

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*¹・高見法侑*³

要旨：鋼繊維補強コンクリート中の鋼繊維ならびに鉄筋の腐食メカニズムを電気化学的に明確にする目的で、鋼繊維補強モルタル供試体中の鋼繊維および鉄筋の近傍にミニセンサーを埋設して促進腐食実験を行い、電気化学的特性値を測定した。また、鉄筋と結線したステンレス筋との間のマクロセル腐食電流も連続的に測定した。まだ実験途中ではあるが、これまでに得られた連続腐食モニタリングによる測定値から判断して、鋼繊維補強モルタル（コンクリート）を用いて内部鉄筋の腐食抑制を行える可能性が高いことが判った。

キーワード：腐食モニタリング^{*}、ミニセンサー、電気化学的特性値、マクロセル腐食電流、鋼繊維

1. はじめに

予てより、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明らかにすることにある。そこで今回の実験では、塩化物イオン含有量を0、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、G B R C鉄筋腐食試験法[2]に従い製作し、それぞれを屋外暴露実験に供した。埋設したミニセンサー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、および腐食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中の鋼繊維ならびに鉄筋の腐食状態を推定した。なお、実験は現在継続中であり、本報は中間報告である。

2. 実験方法

実験に用いた供試体は、外形寸法が100×100×410mmの直方体である。モルタルには、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。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(φ13mm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(φ13mmステンレス筋、長さ:300mm)をそれぞれ配置した(図-1参照)。ミニセンサーは、アノード鉄筋とカソード鉄筋の側面にそれぞれ2個ずつ、鉄筋からの距離1mmに固定して連続腐食モニタリングを行った。モルタル中の鋼繊維についてもミニセンサーを取り付け、腐食モニタリングを行った。図-2に示すように、鋼繊維3本を階段状に取り付けた鋼繊維腐食モニタリング用ミニセンサー(以下、SFセンサーと呼ぶ)を製作し、全供試体にモルタル打設面からの鋼繊維のか

*1: (財) 日本建築総合試験所 材料試験室研究員 (正会員)

*2: (財) 日本建築総合試験所 材料試験室室長, 工学博士 (正会員)

