

[2109] 水中における鉄筋コンクリートはりの疲労性状

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 大谷公行 (三井不動産建設)

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、この種構造物はその機能上長期にわたっての耐久性が要求される場合が多い。しかし、一方においては、この種構造物はそれを取り巻く環境が極めて過酷で、海水による化学的侵食作用の他に、波や氷などの環境荷重によって疲労や衝撃の影響を受け、極めて劣化し易い条件下にあるといえる。

ここでは、海洋コンクリート構造物に要求される種々の耐久性のうち、疲労の問題を取り上げ、水中および気中環境における鉄筋コンクリート(以下RCと称す)はりの疲労性状を明らかにし、併せて水の存在がRCはりの破壊様式や疲労強度に及ぼす影響を検討した結果について述べる。

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はりに採用した設計要因は、コンクリート強度、主鉄筋量、せん断スパン有効高さ比(a/d)、せん断補強筋の有無で、それぞれの組合せのもと

で5種類のはりを作製した。RCはりの種類は、図-1に示す横断面と、コンクリートの28日目目標圧縮強度 $f_{c,28} = 400 \text{ kgf/cm}^2$ に対し、弾性設計法によるほぼつり合い鉄筋比を有し、さらに $a/d = 3.03$ (3等分点載荷に対応)としたAはりを基本としている。この基本はりに対し、BはりはAはりに $a/d$ のみを変化させたもので、CはりはAはりとほぼ等しい鉄筋指数を持つように設計されたはりである。また、Dはりはコンクリート強度や $a/d$ の相違がRCはりの破壊様式や疲労性状に及ぼす影響を、さらにAはりにせん断補強のみを施さないEはりはAはりと比較することによって、せん断補強筋の有無が疲労性状に及ぼす影響をそれぞれ検討するために計画したは

表-1 実験計画

はりの種類	コンクリート圧縮強度		主鉄筋量 (鉄筋比)	せん断スパン比 (a/d)	せん断補強筋	試験環境	荷重比 $P_s$ (%)
	目標強度	疲労試験時					
A	400	546	2D19(2.8%)	3.03	有	気中	80~60
		515				水中	70~45
B	400	503	2D29(2.8%)	3.64	有	水中	65~45
C	250	268	2D16(1.9%)	3.03	有	水中	60~35
D	180 300 500	237	2D19(2.8%)	3.03	有	水中	55
		451		3.5			
		592		4.0			
E	400	544	2D19(2.8%)	3.03	無	水中	51

圧縮強度の単位:  $\text{kgf/cm}^2$

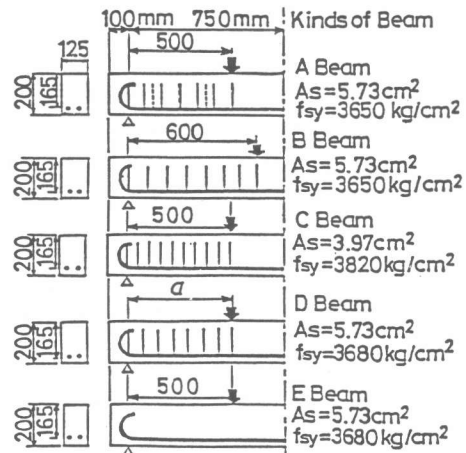


図-1 はりの詳細(Aはりのスタップ: 破線は気中、実線は水中用)

りである。なお、Eはりを除く全てのはりは、曲げ破壊を生じるように、Cはりではφ6mm筋、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各はりの曲げ終局時の算定せん断力に対し、気中試験に用いるAはりにおいてはACI基準に基づいて、一方、水中試験に供するはりでは、せん断力を全てスターラップで受けもたせ、気中試験におけるよりもスターラップ量が多くなるようにそれぞれ決定した。

はり供試体と25本の円柱供試体(φ15X20cm)は、材令1日で脱枠、以後27日間の水中養生を施した後、実験室内に保存・乾燥させた。この乾燥させた供試体は、気中試験においてはそのままの状態、一方、水中試験では疲労試験実施1週間前より再度水中に浸漬して十分に吸水させた後、試験機フレームに組み込んだ鋼製プール内に水没させた状態で試験した。

## 2. 2 载荷試験

はりの载荷試験は、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150cmとし、各はりの設定a/dに対応した位置で、対称2点集中载荷とした。

