

コンクリート舗装版の曲げ疲労に関する基礎的研究

A BASIC STUDY ON THE FLEXURAL FATIGUE OF CONCRETE PAVEMENT SLAB

小梁川 雅*・国府勝郎**・福田 正***

By Masashi KOYANAGAWA, Katsuro KOKUBU and Tadashi FUKUDA

The flexural fatigue strength of concrete is a basic character of pavement design. Accordingly, this research is aimed at clarifying the effects of stress ratio ($\sigma_{min}/\sigma_{max}$) and maximum size of coarse aggregate to the flexural fatigue strength of concrete by conducting various tests. As results, it was found that the effects of the both factors are minimal and that they need not be considered at actual designing. Due to the fact that fatigue phenomena reveals scatter in general, flexural fatigue equations were obtained with the consideration of probability of failure. In comparing the life of concrete pavements calculated from test results and the results of condition survey of concrete pavements in Tohoku Region, the validity of flexural fatigue equations were verified.

1. 緒 論

わが国のコンクリート舗装の設計・施工の技術基準となっている、セメントコンクリート舗装要綱¹⁾(以下要綱)付録のコンクリート版厚設計法では、コンクリート舗装の破損はコンクリート版の曲げ疲労によって生じるとしている。実際にはコンクリート舗装は、コンクリート版、路盤、路床など複数の材料よりなる多層の構造であり、作用する外的要因も交通荷重のほかに気象作用など複雑であって、その破壊機構は必ずしも単純ではない。しかしコンクリート版の破壊が、交通荷重と温度変化の合成作用による曲げ疲労の結果生じるという現行設計法の設計概念は、コンクリート舗装の破壊機構を最も一般的に表現していると考えられる。

そこで本研究においても、コンクリート版の疲労破壊を基本とする従来の設計概念を踏襲することとし、コンクリートの曲げ疲労試験と、これの検証のためのコンクリート舗装の現況調査を実施した。特に本研究の柱とな

るコンクリートの曲げ疲労に関しては、わが国では要綱の設計法に採用された岩間の研究²⁾以降、本格的な研究がない。そこで本研究では次の諸点に留意して試験を実施した。

著者らの実験³⁾によれば、コンクリートの曲げ強度は、供試体の水分変化による影響を大きく受ける。そこで長時間に及ぶ疲労試験中に、供試体の水分が変化しないように細心の注意をはらうことにした。

またコンクリート版には瞬時的な交通荷重載荷による応力と、一日を周期とした温度変化による応力との合成応力が繰り返し作用する。したがってこの場合、コンクリート版に作用する繰り返し応力の最小応力はゼロとはならず、温度応力が最小応力となる。このように最小応力がゼロでない応力波形が作用する場合には、コンクリートの曲げ疲労は最小応力と最大応力の比、すなわち応力比の影響を受けることが Kesler ら⁴⁾によって報告されている。コンクリート版におけるこの応力比の影響の存在は、Domenichini ら⁵⁾が指摘するように、コンクリート版の疲労破壊機構を考察する際に重要であり、本研究における検討項目の1つとした。

疲労破壊現象にはばらつき、すなわち確率的性質を有することが、多くの研究者によって指摘されている⁶⁾。そこで疲労試験結果を統計的に検討することにより、破

* 正会員 工修 秋田高専助手 土木工学科
(〒011 秋田市飯島文京町1-1)

** 正会員 工博 セメント協会主任研究員
(〒114 北区豊島4-17-33)

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市荒巻青葉)

Table 1 Mix Proportion of Concrete.

Aggregate Maximum Size (Gmax) mm	Slump cm	Air Content %	Water Cement Ratio %	Sand Percentage %	Unit Weight (kg/m ³)				
					Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Admixture
20	8±1.5	4±0.5	4.7	3.5	150	319	650	1217	0.798
40	8±1.5	4±0.5	4.4	3.4	153	348	621	1210	0.870

壊確率を考慮した疲労曲線を得ることとした。

最後にこの曲げ疲労曲線を用いてコンクリート舗装の疲労寿命の計算を行い、これと東北地方で実施したコンクリート舗装の現況調査結果と対比することによって、曲げ疲労曲線の検証を試みた。

