

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

FLEXURAL FATIGUE STRENGTH EQUATION FOR CONCRETE PAVEMENT SLAB
DESIGN IN CONSIDERATION OF PROBABILISTIC PROPERTIES

小梁川 雅*・米谷 裕**・福田 正***

By Masashi KOYANAGAWA, Hiroshi YONEYA and Tadashi FUKUDA

The purposes of this study are to clarify the effect of the static flexural strength of concrete on the fatigue strength equation and to determine the design fatigue strength equation to take the reliability of concrete pavement into account. As a result of the statistical analysis of the fatigue tests, it was found that there is almost no effect of the static strength on the fatigue strength equation for concrete pavement design. By means of the present simulation which took account of the scatters of the fatigue strength, the relationship between the failure probability of the flexural fatigue strength equation and the reliability of concrete pavement was obtained.

Keywords: concrete pavement, fatigue strength equation, reliability

1. 緒 論

著者らは、舗装用コンクリートの曲げ疲労強度に対する応力比（最小応力/最大応力）および粗骨材の最大寸法の影響について実験を行い、すでに報告した¹⁾。本論文では、さらに舗装用コンクリートの静的曲げ強度が疲労破壊に与える影響に関する実験結果と、本研究の総括として、曲げ疲労破壊の確率特性を考慮した舗装用コンクリートの曲げ疲労設計曲線に関する検討結果を報告するものである。

わが国では、舗装用コンクリートの設計曲げ強度は45 kgf/cm²が標準とされ、また、一部に40 kgf/cm²の使用も認められている²⁾。しかし現実には舗装用コンクリートとして出荷されるレディーミクストコンクリートは、文献3)によれば圧縮強度分布で150~300 kgf/cm²の範囲にあり、これを曲げ強度に換算すると、約30~60 kgf/cm²の範囲となる。前回の実験は、現行の設計法²⁾における疲労設計曲線が、設計曲げ強度45 kgf/cm²（配合目標強度52 kgf/cm²）を対象としていることを考慮

して実施したものである。したがって、さらに広範囲の静的曲げ強度のコンクリートに関して、その疲労特性を検討する必要がある。そこで今回の実験では、配合目標強度40 kgf/cm²、60 kgf/cm²のコンクリートに関する疲労試験を行った。

コンクリート舗装の力学的設計法においては、コンクリート舗装の疲労寿命を解析する際に、曲げ疲労曲線は大きな影響をもっている。したがって、コンクリート舗装を合理的に設計するためには、コンクリートの疲労現象の確率的特性を考慮した設計用曲げ疲労曲線を決定する必要がある。このようなことから本研究では、試験結果より曲げ疲労破壊の確率特性を求め、これにモンテカルロシミュレーション手法を適用して、コンクリートの疲労現象のばらつきがコンクリート舗装の寿命に与える影響の解析を行い、コンクリート舗装の設計の際に用いる曲げ疲労曲線について検討した。

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、骨材は秋田県由利郡産山砂、仙北郡産碎石を用いた。粗骨材の最大寸法は20 mmとした。

試験に用いたコンクリートは、前回の実験¹⁾と同様に

* 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)

** 秋田高専技官 土木工学科(同上)

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

Table 1 Mix Proportion of Concrete.

Target Strength kgf/cm ²	Slump cm	Air Content %	Water Cement Ratio %	Sand Per- cent %	Unit Weight (kgf/m ³)				
					Water	Cement	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Admix- ture
40	8.0±1.5	4±0.5	60	35	150	250	652	1273	0.83
60	8.0±1.5	4±0.5	35	32	140	400	566	1264	1.00

スランプ 8.0 cm, 空気量 4.0 % として混合し, 材令 28 日曲げ強度 40 kgf/cm², および 60 kgf/cm² を目標とした。Table 1 にその配合を示す。なお, 混和剤として AE 減水剤ポゾリス No. 8 IMP を使用した。

練りまぜは 50 l 強制練りミキサーを用いて行い, 各バッチごとに静的強度試験用 3 本, 疲労強度試験用 6 本の供試体を作製した。供試体の寸法は 15×15×53 cm で, 載荷試験まで水温 20°C の恒温水槽で養生を行った。疲労試験は供試体強度の安定を考慮して, 材令 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。試験装置は前回の実験と同機種であるサーボパルサー (島津 EHF-U 20) を用いた。

各バッチにおける静的曲げ強度を Table 2 に示す。配合目標強度 (以下目標強度と略す) 40 kgf/cm² の場合の全供試体の平均曲げ強度および標準偏差は, それぞれ 43.9 kgf/cm², 2.68 kgf/cm², また目標強度 60 kgf/cm² の場合では 63.1 kgf/cm², 4.25 kgf/cm² であった。

著者らの別の実験⁴⁾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。そこで, 疲労試験期間における供試体内の水分状態を安定させるために, 前回の実験と同様に供試体の周囲にグリースを塗布し, さらにビニール樹脂薄膜で被覆して疲労試験を行った。

疲労試験の応力波形は, 周波数 5 Hz の正弦曲線変化

Table 2 Results of Flexural Strength Test.

