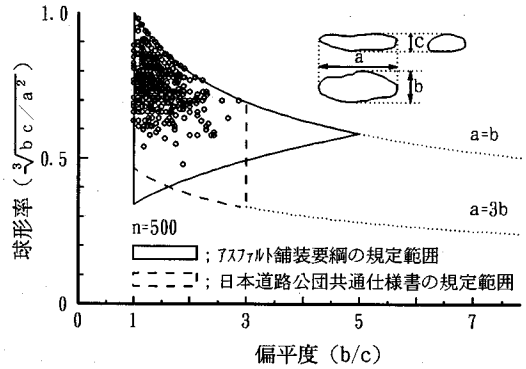


図-3 コンクリート再生骨材の形状のばらつき
(骨材粒径: 20~13mm)

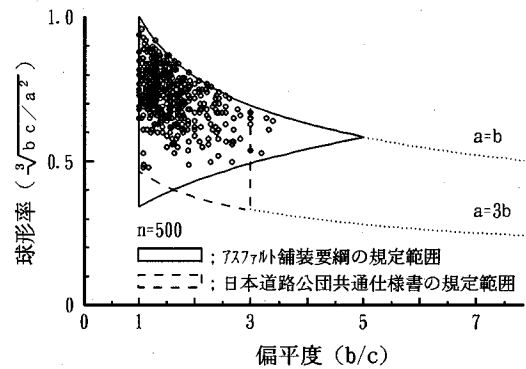


図-4 一般砕石の形状のばらつき (骨材粒径: 20~13mm)

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、個々のコンクリート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、コンクリート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。

図-3と図-4は、同様の試料についてHeywoodの偏平度⁹⁾とKrumbeinの球形率¹⁰⁾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。コンクリート再生骨材の形状は、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。

(2) 配合と供試体

表-4は、コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリートの配合を示したものである。この配合は、

転圧コンクリート舗装技術指針(案)に示されている配合試験方法により求めたもので、コンシステンシーの評価にはマーシャル突固め方法を採用し、締固め率が96%となるように単位水量を決定した。なお、単位セメント量 $340\text{kg}/\text{m}^3$ は、材齢28日の静的曲げ強度試験において $52\text{kgf}/\text{cm}^2$ (5.10 Mpa)の配合強度が得られるように決定したものであるが、転圧コンクリートの単位セメント量としてはこれまでの施工実績の上限値に相当するものである。

転圧コンクリートの練り混ぜは2軸強制練りミキサーを用いて行い、1バッチから静的強度試験用供試体 ($10\times 10\times 40\text{cm}$) を3個、静的強度および疲労強度試験用供試体 ($15\times 15\times 53\text{cm}$) を4個作製した。疲労強度試験用として転圧コンクリート舗装では通常使用しない寸法の供試体を採用したのは、疲労試験機の下限載荷能力の制約によるためである。供試体の作製は転圧コンクリート舗装技術指針(案)に準拠しパイプレーティングタンパを用いて行ったが、個々の供試体の密度の平均値と標準偏差には供試体寸法の違いによる影響は認められなかった。

既存の研究^{2), 11)}によると、コンクリート再生骨材を使用したコンクリートの圧縮強度は、骨材に付着しているモルタル分の影響により、一般骨材を使用した場合と比較すると同一 W/C において 10~40%低下している。本試験における転圧コンクリートの曲げ強度も同様の傾向を示した。すなわち、同一 W/C における材齢28日の静的曲げ強度で比較すると、コンクリート再生骨材を使用した場合は $52\text{kgf}/\text{cm}^2$ (5.10 Mpa)であったのに対して一般骨材を使用した場合は $68\text{kgf}/\text{cm}^2$ (6.67 Mpa)であり、約30%低下していた。

小梁川らの研究⁴⁾によれば、コンクリートの曲げ強度は供試体の含水状態の変化による影響を大きく受けるので、試験が長時間におよぶ疲労試験では試験中に供試体の含水状態が変化しないように細心の注意を払わなければならない。そこで本試験では、この影響を極力排除するために、すべての供試体について材齢28日まで水温20℃の恒温水槽で水中養生を施し、その後疲労試験実施時まで90~170日間気中養生20℃、湿度60%の条件下で気中養生を行った。

図-5は、 $10\times 10\times 40\text{cm}$ の供試体の静的曲げ強度と養生条件・材齢の関係を示したものである。ただし、図中の養生条件切り替え時における強度低下の割合は、小梁川らの実験データ⁴⁾を参考に推測したものであり、本試験の実測値ではない。

