

# 7本よりプレストレスングストランドの空气中 疲労強度および 3%NaCl 中腐食疲労強度

小林 佑規\*  
田中 義久\*

表-1 供試材の化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Al
0.82	0.26	0.73	0.019	0.006	0.01	0.01	0.02	0.037

## 1. まえがき

船舶・海洋構造物など海洋環境で使用される構造物は、波浪による繰返し荷重を受けるため、疲労強度の安全性について十分な検討が必要である。特に、洋上でブロック建造されるような大型コンクリート構造物は、入渠による修理が困難である。このような構造物は、長期間の稼働に対して、補強鋼材の腐食疲労強度に配慮した設計となっていることが望ましい。鋼・プレレストコンクリート製ハイブリッド構造物では、海水に接するプレレストコンクリートの疲労強度設計が重要な課題となる。また、プレストレスングストランドは、不完全なグラウチング部、構造物相互の結合継手部および定着部付近などにおいて、腐食環境に遭遇することも想定される。従来より、プレレストコンクリートの疲労試験は、橋梁・床版などの設計を対象に最小応力を一定とした試験が行われてきた。しかし、海洋構造物にはプレストレス力に波浪による交番荷重が重畳される。このような荷重条件に対するPC鋼材の疲労強度および腐食疲労強度に関する公表されたデータはほとんどなく、海洋コンクリート構造物の疲労強度設計資料が求められている。

本稿は、7本よりプレストレスングストランドを供試材とし、平均荷重および応力比を一定とした空气中の疲労試験および 3% 食塩水中の腐食疲労試験を行った結果の報告である。初断線発生繰返し数を疲労破壊の基準とした  $S-N$  線図を求め、既報の文献との比較、腐食疲労強度の低下および長寿命域の強度推定について検討を行い、供試材の空气中および腐食疲労強度設計資料を提供するものである。

## 2. 供試材および試験体

供試材は、JIS G 3536 に準拠した PC 鋼より線 (7本よりB種, SWPR 7B) のホットストレッチング処理材である。供試材の化学成分を表-1 に示す。ストランドの直径は公称  $12.7\phi$  公称断面積は  $98.7\text{mm}^2$  であり、

\* 運輸省船舶技術研究所

心線の直径は  $4.39\phi$ 、側線の直径は  $4.21\phi$ 、よりの長さ (ピッチ) は  $170\text{mm}$  である。

試験体の長さは、ソケット間を  $650\sim 720\text{mm}$  (ピッチの約4倍) とした。伸び計測の標点間距離は、空气中および腐食疲労試験に対しそれぞれ  $350$  および  $500\text{mm}$  (ピッチの2倍および3倍) とした。ストランドの端末は溶接し、ソケット内で樹脂固着を行うことにより定着部の応力集中を緩和した。また、ソケットにネジ止め加工を施し、繰返しによるより戻しを防止した。

## 3. 実験方法

疲労試験は、平均荷重一定の試験および片振り張疲労に近似する応力比  $R=0.1$  の部分片振り試験とした。平均荷重は、空气中試験の場合ストランドの最大引張荷重  $P_u$  の  $60, 50$  および  $40\%$  の3レベルとし、腐食疲労の場合  $P_u$  の  $60$  および  $40\%$  の2レベルとした。応力

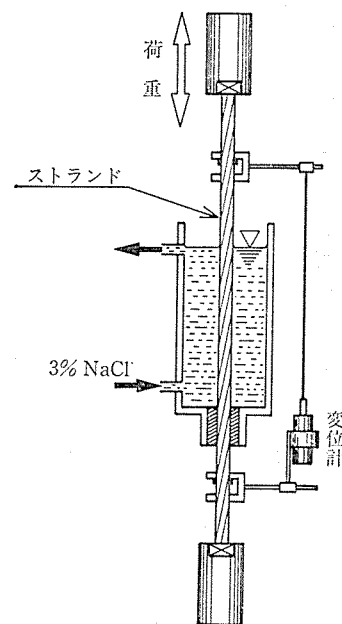


図-1 腐食疲労試験方法

◇論文報告◇

比  $R=0.1$  の試験は、空気中および腐食疲労の両試験で実施した。また、疲労試験に先立ち供試材の静的引張試験を実施した。

空気中の試験は実験室内の室温にて行い、荷重容量 50 tf の油圧サーボ制御疲労試験機を用いた。なお、 $2 \times 16^6$  回を超える空気中試験には容量 30 tf の機械共振型疲労試験機を併用した。空気中試験の繰返し速度は、油圧の場合 18~60 cpm、機械共振の場合 21 cps であった。

腐食疲労試験は荷重容量 20 tf の油圧サーボ制御疲労試験機を用いた。繰返し速度は、腐食疲労標準試験方法<sup>1)</sup>に倣い 10 cpm とした。腐食環境は 3% 食塩水とし、図-1 に示すように、試験体の一部分に食塩水を循環させる方式とした。腐食液の温度は  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、流量は毎分約 1 リットルとなるよう制御した。溶存酸素濃度は空気吹込みによる飽和酸素濃度とし、試験中の環境モニタとして随時 pH、電気伝導度および腐食電位を測定した。

また、空気中および腐食疲労試験において、ストランドの疲労破壊挙動を観察するため、伸びを記録した。

#### 4. 結果および考察

##### 4.1 供試材の機械的性質

供試材の静的引張試験における荷重-伸び線図を図-2 に、その機械的性質を表-2 に示す。静的引張試験において、ストランドは荷重  $P_{0.2}$  を超えると著しい伸びを生じ、最大荷重  $P_u$  にて破断している。また、伸びが直線から離れる荷重を比例限度  $P_p$  とすると、 $P_p$  はほ

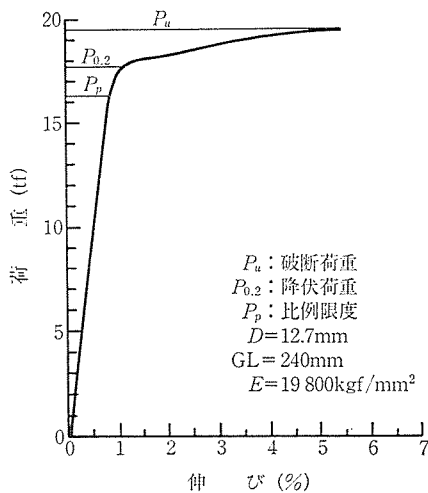


図-2 ストランドの荷重-伸び線図

表-2 供試材の機械的性質

荷重 (kgf)			応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )			弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> ) $E$	伸び (%) $\delta$
破断 $P_u$	0.2% $P_{0.2}$	比例限度 $P_p$	破断 $S_u$	0.2% $S_{0.2}$	比例限度 $S_p$		
19 500	17 700	16 300	197.6	179.3	165.1	19 800	5.4