静的試験における測定項目は、コンクリートひずみ、スパン中央たわみ、鉄筋位置の曲げひびわれ幅、はり中央高さにおける斜めひびわれ幅で、ひずみは曲げスパン上縁より0.5cm、4cm、16.5cm(主鉄筋の図心位置)位置のコンクリート側面にひずみ測定用プラグを貼付し、ホイットモア型ひずみ計(検長10in.)を用いて測定した。また、たわみはスパン中央と支点到設置したダイヤルゲージ(1/100mm)を、ひびわれ幅はマイクロSCOPE(最小目盛:0.02mm)を用いて測定した。

疲労試験は、繰返し载荷速度5Hz., 荷重と時間との関係には正弦波形を採用して行った。疲労試験における上限荷重比( $P_s$ : 以下荷重比と称す)は各はりの静的終局耐力に対する百分率で表し、一方、下限荷重比は全てのはりで10%と一定とした。試験は、はり供試体が疲労破壊するまで行うが、繰返し回数が所定の回数( $n=1,1000,\dots$ )に達するごとに、一時的に試験機の運転を停止し、上記静的試験を挿入して各変形量を測定した。

## 3. 実験結果と考察

### 3. 1 破壊様式

静的および疲労試験におけるRCはりの破壊様式と破壊位置を一括して表-2に示す。静的試験におけるRCはりは、水中、気中の環境条件によらずスターラップを配置した場合には全て曲げ引張破壊を、スターラップを配置しないはりではせん断破壊をした。この場合、各はりの静的終局耐力( $P_u$ : 2本以上の平均値)は表-2に示す通りで、同一はり(Aはり)においては気中と水中の静的耐力には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Aはりが曲げスパン内の主鉄筋の疲労破断によって破壊したのに対し、水中はりは、Dはりの1本を除き、全てスターラップのないEはりと同様のせん断破壊をした。このせん断破壊は、①せん断圧縮、②斜めひびわれとの交差位置の主鉄筋破断、③斜め引張の各タイプに分れ、一般的な傾向として、荷重比が高い場合には①タイプの、荷重比が小さくなるに伴って②タイプの破壊になり易い。さらに、コンクリート強度についてはDはりに見られるように、a/dが3.5程度より小さい範囲では、コンクリート強度が低い(180kgf/cm<sup>2</sup>)と③タイプ、これより強度が大きい(300~400kgf/cm<sup>2</sup>)場合には①タイプ、さらに強度が高く(500kgf/cm<sup>2</sup>程度)なると②タイプの破壊になり易いといえる。同様の傾向は、a/d=4.0のはりに関しても認められるが、この場合、荷重比一定のもとにおけるせん断力が他のはりに比べて小さいため、コンクリート強度の小さなはり1本は曲げ破壊したものと考えられる。

以上の結果を総合判断すると、水中におけるRCはりの破壊はせん断破壊になり易い。このせ

表-2 試験条件とはりの破壊様式

試験の種類	環境条件	はりの種類	終局耐力 or 荷重比 Pu, Ps (%)	破壊位置	破壊様式	試験の種類	環境条件	はりの種類	終局耐力 Mu (tonf·m)	荷重比 Ps (%) or a/d	破壊位置	破壊様式
静的	気中	A	13.7tonf		B-T (15 <sup>s</sup> )	疲	水	C	左欄参照	60 %	S-F (5 <sup>s</sup> )	S-C(2), S-DT(1) S-F(1), S-C(1) S-C (5 <sup>s</sup> )
		B	13.2tonf	B-T (6 <sup>s</sup> )	50 %							
	水中	B	11.2tonf	B-T (6 <sup>s</sup> )	E			左欄参照	40 %	S-C (4 <sup>s</sup> )		
		C	9.8tonf	B-T (4 <sup>s</sup> )								
		D	12.9tonf	B-T (6 <sup>s</sup> ) S-DT (2 <sup>s</sup> )								
疲労	気中	A	80~60%		B-F (20 <sup>s</sup> )	勞	中	D 180*	2.746	3.03	S-DT(1), S-C(1)	S-DT (2 <sup>s</sup> ) B-CC(1), S-C(1)
		A	70~60%	S-C(9), S-F(1)	D 300*			3.182		3.03	S-C (2 <sup>s</sup> )	
	水中	A	50 %	S-C(3), S-F(2)					3.5	S-C (2 <sup>s</sup> )		
		A	45 %	S-F (5 <sup>s</sup> )	4.0			S-C(1), S-F(1)				
		B	65~60%	S-C (10 <sup>s</sup> )	D 500*			3.387	3.03	S-C(1), S-DT(1)		
B	50%	S-C(1), S-F(3)	3.5	S-F (2 <sup>s</sup> )								
									4.0	S-F (2 <sup>s</sup> )		

