

[25] コンクリート中における防食鉄筋の耐食性に関する研究

築貫 義人 (海上保安庁 灯台部工務課)

正会員 ○三上 尚人 (住友金属工業 中央技術研究所)

新井 哲三 (住友金属工業 中央技術研究所)

山崎 章 (住友金属工業 製鋼品条鋼技術部)

1. 緒言

塩化物によるコンクリート中の鉄筋の腐食とそれによる構造物の劣化が問題になっている。特に沖縄では鉄筋コンクリート造りの住宅、校舎、橋梁等の劣化が早くから顕在化したので、被害状況調査は数多く行なわれた。例えば岸谷は劣化を早める原因として海からのしゅきを受けること、海砂を使用していることの2点をあげ、さらに高温多湿であること、良質な骨材が得られないことにふれている¹⁾。また具志らは岸谷があげた二つの劣化原因に加え、混練水に塩分が混入していることもあり得るとしている²⁾。離島での施工では海水そのものを混練水として使用せざるを得ないとも言われている。このように沖縄の鉄筋コンクリート構造物は鉄筋を腐食させる要因が集積された条件下で施工・維持されることが多いので対策の確立が急がれる。筆者らは以上のような背景をもつ沖縄において、防食鉄筋(エポキシ樹脂塗装鉄筋、亜鉛めっき鉄筋)及び裸鉄筋の耐食性を比較するため、暴露試験を行なっている。この報文は暴露2年間の鉄筋の腐食挙動及びそれに関する考察をまとめたものである。

2. 試験内容

2.1 供試鉄筋

表1. 供試鉄筋の種類

表面処理 (目標膜厚 μm)	素材
エポキシ樹脂塗装 (180 \pm 50)	SD30 横ふし
亜鉛めっき (80.クロメート処理なし)	(JIS G3112)
裸 (プラスト表面)	D13 \times 600 mm ¹

供試鉄筋を表1に示す。エポキシ樹脂塗装鉄筋は静電粉体塗装によって得たものである。塗膜疵の影響を調べるため鉄筋の長さ方向中央の15ふしに1ふし当たり1.0~3.6mm²(平均1.9mm)の塗膜疵をつくり、供試体のかぶり面に向くように埋込んだ。この塗膜疵の大きさは取扱い

やコンクリートの打設時に粗骨材との衝突によって生じる塗膜疵の大きさをほとんどすべて含んでいる^{3),4)}。裸鉄筋は表面状態を一定にするため、ミルスケールを除いて供試した。

2.2 供試体

コンクリート用材料を表2に示す。骨材はすべて沖縄産である。混練水として用いた海水は淀川、神崎川及び武庫川の各河口に狭まれた尼崎港から採取したため、表3に示すように標準的な海水に比較して5倍に希釈された濃度になっている。コンクリートの配合は表4のように行なった。供試体の形状は図1に示すとおりで、同一種類の鉄筋を繰返し2で、かぶりが2,4,7cmとなるように水平に埋込んだ。コンクリート打設の際にはバイブレータ等による締固めは行なわなかつ

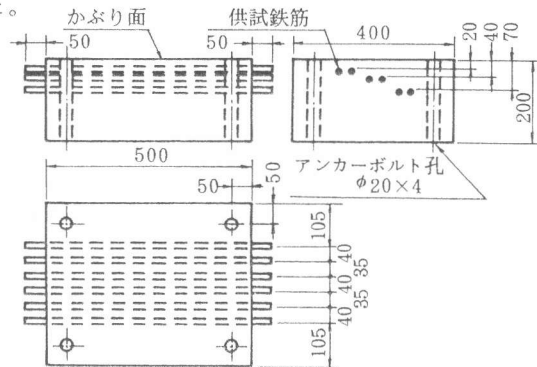


図1. 供試体形状 (単位mm)

た。水中で30日間養生した後、かぶり面を下側にして距離30cmの支点で支え、上方から集中荷重を加えてひびわれを導入した。各供試体のかぶり面に生じたひびわれ長さは82~330cm、最大ひびわれ幅は0.2~3.0mmである。

