

論文

[2073] 水中における RC はりのせん断疲労強度

井上 正一<sup>\*1</sup>・西林 新蔵<sup>\*2</sup>・吉野 公<sup>\*3</sup>・権 赫文<sup>\*4</sup>

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、この種の構造物に作用する波による疲労の問題を考えた場合、鉄筋は①変動荷重下で疲労限が低下する、②腐食疲労には疲労限が存在しない、③湿潤環境下での鉄筋およびコンクリートの疲労強度は大幅な低下をする、といった材料の力学特性の低下、さらには④ひびわれ中の水のくさび作用等による気中との破壊様式の相違、といった構造物特性の低下、も同時に引き起こされる。

本研究は、これら複合疲労の問題のうち、特に④の問題、すなわち、気中では曲げ疲労破壊する RC はりであっても水中ではせん断疲労破壊になりやすいという事実[1],[2] を参考にし、せん断補強筋の有無がせん断疲労強度に及ぼす影響を明らかにし、併せて水中において生じやすいスターラップの疲労破断を伴わないタイプのせん断疲労耐力式を検討した結果を述べる。

表-1 実験計画

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 はりは、せん断補強筋の無いはり(シリーズ I)とせん断補強したはり(シリーズ II)で、コンクリート強度、主鉄筋量、 $a/d$  をはりの設計要因として選んだ。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 で、基本の B40- はりは、B が主鉄筋量  $A_s = 2D19 = 5.73 \text{ cm}^2$  であることを、数字 40 が 28 日目標圧縮強度が  $f'_{c28} = 400 \text{ kgf/cm}^2$  のコンクリートを用いていることを示している。この

	はりの種類	圧縮強度		スターラップ 間隔 s (mm)	せん断 スパン比 (a/d)	試験 環境
		$f'_{c28}$	$f'_c$			
シリーズ I	B40-A	400	572	せん断補強筋なし	2.0	気中
			584		3.03	
	B25-A	250	318		3.03	気中
	B40-W	400	514		2.0	水中
					3.03	
					4.0	
	3.03					
B20-W	200	269	3.03	水中		
A40-W	400	538	2.0			
			3.03			
	4.0					
A20-W	200	240	3.03			
シリーズ II	B40-A	400	546	125	3.03	気中
	B40-W		515	83	3.03	
		503	86	3.64	水中	
	B18-W	180	237	83		3.03
	B30-W	300	451	96		3.5
	B50-W	500	592	110		4.0
A20-W	200	268	56	3.03		

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、その他の A20-W 等のはりは、A が主鉄筋量  $A_s = 2D16 = 3.98 \text{ cm}^2$  であることを、数字がコンクリート強度 ( $f'_{c28} = 200 \text{ kgf/cm}^2$  等) を、第 3 の記号 -A, -W は、試験環境が気中(A)あるいは水中(W)であることを示している。なお、シリーズ II の RC はりは全て、 $\phi 9$  mm (SR24) 筋の鉛直スターラップでせん断補強をするが、特に、水中で試験するはりにおいては、せん断疲労破壊を避けるための特別な配慮をした。すなわち、スターラップの所要量は、気中での試験はりにおいてはコンクリート

\*1 鳥取大学助教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)  
 \*2 鳥取大学教授 工学部土木工学科, 工博 (正会員)  
 \*3 鳥取大学助手 工学部土木工学科, 工修 (正会員)  
 \*4 鳥取大学工学部土木工学科研究生, 工博

標準示方書に基づいて、一方、水中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、コンクリート標準示方書におけるコンクリートの受け持つ分担せん断力をゼロとして、それぞれ決定・配置した。この結果、水中で試験するはりのスターラップ量は、同一仕様の気中はりよりもかなり多くなっている（表-1参照）。はり供試体は、同時に8本打設し、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、一方、水中で試験するはりでは、疲労試験実施1週間前より鋼製の水槽内にはり全体を水没させ、その状態のままで試験した。