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はコンクリート部の圧縮疲労破壊  
 180\*等: コンクリートの目標圧縮強度を、( )内の数値ははり本数を、15<sup>s</sup>の\$は試験した全てのはりが同一破壊様式をしたことを示す。

ん断破壊は、気中試験におけるせん断補強筋のないRCはりと同様に斜めひびわれ挙動が関与し、破壊箇所は部材中の最弱部で生じる。すなわち、コンクリート強度が弱い場合には斜めひびわれが載荷点まで直進・伝播し斜め引張破壊に、コンクリート強度が大きくなるとせん断圧縮破壊に、さらに高強度になるとコンクリート部は比較的健全であるが、斜めひびわれと交差する位置での主鉄筋の応力集中が大きくなり、これによって鉄筋破断型の破壊になり易くなる。

3.2 疲労寿命の分布とそのばらつき

図-2(A),(B)は、気中Aはりとは水中Bはりに対し、各荷重比ごとの疲労寿命(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は同一試験条件に用いた供試体総数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-2および他のはりについても同様の検討を行った結果より、プロット点はいずれの場合もほぼ直線上にあり、水中、気中におけるRC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)で表され、P(N)=0.5 (t=0)に相応する平均疲労寿命(N̄) および logNの標準偏差V(logN)はそれぞれ式(3)によって算定される。

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

$$\bar{N} = 10^{-A/B}, \quad V(\log N) = 1/|A| \quad (3)$$

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

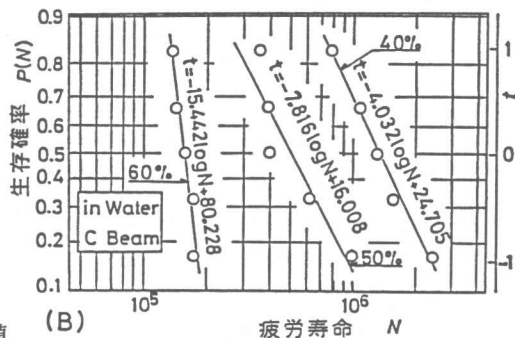
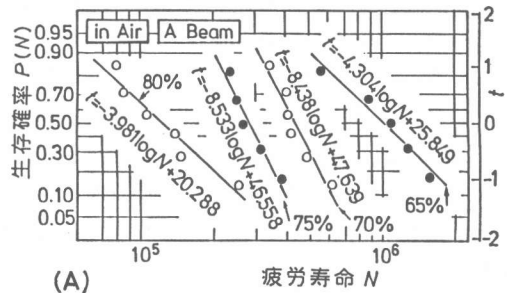


図-2 P(N) ~ N関係

表-3に、同一荷重比で4本以上試験したはりに対して、式(2)を最小二乗法によって決定した係数A、B(A、Cはりは図-2中に併記)、 $\bar{N}$ 、 $V(\log N)$ の値を示す。

図-3に各はりごとの $V(\log N)$ の値を示す。図より、水中で試験したはりの $V(\log N)$ の値は気中で曲げ破壊したはりのそれよりもやや大きくなる程度で、一般にいわれている気中におけるせん断破壊するRCはりの $V(\log N)$ の値に比べて極めて小さく、水中におけるRCはりの疲労寿命のばらつきはそれほど大きくないといえる。

### 3.3 平均疲労寿命( $\bar{N}$ )と $P_s \sim \bar{N}$ 線式

図-4は荷重比( $P_s$ )と平均疲労寿命( $\bar{N}$ )との関係を示したもので、 $P_s \sim \bar{N}$ 線式も併記している。いま、 $P_s \sim \bar{N}$ 線式に $\bar{N}=200$ 万回を代入して疲労強度を求めると、Aはりは気中で $P_s=60\%$ 、水中で $P_s=45\%$ 、さらに水中B、Cはりではそれぞれ $P_s=46\%$ 、 $37\%$ となり、水中での200万回疲労強度は気中のそれよりも15~25%程度低下することがわかる。この水中と気中における疲労強度の相違は、一部は破壊様式の違いによってもたらされたものと考えられるが、水中における疲労強度はA、B、Cはりに見られるように同一破壊様式を示す場合であっても、コンクリート強度や鉄筋比の相違によっても変化する可能性のあることがわかる。

