

論文

[2047] 海水中における RC はりの疲労性状

正会員 西林 新蔵 (鳥取大学土木工学科)

正会員 ○井上 正一 (鳥取大学土木工学科)

正会員 吉野 公 (鳥取大学土木工学科)

井上 祥一 (鳥取大学大学院)

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に暴露されることになる。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の影響を考えた場合、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乾燥条件下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が極めて重要となる。

このような観点から、本研究では、海洋環境を含む腐食環境条件の相違がコンクリート構造物の疲労性状、とりわけ疲労寿命に及ぼす影響を明らかにするために計画した。すなわち、気中、真水中および海水中での RC はりの疲労試験を実施し、水の存在や腐食環境条件の相違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をしたはりに対し、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、材料レベルの疲労特性と部材レベルの疲労特性との関係についても考察を加えている。

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、載荷方法、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 はりの断面寸法は全て、 $170 \times 12.5 \times 20$ cm、有効高さ $d = 16.5$ cm (図-1 参照) で、コンクリートの28日目標圧縮強度 $f_{c28} = 400$ kgf/cm²、主鉄筋量 $A_s = 2D19 = 5.73$ cm² の B4 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するはりで、B2 はりはコンクリート強度のみを $f_{c28} = 250$ kgf/cm² に変えたものである。試験環境は、気中(A)と水中(W)および海水中(S)で、水中試験においては、はり全体を水中浸漬するはり(W)と、曲げスパンをジャケットで包みこの部分のみを水中に部分浸漬するはり(以下ジャケットはりと呼び、水浸漬の場合には WJ と表記)を、海水中の試験においてはジャケットはり(SJ)のみをそれぞれ用いた。なお、ジャケットはりは、最弱部を曲げスパンに作ることによって、水中で起こりやすいせん断破壊を

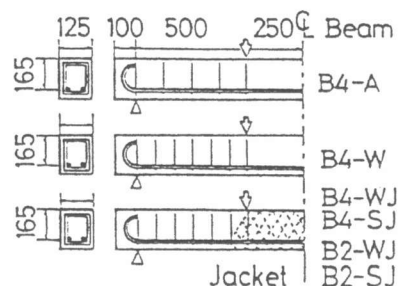


図-1 はりの詳細

避け[1],[2], 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、繰返し荷重下でのせん断破壊を避けるため、 $\phi 9\text{mm}$ (SR24) 筋のスターラップ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設計曲げ耐力の計算値に相応するせん断力に対し、一方、腐食環境（水中と海水中）下で試験するはりにおいては曲げ終局耐力の実験値に対応するせん断力に対して、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、腐食環境下で試験するはりのスターラップ量は気中での試験はりよりもかなり多くなっている（図-1と表-1参照）。

表-1 実験計画

はりの種類	コンクリート		主鉄筋の引張強度	スターラップの間隔	試験環境	終局耐力 P_u (tf)	荷重比 P_s (%)
	強度	弾性係数					
	f_c	E_c ($\times 10^5$)	f_{su}	(mm)			
B4-A	552	3.3, (3.7)	5680	125	気中	13.7	85~60
B4-W	515	3.3, (3.5)	5660	83	水中	13.7	70~45
B4-WJ	506	3.3, (3.5)	5660			13.8	72~46
B2-WJ	332	2.8, (2.8)	5510			12.7	70~50
B4-SJ	517	3.3, (—)	5660		海水中	13.8	70~50
B2-SJ	361	2.8, (2.9)	5510	12.7		70~50	

はりの種類の数字4, 2は使用コンクリートの28日目標強度が 400と 250 kgf/cm^2 であることを示す。 f_c は試験実施時の平均圧縮強度、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/cm^2

供試体はRCはりと同円柱 ($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$) で、各打設日ごとに8体のはりと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、そのままの状態で行い、一方、腐食環境（水中と海水中）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をあるいはジャケット内（曲げスパン）のみを対応する試験溶液中で飽水状態とし、この状態を試験終了時まで保持して試験した。すなわち、ジャケットはりにおいては、水中ポンプにて常時ジャケット内に試験溶液を補給し、はり全体が液面から出ないように配慮した。なお、海水には鳥取県賀露港から採取した天然海水を用いている。

