

(106) 15年間海水暴露されたPCはり中のアンボンドPC鋼棒の性質

高周波熱錬(株) 製品事業部

○池上由洋

同 上 正会員 新田 一

同 上 正会員 山下英治

1. はじめに

グラウトを必要としないアンボンド工法は省力化と経済性の点から有利なポストテンション工法であり、同工法に用いられるアンボンドPC鋼材には防錆材の種類とその塗布方法によっていくつかのタイプがある。そのひとつとして表面にアスファルト系防錆材を塗布し、これに保護テープを巻き付けた塗布形アンボンドPC鋼棒は昭和32年にPCまくらぎ用として製造され、以来橋梁やボックスカルバートなどに幅広く使用されている。最近では同鋼棒の外周をさらにポリエチレンで被覆保護し、PC鋼棒の防錆に対する信頼性をなお一層高めるような品質改善も進んでいる。

しかしながら、こうしたアンボンドPC鋼棒の防錆能力や耐久性の評価は実験室的な促進試験によって得られる場合が多く、実際のPC部材中に配筋し、かつ自然環境下で長期間にわたりそれらを調査した報告は少ない。そこで、本実験は塗布形アンボンドPC鋼棒を用いたPCはりを作製し、干満のある海水中に15年間自然暴露した後、同はりの曲げ試験とPC鋼棒の腐食状況および機械的性質を確認して、苛酷な使用状況におけるアンボンドPC鋼棒の防錆能力と耐久性を調査した。それらの結果を以下に報告する。

2. 実験概要

2.1 塗布形アンボンドPC鋼棒

本実験に用いたアンボンドPC鋼棒の概要は図-1に示すようにPC鋼棒の表面に防錆材を塗布し、その上に保護テープを巻き付けたものである。PC鋼棒はJIS G 3109(試験開始時; 現JIS G 3137)に規定するD種1号に相当する丸棒13mmで機械的性質を表-1に示す。その特徴は低炭素合金鋼の熱間圧延線材に引抜加工を加えた後、高周波誘導加熱による熱処理を施して所定の品質を与えるため均質微細な金属組織や高い弾性限を持っていることである。これにより、優れた靱性やリラクセーション特性をもっている。

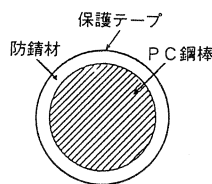


図-1 塗布形アンボンドPC鋼棒

表-1. PC鋼棒の機械的性質

	呼び名	耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
規格値	13mm	1275 以上	1420 以上	5 以上
実測値	-	1338	1442	9

表-2. 防錆材の品質基準

試験項目	試験方法	判定基準
針入度	JIS K 2207	25°Cで75~130
軟化点	JIS K 2207	130°C以上
引火点	JIS K 2265	200°C以上
流下試験	JIS K 2246	80°C 24時間以上
フラース破壊点	JIS K 2207	-30°C以下
低温付着性	JIS K 2246	-17.5°C 1時間以上
塩水噴霧試験	JIS K 2246	5% NaCl溶液を35°Cの温度のもとで噴霧したときの発錆時間が24日以上
加熱鋼板腐食試験	JIS K 2220	100°C 24時間試験で著しい変色や錆がおこらないこと

防錆材はストレートアスファルトに樹脂、粘性調整剤、酸化防止剤等が配合されアンボンド工法に適した特性を有している。防錆材の品質基準を表-2に示す。

2.2 PCはり供試体

暴露試験に用いたPCはり供試体は図-2に示す形状・寸法とし、2.1に示したアンボンドPC鋼

棒を偏心距離3cmの位置に直線配置し、コンクリート打設後蒸気養生を行い所定のコンクリート強度が発現した後、規格耐力の70%（118kN）相当の緊張力を導入した。その後、両端の定着体を防錆するために保護コンクリートで覆い、打ち継ぎ部分表面には硬化樹脂を塗布した。なお、コンクリートの設計基準強度は400kgf/cm<sup>2</sup>とし、強度確認のための円柱供試体(φ10×20cm)もPCはりと同様に作製した。本実験に使用したコンクリートの示方配合を表-3に示す。