図-5に平均疲労寿命( $\bar{N}$ )と $a/d$ との関係を、図-6には $\bar{N}$ と鉄筋指数( $q$ )との関係を示す。これらの図における $\bar{N}$ は、Dはりでは同一条件に用いた2本の供試体の疲労寿命( $N_1, N_2$ )の幾何学平均( $\bar{N} = \sqrt{N_1 \cdot N_2}$ )を、その他のはりでは $P_s \sim \bar{N}$ 線式より求めた $P_s=55\%$ における $\bar{N}$ の値を採用している。また、鉄筋指数はコンクリート強度に目標強度を、鉄筋の降伏点強度は $f_{sy}=3500 \text{ kgf/cm}^2$ として算定している。これらの図より明らかなように、コンクリート強度が同一の場合、はりの平均疲労寿命は $a/d$ が3.03から3.5の範囲ではほぼ一定、その後は $a/d$ の増加に伴って増加し、 $a/d$ が同一の場合のそれは、コンクリート強度が高くなるに伴って長くなる。また、 $q$ が小さくなるに伴って、さらには同一の $q$ の場合にはコンクリート強度が高くなるに伴って平

表-3 回帰分析結果

はりの種類	荷重比 $P_s(\%)$	実験定数 A	実験定数 B	N ( $\times 10^2$ )	$V(\log N)$
水中 A	70	-4.382	21.873	981	0.23
	60	-4.170	22.698	2774	0.24
	50	-7.819	47.941	13532	0.13
	45	-2.577	16.008	16288	0.39
B	65	-3.486	18.475	1994	0.29
	60	-5.401	30.081	3711	0.19
	50	-9.572	58.172	11948	0.10
E	51	-2.214	7.858	35.4	0.45

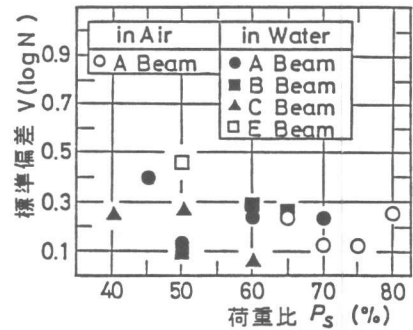


図-3  $P_s \sim V(\log N)$ 関係

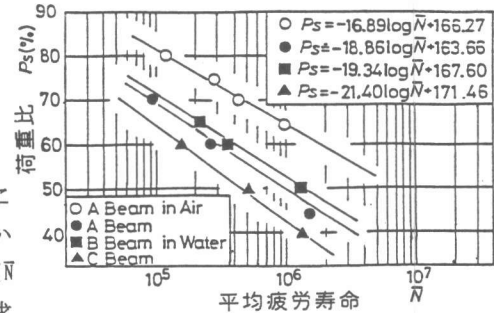


図-4  $P_s \sim \bar{N}$ 関係

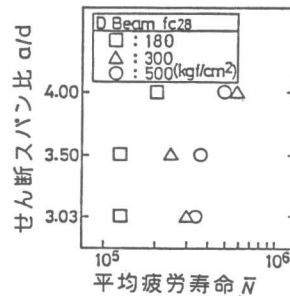


図-5  $a/d \sim \bar{N}$ 関係

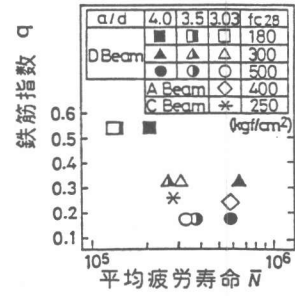


図-6  $q \sim \bar{N}$ 関係

均疲労寿命は長くなる傾向のあることがわかる。

### 3. 4 セン断補強効果について

図-7はAはりりとAはりにせん断補強を施さないEはりの同一上限荷重(ほぼ同一荷重比)における生存確率と疲労寿命との関係を示したものである。図より、Aはりの疲労寿命はEはりのそれに比して2オーダー程度長くなっていることがわかる。図-8は、水中Aはりの繰返し載荷に伴う最大ひびわれ幅の一例を示したもので、曲げひびわれの変化は小さい、載荷初期には無かった斜めひびわれはある繰返し回数で突然発生する、この斜めひびわれの進展速度は極めて大きい、さらに斜めひびわれ発生時から1オーダー長くなった時点ではりは破壊している、などのことがわかる。また、水中で試験したはりのせん断破壊は、Dはりの一部を除き、スターラップの破断を伴わなかった。