Target Strength kgf/cm ²	Batch No.	Flexural Strength			Mean kgf/cm ²
		kgf/cm ²			
40	1	44.8	46.9	45.0	46
	2	42.9	45.5	49.0	46
	3	45.8	37.4	45.4	43
	4	44.1	43.5	39.8	42
	5	45.5	45.1	43.9	45
	6	40.5	41.7	41.0	41
	7	46.1	44.9	44.1	45
	8	39.6	47.5	43.6	44
60	1	70.0	63.6	69.0	68
	2	59.4	65.3	58.8	61
	3	66.6	64.0	63.1	65
	4	71.2	69.2	65.1	69
	5	65.8	61.2	62.3	63
	6	59.4	58.7	55.3	58
	7	64.7	63.1	65.2	64
	8	57.5	58.4	57.8	58

とした。この繰り返し応力波形の最大応力 (σ_{max}) 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。本研究の疲労試験における応力レベル S は, 0.90, 0.85, 0.80, 0.70 の 4 段階である。各応力レベルにおける供試体数は Table 3 に示すとおりである。

繰り返し応力波形の最小応力は 2.5 kgf/cm² とした。また, 本試験では前回の研究成果¹⁾より, 繰り返し回数 200 万回で供試体が破壊しない場合, 試験を途中打ち切りとした。

(3) 試験結果

Table 4 は, 目標強度 40 kgf/cm² の場合および 60 kgf/cm² 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供試体が破壊せずに, 途中打ち切りとなった供試体を示している。

Table 3 Number of Specimens.

Target Strength kgf/cm ²	Stress Level	Number of Specimens
40	0.90	12
	0.85	12
	0.80	12
	0.70	12
60	0.90	12
	0.85	12
	0.80	12
	0.70	12

Table 4 Results of Fatigue Test.

Target Strength kgf/cm ²	Stress Level			
	0.90	0.85	0.80	0.70
40	1947	979	722515	773439
	663	1865	6671	1423374
	22886	4837	10787	847262
	6359	1372	740	1714121
	17219	1759	4204	2000000→
	1805	4193	10224	109410
	4297	3257	23439	2000000→
	471	1647	38699	1100128
	4801	6666	44809	897491
	1307	45970	32077	67943
	49020	989	50999	1245830
	10423	5455	25838	2000000→
	670	3997	5729	2000000→
	1957	1093	76584	2000000→
733	852	49526	937874	
60	14197	1968	180099	1532671
	3245	2511	66784	2000000→
	952	8897	65603	452906
	14214	1346	3124	2000000→
	22289	13668	75169	622111
	150	4897	10473	2000000→
	319	11345	36637	2000000→
	1081	34699	2000000→	2000000→
	3849	4367	2000000→	2000000→

3. 曲げ疲労に対する静的強度の影響

2種類の目標強度に関する疲労試験結果に、さらに前回に実施した目標強度 52 kgf/cm² の場合の試験結果を補足し、静的強度が異なるコンクリートの疲労破壊特性について応力レベルごとに検討することにした。

Table 4 からわかるように各応力レベルにおいて、疲労試験結果はかなりのばらつきを示している。したがって静的強度の影響を検討する場合には、このばらつきを考慮しなければならない。

本研究では各応力レベルにおいて、それぞれの目標強度の供試体による疲労試験結果を1つの標本集団と考え、それぞれの標本集団が属する母集団の平均値および分散に関して統計的仮説検定を行った。平均値の検定においては「2つの分布の平均値は等しい」ことを、分散の検定においては「2つの分布の分散は等しい」ことを仮説として設定した。そして、平均値の仮説検定には *t* 検定を、分散の仮説検定には *F* 検定を用いた。

