

論文

[2046] 水中環境下におけるRCはりの疲労寿命予測に関する研究

正会員 西林 新蔵 (鳥取大学工学部)

正会員 ○井上 正一 (鳥取大学工学部)

正会員 吉野 公 (鳥取大学工学部)

正会員 熊野 知司 (清水建設(株))

1. まえがき

近年、コンクリート製の海洋構造物が建造される機会が増えているが、この種の構造物は従来の陸上構造物に比べて極めて過酷な環境下に設置されることになる。この過酷環境は、鉄筋腐食やコンクリートの劣化をもたらすだけでなく、波による繰返し荷重を考えた場合、鉄筋は①変動荷重下では疲労限が低下する、②腐食環境下においては疲労限が消失する、③湿潤環境では鉄筋およびコンクリートの疲労強度は気中におけるよりも大幅に低下する、といった材料の力学的特性の低下が引き起こされる。このような場において、コンクリート構造物の合理的な設計を行い、かつ耐用期間中に構造物がその機能を十分に発揮することを保証するためには、使用材料の疲労特性は勿論のこと、複合材料としての鉄筋コンクリート部材の疲労特性をも十分に解明しておくことは極めて重要である。

このような観点から、本研究では海洋コンクリート構造物の疲労性状、とりわけ疲労寿命を明確にすることを目的として計画した。すなわち、RCはりの水中と気中での疲労試験を実施し、水の存在がはりの破壊様式や疲労強度に及ぼす影響を明らかにしている。さらに、繰返し荷重下で曲げ破壊したはりに対し、その破壊様式をコンクリート圧潰型と鉄筋破断型に分類し、材料レベルのS-N線図から部材レベルの疲労寿命を予測する際のコンクリート標準示方書の考え方の妥当性と問題点を整理し、新たな寿命予測式を提示している。

2. 実験概要

2.1 供試体の種類と作製

表-1および図-1に、それぞれ実験計画、はりの種類、载荷方法、疲労試験実施時(材令100日以上)における材料強度の詳細を示す。RCはりにおける設計要因は、主鉄筋量とコンクリート強度で、それぞれの組合せのもとで表-1に示すようなはりを作製した。RCはりの断面寸法は全て、 $170 \times 12.5 \times 20\text{cm}$ 、有効高さ $d=16.5\text{cm}$ (図-1参照)で、コンクリートの28日目標圧縮強度 $f_{c28}=400\text{kgf/cm}^2$ 、主鉄筋量 $A_s=2D19=5.73\text{cm}^2$ のBはりを基本としている。このはりは弾性設計法によるほぼつり合い鉄筋比を有し、AはりはBはりよりも鉄筋量のみが少なく、C、DはりではBはりよりも鉄筋量を多くしている。また、A'、B'はりは、それぞれA、Bはりと同一鉄筋量を持つが、コンクリート強度を変えたものである。試験環境は、気中(A)と水中(W、J)で、水中としてはり全体を水没させる(W)と、曲げスパンをジャケットで包みこの部分だけを水中浸漬する(J)の3環境である。なお、ジャケットによる部分水中浸漬環境は、はり最弱部を曲げスパンに作ることによって、水中で生じやすいせん断破壊を避け^{1,2)},