図からわかるように、静的曲げ強度は材齢28日目の水中養生から気中養生へ切り替えた時に大きく低下し、その後徐々に増加している。これは、気中養

表-4 転圧コンクリートの配合

s/a (%)	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
42	27.9	95	340	793	1170	5.10
配合曲げ強度 : $52\text{kgf}/\text{cm}^2$ (5.10MPa)						
セメントの種類 : 普通ポルトランドセメント						
混和剤の種類 : 超硬練り用						
粗骨材の種類 : コンクリート再生骨材20~5mm						
細骨材の種類 : コンクリート再生骨材5~0mm						

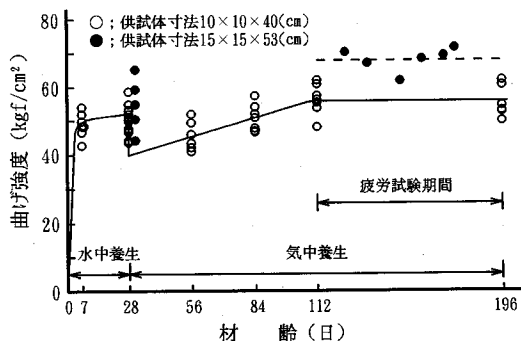


図-5 静的曲げ強度と養生条件・材齢の関係

生へ切り替えることにより供試体周辺部が乾燥収縮し、内部応力として引張応力が発生するために、その分だけ静的曲げ強度が低下したからである。したがって、その後の気中養生により供試体周辺部と内部の含水状態の差が徐々に減少すると、それに伴い引張応力が減少するので静的曲げ強度は徐々に増加している。そして、疲労試験の実施前には含水状態の差がなくなり、疲労試験期間中は静的曲げ強度の増加がほとんど認められず一定になっている。

なお、 $15\times 15\times 53\text{cm}$ の供試体もこれと同様の傾向を示し、疲労試験期間中に実施した静的曲げ強度試験の結果において強度の増加は認められなかった。

(3) 試験方法

コンクリートの疲労試験においては、基準となる静的強度の誤差が解析結果に大きな影響を与えるため、静的強度はできるだけ正確に推測しなければならない。そのため一般には、疲労試験に先立って各練り混ぜバッチ毎の静的強度を測定し、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す方法が採用されている。しかし、今回はコンクリート再生骨材を使用していることから通常のコンクリートよりも品質のばらつきが大きく、さらに転圧コンクリートであることから供試体作製時の締

固めに起因する密度のばらつきが強度に影響をおよぼすことになる。したがって、コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリートの場合は、同一バッチから作製された供試体でも静的強度のばらつきは当然大きいものとなり、上記の方法では個々の供試体の静的強度を正確に推測することが困難といえる。

そこで本試験では、個々の供試体の疲労試験期間中の静的曲げ強度を推測するにあたり、各練り混ぜバッチ毎に測定した静的曲げ強度の全体データを用いて疲労試験期間中の静的曲げ強度を推測し、さらにそれを各々の供試体の締固め率により補正する手法を採用した。

試験手順は、15×15×53cmの供試体の材齢28日における平均静的曲げ強度として55.0 kgf/cm² (5.39 Mpa) (n=5, C_v=13.1%)が得られたので、まずこれを仮の基準強度として5段階の応力振幅Sで疲労試験を実施した。ここで、応力振幅Sとは、繰り返し応力の上限応力と下限応力の差と静的強度の比である。

次に、各練り混ぜバッチから抽出した15×15×53cmの供試体により疲労試験期間中の静的曲げ強度と締固め率を求めたところ、平均静的曲げ強度 68.2 kgf/cm² (6.69Mpa) (n=6, C_v=4.7%) と平均締固め率 97.0% (n=6, C_v=0.6%) が得られたので、この結果をもとに個々の疲労試験用供試体の静的曲げ強度を各々の締固め率に応じて補正した。供試体の締固め率は 95.8~98.9% の範囲でばらついていた。そして、補正した強度を実際の基準強度とみなして個々の供試体毎に応力振幅Sを修正し、疲労試験のデータを解析した。

なお、締固め率による静的曲げ強度の補正には、締固め率が 90~100%の区間における静的曲げ強度と締固め率の関係を調べた結果、締固め率が 1.0%増加すれば静的曲げ強度が 7.2%増加することが確認されたので、この関係を使用した。

静的曲げ強度試験および疲労試験における載荷方法は、供試体寸法に応じてスパンが30cmと45cmの3等分点載荷とし、サーボバルブを用いた試験機を使用した。疲労試験の応力は周波数 5 Hzの正弦曲線変化とした。また、上限応力は仮の基準強度の 0.90~0.70 の範囲で5段階、同じく下限応力は全ての供試体について 0.10 とした。したがって、仮の応力振幅は 0.80~0.60 の範囲であった。