検定を行った応力レベルは *S* = 0.90, 0.80 の2段階であり、それぞれの応力レベルに関し、目標強度 40 kgf/cm² と 60 kgf/cm²、60 kgf/cm² と 52 kgf/cm²、40 kgf/cm² と 52 kgf/cm² の場合の疲労試験結果について個々に検討した。その結果、いずれの場合においても平均値、分散双方に関して有意水準 5% で仮説が採択され、応力レベルが高い領域においては、静的強度が異なっても応力レベルと曲げ疲労破壊に至る繰返し数の関係は同一であることが確認された。

一方、応力レベル *S* = 0.70 において、途中打ち切り供試体の割合を比較すると、目標強度 40 kgf/cm² の場合には、12本中3本(25%)であるのに対して、52 kgf/cm² の場合には18本中11本(61%)、60 kgf/cm² の場合には12本中8本(67%)と、目標強度の増加に従って途中打ち切り供試体数の割合が増加している。すなわち静的強度の増加に伴って疲労強度が大きくなる傾向があることがわかる。

4. 曲げ疲労の確率特性

上述のように曲げ疲労寿命に対する静的強度の影響は、応力レベル *S* = 0.70 のデータにおいて若干認められるが、特にコンクリート舗装の設計において疲労解析に大きい影響を与える *S* = 0.80 以上の領域では、静的強度の影響は無視できる。そこで、目標強度 40 kgf/cm²、52 kgf/cm²、60 kgf/cm² のすべてのデータを用いて、新たに曲げ疲労曲線を作成した。

疲労試験においては、各応力レベルにおいて疲労破壊は広範なばらつきを示す (Table 4)。このばらつきは疲労現象に固有の性質であると考えられるので、疲労曲

線の作成にあたっては、統計的検討が必要である。すなわち、各応力レベルごとの疲労試験結果を1つの母集団と考え、その確率分布関数を決定しなければならない。

各母集団に属する供試体の破壊確率は順序統計量の方法によれば、次式によって与えられる。

$$P_n = \frac{i}{n+1} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、*P_n* : 各応力レベルの疲労寿命を小さい順に並べた場合の *i* 番目の供試体の破壊確率

n : 各応力レベルの試験供試体個数

また、途中打ち切りとなった供試体を含む場合には、破壊確率は次式によって与えられる⁹⁾。

Table 5 Probability of Failure of Specimens.

i	S=0.90		S=0.85		S=0.80		S=0.70	
	C.F.	P _r	C.F.	P _r	C.F.	P _r	C.F.	P _r
1	150	0.021	315	0.027	740	0.020	2.3E4	0.022
2	264	0.043	451	0.054	1547	0.039	6.8E4	0.046
3	319	0.064	652	0.081	3124	0.059	1.1E5	0.068
4	471	0.085	811	0.108	3685	0.078	1.1E5	0.090
5	498	0.106	979	0.135	4204	0.098	2.1E5	0.114
6	591	0.128	989	0.162	5729	0.118	3.4E5	0.136
7	663	0.149	1093	0.189	5980	0.137	4.5E5	0.159
8	670	0.170	1274	0.216	6671	0.157	5.9E5	0.182
9	733	0.192	1346	0.243	7582	0.177	6.2E5	0.205
10	952	0.213	1372	0.270	9525	0.196	7.7E5	0.227
11	952	0.234	1647	0.297	1.0E4	0.218	8.5E5	0.250
12	1081	0.255	1665	0.324	1.0E4	0.235	9.0E5	0.273
13	1307	0.277	1759	0.351	1.0E4	0.254	9.4E5	0.296
14	1444	0.298	1966	0.378	1.1E4	0.275	1.1E6	0.318
15	1767	0.319	2511	0.405	1.6E4	0.294	1.2E6	0.341
16	1805	0.340	3060	0.432	2.3E4	0.313	1.4E6	0.364
17	1947	0.362	3257	0.460	2.3E4	0.333	1.5E6	0.386
18	1957	0.383	3640	0.487	2.6E4	0.353	1.7E6	0.409
19	2283	0.404	3997	0.514	3.2E4	0.373	2.1E6	0.432
20	2834	0.426	4193	0.541	3.2E4	0.392	2.6E6	0.455
21	2845	0.447	4367	0.568	3.2E4	0.412	2.0E6→	
22	3245	0.468	4837	0.595	3.7E4	0.431	2.0E6→	
23	3849	0.489	4897	0.622	3.9E4	0.451	2.0E6→	
24	3907	0.511	5455	0.649	4.2E4	0.471	2.0E6→	
25	4147	0.532	6232	0.676	4.5E4	0.490	2.0E6→	
26	4297	0.553	6666	0.703	4.6E4	0.510	2.0E6→	
27	4464	0.575	8897	0.730	5.1E4	0.529	2.0E6→	
28	4506	0.596	1.1E4	0.757	5.1E4	0.549	2.0E6→	
29	4801	0.617	1.1E4	0.784	6.6E4	0.569	2.0E6→	
30	5714	0.638	1.4E4	0.811	6.7E4	0.588	2.0E6→	
31	6359	0.660	1.8E4	0.838	7.5E4	0.608	2.0E6→	
32	8900	0.681	3.4E4	0.865	7.7E4	0.628	2.0E6→	
33	1.0E4	0.702	3.5E4	0.895	1.6E5	0.647	2.0E6→	
34	1.4E4	0.723	4.6E4	0.919	2.4E5	0.667	2.0E6→	
35	1.4E4	0.745	6.9E5	0.948	4.2E5	0.686	2.0E6→	
36	1.4E4	0.766	9.6E5	0.973	7.2E5	0.706	2.0E6→	
37	1.7E4	0.787			7.4E5	0.726	2.0E6→	
38	2.1E4	0.809			1.2E6	0.745	5.0E6→	
39	2.2E4	0.830			1.4E6	0.765	5.0E6→	
40	2.3E4	0.851			1.5E6	0.784	5.0E6→	
41	2.3E4	0.872			2.1E6	0.804	5.0E6→	
42	2.5E4	0.894			3.1E6	0.824	5.0E6→	
43	2.7E4	0.915			2.0E6→			
44	3.0E4	0.936			2.0E6→			
45	4.9E4	0.957			2.0E6→			
46	3.0E5	0.979			3.0E6→			
47					3.0E6→			
48					5.0E6→			
49					5.0E6→			

