

[80] ランダム荷重を受けるコンクリートの疲労特性に関する研究

正会員 ○阪田憲次 (岡山大学工学部)
 正会員 矢村潔 (鳥取大学工学部)
 正会員 西林新蔵 (鳥取大学工学部)

1. まえがき

実際のコンクリート構造物が受ける荷重は、上下限が一定の繰返し荷重であることはきわめて稀であり、大部分は不規則に変動するランダムな繰返し荷重である。したがって、橋梁および港湾構造物のようなランダムな繰返し荷重を受けるコンクリート構造物の合理的な設計を行うためには、このような荷重下におけるコンクリートの疲労特性を明らかにすることが必要である。

しかしながら、実働のランダム荷重をそのまま再現した疲労試験を行うことは、必ずしも合理的ではない。何故ならば、もしも荷重が全くランダムであるならば、そのような荷重が再現されることはないからである。このような場合には、以下のような手順および方法で疲労試験を行うのが、より合理的である。

まず、実働のランダム荷重の中にある一定の統計的な規則性を見つけ出す。荷重の大きさの頻度分布は構造物やそれに載荷される荷重の種類によって異なるが、一般には正規分布¹⁾や指數分布²⁾することが多い。このような、ある規則性をもった荷重の頻度分布をシミュレートしたランダム繰返し荷重（プログラム荷重）を作成し、それを用いて疲労試験を実施するのである。

一方、上述のような複雑な試験によらず、一定振幅荷重の疲労試験を行い、その結果よりランダム荷重下の疲労特性、すなわち疲労寿命を推定する方法が一般に用いられている。このような手法の一つがマイナー則であるが、その適否については議論の分れるところである。このマイナー則の妥当性を検討するためにも、ランダム繰返し荷重下における疲労試験を行う必要がある。

以上のような目的により、本研究は、頻度分布が指數分布型のランダム荷重下におけるコンクリートの疲労試験を実施し、その特性を明らかにするとともに、マイナー則の妥当性について検討するものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料と供試体

セメントは普通ポルトランドセメントを粗骨材は砕石（最大寸法；20mm、比重；2.67）を、細骨材は川砂（比重；2.58）を用いた。コンクリートの配合を表-1に示す。供試体はφ10×20cmの円柱供試体である。

28日間標準水中養生を施した後、疲労試験実施日（材令；約2年）まで実験室内に保存した。

2.2 試験方法

疲労試験は、一定振幅荷重下の疲労試験（以下一定振幅試験と略称）とランダム荷重下の疲労試験（以下ランダム試験と略称）とからなる。これらの試験は、岡山大学工学部設置の島津製作所製サーボパルサー（容量；40t）を用い、繰返し載荷速度は5Hz、荷重と時間との関係は正弦波形の条件下で行った。

一定振幅試験は、S～N線式を定めるためのもので、その上限応力比は、疲労試験開始直前に行った各打設バッチごとの平均圧縮強度（表-2）に対する百分率で選び、下限応力比は、すべて静的強度の10%とした。

ランダム試験における荷重の頻度分布は、指數分布とする。この分布は、海洋における波高とその生起する回数の関係を比較的よく表していると言われている。²⁾その確率密度関数は、次式で表される。

$$p(S) = C \exp [-C(S - S_0)] \quad \dots \quad (1)$$

ここに、Sは上限応力比（%）、S₀は上限応力比のうちの最小値である。また、Cは上限応力比が大きくなるにつれてその生起確率が小さくなる程度を表わす。

表-1 コンクリートの配合

max.size (mm)	W/C (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	S/a (%)
20	56.3	180	320	792	1044	44

表-2 コンクリートの強度

Batch	Slump (cm)	f ₂₈ (kgf/cm ²)	f _{test} (kgf/cm ²)
B	16.3	265	282
C	14.0	285	307
D	17.4	278	304
E	16.3	278	296
F	16.5	284	292
G	15.1	279	288
H	16.8	278	303
I	16.6	272	293