## 2. 2 荷重方法

はりの荷重は図-1に示すような2点対称荷重とした。疲労試験は、繰返し荷重速度5Hz、荷重と時間との関係には正弦波形を採用し、上限荷重比（ $R_m$ ）は各はりの静的終局耐力の実験値の平均値（ $P_u$ ：表-2参照）に対する百分率で数水準選び、下限荷重比は $P_u$ の10%とした。

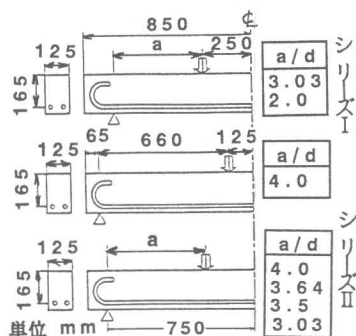


図-1 はり断面の詳細

## 3. 実験結果と考察

### 3. 1 破壊様式

RCはりの破壊位置、破壊様式を一括して表-2に示す。

せん断補強鉄筋のないRCはりにおいては、静的試験で曲げ引張破壊をしたA40-W、 $a/d=4.0$ を除く他のはりは、静的と疲労、気中と水中の試験条件や、 $a/d$ 、コンクリート強度等の試験要因の相違にかかわらず、全てせん断破壊をした。一方、スターラップを配置したはりの破壊様式は、静的試験においては全てのはりが曲げ引張破壊を、水中での繰返し荷重下においては、B18-W、 $a/d=4$ のはり1体を除くと、せん断補強筋のないはりと同様のせん断疲労破壊をした。これらせん断疲労破壊をしたはりの特徴は、①静的荷重下でのせん断圧縮、せん断引張破壊に加えて、斜めひびわれとの交差位置の主鉄筋の疲労破断によるせん断破壊が生じ、低荷重比になるに伴ってこのタイプの破壊が現れやすくなる、②スターラップを配置した水中RCはりせん断破壊においてはスターラップの疲労破断を伴わないせん断破壊が生じやすいこと、である。なお、各はりの静的終局耐力の実験値（ $P_u$ ：複数本の場合は平均値で表示（表-2参照））は、同一仕様の同一  $a/d$  のはりにおいては、試験環境の相違による影響が認められなかった。

### 3. 2 疲労寿命の分布とそのばらつき

図-2(a), (b)は、それぞれ、気中で主鉄筋の曲げ疲労破断で破壊したはりと、水中でせん断疲労破壊したはりに対して、各荷重比ごとに4本以上の試験を行った場合の疲労寿命(N)と次式より算定

表-2(A) 疲労試験結果（せん断補強筋 無）

環境条件	はりの種類	a/d	静的試験			疲労試験	
			終局耐力		破壊-破壊位置 様式	荷重比 $R_m$ (%)	破壊-破壊位置 様式
			実験値 $P_u$ (tonf)	計算値 $2\sqrt{c}u$ (tonf)			
気中	B40-A	2.0	14.2	10.3	S-DT(2 <sup>*</sup> )	74.70, 65	S-DT(2), S-F(1)
		3.0	9.8	8.7	S-DT(2 <sup>*</sup> )	64-60:2	S-DT(3)
	B25-A	2.0	13.3	8.5	S-DT(2 <sup>*</sup> )	80-60:5	S-DT(8)
水中	B40-W	2.0	20.5	9.9	S-C(1)	60-45:5	S-C(2), S-F(1)
		3.03	9.5	8.3	S-DT(2 <sup>*</sup> )	80-60:10	S-DT(3), S-C(4)
		4.0	8.1	7.5	S-DT(1)	60-50:5	S-DT(1), S-F(2)
	B20-W	3.03	9.0	6.7	S-DT(1)	60-40:10	S-DT(3), S-C(1)
	A40-W	2.0	16.2	8.9	S-C(1)	60-50:5	S-C(2), S-F(1)
		3.03	9.6	7.5	S-DT(1)	60-45:5	S-DT(3), S-F(1)
4.0		7.2	6.8	B-T(1)	65-50:5	S-C(1), S-F(3)	
A20-W	3.03	7.9	5.7	S-DT(1)	60, 50, 45	S-DT(2), S-C(1)	

