

# PC鋼より線の3%NaCl水溶液における応力腐食特性

小林 佑規<sup>\*1</sup>・田中 義久<sup>\*2</sup>

## 1. まえがき

コンクリート海洋構造物は、常時、海水の腐食環境に置かれている。洋上接合などによって建造される大型構造物は、入渠による保守・管理が困難であるため、腐食に配慮した設計・施工が要求される。

プレストレストコンクリート(PC)構造物におけるPC鋼材の腐食事例を見ると、わが国では、40年間供用された橋梁<sup>1)</sup>に、グラウト不良によるPC鋼線の破断が見つかっている。米国<sup>2)</sup>では、大部分が腐食による破断であり、融雪剤としての塩化カルシウムが一因となっている。これらPC鋼材の破断は、いずれも構造物の崩壊には至っていない。しかし、部材継手部のPC鋼より線が、建造24年後に、水素脆性の応力腐食割れを生じて崩壊した建築物<sup>3)</sup>もある。このような事例は、グラウトの充填不良箇所および部材継手部に見られ、施工に配慮があれば、腐食は免れたものである。また、コンクリートのひびわれ、かぶり不足、定着部付近は、腐食しやすいことがよく知られている。

応力腐食割れ(SCC)の感受性は、材料、環境および負荷応力が特定の組合せのときに高くなる。PC鋼材は高応力下で緊張されているので、SCCが生じやすい条件を有している。FIP(国際プレストレストコンクリート連合)は、PC鋼材の応力腐食割れについて、チオシアン酸アンモニウム(NH<sub>4</sub>CNS)水溶液による水素脆性割れ試験<sup>4)</sup>を提案している。また、富岡ら<sup>5)</sup>は、ブルー

イング処理材のSCC感受性がNH<sub>4</sub>CNSおよび硝酸アンモニウム(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)水溶液で厳しく、NaCl水溶液で弱いことを示した。これら環境条件の厳しい試験は、PC鋼材の品質管理には有益であるが、実環境との対応が困難である。海水に接しているコンクリート構造物では、PC鋼材の断面減少など、海水腐食が構造物の強度低下に及ぼす課題がより重要と考える。

本稿では、海洋環境を想定し、腐食速度が最大とされている3%NaCl水溶液におけるPC鋼より線の応力腐食について報告する。応力腐食試験は7本よりB種のストランドを供試材とし、定荷重法による自然腐食状態およびアノード分極下の促進試験を実施した。試験結果は、ストランドの破断時間、断面減少、強度低下、応力腐食割れおよび腐食速度について検討した。さらに、被覆モルタルのひびわれ幅がストランドの応力腐食に及ぼす影響を検討した。

## 2. 供試材および試験体

### 2.1 供試材

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、静的引張試験による機械的性質を表-2に示す。ストランドの公称直径は12.7φ、公称断面積は、98.7 mm<sup>2</sup>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

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 <sup>2</sup> )		
破断 $P_u$	0.2% $P_{0.2}$	比例限度 $P_p$	破断 $S_u$	耐力 $S_{0.2}$	比例限度 $S_p$
19 500	17 700	16 300	197.6	179.3	165.1

弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> ) $E$	伸び (%) $\delta$
19 800	5.4



\*1 Yuki KOBAYASHI  
運輸省船舶技術研究所



\*2 Yoshihisa TANAKA  
運輸省船舶技術研究所

長さは 170 mm 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（公称破断応力） $S_u$  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  $\delta$  は、標点距離 240 mm における破断点を含まない一様伸びである。

### 2.2 試験体

試験体は、コイル状に巻き取られた荷姿から切断したままのストランドおよびモルタルに埋め込まれたストランド（以下、モルタル被覆ストランドという）である。

モルタル被覆ストランドは、両引きまたはスリットひびわれを有する。両引きひびわれは、負荷で生じた幅 1 mm 未満のひびわれをいう。スリットは、モルタル打込み時に 1~5 mm 幅を設け、大きなひびわれを想定している。したがって、スリット付きモルタルには、試験時、負荷による両引きひびわれも併存する。なお、ひびわれ幅は試験開始時の値である。

被覆モルタルは外径 50 φ とした。かぶりは、18~19 mm、ストランド直径の 1.5 倍である。モルタルは、早強ポルトランドセメントおよび豊浦標準砂を用い、水セメント比 65%、セメント砂比 50% の配合とした。モルタルの打込みは、試験開始 1 週間前とし、材令 7 日の圧縮強度は 295 kgf/cm<sup>2</sup> であった。

### 3. 実験方法

応力腐食試験は、自然電極電位（自然腐食状態）およびアノード分極下において、定荷重法で実施した。主に、容量 20 tf のレバー式試験機を用い、荷重、伸び、電位および電流を常時記録した。応力腐食試験法を図-1 に示す。試験体および腐食槽は垂直に設置し、試験液は外部タンクより循環した。グリップ間の長さは 660 または 720 mm、伸び計測の標点距離は 500 mm、浸漬長

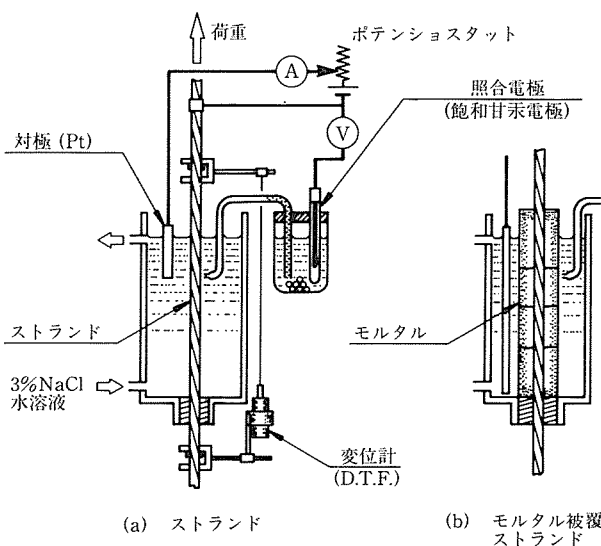


図-1 応力腐食試験法

さはほぼ 250 mm とした。ストランドは、グリップ定着部で試験機と電氣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 80 l のタンクより 2 l の腐食槽に供給した。流量は毎分 1~2 l、液温は 25±1℃、溶存酸素濃度は空気吹込みによる空気飽和濃度である。試験中の pH は、ストランドが 6.3~7、モルタル被覆ストランドが 7.2~10.9 であった。試験液は、試験体ごとに交換したが、長時間の試験では、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 50 mS/cm）にあったので、食塩濃度の管理および試験液交換の一助に用いた。電位制御は、ポテンショスタットにて行い、対極に白金、照合電極に飽和甘汞電極を用いた。対極は、ストランドの試験では液面より 50 mm の深さまで挿入し、モルタル被覆ストランドではモルタルに沿って配置した。

