

# 報告 鋼繊維混入による鉄筋腐食抑制効果

田中博一\*1・栗田守朗\*2

要旨：鋼繊維混入による鉄筋腐食抑制効果を定量的に評価する目的で、鋼繊維の種類（スチール製およびステンレス製）と繊維混入率（0～3vol%）を要因とし、乾湿繰返し環境下における鋼繊維補強コンクリート中の鉄筋の腐食面積率、質量減少率、自然電位などを測定中である。乾湿繰返し期間14週までの結果では、繊維を混入しない場合と比較して、繊維混入率が大きくなるほど鋼繊維混入による鉄筋腐食抑制効果が大きくなり、その効果はスチール製鋼繊維よりステンレス製鋼繊維の方が大きい傾向が認められた。

キーワード：鋼繊維，ステンレス鋼繊維，繊維混入率，鉄筋腐食抑制，塩害

## 1. はじめに

コンクリート中の鉄筋は、強アルカリ環境下にあるため、その表面に不動態被膜が形成され、腐食しにくい状態にある。しかし、塩化物イオンが一定量以上存在する場合や中性化により鉄筋近傍のpHが低下した場合には、鉄筋表面の不動態被膜が破壊され、鉄筋が腐食しやすくなる。鉄筋は腐食するとその体積が2～3倍程度となるため、その膨張圧によりコンクリートにひび割れが発生して劣化が進行し、かぶりコンクリートがはく落したり、鉄筋断面積の減少によって部材の耐力が低下する。したがって、コンクリート構造物を長く供用するためには、コンクリート中の鉄筋の腐食を抑制することが極めて重要である。

一方、コンクリートのぜい性的な性質を改善する方法として、鋼繊維、ポリプロピレン繊維、炭素繊維、ガラス繊維などの短繊維をコンクリート中に混入する方法がある。これらの短繊維の中で鋼繊維については、曲げ強度、せん断強度、じん性などのコンクリートの力学的性能を向上させるだけでなく、極めて激しい腐食環境下においても、鋼繊維の腐食はコンクリート表面部に限られ、さらに鋼繊維を混入したコンクリート中の鉄筋の腐食が抑制されることが報告されている<sup>1)-4)</sup>。この特性を活かせば、飛来塩

分や融雪剤による塩害を受ける環境におけるコンクリート構造物の耐久性を鋼繊維混入により向上させることができると考えられる。

鋼繊維混入による鉄筋腐食抑制のメカニズムとしては、(1)鋼繊維がコンクリート表面から侵入する酸素を鋼繊維自体の腐食により消費する<sup>1),2)</sup>、(2)鋼繊維が微細なひび割れの発生を防ぐため塩化物の浸透が抑制される<sup>3)</sup>、(3)鋼繊維混入による鋼材の表面積の増大が腐食反応を制御する<sup>3)</sup>、などが考えられている。しかし、鋼繊維混入による鉄筋腐食抑制のメカニズムの把握や抑制効果の定量的評価に対する検討が十分でないのが現状である。

そこで、本研究では、鋼繊維の種類（スチール製、ステンレス製）と繊維混入率（0、1、2、3vol%）を要因とし、乾湿繰返し環境下における鋼繊維補強コンクリート中の鉄筋の腐食面積率、質量減少率、自然電位などを測定中である。実験は現在継続中であり、本報告では、乾湿繰返し期間14週までの結果について述べる。

## 2. 実験概要

### 2.1 要因と水準

本実験の要因と水準を表-1に示す。要因は、鋼繊維の種類と繊維混入率とした。鋼繊維の種

\*1 清水建設(株)技術研究所土木研究開発部 工修(正会員)

\*2 清水建設(株)技術研究所土木研究開発部 主任研究員 工修(正会員)

類はスチール製とステンレス製の2種類，繊維混入率は体積比で1%，2%，3%の3種類とし，繊維を混入しないケースと合わせて全部で7ケースについて検討した。

## 2.2 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント，細骨材は君津産山砂と鳥形山産石灰砕砂を6：4の割合で混合したもの，粗骨材は青梅産硬質砂岩砕石，鋼繊維は両端フック付のスチール製とドックボーン型のステンレス製で，寸法はいずれも0.6×30mmのものを用いた。

本実験の配合を表-2に示す。繊維混入率0%のスランブの目標値を18cmとして試験練りを実施して基準配合を設定し，繊維の影響を検討するため，水セメント比，細骨材率，単位水量および空気量は一定とした。また，鉄筋腐食の原因として塩害を想定し，腐食を促進させるために塩化物イオン量として5.0kg/m<sup>3</sup>のNaClを練混ぜ時に水に溶かして混入した。