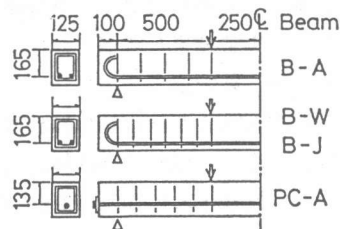


図-1 はりの詳細

表-1 実験計画表

はりの種類	コンクリート			主鉄筋			スターラップ	試験条件	終局	荷重比 P _s (%)
	強度		弾性係数 (X10 ⁵)	断面積 A _s (cm ²)	強度		間隔 (mm)		耐力 Pu(tf)	
	f _m	f _c			f _{sy}	f _{su}				
B-A	400	552	3.3, (3.7)	2D19= 5.73	3650	5680	125	気中	13.7	90 ~60
C-A		568	3.3, (3.7)	2D22= 7.74	3750	5820	55		17.5	70, 60
D-A		556	3.3, (3.7)	2D25=10.13	3900	6200	50		21.7	80 ~60
PC-A		546	3.3, (3.7)	1φ13=1.25	14720	15320	100		10.2	80 ~50
A-J	400	576	3.3, (－)	2D16= 3.97	3320	5060	100	水中	11.1	70 ~50
B-J		506	3.3, (3.5)	2D19= 5.73	3680	5660	83		13.8	72 ~46
C-J		564	3.3, (3.7)	2D22= 7.74	3750	5820	55		17.4	70 ~55
B-W		515	3.3, (3.5)	2D19= 5.73	3680	5660	83		13.7	70 ~45
A'-J	250	312	2.8, (3.1)	2D16= 3.97	3720	5500	96		10.2	70 ~45
B'-J	240	332	2.8, (2.8)	2D19= 5.73	3680	5510	86		12.7	70 ~50
	300	423	3.1, (－)	〃	〃	〃	〃		13.2	60

はりの種類の第1文字ははり名を、第2文字は試験環境（A：気中，J，W：水中（ただし，Jはジャケット条件））を示す。f_mとf_cは目標強度と試験実施時の強度、弾性係数の前の値は示方書による値、（ ）内は実験値で、単位は kgf/cm²。また、PCは有効緊張力 10.8tf のポストテンションPCはりである。

曲げ疲労特性を明らかにするために計画したものである。全てのはりはせん断破壊を避けるため、Cはりではφ6mm、その他のはりではφ9mm（SR24）筋によってせん断補強を施した。この場合のスターラップの所要量は、気中はりにおいては曲げ終局時の算定せん断力に対し、一方、水中試験に用いるはりにおいては曲げ終局時のせん断力の実験値に対して、それぞれコンクリート標準示方書に基づいて決定・配置した。この結果、水中環境に供するはりのスターラップ量は気中での試験はりよりも多くなっている（図-1と表-1参照）。

供試体はRCはりと同柱（φ10X20cm）で、各打設日ごとに8体のはりと同25本の円柱供試体を作製した。これらの供試体は、材令1日で脱枠、以後27日間の水中養生を施した後、実験室内で保存・乾燥させた。この供試体は気中試験においては、そのままの状態で試験し、一方、水中で試験するはりでは、疲労試験実施1週間前よりはり全体あるいは曲げスパンのみを再度飽水状態とし、この状態を試験終了時まで保持して試験した。

2.2 載荷試験

はりの載荷試験には容量20tのパーセータ型疲労試験機を用い、荷重は図-1に示すように全てスパン150cmの3等分点載荷とした。疲労試験は、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い、上限荷重比（P_s）は各はりの静的平均終局耐力の実験値（P_u：表-1参照）に対する百分率で数水準選び、下限荷重比は全てP_uの10%とした。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊様式

静的試験におけるRCはり、水中、気中の試験環境にかかわらず全て曲げ引張破壊をした。この場合、各はりの静的終局耐力（P_u：3本以上の平均値（表-1参照））は、同一仕様のはり（Bはり：B-A，B-J，B-W，Cはり：C-AとC-J）においては、試験環境の相違による静的耐力にほとんど差異が認められなかった。一方、疲労試験における破壊様式は、気中はりと同ジャケットはりでは曲げ破壊を、はり全体を水没させたはり（B-Wはり）では全てスターラップの疲労破断を伴わないせん断破壊をした。この場合の曲げ疲労破壊様式は、図-2に示す通りで、

気中、水中とも作用荷重が小さくなるに伴って、さらには鉄筋量が少なくなるに伴って、コンクリート圧潰型から鉄筋破断型の破壊に移行することがわかる。また、水中における曲げ破壊様式の特徴は、コンクリート圧潰型の破壊が気中におけるよりも低荷重比・低鉄筋比で生じやすくなることである。

3. 2 疲労寿命の分布と平均疲労寿命

図-3は、代表的なはりに対し、各荷重比において同一破壊様式を示したはりの疲労寿命(N)と次式で算定される生存確率P(N)との関係を対数正規確率紙上に示したものである。

$$P(N) = 1 - r / (L + 1) \quad (1)$$

ここに、rは同一試験条件において同一破壊様式を示した供試体総数Lの疲労寿命Nを小さい順に並べたときの序数である。

図-3および他のはりについても同様の検討を行った結果から、プロット点はいずれの場合もほぼ直線上にあり、各荷重比において同一破壊様式を示したはりの疲労寿命の分布は対数正規分布に従うことが明らかになった。