ぼ 16 300 kgf である。最大引張応力  $S_u$  は、197.6 kgf/mm<sup>2</sup> であり、この特性値に対する 0.2% 耐力  $S_{0.2}$  および比例限度  $S_p$  は、それぞれ  $S_{0.2}/S_u=0.908$ 、 $S_p/S_u=0.836$  となる。なお、心線および側線の直径から計算されるストランドの断面積は 98.7 mm<sup>2</sup> であり、JIS で規定される公称断面積と同様であった。

表-2 に示す伸び 5.4% は標点間距離  $GL=240$  mm における一様伸びであり、破断点を含んでいない。引張試験における破断点は、きわめて局部的に収縮している。断面収縮率  $\psi$  は心線が 48.7% であり、側線が 37~49% の範囲にあった。心線の  $\psi$  は、側線の平均値 44% よりやや大きい。これはストランドに引張荷重が作用したとき、心線に最も大きな応力が生じる<sup>2)</sup>ためであると考えられる。したがって、引張によるストランドの破断は、まず心線が破断し、次いで側線が破断したものと推定される。なお、ストランドの真破断応力  $S_f$  は、心線が 385 kgf/mm<sup>2</sup>、側線が 314~387 kgf/mm<sup>2</sup> と計算される。

10 時間 レラクセーション値はミルシートによると 0.6% であり、3% 以下とするブルーイング処理材の JIS 規定値より極めて小さい。

##### 4.2 空気中の疲労強度

7本よりストランドの疲労試験において、疲労破壊はストランドを構成している素線が順次破断していき、試験の最終段階でストランドが分離破断する。また、ストランドは、全素線が同時に疲労破壊することもある。ストランドを構成する素線7本のうち1本の素線が試験中最初に破断した状態を初断線と呼ぶこととし、初断線の発生繰返し数を  $N$  とする。ストランドが疲労によって分離破断した状態を破断とし、その繰返し数を  $N_f$  とする。

ストランドは、初断線によって著しい伸びを生じるので、プレストレストコンクリートの性能が低下する。したがって、初断線発生繰返し数を疲労破壊の基準とする。

空気中の疲労試験では、初断線発生繰返し数が  $10^6$  回を超えた場合、ストランドの全素線が破断に達するか達しないかは極めて不確定である。 $N$  が  $2 \times 10^6$  回を超えた実験点を含めて  $S-N$  線図を求めると、 $S-N$  線図の折れ曲がり点付近に存在する実験点は非安全側に評価される。したがって、 $S-N$  線図は傾斜部と水平部から成るものとし、 $N$  が  $2 \times 10^6$  回程度までの実験点を対象に回帰直線を求めた。また、異種鋼材と比較しやすくなるため、疲労強度は引張強度で基準化した値を用いることとする。

##### 4.2.1 空気中試験の $S-N$ 線図

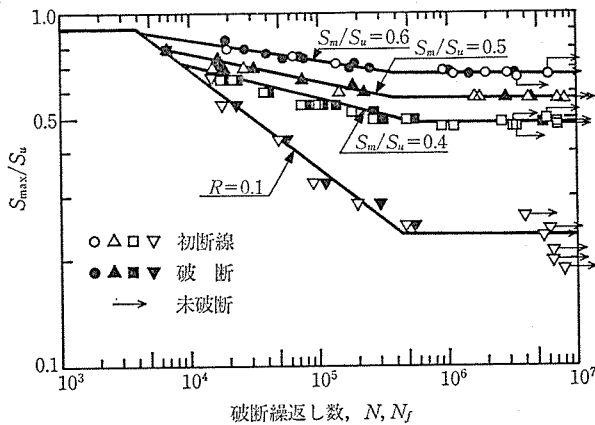


図-3 空气中疲労 S-N 線図 ( $S_{max}/S_u$  vs.  $N$ )

最大引張応力  $S_u$  に対して基準化した最大応力  $S_{max}/S_u$  と  $N$  および  $N_f$  との関係を両対数表示で図-3に示す。中空マークは  $N$ 、中実マークは  $N_f$ 、矢印を付した実験点は未破断試験体を示す。図-3の実線は、 $N$  に対する破壊確率  $P_f=50\%$  の S-N 線図である。

S-N 線図の傾斜は、平均応力  $S_m$  を一定とした試験から、 $S_m/S_u$  が減少すると大きくなる傾向が見られる。そのため、応力比  $R=0.1$  の傾斜は、 $S_m$  一定の試験より極めて大きい。  $2 \times 10^6$  回強度の  $S_{max}/S_u$  は、 $S_m$  が小さくなるにつれて低下している。これらは、(1) 式で与えられる関係から、 $S_{max}$  が  $S_m$  に依存しているためと考えられる。

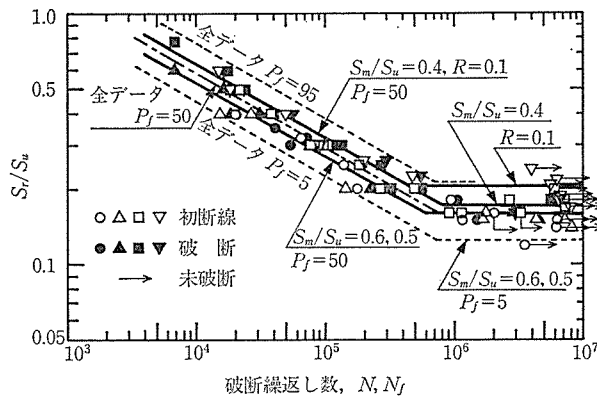


図-4 空气中疲労 S-N 線図 ( $S_r/S_u$  vs.  $N$ )

