

各種骨材を使用したコンクリートの疲労解析

小林良太¹・加藤康弘²・浜田純夫³

¹正会員 工博 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 工修 前田道路(株) 中国支店(〒730 広島県広島市鶴見町4-22)

³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)

筆者らは、コンクリート再生骨材を使用した舗装用の普通コンクリートと転圧コンクリートについて曲げ疲労試験を実施するとともに、既存の研究結果より一般骨材を使用した場合の同一条件下における疲労特性を求め、これらの比較検討を行った。その結果、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するとともに、コンクリートの曲げ疲労においても修正Goodman 線図の関係が成立すること、得られた疲労寿命分布は Weibull 分布関数と対数正規分布関数にはよく適合するが McCall 分布関数への適合性は劣ることなどが明らかになった。

Key Words : cement concrete pavement, fatigue probability, fatigue analysis, recycled aggregate, modified Goodman diagram

1. まえがき

コンクリート塊は建設副産物の中で最も発生量が多いものであるが、アスファルト混合物塊ほど有効にリサイクルされておらず、新たな用途開発が広く望まれている。コンクリート塊の道路での高付加価値な再生利用方法の一つとして舗装用コンクリートの骨材としての利用があげられるが、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コンクリートの品質性状に影響をおよぼすことが懸念されている。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へ使用するには疲労特性を明確にしておくことが必要である。

そこで筆者らは、コンクリート塊よりモルタル付着量の少ない再生骨材を製造し、これを使用した舗装用コンクリートについて曲げ疲労試験を実施し疲労特性に関する研究を行ってきた。

研究では、モルタル付着量の異なる2種類の再生骨材を使用し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。^{1), 2)}

本文は、研究の概要を示すとともに、他研究者の疲労試験結果を筆者らの試験と同一条件に修正する

際に使用したコンクリートの曲げ疲労における修正Goodman 線図の関係、試験で得られた疲労寿命分布の Weibull 分布関数、McCall 分布関数、対数正規分布関数への適合性について述べるものである。

2. 疲労試験の概要

(1)使用材料

表-1は、本研究で使用した2種類の再生骨材の性状を示したものである。これらの再生骨材は、建設副産物として発生したコンクリート塊に一般的な破碎と分級による再生処理を施した後、粗骨材からさらにモルタル分を除去するために実験用処理機による骨材同士のみみ合わせ作用を加えることにより製造したものである。これらの再生骨材は、骨材の周囲に除去できなかったモルタル分が多少残っているため、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。

1981年から5年間行われた総プロ「建設事業への廃棄物利用技術の開発」では、重要土木構造物を含む広範囲のコンクリートに使用できるように再生骨材の品質基準³⁾を示している。これによれば再生骨材は品質により粗骨材が3種類、細骨材が2種類に区分されており、表-1の再生骨材(粗骨材)は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。そこで、本文ではこれらの再生骨材を1種あるいは2種再生骨材と称している。

一方、その他の材料は生コン工場で使用されてい

表-1 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	—
モルタル付着量(%)	16.8	—	23.5	—
アスコン混入率(%)	6.5	—	9.2	—
粗粒率	—	3.37	—	3.19

表-2 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/㎡)					
				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} : 52 kgf/cm² (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, スランプ : 2.5cm, 空気量 : 4.5%
* NCの混和剤 Ad1 : AE減水剤, Ad2 : 空気連行剤 (ℓ/㎡)
* RCCの混和剤 Ad1 : 超硬練り用遅延剤 (ℓ/㎡)

る標準的なものを使用した。

(2)コンクリート

NCとRCCの配合は表-2に示したとおりであり、練り混ぜは2軸パグミルミキサを用い各バッチごとに静的強度試験用と疲労試験用の供試体を作製した。供試体の寸法は15×15×53cmである。

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⁴⁾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気温20℃、湿度60%の条件下でNCの場合は100～430日間、RCCの場合は90～170日間の気中養生を行った。

(3)試験方法

静的強度試験および疲労試験における載荷方法は、スパンが45cmの3等分2点載荷である。また、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り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NCの場合は基準強度の80～55%の範囲で6段階に、同様にRCCの場合は90～70%の範囲で5段階に設定し疲労試験を実施した。下限応力はすべ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の表示は、一般に図-1に示す応力振幅 S_r か上限応力比 S_o のいずれかの考え方を基本にするが、本試験では下限応力 S_{min}' の影響が無視できないことを考慮して応力振幅 S_r の考え方を採用した。また、繰り返し載荷回数200万回になっても供試体が破壊しない場合は、試験を途中打ち切りとした。