## 2.3 供試体の作製方法および暴露条件

供試体の概要を図-1に示す。供試体の形状は，100×150×200mmの直方体とし，かぶり30mmの位置に13mmのみがき丸鋼を2本設置した。打込み後材齢1日で脱型し，材齢7日まで20の室内で湿布養生を行った。その後，1週間の気中乾燥を行い，暴露面を100×200mmの2側面とするため，暴露面以外の表面をエポキシ樹脂によりシールした。

供試体の暴露条件は，鉄筋腐食を促進させるために乾湿繰り返し環境とした。乾燥期間は20

，60%RHの室内に静置し，湿潤期間は20の室内で十分に濡れたウエスで供試体を覆った。なお，乾燥と湿潤は1週間ごとに繰り返した。

各ケースについて，自然電位を測定する供試体を1体，所定の期間で鉄筋を取り出し腐食面積率および質量減少率を測定する供試体を5体作製した。

## 2.4 測定項目

### (1)フレッシュ性状および圧縮強度

フレッシュ性状は，練上り直後のスランブ(JIS A 1101)，空気量(JIS A 1128)およびコンクリート温度を測定した。圧縮強度は，JIS A 1108に準じて20の水中養生を行った100×200mmの供試体を用いて材齢28日で測定した。

表-1 要因と水準

要因	水準
鋼繊維の種類	スチール製，ステンレス製
繊維混入率	0，1，2，3vol%

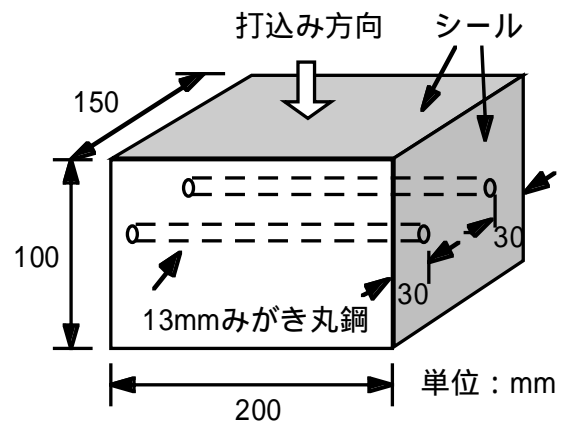


図-1 供試体の概要

表-2 配合

鋼繊維の種類	繊維混入率	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						AE減水剤 (ml/m <sup>3</sup> )	AE助剤 (ml/m <sup>3</sup> )
					W	C	S	G	繊維	NaCl		
無混入	0%	60	4.5	58	180	300	764	8.2	750	1024	0	600
スチール製鋼繊維	1%									998	80	0
	2%									972	160	0
	3%									946	240	0
ステンレス製鋼繊維	1%									998	80	600
	2%									972	160	900
	3%									946	240	900

## (2) 外観観察

ひび割れの発生、鉄筋や繊維の発錆による錆び汁などによる暴露面の変状や供試体から取り出した鉄筋の腐食状況を目視により観察した。

## (3) 腐食面積率

供試体から取り出した鉄筋の腐食箇所を透明なシート（OHPフィルム）に写し取り、スキャナーを用いてパソコンに取り込んで画像処理ソフトを用いて腐食面積を求め、腐食前の鉄筋の表面積に対する比として腐食面積率を算出した。なお、同一供試体に設置した2本の鉄筋の測定値を平均した。

## (4) 質量減少率

供試体から取り出した鉄筋を60℃の10%クエン酸二アンモニウム水溶液に24時間浸漬し、腐食生成物を除去した後の鉄筋の質量減少率を式(1)により算出した。なお、同一供試体に設置した2本の鉄筋の測定値を平均した。

$$W = (W_0 - W_1) / W_0 \times 100 - W_D \times (100 - S) / 100 \quad (1)$$

ここで、

W：質量減少率(%)

$W_0$ ：腐食前の鉄筋質量(mg)

$W_1$ ：腐食生成物除去後の鉄筋質量(mg)

$W_D$ ：腐食していないダミー鉄筋の酸浸漬による質量減少率(%)

S：腐食面積率(%)

