

鳥取大学 正員 井上正一

1. まえがき

既設コンクリート構造物の健全度評価、補修・補強の時期やその判定規準の確立、さらにはメンテナンスフリーを要件とした新設構造物の設計に際して、構造物の耐久性や損傷に大きな影響を及ぼす疲労の問題は解決しておかなければならない重要な課題である。ここでは、鉄筋比を変化させ、繰返し荷重下での曲げ破壊様式が鉄筋切断型とコンクリート圧潰型となるように設計したRCはりの変動荷重下における疲労寿命特性を、一定荷重試験で得られたはりのS-N線式や土木学会指針(案)¹⁾に基づく鉄筋やコンクリート素材のS-N線式との関連において検討した結果について述べる。

2. 実験概要

セメントは普通ポルトランドセメントを、骨材は砕石(最大寸法20mm, 比重2.71), 川砂と陸砂の混合砂(比重2.59, FM=2.88)を使用した。コンクリートの配合を表-1に、供試体の形状寸法と載荷方法を図-1に示す。疲労試験は、(1)一定荷重と(2)変動荷重の各試験からなり、これらの試験は繰返し載荷速度5Hz, 荷重と時間との関係は正弦波形のもとで行った。試験で設定した上限荷重比(S)は、はりの静的終局耐力(Aはり:13.7トン, Bはり:21.5トン)に対する百分率で数水準を選び、一方、下限荷重比は全て10%と一定とした。変動荷重試験は、上限荷重比(S)とそれが作用する頻度($P^*(S)$)関係に4つの指数型の分布モデル(図-2)を選定し、表-2に示すような荷重順序で行った。各上限荷重比($S=S_i$)における載荷繰返し回数 $\eta_{ij}(S_i)$ は i ($i=1, 2, \dots, U$)番目の荷重ブロックにおける総繰返し回数(N_i)を与えることにより、 $\eta_{ij}(S_i) = N_i \cdot P^*(S=S_i)$ で算定される。試験は、第1荷重ブロックの $\eta_{11}(S_1)$ から $\eta_{12}(S_2)$ と順次載荷し、同様の手順で第2荷重ブロックに移り、 U 番目の荷重ブロック内の第 U 番目の上限能力比ではりが破壊する回数 $\eta_{Uk}(S_k)$ を測定した。

3. 結果と考察

(1) 一定荷重試験 図-3は、鉄筋切断で破壊したAはりの疲労寿命(N)と順序統計量の理論を用いて算定した生存確率(P)の関係と対数正規確率紙上にプロットしたものである。図より、各上限荷重比ごとの疲労寿命の分布は対数正規分布に従うといえる。このとき回帰式は、

$$t = A \log N + B \quad (1)$$
で表わされ、平均疲労寿命($\bar{N}$)と $\log N$ の標

表-1 示方配合

Slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				ボツリス No.8(g)
			W	C	S	G	
4±1	45	38	145	329	739	1237	Cx2.5

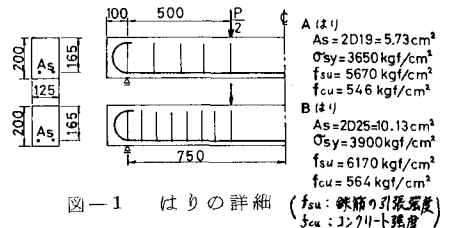


図-1 はりの詳細 (fsu: 鉄筋の引張強度, fcu: コンクリート強度)