2.3 暴露

暴露は沖縄県糸満市西方14kmにあるサンゴ礁上の構築物基礎の上(海洋大気中)とその付近の海水中で行なっている。満潮位から約2.3m上方にある構築物基礎面に固定した供試体は海況が平穏な時以外は海水飛沫を受け、台風時には波浪をかぶる。

2.4 暴露後の評価方法

- (1) コンクリートのpH：かぶり面またはひびわれ面から一定距離毎にコンクリートを分取し、粗骨材を除いた残りを粉砕して試料とする。この試料に2倍量の純水を滴下し、pH試験紙で測定する。
- (2) コンクリート中の塩素イオン濃度：かぶり面から一定距離毎にコンクリートを分取し、粗骨材を除いた残りを粉砕して試料とする。この試料に10倍量の純水を加えて6時間振とう後、溶液中の塩素イオンをクロラニル酸第二水銀比色法で定量する。
- (3) 鉄筋の観察：コンクリート中から取出した鉄筋の外観の特徴を記述し、次式で定義する発錆率を求める。ここで発錆とは主として鋼の赤錆をいい、亜鉛めっき鉄筋に限り亜鉛の腐食物である白錆も対象とする。

$$\text{発錆率} = \frac{\text{錆発生面積}}{(\text{鉄筋公称周長}) \times (\text{埋込み長})} \times 100\%$$

- (4) 鉄筋の食孔深さ：腐食した鉄筋はクエン

酸2アンモニウムの10%水溶液中に15~18時間浸漬して除錆し、腐食していない鉄筋面を基準にして食孔深さを15°ポイントマイクロメータで測定する。

3. 試験結果

3.1 コンクリートのpH及び塩素イオン濃度

暴露2年後には供試体断面のpH低下が、かぶり面から3cm付近にまで及んでいる。ただし低下の程度は僅かであって、かぶり面から約2cmでもpH 12.6~12.7を維持している。かぶり面ではpH 8.2~10.4である。図2に示すようにひびわれ面のpHは経時とともに低下し、暴露2年後にはpH 9.2~11.4の間に分布する。これらの値は測定の手法上、ある厚さの平均pHを示しているのであるが、ひびわれ面そのものは、ほぼ中性になっていると考えられる。

供試体中の塩素イオン濃度分布の例として海水練りのそれを図3に示す。海水練り供試体中の初期塩素イオン濃度は800~600ppm、水道水練りでは

400~300ppmである。これらの値は混練水が持込む塩素イオンに由来するものとしては大きい。その原因は初期値が既にかぶり面から内部に向かって勾配をもっていることから、コンクリート打設、養生、脱枠後の諸手入れをすべて海浜の露天で行なった約3ヶ月の間に海塩の影響を受けたことによるものと考えられる。図3から明らかなようにコンクリート中には、混練水にともなって先在するものよりはるかに多量の外来塩素イオンが短期間に蓄積する。海洋大気中に暴露した供試体は1年後には海水練り、水道水練りともかぶり面から約4cmに塩素イオン濃度の上昇が認められ、2年後には約6cmにまで上昇範囲が拡大している。海水中に暴露した供試体は海水練り、水道水練りとも塩素イオン濃度上昇範囲は約4cmまでで、この値は暴露1年以降で変化していない。

3.2 外観及び発錆率

亜鉛めっき鉄筋及び裸鉄筋の外観の特徴はコンクリート打設時に地を向いていた面(向地面)のほうが、その反対面(向天面)より腐食が進行していることである。これらの鉄筋は図4に示すように海水練り供試体中で大

表2. コンクリート材料

材料	種類	産地
混練水	(1) 海水 (2) 水道水	・ 尾崎港より採取 ・ 尾崎市上水道
細骨材	海砂 / 砕砂	前島産海砂と本部産砕砂を重量比1:1で混合して用いる。
粗骨材	砕石	本部産砕石
セメント	普通ポルトランドセメント	