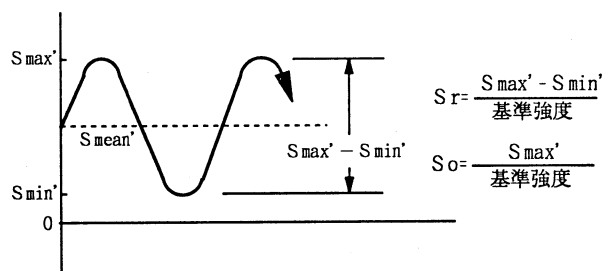


図-1 疲労試験における応力

3. コンクリートの曲げ疲労における修正 Goodman 線図

(1)修正 Goodman 線図

応力 S と破壊回数 N の関係である疲労曲線（以下、 S - N 曲線）の縦軸は、前述のように応力振幅 S_r か応力比 S_o で表されるが、これらの相違点は S_r を用いることにより下限応力を考慮に入れた S - N 曲線図が描けることにある。

材料が疲労破壊しない限界を疲労限といい、疲労限における上限応力比 S_{max} と下限応力比 S_{min} の関係を耐久線図という。なお、本文では、上限応力を S_{max}' 、上限応力比 (= S_{max}' / 基準強度) を S_{max} で表している。

Goodman は金属材料において応力振幅の大きさが静的破壊荷重に関連しているとし、一定の繰返し回数に対する上限荷重と下限荷重の関係、つまり耐久線図として Goodman 線図を提案した。

Graf ら⁵⁾ は、コンクリートの200万回圧縮疲労強度に対する配合、載荷速度、応力振幅および材齢等の影響についての実験を行い、上限および下限応力と疲労強度とを関係づけることによってコンクリートの圧縮疲労に関する応力振幅の影響を示す修正 Goodman 線図を作成した。ここで、疲労強度とは、 S - N 曲線より求められたある繰返し回数（一般には200万回）における S_r あるいは S_o のことであり、

表-3 下限応力比を変化させた疲労試験結果

Smax	Smin	r	N	P(N)	Smax	Smin	r	N	P(N)	
0.85	0.05	1	38	0.800	0.75	0.20	1	36,644	0.800	
		2	117	0.600			2	98,278	0.600	
		3	151	0.400			3	259,216	0.400	
		4	253	0.200			4	521,796	0.200	
0.80		1	445	0.800	0.85	0.35	1	47,492	0.800	
		2	1,119	0.600			2	243,791	0.600	
		3	3,310	0.400			3	326,867	0.400	
		4	3,602	0.200			4	638,964	0.200	
0.75		1	1,868	0.800	0.80		1	504,833	0.833	
		2	5,303	0.600			2	1,175,329	0.667	
		3	8,971	0.400			3	1,873,126	0.500	
		4	9,961	0.200			4	2,000,000	0.333	
0.85		0.20	1	5,501	0.800		0.75	1	1,584,573	0.833
			2	5,752	0.600			2	2,000,000	0.667
			3	9,185	0.400			3	2,000,000	0.500
			4	15,188	0.200			4	2,000,000	0.333
0.80	1		7,036	0.800	r : 破壊回数が小からの順位 N : 破壊回数 P(N) : 生存確率					
	2		10,012	0.600						
	3		48,278	0.400						
	4		61,662	0.200						

また、修正 Goodman 線図とは、図-2に示すように、S_{min}の大きさにより200万回疲労強度（S_{max}）がどのように変化するかを表現したもの⁶⁾である。

一方、松下ら⁷⁾は、1万、10万、100万、200万および1000万回疲労強度についてコンクリートの圧縮疲労試験を行い、任意繰返し回数に対する耐久線図についても修正 Goodman 線図の関係が成立することを示した。

このように、修正 Goodman 線図のコンクリートの圧縮疲労への適用性についてはいくつかの研究が行われているが、曲げ疲労への適用性に関する研究は少ない。

以上のことを踏まえて、本研究ではまず予備試験として3段階のS_{min}による曲げ疲労試験を行い、コンクリートの曲げ疲労においてS_{min}がどのように影響をおよぼすのかを検討し、その場合の修正 Goodman 線図の関係を求めた。