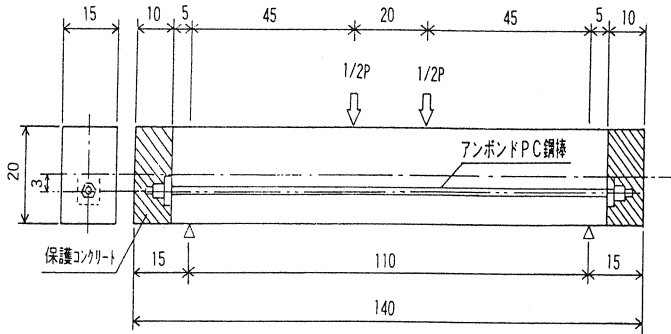


図-2：PCはりの寸法及び載荷方法（単位：cm）

表-3. コンクリートの示方配合

		kg/m <sup>3</sup>
単 位 量	水	150
	セメント	450
	細骨材	742
	粗骨材	1092

### 2. 3 暴露条件および試験項目

作製されたPCはり供試体と円柱供試体の半数は、干満のある海水中に暴露するため兵庫県赤穂市坂越海岸の潮の干満に曝される位置に設置した。他半数は比較として高周波熱錬(熱)赤穂工場内に大気暴露した。

海水中暴露試験中の状況を写真-1に示す。

各供試体に対する試験は、暴露開始から28日、半年、1年、2年および15年目において次の項目を実施した。

- 1) 円柱供試体の圧縮および引張試験
- 2) PCはり供試体の曲げ試験
- 3) コンクリート中性化試験および塩分分析
- 4) 定着部を含むPC鋼棒の腐食状況観察
- 5) PC鋼棒母材部およびねじ部の引張試験
- 6) 防錆材の分析



写真-1 海水中暴露試験中の状況

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 コンクリートの力学特性とPCはりの曲げ特性

各暴露期間での円柱供試体の圧縮および引張試験から求めたコンクリートの力学特性と、図-2に示した載荷方法による曲げ試験から求めたPCはりの曲げ特性を表-4に示す。

表-4 供試体PCはりの曲げ特性

( $\bar{x}$ :n=2)

暴露期間	暴露条件	コンクリート		ひび割れ発生時			破壊時	
		圧縮強度 kgf/cm <sup>2</sup>	ヤング率 ×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	ひび割れ曲げ モーメント (t・m)	有効プレスト レスト力 値 (tons)	ひび割れ時の 中央たわみ量 (mm)	破壊曲げ モーメント (t・m)	破壊時の 中央たわみ量 (mm)
28日	大気中	443	3.01	1.215	11.026	0.85	1.874	10.22
6か月	海水中	441	3.61	1.238	9.285	0.66	2.154	8.70
	大気中	453	3.37	1.266	10.438	0.65	2.154	9.48
1年	海水中	495	3.84	1.350	10.816	0.68	2.198	10.26
	大気中	436	3.40	1.406	14.235	0.76	2.087	9.90
2年	海水中	507	3.86	1.310	8.666	0.45	2.184	9.45
	大気中	437	3.40	1.408	13.240	0.66	2.074	11.38
15年	海水中	655	3.44	1.524	13.019	0.95	2.447	10.58
	大気中	617	3.79	1.547	13.374	0.85	2.290	9.10

表-4からわかるように、コンクリートの圧縮および引張強度は材令期間に比例して増加しており、海水中暴露の方が比較的早期に強度の増加がみられた。また、PCはりの曲げ特性は暴露期間15年においてもひび割れおよび破壊曲げモーメントの値が海水中、大気中ともに試験開始時と同等であった。

これから長期にわたる苛酷な環境中においても、供試体を構成するコンクリートとアンボンドPC鋼棒の品質や機能の低下がなかったことが曲げ特性値の良好な維持につながったと考えられる。

### 3.2 コンクリートの中性化試験および塩分分析結果

暴露期間15年におけるPCはり曲げ試験後の供試体コンクリートに対して、フェノールフタレイン溶液による中性化試験を実施した。その結果、海水中の供試体では表面から最大深さ2mm程度の中性化が認められた。但し、海水中および大気中ともPC鋼棒近傍のコンクリートにおいてはすべて中性化は認められなかった。また、破碎後の各供試体コンクリート中の塩素イオン(Cl<sup>-</sup>)量をイオンクロマトグラフィー法により測定し、コンクリート単位容積質量に対するCl<sup>-</sup>量を求めた。結果を表-5に示すが海水中暴露では建設省通達のポステンにおける塩分総量規制許容値に対して約8倍の値を示した。