表3. 混練水の化学成分 (ppm)

	Cl ⁻	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	pH
海水	4000	1700	580	250	88	75	7.35
水道水	13	8.7	16	2.1	15	2.2	7.75

表4. コンクリートの配合

設計強度 kg/cm ²	粗骨材 最大寸法 mm	水セメント 比 W/C %	スランブ cm	細骨材 率 S/(S+a)%	単位量 kg/m ³				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 a	減水剤
240	25	55	10±2	38.5	144	262	746	1190	-

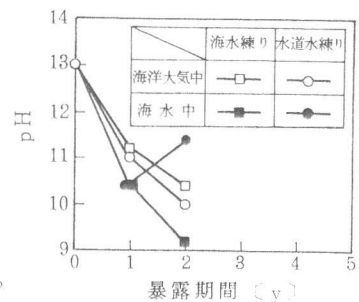


図2. 供試体ひびわれ面のpH

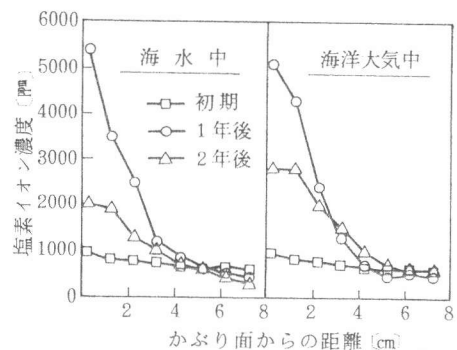


図3. 海水練り供試体中の塩素イオン濃度分布

きな発錆率を示す場合が多い。エポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜健全部は混練水、かぶり、暴露環境の如何にかかわらず発錆せず、塗膜疵とひびわれが一致したところで発錆する。亜鉛めっき鉄筋の白錆発錆率は暴露環境によって大きな差はなく、差を生じるのは素地鉄筋の腐食を示す赤錆発錆率である。すなわち海洋大気中では赤錆が生じているのに対し海中では未だ生じていない。裸鉄筋は海洋大気中で発錆率が大きい。

3.3 食孔深さ

鉄筋の赤錆を除くと素地は孔食を生じている。食孔位置はひびわれとよく一致しているの、これらの食孔はひびわれを浸透する海水によって生じたことを示している。図5は各鉄筋に生じた食孔のうち最も深いものを向天面、向地面に分け、暴露環境毎にあらわしたものである。表5は暴露2年後の全供試体中の亜鉛めっき鉄筋、裸鉄筋に生じた深さ0.1mm以上でかつ深いほうから10番目迄の食孔の深さを向天面、向地面毎に累計したものである。向天面の累計Bに対する向地面の累計Aの比をとれば明らかなように、どちらの鉄筋も向天面より向地面の食孔深さが大きい。ちなみに亜鉛めっき鉄筋、裸鉄筋の最大食孔深さはそれぞれ2.2mm、3.4mmであって、いずれも向地面に生じている。エポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜疵部の最大食孔深さは0.4mmで、他の鉄筋のそれに比較して格段に小さい。

4. 考察

この試験で得られた結果のうち鉄筋の向天面と向地面で腐食差があらわれること、塗膜疵によって露出した鋼面が腐食するという点では裸鉄筋と同じであるのに最大食孔深さを比較するとエポキシ樹脂塗装鉄筋は裸鉄筋の8.5分の1でしかないこと、の二つが特徴である。これらについて考察を加え鉄筋利用技術上の参考とする。

4.1 鉄筋の向天面と向地面の腐食差

鉄筋の向地面には空洞ができたり含水率の高いセメントペーストが滞留する。また、ひびわれのあるコンクリート中ではひびわれに露出する鉄筋面がアノードとなり、その周辺の鉄筋面がカソードとなってマクロセルを形成して孔食が進行すると考えられる⁵⁾。この二つのことから図6のモデルが考えられ、このモデルは図7の系によってマクロセル腐食の実験に変換することができる。この系では中性の人工海水に接する試験片が図6のひびわれに露出する鉄筋のアノードAに対応する。ひびわれ面がほぼ中性になっていると考えることは図2からも妥当である。高pH溶液であるセメント上澄液に接する試験片が図6のひびわれから離れた鉄筋のカソードCに対応する。この領域ではコンクリートから供給される水酸化カルシウムによってアルカリ性になっている。このようにして同一鉄筋面が異なるpHの環境