## (5) 全塩分量

鉄筋位置付近より採取したコンクリートを試料とし、JCI-SC5に準拠して全塩分量を求めた。

## (6) 自然電位

外部電極を用いた場合、かぶりコンクリートに存在する鋼繊維の影響を受けるため、自然電位は、鉄筋に取り付けた埋込み型のミニセンサ<sup>4)</sup>を用いて測定した。ミニセンサは、外径13mm、高さ7mm程度の円筒状のものであり、写真-1に示すようにかぶり30mmに設置した2本の鉄筋のうち1本の上面に2個取り付けた。測定値は銅硫酸銅電極電位に換算して評価した。ASTM C 876による判定基準を表-3に示す。

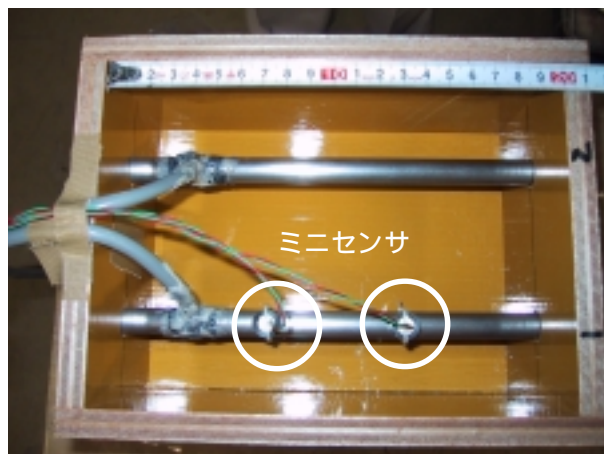


写真 - 1 埋込み型ミニセンサ設置状況

表 - 3 ASTMの腐食判定基準

電位Eの範囲 (mV vs CSE)	コンクリート中の鋼材腐食の可能性
- 200 < E	90%以上の確率で腐食なし
- 350 < E - 200	不確定
E - 350	90%以上の確率で腐食あり

表 - 4 フレッシュ性状、圧縮強度の測定結果

鋼繊維の種類	繊維混入率	スラブ (cm)	空気量 (%)	温度 ( )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
無混入	0%	18.6	4.8	22.0	32.3
スチール製鋼繊維	1%	10.9	5.1	22.0	31.8
	2%	6.2	6.2	22.0	29.6
	3%	2.3	7.4	21.0	29.8
ステンレス製鋼繊維	1%	11.8	4.4	22.0	33.8
	2%	3.9	3.7	22.0	37.2
	3%	0.2	3.1	22.0	39.1

## 3. 結果および考察

### 3.1 フレッシュ性状および圧縮強度

フレッシュ性状および圧縮強度の測定結果を表-4に示す。鋼繊維の種類にかかわらず、繊維混入率が大きくなるにつれ、スラブが小さくなった。圧縮強度は、繊維混入率0%と比較してスチール製鋼繊維混入率2%、3%が若干小さく、ステンレス製鋼繊維混入率2%、3%が若干大きくなった。これは、空気量の影響であると考えられる。

### 3.2 外観観察

乾湿繰返し期間14週までは、いずれの場合においても、暴露面にはひび割れの発生や鉄筋腐食による錆汁などの変状は認められなかった。スチール製鋼繊維を混入したものについては、混入率2%、3%では乾湿繰返し期間4週で、混入率1%では乾湿繰返し期間9週で暴露面にスチール製鋼繊維の腐食による点状の錆びが発生した。なお、ステンレス製鋼繊維については、点状の錆びは確認されなかった。

乾湿繰返し期間14週で鉄筋を取り出した際に供試体の破断面を観察したところ、スチール製鋼繊維の腐食は供試体の表層のみに限られており、内部では腐食していなかった。

乾湿繰返し期間14週で供試体より取り出した鉄筋の腐食状況の一例を写真-2および写真-3に示す。いずれの場合においても、鉄筋の腐食は下面に集中しており、上面ではほとんど生じていなかった。これは、本実験に用いたコンクリートの単位水量が比較的大きいため、ブリーディングの影響によるものと考えられる。鉄筋の腐食は、ほとんどの部分が比較的軽微な均一腐食であり、孔食などの局部的な腐食はほとんど認められなかった。したがって、現段階における鉄筋の腐食は、ブリーディングによる影響が大きい段階にあると考えられる。