表-3 S-N 線図傾斜部の係数

	$P_f$ (%)	$S_m/S_u$			$R$	All data
		0.6	0.5	0.4	0.1	
$\alpha$	5					2.86
	10	2.83	2.90	3.05	3.14	2.94
	50	3.06	3.09	3.33	3.30	3.22
	90	3.30	3.27	3.60	3.46	3.50
	95					3.58
$\beta$		-3.41	-3.36	-3.38	-3.46	-3.35
$SD$		0.184	0.144	0.214	0.124	0.219

$$S_{max} = 2 S_m / (1 + R) \dots \dots \dots (1)$$

$S_u$  に対して基準化した応力範囲  $S_r/S_u$  と  $N$  との関係を図-4に示す。各実験シリーズにおける S-N 線図は (2) 式で表すことができ、図-4の実線は  $P_f=50\%$  に対する S-N 線図を示す。

$$\log N = \alpha + \beta \log (S_r/S_u) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\alpha$  および  $\beta$  は S-N 線図の傾斜部係数であり、 $N$  の対数の標準偏差  $SD$  とともに表-3に示す。平均応力の異なるデータに対して、傾斜  $\beta$  はほぼ等しいが、 $\alpha$  は平均応力が増加するに従いやや低下している。特に、平均応力すなわち  $S_m/S_u$  が 0.4 から 0.5 に増加した場合、疲労強度の低下は著しいが、 $S_m/S_u$  が 0.5 から 0.6 に増加しても疲労強度はほとんど変わらない。応力比  $R=0.1$  の S-N 線図傾斜部の強度は、 $S_m=0.4$  のそれとほとんど同様である。これらの結果から、傾斜部の寿命はバラツキを考慮すると平均応力に関係なく、応力範囲によってのみ定まるともいえる。

また、 $S_r/S_u$  と  $N$  との関係において、 $S_m$  を一定とする実験点は  $R=0.1 \sim 0.82$  の範囲にあり、 $R=0.1$  を一定とする実験点は  $S_m=0.1 \sim 0.6$  の範囲にある。いずれの実験シリーズにおいても、 $R$  および  $S_m$  は広範囲にわたっている。このことから、 $S_r/S_u$  についての S-N 線図は、実験条件によって特に有意な差がないとみることができる。さらに、全実験点を一本の S-N 線図で示すことができれば、疲労設計線図は簡易化される。S-N 線図の傾斜部について、全実験点を対象に求めた (2) 式の  $\alpha$ ,  $\beta$  および  $SD$  を表-3に示した。全データを対象とした表-3の係数では、 $\beta$  は個々の傾斜にほぼ等しいが、 $SD$  は実験点のバラツキを考慮しているので大きくなっている。信頼限界は実験点数に応じて定まるので、全データの破壊確率は5%まで拡張できる。破壊確率5, 50および95%の S-N 線図を、図-4に示した。

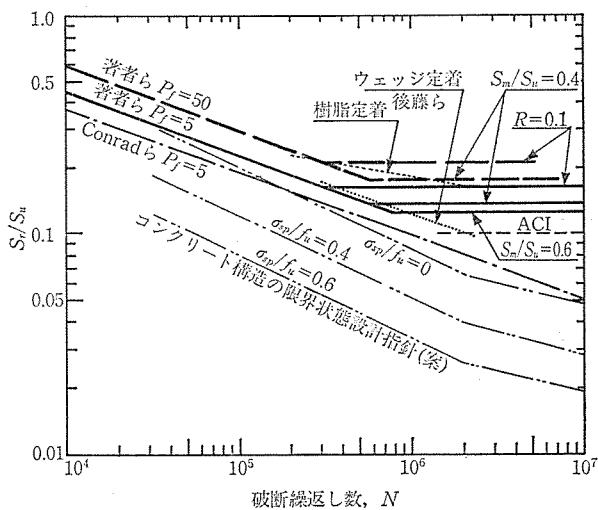
それぞれの S-N 線図に対する  $2 \times 10^6$  回強度は、表-4に見られるように、 $S_r/S_u$  が 0.6 および 0.5 で等しく、平均応力  $S_m/S_u$  が 0.4 に低下すると大きくなっている。それぞれの実験シリーズにおける破壊確率 50% の  $2 \times 10^6$  回強度を基に、全実験点のバラツキを考慮した計算値を表-5に示す。 $P_f=5$  における  $S_m/S_u=0.6$  の  $2 \times 10^6$  回強度は、応力範囲が  $24.7 \text{ kgf/mm}^2$  で

表-4 空气中試験の  $2 \times 10^6$  回疲労強度

	$P_f$ (%)	$S_m/S_u$			$R$
		0.6	0.5	0.4	0.1
$S_r/S_u$	10	0.136	0.141	0.145	0.189
	50	0.160	0.160	0.175	0.210
	90	0.188	0.182	0.211	0.233

表—5 全実験点のバラツキを考慮した  $2 \times 10^6$  回疲労強度

	$P_f$ (%)	$S_m/S_u$			$R$
		0.6	0.5	0.4	0.1
$S_r/S_u$	5	0.125	0.125	0.137	0.164
	10	0.132	0.132	0.144	0.173
	50	0.160	0.160	0.175	0.210
	90	0.194	0.194	0.212	0.255
	95	0.205	0.205	0.224	0.269
$S_r$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	5	24.7	24.7	27.1	32.4
	50	31.6	31.6	34.6	41.5
	95	40.5	40.5	44.3	53.2
$S_m$ (kgf/mm <sup>2</sup> )		118.6	98.8	79.0	25.3



図—5 空气中疲労 S-N 線図の比較 ( $S_r/S_u$  vs.  $N$ )

あり、折れ曲がり点は  $N=7.7 \times 10^5$  となる。

4.2.2 S-N 線図の比較

図—5 において、本供試材の S-N 線図を既報の文献と比較する。

Conrad ら<sup>3)</sup>は、7本より 270 K スtrandの疲労データを収集するとともに最小応力  $S_{min}$  を一定とする疲労試験を行い、 $P_f=5\%$  の疲労強度設計式を示した。本設計式を引張強度で基準化し、MKS 単位に換算すると (3) 式となる。

$$\log N = 2.49 - 3.5 \log(S_r/S_u) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $S_r$  は 15.4~57 kgf/mm<sup>2</sup> の範囲とし、 $S_{min}$  は 52~116 kgf/mm<sup>2</sup> の範囲とする。

$S_{min}$  は疲労寿命に影響を及ぼすが、疲労強度の算定に考慮するほどのものではないとし、(3) 式に  $S_{min}$  を導入していない。さらに、(3) 式は  $S_r/S_u=0.08$  のとき  $N=2 \times 10^6$  を与え、この応力範囲以下で破断した実験点は存在しないが、疲れ限度に相当する応力レベルを設けていない。(3) 式の S-N 線図の傾斜は本供試材のそれとほぼ等しいが、疲労強度は本供試材の方が大きい。