表-2 (B) 疲労試験結果 (せん断補強筋 有)

静的試験					疲労試験						
環境条件	はりの種類	a/d	終局耐力		破壊位置	環境条件	はりの種類	a/d	荷重比 Rm (%)	破壊位置	破壊様式
			実験値 P <sub>u</sub> (tonf)	計算値 2V <sub>c</sub> c <sub>u</sub> (tonf)							
気中	B40-A	3.03	13.7	8.5	B-T (15*)	気中	B40-A	3.03	80~60:5	B-F (20*)	
水中	B40-W	3.03	13.7	8.3	B-T (6*)	水中	B40-W	3.03	67.5	S-C(9), S-F(1)	
	B40-W	3.64	11.2	7.7	B-T (6*)				47	S-C(3), S-F(2)	
	A20-W	3.03	9.8	5.8	B-T (4*)		42	S-F (5*)			
	B18-W	3.03	12.2	6.4	B-T (1)		65.6	50	S-C (10*)		
			3.5	10.0	6.1				B-T (1)	S-C(1), S-F(3)	
			4.0	9.0	5.8				B-T (1)		
	B30-W	3.03	13.2	7.9	B-T (1)		3.03	40	S-C (5*)		
			3.5	11.3	7.5				B-T (1)	S-C(2), S-DT(1)	
	B50-W	3.03	14.6	8.7	B-T (1)		3.03	50	S-DT(1), S-C(1)		
			3.5	12.7	8.2				B-T (1)	52	S-DT(2*)
B18-W	3.03	11.1	7.9	B-T (1)	3.5	50	B-C(1), S-C(1)				
		4.0	11.1	7.9			B-T (1)	51			
B30-W	3.03	5.3	5.3	S-C (2*)	3.5	50	S-C (2*)				
		5.3	5.3	S-C (2*)			53	S-C (2*)			
B50-W	3.03	5.1	5.1	S-C(1), S-DT(1)	4.0	50	S-C(1), S-F(1)				
		5.1	5.1	S-F (2*)			51	S-F (2*)			

破壊位置: Bは曲げスパン、Sはせん断スパン  
 破壊様式: Tは引張破壊、Fは主鉄筋の破断、Cはせん断圧縮破壊、DTは斜め引張破壊、CCはコンクリートの曲げ圧縮疲労破壊  
 (4\*)等: ( )の数字ははり本数を、4\*の\$は試験した全てのはりが同一の破壊をしたことを示す。  
 R<sub>m</sub>の70~60:5:数字5は荷重比を5%刻みで設定したことを示す (R<sub>m</sub>=70, 65, 60%)。

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 は同一条件で試験した供試体総数 L の疲労寿命を小さい順に並べたときの序数である。

図-2 および同一荷重比で4本以上の試験をした他のはりについても同様の図を描いた結果、いずれのプロット点もほぼ直線上にあり、各荷重比 R<sub>m</sub> ごとの疲労寿命の分布は、対数正規分布に従うといえる。この場合、プロット点の傾きより評価される疲労寿命のばらつきは、せん断疲労は曲げ疲労に較べてきわめて大きいといわれている気中での特性が水中では消失し、水中での疲労寿命のばらつきは、せん断疲労であっても、(a) 図の気中曲げ破壊した結果と大差なく、水の存在によって寿命の均一化がもたらされているといえる。