S:Stress Level C.F.:Cycles to Failure
P_r:Probability of Failure

$$P_{Fi} = \frac{i}{n+2} \dots \dots \dots (2)$$

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Table5のようなになる。またこれらの結果を対数正規確率紙に示すとFig.1のようになり、各応力レベルごとのデータはほぼ一直線上に並ぶ。したがって、各応力レベルにおけるデータは、それぞれ対数正規分布の母集団に属することが示された。なおこのことは、有意水準5%のKolmogorov-Smirnov検定によって確認された。

Table6は、各応力レベルにおける対数正規分布のパラメータ*λ*および*ξ*(それぞれ自然対数による平均値、標準偏差値)を示したものである。これにより、ある破壊確率*P_f*に対応する疲労破壊繰返し数*N*を求めることができる。なおTable6からわかるように、データのばらつきは応力レベルが低くなると大きくなる傾向がみられるが、*S*=0.80で最大となった。

以上により各応力レベルにおいて、曲げ疲労の確率分布関数が明らかとなったので、ある破壊確率*P_f*に対応する応力レベル*S*と疲労破壊繰返し数*N*の関係式である疲労曲線を決定することができる。Fig.2に破壊確率*P_f*=10~90%の疲労曲線を示す。一般に、疲労曲線は式(3)の形式で表現され、係数*a*および*b*は実験から定まる係数である。

$$S = b - a \log(N) \dots \dots \dots (3)$$

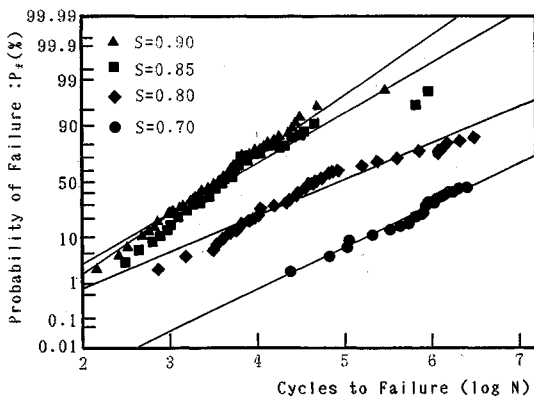


Fig.1 *P_f*-*N* Diagram for Stress Level.

Table 6 Parameters of Log-Normal Distribution for Fatigue Strength.

<i>S</i>	<i>λ</i>	<i>ξ</i>
0.90	8.231	1.6972
0.85	8.431	1.9955
0.80	11.401	2.7894
0.70	15.137	2.3632

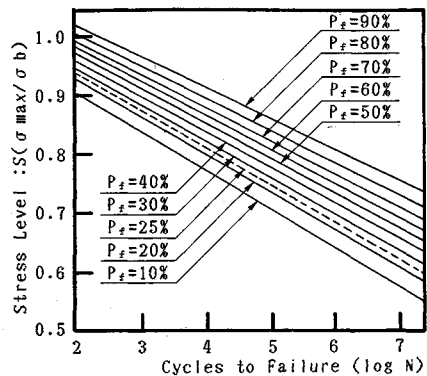


Fig.2 *S*-*N* Diagram for *P_f*.