は、次式のようになる。

$$P(S) = \exp[-C(S - S_0)] \quad \dots \dots \quad (2)$$

本実験においては、実験に要する時間を考慮して、最小の上限応力比 (S_0) を69.5%、最大の上限応力比を84.5%とした。実験に用いた荷重の頻度分布を、図-1～3に示す。図においては、式(1)で示される理論的な分布を、69.5%から84.5%の範囲で30等分して表示しているが、実際に載荷される波の種類は308種類である。本研究においては、荷重の大きさとその頻度が疲労寿命におよぼす影響を検討するため、式(1)の係数Cを3水準採用した。

図-1～3に示したランダム荷重の作成とその載荷手順は以下のとおりである。①一様乱数の発生；混合合同法によって一様な算術乱数を発生させる。②乱数の指數分布への変換；任意の乱数 Φ に対応する応力比 $S(\Phi)$ は、

$$S(\Phi) = S_0 - \ln \Phi / C \quad \dots \dots \quad (3)$$

で求められる。③正弦波形の作成；上記の上限応力比をピークとする正弦波形を作成する。ただし、下限応力比は10%とする。④波の分割デジタル化；1波を24に分割し、デジタル化する。⑤D/A変換とデータレコーダの磁気テープへの書き込み。以上の作業は、鳥取大学工学部設置の小型電子計算機HITAC 20によって行った。⑥疲労試験機への入力；試験機による載荷重を、制御装置の電圧入力端子より上記の波形を入力することによって制御する。

図-4は、上限応力比の理論上の分布とデータレコーダの磁気テープに書き込まれた電圧より求めた上限応力比の分布とを比較したもので、波数の合計は50000波である。図より明らかなように、ほぼ一様な乱数が発生していること、換言すれば、指數分布型のランダム荷重が正しく載荷されていることがわかる。

3. 結果と考察

表-3および図-5は、一定振幅試験の結果を示したもので、疲労寿命の分布が対数正規分布することがうかがわれる。平均疲労寿命と上限応力比との関係は図-6に示すとおりで、その $S \sim N$ 線式は次式で示される。

$$S = 99.186 - 5.756 \log \bar{N} \quad \dots \dots \quad (4)$$

ランダム試験の結果(表-4)は、次に示す累積繰返し回数比 (M ; Miner Sum)によって評価する。

$$M = n_1 / \bar{N}_1 + n_2 / \bar{N}_2 + \dots + n_i / \bar{N}_i \quad \dots \dots \quad (5)$$

ここに、 \bar{N}_i は一定振幅試験における応力比 S_i における平均疲労寿命で、式(4)より求められる。 n_i は応力比 S_i の載荷回数である。

マイナー則においては、コンクリートが疲労破壊する時、 $M=1$ となる。しかし、上述のように、一定振幅試験における疲労寿命がかなりのばらつきをもつことより、 M の値もばらつくことが予想される。すなわち、

$$M = N / \bar{N} \rightarrow \log M = \log N - m (\log \bar{N}) \quad \dots \dots \quad (6)$$