### 3.3 水中環境下におけるRCはりのせん断疲労耐力式

コンクリート構造物のS-N線図として Goodman タイプの式が多用され、その時のSとしては耐力比が一般に用いられる。この耐力比は、曲げ疲労に対しては曲げの耐力比を、せん断疲労に対してはせん断耐力比を用いるのが合理的である。しかし、本研究においては、気中の静的荷重下で曲げ破壊したはり水中ではせん断疲労破壊に移行し、静的なせん断耐力の実験値が得られない。そこで、疲労破壊時での破壊様式に着目し、ここでは、Sとして、算定せん断

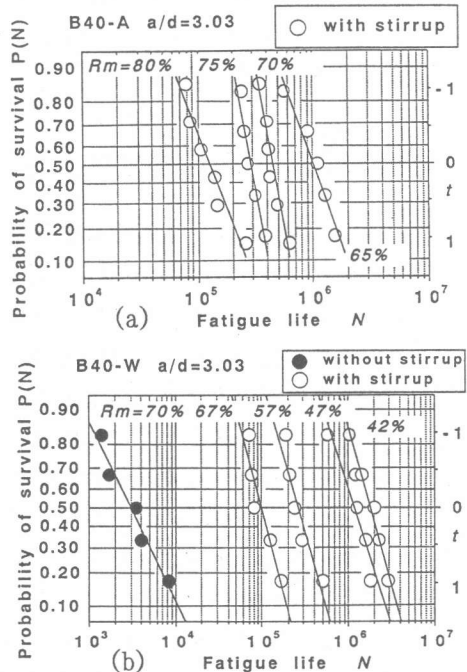


図-2 P(N)-N関係 (t:標準正規変量)

耐力比 $R_c$ （各はりに作用する上限せん断力 $V_{max}$ と二羽[3]が提案したせん断補強筋のない棒部材のせん断耐力 $V_{cu}$ （式(2)）との比）を用いて疲労強度を評価することにした。

$$V_{cu} = 0.2 \cdot (p_w \cdot f'_c)^{1/3} \cdot d^{-1/4} \cdot [0.75 + 1.4/(a/d)] \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

ここに、 $f'_c$ には疲労試験時のコンクリート強度 MPa（表-1 参照）で、 $p_w$ と $b_w$ は主鉄筋比とはり幅、 $V_{cu}$ の算定結果は $2 \cdot V_{cu}$ として表-2に併記している。

図-3は、せん断破壊をしたはりに対する算定せん断耐力比と疲労寿命との関係（ $R_c-N$ 線図）を示したものである。図より、 $a/d=2$ を除けば、せん断補強をしたRCはりの疲労寿命は、補強しない場合よりも $R_c$ の大きい領域においては長くなるが、 $R_c$ の低下に伴って両者の疲労寿命には差のなくなることもわかる。また、せん断補強した水中試験はりでは、 $a/d \geq 3$ の場合、 $a/d$ の値やコンクリート強度、主鉄筋量の相違が疲労寿命に及ぼす影響は小さいといえる。なお、せん断補強をしない場合、気中、水中はりとも $a/d=2$ における疲労強度が $a/d \geq 3$ のそれよりも大きくなっているのは、 $a/d=2$ におけるせん断耐力の実験値が計算値に較べてきわめて大きいため（表-2参照）生じた現象であると考えている。

つぎに、せん断疲労破壊をしたRCはりの疲労寿命が算定せん断耐力比 $R_c$ を用いたGoodman式（式(3)）によって表現できるか否かを検討する。

$$G_c \equiv \frac{(V_{cu} - V_{max})}{(V_{cu} - V_{min})} = (1/K) \log N \quad (3)$$

図-4は、縦軸に上・下限せん断力の実験値 $V_{max}$ 、 $V_{min}$ を用いて算定した $G_c$ を、横軸に $N$ の対数を取ったもので、プロット点が座標( $N=1$ ,  $G_c=1$ )を通る直線上にあれば疲労寿命がGoodman式によって表現できる。図より、せん断補強筋のない水中RCはりの疲労寿命においてはGoodman式で表現可能と考えられるが、せん断補強した水中はりではGoodman式を適用しにくいといえる。

