

# 海洋環境下における鋼繊維補強コンクリートの鉄筋防食効果

## THE EFFECT OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE ON THE CORROSION BEHAVIOR OF REINFORCING STEEL EMBEDDED IN CONCRETE MEMBERS EXPOSED TO MARINE ENVIRONMENT

小林一輔\*・星野富夫\*\*・辻 恒平\*\*\*

By Kazusuke KOBAYASHI, Tomio HOSHINO and Kohei TSUJI

This paper clarified that reinforced concrete members made of steel fiber reinforced concrete (SFRC) exhibit excellent durability in extremely severe corrosive environment such as marine splashing zone. Based on the results of 5 years of exposure test in marine splashing site, it is ascertained that steel fibers dispersing in SFRC does not corrode except for the ones in the surface layer portion and that corrosion of reinforcing bars embeded in SFRC does not occur, even if considerable amount of chloride may penetrate in these reinforced concrete members. Furthermore, the electrochemical concept explaining of the corrosion protection mechanism of SFRC is proposed.

*Keywords* : steel fiber reinforced concrete, corrosion protection of reinforcing steel, marine environment

### 1. はしがき

本論文は鋼繊維補強コンクリート (SFRC) が海洋飛沫帯のようなきわめて厳しい腐食環境下においても優れた耐食性を示すのみならず、コンクリート中の鋼材を防食する機能を有することを、海洋飛沫帯における5年間の暴露試験を通じて確認するとともに、その防食機構について考察を加えたものである。

鋼繊維補強コンクリートが海洋環境下において優れた耐食性を発揮することはすでに数多くの調査研究<sup>1)~4)</sup>を通じて明らかにされているが、本論文において示したような、間欠的な波浪と霧状の海水飛沫に絶えずさらされ、その間に日光を浴びて乾燥するというきわめて厳しい腐食環境下においてこれを確認したものはきわめて少ない。さらに、鋼繊維補強コンクリートの使用が鉄筋を防食する機能を有することを、暴露実験に基づいて明らかにした研究はほとんど見当たらない。

鋼繊維補強コンクリートによる鉄筋の防食効果を検討する場合、その内容としては、鋼繊維補強コンクリート

中における鋼繊維自体の耐食性と内部鋼材の防食機能から成ると考えられる。本論文では、これらを別々に検討するのではなく、表裏一体のものとして取り扱っている。すなわち、複合材料としての鋼繊維補強コンクリートの防食効果という観点に立脚して防食機構の解明を図った点が本論文の特徴である。

### 2. 実験概要

#### (1) 供試体

暴露試験を行った供試体は、図-1に示すように寸法が10×10×120 cmで、内部に長さ110 cm、φ10 mmの異形鉄筋 (SD 30, 高炉品) を2本埋め込んだ鉄筋コンクリートはりであり、計画かぶりを2 cm および3 cmの2種類とした。

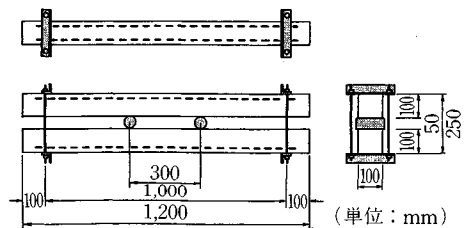


図-1 試験体の寸法と導入ひびわれの保持方法

\* 正会員 工博 東京大学生産技術研究所教授 第5部  
(〒106 港区六本木7-22-1)

\*\* 正会員 東京大学生産技術研究所技官 第5部 (同上)

\*\*\* 正会員 工博 茨城職業訓練短期大学校教員 原子力科  
(〒310 水戸市水府町864-4)

これらの SFRC 供試体は、実構造物の曲げひびわれを模擬するために、まず SFRC と同じ水セメント比の普通コンクリート供試体について、スパン中央部の曲げひびわれ幅がコンクリート引張縁で 0.2~0.3 mm 程度になるように曲げ荷重を行い、これと同一の荷重によりひびわれを導入したものと、ひびわれ幅を普通コンクリート供試体と同一にするために、載荷荷重を増して締め付けを行ったものとの 2 種類設定し、図-1 に示すように種類別に 2 本のほりを 1 組とする 3 等分点 2 点載荷状態で固定して海洋暴露に供した。供試体は各要因ごとにそれぞれ 3 組作製し、暴露 1 年、3 年、5 年用とした。

