

(8) モルタル中におけるPC鋼より線の応力腐食割れ および腐食疲労強度

運輸省船舶技術研究所 正会員 ○小林 佑規
同 正会員 田中 義久

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、厳しい腐食環境の下で波浪荷重を受ける。洋上接合により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。そのため、このような構造物の設計では、稼働期間に対する耐久性、即ち補強鋼材の腐食に配慮しなければならない。浮遊式構造物は、軽量化のため薄板構造が求められるので、腐食対策がいつそう重要である。プレストレストコンクリート中のPC鋼より線は、通常、シーにグラウチングされるが、ひびわれ部、不完全なグラウト部、定着部および構造物相互の継手部等において、海水による腐食環境に遭遇することが想定される。

著者らは、PC鋼より線の腐食強度設計資料を求めるため、実海水の塩分濃度に近い3% NaCl水溶液における応力腐食割れおよび腐食疲労強度について、実験的研究を進めてきた¹⁾²⁾。本稿では、モルタルに埋め込まれたPC鋼より線の応力腐食割れおよび腐食疲労特性について報告する。応力腐食割れ試験は、アノード分極下において実施し、腐食疲労試験は、自然腐食状態下およびカソード分極下において実施した。試験結果は、主としてひびわれ幅が腐食破断、腐食速度および疲労寿命に及ぼす影響について検討した。

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、SWPR7B）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、静的引張試験による機械的性質を表-2に示す。ストランドの直径は公称12.7φ、公称断面積は98.7mm²であり、心線および側線の直径はそれぞれ4.39φおよび4.21φ、よりの長さ（ピッチ）は170mmである。耐力 $S_{0.2}$ および比例限度 S_p は、それぞれ0.2%および0.01%オフセットに相当し、最大引張応力（破断応力） S_u に対し $S_{0.2}/S_u=0.908$ 、 $S_p/S_u=0.836$ となる。なお、表-2の伸び δ は、破断点を含まない一様伸びである。

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

表-2 供試材の機械的性質

荷重 (kgf)			応力 (kgf/mm ²)			弾性係数 (kgf/mm ²) E	伸び (%) δ
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		
19500	17700	16300	197.6	179.3	165.1	19800	5.4

ストランドは、コイル状に巻き取られた荷姿から切断したままの状態のものを用い、外径50φのモルタルに埋め込まれている。かぶりは18~19mmである。セメントは早強ポルトランドセメントを用い、水セメント比65%、セメント砂比50%の配合とした。材令7日における圧縮強度は295kgf/cm²であった。疲労試験体のストランド末端は、ネジ止め加工を施したソケットに樹脂固着し、応力腐食割れ試験体はグリップ定着とした。グリップまたはソケット間の長さは、720mm（ピッチの約4倍）とした。以下、モルタルに埋め込まれたストランド試験体をモルタル被覆ストランドと呼ぶ。

ひびわれは、両引きおよびスリットに区別され、次の方法により発生させた。ここで、ひびわれ幅 W_{cr} は、ひびわれ導入時の値である。(a)両引きひびわれは、応力腐食割れの試験荷重 P_{sc} または疲労試験の最大荷重をモルタル被覆ストランドに負荷して発生させた。 W_{cr} は、ほとんどが1mm未満であった。(b)スリットは、 W_{cr} が1mm以上の大きなひびわれを模擬したものであり、モルタル打ち込み

時にスパーサにより製作した。なお、この試験体にはスリットのほか負荷による両引きひびわれも存在する。また、疲労試験に用いたひびわれの無いモルタル被覆ストランド試験体は、最大荷重よりやや大きい荷重を作用させた状態でモルタルを打ち込んでいる。

3. 実験方法

応力腐食割れ(SCC)試験は、荷重容量20tのレバー式試験機を用い、定荷重法により行った。SCC試験は、アノード分極下における促進試験とした。負荷は、最大引張荷重(破断荷重) P_u の78、74および60%とした。腐食疲労試験は、自然腐食状態およびカソード分極下で実施した。平均荷重は破断荷重の60%とし、破断応力に対する応力範囲 S_r/S_u は0.18および0.1とした。なお、腐食疲労試験は、荷重容量20tfの油圧サーボ制御疲労試験機を用い、サイン波10cpmの繰り返し速度とした。