以上の結果より、水中では気中におけるほどのせん断補強効果は期待できないが、スターラップの配置は、斜めひびわれ発生までの載荷回数を長くする、および疲労寿命のばらつきを小さくする、などの効果として現れていることがわかる。

### 3. 5 変形性状

図-9、10に繰返し載荷に伴うスパン中央たわみおよび最大ひびわれ幅の変化の一例を示す。図-9より、同一荷重比におけるたわみは、水中が気中におけるよりも大きく現れている。一方、図-10(A)における同一荷重比のAはりを比較すると、水中における最大曲げひびわれ幅は気中のそれに比べて初載荷( $n=1$ )時から破壊に至るまで首尾一貫して小さいといえる。さらに、繰返し載荷に伴うこのひびわれ幅は、気中においては漸次増加するのに対し、水中においてはその増加は小さいないしはほぼ一定値を保っている。これらのことより、水中における大きなたわみは、見島ら<sup>1)</sup>によって指摘されている大きなせん断変形に起因してもたらされたものと考えられる。

つぎに、 $a/d$ が曲げ、斜めの両最大ひびわれに及ぼす影響についてみる。図-10(B)および図-8より、 $a/d$ が両ひびわれに及ぼす影響は、 $a/d$ が大きくなるに伴って斜めひびわれ幅は小さくなり、曲げひびわれ幅は大きくなる傾向のあることがわかる。

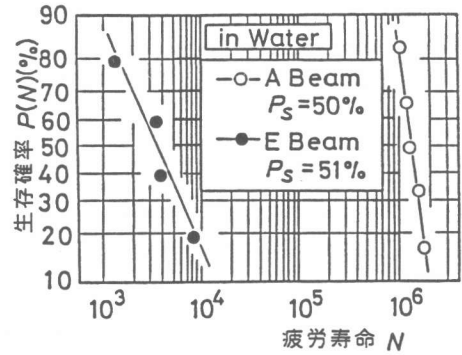


図-7 P(N) ~ N関係

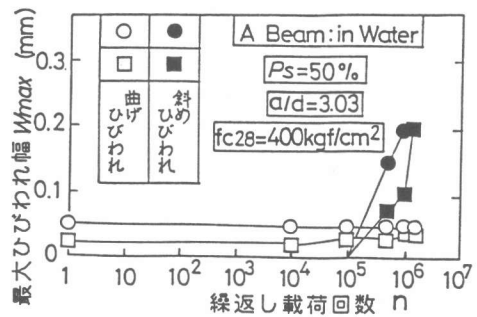


図-8 最大ひびわれ幅の変化

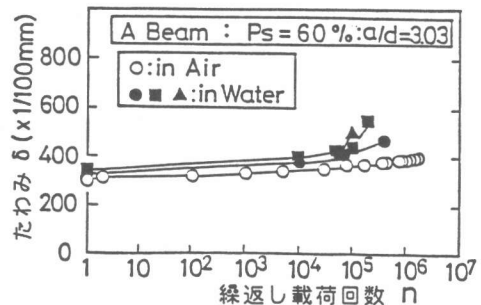


図-9 スパン中央たわみの変化

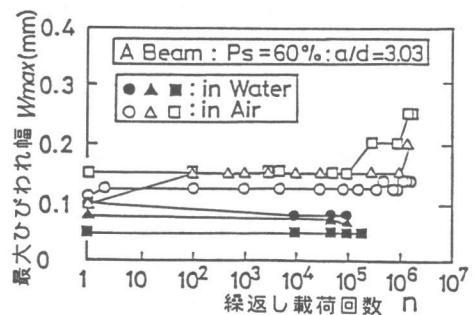


図-10(A) 最大ひびわれ幅の変化

これは、 $a/d$ が大きくなるに伴ってせん断よりも曲げが支配的となってくるためと考えられる。また図-10(B)より、コンクリート強度に着目すると、一般的な傾向として、コンクリート強度が大きくなるほど、曲げおよび斜めひびわれ幅はともに小さくなる傾向のあることも認められた。

