

報告 鋼繊維補強モルタル中の鉄筋腐食モニタリング

下澤 和幸^{*1}・田村 博^{*2}・永山 勝^{*3}

要旨：鋼繊維補強モルタル中の鉄筋腐食メカニズムを電気化学的に解釈することを目的に，鋼繊維補強モルタル中の埋設鉄筋の近傍にミニセンサを配置して屋外暴露実験を行い，電気化学的特性値を測定した。現在も実験は継続中であるが，暴露材齢約 2000 日までに得られた連続モニタリングの各測定値ならびに一部解体させた鉄筋の腐食状況から判断して，鋼繊維補強モルタルにより内部鉄筋の腐食抑制の効果が認められる可能性の高いことが判った。また，塩化物・酸素濃度を变化させた溶液実験の結果より，鋼繊維補強モルタル内部の酸素を鋼繊維が消費し，酸素濃度が低下することで，鉄筋腐食を抑制していると推定した。

キーワード：鋼繊維補強モルタル，鉄筋腐食，電気化学的特性値，溶存酸素濃度，塩化物濃度

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリートにおいては，ごく表面の鋼繊維は腐食するものの，内部の鋼繊維や鉄筋には腐食が認められないことが報告されている¹⁾。本研究の最終目的は，鋼繊維補強モルタル中の鋼繊維および鉄筋の腐食メカニズムを電気化学的に解釈することにある。

本研究では，塩化物イオン含有量を 0 および 3 kg/m³ と変化させ，鋼繊維またはステンレス鋼繊維を混入した鋼繊維補強モルタル供試体と比較用の普通モルタル供試体を製作し，それぞれを海洋（千葉県勝浦市）および内陸（大阪府吹田市）暴露実験に供した。埋設したミニセンサによる連続腐食モニタリングで得られた電気化学的特性値，および電流計により連続的に測定されたマクロセル腐食電流値に基づいて，鋼繊維補強モルタル供試体中の鉄筋の腐食状態を推定した。

既報^{2) - 4)}において，内陸暴露（暴露期間約 7 ヶ月と約 53 ヶ月間）および海洋暴露（暴露期間約 23 ヶ月間）実験における連続モニタリングの結果，ならびにコントロール供試体より取り出

した内部鉄筋の腐食面積・減量測定の結果から，鋼繊維補強モルタルによって内部鉄筋の腐食抑制効果が認められる可能性の高いことを報告した。

本報では，まず，内陸暴露供試体について，暴露期間約 1500 ~ 約 2000 日の間（2000 年 7 月から 2001 年 10 月まで）における連続腐食モニタリングによって得られた電気化学的特性値（自然電位，分極抵抗および液抵抗）の測定結果およびマクロセル腐食電流測定結果，ならびにコントロール供試体（ミニセンサは埋設していない）を破壊して埋設鉄筋を取り出し，約 1600 日目における腐食面積および腐食減量を測定した結果に基づき，鋼繊維補強モルタル中の鉄筋腐食状態について検討した結果について述べる。

次いで，鉄筋腐食に及ぼす塩化物と酸素の影響について調べるため，塩化物濃度および酸素濃度を变化させた溶液中において実施した鉄筋腐食実験の結果について述べる。なお，同腐食実験を実施した理由は，暴露実験結果によれば，鋼繊維補強モルタルによって埋設鉄筋の腐食が抑制されており，その原因のひとつとして鋼繊