(2) 下限応力比と200万回疲労強度

コンクリートの曲げ疲労における修正 Goodman 線図の関係を求めるために、S_{max}が0.85、0.80、0.75の3段階の場合についてS_{min}を0.05、0.20、0.35に変化させて疲労試験を実施した。ただし、コンクリートの種類はNCとし、使用材料は生コン工場で使用されている一般的なものを採用した。なお、繰返し回数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。

疲労試験結果は表-3に示すとおりである。この結

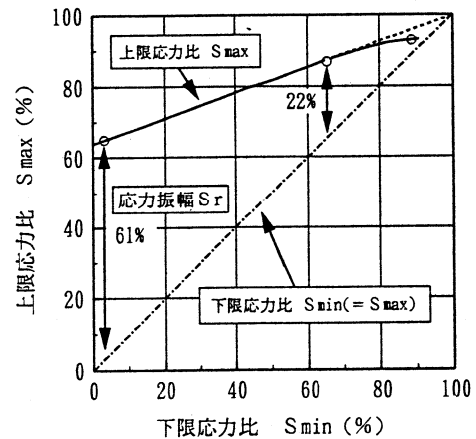


図-2 修正 Goodman 線図⁶⁾

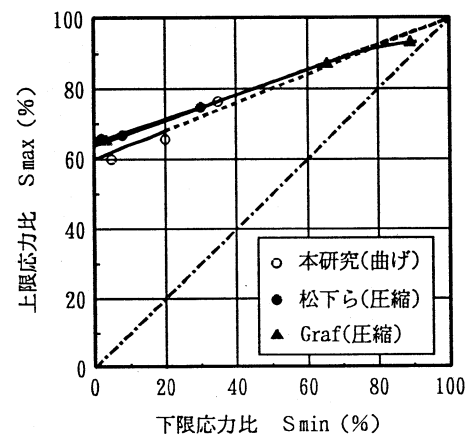


図-3 S_{min}の違いによる200万回疲労強度の変化

果を基にそれぞれのS_{min}の場合について各応力振幅における破壊回数のばらつきを対数正規分布関数で近似することによりS-N曲線を求め、さらにそれぞれの200万回疲労強度を求めた。

図-3は修正 Goodman 線図と同様に縦軸にS_{max}、横軸にS_{min}をとったグラフ上に、本試験結果ならびに松下らと Graf らの200万回疲労強度をプロットしたものである。図中の点線は本試験結果が修正 Goodman 線図に従うとしたときの近似直線である。

図からわかるように、圧縮疲労については、配合や供試体の形状寸法が異なるにもかかわらずほぼ同一の耐久線となった。一方、曲げ疲労については、耐久線の傾きは圧縮疲労よりも大きく、同一S_{min}で比較すれば圧縮疲労よりも小さいS_{max}で同等の200万回疲労強度となる結果が得られた。

これらのことから、本研究の範囲内においては、舗装用コンクリートの曲げ疲労寿命はS_{min}の影響を受けており、その耐久線図には修正 Goodman 線図の関係が成立することが確認できた。そこで、次章においてはこの関係を用いて他研究者のデータを

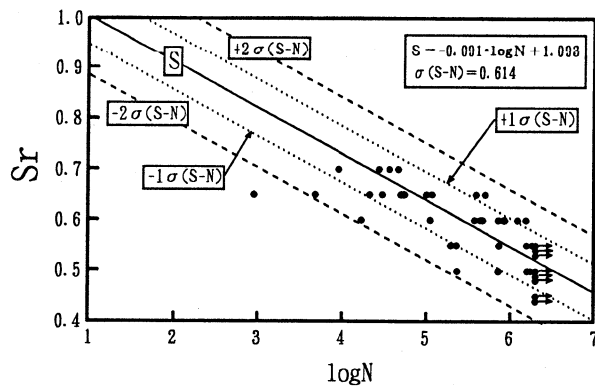


図-4 疲労寿命のばらつきとS-N曲線
(N C, 1種再生骨材使用)