また、コンクリートの強度特性を調べるために、上述のほり供試体の海洋暴露の際に 10×10×40 cm の試験体も同時に暴露させ、曲げ強度試験を行って、水中養生試験体と比較した。曲げ強度試験は、JCI-SF 4「繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」に基づいて行った。普通コンクリートについては

φ10×20 cm の試験体を作製し、海洋暴露および水中養生を行って所定材令で圧縮強度試験を行った。

さらに、SFRC の電気化学的特性や塩分の浸透などの機構について比較検討するために、普通コンクリートはりのほかに、還元鉄粉を混入させたコンクリートはりも作製して暴露に供した。この還元鉄粉は Fe 純度 99.3% のほとんど還元されているものであり、主に粉末冶金の主原料として用いられている。

(2) 使用材料および配合

セメントは表-1 に示す普通ポルトランドセメント、細骨材は大井川産の川砂 (比重 2.64, 吸水率 0.15%, F.M.3.17), 粗骨材は最大寸法 15 mm の碎石 (硬質砂岩, 比重 2.70, 吸水率 0.47%) を用いた。

SFRC に用いた鋼繊維は、φ0.5 mm×30 mm の異形カットワイヤーならびに □0.5×0.5×30 mm のせん断ファイバーを使用した。また、せん断ファイバーと同一の形状のステンレス鋼ファイバー (SUS 430) も使用し

表-1 普通ポルトランドセメントの化学成分

igloss	insol	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Total
0.5	0.2	21.8	5.2	3.1	64.9	1.3	2.1	99.1

表-2 鋼繊維の品質

種類	形状 (mm)	化学成分 (%)				
		Fe	C	Mn	P	S
異形カットワイヤー	φ 0.5×30	99.6	0.04	0.27	0.011	0.019
せん断ファイバー	□ 0.5×30	99.6	0.05	0.29	0.014	0.013

表-3 鉄粉の品質

種類	見掛密度 (g/cm <sup>3</sup> )	Fe (%)	流動度 (sec/50g)	粒度分布 (%)			
				0.5mm	0.3mm	0.18mm	0.15mm
還元鉄粉	3.47	99.3	27.9	0.8	15.4	82.7	1.1

注) 流動度とは、金属粉の形状の判定方法で JIS Z 2502 による。

表-4 コンクリートの配合

コンクリートの種類	W/C (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	SF/SB
鋼繊維補強コンクリート	50	69	230	460	1109	511	118
鉄粉混入コンクリート	60	50	213	355	890	914	353
普通セメントコンクリート	40	43	196	490	736	1002	—
	50	45	196	392	807	1013	—
	60	47	196	327	869	1006	—

注) SF: 鋼繊維 SB: 鉄粉を示す。

た。写真—1に鋼繊維および鉄粉の形状を示す。これらの鋼繊維のコンクリートへの体積混入率  $V_f$  はいずれも1.5%である。

コンクリートの配合は、水セメント比が50%で、スランプが8cmとなるように配合を定めた。なお、比較に用いた普通コンクリートの水セメント比は50%であるが、参考として40%、60%のものも作製した。これらの配合もスランプが8cmとなるように定めた。鉄粉混入コンクリートの配合は、水セメント比60%の普通コンクリートに還元鉄粉を外割で4.5 vol%混入したものであってスランプは4cmである。これらの使用材料ならびにコンクリートの配合についての詳細は、表—2～表—4に示した。