SCCおよび腐食疲労試験法は、図-1に示すように腐食槽を縦型に設置し、伸び計測の標点間距離を500mmとした。試験液に浸漬される試験体の長さは、SCC試験が250mm、疲労試験が450mmである。ストランドは、試験機と電気的に絶縁されている。試験液は、蒸留水に食塩を溶解した3%食塩水とし、貯液量80ℓのタンクよりポンプにて腐食槽に循環した。試験液の流量は毎分1~2ℓ、液温は $25 \pm 1^\circ\text{C}$ に制御し、溶存酸素濃度は空気吹き込みによる空気飽和濃度である。試験中のpHは、7.2~10.9であった。試験液の交換は、試験体ごとに行うほか、長時間の試験にあつては腐食生成物の量を勘案して交換した。なお、電気伝導度は、NaCl水溶液濃度と一定の関係(3%NaCl水溶液で50mS/cm)にあつたので、食塩濃度の管理および試験液交換の目安に用いた。分極電位の制御は、ポテンシオスタットに行い、対極に白金、照合電極に飽和甘汞電極を用いた。対極の位置²⁾は、浸食位置に影響を及ぼすので、モルタル全長に沿って配置した。

4. 結果および考察

4.1 モルタル中のストランドの応力腐食割れ

(1) ひびわれによる破断位置

SCC試験におけるモルタル被覆ストランドは、側線が6本同時に破断することが多い。心線は、いずれの試験体においても発錆が認められず、破断しなかった。ストランドの破断位置を、ひびわれ幅 W_{cr} と腐食状況とともに図-2に示す。黒および斜線部分は発錆の観察された領域を示しており、破断に至った発錆を黒で示した。(a)は両引きひびわれの結果である。破断は孤立した大きなひびわれに生じ、その部分に著しい腐食が見られた。ひびわれが接近していると、腐食は連続して広範囲に拡大している。(b)および(c)はスリット付試験体の場合であり、破断はスリット部で生じた。発錆はスリット部にのみ見られ、負荷によつて発生したひびわれにはほとんど見られなかった。これらの要因として、スリットのような大きなひびわれでは試験液が円滑に循環されるため酸素の供給が十分行われる

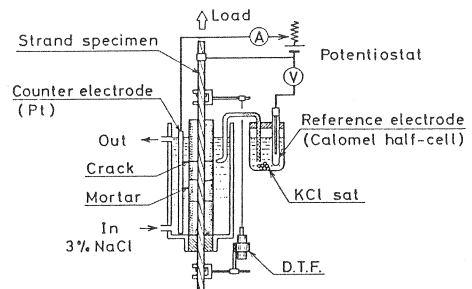


図-1 実験方法

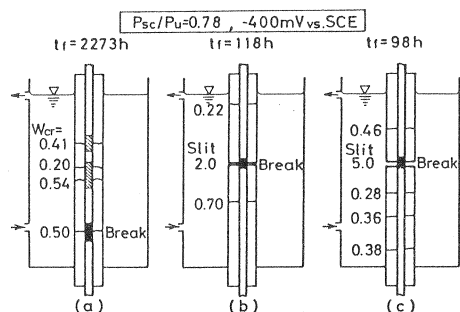


図-2 SCC試験におけるストランドの破断位置

こと、孤立したひびわれ部では、局部電池が形成され易く、局部腐食が助長されるとが考えられる。また、小さなひびわれ内部では試験液の停滞によって、pH値が試験液のそれより若干高くなっていることも考えられる。スリット付試験体の負荷によって発生したひびわれに発錆が見られないのは、破断時間が短時間のため、腐食進行に要する時間が十分でないことにもよる。

側線の腐食長さ l_{co} と W_{cr} との関係を示す。 $W_{cr} \geq 1.0\text{mm}$ のスリット部では、 l_{co} が $6 \sim 14\text{mm}$ の範囲に限定されており、腐食長さはスリット幅にほとんど影響されない。 $W_{cr} < 1.0\text{mm}$ の両引きひびわれの場合は、腐食長さが広範囲に分布している。特に、ひびわれ幅が小さくなるに従って腐食長さが大きくなる傾向がみられる。これは、前述のように、腐食長さは腐食時間に依存しているためと見られる。