*3: (社) 鋼材倶楽部スチールファイバー委員会委員長

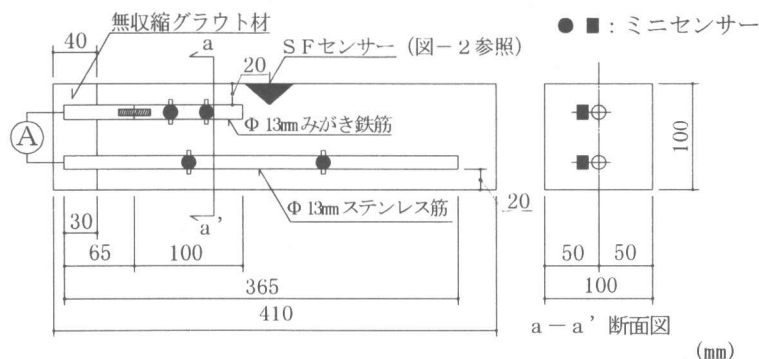


図-1 有筋モルタル供試体の概要

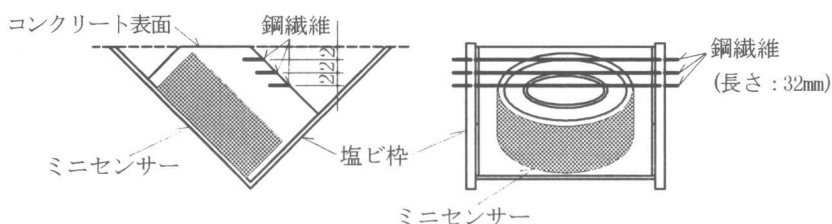


図-2 SFセンサーの概要

ぶり厚さが2, 4および6 mmとなるように配置した。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、それぞれの鉄筋にシールドコードの配線を行った。2種類の鋼繊維補強モルタル供試体および普通モルタル供試体は、それぞれ脱型後から28日間湿空養生(20℃, 100% R. H.)を行ったのち屋外暴露実験に供した。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、屋外暴露実験開始と同時にを行った。それぞれの測定はひとつの供試体を同時に行うことが不可能であるため、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、鋼繊維の腐食モニタリングは測定開始時より多チャンネル鉄筋腐食モニターで自動的に測定していたが、モニタリング対象物が従来より測定している鉄筋等と比べて非常に小さく、分極させるために印加させる最小電流値を流しても分極抵抗や液抵抗の測定が困難であった。そこで、手動式の腐食モニターに切り替え測定を行った。手動測定は、材齢180日目に供試体の表面から散水(約90 L)を行ったのち、材齢196日目までシート養生により散水後の防水処理を施し、1日1回のピッチで行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 鉄筋の電気化学的特性値および腐食電流値

これまでに得られた主な結果は、以下のとおりである。なお、材齢100日目までのデータの図示は割愛した。

①自然電位測定値では、 $Cl^- = 0 \text{ kg/m}^3$ の場合には、いずれの供試体も初期材齢時から0～-200mVの幅で変動し、鋼繊維の有無による差も認められなかった。 $Cl^- = 3 \text{ kg/m}^3$ のそれぞれの供試体は、初期材齢では $Cl^- = 0 \text{ kg/m}^3$ の値とほぼ同じであったが、普通モルタル供試体(以下、PMと略す)は約110日目以降から-100～-400mVの幅で変動し-300mV前後で一定値となった。鋼繊維

維補強供試体（以下，SFRMと略す）は材齢が増しても $\text{Cl}^- = 0 \text{ kg/m}^3$ とほぼ同じ値であり，ステンレス鋼繊維補強供試体（以下，SSFRMと略す）は160日目までは $\text{Cl}^- = 0 \text{ kg/m}^3$ とほぼ同じような値であるが，それ以降-200mV前後の一定値を示した。これらの結果から，SFRMおよびSSFRMの場合には鉄筋腐食を抑制しており，SFRMはSSFRMよりもその効果が大きいと推定された（図-3.1.1～3.1.3 参照）。

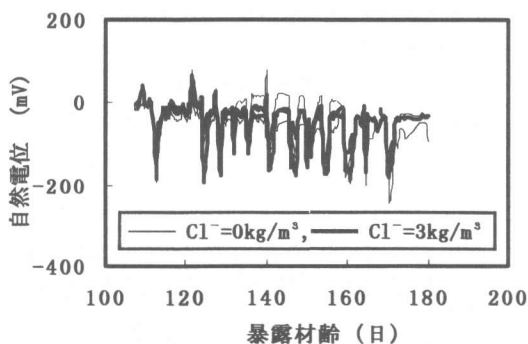


図-3.1.2 自然電位の経時変化
(SFRM, アノード鉄筋)

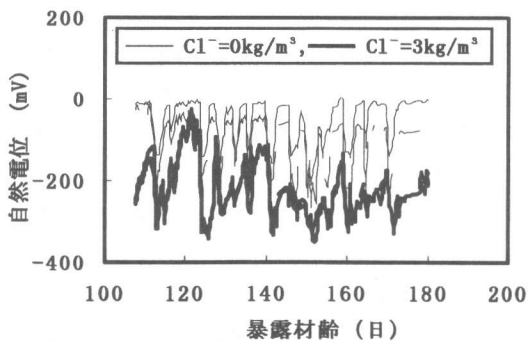


図-3.1.1 自然電位の経時変化
(PM, アノード鉄筋)

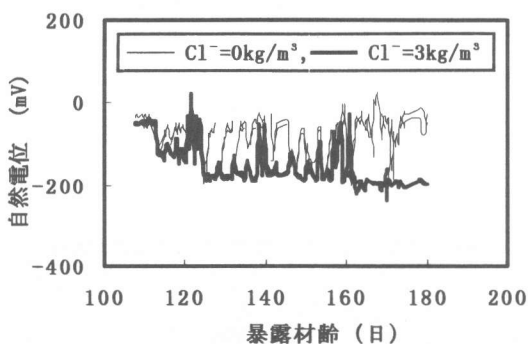


図-3.1.3 自然電位の経時変化
(SSFRM, アノード鉄筋)