Table 7 Coefficients of Fatigue Strength Equation.

<i>P_f</i> (%)	<i>a</i>	<i>b</i>
10	1.037	0.065
20	1.058	0.063
25	1.066	0.063
30	1.072	0.062
40	1.082	0.061
50	1.091	0.059

ここで、*S* : 応力レベル

N : 破壊に至る繰返し数

Fig.2に示した破壊確率ごとの疲労曲線のうち、破壊確率*P_f*=10~50%の各曲線の*a*および*b*は、Table7に示すようになった。ここで*N*≥100である。

なお、著者らは前回の報告¹⁾で疲労曲線を示しているが、これと今回の疲労曲線を破壊確率*P_f*=50%の場合に関して比較すると、同じ繰返し回数*N*に対する応力レベル*S*の差異は約0.01~0.02であって、両者に実質的な差異はない。

5. 曲げ疲労曲線の破壊確率とコンクリート版の疲労値との関係

コンクリート舗装の力学的設計法においては、使用する設計曲げ疲労曲線によって、設計結果を安全側に与えている場合が多い。たとえば舗装要綱付録の設計法における設計曲げ疲労曲線は、疲労破壊の実験値の包絡線、すなわち破壊確率ゼロ%の曲線が選ばれている^{2),6)}。しかしながら、この曲げ疲労曲線の破壊確率とコンクリート版の疲労値との関係は明確にされておらず、このため設計システムとしての信頼性は定量的には不明確のまま取り扱われている。そこで本研究では、曲げ疲労曲線の破壊確率とコンクリート版の疲労値との関係を、モンテカルロシミュレーションによって検討した。

Fig.3に本研究で行ったシミュレーションのフローチャートを示す。本シミュレーションの基礎となるコンクリート版の疲労解析は、舗装要綱付録の設計法を一部

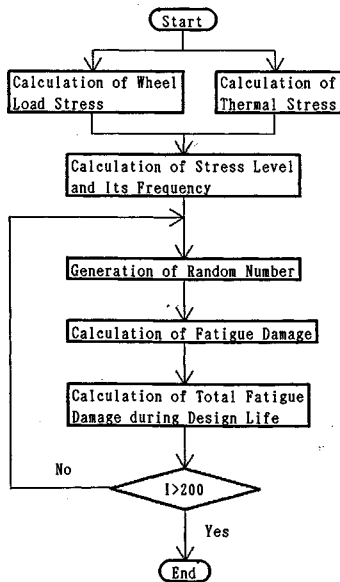


Fig. 3 Flow Chart of Simulation.

修正して用いた。なおこの修正設計法については、著者らによる既往の研究⁷⁾において実舗装の供用成績との適合性を確かめている。主な修正点は次のとおりである。

- a) コンクリートの疲労特性は、本研究の成果を用いる。
- b) コンクリート版の横目地縁部を応力解析の基準とする。
- c) 車輪の走行位置と走行頻度は著者らの調査結果⁸⁾である Table 8 を用いる。
- d) 交通輪荷重分布は、建設省による実測結果である Table 9⁹⁾を用いる。

シミュレーションではまず輪荷重応力と温度応力との合成応力を求め、これより応力レベルとその作用度数を計算する。次にこの度数に相応した個数の乱数を発生さ

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

Placement of Wheel Load* (cm)	15	45	75	Over 75
Relative Frequency (%)	51	43	5	1

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

Table 9 Distribution of Wheel Loads.

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
			t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t
B	4986	749	8371	810	420	229	119	79	45	27	15	6.7	4.3	0.70
C	8930	1889	13934	1855	1210	620	335	208	118	59	30	13.0	8.5	1.81
D	12727	4696	16610	3611	3091	1978	1005	623	378	176	86	36.0	19.0	2.04

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

せる。この乱数は、乗算合同法による一様乱数に、中心極限定理を応用して得られたもので、Table 6 に示したパラメーター入および ξ をもつ対数正規分布に従って発生させた。それぞれの乱数に対して疲労破壊に至るまでの許容繰返し数が得られ、これに Miner による累積疲労損傷仮説を適用することによってコンクリート版の疲労値が計算される。このシミュレーションは1年間の交通量として、Table 9 の輪荷重載荷数を 365 倍して実行した。そして設計寿命 20 年の疲労値は、このシミュレーションによって得られた疲労値を 20 倍して求めた。さらに、得られた疲労値より供用寿命を計算した。シミュレーションの試行回数は、著者らによるこの種のシミュレーションに関する研究¹⁰⁾を参考に 200 回とした。