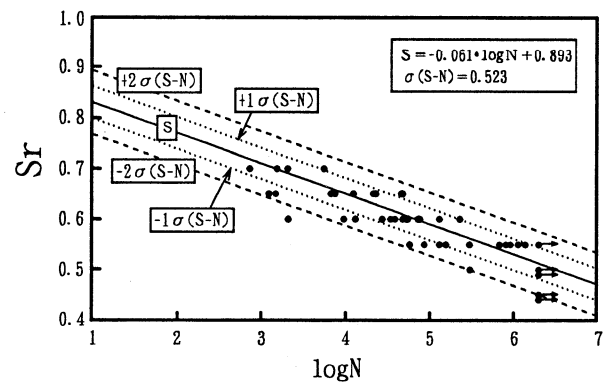


図-5 疲労寿命のばらつきとS-N曲線
(N C, 2種再生骨材使用)

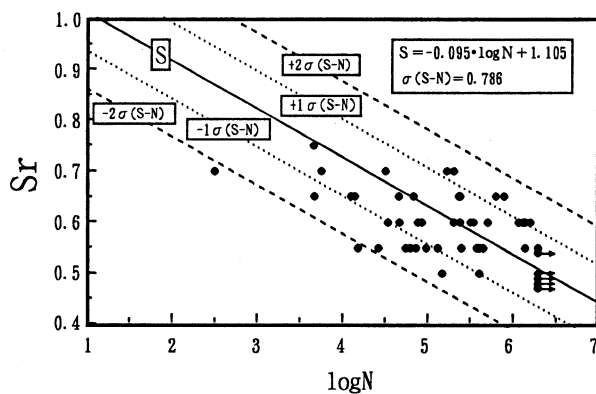


図-6 疲労寿命のばらつきとS-N曲線
(R C C, 1種再生骨材使用)

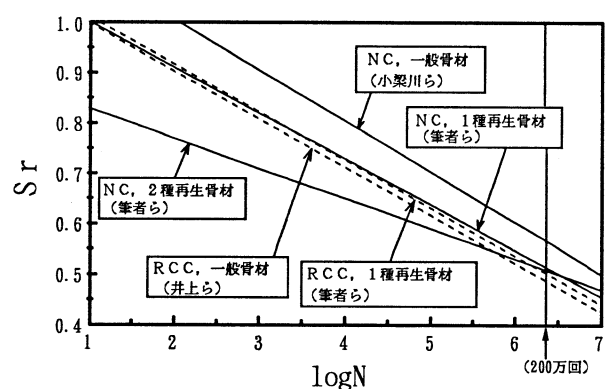


図-7 本研究および他研究者のS-N曲線

本試験と同一条件に修正し、本研究結果との比較検討を行うものとする。

4. 疲労試験結果

疲労試験結果の解析においては、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ので順序統計量の理論を用いて解析し、その結果を基に各応力振幅 S_r における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S-N曲線を求めた。なお、R C Cのデータについては、供試体の締固め程度のばらつきが強度に影響をおよぼしていることが懸念されたので、個々の供試体について密度による強度補正¹⁾を行った。そのため、 S_r の範囲は0.75～0.50になった。

図-4～図-6は、それぞれのS-N曲線と全測点について横軸方向のばらつきの標準偏差 $\sigma(S-N)$ を求め、 $\pm 1\sigma(S-N)$ と $\pm 2\sigma(S-N)$ の範囲を示したものである。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¹⁾ので、 $-1\sigma(S-N)$ と $-2\sigma(S-N)$ の曲線は生存確率 P が0.86と0.98のS-N曲線に相当する。

図-7は、本試験結果とともに、一般骨材を使用したN CとR C Cの疲労特性を検討した小梁川ら⁹⁾と井上ら¹⁰⁾の研究結果から筆者らの試験条件に近いデータを選定して同様の解析を行うことにより求めたS-N曲線を示したものである。Sminを0で試験した小梁川らと井上らの結果については、図-3に示した修正 Goodman 線図の関係を用いて、Sminを本研究と同様の10%に修正している。

図からN Cに着目してみると、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の曲げ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。

なお、S-N曲線は本来 $\log N=1$ において S_r が1.0を示すものであるが、2種再生骨材を使用したN Cの S_r は1.0よりもかなり小さい値を示している。この

ことに関しては、モルタル付着量の多い再生骨材を使用したコンクリートのS-N曲線が片対数グラフにおいて非線形を示すものなのか、あるいは、基準強度の取り方やSrの設定範囲等の試験条件による誤差が影響をおよぼしているのかが明確でない。今後の検討が必要である。