後藤ら<sup>4)</sup>は、PC 鋼より線 (SWPR 7 A T 12.4) の下

限荷重を引張強度の 0.6 倍 (105 kgf/mm<sup>2</sup>) とする疲労試験を実施した。定着具はウェッジタイプのものとしてエポキシ樹脂と圧着グリップを併用したものを用いた。 $2 \times 10^6$  回までの破断繰返し数に対して、応力振幅  $f_{rsk}$  を (4) 式で示した。

$$f_{rsk} = 10^a / N^k \dots\dots\dots (4)$$

ウェッジタイプ定着の S-N 線図は、傾斜および疲労強度が本供試材の  $P_f=5$  の S-N 線図に類似している。しかし、樹脂定着したストランドの疲労強度は、本供試材の  $P_f=50$  の疲労強度に近い値を示している。なお、PC 桁内での PC 鋼より線の疲労強度<sup>5)</sup>は、PC 鋼より線単体の疲労強度とは異なるようである。

コンクリート構造の限界状態設計法指針 (案)<sup>6)</sup>では、PC 鋼線・より線に対する疲労振幅強度の特性値  $f_{rpk}$  を (5) 式により定めている。

$$f_{rpk} = (1 - \sigma_{sp}/f_u) 10^a / N^k \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\sigma_{sp}$  は永久荷重による鋼材の応力度であり、 $f_u$  は鋼材の引張強度である。ただし、 $N$  が  $2 \times 10^6$  回以下のとき  $a=5.5$ 、 $k=0.38$ 、 $N$  が  $2 \times 10^6$  回を超えると  $a=4.1$ 、 $k=0.16$  である。

本供試材に対する  $\sigma_{sp}/f_u=0.6, 0.4, 0 (R=0)$  の S-N 線図を求めた。 $R=0$ 、すなわち片振引張の  $f_{rpk}$  は、 $N$  が  $10^6$  回以下で本供試材の  $P_f=5$  に近づいている。しかし、 $f_{rpk}$  は最小応力に依存しているため、最小応力が大きくなるとかなり厳しい設計値を与える。

ACI Committee 215<sup>7)</sup>では、ひびわれを有しない部材のストランドに重畳できる応力範囲は、最小応力が引張強度の 60% 以下の場合、引張強度の 10% であるとしている。この応力範囲は、本供試材の  $P_f=5\%$  の値よりやや小さいが、コンクリート構造の限界状態設計法指針 (案) よりかなり大きな値となる。

以上の結果から、本供試材は優れた疲労強度特性を与えている。

4.2.3 空气中疲れ限度の推定

$2 \times 10^6$  回強度は平均応力に依存しているため、疲れ限度線図から推定できることを検討する。

図—6 は、 $P_f=5$  および 50 における  $2 \times 10^6$  回強度の疲れ限度線図であり、実験点を結ぶ回帰直線は良好な相関を有している。疲れ限度線図から得られる最大応力および最小応力は、(6) および (7) 式で与えられ、応力範囲は (8) 式から求められる。

$$S_{max}/S_u = a_1 + b_1 S_m/S_u \dots\dots\dots (6)$$

$$S_{min}/S_u = a_2 + b_2 S_m/S_u \dots\dots\dots (7)$$

$$S_r/S_u = S_{max}/S_u - S_{min}/S_u \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $a_1, a_2, b_1$  および  $b_2$  は表—6 に示す定数である。これらの有効範囲は、引張試験にみられるように

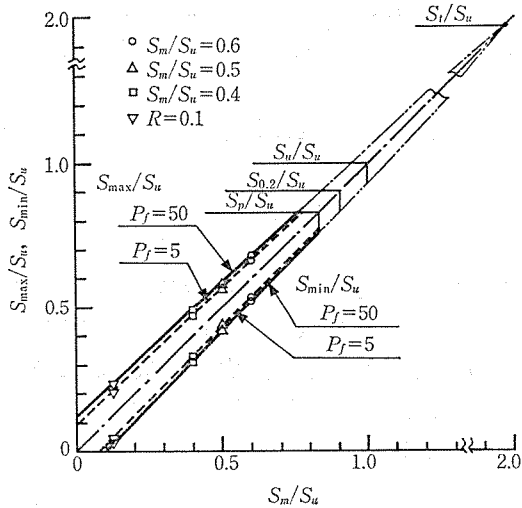


図-6 空气中疲れ限度線図 ( $2 \times 10^6$  回)

表-6 時間強度推定値の定数 (\*: 推定値)

	N	Pf (%)	Smax		Smin	
			a1	b1	a2	b2
空气中 疲労	$2 \times 10^6$	5	0.0869	0.9563	-0.0869	1.0437
	$2 \times 10^6$	50	0.1116	0.9426	-0.1116	1.0574
腐食 疲労	$1 \times 10^5$	50	0.1551	0.9396	-0.1551	1.0604
	$5 \times 10^5$	50	0.0754	0.9657	-0.0754	1.0343
	$1 \times 10^6$	50	0.0538	0.9739	-0.0538	1.0261
	$2 \times 10^6$	50	0.0393	0.9789	-0.0393	1.0211
	$*5 \times 10^6$	50	0.0253	0.9850	-0.0253	1.0150
	$*1 \times 10^7$	50	0.0182	0.9880	-0.0182	1.0120

荷重が比例限度  $P_p$  に達すると著しい伸びを生ずるので、 $S_{max}$  は  $S_p$  までとする。なお、(6) および (7) 式を延長した交点は、(8) 式の  $S_r/S_u=0$  と一致し、その値は真破断応力となることが指摘されている<sup>8)</sup>。本実験の場合、その値は  $P_f=5$  で  $389 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $P_f=50$  で  $386 \text{ kgf/mm}^2$  となり、心線の真破断応力  $S_t$  とほぼ一致する。

以上のように、ストランドの  $2 \times 10^6$  回強度は、いずれの実験点も (6) および (7) 式に適合しており、平均応力から推定できることを示している。

### 4.3 食塩水中の腐食疲労強度

#### 4.3.1 腐食疲労の S-N 線図

3% 食塩水中の腐食疲労試験結果について、 $S_{max}/S_u$  と  $N$  および  $N_f$  との関係を 図-7 に、比較のため空气中試験の S-N 線図を破線で示す。腐食疲労強度は空气中のそれよりやや低く、 $S_m$  が小さくなるに従いその傾斜が大きくなる。S-N 線図の傾斜は、 $S_m/S_u=0.6$  と  $0.4$  でほぼ平行であり、空气中試験の傾斜とは異なっている。さらに、 $R=0.1$  の S-N 線図は、 $S_{max}$  が減少するほど疲労強度の低下が著しい。これらのことから、腐食疲労強度は、平均応力の影響が大きいと推定される。