疲労試験における応力を応力振幅か上限応力比のいずれにより表示するかは議論の分かれるところであるが、下限応力の影響が無視できない¹²⁾ことを考慮して、今回は応力振幅を採用した。なお、繰り返し回数 200万回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。

表-5 疲労試験結果

S	r	N	P(N)	S	r	N	P(N)
0.75	1	4,680	—	1	15,369	0.941	
	1	324	0.833	2	26,764	0.882	
	2	5,699	0.667	3	55,833	0.824	
0.70	3	32,680	0.500	4	63,578	0.765	
	4	168,926	0.333	5	74,062	0.706	
	5	206,525	0.167	6	98,744	0.647	
	1	4,717	0.900	7	134,665	0.588	
	2	12,804	0.800	8	249,936	0.529	
	3	14,225	0.700	9	380,920	0.471	
0.65	4	46,619	0.600	10	401,675	0.412	
	5	68,915	0.500	11	416,446	0.353	
	6	235,612	0.400	12	452,390	0.294	
	7	245,403	0.300	13	1,401,419	0.235	
	8	639,211	0.200	14	1,984,558	0.176	
	9	798,039	0.100	15	2,000,000	0.118	
	1	35,104	0.929	1	151,742	0.875	
	2	47,079	0.857	2	410,404	0.750	
	3	78,086	0.786	3	2,000,000	0.625	
	4	87,412	0.714	4	2,000,000	—	
0.60	5	203,972	0.643	5	2,000,000	—	
	6	243,773	0.571	6	2,000,000	—	
	7	322,339	0.500				
	8	351,338	0.429				
	9	515,628	0.357				
	10	1,187,182	0.286				
	11	1,336,489	0.214				
	12	1,400,165	0.143				
	13	1,615,362	0.071				

3. 試験結果と考察

(1) S-N曲線

表-5は、上記の手法で推測した静的曲げ強度をもとにして個々の供試体の応力振幅Sの修正を行った後に、代表的なSへ集約(例えば、0.625~0.674の場合は0.65とする)することにより疲労試験結果を整理したものである。表中の生存確率 P(N) は順序統計量の理論を適用し以下の式より求めた。

$$P(N) = 1 - r / (n + 1) \quad (1)$$

ここで、

r : 破壊時の繰り返し回数の小さいものからの順位

n : 同一条件で試験を行った供試体数

なお、200万回での途中打ち切りのデータが含まれる場合のP(N) は以下の式¹³⁾によって求めた。この式におけるnには途中打ち切りの供試体数も含まれる。

$$P(N) = 1 - r / (n + 2) \quad (2)$$

コンクリートの疲労寿命の分布形に関しては、各種の分布モデルが提案されている。Weibull および Freudentisl と Gumbel は極小値の確率論を適用した Weibull分布を提案^{1,4)}している。McCall^{1,5)}は無筋コンクリートの曲げ疲労破壊を初めて統計的に取り扱い、べき乗を用いた関数による独自の数学的モデルを提案している。松下ら^{1,4)}および井上ら^{1,6)}は、圧縮疲労試験による疲労寿命分布の Weibull分布と McCall分布および対数正規分布等への適合性について研究を行い、疲労寿命はいずれの分布形にも適合するが Weibull分布と対数正規分布の適合性が比較的好く、簡便さを考慮すると対数正規分布に当てはめて処理することが実用的であるとしている。

そこでここでは、コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリートの疲労試験結果を対数正規分布に当てはめて解析し、既存の研究結果との比較を試みる。

対数正規分布モデルを採用した場合の $P(N)$ と N の関係は式(3)で回帰することができる。また、その場合に、 $P(N)=0.5(t=0)$ に相応する平均疲労寿命 $m(\log N)$ および標準偏差 $\sigma(\log N)$ は、それぞれ式(4)と式(5)で表すことができる。

$$t = A \cdot \log N + B \quad (3)$$

$$m(\log N) = -B/A \quad (4)$$

$$\sigma(\log N) = 1/A \quad (5)$$

ここで、

A, B : 実験より求まる定数

t : 正規分布曲線の対称軸からの距離で、任意の $P(N)$ に対して標準正規積分表より求まる

図-6は、比較的試験個数の多い $S=0.60, 0.65$ の場合について、 $P(N)$ と N の関係を対数確率紙上にプロットしたものである。図から、各データは概ね一直線上に並んでおり、各 S レベルのデータが対数正規分布の母集団に属しているとみなすことができる。