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あるいは小さくなると推測される。

5. 疲労寿命分布の解析

(1) 疲労寿命分布

コンクリート版の疲労試験結果の統計的処理において、その疲労寿命分布がどのような分布理論に適合するのか、あるいはその寿命の平均値やばらつきの大きさをどの程度見込めばよいかの検討は、生存確率Pに関するS-N曲線すなわちP-S-N曲線によって行うことができる。

ある生存確率P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曲線が表され、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。この分布変数を各種分布理論に当てはめて検討を行う訳であるが、このことに関する主な研究としては以下のようなものがある。

Weibull¹¹⁾ および Freudenthal¹²⁾ は、母集団における疲労寿命分布は対数正規分布などの確率分布を示すとしても、実際の疲労試験において破壊する試験片は対数正規分布する母集団から抽出した十分大きな試料中の最弱のものであるとして、極小値の確率論を適用し最小値の分布、いわゆる Weibull 分布関数を導いた。

McCall¹³⁾ は、無筋コンクリートについて曲げ疲労試験を行い、McCall 分布関数と呼ばれる独自の数学的モデルを提案することにより疲労寿命のばらつきを初めて統計的に取り扱った。

沢野ら¹⁴⁾ は、合成桁のスタッドジベルについて疲労試験を行い、途中打ち切りのデータを含む結果の解析に Weibull 分布関数を用いた。

また、浜田ら¹⁵⁾ は軽量コンクリートの疲労解析に McCall 分布関数を適用した。

松下ら⁷⁾ および井上ら¹⁶⁾ は、コンクリートの圧縮疲労試験による疲労寿命分布の Weibull 分布関数、McCall 分布関数および対数正規分布関数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関数にも適合するが Weibull 分布関数と対数正規分布関数の適合性が比較的良好、簡便さを考慮すると対数正規分布関数に当てはめて処理することが実用的であるとしている。

これらのことを考慮し、本研究では以下において対数正規分布関数とともに用いられることの多い Weibull 分布関数と McCall 分布関数を取りあげ、本研究結果への適合性を検討する。

(2) Weibull 分布関数による極値解析

実測値における極値は工学分野では特に重要な意味をもつことが多い。例えば、構造安全性の問題では作用荷重の最大値と抵抗強度の最小値が構造物の安全性と信頼性を保証するうえで最も適切なパラメータとなることと同様に、極端な条件を扱う問題においては実測値における最大値あるいは最小値のみが意味のあるデータとなり、極値を扱う確率と統計の重要性が高くなる。過去の極値観測データや実験データから最大値あるいは最小値の予測を行うときに理論的根拠を与えるものとして極値分布の漸近理論があるが、その中で一般によく使用されているのが疲労と材料破壊の研究に関連して Weibull によって導かれた Weibull 分布関数である。

各応力振幅ごとの偏差の幅(変動係数)が同じ場合に、コンクリート強度および最小応力を考慮した偏差を χ とすれば、Weibull 分布関数は式(1)で表される。いま、疲労試験結果から求められたS-N曲線が式(2)で表されるとすると、このS-N曲線から任意のデータに対するN軸方向の偏差 χ_i は式(3)となる。 χ_i は順序統計量の理論に従い小さい順から並べられた第i番目の値である。

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

$$S_i = A \cdot \log N_i + B \quad (2)$$

$$\chi_i = \log N_i - \left(\frac{S_i - B}{A} \right) \quad (3)$$

ここで、

$\alpha, \beta, \chi_0, A, B$: 実験から求まる定数

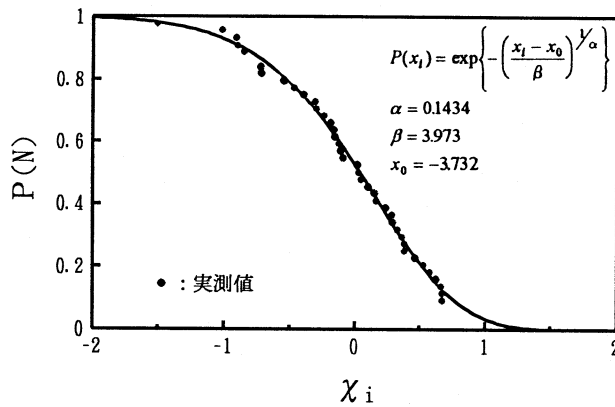


図-8 Weibull 分布関数で解析した $P(N)$ と偏差 χ_i の関係
(NC, 2種再生骨材使用)