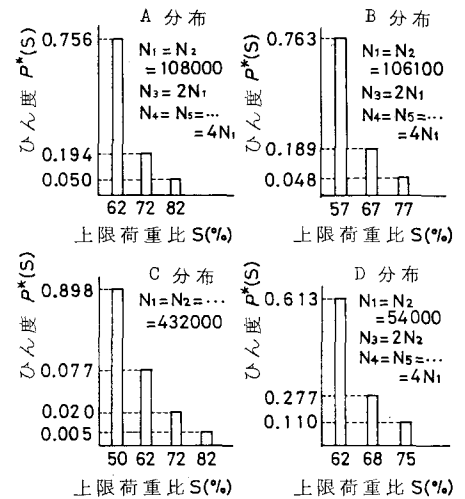


図-2 変動荷重試験の詳細

表-2 荷重順序

はりの 種類	分布 モデル	荷重順序 (荷重比(%))	疲労 寿命 (x10)
A-1	A	S1-S2-S3	44256
A-2	A	72 82 62	870996
A-3	A	72 62 82	472166
A-4	A	62 72 82	54444
A-1	B	77 67 57	249756
A-2	B	67 77 57	159088
A-3	B	67 57 77	215980
A-4	B	57 72 87	371146
B-1	D	75 68 62	19808
B-2	D	68 75 62	11880
B-3	D	68 62 75	21720
B-4	D	62 68 75	67350
C-1	C	S1-S2-S3-S4	412057
C-2	C	82 77 72 50	1390878

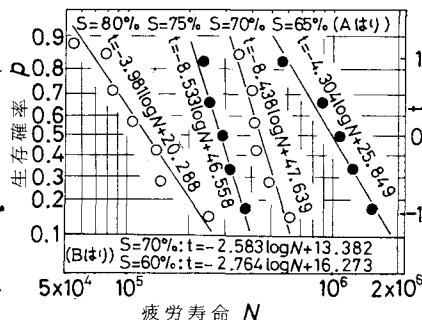


図-3 p-N 関係

準偏差 ($V(\log N)$) は次式で与えられる。

$$\bar{N} = 10^{-B/A}, \quad V(\log N) = 1/|A| \quad \text{----- (2)}$$

図-4は、式(2)より算定した平均疲労寿命($\bar{N}$)と上限荷重比(S)との関係を示したもので、RCはりのような複合材料のS- $\bar{N}$ 線式は破壊様式の相違によってかなり異なってくるのがわかる。

(2) 変動荷重試験 変動荷重下のRCはりの疲労寿命(表-2参照)は次式で定義する累積繰返し回数比を用いて評価することにする。

$$M = \sum_{i=1}^{u-1} \left(\sum_{j=1}^{3u+4} \frac{n_{ij}(S_j)}{\bar{N}(S_j)} \right) + \sum_{j=1}^k \frac{n_{uj}(S_j)}{\bar{N}(S_j)} \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 $\bar{N}(S_j)$ は上限荷重比 $S=S_j$ における平均疲労寿命である。

図-5は、A、B両はりに対し、それぞれのS- $\bar{N}$ 線式を用いて算定したMと生存確率(P)の関係を各分布モデルごとに、図-6は、Aはり全ての試験におけるMとPとの関係をプロットしたものである。図より、いずれの場合もプロット点はほぼ直線上にあり、Mの分布は対数正規分布に従うといえる。このとき、分布の回帰式、Mの平均値($\bar{M}$)および $\log M$ の標準偏差($V(\log M)$)は式(4)で与えられる。

$$t = A_1 \log M + B_1, \quad \bar{M} = 10^{-B_1/A_1}, \quad V(\log M) = 1/|A_1| \quad \text{---- (4)}$$

図-5より明らかなように、疲労寿命の評価値であるMの値は、荷重比の大きさの組合せの影響を強く受け、一般には受ける組合せ荷重の大きさが小さくなるに伴って、さうには低荷重比が長期間に渡って多数回作用することによって、Mの値は大きくなるようである。

つぎに、 $\bar{M}$ について考えた場合、 $\bar{M}$ の値はA分布で0.76、B分布で1.83、D分布で0.98となる。このことは、 $\bar{M}=1$ を破壊条件とするマイナー則は組合せ荷重の種類によって適用限界があるものと考えられる。しかし、実構造物に作用するランダム荷重を考えた場合、図-6に示すAはりの $\bar{M}$ は1.27となり、疲労寿命の推定にマイナー則はかなりの精度で適用できるものと考えられる。一方、Mのばらつきを表わす指標となる $V(\log M)$ は、一定荷重試の $V(\log N)$ の情報(組合せ荷重のうちの $V(\log N)$ の最大値を用いる)から推定できる可能性がある。