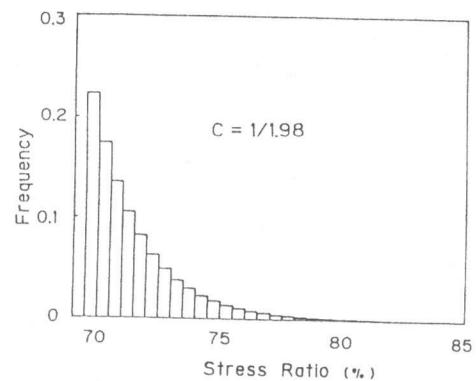


図-1 荷重の頻度分布

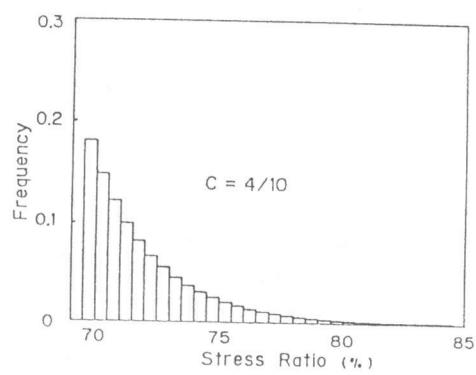


図-2 荷重の頻度分布

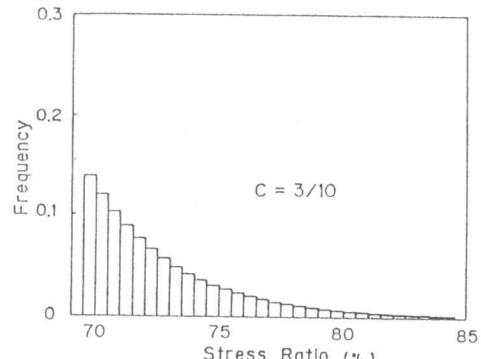


図-3 荷重の頻度分布

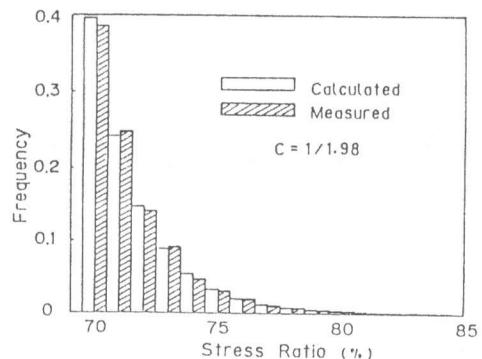


図-4 荷重の頻度分布

表-3 一定振幅疲労試験結果

r	p	Upper Stress Ratio S		
		80 %	75 %	70 %
1	0.923	409	1499	17768
2	0.846	539	1507	20151
3	0.769	641	4106	71471
4	0.692	1903	5173	84717
5	0.615	2072	6035	86253
6	0.538	2210	9703	128980
7	0.462	2263	12695	153128
8	0.385	3232	18481	221891
9	0.308	4741	24691	231129
10	0.231	8932	34981	439271
11	0.154	13370	61875	534882
12	0.077	30847	100087	754950

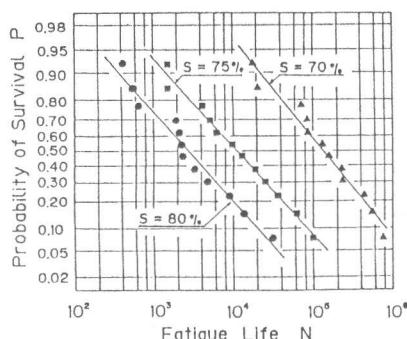


図-5 p ~ N 関係

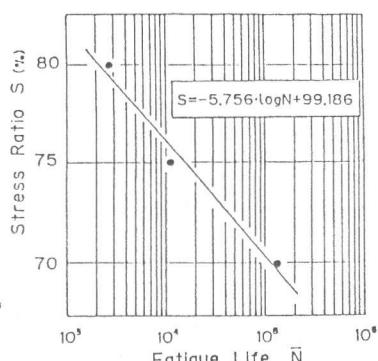


図-6 S ~ N 線式

$$m (\log M) = 0 \rightarrow \bar{M} = 1 \quad \dots \quad (7)$$

$$V (\log M) = V (\log N) \quad \dots \quad (8)$$

より、一定振幅試験における疲労寿命Nが対数正規分布するときMも対数正規分布し、その期待値が1であること、および $\log M$ と $\log N$ の標準偏差が等しいことがわかる。³⁾したがって、コンクリートの疲労に対するマイナー則の適用の是非を論ずるためには、Mの期待値が1であるかどうかということ、ならびにMが対数正規分布するかどうかについて検討すればよいことになる。

図-7～9は、式(1)のCの相違がMの頻度分布におよぼす影響について示したものである。すなわち、C = 1/1.98においては、小さい荷重によるMの占める割合が大となり、逆にM=0.3においては、大きい荷重によるMの占める割合が大きくなる。そして、M=0.4では、どの荷重によるMもほぼ同程度となる。したがって、Mとランダム繰返し荷重下の疲労寿命との関係を求めるとき図-10のようになり、同じ指數分布であっても、Cの値が大きくなるほど小さい荷重の頻度が卓越し、同一Mに対する疲労寿命が大きくなることがうかがわれる。

