

腐食環境におけるRCはりの曲げ疲労寿命予測に関する研究

鳥取大学 正員 西林 新蔵
鳥取大学 学員 ○難波 勝彦

鳥取大学 正員 井上 正一
(株)フジタ 井上 祥一

1. まえがき

近年、コンクリート構造物が海洋等の過酷環境下に建造され、それに伴う耐久性の低下という問題が増大してきた。このような状況で海洋コンクリート構造物の疲労を考えると、構造材料である鋼材の腐食疲労の他に水の存在がコンクリートの疲労に大きく影響すると考えられる。そこで、本研究は、気中および腐食環境(水中、海水中)下でRCはりの曲げ疲労試験を行い、破壊様式や疲労寿命の相違を明らかにするとともに、腐食環境下における疲労寿命の予測手法を確立することを目的としている。

2. 実験概要

実験計画を表-1に、RCはり供試体断面形状を図-1に示す。RCはり供試体は材令28日まで水中養生を施した後、試験実施時(材令100日以上)まで実験室内で乾燥させる。その後、腐食環境下で試験する供試体は、試験実施一週間前よりはり全体を水中浸漬または予め曲げスパンに装着したジャケットによって水または海水浸漬状態に保持し、そのままの状態で行う。疲労試験は繰返し载荷速度5 Hz、载荷はスパン150 cmの3等分点载荷とする。疲労試験における上限荷重比 P_s は、疲労試験に先立って行われた各はりの静的終局耐力の平均値 P_u の百分率で数水準選び、下限荷重比は全て P_u の10%と一定とする。

3. 結果と考察

3.1 破壊様式

各環境下のRCはりの曲げ疲労破壊様式を図-2に示す。水中では気中におけるよりも低鉄筋比、低荷重比においてコンクリート圧潰型の破壊が生ずる。これに対し、海水中では、鉄筋の腐食疲労の影響を受けると考えられ、水中に比べて主鉄筋破断型の破壊を生じやすくなること、コンクリート強度が高いほど主鉄筋破断型の破壊を生じやすくなることもわかる。またB4-Wはりが全てせん断破壊したことより、水中ではせん断破壊しやすいといえる。

表-1 実験計画

はりの種類	コンクリート f_c'	コンクリート $E_c(\times 10^4)$	主鉄筋量 (主鉄筋比) (%)	主鉄筋 引張強度 (kgf/cm ²)	スパン 間隔 s (mm)	試験 環境	終局 耐力 P_u (t)
B4-A	552	3.3	2D19(2.8)	5680	125	気中	13.7
D4-A	558	3.3	2D25(4.9)	6200	50		21.7
B4-W	515	8.3	2D19(2.8)	5660	83	水中	13.6
B4-WJ	508	3.3	2D19(2.8)	5660			13.8
B2-WJ	332	2.8	5510	5510			12.7
C4-WJ	564	3.3	2D22(3.8)	5820	62.5		17.4
B4-SJ	517	3.3	2D19(2.8)	5660	83	海水中	13.7
B2-SJ	361	2.8	5510	5510			12.7
C4-SJ	520	3.3	2D22(3.8)	5340	62.5		17.2

はりの種類の英字B, C, Dはそれぞれ主鉄筋径D19, D22, D25を、数字4, 2はそれぞれコンクリートの28日強度が400, 250kgf/cm²を示す。 f_c' は試験実施時の圧縮強度、 E_c は示方書による弾性係数で、単位はkgf/cm²である。WJ, SJのJは曲げスパンのみを浸漬したはりを示す。

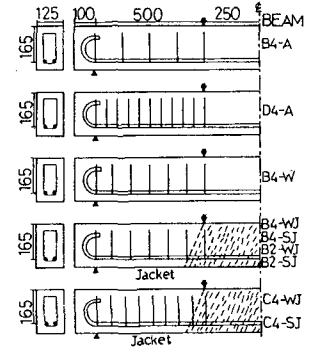


図-1 断面形状

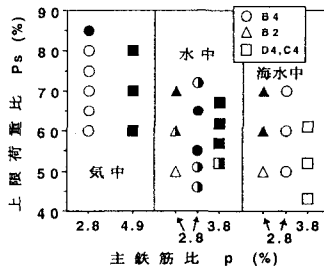
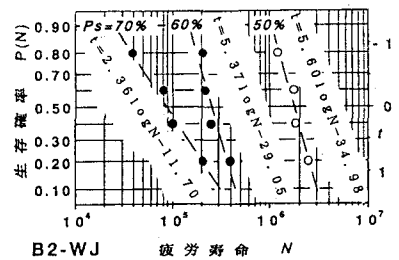
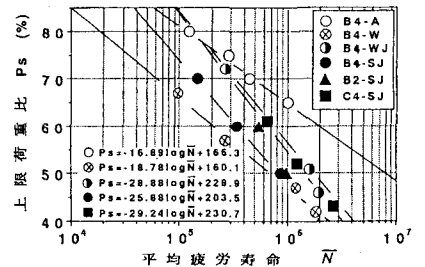


図-2 破壊様式 (黒塗りは圧潰、白抜きは鉄筋破断、半塗りは混在)