シミュレーションの対象としたコンクリート舗装および交通条件は次のとおりである。

- コンクリートの曲げ強度 $\sigma_b = 45 \text{ kgf/cm}^2$
- コンクリートの弾性係数 $E = 350\,000 \text{ kgf/cm}^2$
- コンクリートのポアソン比 $\mu = 0.25$
- コンクリートの温度膨張係数 $\alpha = 0.00001/^\circ\text{C}$
- 路盤支持力係数 $K_{75} = 8 \text{ kgf/cm}^3$
- コンクリート版厚 $H = 25 \text{ cm}$
- 交通量区分¹²⁾ D 交通

Fig. 4 は、シミュレーションの結果得られた供用寿命のばらつきを示すヒストグラムである。次に、このヒストグラムを図中に示されるようなベータ分布関数によって確率密度曲線に変換した。ここでこの曲線の供用寿命

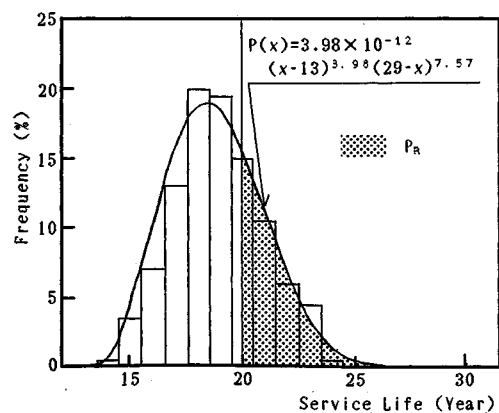


Fig. 4 Service Life Distribution.

≥20年の領域を積分した面積は、コンクリートの疲労強度のばらつきに起因するコンクリート舗装の破壊に対する信頼性確率であるので、これを疲労に関する信頼性確率 P_R と定義すれば、この例では $P_R=29.4\%$ である。

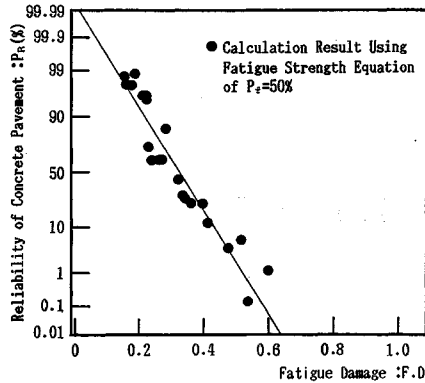


Fig.5 Relationship between Fatigue Damage and Reliability in Case of $H=25\text{ cm}$, D-traffic.

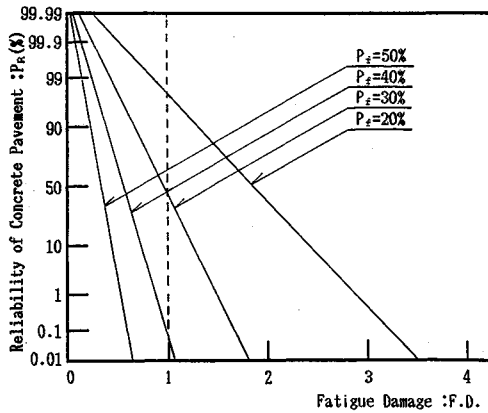


Fig.6 P_R - P_f - FD Relationship in Case of $H=25\text{ cm}$, D-traffic.

一方、これに対して、このコンクリート舗装について、ある破壊確率 P_f の曲げ疲労曲線を用いて決定論的に解析を行うと、その場合の疲労値 FD を求めることができる。たとえば $P_f=50\%$ の曲げ疲労曲線を用い、コンクリート舗装の路盤支持力係数、コンクリートの弾性係数、ポアソン比を変化させた場合の P_R - FD の関係は、Fig.5 のように得られる。

Fig.5 によれば、決定論的疲労解析によって得られた疲労値 FD と、シミュレーションによって得られた疲労に関する信頼性確率 P_R は、ほぼ直線関係になることがわかる。さらにこの関係は、決定論的な解析に用いる疲労曲線の破壊確率 P_f を変えることによって Fig.6 に示すように変化する。そこでこの P_R - P_f - FD の関係から、設計の際に基準となる疲労値 $FD=1.0$ における P_R と P_f の関係を求めると、Fig.7 の実線 (D交通) のようになる。すなわち、たとえば破壊確率 $P_f=25\%$ の曲げ疲労曲線を用いて設計した場合、設計寿命 20 年に