図-11,12は $10^5$ 回以上の繰返し载荷に耐えたRCはりに対し、繰返し回数 $n=10^5, 10^6, 2 \times 10^6$ 回における各上限荷重比作用時のたわみと初载荷( $n=1$ )時のたわみの比( $\delta r$ :相対たわみ)および相対ひびわれ幅( $W_r$ )の関係を示したものである。図より、繰返し载荷に伴うたわみ増加は水中が気中よりも大きく、この傾向は载荷回数が多くなるに伴って顕著になる。一方、水中における曲げひびわれ幅に関しては、値そのものは、前述のように、はりがせん断破壊したこともあって気中におけるよりも小さいが、相対ひびわれ幅のばらつきは各はり間でかなり大きくなるのがわかる。

#### 4. 結論

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はりの疲労性状を検討したものである。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はりの破壊様式は水中と気中で異なり、気中では曲げ破壊するはりであっても水中においてはせん断破壊になり易くなる。このせん断破壊は、コンクリート強度が高くなるに伴って、斜め引張からせん断圧縮、さらには斜めひびわれとの交差位置の主鉄筋破断型の破壊へと移行する傾向がある。

2) RCはりの各荷重比における疲労寿命の分布は、水中や気中の環境条件にかかわらず対数正規分布に従う。

3) 水中におけるRCはりの200万回疲労強度は気中におけるよりも15~25%程度小さくなるが、 $a/d$ が大きくなるに伴って、この低下の程度はやや小さくなる。

4) 水中におけるRCはりのせん断補強は気中ほどには期待できないが、スターラップを配置することによって、はりの疲労寿命は長くなり、疲労寿命のばらつきは小さくなる。

5) 水中では、曲げひびわれ幅は気中よりも小さいものの、同一荷重比におけるたわみは気中よりも大きく、さらに斜めひびわれの発達・進展速度が極めて大きくなる。

本研究は、文部省科学研究費によって行ったものである。ここに謝意を表する。

参考文献 1) 前岡, 水本, 児島, 土木学会年次講演概要集, pp.305~306, 1982.

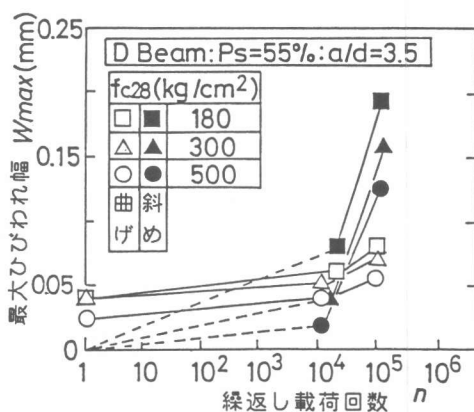


図-10(B) 最大ひびわれ幅の変化

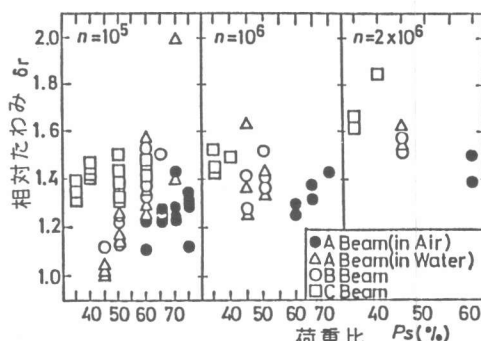


図-11 たわみの変化

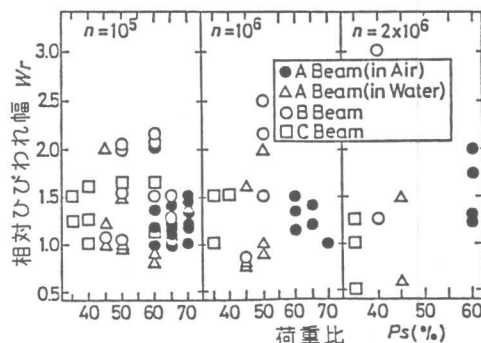


図-12 曲げひびわれ幅の変化