### 4. 結果および考察

#### 4.1 自然腐食状態下の応力腐食

応力腐食試験は、負荷を破断荷重の 72~88% とし、4 000~9 800 時間継続したが、ストランドは破断しなかった。そのため、応力腐食試験に供したストランドの残存強度、伸びおよび自然腐食状態下の腐食速度について検討する。以下、負荷レベルを、負荷荷重  $P_{sc}$  と破断荷重  $P_u$  との比  $P_{sc}/P_u$ 、応力腐食時間を  $t$  (hr) で表す。

##### 4.1.1 応力腐食材の機械的性質

###### (1) 残存強度

応力腐食材 (SC1~SC4) の静的引張試験における荷重-伸び線図を図-2 に、公称断面積から求めた残存強度を、空气中強度 (ST 材) との比  $R$  で、表-3 に示す。

応力腐食材は、最大引張荷重のとき、標点距離 350 mm 内の腐食部分で破断した。破面は、Cup and cone の延性破面であった。負荷がほぼ等しい SC1 と SC2 は、荷重-伸び線図が同様な軌跡を示し、弾性係数、耐力および破断強度の低下はほぼ同様であった。腐食時間

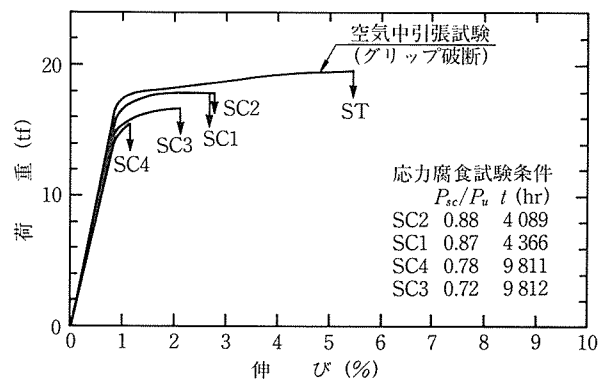


図-2 荷重-伸び線図

表-3 公称断面積に対する残存強度

	負荷重 $P_{sc}/P_u$	試験時間 $t$ (hr)	比 例 限 度 $R_p$	耐 力 $R_{0.2}$	破 断 強 度 $R_u$	弾 性 係 数 $R_E$	破 断 伸 び $\delta_f$ (%)
ST	—	—	1.0	1.0	1.0	1.0	*5.42
SC 2	0.88	4089	0.890	0.955	0.908	0.932	2.74
SC 1	0.87	4366	0.875	0.955	0.911	0.936	2.66
SC 4	0.78	9811	0.841	0.870	0.795	0.843	1.17
SC 3	0.72	9812	0.875	0.887	0.856	0.883	2.14

\*：一様伸び

表-4 腐食断面積に対する残存強度

	断面積 $R_A$	比 例 限 度 $R_p$	耐 力 $R_{0.2}$	破 断 強 度 $R_u$	弾 性 係 数 $R_E$	絞 り %	
						心 線 $\varphi_c$	側 線 $\varphi_s$
ST	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	48.7	45.0
SC 2	0.9813	0.907	0.973	0.925	0.950	44.2	38.1
SC 1	0.9769	0.895	0.978	0.933	0.958	46.7	36.9
SC 4	0.8725	0.964	0.997	0.911	0.966	40.0	41.6
SC 3	0.8872	0.985	1.000	0.965	0.996	49.8	46.8

が等しい SC 3 と SC 4 は、負荷の大きい SC 4 の強度が低下した。倉内<sup>6)</sup>は、2年間にわたる海水浸漬において、破断荷重が腐食時間の長さとともに低下することを示している。表-3 の破断荷重は、6 か月間の海水浸漬材に近似しているが、13 か月間では本実験の方が低下した。このように、腐食材の強度低下は、海水浸漬より応力腐食の方が大きくなることを示している。

腐食断面積から求めた残存強度を、空气中強度との比で表-4 に示す。腐食断面積は、絞りの影響を受けていない箇所の直径測定から求めた。 $R_A$  は、腐食断面積と公称断面積との比である。腐食断面積の減少には、負荷レベルおよび腐食時間が影響を及ぼしている。腐食断面積に対する破断強度は、空气中強度より 3~9% の低下となる。しかし、腐食断面積を考慮した耐力および弾性係数は、SC 3 と SC 4 の場合、ST 材の値に近づいている。

以上の結果から、自然腐食による強度低下は、断面減少が主要な要因であるといえる。断面減少を考慮してもなお空气中より強度低下が見られるのは、負荷が強度劣化に及ぼした影響と考えられる。

(2) 破断伸び

海水浸漬材の伸び<sup>6)</sup>は、6 か月までの浸漬が著しく低下し、それ以上浸漬してもほとんど低下していない。しかし、応力腐食材の伸びは、表-3 によると、負荷が大きく腐食時間が長いほど低下している。また、低ひずみ速度試験<sup>7)</sup>からも、ひずみ速度 ( $2 \times 10^{-5} \sim 2.8 \times 10^{-6} S^{-1}$ ) の低下にともなって、伸びの低下が見られた。

これらの結果から、伸びの低下は、孔食数の増加とその成長割合による表面あらさが影響しているものとみられる。すなわち、無負荷では、孔食の成長が一定期間で抑制されるが、負荷が作用している場合は、腐食時間と

ともに孔食の数と深さが成長し続ける。結局、孔食の成長が、靱性および破断強度を低下させることになる。

(3) 応力腐食試験中の伸び

応力腐食試験中に生じた伸びの挙動から、前述の破断伸びおよび破断強度の低下について検討する。標点距離  $L$  における計測長さ  $l$  の伸びひずみを (1) 式の対数ひずみ  $\varepsilon$  で表し、試験中の経時変化を図-3 に示す。

$$\varepsilon = \ln(l/L) \dots\dots\dots (1)$$

塑性ひずみは、(1) 式から負荷による弾性ひずみを減じたものとする。 $\varepsilon_{PS1}$  を応力腐食試験開始時に生じた塑性ひずみ、 $\varepsilon_{PS2}$  を試験中止時の塑性ひずみとすると、試験中に生じた塑性ひずみは、 $\Delta\varepsilon_{PS} = \varepsilon_{PS2} - \varepsilon_{PS1}$  となる。 $\varepsilon_{pr}$  は、残存強度試験における  $\delta_f$  の塑性ひずみ分である。これらの値を表-5 に示す。