表-5 供試体コンクリート中のCl<sup>-</sup>量と単位容積質量に対するCl<sup>-</sup>量

暴露条件	コンクリート中のCl <sup>-</sup> 量	単位容積質量に対するCl <sup>-</sup> 量	塩分総量規制値
海水中暴露	0.203 wt%	表-3より 2412 × 0.203 % = 4.90 kg/m <sup>3</sup> (塩分総量規制値の約8倍)	ポステンの場合 0.6 kg/m <sup>3</sup> 以下
大気中暴露	検出されず		

### 3.3 PC鋼棒の発錆状況観察結果

暴露期間15年の曲げ試験を行った各供試体より取り出したPC鋼棒に対し、定着部と防錆材を除去

した母材部表面の発錆状況を観察した。定着部の外観状況を写真-2に示すが、鋼棒のねじ部余長、定着ナットおよびアンカープレートの表面は海水中暴露の場合、全面に発錆が認められた。

これは元来の苛酷な環境に加え暴露期間中に波動等の影響を受け、定着部の保護コンクリートと本体の境界部にマクロ的あるいはミクロ的な剥離や損傷を生じたために海水の侵入を受け、同部分の腐食が著しいものとなったと考えられる。但し、本体側のコンクリート面と接するアンカープレート表面は防錆材が確実に密着しており、発錆は認められなかった。

また、大気中暴露のものは海水中暴露と比較してわずかの発錆が定着ナットとアンカープレートの一部に観察されただけであり、それらは保護コンクリート打設までに生じた可能性も考えられる程度のものであった。

アンボンドPC鋼棒におけるねじ部および母材部の表面状況を写真-3, 4に示す。

同写真から明らかなように、防錆材を除去した表面には、暴露条件によらず、ねじ部および母材部の全長にわたり発錆はまったく認められなかった。

以上から、アスファルト系防錆材が表面と確実に密着して塗布された部分では確実な防錆効果が期待出来ることが確認できた。

### 3. 4 PC鋼棒母材部およびねじ部の引張試験結果

各暴露期間のPCはり供試体から取り出されたアンボンドPC鋼

棒の母材部とねじ部に対して引張試験を実施し、暴露試験後の機械的性質を確認した。母材部の引張試

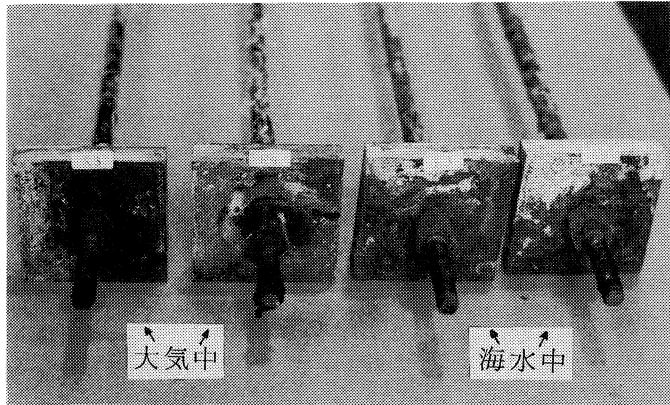


写真-2 定着部の外観状況 (暴露期間15年)

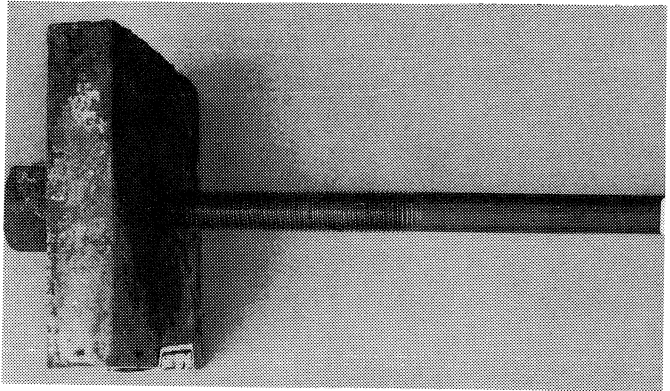


写真-3 PC鋼棒ねじ部近傍の外観状況 (海水中暴露15年; 防錆材除去後)