②分極抵抗測定値では，いずれの供試体も10 kΩ以上の大きな値を示した。これまでの実験によれば，10kΩ以上の大きな測定値の場合には，センサーの近傍では，腐食は発生していない[3,4]。したがって，センサー固定近傍には現時点では腐食は発生していないものと判断された（図-3.2.1～3.2.3 参照）。

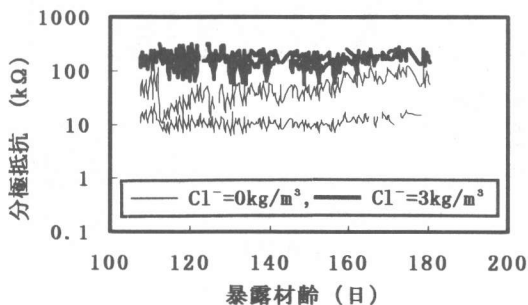


図-3.2.2 分極抵抗の経時変化
(SFRM, アノード鉄筋)

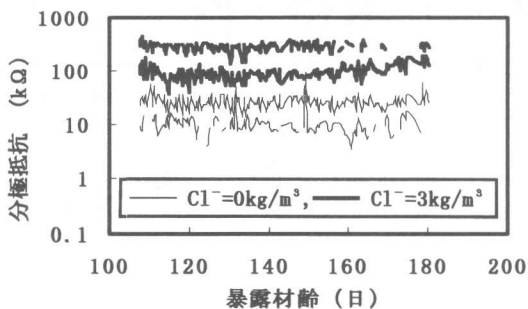


図-3.2.1 分極抵抗の経時変化
(PM, アノード鉄筋)

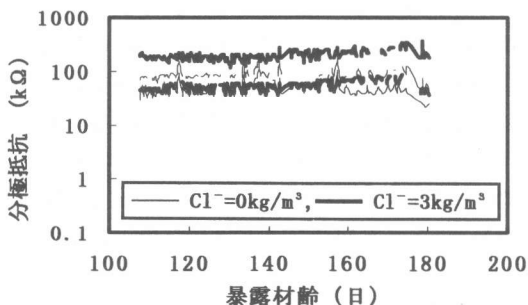


図-3.2.3 分極抵抗の経時変化
(SSFRM, アノード鉄筋)

③液抵抗測定値では、 $\text{Cl}^- = 0 \text{ kg/m}^3$ の場合には、いずれの供試体も約 $1 \text{ k}\Omega \sim 10 \text{ k}\Omega$ 前後の値であった。一方、 $\text{Cl}^- = 3 \text{ kg/m}^3$ の場合には、PMでは $\text{Cl}^- = 0 \text{ kg/m}^3$ の値と同じであるのに対し、SFRMの場合には、初期材齢時は $\text{Cl}^- = 0 \text{ kg/m}^3$ とほぼ同じ様な値であったが、材齢が増すにつれて変動幅が大きくなり測定値が増大した。また、SSFRMも約170日目前後から測定値が増大した。これらの結果から、SFRMおよびSSFRMの場合には、材齢の経過とともに、鉄筋表面における腐食環境が腐食を抑制する方向に変化していることが確認できた。この現象に対する原因の究明については、今後の課題としたい(図-3.3.1~3.3.3参照)。

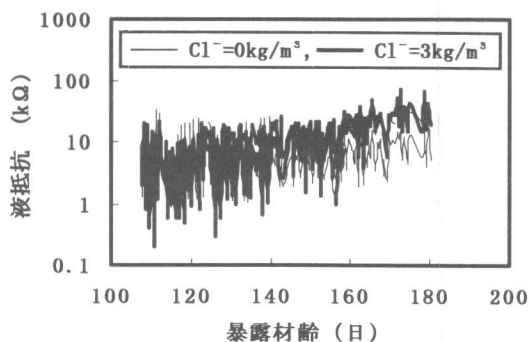


図-3.3.1 液抵抗の経時変化
(PM, アノード鉄筋)

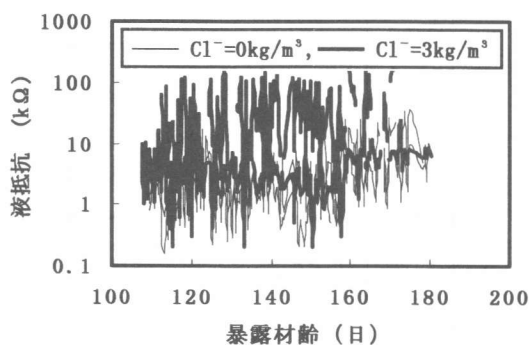


図-3.3.2 液抵抗の経時変化
(SFRM, アノード鉄筋)