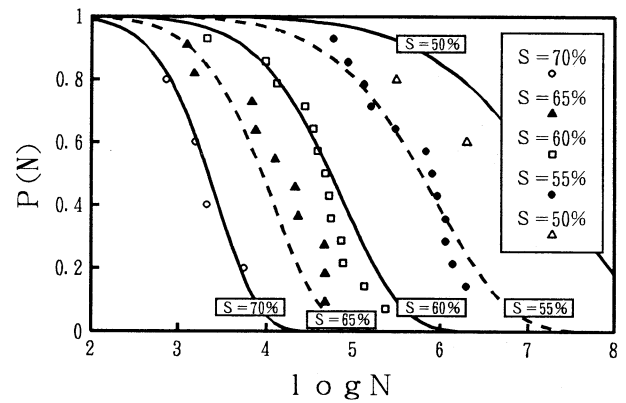


図-9 McCall 分布関数で解析した $P(N)$ と $\log N$ の関係
(NC, 2種再生骨材使用)

式(3)を式(1)に代入すれば Weibull 分布関数によるP-S-N曲線は式(4)のようになる。

$$P(\chi_i) = \exp \left[- \left\{ \frac{\log N_i - \left(\frac{S_i - B}{A} \right) - \chi_0}{\beta} \right\}^{\frac{1}{\alpha}} \right] \quad (4)$$

なお、浜田ら⁸⁾は、途中打ち切りデータを含む場合のコンクリートの疲労試験結果に Weibull 分布関数を適合し、 α 、 β 、 χ_0 を求めるにあたってそれぞれが最小分散になるような最良線形推定法を導いている。本研究もこの解析方法を用いて Weibull 分布関数による解析を行った。

図-8は、本実験データの中から2種再生骨材を使用した舗装用コンクリートの疲労試験結果を代表例として抽出し、これに Weibull 分布関数を適合させて上記の手法で α 、 β 、 χ_0 の値を算出して求めたP-S-N曲線と各破壊点の実測データを $P(N)$ と偏差 χ_i の関係について比較したものである。Weibull 分布関数と各破壊点はほぼ一致しており、これらの定数の信頼性が高いことを示している。

(3) McCall 分布関数による解析

McCall は無筋コンクリート版の曲げ疲労試験を行いその試験結果を初めて統計的に取り扱い、 $P(N)$ が $N=1$ 、 $N \rightarrow \infty$ に対し、 $P(N)=1$ および $P(N) \rightarrow 0$ となり、あるいは $S=0$ 、 $S \rightarrow 1$ に対して、 $P(N)=1$ および $P(N) \rightarrow 0$ となるような独自の数学的モデルを提案し、 P 、 S 、 N の関係を式(5)で示した。式(5)は二度両辺の対数をとって線形に変換すると式(6)のようになる。

$$P = 10^{-a \cdot S^b (\log N)^c} \quad (5)$$

$$\log S = A + B \cdot \log(\log N) + C \cdot \log(-\log P) \quad (6)$$

ここで、

a, b, c, A, B, C : 実験から求まる定数

McCall は図式を用いた方法で実験結果から式(6)を直接求めたが、本研究では最小二乗法を用いて定数 A, B, C を求めた。

図-9は、Weibull 分布関数の場合と同様に、2種再生骨材を使用したNCについて McCall 分布関数を適合させて上記の手法で A, B, C の値を算出し、これと代入したP-S-N曲線と各破壊点の実測データを $P(N)$ と $\log N$ の関係について比較したものである。

図からわかるように、本試験結果の曲げ疲労寿命分布は McCall 分布関数との適合性があまりよくなく、松下らおよび井上らが McCall 分布関数にも適合するとした圧縮疲労寿命分布の場合とは異なる結果が得られた。