(3) 暴露試験場

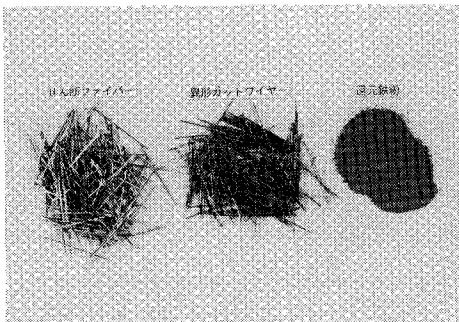
暴露試験は、静岡県伊豆半島東海岸（伊東市城ヶ崎・図—2参照）の岩場に設置した海洋暴露試験場において実施したもので、供試体は写真—2、に示すような最高潮位から約50cm程度上部の架台に、打ち寄せる波の進行方向に平行になるように固定した。この場所は満潮時には波で洗われ、干潮時にも前面に岩礁があるために海

水飛沫を受けるきわめて厳しい腐食環境下であって、JCI-SC7「コンクリート供試体の暴露試験場の環境区分に関する規準」における環境区分Aに該当する環境である。

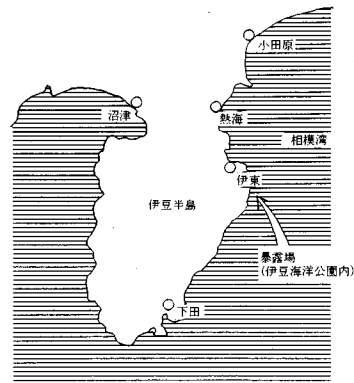
(4) 調査項目

暴露試験は、1983年10月（ただし、鉄粉混入コンクリートは1984年10月）より開始した。供試体の外観上の変状やひびわれの追跡等については、暴露開始時から6か月、1、2、3、4および5年経過の時点で現地測定を行った。また同時に、暴露5年用のコンクリート供試体中における鉄筋の腐食状態のモニタリングを行うために、片側の供試体の鉄筋端部に取り付けた防水性のリード線により自然電位の経時変化を定期的に測定した。

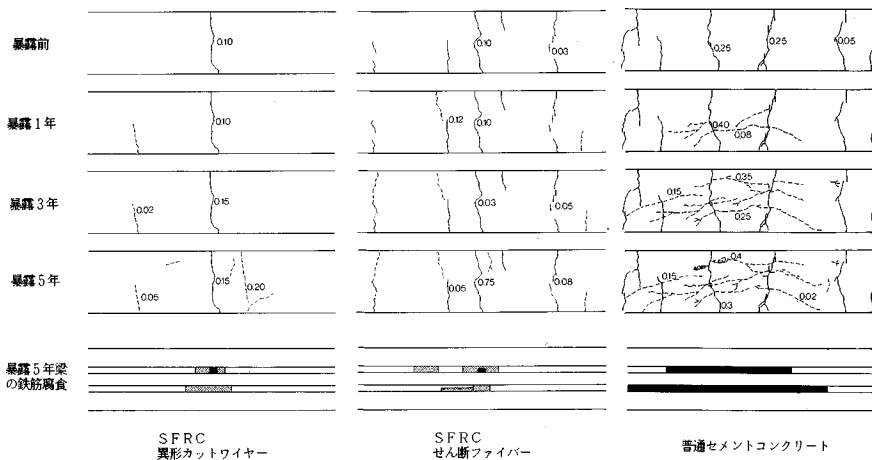
暴露1年、3年および5年を経過した時点でおのおのの供試体を現地より引き揚げ、表面の劣化状態やコンクリート中への塩分の浸透を調べるとともに内部の鉄筋の自然電位、分極抵抗などを供試体の各側面より測定した後、供試体を解体し鋼繊維の腐食状態や鉄筋の腐食状態、



写真—1 鋼繊維および鉄粉の形状



図—2 暴露試験場の位置



図—3 供試体表面のひびわれの経時変化と鉄筋腐食 (W/C=50%, かぶり2cm)

腐食位置などを調べた（ただし、鉄粉混入コンクリート供試体は、暴露4年を経過した時点で現地より引き揚げ、解体・調査を行った）。

また、コンクリートの性状を調べるために強度試験のほかに、供試体中より切り出したコンクリート片による酸素の拡散試験を行った。

### 3. 暴露試験結果

#### (1) 供試体の外観およびひびわれの状況

写真-3(a)に暴露5年後の供試体の外観を示す。手前の3本の供試体がSFRC供試体、上側2本の供試体が普通コンクリート供試体であるが、SFRC供試体の表面には、表層部分の鋼繊維の腐食によって生じた腐食