*1（財）日本建築総合試験所 材料部材料試験室（正会員）

*2（財）日本建築総合試験所 材料部長 工博（正会員）

*3（財）日本建築総合試験所 材料部材料試験室長 博（工）（正会員）

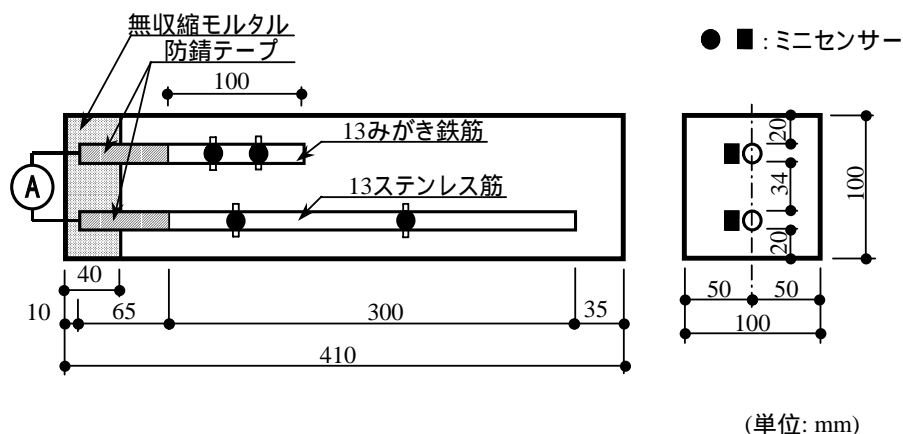


図 - 1 供試体の外形および寸法

表 - 1 モルタルの種類

種類	W/C	C/S	塩化物量	鋼繊維量
普通モルタル	60%	36%	0kg/m ³	0 vol%
			3kg/m ³	
鋼繊維補強モルタル			0kg/m ³	1 vol%
			3kg/m ³	
ステンレス鋼繊維補強モルタル			0kg/m ³	1 vol%
			3kg/m ³	



写真 - 1 内陸暴露状況

維を混入したことにより、モルタル中の酸素濃度が低下したと予想されたためである。

2. 実験概要

2.1 実験（内陸暴露実験）

本実験に用いた供試体は、図 - 1 に示す外形寸法が 100×100×410mm の直方体である。供試体中の鉄筋としては、打設面からかぶり厚さ 20mm の位置にアノード鉄筋(13mm みがき鉄筋、長さ：100mm)を、型枠底面からのかぶり厚さ 20mm の位置にカソード鉄筋(13mm ステンレス筋、長さ：300mm)をそれぞれ配置した。モルタルには、表 - 1 に示す塩化物イオン含有量 0 および 3 kg/m³ に変化させた普通モルタル (W/C=60% ,C/S=36%)、およびその普通モルタルに長さ 30mm の鋼繊維またはステンレス鋼繊維を 1.0vol% 混入させた繊維入りモルタルを用いた。ミニセンサを、試験鉄筋の側面に 2 個

ずつ、鉄筋からの距離 1mm に固定し、交流矩形波電流分極法による腐食モニタリングによって、自然電位、分極抵抗および液抵抗を連続測定した。また、アノード鉄筋とカソード鉄筋間のマクロセル腐食電流を測定するため、各鉄筋にシールドコードを配線し、電流計により連続測定した。2 種類の鋼繊維補強モルタルおよび普通モルタル供試体は、脱型後から 28 日間湿空養生 (20℃, 100%R.H.) を行ったのち、海洋および内陸暴露実験に供した(写真 - 1 参照)。鉄筋腐食モニタリングおよびマクロセル腐食電流測定は、暴露実験開始と同時に行っており、各測定はひとつの供試体について同時に行うことは不可能であるため、腐食モニタリングは 4 時と 14 時、腐食電流測定は 6 時と 12 時にそれぞれ行った。また、腐食状況の確認のためにそれぞれの種類ごとに製作したコントロール供試体を破壊

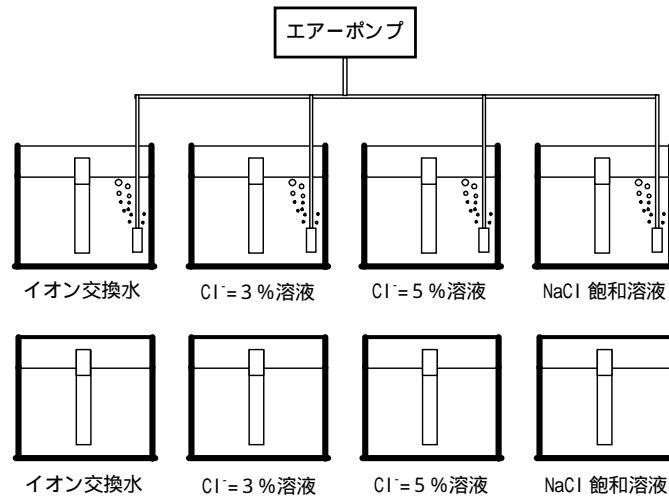


図 - 2 溶液実験の種類

し、暴露期間約 1600 日目における埋設鉄筋の腐食面積および腐食減量を測定した。

2.2 実験（溶液実験）

図 - 2 に示す実験装置により実験を行った。塩化物・酸素濃度の影響を調べることに限定して実験を行っており、実験溶液はイオン交換水、塩化物イオン濃度 3% および 5% 溶液、ならびに NaCl 飽和溶液の 4 種類とした。実験では各溶液を実験容器に 1.5 L ずつ注水し、13mm みがき鉄筋を露出長さ 60mm に調整して容器のほぼ中央に浸漬した。また、各溶液ごとに密閉状態のものとエア-ポンプにより空気を供給し溶存酸素を初期状態から保持したものを用意し、120 時間実験を継続した。なお、実験中には溶存酸素電極により、各溶液の溶存酸素量を測定した。浸漬実験終了後直ちに、試験鉄筋に発生した錆を取り除き、腐食減量を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 実験（屋外暴露実験）