2. 曲げ疲労試験

(1) 使用材料および配合

本試験で用いたセメントは普通ポルトランドセメントであり、骨材は大井川産川砂、奥多摩産砕石を用いた。

試験に用いたコンクリートは、スランプ8.0 cm、空気量4.0%、材令28日曲げ強度52 kg/cm²(45 kg/cm²×1.15)を目標とした。粗骨材の最大寸法は20 mm、40 mmの2種類とした。表—1にその配合を示す。なお、混和剤としてAE減水剤ボゾリス No 5 Lを使用した。

練りまぜは100 l強制練りミキサーを用いて行い、各バッチごとに若干の変更はあるが、静的強度試験用3本、疲労強度試験用6~7本の供試体を作製した。供試体の寸法は15×15×53 cmであり、載荷試験まで水温20°Cの恒温水槽で養生を行った。疲労試験は供試体作製から2か月以降に開始した。

(2) 試験方法

載荷方法は静的強度試験、疲労強度試験ともにスパン45 cmの3等分点載荷とした。試験装置は島津サーボパルサ EHF-U 50を用いた。

各バッチにおける静的曲げ強度ならびに試験開始材令を表—2に示す。粗骨材最大寸法20 mmの場合の13バッチの平均曲げ強度および標準偏差は、それぞれ54.1 kg/cm²、4.8 kg/cm²であった。また粗骨材最大寸法40 mmの場合の5バッチでは53.1 kg/cm²、2.8 kg/cm²であった。なお疲労試験においては、各バッチの平均曲げ強度を表—2に示すように2桁の数値に丸めて基準値として用いた。

前述のように、著者らの実験によればコンクリートの曲げ強度は、試験時における供試体内の水分変化の影響を敏感に受ける。特に疲労試験の場合のように、水中養生供試体を長期間乾燥状態に置いた場合にその影響は大きい。そこで供試体中の水分を初期状態のまま保持するために、供試体の周囲を水分を含んだスポンジで包み、さらに試験中に水分を補給することによって乾燥を防いだ。しかしこの方法では、供試体中の水分保持が確実に

Table 2 Results of Flexural Strength Test.

Gmax mm	Batch No.	Flexural Strength kg/cm ²			Means kg/cm ²	Age days	
		1	2	3			
20	1	62.2	56.8		60	56	
	2	49.1	43.7	45.0	46	56	
	3	53.0	61.3		57	56	
	4	47.5	57.9		53	56	
	5	60.3	61.1		61	56	
	6	54.0	51.1	51.0	52	56	
	7	73.3	62.6	63.9	53.0	63	56
	8	46.4	47.4	47.3	50.0	48	56
	9	50.7	55.4	51.9		53	56
	10	53.2	51.4	49.7		51	56
40	11	54.0	53.7	55.5		54	98
	12	57.2	55.4	50.0		54	62
	13	58.4	51.1	47.1	49.1	51	71
	14	44.0	48.3	53.9	53.9	50	70
	15	57.6	54.9	49.2	52.9	54	148
	16	59.2	57.3	59.4	56.4	58	90
	17	51.6	53.1	53.6	48.3	52	127
	18	51.9	51.8			52	217

Table 3 Number of Specimens.

Gmax mm	Stress Level	Stress Ratio		
		0.0	0.3	0.5
20	0.90	5	7	0
	0.85	0	7	5
	0.82	0	1	0
	0.80	5	8	0
	0.79	0	1	0
	0.75	1	1	0
	0.73	0	1	0
	0.70	6	4	4
	0.68	0	1	0
	0.60	4	3	0
40	0.90	5	5	0
	0.80	5	5	0
	0.70	3	3	0
	0.60	3	3	0

ない懸念があったので、途中から供試体表面にグリースを塗布し、さらにビニール樹脂膜で被覆する方法に変更した。

疲労試験の応力波形は、周波数5 Hzの正弦曲線変化とした。この繰り返し応力波形の最小応力(σ_{min})と最大応力(σ_{max})の比を応力比($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$)と、また繰り返し応力波形の最大応力と静的強度(σ_b)の比を応力レベル($S = \sigma_{max}/\sigma_b$)と定義することとする。

実験は最初に粗骨材最大寸法20 mmのコンクリートについて行った。この場合、応力比について0.0、0.3、0.5の3種類、応力レベルについて0.60、0.70、0.80、0.85、0.90の5種類を設定し試験を行うこととした。

次に粗骨材最大寸法40 mmのコンクリートを用いて、応力比については0.0、0.3の2種類、応力レベルについては0.60、0.70、0.80、0.90の4種類を設定し試験を行うこととした。しかし、実際に設定された応力レベ