生成物が、斑点状および棒状に形成されている様子がわかる。

図-3は、0.2~0.3mm幅のひびわれを生じさせた普通コンクリート供試体および、これと同一の荷重で曲げひびわれを導入したSFRCの供試体の暴露期間を通じてのひびわれの経時変化を示したものである。普通コンクリートの表面には暴露1年目より鉄筋位置に沿った縦ひびわれが発生したが、SFRC供試体の場合、同図および写真-3(b)に示すように縦ひびわれの発生は認められず、暴露前に導入した曲げひびわれのパターンは5年経過後でもほとんど変化していないことがわかった。また、図-4はSFRCの防食のメカニズムを検討するために作製した供試体について、同様にひびわれの経時

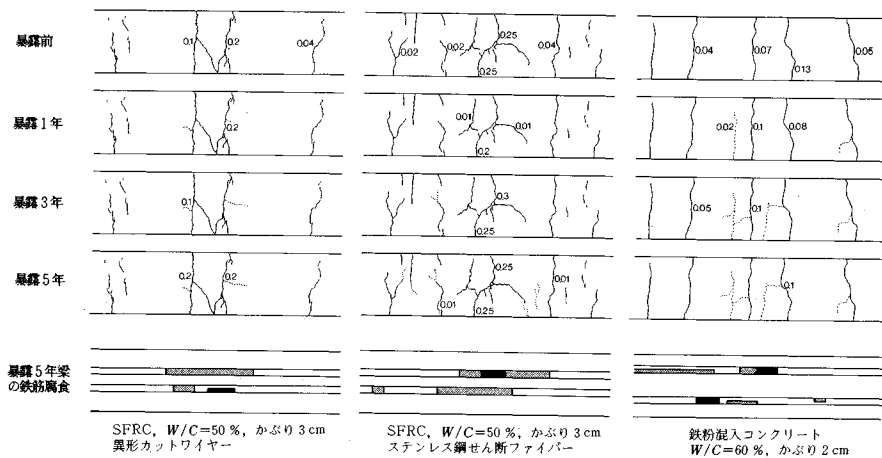


図-4 供試体表面のひびわれの経時変化と鉄筋腐食

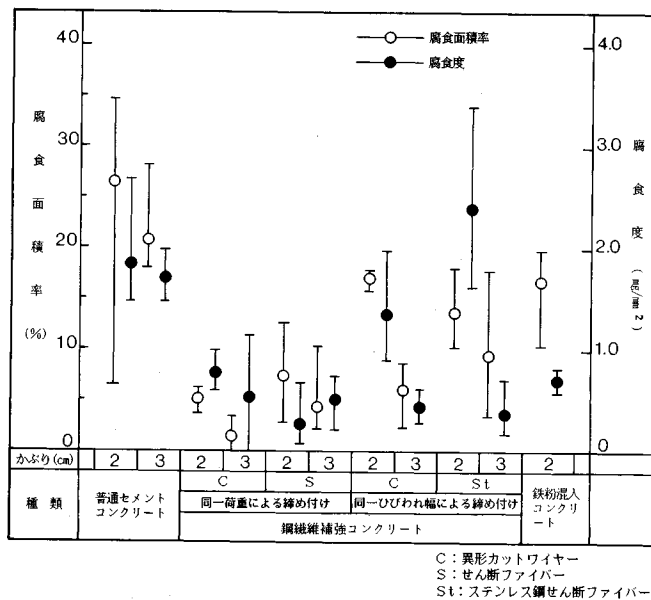


図-5 鉄筋の腐食面積率および腐食度



写真-2 暴露試験場



写真-4(a) 暴露5年のSFRCの断面と表面状態  
(異形カットワイヤー)