内陸暴露実験における、暴露期間約 1500 ~ 2000 日間の連続腐食モニタリングおよび腐食電流測定の結果、ならびにコントロール供試体による約 1600 日目における埋設鉄筋の腐食面積および腐食減量の測定結果について述べる。なお、ステンレス鋼繊維補強供試体の測定結果については、本報では割愛した。

(1) 自然電位測定値は、塩化物を含んだ普通モルタル供試体の場合、測定値が大きく変動を繰り返しながら卑変ののちに貴変する傾向を示し、徐々に卑変している（図 - 3 a）参照）。一方、鋼繊維補強モルタル供試体は、普通モルタルの経時変化と同様に、測定値は変動を繰り返し、卑変ののちに貴変する傾向にあるが、およそ -100mV を中心として変動を繰り返している（図 - 3 b）参照）。それぞれの自然電位測定値の経

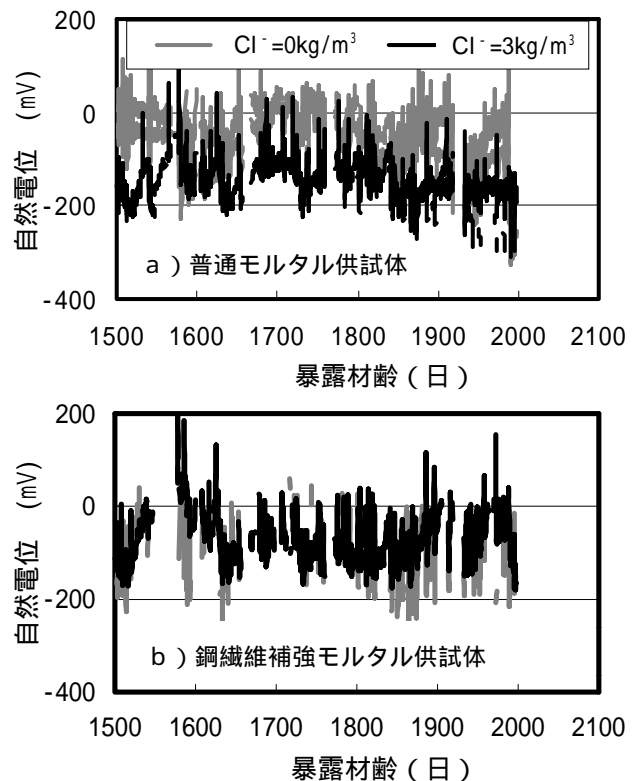


図 - 3 自然電位の経時変化

時変化の傾向から推定して、塩化物を含んだ場合には普通モルタル供試体では、鋼繊維補強モルタル供試体に比べて、埋設鉄筋の腐食発生傾向の大きいことが判った。暴露材齢約 2000 日間（約 5.5 年間）にわたる長期間の自然電位測定結果により、鋼繊維補強モルタルの埋設鉄筋に対する腐食抑制効果が確認できた。

(2)分極抵抗測定値からは、以下のことが判った。塩化物を含む場合、普通モルタル供試体は鋼繊維補強モルタル供試体に比べ、分極抵抗測定値は小さな値を示しており、埋設鉄筋の腐食発生傾向が大きいことが判った（図 - 4 a）および b）参照）。また、塩化物を含まない場合も、塩化物を含む供試体と同様の傾向となり、普通モルタル供試体は鋼繊維補強モルタル供試体に比べ、分極抵抗測定値は小さな値を示した（図 - 4 a）および b）参照）。以上のことから、長期間にわたる分極抵抗測定結果からも、鋼繊維補強モルタルの埋設鉄筋に対する腐食抑制効果が確認することができた。なお、普通モルタル供試体では塩化物を含まない供試体が塩化物を含む供試体に比べて小さな値を示しており、腐食傾向が強いと推定できる。しかし、後述のとおり塩化物を含まない供試体の鉄筋には腐食が認められなかった。この点についての原因究明については、今後の課題とする。