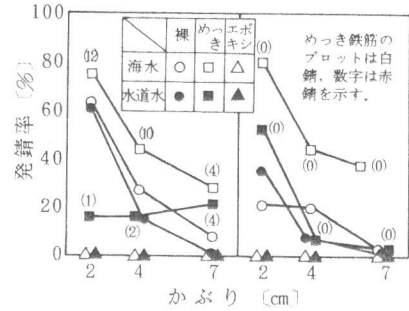


図4. ひびわれのある供試体中の鉄筋発錆率 (塗装鉄筋は塗膜健全部、暴露2年)

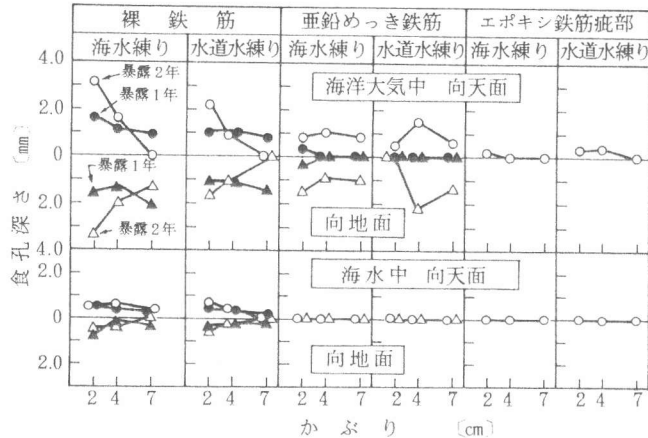


図5. ひびわれを導入した供試体中の鉄筋の最大食孔深さ

表5. 向天面、向地面の食孔累計深さ

鉄筋	環境	混練水	食孔累計深さ〔mm〕		A/B
			向地面A	向天面B	
裸	海洋大気中	海水	4.9	3.6	1.4
		水道水	3.9	3.4	1.1
	海水中	海水	1.0	0.9	1.1
		水道水	0.5	0.4	1.3
めっき	海洋大気中	海水	2.3	0.8	2.9
		水道水	1.8	0.8	2.3

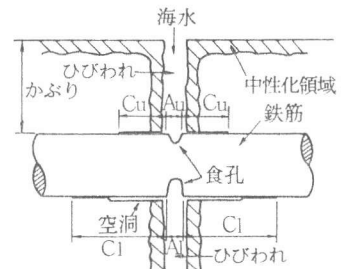


図6. 鉄筋の向天面と向地面に腐食の差があらわれるモデル

に接することになり、アルカリ濃度を駆動力とするマクロセルを形成する。腐食電流の実測値は図8に示すとおり、一定面積のアノードに対するカソード面積の比とともに大きくなる。

図6の鉄筋の向天面は密実なコンクリートに覆われているので鉄筋とコンクリートの界面を浸透する海水の範囲は比較的狭く、またそれによって生じる水膜は薄いので電気抵抗は大きい。このような条件下で形成されるマクロセルはカソードCuが大きくなれないので小規模である。一方、向地面では海水が広がりやすく水膜も厚いので電気抵抗は小さい。このような条件のもとではカソードClが大きくなれるので大きな規模のマクロセルを形成する。結局、図8の結果は図6の $Cl/A1 > Cu/Au$ に対応して向地面に、より深い食孔が生じることを説明する。

4.2 塗膜疵部の腐食

ひびわれを浸透する海水が塗膜疵によって露出した鋼面と接触することは勿論、塗膜と鉄筋の界面へも浸透する。しかし塗膜の密着力が正常であれば図9(a)のように小さな塗膜疵によって露出する鋼面と海水が接触するのは狭い範囲に限られる。結局、この場合もアノードに対するカソードの面積比が図9(b)の裸鉄筋のそれに比較して小さく、したがってマクロセルの規模が大きくなり得ないことによって孔食速度は小さい。