ル、応力比および供試体数は表-3 に示すとおりとなった。なお、 $R=0.0$ の場合の繰り返し応力波形の最小値としては、 $\sigma_{min}=1.0 \text{ kg/cm}^2$ を与えている。また疲労試験では、ある繰り返し回数で供試体が破壊しない場合、試験を途中打ち切りとするが、本試験では途中打ち切りの回数は、2 000 000、3 000 000、5 000 000 回の場合がある。

(3) 試験結果

a) 応力比の影響

表-4 は粗骨材最大寸法 20 mm の場合の疲労試験結果である。表中の→表示はその繰り返し回数で破壊せずに途中打ち切りとなった供試体を示している。

既往の研究によれば^{4),5)}、コンクリートの疲労現象は応力比の影響を受け、応力レベルと破壊に至る繰り返し回数、応力比の間に線形関係があると報告されている。そこで、応力レベル $S=0.90, 0.85, 0.80$ の3段階において、各応力比ごとのデータ集団の平均値と分散を比較することによって、応力比の影響を検討した。平均値の検討に対しては t 検定を、分散の検討に対しては F 検定を用いた。

その結果、応力レベル $S=0.90, 0.80$ に関しては、応力比 $R=0.0$ と 0.3 の各データ集団間に危険率 5% で有意の差が認められなかった。また応力レベル $S=$

0.85 に関しては、応力比 $R=0.0$ と 0.3 の各データ集団間に、平均値については危険率 5% で、分散については危険率 2% で有意の差は認められなかった。したがって、各応力レベルにおける疲労試験データは、全体としてみれば同一の母集団より抽出されたものと考えて差し支えない。つまり本研究の場合、コンクリート舗装の実用設計上問題となる応力レベル $S \geq 0.80$ の領域では応力比の影響は認められない。

一方、応力レベル $S \leq 0.75$ の領域では、応力比によって途中打ち切りデータの個数に差がみられる。応力レベル $S=0.75 \sim 0.68$ では、応力比 $R=0.0$ の場合 7 個中 2 個が途中打ち切りであるのに対して、 $R=0.3$ の場合には 7 個中 5 個、 $R=0.5$ の場合には 4 個すべてと途中打ち切り個数が増えている。応力レベル $S=0.60$ の場合にも同様の傾向がある。このように応力レベル $S \leq 0.75$ の領域では応力比の影響が認められる。

b) 粗骨材最大寸法の影響

表-5 は粗骨材最大寸法 40 mm の場合の疲労試験結果である。応力レベル $S=0.90, 0.80$ において、粗骨材最大寸法 20 mm、40 mm の場合の各データ集団の平均値と分散を、前述と同様に t 検定、 F 検定によって検討した。

その結果、いずれの応力レベルにおいても、粗骨材最

Table 4 Results of Fatigue Test, $G_{max}=20 \text{ mm}$.

Stress Ratio=0.0						Stress Ratio=0.3												
S	Flexural Strength kg/cm ²	Maximum Stress kg/cm ²	Minimum Stress kg/cm ²	Cycles to Failure	Batch No.	S	Flexural Strength kg/cm ²	Maximum Stress kg/cm ²	Minimum Stress kg/cm ²	Cycles to Failure	Batch No.							
0.90	60	54.0	1.0	8900	1	0.90	46	41.4	12.4	591	2							
	57	51.3	1.0	4147	3		58	52.2	15.7	27387	4							
	61	54.9	1.0	2845	5		52	46.8	14.0	14059	6							
	63	56.7	1.0	498	7		48	43.2	13.0	2283	8							
0.80	53	47.7	1.0	24924	9	51	45.9	13.8	2834	10								
	60	48.0	1.0	15768	1	54	48.6	14.6	264	12								
	57	45.6	1.0	42025	3	54	48.6	14.6	1767	12								
	61	48.8	1.0	1236430	5	54	45.9	13.8	692454	11								
0.75	63	50.4	1.0	31857	7	54	45.9	13.8	315	11								
	53	42.4	1.0	1366653	9	54	45.9	13.8	1274	11								
	53	39.8	1.0	339286	9	54	45.9	13.8	811	11								
	60	42.0	1.0	588196	1	54	45.9	13.8	451	11								
0.70	57	39.9	1.0	2052576→	3	54	45.9	13.8	960208	11								
	61	42.7	1.0	112346	5	54	45.9	13.8	17721	11								
	63	44.1	1.0	2100000	7	58	47.7	14.3	1547	4								
	53	37.1	1.0	2633311	9	46	36.8	11.0	32046	2								
0.60	54	37.8	1.0	2400000→	12	58	46.4	13.9	2144904	4								
	60	36.0	1.0	1097358	1	52	41.6	12.5	5980	6								
	57	34.2	1.0	3414672→	3	48	38.3	11.5	2235640→	8								
	61	36.6	1.0	2130000→	5	51	40.8	12.2	23471	10								
Stress Ratio=0.5	63	37.8	1.0	203000	7	48	38.4	11.5	9525	8								
	0.85	S	Flexural Strength kg/cm ²	Maximum Stress kg/cm ²	Minimum Stress kg/cm ²	Cycles to Failure	Batch No.	54	43.2	13.0	3089274	12						
								54	43.2	13.0	3685	12						
								0.79	54	36.5	12.9	5440000→	11					
								0.75	51	38.3	11.5	23343	10					
	0.70	0.73	58	42.4	12.7	2487420→	4	46	32.2	10.7	2131614→	2						
								52	36.4	10.9	2500000→	6						
								48	33.6	10.1	2962300→	8						
								51	35.7	10.7	213775	10						
	0.68	0.68	54	36.5	11.0	5000000→	11	46	27.6	8.3	3925540→	2						
								52	31.2	9.4	2800000→	6						
								0.60	0.60	54	32.4	9.7	5270000→	12	54	32.4	9.7	5270000→