2.2 荷重試験

はりの荷重試験には容量 20 トンのパル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 150 cm の3等分点荷重とした。疲労試験は、繰返し荷重速度 5 Hz、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) は各はりの静的終局耐力の実験値の平均値 (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、気中、水中、海水中の試験環境条件の相違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 : 各はりとも3本以上の平均値(表-1参照)) は、同一仕様のはり (B4はりあるいはB2はり) においては、試験環境の相違による静的耐力に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、はり全体を水没させたはり (B4-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、その他のはり (気中はりおよびジャケットはり) では曲げ破壊をした。この場合の曲げ疲労破壊様式は、図-2に

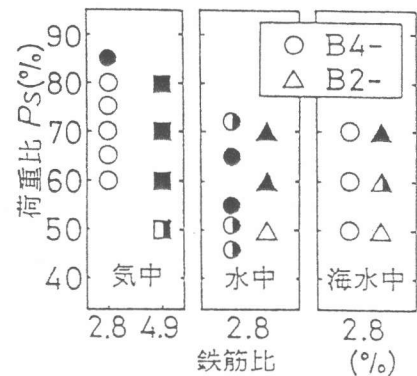


図-2 破壊様式 (白抜きは鉄筋破断、黒塗りコンクリート圧壊、半塗りは両破壊様式が混在)

示す通りで、気中においては高荷重比あるいは鉄筋量が極めて多い場合（図中の■はりはB4はりの主鉄筋に $A_s=2D25=10.13 \text{ cm}^2$ を用いたはりで、以下D4-Aはりと称す[3]）にのみ生じていたコンクリート圧潰型の破壊が、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、低鉄筋比で生じやすくなる傾向のあることが伺える。なお、海水中と水中における曲げ疲労破壊様式の相違は、海水中では水中におけるよりも①鉄筋破断型の破壊が生じやすくなること、さらには②コンクリート強度が破壊様式にかなり大きな影響を及ぼし、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、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、各荷重比ごとに試験したはりのうち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)との関係に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および他のはりにについても同様の検討を行った結果、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。

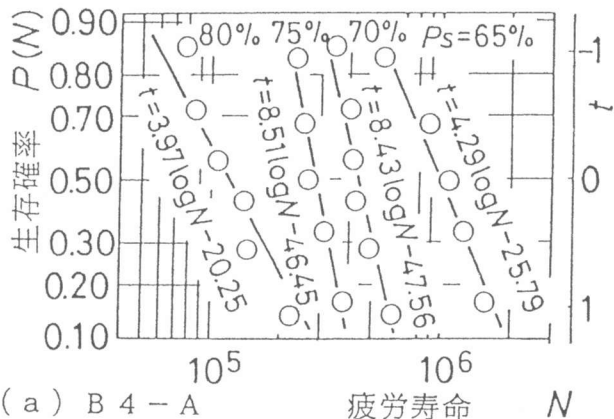
$$t = A \cdot \log N + B, \quad t = \Phi^{-1}(1 - P(N)) \quad (2)$$

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

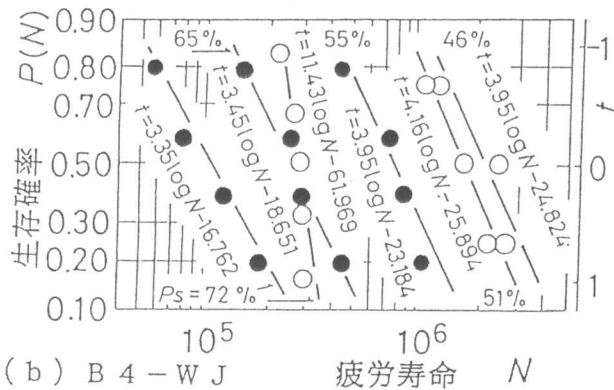
ここに、tは標準正規変量で、任意のP(N)値に対して標準正規積分表 ($1 - P(N) = \Phi(t)$) より求まる。