写真-3(a) 暴露5年時点のSFRCの外観



写真-4(b) コンクリート表面付近の鋼繊維の状態  
[(a)の左端部の拡大]



写真-3(b) 暴露5年時点におけるSFRCの表面状態



写真-5 鉄粉混入コンクリート供試体断面における鉄粉の腐食状態

変化を示したものである。SFRC 供試体の場合には、両方とも初期ひびわれ幅を 0.2~0.3 mm となるように締め付けたものである。このような条件の場合にも、ひびわれの変化はほとんど認められないことを示している。

(2) 鋼繊維の腐食状況

SFRC 供試体の断面を写真—4(a) および (b) に示すが、鋼繊維の腐食は供試体の表面より約 1 mm 以内のごく表層部分に限定されていた。また、比較に用いた鉄粉混入コンクリート供試体の断面においても写真—5 に示されるように鉄粉の腐食はコンクリートの表層部分に限定されていた。

(3) 鉄筋の腐食状況

暴露 5 年後の供試体より取り出した鉄筋の腐食位置の概略を図—3 および図—4 の下方へ示す。図中の灰色部分はごく表面に発生した点状のさびであり、黒色部分は鉄筋の断面減少を伴うような腐食箇所を示している。

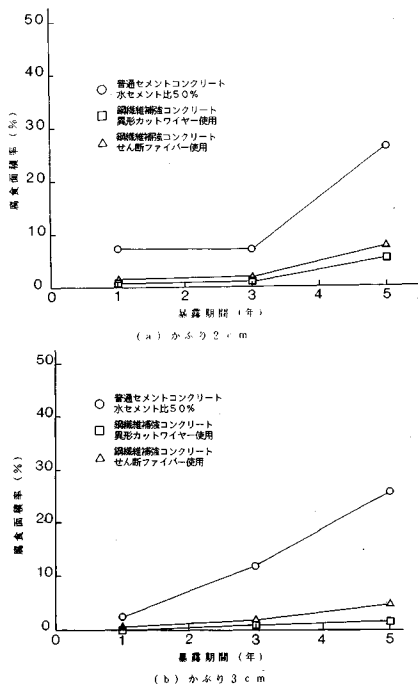
SFRC を用いた供試体中の鉄筋の腐食は、いずれも暴露前に導入したひびわれ部分に限定されていたが、普通コンクリート供試体中の鉄筋はほぼ全面にわたって腐食を生じていた。

SFRC 中の鉄筋の腐食面積率と腐食度を普通コンクリート中の鉄筋と比較して示したものが図—5 である。ここで、腐食度とは腐食減量/腐食面積の値であって、平均腐食深さ (mg/mm<sup>2</sup>) を表わしている。この値が小さいことは、腐食が鉄筋のごく表層部分に限定されていることを示している。図—5 より、SFRC を用いた供試体中の鉄筋の腐食は、同一荷重による締め付けを行った場合にはきわめて軽微であり、また同一ひびわれ幅による締め付けを行った場合には前者に比較して腐食面積、腐食度とも大きい。普通コンクリート供試体の場合に比べれば腐食は小さい。なお、還元鉄粉を混入した供試体とステンレス鋼製の鋼繊維を用いた SFRC 供試体中の鉄筋の腐食についてはあとで触れることにする。

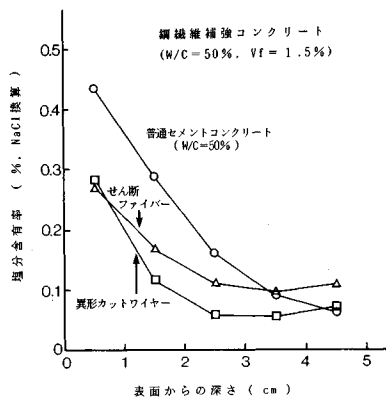
図—6 は図—3 に示した条件の供試体について、腐食面積率の経時変化をかぶり厚さ別に示したものである。これらの図から明らかなことは、海洋飛沫帯のようなきわめて厳しい腐食環境下に暴露した場合でも SFRC 供試体中の鉄筋の腐食は 5 年間にごくわずかしこ増加していないことである。