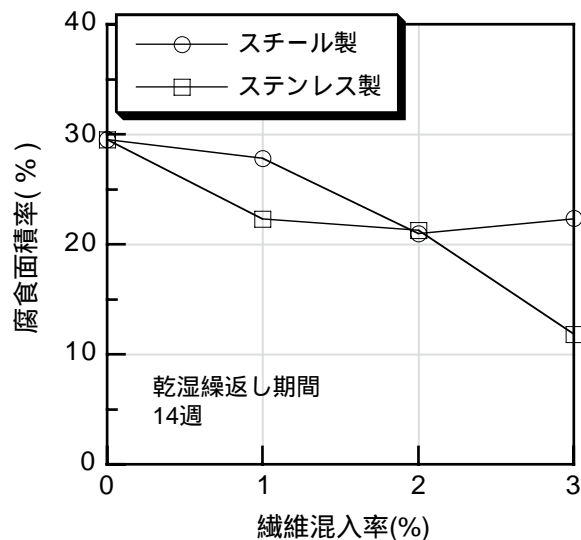


図 - 2 繊維混入率と腐食面積率の関係

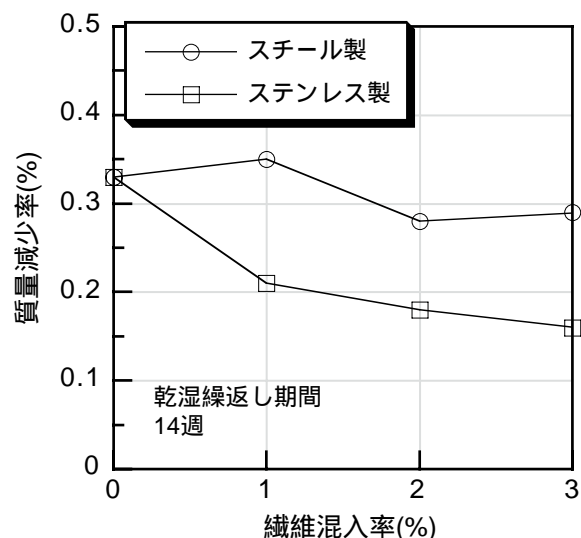


図 - 3 繊維混入率と質量減少率の関係

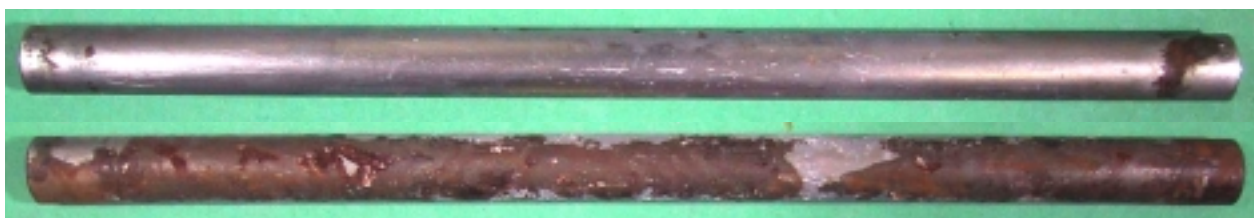


写真 - 2 繊維混入率0%の鉄筋腐食状況 (乾湿繰返し期間14週, 上: 上面, 下: 下面)

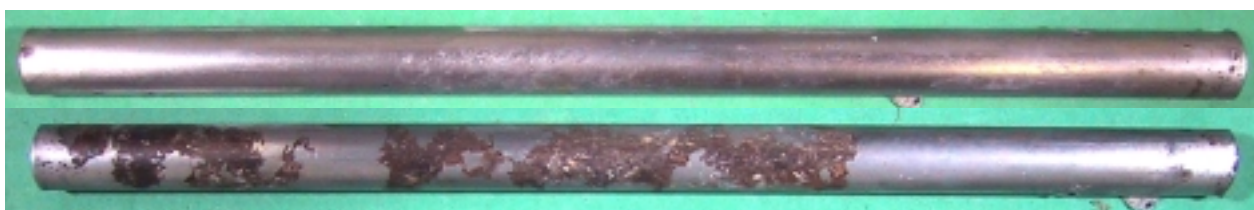


写真 - 3 ステンレス製鋼繊維混入率3%の鉄筋腐食状況 (乾湿繰返し期間14週, 上: 上面, 下: 下面)

### 3.3 腐食面積率

乾湿繰返し期間14週における腐食面積率を図-2に示す。繊維混入率0%に対して、繊維混入率が大きくなるほど、腐食面積率が小さくなる傾向が認められた。スチール製鋼繊維とステンレス製鋼繊維を比較すると、繊維混入率2%では同程度あったが、繊維混入率1%および3%ではスチール製鋼繊維よりステンレス製鋼繊維の方が腐食面積率が小さくなった。