(4) 対数正規分布関数による解析

対数正規確率紙上において、同一応力振幅における疲労寿命の分布が直線で近似できるとき、その直線の $P(N)=0.50$ における N がその応力振幅における平均疲労寿命となる。つまり、回帰直線を式(7)で表せば、定数 A および B は式(8)によって決定される。

$$t = A \cdot \log N + B \quad (7)$$

表-4 $P(N)=0.50$ 以上および 0.80 以上の実験値に対する適合度 F_{50} と F_{80} ($\times 10^{-3}$)

コンクリート	使用骨材	試験者	F_{50} ($\times 10^{-3}$)			F_{80} ($\times 10^{-3}$)		
			Weibull 分布関数	対数正規 分布関数	McCall 分布関数	Weibull 分布関数	対数正規 分布関数	McCall 分布関数
NCP	一般骨材	小梁川 ⁹⁾	1.16	1.78	20.09	0.90	1.73	12.41
	1種再生骨材	筆者	0.93	0.81	23.60	0.34	0.52	9.91
	2種再生骨材	筆者	0.39	0.66	5.97	0.56	0.39	3.45
RCCP	一般骨材	井上 ¹⁰⁾	1.07	3.33	5.39	1.34	5.61	2.56
	1種再生骨材	筆者	0.19	1.14	20.84	0.18	2.36	10.19

$$\begin{cases} A = \frac{n \cdot \sum (t \cdot \log N)}{n \cdot \sum (\log N)^2 - (\sum \log N)^2} \\ B = \frac{(-\sum \log N) \cdot \sum (t \cdot \log N)}{n \cdot \sum (\log N)^2 - (\sum \log N)^2} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 t は正規分布曲線における対称軸からの距離であるから、 $P(N) \geq 0.50$ のときは $t \geq 0$ であり、 $P(N) < 0.50$ のときは $t < 0$ である。また、 t の定義より、求めたい $P(N)$ の値がわかっているならば正規積分表を用いて t の値を求めることができる。

このようにして求めた各応力振幅ごとの破壊回数と、それぞれの応力振幅の関係を直線近似させれば、その $P(N)$ での $S-N$ 曲線すなわち $P-S-N$ 曲線が描けることになる。

浜田ら⁸⁾ は、途中打ち切りデータを含む場合の疲労試験結果の対数正規分布関数による解析において、平均値と標準偏差がそれぞれ最小分散になるような最良線形推定量を導いた。本研究もこの解析方法を用いて対数正規分布関数による解析を行った。

図-10は、Weibull 分布関数や McCall 分布関数の場合と同様に、2種再生骨材を使用した舗装用コンクリートの試験結果を対数正規分布関数で解析したときの $P-S-N$ 曲線について、 $P(N)$ と偏差 χ_i の関係を用いて各破壊点の実測データとの比較を行ったものである。

図からわかるように、実測データは曲線とほぼ一致した傾向を示しているため、これらは対数正規分布関数に従っているとみなすことができる。

(5) 各分布関数の適合性の検定

ここでは、本試験結果および他研究者の結果を基に、上述の3種類の分布関数の適合性について比較検討を行う。

適合性の検討は、同一実測値に対する生存確率について、つまり P の軸方向に対する適合度の検定により行うものとする。そこで、同一実験値に対する

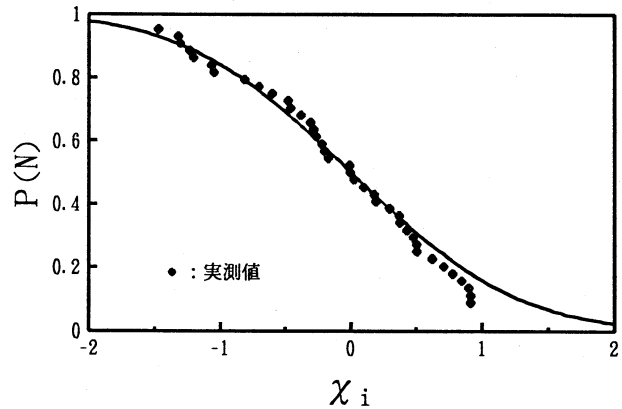


図-10 対数正規分布関数で解析した $P(N)$ と χ_i の関係
(N C, 2種再生骨材使用)