そこで、ここでは、水中RCはりにおいて、せん断補強筋の有無がせん断疲労強度に及ぼす影響を上田ら[4]の提案している両対数形の耐力式を用いて評価することにする。

図-5は、せん断補強筋のない水中はりに対する $R_c-N$ 関係を示したもので、横軸の $r$ は下限と上限の作用せん断力比（ $V_{min}/V_{max}$ ）である。また、図中の実線と点線は、上記3.3で述べた理由により、 $a/d=2$ を除いたデータに対して、それぞれ、最小二乗法による式と、 $R_c=1$ で $N=1$ を通ることを条件として上田らが提案した方法[4]で決定した式を示しているが、両式による疲労強度にはほとんど差のないこと

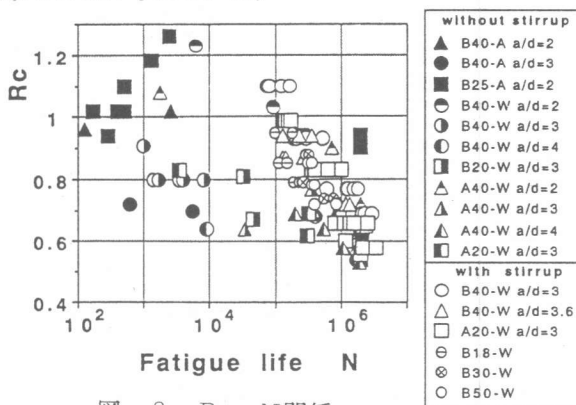


図-3  $R_c-N$ 関係

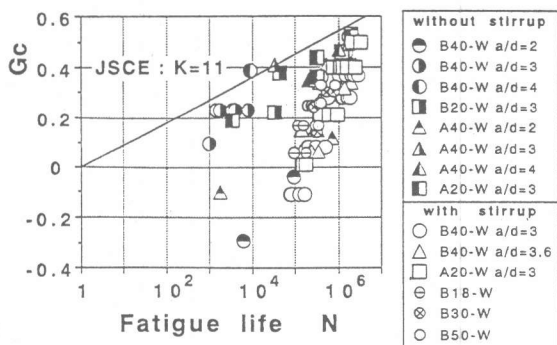


図-4  $G_c-N$ 関係

がわかる。なお、上田らは、せん断補強鉄筋のない気中はりの $R_c-N$ 線式として式(4)を提案しているが、この場合の $R_c=V_{max}/V_{cu}$ の算定には檜貝式[5]によるせん断耐力を用いている。本研究で用いたはりに対して、檜貝式と二羽式(式(2))から試算したせん断耐力間には差がなく、したがって、図-5中の式と式(4)から同一 $R_c$ 値における疲労寿命の長短を比較できる。

$$\log R_c = -0.036(1-r^2)\log N \quad (4)$$

図中の点線の式および式(4)の比較より、せん断補強鉄筋のない水中はりの疲労寿命は、上田が提案している気中における疲労寿命よりもやや小さくなっている。

図-6は、せん断補強を施した水中はりに対して、図-5と同様の整理をしたものである。これら図中の $R_c-N$ 線式を比較すると、せん断補強がある場合の $R_c-N$ 線式は、ない場合よりも傾きが急になる一方で、切片は大きくなっている。すなわち、スターラップの破断を伴わないせん断疲労破壊では、ある繰返し回数から急激な疲労進行が始まること、疲労寿命は $R_c$ の値(せん断力の大きさ)には鈍感であることがわかる。したがって、この種の破壊を示すはりでは、 $R_c=1$ で $N=1$ なる条件にこだわらない $R_c-N$ 線式を構築する必要があるものと考えられる。