(4) 鉄筋コンクリート部材におけるコンクリートマトリックス部分の特性

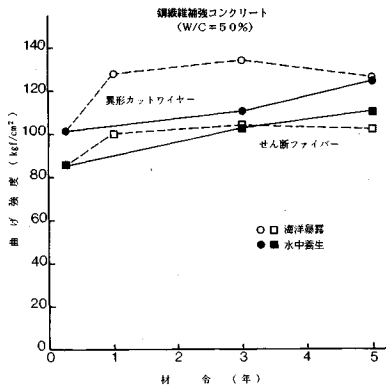
図—7 は SFRC のコンクリートマトリックス中への塩分の浸透状況を示したものである。SFRC 部材における塩分の浸透性状を普通コンクリート部材と比較すると、表層部分ではやや塩分が少ないが内部では大差がないことがわかる。一方、5 年間暴露を行った SFRC 供



図—6 腐食面積率の経時変化



図—7 暴露 5 年後のコンクリート中の塩分含有率 (全塩分)



図—8 海洋環境下における SFRC の曲げ強度

試体から切り出した試験片の酸素拡散係数は、 $4\sim 6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ であり、これに対応する普通コンクリート供試体の値は、 $3\sim 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ であって、従来のコンクリートにおける酸素拡散係数の実験結果<sup>5)</sup>に照らしてみると、この程度の差は鉄筋の腐食に影響を及ぼすような差ではないと考えられる。

図-8は5年間暴露を行ったSFRCの曲げ強度試験の結果を、同時に作製して水中養生を行った供試体による結果と比較して示したものである。この結果をみると、SFRCを5年間海洋飛沫帯に暴露しても強度に影響を及ぼすような劣化が認められないことがわかる。また、鋼繊維の腐食は写真-4に示した供試体の場合と同様に、表面付近に限定されていた。

(5) SFRC中における鉄筋の自然電位および分極抵抗の分布特性

SFRC内部の鉄筋の自然電位の測定および分極抵抗の測定を行い、その後鉄筋を取り出して腐食位置との対応を調べた。自然電位の測定は、ASTM C 876-77に基づきAg/AgClを照合電極として用いた。また、分極抵抗は供試体端部に対極を埋め込み、鉄筋との間に低周波および高周波の電流を印加することによって測定を行った。

図-9(c)は、かぶり2cmの普通コンクリート供試体の測定結果であるが、腐食位置の自然電位は約450~500mV、分極抵抗は10Ω以下である。ここには示さないが、かぶりが3cmの供試体における腐食位置の自然電位は400~450mV、分極抵抗は10~20Ωを示し、いずれも腐食位置との対応が得られている。一方、SFRCの場合には図-9(a)および(b)に示すように腐食位置における自然電位の変化は認められず、おおむね150~300mVの間において平坦な測定結果を得た。分極抵抗も50Ω以上であり腐食位置とは対応づけられない。

4. 塩分環境下におけるSFRCの防食効果

(1) 概要

SFRCが優れた耐久性を示す理由としては、従来、①鋼繊維がコンクリート表面の微小なひびわれを拘束するので、塩化物の浸透および酸素の拡散を抑制する。②鋼繊維補強コンクリートは一般に単位セメント量が多いので、より多くの塩化物をフリーデル氏塩として固定する。③鋼繊維の混入によって生じた膨大な鋼の表面積の存在が腐食反応を制御する、などの説が述べられてきた。

しかし、今回の測定によれば、上記の①に関して、酸素の拡散は普通コンクリートと比較して特に大きな相違はみられず、また、塩化物の浸透も図-7に示されるように、供試体内部の鉄筋位置においてはあまり差がみられない。一方、②の場合、フリーデル氏塩による塩化物