SC 2 と SC 1 の伸びひずみは、負荷当初に大きく生じ、経時により著しく増加した。 $\Delta\varepsilon_{PS}$  が負荷レベルと逆であるのは、 $\varepsilon_{PS1}$  の相違、すなわち試験開始時におけるひずみ硬化の相違が要因とみられる。両者の破断荷重の低下要因は、負荷が耐力に近い場合  $\varepsilon_{PS2}$  が大きく、腐食よりクリープの影響が大きいとみられる。

SC 4 と SC 3 の伸びひずみの増加は、両者とも  $t=3200$  から生じているが、SC 4 のひずみ増分は直線的で大きく、SC 3 のそれは小さい。また、両者の  $\Delta\varepsilon_{PS}$  は、 $\varepsilon_{PS1}=0$  であるから、腐食による断面減少によるものと考えられる。したがって、SC 4 は、負荷が大きいため  $\Delta\varepsilon_{PS}$  が大きく生じ、このことが孔食の成長を助長し、 $\varepsilon_{pr}$  および破断荷重を低下させたと推定される。

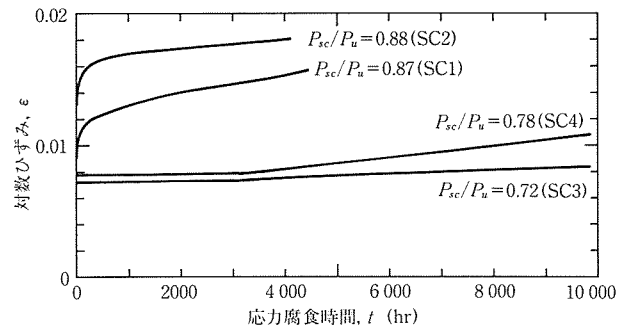


図-3 伸びひずみの経時変化

表-5 応力腐食試験の塑性ひずみ

	$P_{sc}/P_u$	$\varepsilon_{PS1}$	$\Delta\varepsilon_{PS}$	$\varepsilon_{PS2}$	$\varepsilon_{pr}$
SC 2	0.88	0.0044	0.0043	0.0087	0.0174
SC 1	0.87	0.0005	0.0061	0.0066	0.0166
SC 4	0.78	0.0000	0.0016	0.0016	0.0023
SC 3	0.72	0.0000	0.0001	0.0001	0.0117

4.1.2 自然腐食状態下の腐食速度

応力腐食による断面減少は、主に側線に生じた。それぞれの側線断面は、均一に減少したと仮定する。 $t$  時間

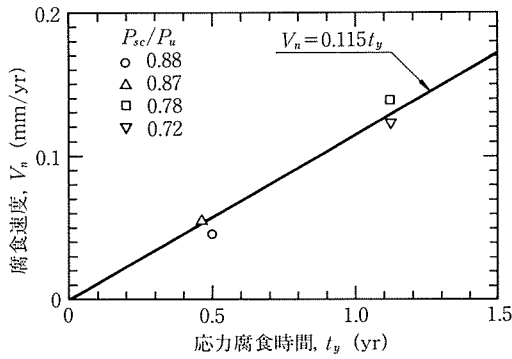


図-4 自然腐食状態下の腐食速度

後の側線腐食直径  $d_{sc}$  を6本の平均値から求め、 $\rho$  を密度、 $d_{so}$  を処女材の側線直径とする。自然腐食状態下における側線の腐食速度  $V_n$  ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ ) は、(2)式から求められる。

$$V_n = \rho d_{so} \{1 - (d_{sc}/d_{so})^2\} / (4t) \dots\dots\dots (2)$$

腐食速度  $V_y$  ( $\text{mm}/\text{yr}$ ) と腐食時間  $t_y$  ( $\text{yr}$ ) との関係は、 $\rho = 7.853 \times 10^6 \text{ g}/\text{m}^3$  から、 $V_y = 1.115 V_n$  となる。したがって、(2)式の腐食速度は、図-4に示すように、(3)式の比例関係で表される。

$$V_y = 0.115 t_y \dots\dots\dots (3)$$

海水による炭素鋼の腐食速度<sup>8)</sup>は、初期が0.2 mm/yr、数年経過時が0.1 mm/yr程度といわれている。(3)式の腐食速度は、1年で0.12 mmとなり、炭素鋼より遅いといえる。なお、図-3で見られたように、 $\Delta E_{ps}$ は3200時間から増加しており、この時間から断面減少が生じたとすると、SC 2, SC 1, SC 4およびSC 3の腐食速度は、それぞれ0.25, 0.16, 0.21および0.18 mm/yrとなり、その平均値は0.2 mm/yrである。したがって、(3)式の腐食速度が時間に比例しているのは、ブルーイングによる酸化皮膜が孔食の発生を抑制しているためと考えられる。また、(3)式はストランドのごく初期の腐食速度を与えるものであり、4.5か月後(3200時間)には皮膜が破壊され、腐食速度が0.2 mm/yrとなるものと推定される。なお、負荷応力が腐食速度に及ぼす影響は、実験範囲ではほとんど見られなかった。

4.2 アノード分極下の応力腐食

腐食は、電気化学反応によって浸食される現象である。ストランドは、アノード反応によって溶解し、負荷応力の作用のため破断する。以下、ストランドおよびモルタル被覆ストランドにおける破断時間、断面減少、応力腐食割れおよび腐食速度について検討する。

4.2.1 ストランドの応力腐食

(1) ストランドの破断時間

ストランドの破断時間  $t_f$  (hr) は、素線7本のうち1本が最初に破断したとき(初断線)とする。初断線の発生は側線に生じ、そのとき試験を中止した。電極電位  $\phi$