(2) ひびわれ幅と破断時間の関係

ひびわれ幅と破断時間との関係を図-4に示す。縦軸の W_{cr} は、それぞれの試験体における破断位置近傍のひびわれ幅またはスリット幅である。ストランドの実験点²⁾ は中実マークでプロットした。破断時間 t_f は、 W_{cr} が小さくなるに従って長くなり、 $W_{cr} < 0.5\text{mm}$ で著しく向上している。また、 t_f は負荷荷重 P_{sc} および腐食電位 ϕ にも依存しているが、 t_f の P_{sc} および ϕ への依存性は、 $W_{cr} \geq 1\text{mm}$ のスリットの場合に高く、 $W_{cr} < 1\text{mm}$ の両引きひびわれでは低いようである。いずれにせよ、ひびわれ幅を小さくおさえることにより、ストランドの破断時間を著しく向上させることができる。

(3) 腐食速度

SCC 試験におけるストランドの重量減少とファラデーの法則から求めた反応重量とは、負荷荷重の影響を受けずほぼ一致していた²⁾。モルタル被覆ストランドでは、図-5に見られるように、重量減少と反応重量とが一致しない部分がある。腐食時間の短いストランドは、局所的な腐食箇所破断するため、絞りによって直径が過小に測定され易く、重量減少が反応重量より大きくなっている。一方、腐食時間の長いストランドは、図-2のように発錆が広範囲にわたるものの、発錆部分の腐食量が少ないため直径測定が不可能であったためである。

腐食速度と腐食電位との関係を、図-6に示す。素線の腐食速度は、ストランドを解体したままの側線（以下、無処理材と呼ぶ）および表面を #400 のエメリー紙で研磨した側線（以下、研磨材と呼ぶ）を用い、アノード分極曲線から求めた。前報²⁾ のストランドに対する腐食速度は、反応重量から求め中実マークでプロットし、モルタル被覆ストランドに対しては中実マークでプロットした。無処理材

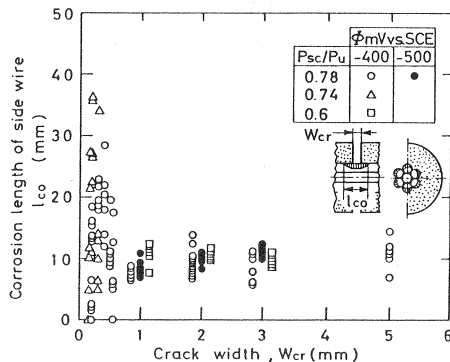


図-3 腐食長さとひびわれ幅の関係

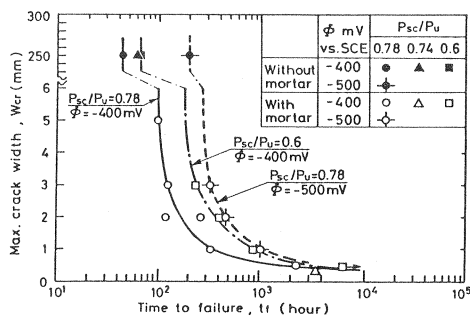


図-4 ひびわれ幅と破断時間の関係

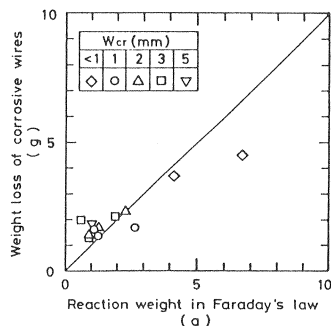


図-5 腐食減量と反応重量との比較

の腐食速度は、研磨材のそれより小さく、電位が卑になるに従ってその傾向が著しくなる。研磨材の自然腐食電位 E_{corr} は -688mV vs. SCE に達したが、無処理材のそれは -610mV vs. SCE 程度であった。なお、無処理材の自然腐食電位が研磨材のそれに達するには、ほぼ150時間を要した。この腐食速度の相違は、無処理材には被膜があり、研磨材は表面が活性化しているためと考えられる。

ストランドの腐食速度は、負荷荷重の影響がほとんどないと言える。電位が -500mV 以下の腐食速度は、分極曲線から求めた素線の値に近似しているが、電位が貴になるに従って低下した。これは、浸漬部が均一に腐食したものと仮定して腐食速度を計算したため、見かけ上のことである。実際には、電位が貴になるに従って局所的な腐食となっているため、局所の腐食速度は研磨材の腐食速度に近くなるものと考えられる。