大寸法の相違による有意差は危険率5%で認められなかった。したがって応力レベル $S=0.90, 0.80$ では、粗骨材最大寸法の影響を無視し、すべてのデータが同一の母集団に属していると考えて差し支えない。

一方、応力レベル $S \leq 0.70$ の領域では、粗骨材最大寸法 20 mm の場合には、途中打ち切り個数が 25 個中 16 個であるのに対して、粗骨材最大寸法 40 mm の場合には 12 個中 11 個と増えている。このように応力レベル $S \leq 0.70$ の領域では粗骨材最大寸法の影響が認められ、最大寸法 40 mm の場合の供試体の疲労寿命は長くなる傾向がみられる。

c) 曲げ疲労曲線

以上のように本研究の場合、応力レベル $S \geq 0.80$ の領域では、応力比、粗骨材最大寸法とも疲労寿命には影響を与えないことが確かめられた。そこで、疲労試験結

果から応力レベルと繰り返し回数の関係、いわゆる疲労曲線を求める際に、 $S=0.90, 0.80$ におけるすべてのデータに加えて、 $S=0.85, 0.70$ における最大寸法 20 mm の場合のデータを用いることとした。

疲労試験においては、同一応力レベルで試験を行ってもその疲労寿命はばらつきを示す。このばらつきは疲労現象に固有の性質と考えられるので、疲労曲線を求める場合には、統計的な検討を加えることが必要である。本研究では、得られた疲労試験結果に次の順序統計量の方法⁷⁾を適用することによって、疲労寿命の発生確率、すなわち各供試体の破壊確率を推定した。

いま、一連の疲労試験によって n 個の疲労寿命 N が得られた場合、それを小さい順に並べ、

$$N_1 \leq N_2 \leq N_3 \leq \dots \leq N_i \leq \dots \leq N_n$$

とすると、 N_i における破壊確率 $P(f)_i$ の期待値は次式

Table 5 Results of Fatigue Test, $G_{max}=40$ mm.