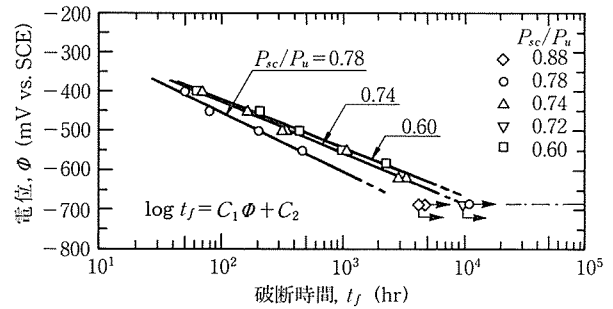


図-5 破断時間に及ぼす電位の影響

表-6 破断時間の実験定数

$P_{sc}/P_u$	$C_1$	$C_2$
0.78	-0.00674	-1.06
0.74	-0.00776	-1.31
0.60	-0.00831	-1.51
*0.50	-0.0085	-1.56

\* 推定値

と  $t_f$  との関係は、図-5に見られるように、負荷レベルごとに(4)式の直線で表すことができる。

$$\log t_f = C_1 \phi + C_2 \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $C_1$  および  $C_2$  は、表-6に示す実験定数である。 $P_{sc}/P_u = 0.5$ の定数は、外挿して得た推定値である。

$\phi$  と  $t_f$  が直線関係を示すことは、アノード分極曲線の電位と腐食電流密度とが実験範囲でほぼ直線であることによる。破断時間は、いずれの負荷レベルにおいても貴電位ほど短い。なお、前述の自然腐食状態の実験点SC 1~SC 4は、 $E_{corr} = -688 \text{ mV}$ としてプロットすると、 $\phi - t_f$ 直線を外挿した時間となっても破断していない。これは、電位を制御しているかないかの相違が皮膜の破壊に影響を及ぼしていると考えられる。

負荷レベルが破断時間に及ぼす影響を図-6に示す。実線は、(4)式から得られる  $t_f$  を示す。破断時間は、いずれの電位においても、 $P_{sc}/P_u > 0.7$  のとき著しく短寿命となる傾向がある。逆に、 $P_{sc}/P_u \leq 0.7$  では、破断時間の負荷依存性が小さい。すなわち、後述で示すように、腐食速度の負荷依存性が小さいことおよび直径減少の自乗が断面積となることから、低負荷でも破断時間の

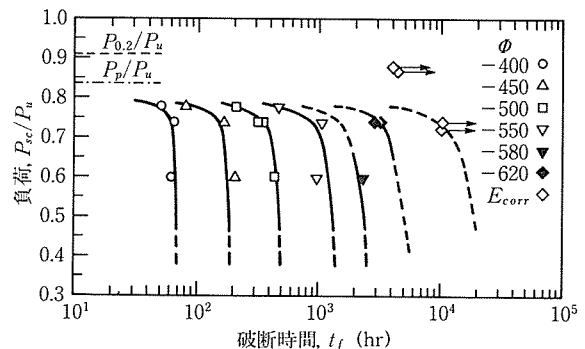


図-6 破断時間に及ぼす負荷の影響

向上は期待できない。

(2) 素線の断面減少

初断線発生時点での素線直径を測定した。素線の腐食直径は、必ずしも同心円となっていないが、取扱いを容易にするため、円形と仮定する。側線の腐食直径  $d_{sc}$  は、破断部の絞り箇所を除いた側線腐食直径の平均値を示す。以下、心線の腐食直径を  $d_{cc}$ 、処女材の側線直径を  $d_{s0}$ 、心線直径を  $d_{c0}$  とし、応力腐食材の腐食直径を処女材との比  $d_{sc}/d_{s0}$ 、 $d_{cc}/d_{c0}$  で表す。

電位が側線の直径減少に及ぼす影響を、浸漬深さととの関係で図-7 ( $P_{sc}/P_u=0.6$  の場合) に示す。いずれの電位においても、対極付近の溶解が著しい。液面での溶解が際だっているのは、空気中からも酸素が供給されるためと考えられる。初断線は、最小断面近傍に生じており、貴電位で短寿命、卑電位で長寿命となる。これは、局部腐食または均一腐食となるかの相違による。

負荷が直径減少に及ぼす影響を 図-8 ( $\phi=-450$  mV の場合) に示す。電位が貴であるため局部腐食を呈しており、局部腐食の成長は、腐食時間に対応している。しかし、直径の減少度合は、負荷レベルとは逆である。

心線および側線の直径減少を 図-9 で比較する。心線は、対極付近でわずかに減少しているに過ぎず、電位および腐食時間の影響が小さい。この傾向は、他の負荷レベルにおいても同様であった。初断線が側線に生じたのは、両者の腐食断面が著しく異なることに起因している。この断面減少の相違は、心線を取り巻く側線が腐食電流および酸素の供給を制限し、シールド効果をもたらしていると考えられる。

以上の溶解現象は、対極配置と密接な関係にあると推定される。同一の負荷および電位における対極配置の異なる試験結果を 図-10 に示す。対極を腐食槽下部に局部的に設置した場合は、対極近傍が著しく溶解した。対極を腐食槽に沿って設置した場合は、浸漬部全体がほぼ均一に溶解した。破断時間は、前述と同様、局部腐食であれば短く、均一腐食であれば長くなっている。さらに、最小腐食直径は、同負荷であるため、ほぼ同様な値である。このような溶解の相違は、腐食電流密度の分布が異なるためであり、コンクリートのひびわれ部で腐食が著しくなることを示唆している。

(3) 素線の残存強度

初断線の発生しなかった側線について、引張試験による残存強度を求めた。一部の素線は、焼鈍(真空中 200 °C, 54 hr)を行っている。破断は、いずれの素線も最小断面近傍で生じた。なお、処女材の公称破断荷重および応力は、心線が  $P_{cu}=3\,045$  kgf,  $S_{cu}=201.2$  kgf/mm<sup>2</sup>、側線が  $P_{su}=2\,845$  kgf,  $S_{su}=204.4$  kgf/mm<sup>2</sup> であり、処女材の焼鈍側線は、 $P_{su}=2\,798$  kgf,  $S_{su}=201.0$  kgf/