このとき、各荷重比ごとの回帰式は式(2)で表わされ、 $P(N)=0.5$ ($t=0$)に相応する平均疲労寿命($\bar{N}$)は式(3)によって算定される。

$$t = A \log N + B, \quad t = \Phi^{-1}(P(N)) \quad (2)$$

$$\bar{N} = 10^{-A^{-1}B} \quad (3)$$

ここに、tは標準正規変量で、任意のP(N)値に対して標準正規積分表($P(N) = \Phi(t)$)より求まる。

3. 3 $P_s - \bar{N}$ 線式とはりの疲労強度

図-4(a),(b)は、同一破壊様式をしたはりが4本以上あった荷重比に対して、それぞれ主鉄筋破断型の破壊を示したはりとコンクリート圧潰型の曲げ破壊を示したはりの $P_s - \bar{N}$ 関係を示したものである。なお、(b)図には、比較のために主鉄筋の破断で破壊した気中Bはり(B-A)と水中でせん断破壊をしたB-Wはりの結果を示している。

まず、主鉄筋破断型の破壊をしたはりの疲労強度について考えてみる。図(a)の $P_s - \bar{N}$ 線式に $\bar{N}=200$ 万回を代入して求めた200万回疲労強度は、B-Aはりで $P_s=60\%$ 、B-Jはりで $P_s=47\%$ 、A-Jはりでは $P_s=44\%$ となる。このことより、水中で主鉄筋の疲労破断によって破壊するRCはりの曲げ疲労強度は、気中のそれに比べて15%程度低下するといえる。一方、図(b)よ

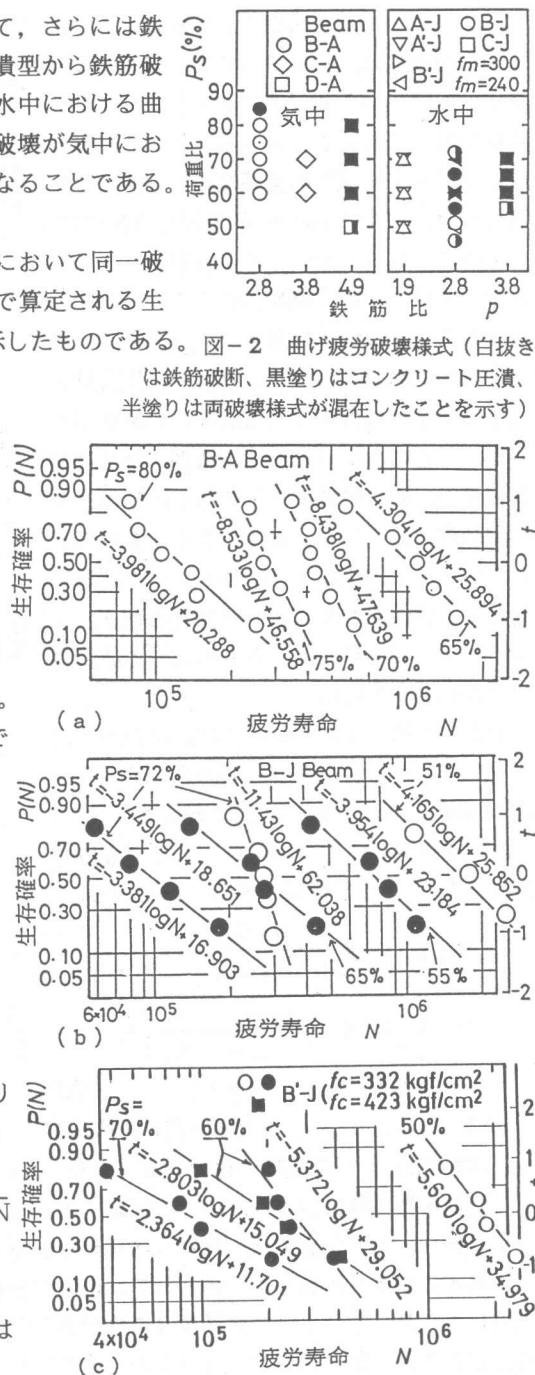


図-3 P(N) - N線図 (白抜き: 鉄筋破断、黒塗: コンクリートの圧潰)