S	Stress Ratio=0.0					Stress Ratio=0.3					
	Flexural Strength kg/cm ²	Maximum Stress kg/cm ²	Minimum Stress kg/cm ²	Cycles to Failure	Batch No.	S	Flexural Strength kg/cm ²	Maximum Stress kg/cm ²	Minimum Stress kg/cm ²	Cycles to Failure	Batch No.
0.90	5.0	45.0	1.0	23236	1.4	0.90	5.8	52.2	15.7	952	1.6
	5.0	45.0	1.0	4506	1.4		5.2	46.8	14.0	4464	1.7
	5.4	48.6	1.0	5714	1.5		5.2	46.8	14.0	29944	1.7
	5.2	46.8	1.0	20670	1.8		5.2	46.8	14.0	3907	1.8
	5.2	46.8	1.0	29972	1.8		5.2	46.8	14.0	1444	1.8
0.80	5.0	40.0	1.0	1483938	1.4	0.80	5.8	46.4	13.9	5467467→	1.6
	5.0	40.0	1.0	422222	1.4		5.2	41.6	12.5	10394	1.7
	5.0	40.0	1.0	243861	1.4		5.2	41.6	12.5	7582	1.7
	5.2	41.6	1.0	3011816→	1.8		5.2	41.6	12.5	3004949→	1.8
	5.2	41.6	1.0	744841	1.8		5.2	41.6	12.5	51261	1.8
0.70	5.0	35.0	1.0	5602698→	1.4	0.70	5.8	40.6	12.2	2275491	1.6
	5.0	35.0	1.0	6016425→	1.4		5.2	36.4	10.9	5812252→	1.7
	5.4	37.8	1.0	5615110→	1.5		5.2	36.4	10.9	5536073→	1.7
	5.0	30.0	1.0	6079032→	1.4		5.8	34.8	10.4	5690962→	1.6
	5.4	32.4	1.0	5923645→	1.5		5.2	31.2	9.4	6766727→	1.7
0.60	5.4	32.4	1.0	6447044→	1.5	0.60	5.2	31.2	9.4	5093817→	1.7
	5.4	32.4	1.0	6447044→	1.5		5.2	31.2	9.4	5093817→	1.7

Table 6 Probability of Failure.

m	Stress Level = 0.90		Stress Level = 0.85		Stress Level = 0.80		Stress Level = 0.70	
	Cycles to Failure	Probability of Failure	Cycles to Failure	Probability of Failure	Cycles to Failure	Probability of Failure	Cycles to Failure	Probability of Failure
1	264	0.0435	315	0.0769	1547	0.0370	23343	0.0500
2	498	0.0870	451	0.1538	3685	0.0741	112346	0.1000
3	591	0.1304	811	0.2308	5980	0.1111	213775	0.1500
4	952	0.1739	1274	0.3077	7582	0.1481	339286	0.2000
5	1444	0.2174	3060	0.3846	9525	0.1852	588196	0.2500
6	1767	0.2609	3640	0.4615	10394	0.2222	2100000	0.3000
7	2283	0.3043	6232	0.5385	15768	0.2593	2633311	0.3500
8	2834	0.3478	10796	0.6154	23471	0.2963	2052576→	
9	2845	0.3913	17721	0.6923	31857	0.3333	2131614→	
10	3907	0.4348	33656	0.7692	32046	0.3704	2400000→	
11	4147	0.4783	692454	0.8462	42025	0.4074	2487420→	
12	4464	0.5217	960208	0.9231	51261	0.4444	2500000→	
13	4506	0.5652			243861	0.4815	2962300→	
14	5714	0.6087			422222	0.5185	5000000→	
15	8900	0.6522			744841	0.5556	5158619→	
16	14059	0.6957			1236430	0.5926	5320000→	
17	20670	0.7391			1366653	0.6296	5721277→	
18	23236	0.7826			1483938	0.6667	5952101→	
19	24924	0.8261			2144904	0.7037		
20	27387	0.8696			3089274	0.7407		
21	29972	0.9130			2235640→			
22	29944	0.9565			3004949→			
23					3011816→			
24					5440000→			
25					5467467→			

で与えられる。

$$P(f)_i = \frac{i}{n+1} \dots\dots\dots (1)$$

一方、予定した繰返し回数で供試体が破壊せずに途中打ち切りになったデータを含む場合には、破壊確率 $P(f)_i$ の期待値は式 (2) で与えられる。

$$P(f)_i = \frac{i}{n+2} \dots\dots\dots (2)$$

なお、式 (2) における n には途中打ち切り供試体の個数も含まれる。

式 (1), (2) を用いて各応力レベルごとに破壊確率を計算すると表-6 のようになる。ここで、応力レベル $S=0.82, 0.79$ は $S=0.80$ として、 $S=0.75, 0.73, 0.68$ は $S=0.70$ として取り扱った。これらの結果を対数正規確率紙上にプロットすると図-1~4 のようになり、各データはほぼ一直線上に並ぶ。このことは各応力レベルのデータが、対数正規分布の母集団に属することを示している。なお図中の直線は最小二乗法により得たものである。これらの関係から、各応力レベルごとの破壊確率での許容繰返し回数を求めることができ