3. 3 $P_s - \bar{N}$ 線式とはりの疲労強度

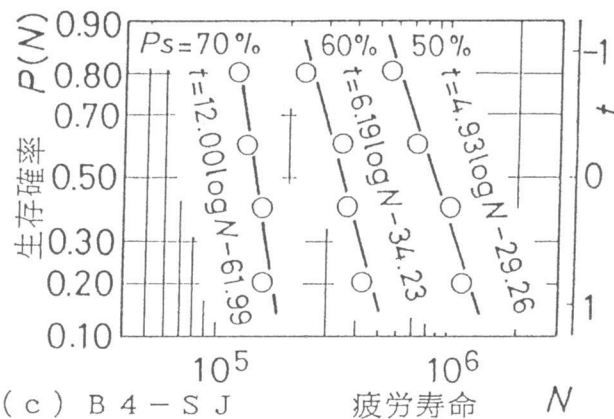
図-4および表-2は、同一荷重比において同一破壊様式を示したはりが4本以上ある場合の結果に対して、主鉄筋破断型の曲げ破壊を示したはりの $P_s - \bar{N}$ 関係を示したものである。なお、これらの図表には、



(a) B4-A 疲労寿命 N



(b) B4-WJ 疲労寿命 N



(c) B4-SJ 疲労寿命 N

図-3 P(N)-N線図 (白抜：鉄筋破断、黒塗：コンクリートの圧壊)

比較のためにせん断疲労破壊をした水中の B4-W はりの結果も併せて示している。

表中の $P_s - \bar{N}$ 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 はりに対して、気中はり (B4-A) で $P_s = 60\%$ 、水中ジャケットはり (B4-WJ) で $P_s = 47\%$ 、はり全体を水中に浸漬したはり (B4-W) で $P_s = 42\%$ 、海水中ジャケットはり (B4-SJ) で $P_s = 40\%$ となる。このことより、腐食環境下で主鉄筋の破断によって破壊する RC はりの曲げ疲労強度は、水中では気中よりも 15% 程度低下し、海水中では水中よりもさらに 5% 程度低下するといえる。

3. 4 コンクリート圧潰型のはりの疲労寿命とコンクリート上縁応力との関係

土木学会コンクリート標準示方書に従えば、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 ($N = N_b$) は次式で表されるグッドマン式によって予測できるとしている。

$$\log N_b = K \frac{1 - \sigma_b / (\beta f_c)}{1 - \sigma_{bmin} / (\beta f_c)} = K \frac{1 - S_b / \beta}{1 - S_{bmin} / \beta} \quad (4)$$

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 , σ_{bmin} 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_{bmin} は上・下限応力比である。

以下、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。

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、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(4)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(4)の曲線の下側に現われ、さらにプロット点と式(4)の傾きもかなり異なっている。これらの結果から、水中で生じやすいコンクリート圧潰型の破壊を示すはりの疲労寿命を予測するための土木学会の考え方は適切でないといえる。なお、実験結果は少ないが、コンクリート応力が同一の場合、コンクリート圧潰型の破壊を示す RC はりの疲労寿命は水中と海水中でほぼ等しく、この破壊様式を呈する場合には腐食環境の影響を受けにくいと推察される。

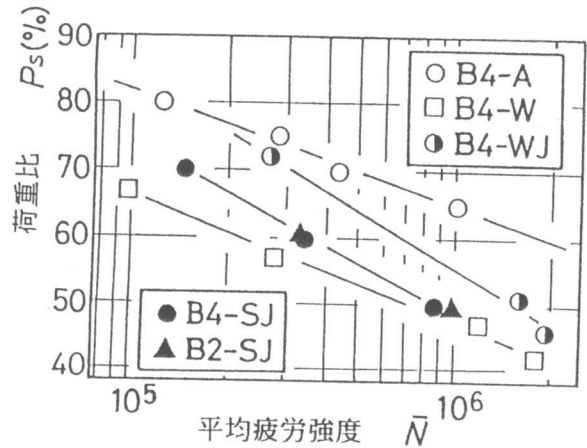


図-4 $P_s - \bar{N}$ 線図

表-2 $P_s - \bar{N}$ 線式

はりの種類	回帰式 $P_s = A \log \bar{N} + B$
B4-A	$P_s = -17.81 \log \bar{N} + 162.06$
B4-W	$P_s = -18.86 \log \bar{N} + 160.77$
B4-WJ	$P_s = -19.62 \log \bar{N} + 170.39$
B4-SJ	$P_s = -25.87 \log \bar{N} + 203.49$