5. 結論

沖縄の海洋環境で行なっている暴露2年の結果からコンクリート中の鉄筋の腐食挙動に関連して次の諸点が明らかとなった。

- (1) 鉄筋の向地面の孔食は向天面に比較して進行速度が大きい。その理由は向地面で海水の浸透範囲が大きく、アノードに対するカソードの面積比が大きくなる結果、マクロセルの規模が大きくなることによる。
- (2) エポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜疵部で生じる食孔の深さは、他の鉄筋に比較すると格段に小さい。その理由は小さな塗膜疵によって露出する鋼面及びその周辺の塗膜と鉄筋の限られた範囲の界面で構成されるマクロセルにおいて、カソード/アノード面積比が小さく、したがってマクロセルの規模が大きくなり得ないことによる。
- (3) エポキシ樹脂塗装鉄筋は混練水、かぶり、暴露環境の如何を問わず、良好な耐食性を示す。亜鉛めっき鉄筋は海洋大気中に暴露した海水練り、水道水練り両供試体中で孔食を生じる。裸鉄筋は混練水、暴露環境にかかわらず孔食を生じ、海洋大気中ではかぶりが小さければそれが著しく進行する。

参考文献

- 1) 岸谷, 沖縄における鉄筋コンクリート造校舎の鉄筋腐食調査(那覇市の例), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1973. 10
- 2) 具志, 和仁屋, 伊良波, 沖縄におけるコンクリート造校舎の耐久性調査(その1 宮古島), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1976. 10
- 3) 斉藤, 小林, 横江, エポキシ樹脂塗装鉄筋コンクリートの試験施工報告, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 1984. 10
- 4) 新井, 白川, 三上, 小山, 山崎, エポキシ樹脂塗装鉄筋, 住友金属, Vol. 36, No. 3, p. 69
- 5) 三上, 白川, コンクリート中での表面処理鉄筋の耐食性, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 1982. 10

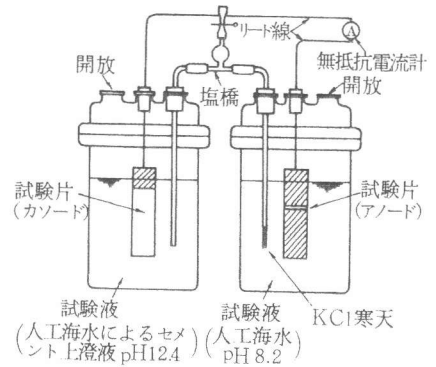


図7. アルカリ濃度マクロセル腐食実験方法

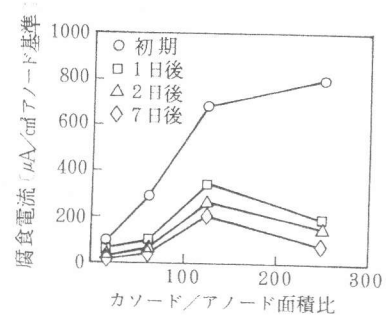
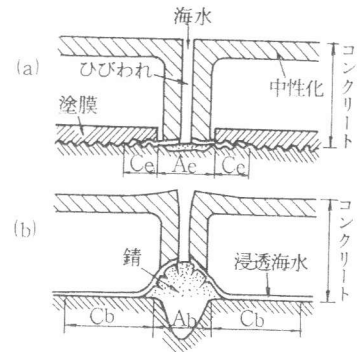


図8. 腐食電流に及ぼすカソード/アノード面積比の影響



Ae, Ab: 塗装鉄筋, 裸鉄筋のアノード範囲
Ce, Cb: " , " カソード範囲

図9. 疵のある塗装鉄筋(a)及び裸鉄筋(b)の腐食モデル

($Ce/Ae < Cb/Ab$)