モルタル被覆ストランドの腐食速度は、ストランドのそれよりさらに低下し、大きなバラツキを生じている。これは、図-4に見られるように、破断時間がひびわれ幅により異なるためである。図-7のひびわれ幅と腐食速度の関係によると、腐食速度のひびわれ幅依存性が存在し、 1mm 以下のひびわれ幅のとき、腐食速度は著しく低下するようになる。また、腐食速度は電位にも依存しているが、ひびわれ幅が 0.5mm 以下になると電位の影響は小さいものと推定される。

電位が $-450\sim-400\text{mV}$ のとき、破断箇所近傍の素線表面には、結晶粒内および粒界に微細な亀裂が観察されている²⁾。同様な亀裂は、 -400mV を付与したスリット付試験体破断近傍の表層部およびピット内にも観察された。この亀裂は、表層から鋼が溶解されていくために寄与しているものと考えられる。また、電位 -450mV では、無処理材の腐食速度が研磨材のそれに近い値となっており、素線の表面形態に影響されない電位と考えられる。一方、ストランドの SCC 試験の伸びから求めた塑性歪 ϵ_p は、破断時間との関係において図-8となる。ここに、 ϵ_p は破断までに生じた全伸びから弾性歪を減じたものである。 ϵ_p は、負荷荷重が大きく、また破断時間即ち腐食時間が長いほど大きくなる傾向にある。しかし、200時間以内に破断したときの ϵ_p は、破断時間に関係せずほぼ同様な値を示している。このことは、短時間に破断する場合は断面減少が局所的であるために見かけ上の破断伸びが小さく、長時間で破断する場合は全面腐食により断面減少が一様に生ずるために破断伸びが大きくなったものと推定される。これらのことから、腐食速度が大きく、巨視的な塑性歪が小さいときの破断は、アノード分極による活性径路型の応力腐食割れ (APC) であると言える。

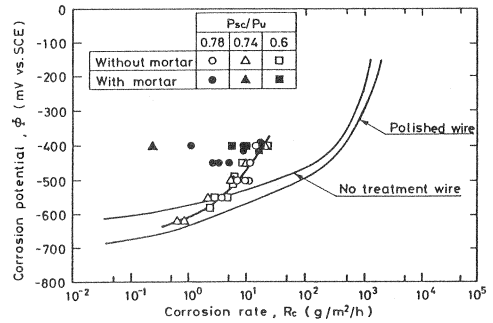


図-6 腐食電位と腐食速度の関係

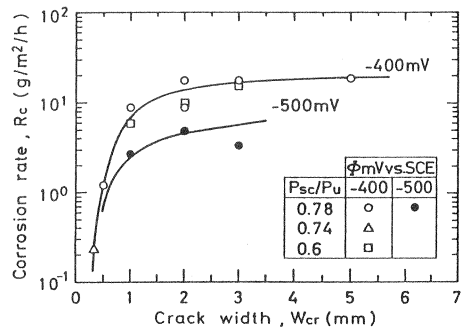


図-7 ひびわれ幅と腐食速度の関係

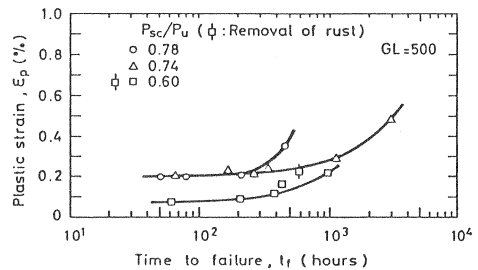


図-8 SCC試験における塑性歪

4.2 モルタル中の腐食疲労強度

モルタル被覆ストランドの腐食疲労試験は、ひびわれ幅が疲労寿命に及ぼす影響およびカソード防食効果の検討のために実施した。疲労破壊の基準として、素線 7本のうち 1本の素線が破断したときの繰返し数、即ち初断線発生寿命を採用する。