(3)液抵抗測定値は、塩化物の有無にかかわらず普通モルタル供試体が鋼繊維補強モルタル供試体に比べて小さな値を示しており、埋設鉄筋の腐食が発生しやすい環境にあると推定することができる（図 - 5 a）および b）参照）。長期間にわたる液抵抗測定値から、鋼繊維補強モルタル供試体は普通モルタル供試体に比べ、埋設鉄筋周辺的环境が腐食を抑制する傾向にあることが判った。

(4)マクロセル腐食電流値は、塩化物を含まない供試体ではいずれの供試体も比較的小さく、時折 200 ~ 300nA/cm² 程度の電流が測定される程度である（図 - 6 a）および b）参照）。一方、塩化物を含む鋼繊維補強モルタル供試体は、塩

化物を含まない供試体と同様、ほとんど腐食

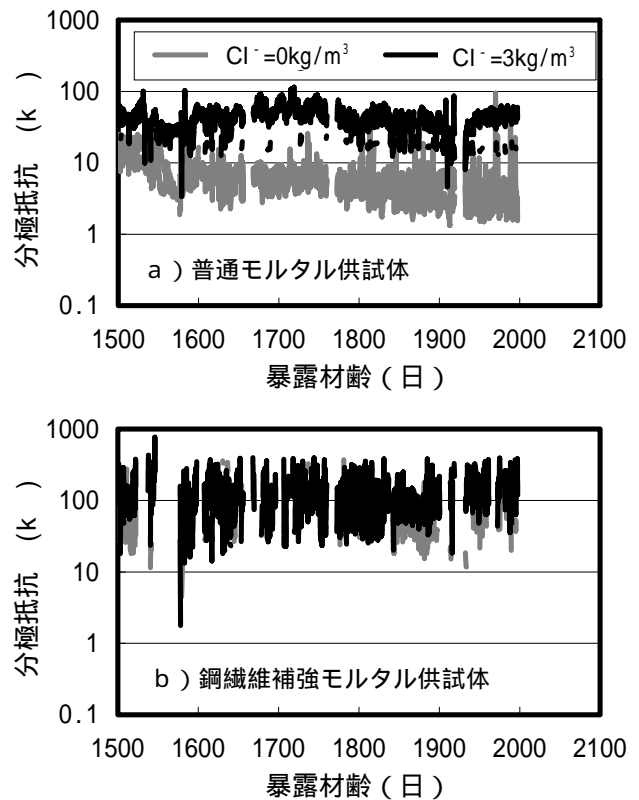


図 - 4 分極抵抗の経時変化

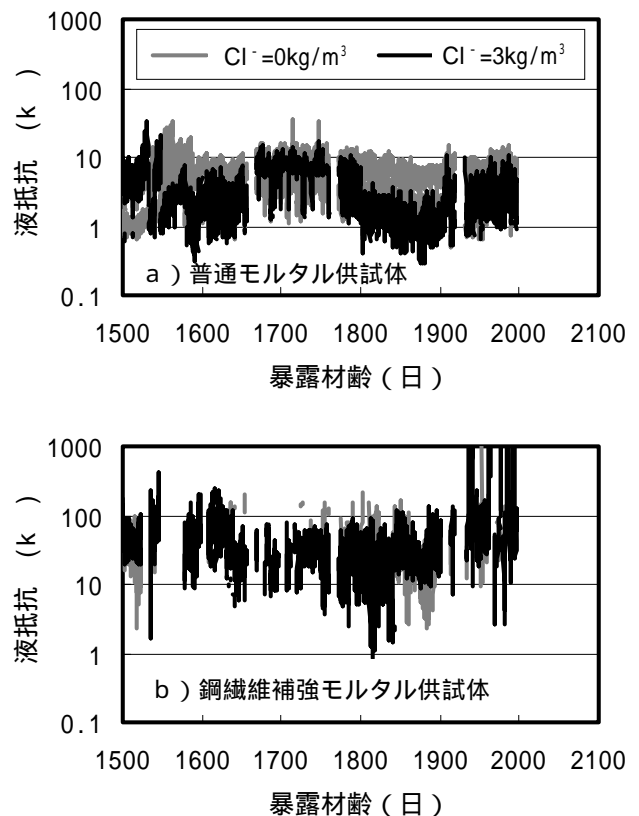


図 - 5 液抵抗の経時変化

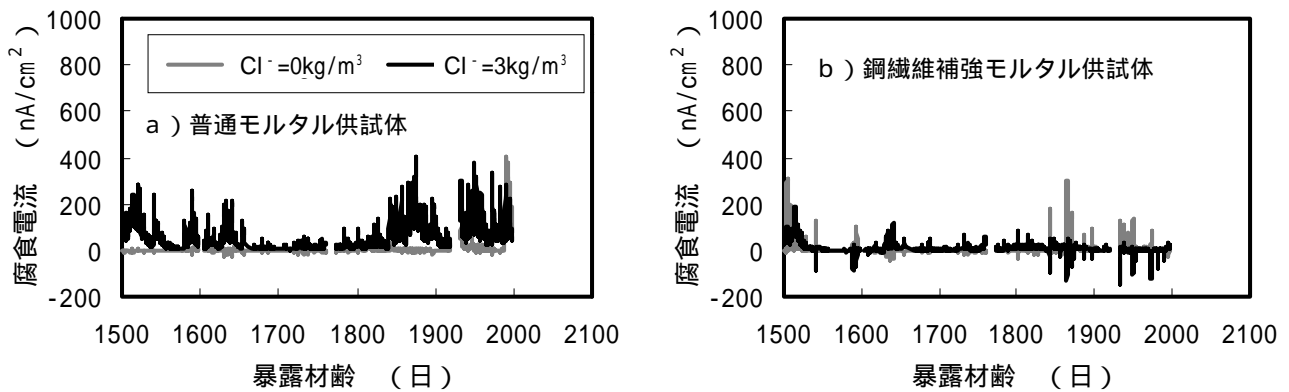




図 - 6 マクロセル腐食電流の経時変化

表 - 2 試験鉄筋の腐食面積および腐食減量

供試体	鉄筋腐食状況	腐食面積 (mm ² : %)	腐食減量 (mg : %)
普通モルタル (Cl ⁻ = 3 kg/m ³)	 上面 下面	3671 : 90.0 (孔食 : 327)	572 : 0.58
鋼繊維補強 モルタル (Cl ⁻ = 3 kg/m ³)	 上面 下面	2882 : 70.6 (孔食 : 46)	94 : 0.09

■ : 孔食 ■ : 表面腐食