り、コンクリート圧潰型を示したはりの 200 万回疲労強度は、B-J はりで $P_s=47\%$ となり、気中 D-A はりのそれ ($P_s=50\%$) よりも 3 % 程度の低下にとどまっている。このことは、コンクリート圧潰型の破壊様式を示すはりに対しては、水中における 200 万回疲労強度は気中のそれよりもやや低下する程度で、プレーンコンクリートの圧縮疲労強度でいわれているほどの大きな低下は示さないといえる。なお、水中においては、コンクリート圧潰型と鉄筋破断型の疲労強度はほぼ等しい値を示すこと、さらにコンクリート圧潰型のはりの疲労強度は、同一の破壊をした気中 D-A はりの疲労強度 ($P_s=50\%$) と水中でせん断破壊をした B-W はりのそれ ($P_s=42\%$) の中間域で変動する特性を有することが注目される。

3. 4 コンクリート圧潰型のはりの疲労寿命予測に関する検討

土木学会標準示方書によれば、中心圧縮応力下のプレーンコンクリートの S-N (S_c-N_c と表記) 線式には、次式で表わされるグッドマン式を用いてもよいとし、はりの疲労寿命は式(5)によって推定できるとしている。

$$\log N_o = K \frac{1 - \sigma_o / f_c}{1 - \sigma_{o \min} / f_c} = K \frac{1 - S_o}{1 - S_{o \min}} \quad (4)$$

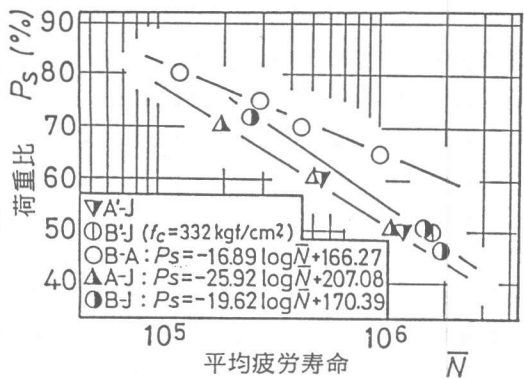
$$\log N_b = K \frac{1 - \sigma_b / (\beta f_c)}{1 - \sigma_{b \min} / (\beta f_c)} = K \frac{1 - S_b / \beta}{1 - S_{b \min} / \beta} \quad (5)$$

気中: $K=17$, 水中: $K=10$, 矩形はり: $\beta=4/3$

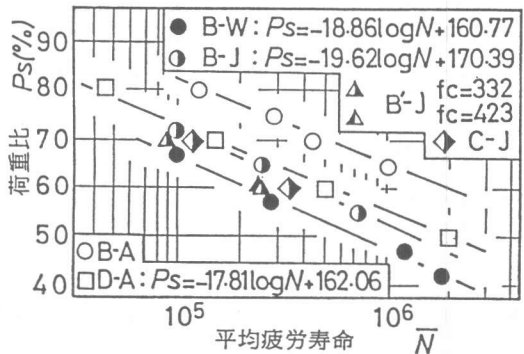
ここに、 σ_o , $\sigma_{o \min}$ は上限応力と下限応力で、 f_c はコンクリートの静的圧縮強度、 S_o , $S_{o \min}$ は上限および下限応力比である。また、 σ_b , $\sigma_{b \min}$ は弾性計算に基づいて算定される上・下限荷重作用時のコンクリート上縁応力で、 S_b , $S_{b \min}$ は上・下限応力比である。

すなわち、土木学会では、材料レベルから部材レベルの疲労寿命を予測する手法として、S-N 線式の傾き (K 値) を一定として、応力勾配の疲労に及ぼす有利な影響は係数 β によって考慮しようとしている。この係数 β の物理的な意味は示方書に記載されているが、グッドマン式の定義に従えば、式(5)から $N_b=1$ のときの切片、すなわち上縁応力比 S_b が 1 でなく β を通るように修正したものであるといえる。

以下の議論においては、コンクリートおよび鉄筋応力は、図-1 の断面寸法と表-1 の材料定数 (ただし、コンクリートの弾性係数には示方書の値を用いる) を用いて算定した結果より考察する。