(1) 腐食疲労寿命および強度

モルタル被覆ストランドの腐食疲労における S-N線図を、既報¹⁾の空气中および腐食疲労 $S_m/S_u=0.6$ の S-N線図とともに図-9に示す。モルタル被覆ストランドの S-N線図は、ひびわれ幅をパラメータとして、ストランドの腐食疲労 S-N線図とほぼ平行と見なすことができ、寿命はひびわれ幅が小さくなるに従って向上している。なお、 $W_{cr}=1$ の S-N線図は、腐食疲労 $S_m/S_u=0.4$ のそれとほぼ同様であり、 $W_{cr}=0$ の寿命は、腐食疲労 $R=0.1$ の寿命よりやや短い程度であった。

ストランドの腐食疲労寿命 N_{cf} に対するモルタル被覆ストランドのそれ N_{mor} を腐食疲労寿命比 N_{mor}/N_{cf} とし、ひびわれ幅との関係を 図-10に示す。腐食疲労寿命比は、 W_{cr} が小さくなるにしたがって、直線的に増加している。しかし、 $W_{cr}=0$ で $S_r/S_u=0.18$ のときの寿命は、破壊確率 $P_f=50\%$ における空气中寿命の 80% であった。この空气中寿命に達しなかった理由としては、この応力範囲での変動歪が 1800μ と大きいため、モルタルとストランドとの付着が不完全になり、腐食液がモルタルの微細クラックからストランドまで浸透したことが考えられる。また、寿命比と W_{cr} の直線関係から外挿される $N_{mor}=N_{cf}$ における W_{cr} は、ほぼ $1.6\sim 1.8\text{mm}$ 、平均 1.7mm となる。したがって、 $W_{cr}=1.7\text{mm}$ では、モルタル被覆によるストランドの寿命増加が全く期待できないと推定される。

ストランドの腐食疲労応力範囲 $S_{r,mor}$ に対するモルタル被覆ストランドのそれ $S_{r,cf}$ を腐食疲労強度比 $S_{r,mor}/S_{r,cf}$ とし、 W_{cr} との関係を 図-11に示す。 $S_{r,mor}/S_{r,cf}$ は、S-N線図がほぼ平行であるため、 $N=5\times 10^5\sim 2\times 10^6$ に対してほぼ同様な値となった。この結果、強度比とひびわれ幅とは直線関係が得られ、前述と同様 $W_{cr}=1.7$ で $S_{r,mor}=S_{r,cf}$ となっている。

(2) 防食効果

試験液におけるストランドの防食効果を検討するため、カソード分極下で疲労試験を実施し、図-9に -800mV に対する実験点をプロットした。応力範囲 $S_r/S_u=0.18$ での疲労寿命は、空气中試験における破壊確率 $P_f=50\%$ の寿命まで向上しており、十分な防食効果が得られている。 $S_r/S_u=0.1$ での疲労寿命