表-6は、各 S レベルの t と N の関係を N 軸方向の最小二乗法で求めた回帰式と、式(4)と式(5)より求めた $m(\log N)$ および $\sigma(\log N)$ をまとめて示したものである。表中の $m(\log N)$ と S の関係を N 軸方向の最小二乗法により求めると、 $P(N)=0.5$ の場合の $S-N$ 曲線が次式のように得られる。

$$S = -0.095 \cdot \log N + 1.105 \quad (6)$$

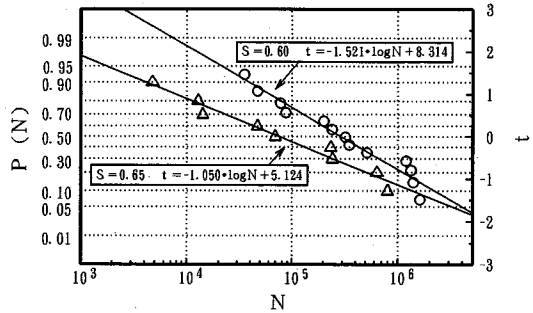


図-6 対数正規分布確率紙における $P(N)-N$ 曲線

表-6 各 S レベルの t と N の回帰式, $m(\log N)$, $\sigma(\log N)$

S	回帰式	$m(\log N)$	$\sigma(\log N)$
0.70	$t = -0.671 \cdot \log N + 2.864$	4.265	1.490
0.65	$t = -1.050 \cdot \log N + 5.124$	4.879	0.952
0.60	$t = -1.521 \cdot \log N + 8.314$	5.467	0.657
0.55	$t = -1.232 \cdot \log N + 6.656$	5.402	0.812
0.50	$t = -0.756 \cdot \log N + 5.022$	6.642	1.323

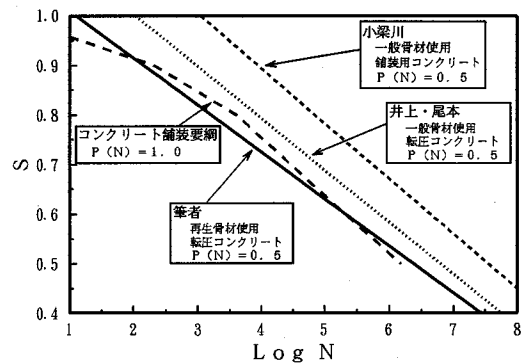


図-7 本研究および他研究者の $S-N$ 曲線

図-7は、式(6)の再生骨材を使用した転圧コンクリートの $S-N$ 曲線を、舗装用コンクリートおよび一般の転圧コンクリートの $S-N$ 曲線 ($P(N)=0.5$) と比較したものである。これらの曲線は、小梁川ら⁵⁾および井上と尾本⁷⁾の研究データを本試験と同様の条件(応力振幅の採用、式(1)と式(2)の使用、対数正規分布への適合)により解析し求めたものである。図中にはセメントコンクリート舗装要綱の $S-N$ 曲線 ($P(N)=1.0$) も参考値として示している。なお、小梁川らのデータについては、筆者らの試験条件に近い粗骨材最大粒径が20mmで下限応力が0%の場合のデータのみを使用した。

図からわかるように、これらの $S-N$ 曲線はほぼ同様の傾きを示しているが、舗装用コンクリート、一般の転圧コンクリート、コンクリート再生骨材を使

表-7 他研究者の疲労試験におけるS-N曲線, 200万回疲労強度, $\sigma(\log N)$, $\sigma(S-N)$

試験	コンクリート	試験者	S-N 曲線	200万回強度	$\sigma(\log N)$	$\sigma(S-N)$
圧縮疲労	普通コンクリート	阪田 ¹⁸⁾	$S = -0.056 \cdot \log N + 1.032$	0.68	0.46~0.57	0.983
		松下 ¹⁴⁾ **	$S = -0.054 \cdot \log N + 1.000$	0.66	0.73~1.48	0.713
		井上 ¹⁶⁾	$S = -0.069 \cdot \log N + 1.069$	0.63	0.38~0.46	0.537
曲げ疲労	普通コンクリート (舗装用)	McCall ¹⁵⁾	$S = -0.064 \cdot \log N + 0.958$	0.55	1.63~3.38	1.970
		小梁川 ⁶⁾ **	$S = -0.111 \cdot \log N + 1.339$	0.64	0.70~1.14	0.732
		Gomez ⁸⁾	$S = -0.066 \cdot \log N + 1.015$	0.60	0.43~1.21	0.645
	転圧コンクリート	井上 ⁷⁾	$S = -0.105 \cdot \log N + 1.213$	0.55	0.65~0.89	0.574
		Gomez ⁸⁾	$S = -0.065 \cdot \log N + 1.008$	0.60	0.45~1.36	0.677
		筆者	$S = -0.095 \cdot \log N + 1.105$	0.51	0.65~1.49	0.786