(a) 鉄筋破断型のはり



(b) コンクリート圧潰型のはり

図-4 $P_s - \bar{N}$ 線図

図-5は曲げスパン内のコンクリートが圧潰したはりに対して、各上・下限荷重作用時の応力を算定し、式(5)のK値を検討したものである。 $\beta=1$ の場合を示した同図より類推して、 $\beta=4/3$ とした場合にもKは一定値として示せないことがわかる。また、図-6は、図-5と同一はりに対して、コンクリート上縁応力比 S_b と疲労寿命の実験値 N との関係を示したもので、式(5)の S_{bmin} を $S_{bmin}=0.1$ （本実験条件におけるRCはりの S_{bmin} は0.1から0.14の間にある）としたときの予測値も示している。図より、水中でのプロット点は荷重比の低下に伴って式(5)の曲線の下側に現われ、さらにプロット点と式(5)の傾きもかなり異なっている。これらの結果から、Kと β に一定値を用いる土木学会の考え方は適切でなく、RCはりのS-N線式としてグッドマン式が適用できないことを示している。

そこで、基本的には土木学会の考え方に従うが、 β を変数として取り扱う場合の β が採り得る値を検討した。

コンクリート圧潰型で破壊したあるjというはりに着目すると、上・下限荷重作用時の上縁応力 σ_{bj} 、 σ_{bminj} および疲労寿命 N_j は、実験ないしは計算によって算定され既知である。各はりごとの β は、試験環境条件に対応するK値を用い、疲労寿命の推定値 N_b を $N_b=N_j$ とおき、さらに応力の計算値を次式（式(5)を β で整理したもの）に代入することによって算定される。

$$\beta = \frac{(K \cdot \sigma_{bj} - \sigma_{bminj} \cdot \log N_j)}{f_c \cdot (K - \log N_j)} \quad (6)$$

図-7に、各はりごとに算定した曲率ないしは上縁応力比 S_b と β との関係を示す。図より、示方書の変動荷重による応力度の計算法をそのまま適用すれば、 β は変数として扱う必要があることがわかる。この場合、相関係数Rの比較から、プロット点の線形性は曲率よりも S_b の方が良好で、本研究の範囲から、水中と気中でコンクリートが圧潰するはりに対する β として、それぞれ図中の直線式（ただし、 $\beta \geq 1$ ）が得られた。

3. 5 鉄筋破断型のはりの疲労寿命評価に関する検討

図-8は、主鉄筋の破断で破壊したはりに対し、図-7 ϕ ないしは S_b と β との関係

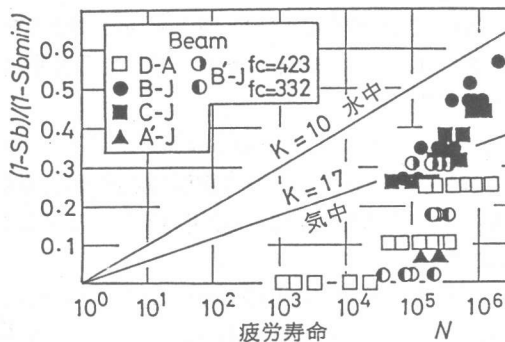


図-5 グッドマン式への適用

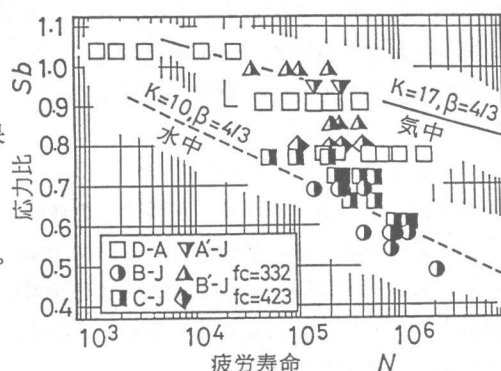
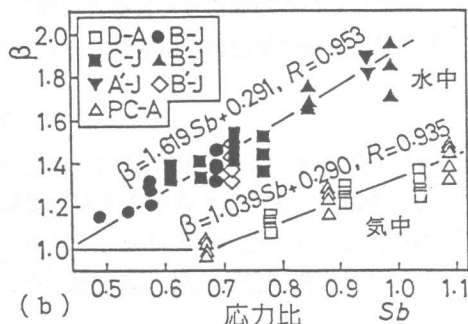
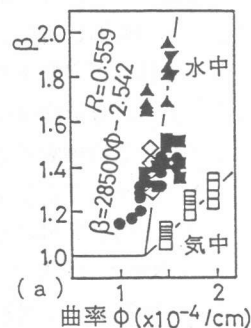