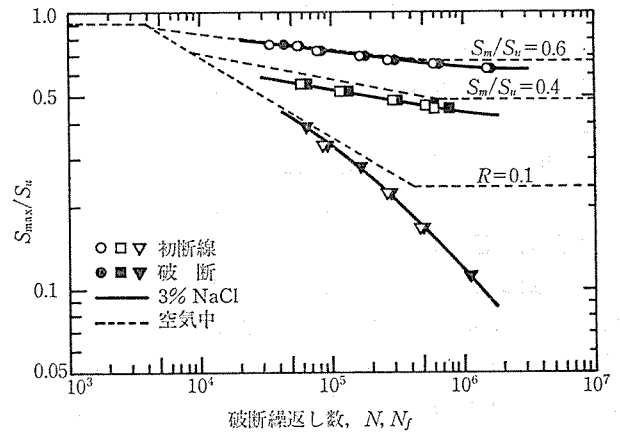


図-7 腐食疲労 S-N 線図 ( $S_{max}/S_u$  vs.  $N$ )

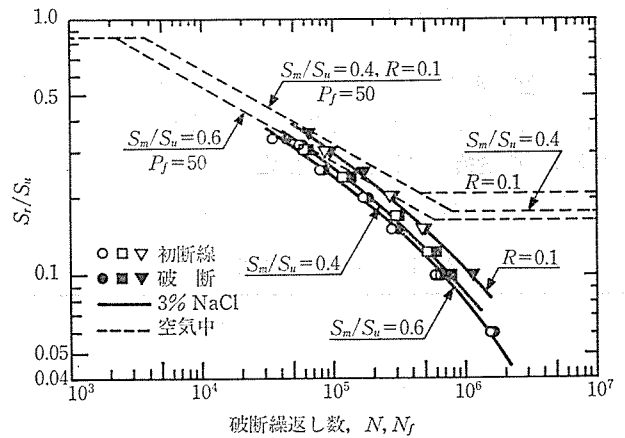


図-8 腐食疲労 S-N 線図 (両対数表示  $S_r/S_u$  vs.  $N$ )

一般に、鋼材の腐食疲労における S-N 線図は、バラツキの小さい凸形が得られ、時間経過が長いほど腐食効果が生じる。[ $S_r/S_u$  についての S-N 線図を 図-8 に示すと、本実験においてもそのような傾向が見られた。初断線発生繰返し数は  $S_r/S_u=0.3 \sim 0.4$  で空气中のそれとほとんど変わらず、腐食疲労による寿命低下が見られない。しかし、 $S_r/S_u$  が  $0.3$  より小さな範囲では  $N$  は空气中試験のそれより低下し、応力範囲が小さいほど

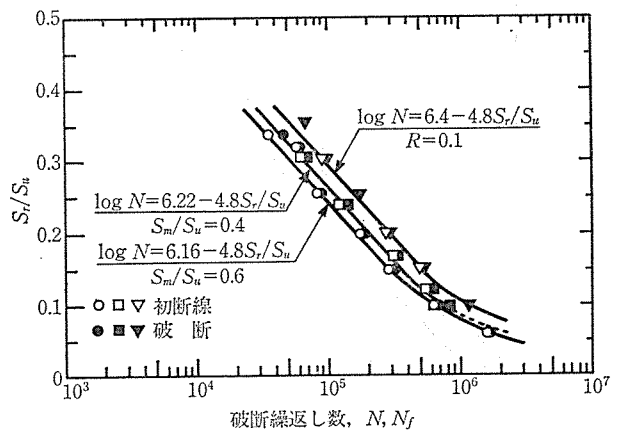


図-9 腐食疲労 S-N 線図 (片対数表示  $S_r/S_u$  vs.  $N$ )

◇論文報告◇

その傾向は顕著となっている。また、空气中試験の場合、 $S_m/S_u=0.4$  と  $R=0.1$  の疲労強度はほぼ同様であったが、腐食疲労では  $S_m=0.4$  の疲労強度が低下している。

図-9 は、片対数で表示した  $S_r/S_u$  についての  $S-N$  線図である。腐食疲労では、片対数で表示すると両対数で表示した図-8 では見られなかった「直線部分」が見られ、【評価し易い  $S-N$  線図が得られる。  $S-N$  線図は  $S_r/S_u$  が 0.15 以上の場合直線で表示でき、その傾斜は各実験シリーズごとにほぼ平行である。しかし、 $S_r/S_u$  が 0.15 より小さい応力範囲では、寿命が延びる傾向を示し、疲れ限度に相当する領域が見られる。腐食疲労の  $S-N$  線図を  $a_1, \beta_1$  を定数として (9) 式で示し、これらの定数を 図-9 に示す。

$$\log N = a_1 - \beta_1 S_r/S_u \dots\dots\dots (9)$$

また、図-9 から腐食疲労の時間強度を読み、表-7 に示す。ただし、 $2 \times 10^6$  回強度は 図-9 から外挿した。

4.3.2 腐食疲労時間強度の推定

従来より、鋼材の腐食疲労には疲れ限度がないといわ

表-7 腐食疲労の時間強度 (\*: 推定値)

	N	$S_m/S_u$		R
		0.6	0.4	0.1
$S_r/S_u$	$1 \times 10^5$	0.242	0.254	0.292
	$5 \times 10^5$	0.111	0.120	0.146
	$1 \times 10^6$	0.077	0.084	0.105
	$2 \times 10^6$	0.055	0.059	0.077
	* $5 \times 10^6$	0.033	0.039	0.050
	* $1 \times 10^7$	0.023	0.027	0.036
	$S_r$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$1 \times 10^5$	47.8	50.2
$5 \times 10^5$		21.9	23.7	28.8
$1 \times 10^6$		15.3	16.6	20.7
$2 \times 10^6$		10.8	11.7	15.3
* $5 \times 10^6$		6.5	7.6	9.8
* $1 \times 10^7$		4.5	5.3	7.1

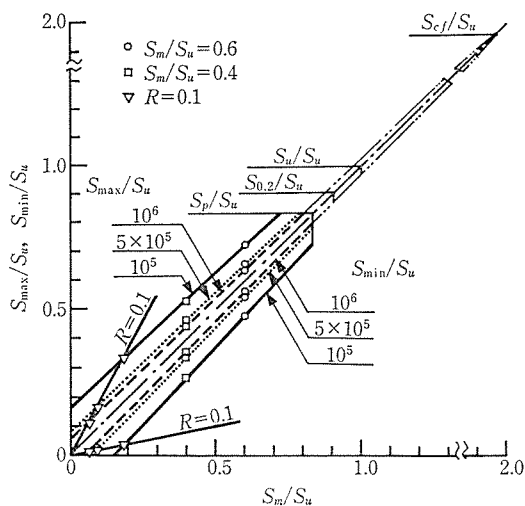


図-10 腐食疲労の時間強度の推定

れている。本実験では、 $2 \times 10^6$  回以上の試験が行われていないので疲れ限度の有無については明言できない。ここでは、 $2 \times 10^6$  回を超える時間強度の推定を試みる。