分布形から得られる生存確率の理論値と式(9)⁸⁾ に示した順序統計量から得られる期待値との差の二乗の平均値を式(10)に示すように適合度 F とした。

$$P(N_i) = 1 - \frac{r}{n+2} \quad (9)$$

$$\text{適合度 } F = \frac{\sum (\text{理論値} - \text{期待値})^2}{n} \quad (10)$$

ここで、 $P(N_r)$: 生存確率の期待値⁸⁾

r : 破壊時の繰返し回数の小さいものからの順位

n : 同一条件で試験した供試体個数

表-4は、本試験および他研究者の結果における生存確率の期待値が 0.50 以上および 0.80 以上の値に対する適合度 F_{50} と F_{80} を示したものである。ここで、Weibull 分布関数および対数正規分布関数の生存確率は全実験値に対する生存確率を用いたのに対し、McCall 分布関数の場合はその分布形の性質上、各応力振幅に対する生存確率を用いて検討した。

この表から、Weibull 分布関数と対数正規分布関数の適合度はほぼ同程度であること、McCall 分布関数の適合度は Weibull 分布関数および対数正規分布関数と比べてかなり劣っていることがわかる。

さらに、Weibull 分布関数においては、 F_{80} でよい適合性を示しており、極値での適合性がよいとされていることを裏付ける結果が得られた。

6. まとめ

本文における主な結論を以下に列記する。

- (1) 舗装用コンクリートの曲げ疲労は繰り返し応力の下限応力の影響を受けており、その耐久線図には修正 Goodman 線図の関係が成立する。
- (2) 再生骨材を用いることによりコンクリートの曲げ疲労強度は低下する。これは、再生骨材に付着しているモルタルの影響によるものと推測される。
- (3) 使用骨材の種類が同一の場合、RCCの曲げ疲労強度はNCのそれと比較すると、同等かあるいは小さくなると推測される。
- (4) 各種骨材を使用したコンクリートの曲げ疲労解析においては、Weibull 分布関数と対数正規分布関数がよい適合性を示す。一方、McCall 分布関数はこれらの分布関数に比べ適合性が劣っている。

参考文献

- 1) 小林良太, 浜田純夫, 上田 満: 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, 土木学会論文集, No. 546/VI -32, pp. 133~143, 1996.
- 2) 小林良太, 浜田純夫, 加藤康弘: コンクリート再生骨材を使用したコンクリート舗装版の曲げ疲労特性に関する研究(ノート), 土木学会論文集第VI部門投稿中
- 3) 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.
- 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) Graf, O., Brenner, E.: Versuche zur Ermittlung der Widerstands fähigkeit von Beton gegen oftmals wiederholte Druckbelastung, 2. Teil, Bulletin No. 83, Deutscher Ausschuß für Eisenbeton, 1936.
- 6) Nordby, G.M.: Fatigue of Concrete-A Review of Research, Journal of A.C.I., Vol.55, PP.191~220, 1958.
- 7) 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.
- 8) 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, 土木学会論文報告集, 第189号, pp.99~105, 1971.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Weibull, W.: Fatigue testing and the analysis of results, Pergamon press, 1961.
- 12) Freudenthal, A. M., E. J. Gumbel: On the statistical interpretation of fatigue tests, Proc. Roy. Soc. London, A216, pp. 309~332, 1953.
- 13) John T. McCall: Probability of fatigue failure of plain concrete, Journal of A.C.I., Vol.55, PP.233~244, 1958.
- 14) 沢野邦彦, 浜田純夫, 若林武忠, 成岡昌夫: 直径19 mm スタッドジベルの押し抜き疲労強度に関する研究, 土木学会論文報告集, 第174号, pp. 1~9, 1970.
- 15) 浜田純夫, 成岡昌夫: 軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する一実験, 土木学会論文報告集, 第 176 号, pp.83~88, 1979.
- 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, No. 451/V-17, pp. 59~67, 1992.

BENDING FATIGUE STRENGTH OF PAVEMENT CONCRETES WITH NORMAL AND RECYCLED AGGREGATES

Ryota KOBAYASHI, Yasuhiro KATO and Sumio HAMADA

This paper presented fatigue strength of plain pavement concrete and roller compacted concrete with recycled aggregate. Comparative studies on the bending fatigue strength conducted with other researchers are also included. Bending fatigue strength characteristics of recycled aggregate concrete are emphasized. In the study the modified Goodman diagram is fairly well applicable for the determination of fatigue strength of recycled aggregate concrete. Weibull and the normal probability distribution functions agree well with the experimental results.