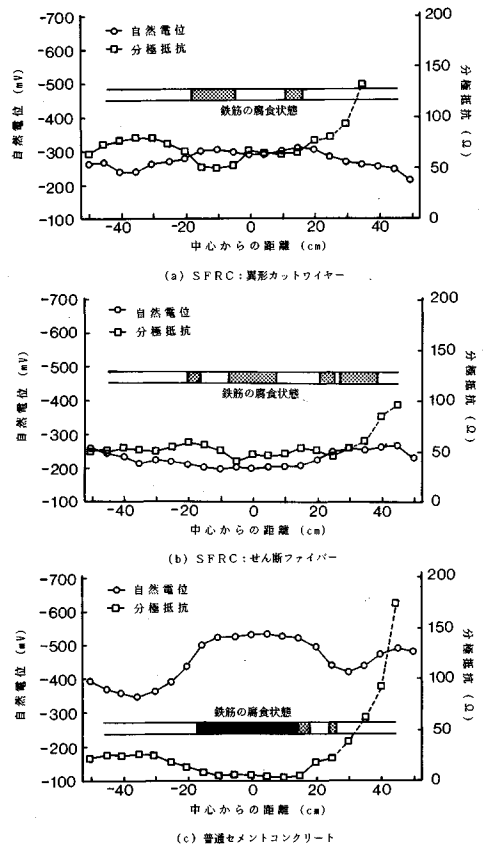


図-9 鉄筋の自然電位および分極抵抗 (海洋暴露5年, かぶり2cm)

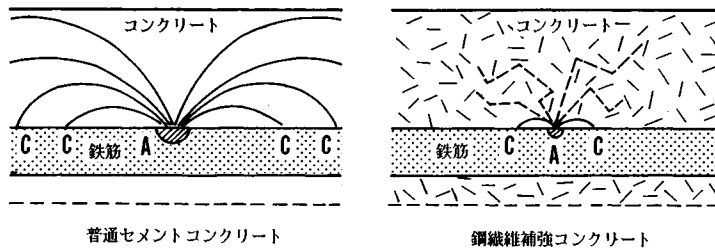
の固定はセメント重量の0.4%程度(CI<sup>-</sup>)が限界であるといわれており<sup>6)</sup>、飛来塩分のように常時塩分が侵入する場合に対しては、このような機構では説明が困難である。したがって、①および②はSFRCの腐食効果に対する本質的な要因とはなり難く、主たる要因は残された③の鋼繊維による電気化学的防食機構であろうと考えられる。

(2) マトリックス中の鋼繊維自身の耐食性

暴露試験の結果、SFRCの鋼繊維は表層部分を除きコンクリート内部ではまったく腐食しないことが観察された。Mangatら<sup>3)</sup>は無筋のSFRC供試体を用いて1200日間の暴露試験を行った結果、①鋼繊維自身の再不動態化、②膨大な表面積、および③鋼繊維の不連続性によるカソード面積の限定、を耐食性の理由として挙げている。著者らも彼らと同様の見解をもっているが特に③に加えて鋼繊維の分散や配向の重要性を考える必要がある。この点に関しては次節のb)でマクロな視点から述べることにする。

(3) SFRCによる鉄筋の防食機構

a) コンクリート表層の鋼繊維の腐食による防食



図—10 鉄筋腐食電流の流れ (A:アノード, C:カソード)