表-7 の時間強度を疲れ限度線図に倣い、図-10 にプロットした。  $R=0.1$  の実験点は、いずれも  $S_m/S_u=0.6$  および  $0.4$  の実験点を結ぶ直線の延長上にきている特性がある。したがって、腐食疲労の時間強度は、平均応力によって推定することができると考えられる。このため、時間強度は空气中の疲れ限度線図と同様 (6) および (7) 式で示し、両式の定数を表-6 に示す。なお、腐食疲労時間強度の有効範囲は、空气中と同様ストランドの比例限度とする。

空气中の疲れ限度線図では、(6) および (7) 式を延長して得られる交点は、真破断応力とほぼ一致していたが、腐食疲労時間強度では (8) 式の  $S_r/S_u=0$  によって定まる交点の応力  $S_{cf}$  は、真破断応力と異なる。しかし、 $S_{cf}/S_u$  と  $N$  との関係は、図-11 においてよい直線関係にある。したがって、定数  $a_1$  および  $b_1$  を  $N$  に対してプロットし、図-11 から外挿すれば、 $5 \times 10^6$  および  $10^7$  回強度を推定することができる。表-6 および表-7 における \*印の定数は、こうして求めた推定値である。  $S_m/S_u=0.6$  の場合、 $2 \times 10^6$  回強度は、 $S_r=10.8$  kgf/mm<sup>2</sup> であり、この値は引張強度の 5.5% にあたる。 $5 \times 10^6$  および  $10^7$  回強度はそれぞれ 6.5 および 4.5 kgf/mm<sup>2</sup> と推定される。

一方、冷間引抜き 7mm 鋼線 (引張強度 179 kgf/mm<sup>2</sup>) の海水中疲労強度<sup>9)</sup>では、 $10^6, 2 \times 10^6, 5 \times 10^6$  回に対する応力範囲は 19, 14, 10 kgf/mm<sup>2</sup> である。引張強度に対するこれらの値は、それぞれ 0.106, 0.078, 0.056 であり、表-7 に示した  $R=0.1$  の腐食疲労強度に極めて近い値となっている。

4.3.3 腐食疲労による強度低下

一般に、鋼材の空气中疲労強度は、ある程度の引張強

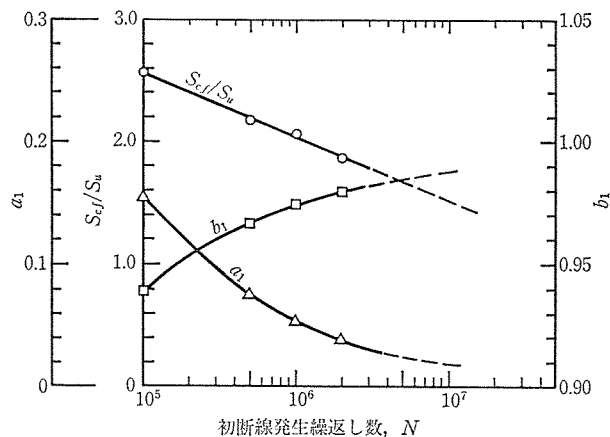
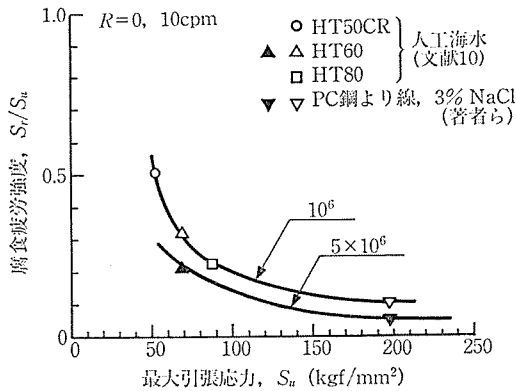


図-11 腐食疲労強度推定の定数



図—12 引張強度と腐食疲労強度との関係

度までは比例関係にある<sup>9)</sup>。繰返し速度 10cpm の片振り引張試験における  $10^6$  および  $5 \times 10^6$  回腐食疲労強度<sup>10)</sup>と本供試材の実験点を 図—12 にプロットすると、引張強度が大きいほど腐食疲労強度  $S_r/S_u$  は低下している。特に、引張強度が 100 kgf/mm<sup>2</sup> 程度までの鋼材において、腐食疲労強度の低下が著しい。200 kgf/mm<sup>2</sup> 以上の強度を有するストランドの疲労強度は、 $10^6$  回で引張強度の 10%、 $5 \times 10^6$  回で 5% 程度に低下すると推定される。

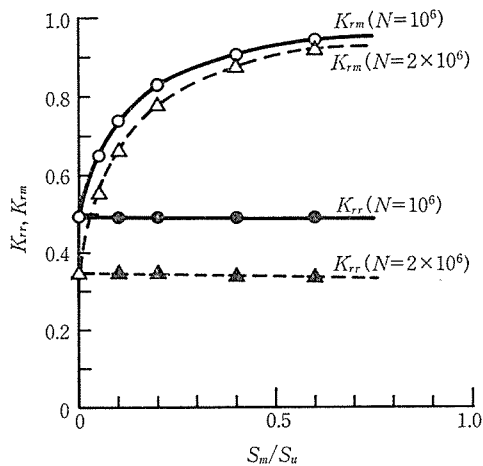
空气中疲労強度に対する腐食疲労強度の低下割合を、(10) および (11) 式で定義する。

$$K_{rr} = [S_r]_{NaCl} / [S_r]_{Air} \dots\dots\dots (10)$$

$$K_{rm} = [S_{max}]_{NaCl} / [S_{max}]_{Air} \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 $K_{rr}$  は応力範囲の強度低下割合であり、 $K_{rm}$  は最大応力の強度低下割合である。空气中および食塩水中強度に対して、それぞれ Air および NaCl を符して示す。

$10^6$  および  $2 \times 10^6$  回強度における  $K_{rr}$  および  $K_{rm}$  と、平均応力との関係を 図—13 に示す。ここで、空气中強度は  $P_f=50$  の値を用いた。 $K_{rr}$  は平均応力の影