表-4 ランダム荷重疲労試験結果

r	p	C = 1/1.98		C = 4/10		C = 3/10	
		N	M	N	M	N	M
1	0.952	8944	0.1700	4519	0.1853	1747	0.1165
2	0.904	9963	0.1895	4566	0.1859	2704	0.1941
3	0.857	12818	0.2474	6230	0.2689	3162	0.2192
4	0.810	13686	0.2656	6599	0.2817	3968	0.2687
5	0.762	15458	0.3036	7623	0.3251	5450	0.3978
6	0.714	15928	0.3141	8991	0.3761	5996	0.4114
7	0.667	23800	0.4769	11929	0.5149	8174	0.5901
8	0.619	37892	0.7576	13478	0.5522	8221	0.5920
9	0.571	64964	1.3197	14706	0.6263	9714	0.7328
10	0.524	79555	1.6119	18242	0.7650	10405	0.7722
11	0.476	89372	1.8009	26526	1.0586	11700	0.9570
12	0.429	99736	2.0126	27685	1.1784	15090	1.0632
13	0.381	108534	2.1856	41054	1.7350	22292	1.7015
14	0.333	133546	2.6970	59431	2.4989	22438	1.7153
15	0.286	177824	3.6106	69706	2.8989	41600	3.0917
16	0.238	209747	4.2712	81968	3.3249	47928	3.4824
17	0.190	216668	4.4119	113682	4.6609	63523	4.6010
18	0.143	242949	4.9272	129698	5.3801	98010	7.2165
19	0.095	263063	5.3343	160399	6.7276	129430	9.4929
20	0.048	537991	10.8855	226091	9.4244	179577	13.1075

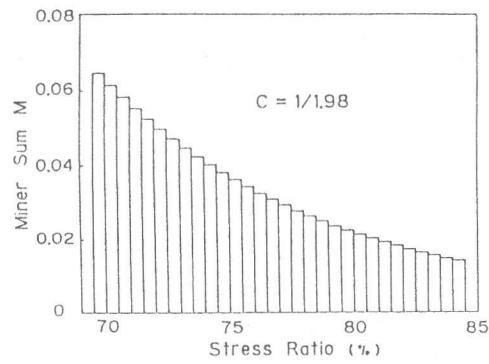


図-7 M の頻度分布

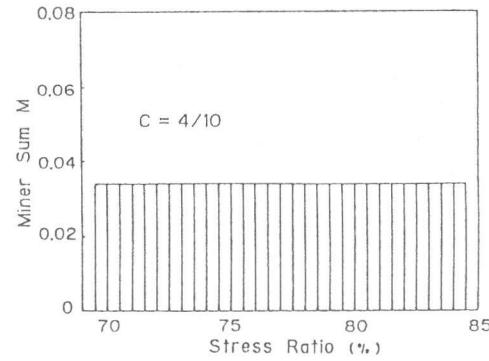


図-8 M の頻度分布

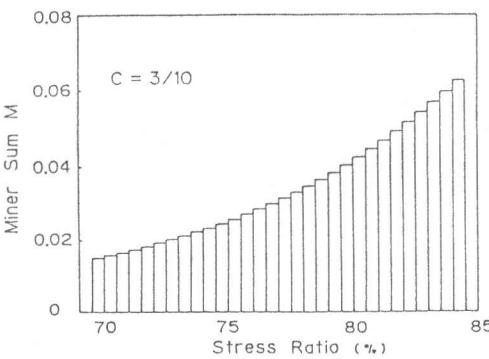


図-9 M の頻度分布

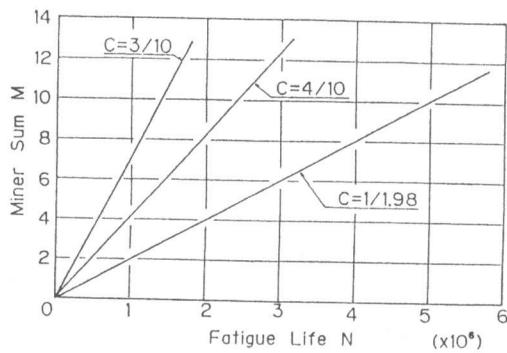


図-10 累積繰返し回数比と疲労寿命との関係

図-11は、ランダム試験における疲労寿命と生存確率との関係を示したものである。また、図-12~14は、Mと生存確率との関係を示したものである。図より明らかのように、ランダム繰返し荷重の疲労寿命が対数正規分布すること、さらに、累積繰返し回数比Mが対数正規分布することがわかる。図-12~14に示した直線の回帰式は、それぞれ以下のとおりである。