### 3.4 スターラップ応力とせん断疲労耐力式の提案

コンクリート標準示方書によれば、せん断補強をしたRCはりのせん断疲労に対する安全性の照査は、式(5)、(6)より算定されるスターラップの応力と、式(7)より得られる設計疲労強度から $\gamma_i \sigma_{wr} / (f_{wr} \gamma_b) \leq 1.0$  ( $\gamma_i$ : 構造物係数,  $\gamma_b$ : 部材係数)により行うことを明記している。

$$\sigma_{wr} = \frac{(V_{pd} + V_{rd} - k_2 \cdot V_{cd})s}{A_w z (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)} \frac{V_{rd}}{V_{pd} + V_{rd} + V_{cd}} \quad (5)$$

$$\sigma_{wpd} = \frac{(V_{pd} + V_{rd} - k_2 \cdot V_{cd})s}{A_w z (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s)} \frac{V_{pd} + V_{cd}}{V_{pd} + V_{rd} + V_{cd}} \quad (6)$$

$$f_{wr} = 1/2 \cdot [1900(1 - \sigma_{wpd} / f_{wu}) (10^{\alpha} / N^k) / \gamma_s], \quad \alpha = k_0(0.82 - 0.003\phi) \quad (7)$$

ここに、 $f_{wr}$ ,  $\sigma_{wr}$ ,  $\sigma_{wpd}$ ,  $f_{wu}$  は、せん断補強筋のそれぞれ、設計疲労強度、変動荷重による応力度、永久荷重による応力度、引張強度。 $V_{pd}$ ,  $V_{rd}$ ,  $V_{cd}$  は、永久荷重によるせん断力、変動せん断力、およびせん断耐力である。 $A_w$ ,  $s$  および  $\alpha_s$  はせん断補強鉄筋の1組の断面積、間隔および部材軸とのなす角度である。 $z = d/1.15$ ,  $k$  は 0.12,  $\phi$  は鉄筋の公称直径,  $k_0$  は一般に 1.0,  $\gamma_s = 1.05$ ,  $\gamma_i = 1.0 \sim 1.1$  (1.0を採用),  $\gamma_b = 1.0 \sim 1.1$  (1.0を採用) である。さらに  $k_2$  は変動荷重の頻度の影響を考慮するための係数で、一般に 0.5 としよ。

図-7は、 $V_{pd} = V_{min}$ ,  $V_{rd} = V_{max} - V_{min}$  には、実験値 ( $V_{max}$ : 上限せん断力,  $V_{min}$ : 下限せん断力) を、 $V_{cd}$  には二羽式より算定される  $V_{cu}$  (計算値: 式(4)) を式(5), (6) に代入して