る。

たとえば、図-1~4 より破壊確率 P が 10%, 15%, 20%, 50% の場合の許容繰返し回数 N を求め、最小二乗法によって疲労曲線を求めると図-5 のようになる。これらの疲労曲線は次式で与えられる。

$$P=10\% : S=1.020-0.063 \log N \dots\dots\dots (3)$$

$$P=15\% : S=1.037-0.062 \log N \dots\dots\dots (4)$$

$$P=20\% : S=1.048-0.061 \log N \dots\dots\dots (5)$$

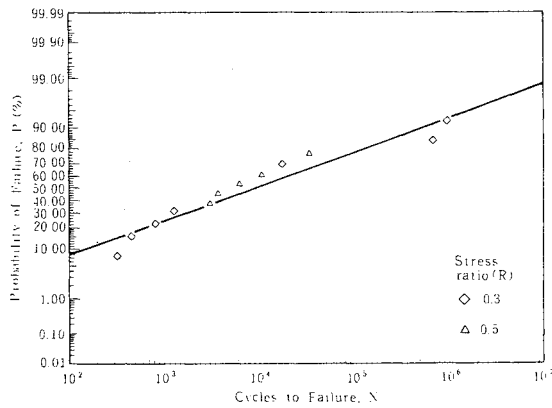


Fig. 2 P-N Diagram, $S=0.85, G_{max}=20$ mm.

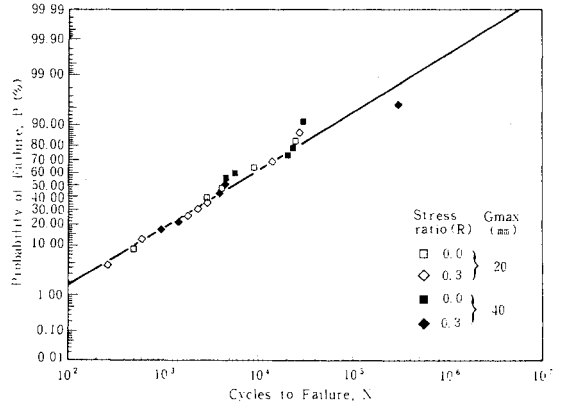


Fig. 1 P-N Diagram, $S=0.90$.

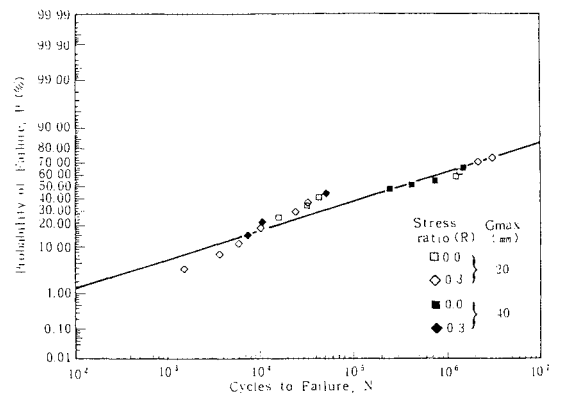


Fig. 3 P-N Diagram, $S=0.80$.

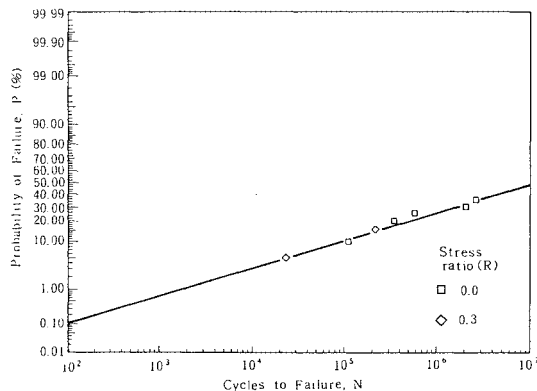


Fig. 4 P-N Diagram, $S=0.70, G_{max}=20$ mm.

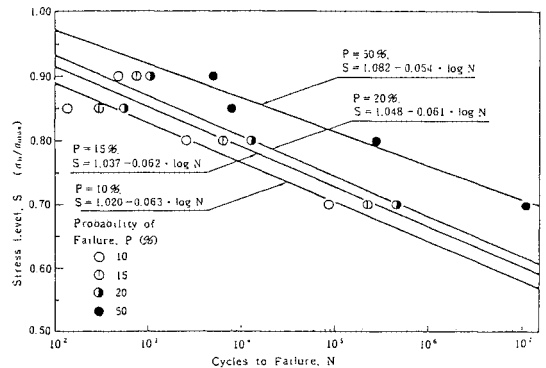


Fig. 5 Fatigue Curve.