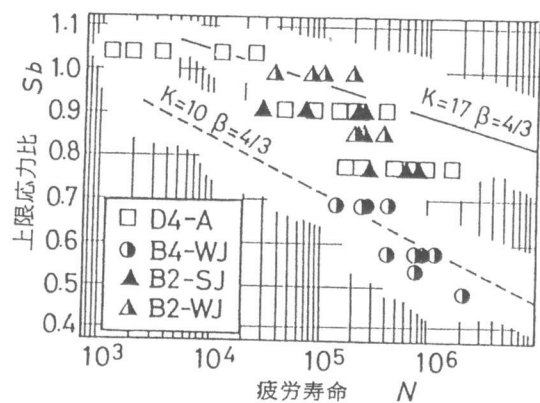


図-5 応力比と疲労寿命との関係

3. 5 鉄筋破断型のはりの疲労寿命と鉄筋応力との関係

図-6は、主鉄筋の破断で破壊したはりに対し、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、ジャケットはりB4-WJの条件(下限応力: $\sigma_{spd}=428\text{kgf/cm}^2$)に対して土木学会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(5))も示している。なお、この直線は、B4、B2はりではほぼ一致し、さらに水中以外の他の試験環境条件においてもほぼ一致している。

$$f_{srd} = 1900 (1 - \sigma_{spd} / f_{ud}) (10^{\alpha} / N^k) / \gamma_s, \quad \alpha = k_0 (0.82 - 0.003 \phi) \quad (5)$$

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_0 は一般に1.0、 γ_s は1.05である。

図より、気中のはりのプロット点はいずれも示方書の式よりも上にあり、安全側の結果となっている。さらに、プロット点と直線との傾きはほぼ一致しており、示方書のS-N線式が生存確率95%を見込んで規定された式であることを考えると、かなり合理的な式を与えているといえる。

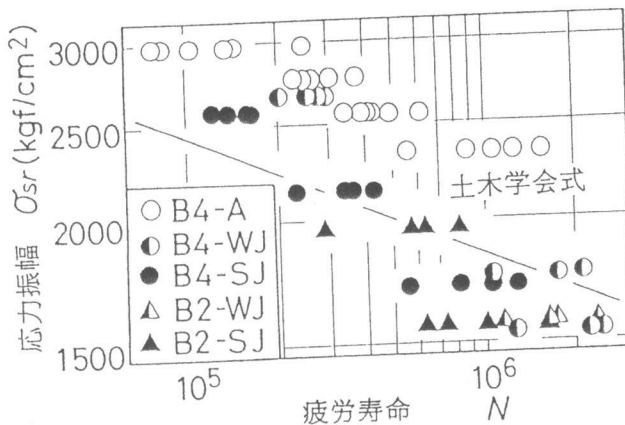


図-6 応力振幅と疲労寿命との関係

一方、腐食環境下のはりの疲労強度は、気中よりも水中で、水中よりも海水中で小さく、さらに水中および海水中のはりのプロット点はともに応力振幅が小さくなるに伴って実線(式(5))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適用できず、特に長寿命域の疲労を対象としなければならない場合には新たなS-N線式を規定して行く必要のあることを示している。

3. 6 腐食環境下における鉄筋の疲労振幅強度の特性値を決定する際の問題点

図-7、8は、それぞれ腐食環境下における裸鉄筋のS-N線図と、裸鉄筋をセメントペーストあるいはコンクリート中に埋込むことによる海水中での疲労強度の増加状況を示したものである[4]。図-6、7の比較より、いずれのS-N線図の傾きも、気中から水中、さらには海水中へと腐食環境がシビアになるに伴って大きくなっており、この観点からは、鉄筋破断型のRCはりのはりの疲労特性は同一環境条件における材料の疲労性状と密接に関係していることが伺える。