### 3.4 質量減少率

乾湿繰返し期間14週における鉄筋の質量減少率を図-3に示す。繊維混入率0%に対して、スチール製鋼繊維混入率1%を除くと、繊維混入率が大きくなるほど質量減少率が小さくなる傾向が認められた。鋼繊維の種類を比較すると、繊維混入率にかかわらず、スチール製鋼繊維よりステンレス製鋼繊維の方が質量減少率が小さくなった。

乾湿繰返し期間14週における腐食面積率と質量減少率の関係を図-4に示す。腐食面積率が大きくなるほど、質量減少率が大きくなる傾向が認められた。

今回の測定結果では、腐食面積率、質量減少率ともに、スチール製鋼繊維混入率1%の鉄筋腐食抑制効果がほとんど認められなかった。これは、既往の報告<sup>1),3)</sup>とは異なる結果となった。本報告は、乾湿繰返し期間が14週と短期における結果であり、3.2で述べたように現段階の鉄筋の腐食は主にブリーディングの影響によるものと考えられ、今後、塩害による腐食の影響を把握するには長期的に検討する必要があると考えられる。

鋼繊維混入による鉄筋腐食抑制のメカニズムとして、かぶりコンクリート中に存在する鋼繊維自身の腐食により酸素が消費されることが考えられるが、この場合、ステンレス製鋼繊維より腐食しやすく、酸素消費量が多いスチール製鋼繊維の方が鉄筋腐食抑制効果が大きくなると考えられる。しかし、本実験の結果では、繊維混入率が同じ場合、スチール製鋼繊維よりステンレス製鋼繊維の方が鉄筋腐食抑制効果が大き

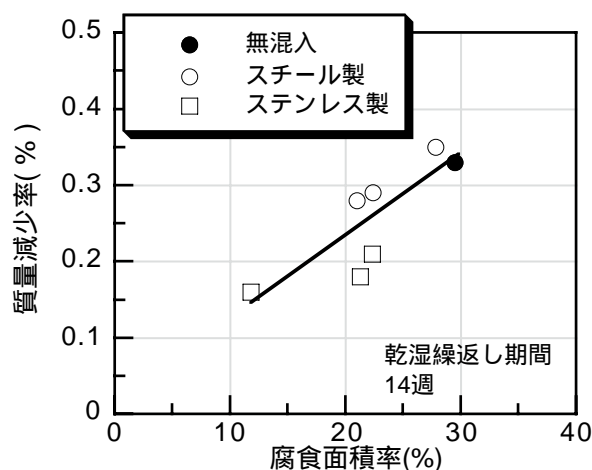


図-4 腐食面積率と質量減少率の関係

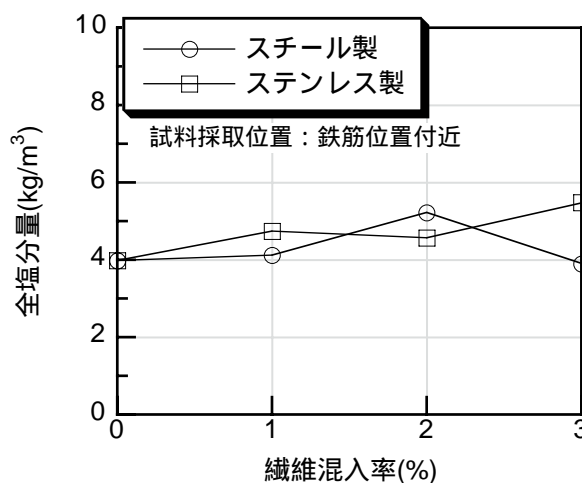


図-5 繊維混入率と全塩分量の関係

くなる傾向が認められた。この理由については現状では不明であり、今後、長期的に検討して、その腐食抑制メカニズムを明らかにしていく予定である。

### 3.5 全塩分量

鉄筋位置付近から採取したコンクリートの全塩分量を図-5に示す。鋼繊維の種類、繊維混入率によらず、全塩分量はほぼ同程度であり、一般的な腐食発生限界濃度(1.2kg/m³)以上であった。塩分量が繊維を混入していないものと同程度である場合でも、鋼繊維による鉄筋腐食抑制効果が得られることが確認された。