$$P=50\% : S=1.082-0.054 \log N \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 $P=50\%$ の疲労曲線は本試験結果の平均線を示すものである。また、正規分布においては標準偏差 σ の下側領域が約 15% の確率をもつので、 $P=15\%$ の場合の疲労曲線を示した。なお、これらの疲労曲線は応力レベル $S=0.70$ 以上の領域で得たものであるが、実用設計において応力レベル $S=0.70$ より小さい領域に拡張しても安全側に使用できる。また、これらの疲労曲線は $N \geq 100$ の条件で求められている。

3. コンクリート舗装版の破損状況

東北地方において実施したコンクリート舗装の現況調査結果により、本研究で得られた曲げ疲労曲線の妥当性を検討した。

(1) 現況調査

交通量などの記録が良好な版厚 25 cm のコンクリート舗装区間 68 か所において、ひびわれ水準と累積大型車交通量との関係を調査した(表一7)⁸⁾。ここで水準Ⅰはひびわれがほとんどないもの、水準Ⅱはひびわれ度が 30 cm/m^2 以下のもの、水準Ⅲはひびわれ度が 30 cm/m^2 以上のものである。なお、ひびわれ度とはコンクリート版の単位面積当たりのひびわれ延長で、道路維持修繕要綱⁹⁾によれば、ひびわれ度 30 cm/m^2 はコンクリート舗装の修繕を実施する際の1つの基準値になっている。ここで、累積大型車交通量 100 万、 500 万、 1000 万台/車線は、 20 年間の日平均大型車交通量に換算すると、それぞれ、 140 台、 700 台、 1400 台/車線に相当する。

表一7によれば版厚 25 cm のコンクリート舗装は、日平均大型車交通量が $140 \sim 700$ 台/車線に対して 90% が、また $700 \sim 1400$ 台/車線に対して 80% が水準Ⅱ以上の成績、すなわち実質的なひびわれ破損なしにその設計寿命を全うしている。換言すれば、それぞれ破壊確率 10% 、 20% で設計寿命 20 年を供用したことになる。

(2) 曲げ疲労曲線の検証

本研究で得られた疲労曲線を用いてコンクリート舗装の疲労計算を行い、現況調査結果と比較することによって疲労曲線の検証を試みる。

疲労計算には要綱付録の方法を一部修正して用いた。修正箇所は次のとおりである。

- (a) 疲労曲線は本研究で得られたものを用いる。
- (b) 要綱付録の設計法では縦目地縁部を設計基準と

しているが、著者らの調査結果^{8),10)}により本研究では横目地縁部を基準とする。

- (c) 車輪の走行位置と走行頻度は著者らの調査結果¹¹⁾を用いる(表一8)。
- (d) 交通輪荷重分布としては、日平均大型車交通量 700 、 1400 台/車線にはほぼ対応するものとして建設省による実測結果¹²⁾の交通量区分 B 、 C を用いる(表一9)。
- (e) 前述の現況調査結果より、 B 交通に対しては破壊確率 10% に相当する式(3)と、破壊確率 20% に相当する式(5)を、 C 交通に対しては破壊確率 20% に相当する式(5)を用いる。
- (f) 計算に用いたコンクリート舗装の構造および、材料の力学定数は以下のとおりとした。

版幅	4.0 m
版厚	25 cm
コンクリートの曲げ強度	45 kg/cm ²
コンクリートのヤング係数	350 000 kg/cm ²
コンクリートのポアソン比	0.25
コンクリートの熱膨張係数	0.00001/°C
路盤支持力係数 (K_{rs})	10 kg/cm ³

以上の条件で疲労計算を行ったところ、計算結果は表一10に示すように、 B 交通で破壊確率 10% の場合および C 交通で破壊確率 20% の場合に、疲労抵抗値は約 0.5 を示しており、計算結果はコンクリート舗装の現

Table 7 Relationship between Cumulative Number of Commercial Vehicles and Cracking Levels for Slab Thickness of 25 cm.

Cum.No.of C.V. ($\times 10^4$ V.P.L.)	No. of Sites, (): %			Total
	I	II	III	
500-1000	7* (44)	6 (37)	3 (19)	16 (100)
100-500	22 (67)	7 (21)	4 (12)	33 (100)
5-100	19 (100)	0	0	19 (100)

* Includes 3 Sites of 1000-2000 $\times 10^4$ V.P.L.