すなわち、RCはりのはりの疲労強度が気中よりも水中で、水中よりも海水中で小さくなること、海水中と水中ではコンクリートの疲労強度には差がないが(図-5参照)、鉄筋では大きな差があり、これが海水中で鉄筋破断型の疲労破壊が生じやすくなること、に関係している。

しかし一方で、図-8より、コンクリートで取り囲まれた鉄筋の疲労強度は裸鉄筋のそれよりもきわめて大きくなることから、腐食環境下においては鉄筋を取囲むコン

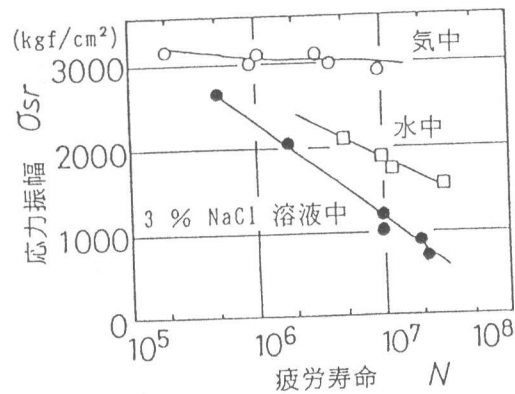


図-7 鉄筋のS-N線図

クリートの劣化の進行に伴って材料の疲労強度も低下する可能性のあることを示すもので、疲労寿命を予測して行くための鉄筋のS-N線式をどのように規定して行くかが緊急課題として残されている。とくに、土木学会では設計疲労強度（設計S-N線式）の決定は技術者の判断に委ねているが、その判断には腐食速度の評価も含め、腐食が進行した状態でのRCはりの疲労性状の解明等、今後明らかにされなければならない問題が山積みされているといえる。

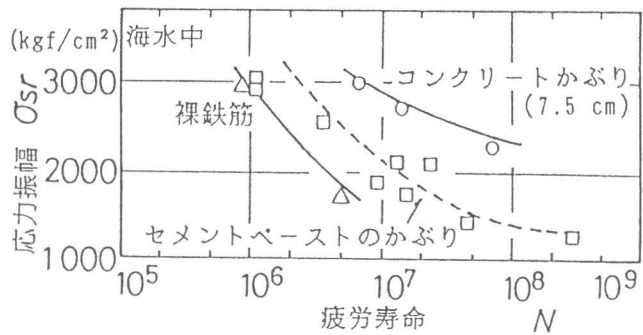


図-8 埋込み鉄筋のS-N線図

4. まとめ

本研究は、海洋を含む腐食環境下の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、先ず、コントロール用として、損傷のない健全な供試体を用い、疲労試験中（短期間）にのみ腐食環境の影響を受けるRCはりの曲げ疲労性状を明らかにすることを目的として行ったものである。したがって、ここで得られたRCはりの疲労特性は、実構造物の供用期間とその間に蓄積される腐食の問題が考慮されていないため、腐食環境下における（腐食）疲労特性の最も良好な（危険側の）結果であると判断される。ここでは、その点を強調し、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、気中と腐食環境下（水中と海水中）で異なり、気中で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、さらに海水中では水中よりも鉄筋破断型の破壊が生じやすくなる。
- (2) 主鉄筋の破断で破壊するRCはりの200万回曲げ疲労強度は、鉄筋が置かれる腐食環境条件によって変わると考えられるが、一般に、ひびわれを許容するRCはりにおいては、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疲労強度も低下する。
- (3) 腐食環境下において鉄筋破断型の疲労破壊を示すRCはりの疲労性状は、同一腐食環境下の鉄筋の疲労性状とかなり密接に関係した挙動を示す。
- (4) 水中および海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。

参考文献

- [1] 前岡隆顕, 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
- [3] 西林新蔵, 井上正一, 熊野知司: 水中におけるRCはりの疲労強度とその寿命予測に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第V部, 1988, pp.590-591
- [4] Browne R.D. and Baker A.F.: Performance of Concrete in Marine Environment, Developments in Concrete Technology-2, Applied Science Publishers, p.133, 1979