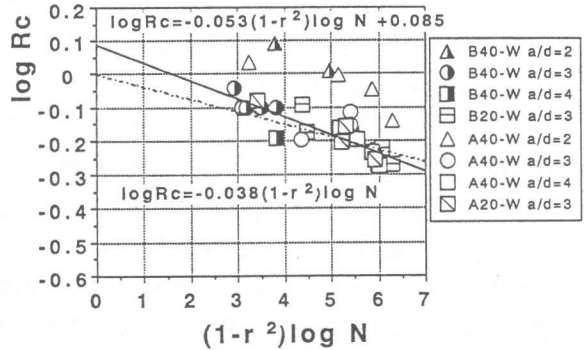


図-5  $R_c-N$ 関係

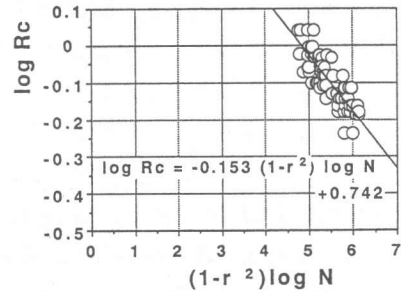


図-6  $R_c-N$ 関係

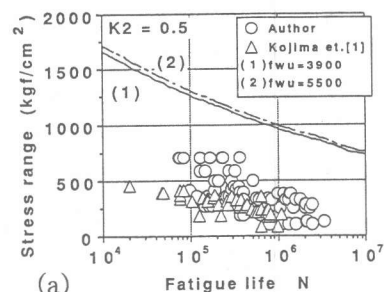
得られるスターラップの振幅応力とせん断破壊したはりの疲労寿命との関係を示したもので、(a)が  $k_2=0.5$ 、(b)が  $k_2=0$  とした場合である。また、図中の実線は、 $\phi=9$ 、 $\alpha_s=90$  度、 $f_{wu}=3900 \text{ kgf/cm}^2$  (SR 235) および  $f_{su}=5500 \text{ kgf/cm}^2$  (SD 295A 想定)とした場合のせん断補強筋のS-N線式(式(7))を実線と一点鎖線で併記している。海洋コンクリート構造物を対象とした Det Norske Veritas 基準では、コンクリートの分担せん断力をゼロ( $k_2=0$ )とし、全せん断力はせん断補強筋で受け持たせることを規定している。しかし、図-7より、 $k_2=0.5$  は勿論、 $k_2=0$  とした場合においても、RCはりの疲労寿命は予測値(土木学会式)よりも危険(下)側あることがわかる。すなわち、当然の結果ではあるが、水中で生じやすいスターラップの破断を伴わないRC部材の安全性の照査には土木学会の考え方をそのまま適用できず、新たな耐力式を規定して行く必要がある。このような式として、現状ではデータ数が少ないが、図-5と6中  $R_c$ -N線式が交差するため、次式(8A)、(8B)のうち大きいNの値を与える式、或は安全側の式として式(8A)を用いることを提案したい。

$$\log R_c = -0.038(1-r^2) \log N \quad (8A)$$

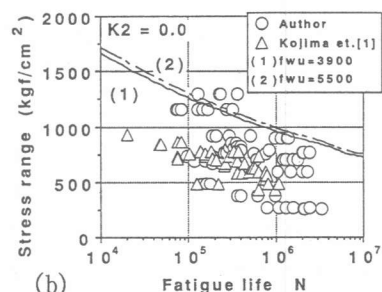
$$\log R_c = -0.153(1-r^2) \log N + 0.742 \quad (8B)$$

#### 4. まとめ

本研究は、海洋を含む湿潤環境下のコンクリート構造物の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。本研究より、湿潤環境下でRCはりが繰返し荷重を受けた場合、気中で曲げ破壊をしても水中ではせん断破壊になりやすく、このせん断破壊においてはスターラップの疲労破断を伴わないこと、算定せん断耐力比( $R_c$ :作用せん断力と二羽式によるせん断耐力との比)で整理すれば、 $a/d \geq 3.0$  の範囲においては、コンクリート強度や鉄筋量の相違は疲労寿命にほとんど影響を及ぼさないこと、長寿命域になるに伴ってせん断補強筋の有無が疲労寿命に及ぼす影響が小さくなること、水中でスターラップの疲労破断を伴わないRCはりの疲労は、ある繰返し回数から急激に進行し、せん断力の大小による疲労寿命差はきわめて小さくなること、等の挙動が明らかにされ、示方書に規定されていないせん断耐力式を暫定式として提示した。



(a)



(b)

図-7 スターラップ応力

#### 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, 中橋一壽: 水中環境下におけるRCはりの疲労特性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第V部, pp.514-515, 1987
- [3] 二羽淳一郎, 岡村 甫ほか: せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372, V-5, pp.167-176, 1986.8
- [4] 上田多門, 岡村 甫, Sabry A. Farghal, 榎本松司: せん断補強鉄筋のないはりのせん断疲労, コンクリート工学, Vol.20, No.9, pp.89-98, 1982.11
- [5] Okamura, H. and Higai, T. : PROPOSED DESIGN EQUATION FOR SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS, 土木学会論文集, NO.300, pp.131-141, 1980.8