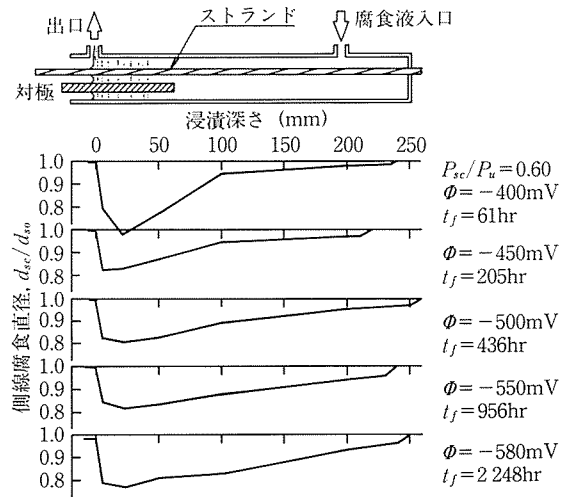


図-7 側線の直径減少に及ぼす電位の影響

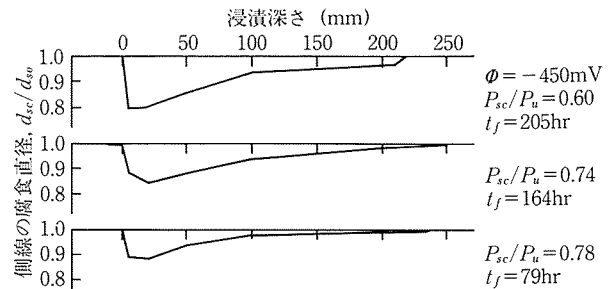


図-8 側線の直径減少に及ぼす負荷の影響

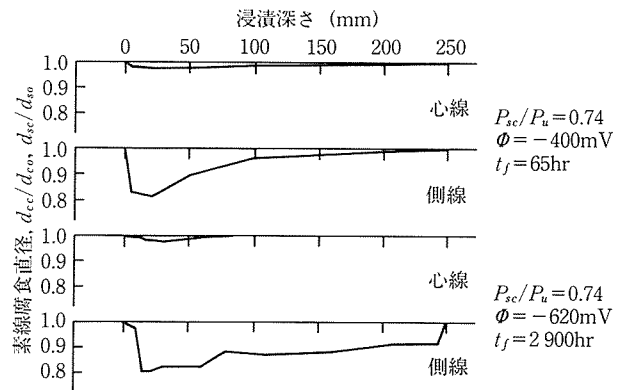


図-9 心線と側線の直径減少の比較

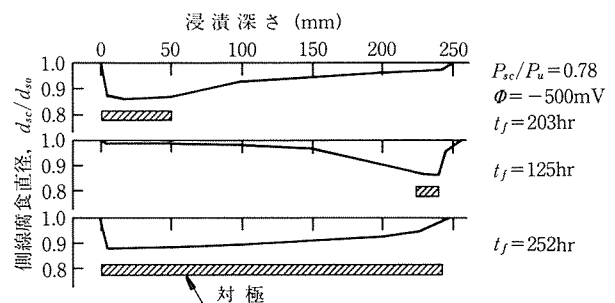


図-10 対極配置が直径減少に及ぼす影響

mm<sup>2</sup>である。

心線および側線について、応力腐食材と処女材との破断荷重比を  $P_{cr}/P_{cu}$ ,  $P_{sr}/P_{su}$  断面積比を  $A_{cc}/A_{co}$ ,  $A_{sc}/A_{so}$ , 破断応力比を  $S_{cr}/S_{co}$ ,  $S_{sr}/S_{so}$  とする。これらの関係は、心線が (5) 式で、側線が (6) 式で表される。

$$S_{cr}/S_{co} = (P_{cr}/P_{cu}) / (A_{cc}/A_{co}) \\ = (P_{cr}/A_{cc}) / (P_{cu}/A_{co}) \dots\dots\dots (5)$$

$$S_{sr}/S_{so} = (P_{sr}/P_{su}) / (A_{sc}/A_{so}) \dots\dots\dots (6)$$

破断荷重比と断面積比との関係を、図-11に示す。等価線は、 $S_{cr}/S_{co}=1$ ,  $S_{sr}/S_{so}=1$  のときであり、応力腐食材と処女材の破断応力が等しいことを示す。心線は、断面積が10%程度減少したのもも見られるが、破断応力の低下がほとんど見られない。側線は、断面積がほぼ55~85%の範囲に低下した。さらに、 $A_{sc}/A_{so}=0.7\sim0.8$  のとき  $P_{sr}/P_{su}$  が等価線よりやや低下しているの、応力腐食による破断応力の低下が認められる。

応力腐食時間が破断応力に及ぼす影響を図-12に示す。心線の破断応力は、長時間の応力腐食に対して、低下していない。側線の破断応力は、 $t=300$  のとき、処女材の90%以下に低下しているものが見られる。しかし、

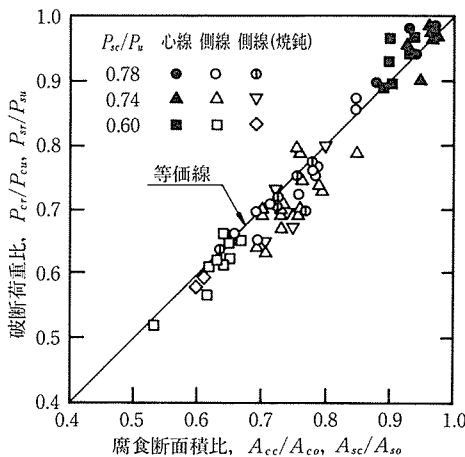


図-11 素線の破断荷重と断面積との関係

$t=500\sim3\,500$  での破断応力は、処女材のほぼ92%である。なお、絞りは、処女材とほとんど変わらず、焼鈍材もばらつきの範囲内にあった。

一方、初断線が発生するまでに生じた試験中の塑性ひずみ  $\Delta\varepsilon_{PS}$  と破断時間との関係は、図-13となる。 $\Delta\varepsilon_{PS}$  は、負荷が大きく、腐食時間が長いほど大きくなっている。 $\Delta\varepsilon_{PS}$  の時間依存性は、均一腐食による断面減少のためである。しかし、200時間以内に破断する場合の  $\Delta\varepsilon_{PS}$  は、局部腐食のためほぼ同一な値を示している。なお、試験中に腐食生成物を時々除去したストランドは、 $\Delta\varepsilon_{PS}$  がやや大きく、破断時間が(4)式より短寿命となった。

これらの結果から、短時間での破断は、局部腐食により見かけ上の塑性ひずみが試験中ほとんど生ぜず、局部腐食が切欠きとなり破断応力を低下させるとみられる。逆に、長時間での破断は、均一腐食により塑性ひずみが試験中に大きく生じ、長時間にわたる孔食の成長が強度を低下させると見られる。さらに、素線の引張試験は、より加工のねじれが存在したままの状態で行っており、ねじれが破断箇所にも集中することも強度低下の一因である。