$$C = 1/1.98 ; t = 0.1397 - 1.544 \log M \quad \text{--- (9)}$$

$$C = 4/10 ; t = 0.0449 - 1.611 \log M \quad \text{--- (10)}$$

$$C = 3/10 ; t = 0.0567 - 1.501 \log M \quad \text{--- (11)}$$

ここに、tは正規分布曲線の対称軸からの距離である。

式(9)~(11)にt=0を代入して求めたMはMの期待値(平均値)となる。それらは、C=1/1.98、4/10および3/10で、それぞれ、1.232、1.066および1.091となる。累積繰返し回数比(M)の期待値がほぼ1に等しいことより、コンクリートの疲労に対してマイナー則が成立することがわかる。

C=1/1.98のとき、すなわち、ランダム荷重において、比較的小さい荷重の割合が卓越しているときのMの値が、他の場合よりも若干大きい。これは、荷重の大きさの相違が疲労損傷に影響すること、すなわち、比較的小さい荷重は、マイナー則から予測されるほどには疲労損傷に寄与しないことを意味するものである。

4.まとめ

本研究の結果、コンクリートの疲労に対しマイナー則を適用することが妥当であることが明らかになった。また、ランダムな荷重のうち、比較的小さい荷重の繰返しは、マイナー則から予測されるほどに疲労損傷に寄与しないことが明らかになった。

本研究は、昭和59年度文部省科学研究費補助金(総合研究(A)；課題番号：58350028)によって実施したものである。

[参考文献]

- 1) 国広哲男；道路橋の実働荷重と疲労設計、第22回構造工学シンポジウム論文報告集、1976年1月
- 2) A.K.Williams & J.E.Rinne；Fatigue Analysis of Steel Off-Shore Structures, Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 1, 60, 1976年11月
- 3) J.V.Leeuwen & A.J.M.Siemens；Miner's Rule with respect to Plain Concrete, Second International Conference on Behaviour of Off-Shore Structures, 1979年8月

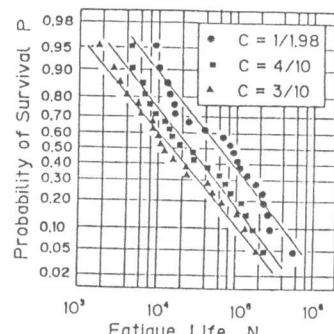


図-11 p～N関係

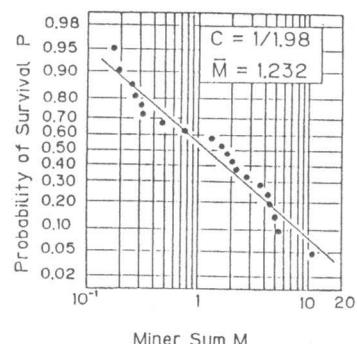


図-12 p～M関係

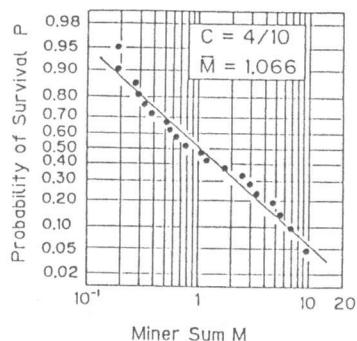


図-13 p～M関係

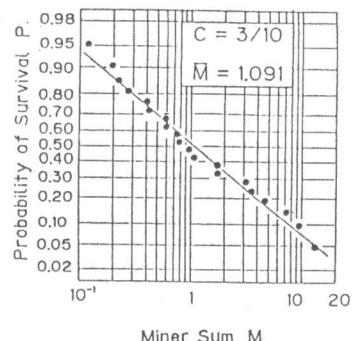


図-14 p～M関係