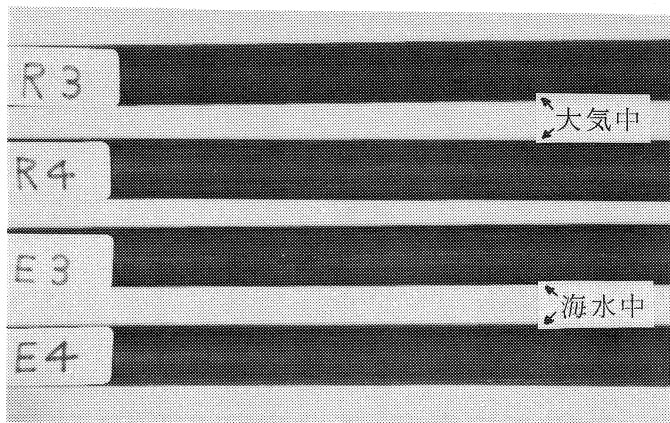


写真-4 母材部の外観状況 (暴露期間15年)

験結果を図-3に示す。

同図からわかるように、PC鋼棒母材部の機械的性質は海水中、大気中に15年間暴露された後においても全てJIS規格値を満足していた。

また、試験開始時と15年までの各暴露期間における機械的性質も同等の値を示しており、低下は認められなかった。

ねじ部の引張試験は各供試体を使用していたアンカープレートを取り除き、定着ナットとPC鋼棒ねじ部が嵌合した状態で引張力を負荷して破断時の荷重と破断状況を確認した。それらの結果を表-6に示す。

暴露後15年でのねじ部強度は2つの暴露条件とも試験開始時と同等であり、母材部と同様に暴露による強度の低下はなかった。

これらの試験結果は、3.1で示したPCはり供試体の曲げ特性と3.3で示したPC鋼棒の発錆状況観察の結果をよく裏付けており、アンボンドPC鋼棒の防錆効果は苛酷な腐食環境におかれた場合でも長期間維持されるということを示している。