(4) 側線の応力腐食割れ

初断線の発生した側線について、破断箇所の伸線方向断面を顕微鏡観察した。電位が-450または-400 mV のとき、結晶粒内および粒界に微細な亀裂が観察され

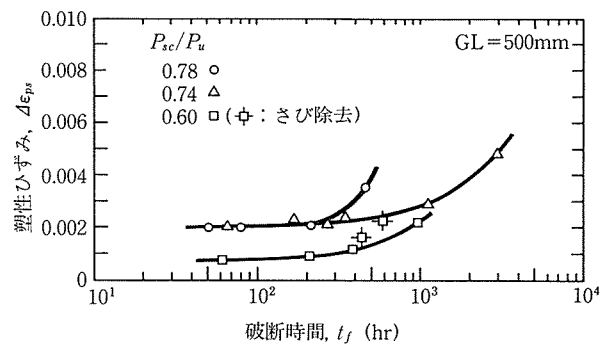


図-13 応力腐食試験中の塑性ひずみ

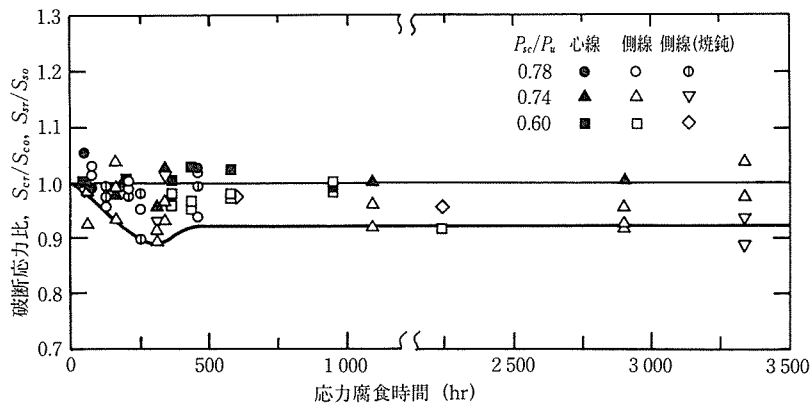
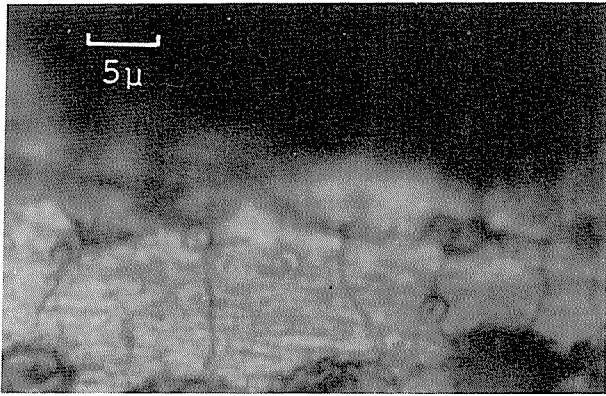
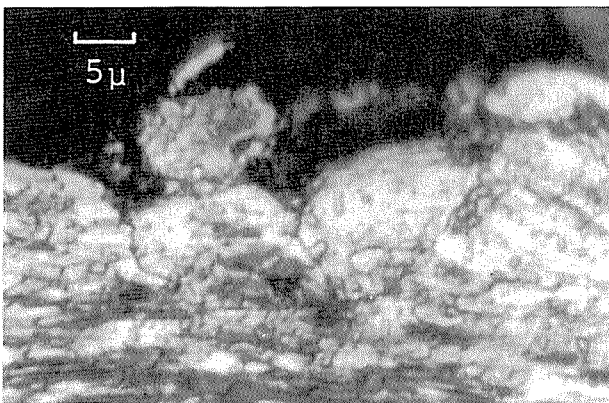


図-12 素線の破断応力と応力腐食時間との関係



(a)  $P_{sc}/P_u=0.60$ ,  $\phi=-400$  mV,  $t_f=61$  hr



(b)  $P_{sc}/P_u=0.78$ ,  $\phi=-450$  mV,  $t_f=79$  hr

写真-1 アノード分極下の応力腐食割れ

た。写真-1 (a), (b) に負荷および電位が異なる側線表層部の亀裂を示す。同様な亀裂は、後述の分極電位  $-400$  mV のひびわれ部直下の破断側線にも観察された。これらの亀裂は、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、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。

また、電位が  $-450$  または  $-400$  mV のときは、破断時間に対して  $\Delta \epsilon_{ps}$  が変わらず、局部腐食に生じた亀裂が破断応力を低下させたと考えられる。しかし、亀裂は、深さがきわめて浅いため、絞りには影響を及ぼさなかったものと見られる。

#### 4.2.2 モルタル被覆ストランドの応力腐食

##### (1) ひびわれ幅と破断時間の関係

モルタル被覆ストランドは、数個のひびわれが存在するとき、最大ひびわれ幅の位置で破断した<sup>9)</sup>。破断位置でのひびわれ幅  $W_{cr}$  と  $t_f$  との関係を図-14 に示す。被覆モルタルは、ストランドの破断寿命を向上させる効果がある。破断時間は、 $W_{cr} \geq 2$  mm のとき、ひびわれ幅の影響が小さく、 $W_{cr} < 2$  mm のとき、ひびわれ幅が狭くなるにしたがって著しく向上する。狭いひびわれ幅が破断寿命を向上させるのは、試験液がひびわれ内部に十分循環されず、溶存酸素の供給が抑制されるためである。

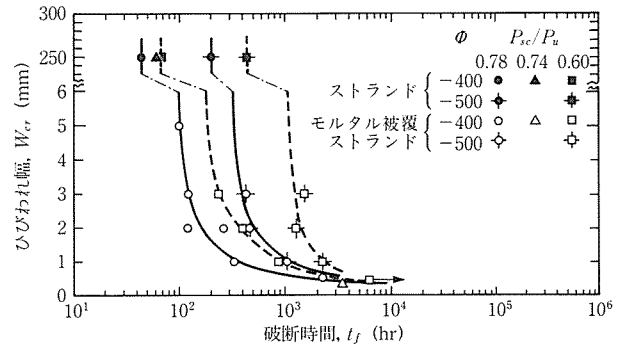


図-14 ひびわれ幅と破断時間との関係

また、 $t_f$  は、 $P_{sc}$  および  $\phi$  にも依存している。 $t_f$  の  $P_{sc}$  および  $\phi$  への依存性は、ストランドのみの場合と同様、同電位では負荷が小さいほど、同負荷では電位の低いほど長寿命である。