(注) * 下限応力が2%の場合のデータのみ使用

** 粗骨材最大粒径20mmで下限応力0%のデータのみ使用

用した転圧コンクリートの順に低くなっている。また、200万回疲労強度をSでみれば、舗装用コンクリートの場合は0.64、一般の転圧コンクリートの場合は0.55、コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリートの場合は0.51であった。

KlainberとLeeの研究¹⁷⁾によると、砂利と低強度の石灰岩砕石を使用したコンクリートの疲労試験結果から、骨材の強度がコンクリートの疲労強度に影響をおよぼすことが明らかにされている。一方、コンクリート再生骨材と一般骨材の強度をBS 812の骨材破碎試験で測定したところ、静的圧縮荷重下における破碎値はそれぞれ27.9%と21.2%であり、コンクリート再生骨材の方が破碎しやすいことが認められた。したがって、コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリートの疲労強度が、一般骨材を使用した場合よりも低いのは、コンクリート再生骨材の強度が低いことに起因していると推測される。

(2) 疲労寿命のばらつき

図-8は、表-5に示した疲労寿命の全測点と式(6)のS-N曲線についてN軸方向のばらつきの標準偏差 $\sigma(S-N)$ を求め、S-N曲線の $\pm 1\sigma(S-N)$ と $\pm 2\sigma(S-N)$ の範囲を示したものである。ここで、全データの分散が対数正規分布とみなせることから、 $-1\sigma(S-N)$ と $-2\sigma(S-N)$ の曲線はそれぞれP(N)が0.86と0.98のS-N曲線に相当している。これらの曲線から200万回疲労強度をSでみれば、P(N)=0.86のとき0.43、P(N)=0.98のとき0.36となる。

また、表-7は、他者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解析を行い、同様の手法によりP(N)=0.50のときのS-N曲線、200万回疲労強度、疲労寿命の全測点とS-N曲線の $\sigma(S-N)$ を求めた結果を示したものである。表には、各Sレベルにおける疲労寿命の標準偏差 $\sigma(\log N)$ の範囲も示している。表からわかるように、1950年代の研究のため試験の精度が劣っていたと思われるMcCallら

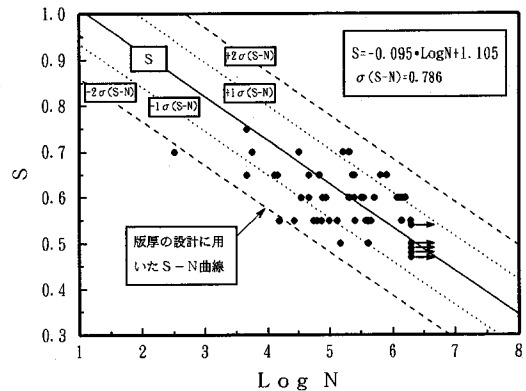


図-8 疲労寿命のばらつきとS-N曲線の関係

のデータを除くと、その差はあまりないものの本試験結果が最も大きなばらつきを示している。

コンクリートの疲労寿命のばらつきは静的強度のばらつきと密接に関係している。また、静的強度に関しては圧縮強度よりも曲げ強度の方がばらつきが大きいことから、曲げ疲労寿命のばらつきが大きいことは、一般によく知られている。まして本試験の場合は、対象としたコンクリートが締固めに起因する密度のばらつきを考慮しなければならない転圧コンクリートであり、さらに性状のばらつきが大きいコンクリート再生骨材を使用しているため、その疲労寿命のばらつきは当然大きいものと懸念されていた。表-7の結果はこれらのことを裏付けているといえる。

(3) P-S-N曲線

ここで、Weibull分布とMcCall分布により本試験のP-S-N曲線を求め、P(N)=0.50, 0.86, 0.98のときの200万回疲労強度について、対数正規分布によ

る解析結果との比較を試みる。

ある生存確率P（一般には P(N)=0.50）に対する S-N曲線が与えられていれば一つの方程式で P-S-N 関係式が表され、さらに、各破壊点と S-N曲線との N軸方向の偏差に関する統計分布が求められる。その場合、Nの偏差の分布が S-N曲線によって与えられるNから独立していると仮定すれば、S-N 曲線からのすべての偏差が同じグループに属することになり、大きな分布変数が得られる。