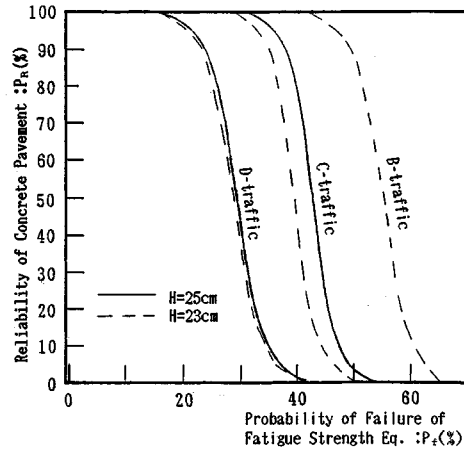


Fig.7 Relationship between P_R and P_f .

Table 10 Calculation Conditions for Slab Depth of $H=23\text{ cm}$.

Traffic Volume Level = B				Traffic Volume Level = C				Traffic Volume Level = D			
Condition		P_R	F.D.	Condition		P_R	F.D.	Condition		P_R	F.D.
k_{75}	μ E			k_{75}	μ E			k_{75}	μ E		
5	0.20 300000	95.518	0.741	8	0.20 300000	99.728	0.250	9	0.18 300000	99.039	0.164
8	0.25 330000	99.134	0.761	9	0.18 320000	99.808	0.267	10	0.18 310000	97.046	0.163
6	0.20 320000	98.408	0.800	10	0.20 330000	99.109	0.346	10	0.20 310000	94.848	0.213
8	0.20 350000	97.661	0.841	9	0.20 320000	99.619	0.354	10	0.18 320000	92.703	0.246
7	0.25 320000	98.981	0.885	8	0.20 310000	99.264	0.381	9	0.20 300000	92.405	0.215
7	0.20 340000	97.868	0.969	10	0.18 340000	98.922	0.399	9	0.18 310000	78.002	0.248
9	0.25 350000	92.955	1.066	9	0.18 330000	99.476	0.406	8	0.18 300000	73.222	0.263
5	0.20 310000	33.621	1.130	8	0.18 320000	88.775	0.436	10	0.20 320000	67.951	0.322
8	0.25 340000	26.955	1.180	7	0.20 300000	29.268	0.438	9	0.20 310000	64.570	0.326
6	0.20 330000	15.843	1.217	7	0.18 310000	29.310	0.500	10	0.18 330000	46.189	0.373
7	0.25 330000	13.877	1.351	10	0.20 340000	69.147	0.527	8	0.18 310000	10.820	0.400
7	0.20 350000	32.141	1.472	9	0.20 330000	67.113	0.539	8	0.20 300000	3.608	0.347
5	0.25 300000	3.548	1.614	8	0.20 320000	24.098	0.581	7	0.18 300000	2.785	0.452
5	0.20 320000	1.778	1.723	9	0.18 340000	51.795	0.617	9	0.18 320000	1.867	0.377
8	0.25 350000	5.203	1.767	6	0.18 300000	18.363	0.624	10	0.18 340000	1.367	0.564
6	0.20 340000	2.877	1.852	8	0.18 330000	20.323	0.663	9	0.18 330000	1.317	0.570
				7	0.20 310000	20.343	0.669	9	0.20 320000	1.027	0.496
				7	0.18 320000	7.779	0.761	10	0.20 330000	0.751	0.489
				9	0.20 340000	14.049	0.819	8	0.20 310000	0.329	0.528
				6	0.20 300000	1.046	0.840				
				8	0.20 330000	5.463	0.884				

Table 11 Calculation Conditions for Slab Depth of $H=25$ cm.