図-3 $P(N)-N$ 線図 (黒塗りは圧潰、白抜きは鉄筋破断)図-4 P_s-N 線図

3.2 疲労寿命の分布と $P_s-\bar{N}$ 線式 同一破壊様式を示したはりに対して、各荷重比ごとの疲労寿命 N と次式(1)より算定される生存確率 $P(N)$ との関係に対数正規確率紙上にプロットした一例を図-3に示す。

$$P(N) = 1 - r / (L + 1) \quad , \quad t = \Phi^{-1}(P(N)) \quad (1)$$

ここに、 r は同一試験条件で試験した同一仕様の RC はり供試体総本数 L の疲労寿命 N を小さい順に並べたときの序数で、 t は標準正規変量である。他のはりについても同様に行った結果、同一荷重比において同一破壊様式を示すはり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、 $P(N) = 0.5 (t = 0)$ に相応する疲労寿命 N が平均疲労寿命 $\bar{N}$ を表わす。図-4に鉄筋破断型の破壊をしたはりに対する $P_s-\bar{N}$ 関係を示す。図中の $P_s-\bar{N}$ 線式に $\bar{N} = 200$ 万を代入して求まる 200 万回疲労強度は、腐食環境が気中から水中へ、水中から海水中へと厳しくなるに伴って低下することがわかる。

3.3 疲労寿命予測手法の提案

3.3.1 鉄筋破断型のはりの場合 図-5 に鉄筋破断による曲げ疲労破壊したはりに対して、弾性設計に基づく応力振幅算定値と疲労寿命の実験値との関係を示す。図中の実線は、土木学会に規定されている異形鉄筋の $S-N$ 線式(式(2))に、B4-A はりの試験条件 ($\sigma_{s, \min} = 425 \text{ kgf/cm}^2$) を代入したものである。

$$\sigma_{s, r} = 1900 \cdot (1 - \sigma_{s, \min} / f_{ud}) (10^4 / N^{0.12}) / 1.05 \quad , \quad a = 0.82 - 0.003 \cdot \phi \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_{s, r}$ は鉄筋応力振幅、 $\sigma_{s, \min}$ は鉄筋下限応力、 f_{ud} は鉄筋引張強度、 ϕ は鉄筋の公称径である。

図より、プロット点の傾きは、気中よりも水中で、水中よりも海水中で急となっていることから、腐食環境が厳しくなるに伴って鉄筋の疲労強度は小さくなることがわかる。また疲労寿命の実験値は、気中では実線(予測値)よりも上側に現れるが、腐食環境下では応力振幅が低下するに伴って下側に現れてくる。このことより、気中の $S-N$ 線式は腐食環境下では適用できず新たに規定していく必要があると考えられる。

3.3.2 コンクリート圧潰型のはりの場合 土木学会によれば、コンクリート圧潰型の曲げ疲労破壊をする RC はりの疲労寿命は次式(3)で推定できる。

$$\log N = K \frac{1 - \sigma_{cb} / (\beta \cdot f_c)}{1 - \sigma_{cbm} / (\beta \cdot f_c)} = K \frac{1 - S_{cb} / \beta}{1 - S_{cbm} / \beta} = K \frac{1 - S_{ce}}{1 - S_{cem}} \quad (3)$$

ここに、 K は気中で17、水中で10、 β は応力勾配を考慮した低減値で矩形はりでは $4/3$ 、 f_c はコンクリート静的圧縮強度である。 σ_{cb} 、 σ_{cbm} は弾性設計に基づく上・下限応力、 S_{cb} 、 S_{cbm} は上・下限応力比、 S_{ce} 、 S_{cem} は上・下限修正応力比である。図-6にコンクリート圧潰型の破壊をしたはりに対して、 S_{ce} と疲労寿命 N の関係を示す。図中の実線は気中の、破線は水中の $S-N$ 線式を描いたものである。図より全環境下においてプロット点は直線上にないことより、低減値 β を定数でなく式(4)より算定される変数として用いることを考える。

$$\beta = \frac{K \sigma_{cb} - \sigma_{cbm} \log N}{f_c \cdot (K - \log N)} \quad (4)$$

図-7 に上式より算定される β と S_{cb} の関係を示す。この図において、各環境下ごとの回帰式(式(5))を暫定式として用いることを提案する。

$$\text{気 中: } \beta = 0.564 + 0.714 \cdot S_{cb} \quad , \quad \text{湿潤環境: } \beta = 0.380 + 1.477 \cdot S_{cb} \quad (5)$$

ただし、式(5)において β が1より小さくなる場合には、 $\beta = 1$ とする。

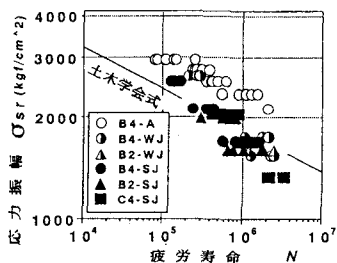


図-5 $\sigma_{s, r}-N$ 線図

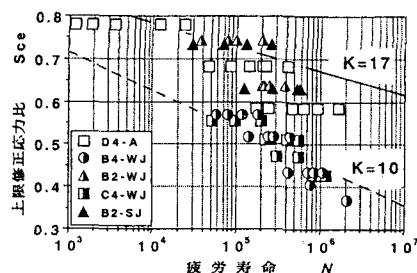


図-6 $S_{ce}-N$ 線図

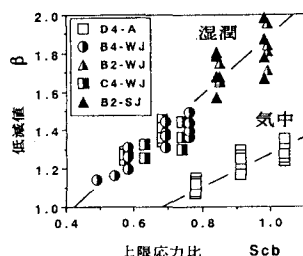


図-7 $\beta-S_{cb}$ 線図