式(7)は、各Sレベルの疲労寿命分布に Weibull 分布を当てはめて、対数正規分布の場合と同様に、 $m(\log N)$ と S の関係を N軸方向の最小二乗法で求めた P(N)=0.50 のときの S-N曲線である。

$$S = -0.077 \cdot \log N + 1.005 \quad (7)$$

Weibull 分布関数¹⁹⁾は、偏差を χ とすれば以下の式で表される。

$$P = \exp\left\{-\left[\frac{(\chi - \chi_0)}{\beta}\right]^{1/\alpha}\right\} \quad (8)$$

ここで、

α, β, χ_0 : 実験から求まる定数

任意のデータに対する偏差 χ_i が

$$\chi_i = \log N_i - (13.05 - 12.99 \cdot S_i) \quad (9)$$

であることを考えると、式(8)は以下ようになる。

$$P = \exp\left\{-\left[\frac{(\log N - 13.05 + 12.99 \cdot S - \chi_0)}{\beta}\right]^{1/\alpha}\right\} \quad (10)$$

式(10)を線形推定法により解析すると、以下に示す α, β, χ_0 が得られる。

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.2255 \\ \beta &= 0.3668 \\ \chi_0 &= -0.3375 \end{aligned}$$

図-9は、P(N)と偏差 χ の関係について、上記定数の Weibull分布関数と各破壊点の実測データを比較したものであるが、両者はほぼ一致しており上記定数の信頼性が高いことを示している。そこで、これらの定数を式(10)に代入すると P-S-N曲線は以下のようになる。

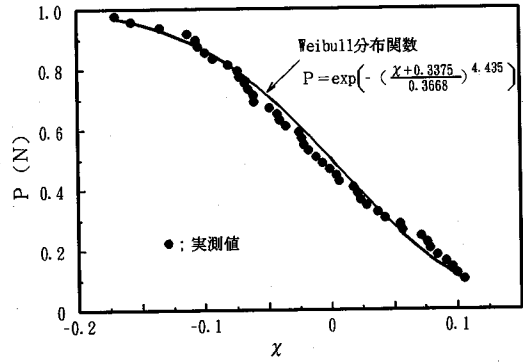


図-9 P(N)と偏差 χ の関係

表-8 200万回疲労強度

コンクリートの種類	P(N)	分布形		
		Weibull 分布	対数正規 分布	McCall 分布
再生骨材使用 転圧コンクリート	0.50	0.50	0.51	0.55
	0.86	0.45	0.43	0.48
	0.98	0.40	0.36	0.41
(本試験)	差*	0.10	0.15	0.14
一般骨材使用 転圧コンクリート	0.50	0.54	0.55	0.62
	0.86	0.50	0.49	0.55
	0.98	0.46	0.43	0.46
(井上・尾本)	差*	0.08	0.12	0.16

(注) * 差 : P(N)が0.50と0.98のときの差

$$P = \exp\left[(-2.726 \cdot \log N - 35.41 \cdot S + 34.66)^{4.435}\right] \quad (11)$$

一方、McCall は、無筋コンクリートの曲げ疲労試験結果から、P-S-N曲線として次式¹⁵⁾を提案している。

$$P = 10^{-a S^b (\log N)^c} \quad (12)$$

ここで、

a, b, c : 実験より求まる定数

式(12)は二度両辺の対数をとって線形に変換すれば、

$$\log S = A + B \cdot \log(\log N) + C \cdot \log(-\log P) \quad (13)$$

となり、本試験の P-S-N曲線を式(13)で表すと次式が得られる。

$$\begin{aligned} \log S &= 0.1929 + 0.5134 \cdot \log(\log N) \\ &+ 0.08459 \cdot \log(-\log P) \end{aligned} \quad (14)$$

表-8はWeibull分布と対数正規分布および McCall 分布における 200万回疲労強度を比較したものである。Weibull分布と McCall分布の場合の 200万回疲労強度は式(11)と式(14)の P-S-N曲線から、対数正規分布の場合は S-N曲線の偏差から求めたものである。また表には、井上と尾本の一般骨材を使用した転圧コンクリートの疲労試験結果⁷⁾より求めた 200万回疲労強度を参考値として示している。