図—13 腐食疲労強度の低下割合

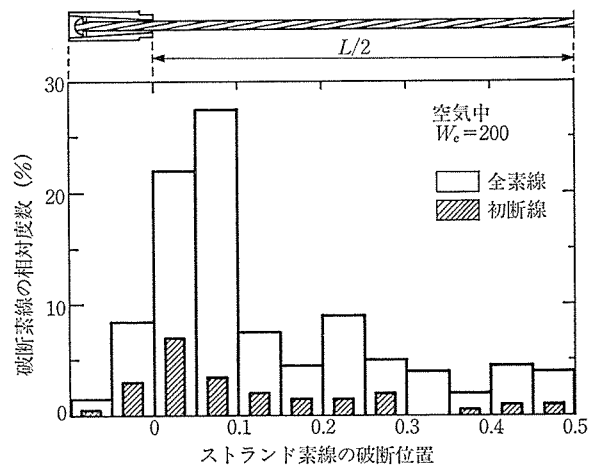
響を受けず、 $10^6$  および  $2 \times 10^6$  回腐食疲労強度はそれぞれ空气中疲労強度の 49% および 34% となる。 $K_{rm}$  は平均応力の減少に従い低下しており、平均応力が小さいほど低下割合は大きい。これらの強度低下割合は、 $10^6$  より  $2 \times 10^6$  回の方が大きくなっている。

4.4 疲労によるストランドの破断

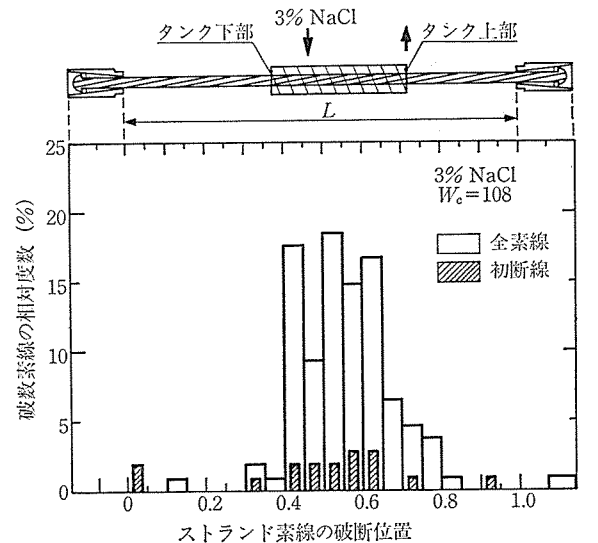
ストランドの疲労試験において、試験体は取付けチャック掴み部から破断し、ストランド自体の疲労強度を評価しがたいことがある。本実験では、溶接したストランド端末を樹脂固着した定着方法により、ストランド部分での疲労破壊を期待した。ストランドの破断位置、初断線の疲労亀裂発生位置および初断線発生繰返し数の観察結果について検討する。

4.4.1 ストランドの破断位置分布

空气中および腐食疲労試験におけるストランドの破断位置について、それぞれ 図—14 および 図—15 に示す。縦軸は破断素線の相対度数を示し、横軸はソケット間の



図—14 ストランドの破断位置分布 (空气中疲労)



図—15 ストランドの破断位置分布 (腐食疲労)

長さ  $L$  に対する破断位置である。

空气中試験では、ストランド全素線の破断位置はソケット付近に集中しており、初断線はさらにソケット近傍で生じている。これは、定着部端部の応力集中および端末加工時に生じた表面欠陥によるものと考えられる。

腐食疲労では、ストランド全素線の破断および初断線の発生位置は食塩水に浸漬されている部分に集中しており、端末加工時に生ずる欠陥等は疲労破壊に影響を及ぼしていない。また、ソケット近傍で初断線が生じても、他の素線は腐食環境で破断している。さらに、タンク下部での破断は少ないが、タンク上部の腐食液に直接浸漬されていない部分でも破断がみられる。これは、タンク下部は止水により腐食環境がなく、タンク上部は腐食液が素線の接触部を毛細管現象により上昇するためである。したがって、ストランドは、腐食環境が厳しいほどその部分で破断する割合が極めて高いといえる。

4.4.2 疲労亀裂の発生点

PC 部材中ストランドの疲労亀裂発生点は、素線相互の接触点であることが報告<sup>4),5)</sup>されている。本実験におけるストランドの疲労亀裂発生点の模式図を図-16に、疲労亀裂発生割合を表-8に示す。

空气中試験の場合、側線の外部表面Cからの亀裂発生が最も多い。これは、ストランドの端末加工時に受けた損傷など欠陥の存在割合が外部表面で高いためと考えられる。なお、ストランドに引張力が作用したときの応力は、心線が最も大きく、次いで側線の内側、側線の外側の順に大きい<sup>2)</sup>が、亀裂発生は表面欠陥による影響がより大きいといえる。

腐食疲労の疲労亀裂発生点は、初断線および全素線とも側線の接触部に集中している。これは、接触部の腐食被膜が繰返しひずみにより破壊され、新生面が常に腐食

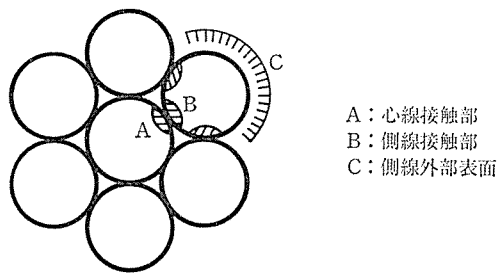


図-16 疲労亀裂の発生点

表-8 疲労亀裂発生の割合 (%)

		心線接触部 A	側線接触部 B	側線外部表面 C
初断線	空气中	21.3	19.1	59.6
	腐食	11.8	64.7	23.5
全素線	空气中	11.6	39.7	48.6
	腐食	10.0	75.6	14.4

環境に触れているためである。図-15で、初断線がソケット近傍で生じても、他の素線は腐食液浸漬部で破断していることに注目したい。

4.4.3 初断線発生繰返し数と破断繰返し数との関係

空气中および腐食疲労試験の初断線発生繰返し数  $N$  と全素線破断繰返し数  $N_f$  との関係を、図-17および図-18に示す。両者の回帰直線は、(12)および(13)式で与えられる。

空气中  $N=1.68 N_f^{0.94}$ .....(12)

腐食  $N=0.837 N_f$ .....(13)