電流は流れていないが(図 - 6 b)参照), 普通モルタル供試体では, 数十~約 400nA/cm²程度のマクロセル腐食電流が常時流れている状態にあり(図 - 6 a)参照), 埋設鉄筋の腐食発生傾向が大きいといえる。以上のとおり, マクロセル腐食電流測定値からも鋼繊維補強モルタル中の埋設鉄筋に対する腐食抑制効果が確認できた。(5)暴露材齢約 1600 日目における埋設鉄筋の腐食面積および腐食減量を測定した結果, 塩化物を含んだ普通モルタル供試体および鋼繊維補強モルタル供試体において表 - 2 に示す鉄筋腐食が確認された。腐食面積は, 普通モルタル供試体が鉄筋表面の 90%の範囲に, 鋼繊維補強モルタル供試体では鉄筋表面の 70%の範囲に腐食が発生していた。腐食面積に大差はなかったが,

各鉄筋下面に発生した孔食の面積に違いがあり, 普通モルタル供試体は鋼繊維補強モルタル供試体の約 8 倍であった。腐食減量には明瞭な違いがあり, 普通モルタル供試体は鋼繊維補強モルタル供試体の約 6 倍であった。なお, 塩化物を含まない供試体中では鉄筋腐食は認められなかった。以上のことから, 鋼繊維補強モルタルによる埋設鉄筋の腐食抑制効果を確認することができた。

3.2 実験 (溶液実験)

塩化物濃度および酸素濃度を变化させた溶液中における鉄筋腐食実験の結果について述べる。(1)密閉した溶液中では, 塩化物濃度に依存することなく, 腐食減量は飽和溶液が最も小さな値であった。また, 塩化物を含まないイオン交換

水と塩化物イオン濃度3および5%の試験溶液では、腐食減量には大差なかった(図-7参照)。(2)酸素を常時供給し、初期の状態から溶存酸素量をほぼ一定に保った場合には、鉄筋腐食は進行した。塩化物濃度が高いほど鉄筋腐食は促進されるものではなく、今回の実験では、塩化物イオン濃度3%の条件で最も腐食減量が大きくなった(図-7参照)。