表-3は、指針案1にもとづき、各はりに上・下限荷重が作用したときのコンクリート応力と鉄筋応力、さうにはこれら材料に関するS- $\bar{N}$ 線式より算定した疲労寿命 $\bar{N}(S)$ を示す。図-7には、表中の $\bar{N}(S)$ を式(3)に代入して求めたM(M_1 と表記)と生存確率の関係を示す。Bはりの回帰式に $M_1=1$ を外挿して求めた破壊確率($P_f=1-P$)5%は、疲労振幅強度の特性値に考慮されている P_f と同程度の値を示し、指針案はコンクリートの疲労が問題となる場合に対し、適切な破壊判定規準を手えていると考えられる。

本研究は昭和58年度吉田奨励金を授与され、鳥取大学・西村新蔵教授の指導のもとに行われたものである。ここに明記し謝意を表します。

1) 土木学会、コンクリート・ライブラリー 第52号、コンクリート構造物の限界状態設計法指針集、1983

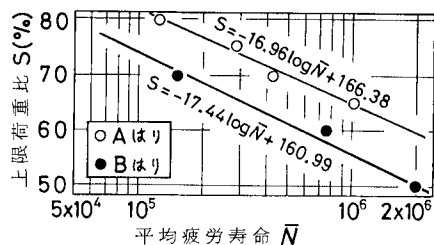


図-4 S- $\bar{N}$ 線図

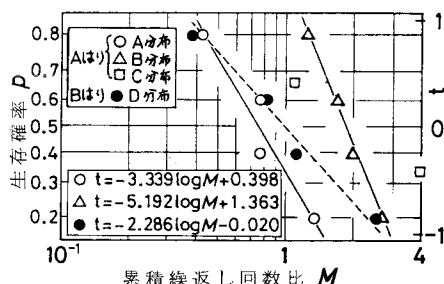


図-5 p-M関係(各分布モデル)

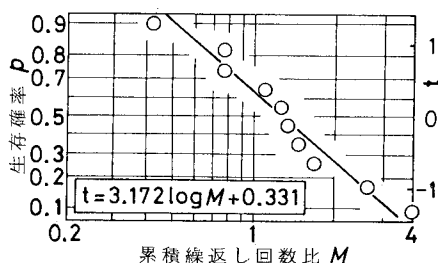


図-6 p-M関係

表-3 応力度と疲労寿命の算定

A はり			B はり		
荷重比	鉄筋		荷重比	コンクリート	
S (%)	σ_s (kgf/cm ²)	N(S)*1	S (%)	σ_{CR} (kgf/cm ²)	N(S)*2
82	3507	20860	75	393.4	4656
77	3292	31190	68	356.7	12660
72	3079	47920	62	325.2	2156000
67	2865	76400	10	52.3	—
62	2651	127500	σ_{CR} : 三角形分布の応力の合力位置と同一位置に合力位置がくるようにした矩形分布の応力度		
57	2438	223000			
50	2138	545700			
10	428	—			

*1: $N^k = (1 - \sigma_{sp}/f_{su}) 10^a / f_{rsk}$
($f_{rsk} = \sigma_s - 428$, $f_{su} = 5670$ kgf/cm²,
 $N \leq 2$ のとき $a = 4.3$, $k = 0.18$)

*2: $\log N = 1 - K f_{rk} / (0.85 f_{cu} (1 - 52.3 / f_{cu}))$
($f_{rk} = \sigma_{CR} - 52.3$, $f_{cu} = 564$ kgf/cm², $K = 17$)

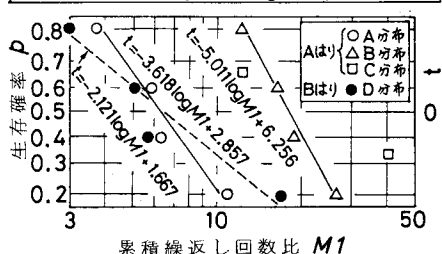


図-7 p-M1関係