Traffic Volume Level = C					Traffic Volume Level = D				
Condition			P_R	F.D.	Condition			P_R	F.D.
K_{75}	μ	E			K_{75}	μ	E		
5	0.25	320000	99.487	0.375	10	0.25	350000	98.637	0.154
7	0.25	350000	99.403	0.380	7	0.25	320000	97.709	0.158
5	0.20	340000	99.834	0.430	5	0.20	310000	97.778	0.178
5	0.25	330000	88.549	0.567	7	0.20	340000	98.799	0.188
5	0.20	350000	34.479	0.647	6	0.20	330000	96.191	0.213
5	0.25	340000	21.915	0.857	9	0.25	350000	96.104	0.222
					8	0.25	340000	95.487	0.223
					5	0.25	300000	72.786	0.228
					7	0.25	330000	80.519	0.237
					5	0.20	320000	61.485	0.265
					6	0.25	320000	61.135	0.271
					7	0.20	350000	84.309	0.282
					6	0.20	340000	43.873	0.319
					8	0.25	350000	29.422	0.336
					5	0.25	310000	27.777	0.344
					7	0.25	340000	24.103	0.357
					5	0.20	330000	24.119	0.399
					6	0.25	330000	12.323	0.409
					6	0.20	350000	0.479	0.479
					5	0.25	320000	5.870	0.518
					7	0.25	350000	0.157	0.537
					5	0.20	340000	1.151	0.589

いて、疲労に関する信頼性確率 P_R は約 85 % である。

本研究では以上の解析を版厚 $H=23, 25$ cm, および交通量区分 B, C, D の場合について行い、さらに広範囲の設計条件に対する P_R - P_f - $F.D.$ の関係を求めた。計算の対象とした舗装構造条件は広範囲に選択したが、疲労解析では応力レベルごとの繰り返し回数と同じ場合には同じ結果となることから、計算を行った舗装構造条件を整理すると Table 10, 11 に示すようになる。なお版厚 28 cm 以上の場合、今回の解析で用いた修正設計法によれば、設計寿命 20 年ではコンクリート版の疲労による破壊は生じないことから、検討の対象から除外した。

Fig. 7 において、C 交通と D 交通の場合を比較すると、交通条件が同じ場合、 P_f と P_R の関係は、版厚にかかわらずほぼ同じ傾向を示すといえる。すなわち疲労に関する信頼性確率 P_R は、コンクリート舗装の構造に依存せず、選択した曲げ疲労曲線の破壊確率 P_f と交通条件によって決まることがわかる。また同図によれば、同じ信頼性水準 P_R を得るためには、重交通になるほど曲げ疲労設計曲線の破壊確率 P_f を小さくしなければならないことがわかる。

6. 結 論

本論文は、舗装用コンクリートの静的曲げ強度がその疲労破壊に与える影響に関して行った実験結果と、著者らによる舗装用コンクリートの曲げ疲労に関する一連の研究の総括として、破壊確率を考慮した疲労曲線に関する検討結果を報告したものである。その主な結論は次のとおりである。

コンクリートの曲げ疲労に関する実験結果において、応力レベル $S \geq 0.80$ の領域ではコンクリートの静的曲

げ強度が異なっても、応力レベルと曲げ疲労破壊に至る繰り返し数の関係は同一であることが、統計的検定によって判明した。一方、応力レベル $S < 0.80$ の領域では、静的曲げ強度の増加に伴って疲労強度が増加する傾向がある。しかしコンクリート舗装の設計においては、応力レベル $S \geq 0.80$ の応力状態が問題となるので、コンクリートの静的曲げ強度の相違の影響は実用上、無視できるといえる。

コンクリートの曲げ疲労現象のばらつきが、コンクリート版の疲労破壊に与える影響を、モンテカルロシミュレーションによって検討した。この結果、コンクリートの曲げ疲労曲線の破壊確率と、コンクリートの疲労強度のばらつきに起因する破壊に対するコンクリート舗装の信頼性確率との関係が得られた。この関係に基づいて選択された曲げ疲労設計曲線を用いることによって、コンクリートの曲げ疲労強度のばらつきにかかわるコンクリート舗装の信頼性を保証することができる。さらにこの関係は、検討の対象とした舗装構造条件の範囲では、舗装の構造特性とは無関係であり、交通条件によってのみ影響されることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) セメントコンクリート舗装要綱，日本道路協会，1984.
- 3) レディーミクストコンクリート工場から出荷された舗装用コンクリートの実績調査，セメント協会道路技術専門委員会報告 R-5, 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) 浜田純夫・中川健治・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.
- 6) 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 (3)，土木研究所報告第 117 号，pp.1~124, 1964.
- 7) 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.
- 8) 島田洋一・Montaño, J.R.・小梁川雅：車輪通過位置に関する研究，土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集，pp.292~293, 1987.
- 9) 飯島 尚・今井 博：車両重量調査結果の解析，道路，pp.42~48, Jun., 1982.
- 10) Montaño, J.R., Koyanagawa, M. and Fukuda, T.: Evaluation of Service Life of Concrete Pavement by Monte Carlo Simulation, Proceedings of JSCE, No.402/V-10, pp.161~167, 1989.