コンクリート中の鉄筋の腐食は酸素の拡散律速によるカソード支配であると考えられる。すなわち、鉄筋およびマトリックス中の鋼繊維を腐食させるためにはカソード部への酸素の供給が必要である。今回の暴露試験結果ではコンクリート表層部の鋼繊維だけが腐食していたが、外部環境より侵入する酸素の大部分がコンクリート表層部の鋼繊維の腐食によって捕捉され、消費されることが考えられる。また、二次的な効果として表面部分における鋼繊維の腐食生成物による物理的な閉塞効果が考えられる。すなわち、内部の鋼繊維および鉄筋の位置では腐食に必要な酸素濃度の条件が満足されなくなるということである。特に、鋼繊維は比表面積が大きいために、この効果は無視できないと思われる。このような防食のメカニズムを検証する1つの方法として実施したものが、酸化性でしかも比表面積の著しく大きい、還元鉄粉を混入した鉄筋コンクリート供試体による実験である。この場合にも鉄粉そのものの腐食は鋼繊維の場合と同様、ごく表層部分に限定されており、また内部の鉄筋腐食の進行も図—4から明らかなように普通コンクリート供試体の場合に比較して抑制され、異形カットワイヤーの供試体とはほぼ同等の腐食状態を示していた。一方、ステンレス鋼の鋼繊維を用いたSFRC供試体の場合には、コンクリート表層部においても鋼繊維の腐食がほとんど認められないものの、内部の鉄筋の腐食は図—4から明らかなように、炭素鋼の鋼繊維を用いた異形カットワイヤーの供試体に比較してやや大きくなっている。これはステンレス鋼が腐食されにくく、表層部における鋼の腐食による酸素供給の抑制効果が減じたためと考えられる。しかし、以上の結果は、上記のメカニズムの妥当性のある程度立証しているようにも考えられるが、SFRCによる鉄筋の防食機構を説明する論拠としてはやや薄弱であると思われる。そこで、SFRCがコンクリートマトリックス中に鋼繊維という粒子を分散させた複合材料であることに着目して、SFRC全体として鉄筋の防食に関与する防食機構を考えてみた。

b) 粒子分散系複合材料としてのSFRCによる鉄筋腐食の抑制

普通コンクリート供試体中の鉄筋の腐食は、暴露前に

導入した曲げひびわれ部分を起点として発生した腐食が、時間の経過とともにひびわれ部分以外にも拡大して全面的腐食状態に至る経過をたどるが、SFRC供試体の場合の腐食はひびわれ部分に局限されており、腐食領域の拡大はほとんど生じていない。一般に、腐食の進行速度を増大させるにはアノード面積に比べて、十分に大きなカソード面積が必要になる。しかし、SFRCの場合には、ひびわれ部分の鉄筋上にアノードとなるべき起点が生じて、図—10に示すように鉄筋を取り囲む電場がランダムに配向された鋼繊維の界面効果によって不連続となることが想定される。したがって、マクロセルの形成や、その維持が行われにくくなり、腐食の進行が抑制されるものと考えられる。暴露期間中に、照合電極をSFRC供試体の表面に接触させて内部の鉄筋との間に生じる自然電位を定期的にモニターしたが、電位の値が非常に不安定であったことも鋼繊維の界面効果を説明づける現象の1つと考えられる。

本章では、ひびわれがない限り、海洋飛沫帯のような厳しい腐食環境下であっても、鋼繊維自身の耐食性とコンクリート内部の鉄筋の防食性が電気化学的機構により説明づけられることを考察した。

## 5. 結 論

鋼繊維補強コンクリート中の鋼繊維は、海洋飛沫帯のような厳しい腐食環境下においても表層部を除いてほとんど腐食しないのみならず、鋼繊維補強コンクリートを用いた鉄筋コンクリートはりにおいては鉄筋の腐食も生じないことを、5年間にわたる海洋飛沫帯における暴露試験を通じて明らかにした。さらに、このような環境において鋼繊維自体の腐食が進行しない理由について考察を加えるとともに鋼繊維補強コンクリートが内部に埋め込まれた鋼材を防食する主な原因は電気化学的なメカニズムによるものであることを指摘した。

おわりに、今回のSFRCの暴露試験に際し鋼材倶楽部のSFRC特別委員会よりご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。



参 考 文 献

- 1) Hannant, D. J. and Edgington, J. : Rilem Symposium on fibre reinforced cement and concrete, Construction Press, Lancaster, 1, 159, 1975.
- 2) 西・大塩・會根 : 小野田研究報告, Vol.30, No.100, 1978.
- 3) Mangat, P. S. and Kribanandan Gurusamy : Cement and Concrete Research, Vol.18, pp.44, 1988.
- 4) 小林・星野 : 生産研究, 39, 432, 1987.
- 5) 小林・出頭 : コンクリート工学 (論文), Vol.24, No.12-1, pp.91~106, 1986.
- 6) Richartz, W. : Zement-Kalk-Gips, Nr.10, S.447~456, 1969.

(1989.9.29・受付)

---