表からわかるように、どの分布形を適合してもその結果得られる 200万回疲労強度に大差はみられないが、P(N)が中央付近においては Weibull分布と対数正規分布がほぼ一致した値を示している。また、再生骨材使用の有無に着目して P(N)が 0.50と0.98のときの200万回疲労強度の差をみると、Weibull分布と対数正規分布では再生骨材を使用した方が0.02~0.03 大きい値を示しているのに対し、McCall分布では逆に0.02小さい値を示している。前述のように、再生骨材を使用すると疲労寿命のばらつきが大きくなることから、Weibull分布と対数正規分布の示した傾向の方が妥当であろう。

以上のことから、本試験の疲労寿命の解析においては、既存の研究結果^{14)、16)}と同様に、Weibull分布と対数正規分布の適合性が比較的良好といえる。ただし、疲労寿命の極値を解析する場合には、極値における信頼性が高い Weibull分布を適合することが望ましい。

(4) 版厚の設計

次に、本試験で求めた S-N曲線により、コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリート舗装版の版厚の設計を行い、一般骨材を使用した舗装用コンクリートとの比較を試みる。

版厚の設計は、舗装用コンクリートの場合と同様にコンクリート舗装要綱の設計公式に則り行った。疲労抵抗を求めるための S-N曲線としては、コンクリート再生骨材を用いた場合は本試験で得た S-N曲線を、一般骨材を用いた場合は岩間の実験より得られたセメントコンクリート舗装要綱の S-N曲線をそれぞれ使用した。なお、本試験で得た S-N曲線としては、平均曲線 (P(N)=0.50) よりも安全側のものを採用すべきであるがその基準が明確でないため、ここでは図-8の安全側へ2σ (S-N) 移行した S-N曲線 (P(N)=0.98) を採用した。この S-N 曲線は次式で表せる。

$$S = -0.095 \cdot \log N + 0.956 \quad (15)$$

表-9 コンクリート版の設計条件と交通条件

設計条件	交通条件 (台/日)		
	輪荷重 (t)	A交通	B交通
路盤支持力係数: $K_{rs}=10 \text{ kgf/cm}^2$ コンクリート版強度: $\sigma_{ok}=45 \text{ kgf/cm}^2$ (4.41MPa)	0~1	531	2672
ヤング係数: $E=95 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	1~2	38	278
ポアソン比: $\mu=0.25$	2~3	20	153
膨張率: $\alpha=10 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	3~4	10	78
収縮目地間隔: $m=10.0 \text{ m}$	4~5	5	42
4車線, 車線幅: 3.00m 以上	5~6	3	26
郊外部, 十分な路肩幅あり	6~7	3	14

設計条件と交通条件は、両者とも同一でそれぞれ表-9に示した標準的なものを用いた。表中の交通条件は、A交通の場合20年間の5t換算輪数が代表値である30万輪に、またB交通の場合も同様に 200万輪に相当するものであり、0~7t の輪荷重の分布は一般国道における車両重量調査結果²⁰⁾に準拠させたものである。

版厚の選定では、各種の版厚について20年間の輪荷重応力と温度応力の合成応力を算出して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。

その結果、コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリート舗装版の版厚はA交通で28cm、B交通で32cmが得られ、一般骨材を使用した舗装用コンクリートの場合のA交通で 22cm、B交通で 23cmと比較すると6~9 cm 厚くなる事が確認された。これは岩間の実験において繰り返し下限応力を上限応力の1/10としていることから、要綱の設計曲線を本試験で採用した応力振幅Sに換算すると約10%下側へ移行することを差し引いても、なおかつ大きいといえる。

したがって、コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリート舗装版については、配合上の対策によりこれ以上の高強度を求めることは現実的でないことや、道路舗装において30cm以上の版厚の採用は一般的でないことを考慮すると、A交通もしくはより交通量の少ない場所を主体に適用すべきであろう。

一方、B交通以上の場所に適用する場合は、上層にアスファルト混合物層を設けてコンクリート版にかかる応力を低減させたり、あるいは下層の盤の強度を高める等の対策が必要となる。