### 3.5 防錆材の分析結果

暴露試験後における防錆材の品質が、試験開始時の状態と比較して変化がないかを、特性値測定と組成分析により確認した。それらの結果を表-7に一覧で示す。

同表に示す特性値の判定基準は日本建築学会の指針に示される値を用い、組成分析の判定基準は試験開始時における防錆材組成の代表性状を1とした時の指数で示した。

各暴露期間における両者の分析値は海水中、大気中ともにそれらを満足しており、防錆材の防錆性能を含めた品質は15年後においても十分に維持されていたと判断される。

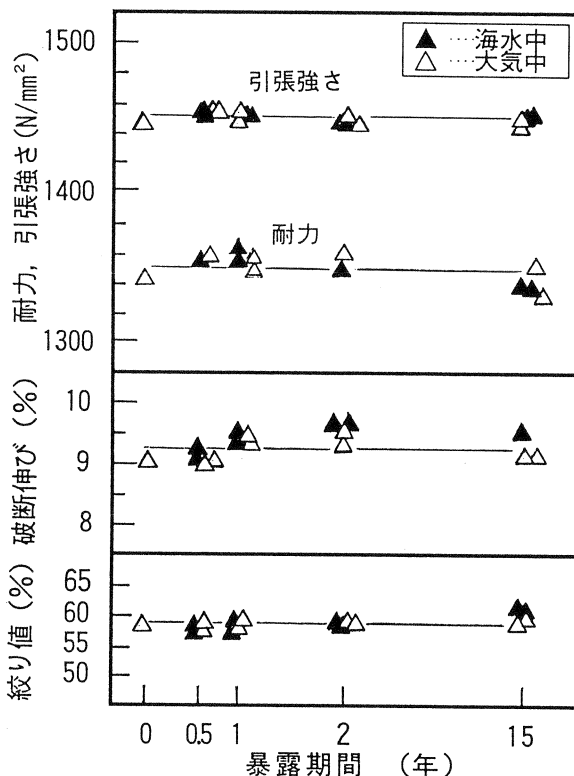


図-3 PC鋼棒母材部(15年暴露)の引張試験結果

表-6 PC鋼棒ねじ部(15年暴露)の引張試験結果

暴露条件	No	表面発錆の有無	破断荷重 kN	ねじ* 強度比 %	破断形態
大気中 (試験開始時)	-	なし	181.0	96.1	延性破断
海水中	1	なし	181.2	96.2	延性破断
	2	なし	180.8	96.0	延性破断
大気中	1	なし	180.8	96.0	延性破断
	2	なし	181.0	96.1	延性破断

備考： \* ねじ強度比は、各ねじ部破断荷重を母材部の規格引張荷重で除して求めた値を示す。

表-7 アンボンド防錆材の分析結果一覧

暴露 期間	暴露 条件	特性値測定結果				組成分析結果					
		針入度 25℃時	軟化点 ℃	フラス こけい化点 ℃	塩水噴霧 試験	鉱油	樹脂	粘着剤	防錆剤	酸化防 止剤	アスフ アルト
判定基準値		75 ~ 130	130 以上	-30 以下	暴露開始 は24日 以上の事	0.8 以上	0.8 以上	0.8 以上	0.8 以上	0.8 以上	0.8 以上
28日	大気中	96	142	-38	>24	1	1	1	1	1	1
6か月	海水中	100	142	-35	>24	1	1	1	1	1	1
	大気中	96	142	-35	>24	1	1	1	1	1	1
1年	海水中	104	142	-35	>24	1	1	1	1	1	1
	大気中	98	142	-35	>24	1	1	1	1	1	1
2年	海水中	96	141	-35	>24	1	1	1	1	1	0.99
	大気中	100	141	-35	>24	1	1	1	1	1	1
15年	海水中	102	144	-35	>24	1	1	0.99	0.99	1	1
	大気中	102	144	-35	>24	1	1	1	0.99	1	0.99

備考：組成は代表性状を1とした時の指数で示した。

#### 4. まとめ

塗布形アンボンドPC鋼棒の防錆能力と耐久性を調査するため、同鋼棒を用いたPCはりを作製して15年間にわたる干満のある海水中と大気中における暴露試験を行い、はりの曲げ特性とPC鋼棒の諸特性調査および防錆材の品質確認を実施した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 干満のある海水中に15年間暴露されたコンクリートにおいて、その力学特性は暴露開始時と同等であった。また、中性化深さは表面から最大2mm程度認められた。
- (2) また、同コンクリート中に含まれるCl<sup>-</sup>量はポストテンションの土木構造物における塩分総量規制値の約8倍の値を示した。
- (3) 15年間の海水中暴露において、定着端部からの海水の侵入の可能性があったにもかかわらずPC鋼棒の母材部およびねじ部に発錆は認められず、機械的性質の低下もなかった。
- (4) アンボンド防錆材の防錆性能は15年間の海水中暴露後においても十分維持されていた。
- (5) コンクリートとPC鋼棒が健全であったことにより、海水中に15年間暴露されたPCはりの曲げ特性は試験開始時と比較して同等であった。
- (6) 以上から、塗布形アンボンドPC鋼棒の優れた防錆能力と耐久性が確認された。

本実験を行うにあたり、京都大学名誉教授 六車 熙 先生、東扇アサノポール(株) 殿 および昭和シェル石油(株) 殿 に多くの御指導と御協力を賜った。ここに厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) F. レオンハルト：プレストレストコンクリート，レオンハルトのコンクリート講座 5，鹿島出版会，pp180～194，1984年5月
- 2) 山下，池上ほか：16年材令プレストレストコンクリート中のPC鋼棒の性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 9，No1. pp345～350，1987年9月
- 3) 倉内，増田ほか：アンボンド工法用シートPC鋼より線および定着具の耐食性，プレストレストコンクリート，Vol. 30，No. 4，pp70～78，1988年7月
- 4) プレストレストコンクリート構造分科会：アンボンド工法用PC鋼材と施工時の取扱いについて，建築雑誌，Vol. 94，No. 1153，pp57～64，1979年7月