(3)実験期間中の各溶液中の溶存酸素量を、数時間ごとに測定した結果、密閉状態では初期の酸素量から経時とともに減少した。また、酸素供給したものは初期の酸素量から変化することなく一定量を保った。なお、飽和溶液では、初期の段階から溶存酸素は少なかった(図-8参照)。

(4)以上のことから、中性溶液中では、鉄筋腐食に関与するとされる塩化物は、限界濃度を超過して含有すると鉄筋腐食速度は濃度の増大とともに低下することが判った。また、鉄筋腐食の促進には酸素濃度が大きく関与し、酸素濃度依存性のあることが判った。

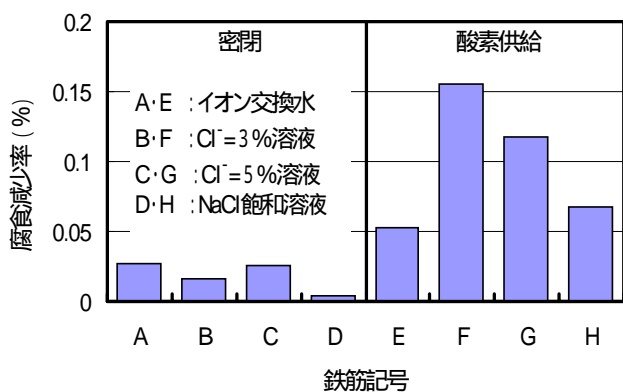


図-7 溶液実験による腐食減量

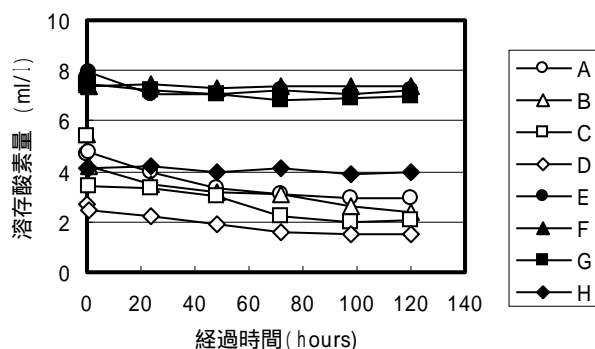


図-8 溶存酸素の経時変化

4. まとめ

約2000日間(約5.5年間)の長期にわたり実施している内陸暴露実験は、まだ継続中ではあるが、鋼繊維補強モルタルによる内部鉄筋の腐食抑制効果が存在する可能性の高いことが、以下のように確認された。

(1)長期的に連続測定されたミニセンサによる鉄筋腐食モニタリングにより得られたすべての電気化学的特性値(自然電位・分極抵抗・液抵抗)とマクロセル腐食電流値の経時変化、およびコントロール供試体中の鉄筋腐食状況(腐食面積・腐食減量)から判断して、鋼繊維補強モルタルによる内部鉄筋の腐食抑制効果が高いことが明らかとなった。

(2)溶液実験の結果から、鉄筋腐食の促進に関与するとされる塩化物は、一定濃度を超過して含有すると鉄筋腐食は緩やかな進行状態となること、鉄筋腐食には酸素濃度が大きく関与し、酸素濃度依存性のあることが判った。

(3)以上の結果、鋼繊維補強モルタルにおいてもモルタル中の酸素を鋼繊維が消費し、内部の酸素濃度を低下させることで、鉄筋腐食を抑制している可能性が高いことが判った。

なお、本実験は、(社)日本鉄鋼連盟スチールファイバー委員会と(財)日本建築総合試験所が共同研究として実施しているものである。

参考文献

- 1) Schupack, M.: Durability of SFRC exposed to severe environments, STELL FIBER CONCRETE US-SWEDEN joint seminar (NSF-STU) Stockholm, pp.479-496, 3-5 June, 1985
- 2) 下澤和幸・田村博・永山勝・高見法侖: 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
- 3) 山本祐子・田村博・永山勝・下澤和幸: 鋼繊維補強モルタル中の鉄筋腐食モニタリング, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.955-956, 1999
- 4) 下澤和幸・田村博・永山勝: 鋼繊維補強モルタル中の鉄筋腐食モニタリング(内陸暴露実験について), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.487-488, 2001