### 3.6 自然電位

乾湿繰返し期間14週における埋込み型ミニセンサによる自然電位の測定結果を図-6に示す。



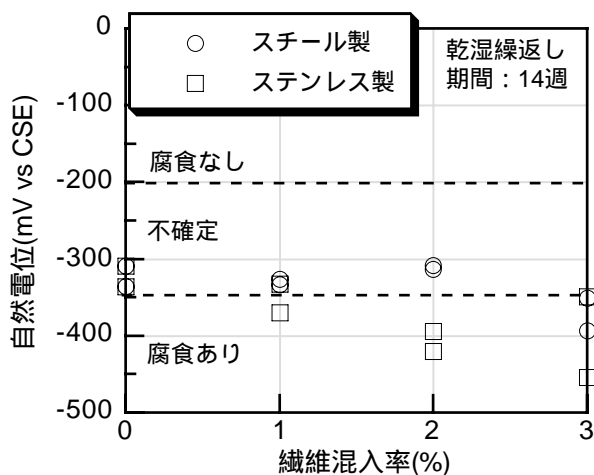


図 - 6 繊維混入率と自然電位の関係

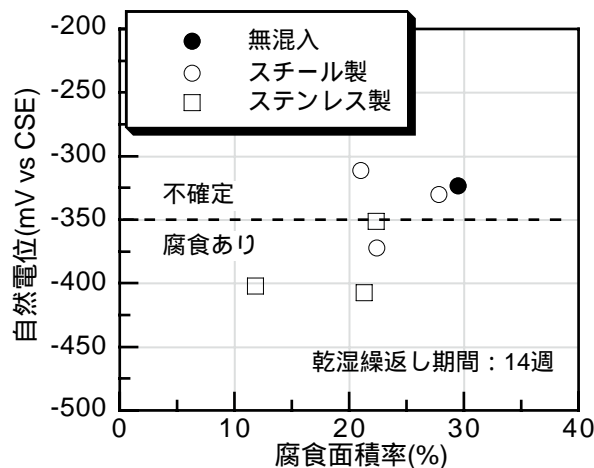


図 - 7 腐食面積率と自然電位の関係

鋼繊維の種類に関わらず，繊維混入率が大きくなるほど自然電位が卑になる傾向が認められた。繊維混入率 0%，スチール製鋼繊維混入率 1%，2%およびステンレス製鋼繊維繊維混入率 1%の 1 部が不確定領域であり，その他は腐食領域であった。

腐食面積率と自然電位の関係を図 - 7 に示す。腐食面積率が比較的小さい場合でも，自然電位が卑な傾向にあり，腐食面積率と自然電位には良好な相関性が認められなかった。質量減少率と自然電位の関係も同様であった。腐食面積率が小さい場合に自然電位が卑な傾向にある原因については現状では不明であり，今後長期的な測定結果より検討する必要がある。

#### 4. まとめ

本報告で得られた知見を以下に示す。

- (1) 乾湿繰返し期間 14 週では，鉄筋の腐食はブリーディングの影響により下面に集中し，比較的軽微な均一腐食であった。
- (2) スチール製鋼繊維では，暴露面に点状の錆びが観察されたが，スチール製鋼繊維の腐食は供試体の表層部に限られ，内部では腐食していなかった。
- (3) スチール製鋼繊維，ステンレス製鋼繊維ともに繊維混入率 0% に対して，混入率が大きくなるほど，鉄筋腐食抑制効果が大きくなる傾向が認められた。

(4) 繊維混入率が同じ場合，スチール製鋼繊維よりステンレス製鋼繊維の方が鉄筋腐食抑制効果が大きい傾向が認められた。

(5) 塩分量が繊維を混入していないものと同程度である場合でも，鋼繊維による鉄筋腐食抑制効果が得られることが確認された。

今後，長期的に実験を継続して腐食面積率，質量減少率，自然電位などを測定し，鋼繊維混入による鉄筋腐食抑制のメカニズムを検討し，鉄筋腐食抑制効果を定量的に評価していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 河田和久，阪下真司，濱崎義弘，杉本克久：微細金属添加によるモルタル中鉄筋の耐食性向上技術，コンクリート工学，Vol.38，No.2，pp.29-33，2000.2
- 2) Abdullah K.SOMEH，佐伯昇，堀口敬，能登谷武紀：亜鉛めっき鋼繊維による鉄筋コンクリート部材の防食挙動と性能，土木学会論文集，No.655/V-48，pp.35-46，2000.8
- 3) 辻恒平，星野富夫，小林一輔：鋼繊維補強コンクリートの防食機構，生産研究，41 巻 10 号，pp.62-64，1989.10
- 4) 下澤和幸，田村博，永山勝，高見法侑：鋼繊維補強モルタル中の鉄筋腐食モニタリング，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.847-852，1997