##### (2) ひびわれ部の断面減少

モルタル被覆ストランドは、心線と側線の隙間にモルタルが充填されていることもあり、ひびわれ部の側線のみで断面減少が生じた。なお、腐食は、ひびわれの存在しない箇所での側線付着部には発生していない。

図-15 にひびわれ部の断面形状を示す。伸線方向の腐食断面は、半楕円形に減少した。腐食長さを  $l_{co}$ 、腐食深さを  $d_p$  とする。 $l_{co}$  は、 $W_{cr} < 1$  mm のとき  $40$  mm に成長するものも見られたが、 $W_{cr} \geq 1$  mm のとき  $10 \pm 4$  mm と局所的であった<sup>9)</sup>。このことは、狭いひびわれ幅では、腐食が付着面に沿って進行し、破断に長時間を要するが、広いひびわれ幅では、腐食が直径減少を助長させ、短時間に破断することを示している。

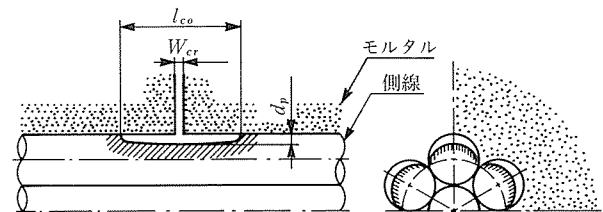


図-15 ひびわれ部側線の腐食断面

#### 4.2.3 アノード分極下の腐食速度

##### (1) 素線の腐食速度

側線のアノード分極曲線から腐食速度を求め、電位との関係を図-16 に示す。なお、ストランドから切断したままの側線は無処理材、#400 のエメリー紙で研磨した側線を研磨材と呼ぶ。

側線の腐食速度は、無処理材が研磨材より遅く、電位が自然電極電位に近づくと著しくその傾向が著しくなった。しかし、貴電位  $-450 \sim -400$  mV では、両者の腐食速度が近似してくる。自然電極電位  $E_{corr}$  は、研磨材が  $-688$  mV、無処理材が  $-610$  mV 程度であっ

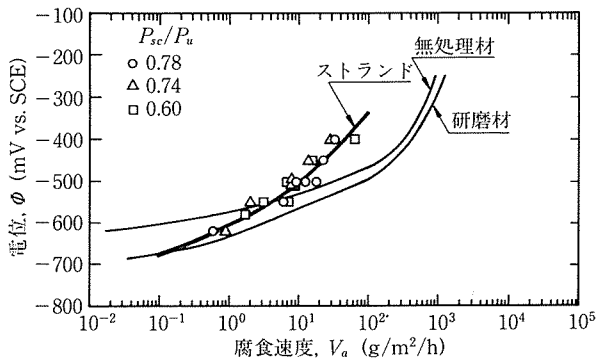


図-16 側線およびストランドの腐食速度

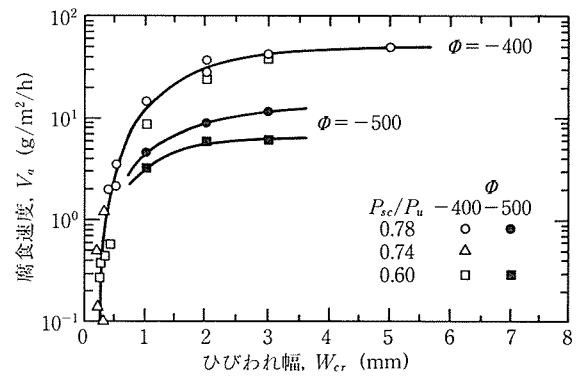


図-17 ひびわれ幅が腐食速度に及ぼす影響

た。なお、無処理材の自然電極電位が研磨材のそれに達するには、ほぼ150時間を要した。これら腐食速度の相違は、表面に存在する皮膜の有無が影響を及ぼしている。

(2) ストランドの腐食速度

ストランドは、側線が著しく断面減少することから、その最小断面が最大腐食速度を与えることになる。各側線の最小腐食直径の平均値を  $d_{sc}$  とする。アノード分極下におけるストランドの腐食速度  $V_a$  ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ ) は、(2)式から求めた。

$V_a$  と  $\phi$  との関係を、図-16に示す。負荷レベルが  $V_a$  に及ぼす影響は、ばらつきの範囲にあり、ほとんどないと言える。 $V_a$  を分極曲線から求めた腐食速度と比較すると、ストランドは、 $\phi = -550$  のとき無処理材とほぼ等しく、 $\phi < -550$  のとき無処理材と研磨材の間、自然電極電位のとき研磨材に近くなった。また、ストランドの腐食速度は、貴電位ほど分極曲線からの腐食速度より遅くなっている。貴電位で腐食速度が遅いのは、腐食速度の計算に側線の平均値を用いたことにもよる。実際には、初断線発生箇所の腐食速度は、貴電位で局部腐食となるから、無処理材の腐食速度に近くなるものと考えられる。なお、応力腐食試験中の腐食電流から求めた反応重量を用い、浸漬部のストランドが均一に腐食すると仮定した腐食速度<sup>7),9)</sup>は、貴電位のとき、図-16の腐食速度よりさらに遅くなった。しかし、自然電極電位に近い電位での腐食速度は、均一腐食となるため、ほとんど変わらなかった。

海水中では、自然電極電位の状態にある。図-16の腐食速度を外挿して得られる腐食速度は、 $\phi = -650$  のとき  $V_a = 0.2 \text{ g}/\text{m}^2/\text{h}$  ( $0.22 \text{ mm}/\text{yr}$ )、 $-690 \text{ mV}$  のとき  $V_a = 0.1 \text{ g}/\text{m}^2/\text{h}$  ( $0.11 \text{ mm}/\text{yr}$ ) となる。これらの腐食速度は、前者が鋼材の初期腐食速度、後者が(3)式から求められるストランドの自然腐食状態1年後の腐食速度と一致している。