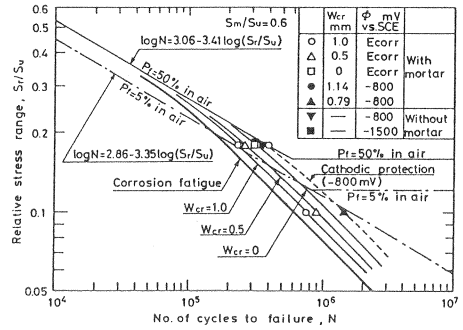


図-9 S-N線図

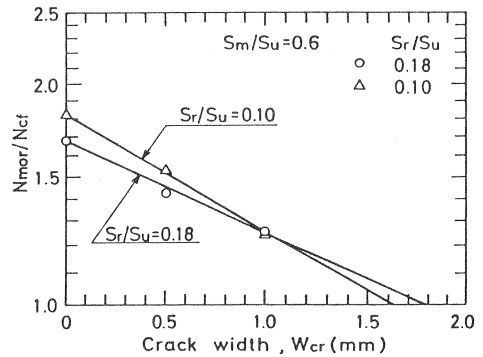


図-10 腐食疲労寿命比とひびわれ幅の関係

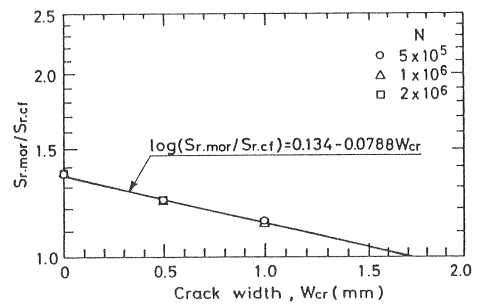


図-11 腐食疲労強度比とひびわれ幅の関係

は、空气中Pf=5%のS-N線図を延長して得られる寿命とほぼ等しい値となった。これら2点によるS-N線図は、モルタル被覆ストランドのS-N線図とほぼ同様な傾向を示している。なお、研磨材および無処理材のカソード分極曲線から得られる-800mVに対する電流密度は、0.35~0.43A/m²であり、ストランドに対するそれは0.3~0.1A/m²であった。鋼材の海水におけるカソード防食電流は、0.05~0.15A/m²ともいわれていることから、本実験での電流密度はやや高い値と考えられる。一例の防食実験結果ではあるが、ストランドの腐食疲労寿命は、適度なカソード防食により向上できると言える。

(3) 本実験結果とFIP勧告との比較

FIPのコンクリート船舶³⁾では、寿命20年を想定し、ストランドの許容応力が3点の時間強度で与えられている。それらは、1X10⁵、5X10⁵、2X10⁶回に対し310、190および125MPaである。この時間強度を本供試材のSuで規準化したS-N線図をFIP-Aとして図-12に示す。また、1.3倍の許容応力に対するストランドの試験が要求されていることから、強度確認のためのS-N線図はFIP-Tで示される。さらに、冗長度を考慮しない場合の許容応力が、前述の繰返し数に対して190、125、110MPaとして与えられており、これに対するS-N線図

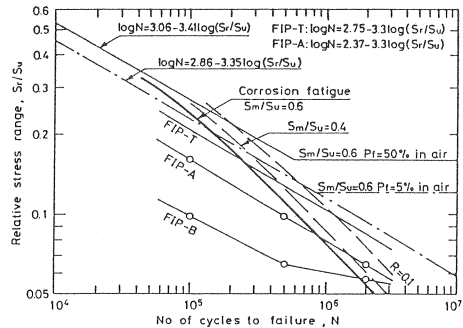


図-12 本実験結果とFIP勧告との比較

をFIP-Bで示した。これらのS-N線図を本実験結果と比較すると、概略以下のとおりである。FIP-Tは、傾斜が空气中Pf=5%のそれにほぼ等しいが、寿命はやや安全側となっている。また、本実験の腐食疲労寿命1X10⁶回および2X10⁶回は、それぞれFIP-AおよびFIP-Bの寿命にほぼ等しくなっている。

5. まとめ

モルタルに埋め込まれたPC鋼より線の応力腐食割れおよび腐食疲労試験から、腐食強度設計資料を得るための検討を行い、次の結論が得られた。

- (1) 応力腐食割れの破断は、複数のひびわれが存在する場合、最大ひびわれ箇所から生ずる。
- (2) 破断時間は、ひびわれ幅が小さいほど長くなる。ひびわれ幅が0.3~0.5mmでの破断時間は、ストランドのそれより著しく向上する。
- (3) 腐食速度は、電位およびひびわれ幅に依存し、ひびわれ幅が1mm以下で著しく低下する。
- (4) 電位が-450~-400mV vs. SCEでは、局部腐食が生じ、活性径路型の応力腐食割れを生ずる。
- (5) モルタル被覆ストランドの腐食疲労S-N線図は、ストランドのそれとほぼ平行となる。
- (6) 腐食疲労寿命および強度は、ひびわれ幅に依存する。ひびわれ幅を小さくすることによって寿命は向上されるが、1.7mmのひびわれ幅ではモルタル被覆による寿命増加の効果がない。
- (7) 適度な陰極防食は、腐食疲労寿命をモルタル被覆効果以上に向上させることができる。

参考文献

- 1) 小林佑規、田中義久：「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」、プレストレストコンクリート、Vol.31, No.2, Mar. 1989, PP.7-15.
- 2) 小林佑規、田中義久：「3%食塩水におけるPC鋼より線の応力腐食割れ試験」、プレストレストコンクリート技術協会、第29回研究発表会講演概要、1989年11月、PP.45-48.
- 3) FIP Recommendations: "Design and construction of concrete ships," 1986.