空气中疲労では長寿命、すなわち低応力範囲の試験になるに従い、初断線から全素線が破断に至るまでの繰返

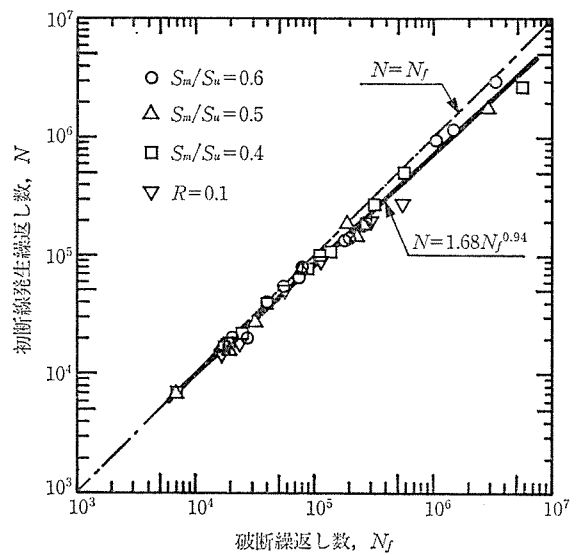


図-17 初断線発生繰返し数と破断繰返し数との関係 (空气中疲労)

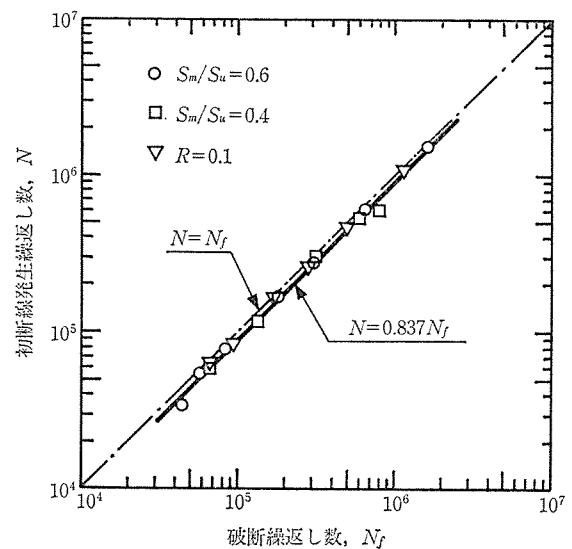


図-18 初断線発生繰返し数と破断繰返し数との関係 (腐食疲労)



し数が大きくなっている。概して、高応力範囲の試験では全素線が同時に破断するが、低応力範囲の試験では初断線から全破断に至るまで徐々に素線が断線していくことが伸びの計測から記録されている。この過程は、「全素線のうち最弱素線に疲労亀裂が生じると健全な素線に応力が再配分され、次にまた別の素線に新たな疲労亀裂が生ずる」ことを繰り返して疲労破壊が進行していくものと考えられる。

腐食疲労試験では、初断線が生じたのち他の素線は同時に破断する傾向が見られた。初断線発生繰返し数は、全素線破断繰返し数の 83.7% と一定の値である。この関係は、応力範囲と疲労亀裂進展速度とに一定の関係があることを示唆しているとみられる。さらに、腐食疲労では、どの素線にも一様な被害が累積していくものと考えられる。

## 5. 結 論

7本よりプレストレスングストランドの平均応力および応力比を一定とした空気中および 3% 食塩水中の腐食疲労試験を実施し、初断線発生繰返し数を基準とした  $S-N$  線図から疲労強度設計資料を求めるための検討を行い、次の結論が得られた。

- 1) 空気中試験の  $S-N$  線図傾斜部の寿命は、平均応力の影響をほとんど受けず、応力範囲のみによって示すことができる。破壊確率 5% の初断線発生繰返し数は、次式で示される。

$$\log N = 2.86 - 3.35 \log(S_r/S_u)$$

- 2) 空気中  $2 \times 10^6$  回疲労強度は平均応力に依存し、疲れ限度線図から推定することができる。破壊確率 5% の最大応力は次式で示される。

$$S_{\max}/S_u = 0.0869 + 0.9563 S_m/S_u$$

- 3) 腐食疲労の応力範囲と初断線発生繰返し数とを示す  $S-N$  線図は、片対数で表示すると  $S_r/S_u$  が 0.15 以上のとき直線で示すことができる。傾斜部の強度は、平均応力の増加によって低下する。 $5 \times 10^6$  回以上の時間強度に対する最大応力は平均応力から推定できる。

- 4) 食塩水中  $2 \times 10^6$  回疲労強度は、平均応力が引張強度の 60% のとき、応力範囲が引張強度の 5.5% に低下する。空気中強度に対する腐食疲労強度の低下は、平均応力に依存する。応力範囲の強度低下割合は平均応力の変化に対して一定であるが、最大応力の強度低下割合は平均応力が小さいほど大きい。
- 5) 腐食疲労の初断線発生繰返し数は、破断繰返し数の 83.7% と一定である。空気中試験の場合、初断線から破断に至る繰返し数は低応力範囲になるに従い大きくなる。
- 6) ストランドの疲労亀裂は、空気中試験では外部表面の損傷部から生ずるが、腐食疲労では側線の接触部から生ずる。腐食疲労による素線の破断は、腐食液に浸漬されている部分から生ずる。

## 参 考 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会：環境強度部会方式腐食疲労標準試験方法，第3回シンポジウム前刷集，1987年5月
- 2) ワイヤロープ便覧，白亜書房，昭和42年10月
- 3) Conrad Paulson, Jr., Karl H. Frank and John E. Breen: "A Fatigue Study of Prestressing Strand", Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, April 1983.
- 4) 後藤祐司，猪熊康夫：ひびわれを有する PC 桁中の PC 鋼材の疲労特性について，プレストレスコンクリート，Vol. 26, No. 6, Nov., 1984, pp. 83-90
- 5) 豊福俊泰，米田利博：PC 鋼より線の疲労強度，コンクリート工学，Vol. 25, No. 7, July, 1987, pp. 37-40
- 6) (社)土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)，コンクリート・ライブラリー第52号，昭和59年2月29日
- 7) ACI Committee 215: "Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading", ACI MANUAL OF CONCRETE PRACTICE, PART 1-1983, pp. 215 R 1-215 R 25.
- 8) 日本機械学会：疲れ強さの設計資料(I)，昭和52年4月
- 9) M. Birkenmaier and R. Narayanan: "Fatigue Resistance of Large High Tensile Steel Stay Tendons"; (訳)長井 洋，「太径高強度斜張ケーブル疲労強度」，橋梁，Jan., 1983, pp. 1~8
- 10) 西田新一，稲垣裕輔：腐食疲労強度に及ぼす繰返し速度，応力形式の影響，第3回シンポジウム前刷集，日本鉄鋼協会，1987年5月，pp. 51~68

【1988年12月12日受付】