

腐食湿潤環境におけるRCはりの疲労性状

鳥取大学 正会員 西林 新蔵

鳥取大学 正会員 井上 正一

鳥取大学 学生員 井上 祥一

佛松村組 正会員 曾谷 智司

1. まえがき

近年、コンクリート製の海洋構造物が建設される機会が増えているが、これらの構造物は従来の陸上構造物に比べて極めて過酷環境に暴露されることになる。この過酷環境は、構造材料であるコンクリートや鋼材の静力学的特性の低下を引き起こすが、その他にも疲労挙動を考えた場合、腐食疲労や水の存在がコンクリート構造物の疲労に大きな影響を及ぼすと考えられる。このような観点から、本研究では、湿潤で腐食環境下におけるRCはりの曲げ疲労試験を行い、腐食環境条件の相違がRCはりの破壊様式や疲労寿命に及ぼす影響を明らかにし、

併せて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

実験計画とはりの設

計要因を表-1に、は

り供試体の断面形状を

図-1に示す。RCは

りの主鉄筋量 A_s は全て2D19=

5.73 cm^2 で、コンクリート強度のみを変えている

(B4、B2はりはそれぞれ28日目標強度 f_{c28} =400と250 kgf/cm^2 を使用)。

RCはり供試体は材令28日まで水中養生を施した後、実験室内で3か月間乾燥させた。その後、腐食環境下(水中と海水中)で疲労試験を行うはりは、試験開始1週間前より、はり全体を、あるいは予め曲げスパンに装着したジャケット内のみを常時水あるいは海水浸漬状態になるようにして試験を行った。疲労試験は繰返し載荷速度5Hz、載荷はスパン150cmの3等分点載荷のもとで行なった。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った各はりの静的終局耐力の平均値(P_u ;

表-1に併記)に対する百分率で水準を選び、一方、下限荷重比は全て P_u の10%と一定とした。

3. 結果と考察

3.1 破壊様式 各種環境下で行ったRCはりの曲げ疲労破壊様式を図-2に示す。気中においては高荷重比の場合にのみ生じていたコンクリート圧潰型の破壊が、湿潤な腐食環境下(水中と海水中)においては気中におけるよりも低荷重比で生じやすくなる。また、海水中の方が水中よりも鉄筋破断型の破壊が生じやすいこと、コンクリート強度が大きいほど鉄筋破断型の破壊になりやすくなること、もわかる。なお、はり全体を水中浸漬したB4-Wはりは全てせん断破壊をしており、水中ではせん断破壊が生じやすいといえる。

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 $A_s (\text{cm}^2)$	引張強度 $f_{t,0}$ (kgf/cm^2)	スパン 間隔 s (mm)	試験 環境	終局 耐力 $P_u (\text{t})$
B4-A	552	3.3		5680	125	気中	13.7
B4-W	515	3.3	2D19	5660			13.7
B4-WJ	506	3.3		5660	83	水中	13.8
B2-WJ	332	2.8	-5.73	5510			12.7
B4-SJ	517	3.3		5660		海水中	13.8
B2-SJ	361	2.8		5510			12.7

はりの種類の数字4、2は使用コンクリートの28日強度の400と250 kgf/cm^2 を示す。 f_c は試験実施時の平均圧縮強度、 E_c は弾性係数(示方書による値)、単位は kgf/cm^2 、WJ、SJのJはジャケットはりを示し、曲げスパンのみを浸漬

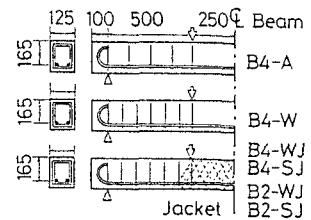


図-1 断面形状

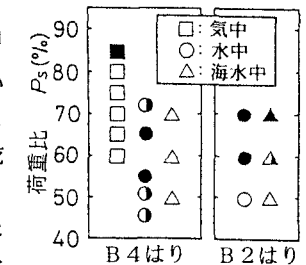


図-2 破壊様式(白抜きは鉄筋破断、黒塗りはコンクリート圧潰、半塗りは両破壊様式が混在)

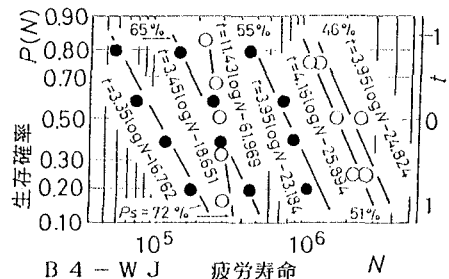


図-3 $P(N)-N$ 線図(白抜きは鉄筋破断、黒塗りはコンクリートの圧潰)

3.2 疲労寿命の分布と $P_s - \bar{N}$ 線式 図-3は、各荷重比ごとに同一破壊様式を示したはりの疲労寿命 N と、次式 (1) より求めた生存確率 $P(N)$ の関係の一例を対数正規確率紙上にプロットしたものである。

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

ここに、 r は同一条件で試験した供試体総数 ℓ の疲労寿命 N を小さい順に並べたときの序数で、 t は標準正規変量である。

図-3および他のはりについても同様の処理を行った結果より、各荷重比ごとに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といえる。