Table 8 Transverse Distribution of Wheel Load Placement and Its Relative Frequency.

Placement of Wheel Load* (cm)	15	45	75	Over 75
Relative Frequency (%)	50	46	2	2

* Distance from the Center of the Most Frequent Passing Position of Wheel Loads

Table 9 Distribution of Wheel Loads¹²⁾

Traffic Volume Level	M.N.T.V.	M.N.C.V.	Number of Wheel Loads											
			0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-12	12-14
B	4986	749	8371	810	420	229	119	79	45	29	15	6.7	4.3	0.57
C	8930	1889	13934	1855	1210	620	335	208	118	59	30	13	8.5	1.6

M.N.T.V. : Mean Number of Total Vehicles (V/day/direction)

M.N.C.V. : Mean Number of Commercial Vehicles (V/day/direction)

Table 10 Calculation Results of Fatigue Damage.

Probability of Failure	Traffic Volume Level	
	B	C
10%	0.546	—
20%	0.154	0.412

況調査結果にほぼ近い結果である。このことは本研究で得られた疲労曲線が妥当であることを示している。

4. 結 論

本研究は、コンクリート舗装設計の基礎となるコンクリートの曲げ疲労現象に対する、応力比、粗骨材最大寸法の影響を明らかにすること、また、破壊確率を考慮した曲げ疲労曲線を得ることを目的として行った。得られた主な結果をまとめると次のようになる。

(1) 従来の研究によれば、コンクリートの曲げ疲労現象に関して、破壊に至る繰返し回数と応力レベル、応力比の間には線形関係があるとされていた。しかし本研究で得られた結果によれば、応力比の影響は実用上無視できる程度に小さい。

(2) 粗骨材最大寸法に関しては、20 mm, 40 mm の場合について疲労試験を行ったが、その影響は無視できる程度に小さい。

(3) 順序統計量の方法を適用することにより、破壊確率を考慮した疲労曲線を得た。このうち、破壊確率 10%, 20% の場合の疲労曲線を用いて、コンクリート舗装の現況調査結果との対比を行い、本研究で得られた疲労曲線の妥当性を検証した。

(4) 本研究で得られた破壊確率 15%, 50% の疲労曲線は、次のとおりである。

$$P=15\% : S=1.037-0.062 \log N$$

$$P=50\% : S=1.082-0.054 \log N$$

ここで、S : 応力レベル

N : 破壊時の繰返し回数 ($N \geq 100$)

謝 辞 : 本研究の主要な部分であるコンクリートの曲げ疲労試験は、セメント協会道路対策専門委員会(主

査: 福田 正) による研究として実施されたもので、その成果¹³⁾の使用をお認めいただいた委員各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) セメントコンクリート舗装要綱, 日本道路協会, 1984.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) John W. Murdock, Clyde E. Kesler: Effect of Range of Stress on Fatigue Strength of Plain Concrete Beams, ACI Journal pp. 221~231, Aug. 1958.
- 5) Domenichini, L. and Marchionna, A.: Influence of Stress Range on Plain Concrete Pavement Fatigue Design, Proceedings of Second International Conference on Concrete Pavement Design, pp. 55~65, 1981.
- 6) たとえば, 横堀武夫: 材料強度学, 岩波書店, 1964.
- 7) 石川 浩: 実働荷重下における機械・構造物疲労寿命の信頼性解析(II), 材料, 第 24 巻, 第 260 号, pp. 121~132, 1975.
- 8) Fukuda, T., Koyanagawa, M. and Murai, S.: Condition Survey of Concrete Pavements and Its Evaluation, Proceedings of Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, pp. 519~523, 1985.
- 9) 道路維持修繕要綱, 日本道路協会, 1979.
- 10) 福田 正・村井貞規・小梁川雅: コンクリート舗装版のひびわれ発生位置に関する研究, 第 16 回日本道路会議論文集, pp. 333~334, 1985.
- 11) 福田 正・遠藤成夫・山崎克範・鈴木登夫: 自動車の走行位置調査結果とそのコンクリート舗装構造への影響, 舗装, pp. 9~13, 1976.
- 12) 飯島 尚・今井 博: 車両重量調査結果の解析, 道路, pp. 42~48, Jun. 1982.
- 13) コンクリートの曲げ疲労強度に関する研究, セメント協会道路対策専門委員会報告 R-3, セメント協会, Dec. 1985.

(1986. 1. 6・受付)