図-6 応力比と疲労寿命との関係



応力振幅の計算値(σ_{sr})と疲労寿命との関係を両対数紙上に示したもので、ジャケットB-Jはりの条件($\sigma_{spd}=428\text{kgf/cm}^2$)に対して示方書に規定されている異形鉄筋のS-N線式(式(7))も示している。

$$f_{srd}=1900(1-\sigma_{spd}/f_{ud})(10^{\alpha}/N^k)/\gamma_s, \quad \alpha=k\phi(0.82-0.003\phi) \quad (7)$$

ここに、 f_{srd} 、 σ_{spd} は鉄筋の設計疲労強度と下限応力である。また、 f_{ud} は鉄筋の引張強度(ここでは表-1の f_{su} を用いる)、 k は0.12、 ϕ は鉄筋の公称直径、 $k\phi$ は一般に1.0、 γ_s は1.0である。

図より、水中はりの疲労強度は気中よりもかなり小さく、さらに水中はりのプロット点は応力振幅が小さくなるに伴って実線(式(7))の下側に現われている。このことは、水中環境における鉄筋のS-N線式は気中と同一のものが適用できず、新たに規定して行く必要のあることを示している。

4. まとめ

本研究は、海洋コンクリート構造物の疲労性状を把握するための手始めとして、水中環境下におけるRCはりの曲げ疲労性状を検討し、併せてより精度の良い疲労寿命の予測手法を開発することを目的として行ったものである。ここでは、研究の範囲内で明らかになったことを列挙し、結論とする。

- (1) RCはりの曲げ疲労破壊様式は気中と水中で異なり、気中では主鉄筋の疲労破断によって破壊するはりであっても水中ではコンクリート圧潰型の破壊になりやすくなる。
- (2) 水中におけるRCはりの曲げ疲労強度は気中で主鉄筋の破断で破壊するはりのそれに比べて15%程度低下する。
- (3) RCはりの疲労寿命予測において、応力勾配が疲労に及ぼす有利な影響を考慮して導入された低減係数 β は、土木学会のように $\beta=4/3$ と一定値を示さず、はり上縁応力比の大きさに依存して変化する量であるといえる。コンクリート強度300~600kgf/cm²の範囲における β の暫定値として次式を用いることを提案する。

$$\text{水中: } \beta = 0.291 + 1.619 \cdot S_b \geq 1, \quad \text{気中: } \beta = 0.290 + 1.039 \cdot S_b \geq 1$$

- (4) 水中において主鉄筋の破断で破壊するRCはりの疲労寿命の予測式として、土木学会が規定している鉄筋のS-N線式は適用できない。

本研究は昭和63年度科学研究費(一般研究(C))の一部で行った。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 前岡隆頭, 水元義久, 児島孝之: 鉄筋コンクリートはりの疲労性状に及ぼす水の影響に関する一実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第V部, 1982, pp.305-306
- 2) 西林新蔵, 井上正一, 大谷公行: 水中における鉄筋コンクリートはりの疲労性状, コンクリート工学年次講演会論文集, 第9巻, 第2号, 1987, pp.663-638

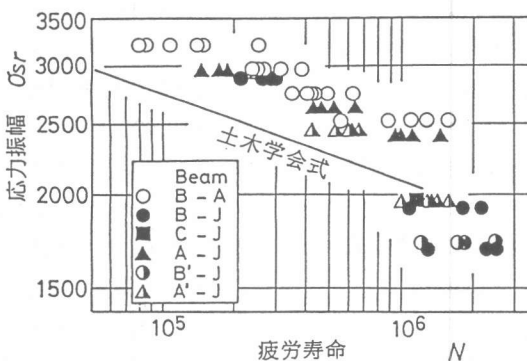


図-8 応力振幅とはりの疲労寿命