このとき、 $P(N) = 0.5$ ($t = 0$) に相応する N の値が平均疲労寿命 $\bar{N}$ を表わす。図-4は、主鉄筋破断型の破壊をしたはりに対する $P_s - \bar{N}$ 関係を示したものである。図中の $P_s - \bar{N}$ 線式に $\bar{N} = 200$ 万回を代入して求めた 200 万回疲労強度は、B4-A で $P_s = 60\%$ 、B4-WJ で $P_s = 47\%$ 、B4-SJ で $P_s = 40\%$ 、せん断破壊をした B4-W はりで $P_s = 42\%$ となる。このことより、主鉄筋の疲労破断で破壊するはりの曲げ疲労強度は、気中から水中、水中から海水中へと腐食環境がシビアになるに伴って低下すること、この低下は長寿命域においてより顕著に現われること、がわかる。

3.3 鉄筋応力と鉄筋破断型のはりの疲労寿命

図-5は、主鉄筋破断型で曲げ破壊したはりに対して、弾性論に基づく鉄筋の応力振幅の計算値とはりの疲労寿命の

実験値との関係を示したもので、図中の実線は、B4-WJ はりの試験条件 ($\sigma_{\min} = 428 \text{ kgf/cm}^2$) に対し、コンクリート標準示方書に規定されている異形鉄筋の $S-N$ 線式 (式 (2)) を示したものである。

$$\sigma_{sr} = 1900(1 - \sigma_{\min}/f_{ud})(10^3/N^{0.12})/1.05, \quad a = (0.82 - 0.003\phi) \quad (2)$$

ここに、 σ_{sr} は鉄筋の振幅応力、 $\sigma_{\min}$ は鉄筋の下限応力、 f_{ud} は鉄筋の引張強度 (B4-WJ はりでは $f_{ud} = 5660 \text{ kgf/cm}^2$: 表-1 参照)、 ϕ は鉄筋の公称径 (19mm) である。

図より、疲労寿命の実験値は、気中よりも水中で、水中よりも海水中で小さく、さらに腐食環境下のプロット点は応力振幅が小さくなるに伴って実線 (予測値) の下側に現われている。このことは、腐食環境下における鉄筋の $S-N$ 線式は気中と同一のものが使用できず、新たな $S-N$ 線式を規定していく必要があることを示している。

3.4 コンクリート上縁応力とはりの疲労寿命 コンクリート標準示方書によれば、コンクリート圧潰型の曲げ破壊を示す RC はりの疲労寿命 ($N = N_b$) は次式によって予測できる。

$$\log N_b = K \frac{1 - \sigma_b / (\beta \cdot f_c)}{1 - \sigma_{b\min} / (\beta \cdot f_c)} = K \frac{1 - S_b / \beta}{1 - S_{b\min} / \beta} \quad (3)$$

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

ここに、 f_c はコンクリートの静的平均圧縮強度、 σ_b 、 $\sigma_{b\min}$ は弾性計算に基づく上・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。

図-6は、コンクリートが圧潰したはりに対して、コンクリート上縁応力比 S_b とはりの疲労寿命 N との関係を示したもので、図中には、式 (3) の $S_{b\min}$ に $S_{b\min} = 0.1$ (B4, B2 に対する $S_{b\min}$ は 0.1 と 0.13) を代入したときの $S_b - N$ 線式も示している。図より、プロット点は $K = 10$ の曲線上になく、土木学会コンクリート標準示方書の考え方は、湿潤環境下の RC はりの疲労寿命の予測に適用できないといえる。

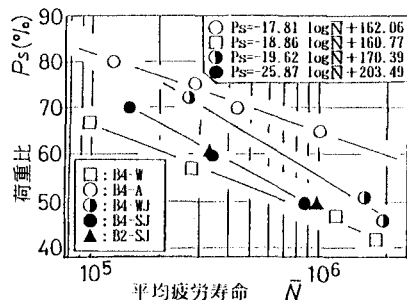


図-4 $P_s - \bar{N}$ 線図

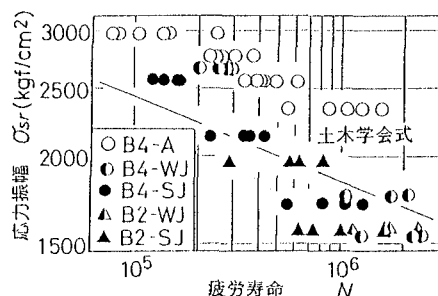


図-5 $\sigma_{sr} - N$ 線図

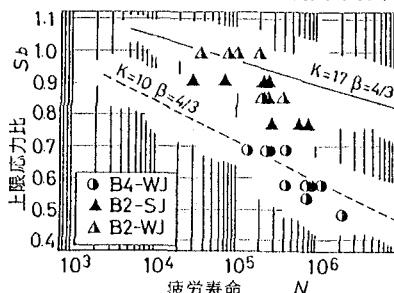


図-6 応力比と疲労寿命との関係