4. まとめ

本研究は、コンクリート副産物より製造した再生骨材を用いた転圧コンクリートの曲げ疲労特性を明

らかにし、舗装への適用性について検討することを目的に行ったものである。

以下、本研究の範囲内で明らかになった点を列記する。

- (1) コンクリート再生骨材は、骨材周辺に付着しているモルタルの影響により、一般骨材よりも吸水率が大きく強度が小さい。そしてこれらの性状は、一般骨材の領域からモルタルの領域まで幅広くばらついている。
- (2) コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリートの $P(N)=0.5$ のS-N曲線は、既存の研究データを本試験と同様の条件で解析することにより求めた一般の舗装用コンクリートや転圧コンクリートのS-N曲線よりも低い値を示した。すなわち、200万回疲労強度をSで表すと、舗装用コンクリートが0.64、一般の転圧コンクリートが0.55に対し再生骨材を使用した転圧コンクリートは0.51であった。これは、コンクリート再生骨材の強度が低いことに起因していると推測される。
- (3) コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリートの疲労寿命のばらつきは、他研究者の各種コンクリートの疲労試験結果と比較すると、最も大きい値を示した。これは、疲労試験特有のばらつきに再生骨材の性状のばらつきと締固めに起因する密度のばらつきが加算されたからである。
- (4) 同一生存確率での200万回疲労強度について、Weibull分布およびMcCall分布を適合したP-S-N曲線から求めた場合と、対数正規分布で解析して求めた場合とを比較すると、Weibull分布と対数正規分布の適合性が比較的好かった。したがって、コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリートの疲労寿命の解析に際しては、対数正規分布とWeibull分布のいずれを適合させても差し支えないといえる。ただし、疲労寿命の極値を解析する場合は、極値における信頼性が高いWeibull分布を適合することが望ましい。
- (5) コンクリート再生骨材を使用した転圧コンクリート舗装版の版厚の設計を、 $P(N)=0.98$ のS-N曲線をもとに行くと、一般骨材使用の場合よりもA交通で6cm、B交通で9cm厚くしなければならないことがわかった。したがって、主な適用場所としてはA交通以下の場所が対象となる。

謝辞：本研究の遂行にあたり、曲げ疲労試験では山口大学工学部兼行啓治技官をはじめ多くの卒業生から多大な協力を受けました。ここに深謝します。

参考文献

- 1) 建設省：総合的建設廃棄物対策研究会報告書，1992。
- 2) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト 建設事業への廃棄物利用技術の開発報告書，1986。
- 3) 岩間 滋：コンクリート舗装の構造設計に関する研究，土木研究所報告，第117号，1964。
- 4) 小梁川 雅，福田 正：含水変化を受けたコンクリート供試体の曲げ強度，土木学会論文集，第354号/V-2（ノート），pp.157～160，1985。
- 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) 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，第426号/V-14，pp.151～157，1991。
- 7) 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。
- 8) Jorge Gomez and Charles F.Scholer：Fatigue strength of roller compacted concrete，4th international conference on concrete pavement design and rehabilitation，Session 5A Evaluation and testing，pp.505～518，1989。
- 9) 井伊谷綱一：粉体工学ハンドブック，朝倉書店，pp.55。
- 10) 岡田 清，六車 照：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp.99。
- 11) (財)建築業協会：再生骨材および再生コンクリート使用基準（案）・同解説一添付資料一，pp.18～20，1977。
- 12) 石橋忠良，児島孝之，阪田憲次，松下博通：疲労（コンクリート構造物の耐久性シリーズ），pp.47，技報堂出版，1987。
- 13) 浜田純夫，中川建治，成岡昌夫：疲労試験における途中打ち切りデータの処理に関する研究，土木学会論文集，第189号，pp.99～105，1971。
- 14) 松下博通，徳光善治：生存確率を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集，第284号，pp.127～138，1979。
- 15) John T. McCall：Probability of fatigue failure of plain concrete，*Journal of A.C.I.*，Vol.55，PP.233～244，1958。
- 16) 井上正一，西林新蔵，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，第451号/V-17，pp.59～67，1992。
- 17) Klainber F.W and D-Y.Lee：The effects of air content，water-cement ratio and aggregate type on the flexural fatigue strength of plain concrete，*Journal of A.C.I.*，SP-75，PP.111～131，1982。
- 18) 阪田憲次，木山英郎，西林新蔵：統計的処理によるコンクリートの疲労寿命に関する研究，土木学会論文報告集，第198号，pp.107～114，1972。
- 19) Weibull W.：Fatigue testing and the analysis of results，*Pergamon press*，1961。
- 20) 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。

(1995. 8. 25受付)

STUDY ON THE BENDING FATIGUE PROPERTIES OF ROLLER COMPACTED CONCRETE MIXED WITH RECYCLED AGGREGATES

Ryota KOBAYASHI, Sumio HAMADA and Mitsuru UEDA

An equation for the S-N curve is proposed from the test data obtained in the present study. This equation was determined from the relationship between the applied stress S and the failure stress repetition numbers N , which are assumed to be distributed in a logarithmic normal function. The equation provides rather lower strength compared with the equations for pavement concrete and RCC.

Relationships of life probability P and the S-N curve were determined based on the McCall and Weibull distributions, where life probability of fatigue strength at 2 million repetitions was determined. From these results the applicability of the recycled aggregate to the RCC is also investigated.