(3) ひびわれ幅が腐食速度に及ぼす影響

ひびわれ部の腐食断面は、図-15に示したように、付

着面または直径方向に減少する。腐食速度の計算に、直径方向の断面減少、すなわち  $d_p$  を採れば、初断線の発生に寄与する最大腐食速度が得られる。したがって、ひびわれ部の腐食速度は、(7)式から求めた。なお、 $d_p$  は、各側線の平均値を用いた。

$$V_a = \rho d_p / t \dots\dots\dots (7)$$

ひびわれ幅と腐食速度との関係を図-17に示す。腐食速度は、ひびわれ幅、負荷および電位に依存している。 $\phi = -400$  の腐食速度は、 $W_{cr} > 3 \text{ mm}$  のときほぼ一定値を与えるが、 $W_{cr} \leq 3$  のときひびわれ幅の減少にともない著しく低下する。また、 $W_{cr} \geq 5$  では、 $V_a = 50 \text{ g}/\text{m}^2/\text{h}$  となり、図-16のストランドのみの腐食速度と一致する。したがって、 $W_{cr} \geq 5$  では、腐食速度を低下させるモルタルの被覆効果がなくなる。

腐食速度の電位依存性は、ひびわれ幅1mm以上のとき大きい。しかし、ひびわれ幅が狭くなるにしたがって、電位の影響は小さくなる傾向がある。

腐食速度の負荷依存性は、 $\phi = -400$  ではほとんど見られない。しかし、 $\phi = -500$  では、負荷の低いほど腐食速度の低下が見られるが、ひびわれ幅が狭くなるにしたがって、負荷の影響は小さくなる傾向がある。

以上の結果から、腐食速度は、ひびわれ幅に大きく依存するが、ひびわれ幅の狭いときは、腐食速度の電位および負荷依存性が小さいと推定される。図-17から外挿される腐食速度は、 $W_{cr} = 0.25 \sim 0.3 \text{ mm}$  のとき、 $V_a = 0.1 \sim 0.2 \text{ g}/\text{m}^2/\text{h}$  ( $0.11 \sim 0.22 \text{ mm}/\text{yr}$ ) を与える。この腐食速度は、ストランドのみの腐食速度から推定される自然電極電位での腐食速度と一致している。

5. 結 論

3% NaCl水溶液におけるPC鋼より線の応力腐食試験から、応力腐食における断面減少、強度低下および腐食速度等の検討を行い、次の結論が得られた。

- 1) 自然腐食状態下では、均一腐食が生じる。応力腐食材の強度は、負荷の影響が生じるが、腐食断面で



評価すると強度低下は小さい。破断伸びの低下は、負荷が大きく腐食時間が長いほど著しく、強度低下の一因となる。

- 2) アノード分極下におけるストランドの破断時間は、電位および負荷に依存する。破断時間は、貴電位で短寿命、卑電位で長寿命となる。この相違は、局部腐食となるか均一腐食となるかに起因している。負荷が引張強度の70%を超えると著しく短寿命となるが、70%以下では破断時間に及ぼす負荷の影響は小さい。
- 3) 側線の強度は、局部腐食となる貴電位で10%、均一腐食となる卑電位で8%低下する。
- 4) 電位が $-450\sim-400$  mV のとき、局部腐食箇所に活性径路腐食の応力腐食割れを生じ、強度低下の一因となる。
- 5) 自然腐食状態での初期腐食速度は、皮膜があるため時間に比例する。1年程度の腐食速度は、 $0.115$  mm/yr である。しかし、皮膜は4.5か月後に破壊され、皮膜破壊後の腐食速度は、 $0.2$  mm/yr となる。
- 6) スtrandの腐食速度は、負荷荷重に依存しないが、貴電位となるにしたがって早くなる。アノード分極電位が自然電極電位に近いときの腐食速度は、自然腐食状態の1年後の腐食速度に相当する。
- 7) モルタル被覆strandは、ひびわれ部の側線に局部腐食が生ずる。ひびわれ部の腐食速度は、ひびわれ幅、電位および負荷に依存する。ひびわれ幅が狭くなると、腐食速度は著しく低下するが、腐食速度の電位および負荷依存性は小さくなる。ひびわれ幅 $0.25\sim 0.3$  mmの腐食速度は、 $0.11\sim 0.22$  mm/yr と推定される。

#### 参 考 文 献

- 1) 下村 亘, 久松光世, 林下 敦: 草創期におけるPC鉄道橋(光弦橋)の性状調査について, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, プレストレストコンクリート技術協会, 平成2年11月, pp. 203-208
- 2) ELICES M.: Durability of prestressing steel: A report of the third symposium on stress corrosion cracking, Proc. 9th Congress Fed. Int. Precontrainte, 1982, Vol. 3, pp. 74-81.
- 3) Bernd Isecke and Wolfgang Stichel: Corrosion Failures in Steel Reinforced and Prestressed Concrete Structures, Structural Failure, Product Liability and Technical Insurance, H.P. Rossmannith (editor), Elsevier Science, 1984, pp. 107-113.
- 4) FIP technical report: Report on Prestressing Steel: 5. Stress corrosion cracking resistance tests for prestressing tendons, Sep. 1980.
- 5) 富岡敬之, 甘田 勉: PC鋼線の応力腐食に関する二, 三の実験, 第8回研究発表会講演概要, プレストレストコンクリート技術協会, 1968年2月, pp. 3-4
- 6) 倉内 実: PC鋼材の腐食, コンクリート工学, Vol. 25, No. 7, July 1987, pp. 32-36
- 7) 小林佑規, 田中義久: 3%食塩水中におけるPC鋼より線の応力腐食割れ試験, 第29回研究発表会講演概要, プレストレストコンクリート技術協会, 1988年11月, pp. 45-48
- 8) 腐食防食協会: 金属の腐食・防食Q&A-コロージョン110番, 丸善, 昭和63年12月, p. 11
- 9) 小林佑規, 田中義久: 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, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, プレストレストコンクリート技術協会, 平成2年10月, pp. 33-38

【1991年3月19日受付】

---

#### ◀刊行物案内▶

### 日本原子力敦賀2号機PCCV

本書は、プレストレストコンクリート第28巻の特別号として発刊されたもので、我が国で初めて採用されたプレストレストコンクリート製原子炉格納容器(日本原子力発電(株)敦賀発電所2号機)に関して、その各種模型実験、設計・施工に至る各分野にわたり詳述した貴重な資料です。

体 裁: B5判 128頁  
定 価: 3000円(送料: 150円)