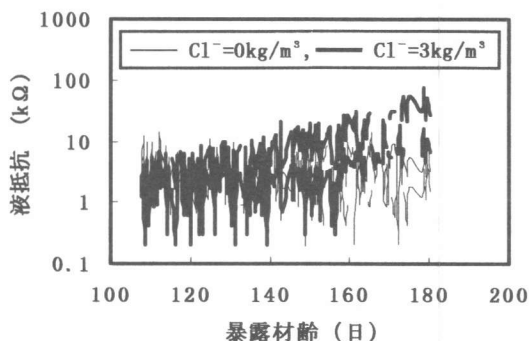


図-3.3.3 液抵抗の経時変化
(SSFRM, アノード鉄筋)

④マクロセル腐食電流値は、 $\text{Cl}^- = 0 \text{ kg/m}^3$ の場合には、いずれの供試体も腐食電流値はほぼ零であった。 $\text{Cl}^- = 3 \text{ kg/m}^3$ のPMの場合には、数 $\text{nA/cm}^2 \sim$ 約 500 nA/cm^2 の幅で変動する腐食電流値が測定された。SFRMでは腐食電流値がほとんど零であり、SSFRMの場合には、SFRMよりも若干大きい微少な腐食電流値が測定された。これらの結果から、SFRMやSSFRMを用いることにより鉄筋の腐食を抑制できる可能性のあることが明らかとなった(図-4.1~4.3参照)。

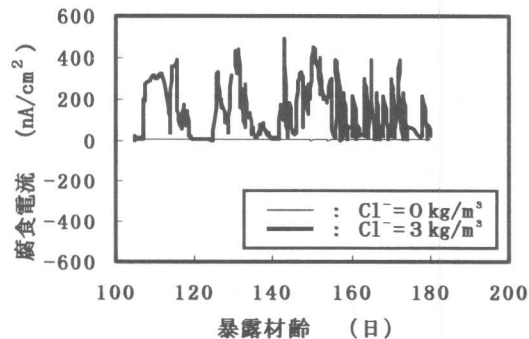


図-4.1 腐食電流の経時変化 (PM)

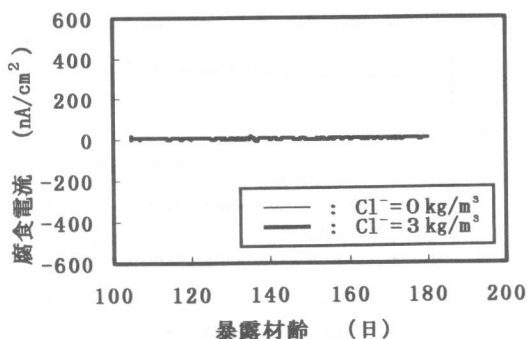


図-4.2 腐食電流の経時変化 (SFRM)

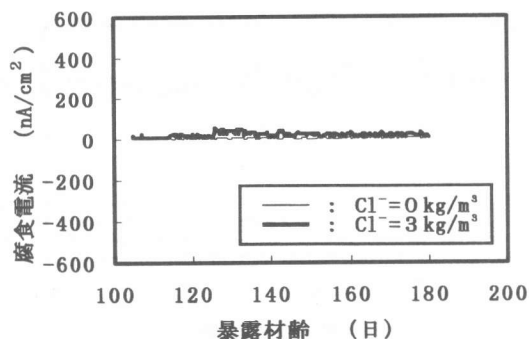


図-4.3 腐食電流の経時変化 (SSFRM)

3. 2 鋼繊維の電気化学的特性値

①鋼繊維の自然電位測定値は、PMでかぶり厚さの違いによる差が認められたが、表面に近いかぶり厚さ2mm鋼繊維が卑な値になったのではなく、かぶり厚さ4、6mmの鋼繊維が卑な値を示した。これは供試体には鋼繊維がSFセンサーに取り付けられた3本のみが存在するだけで、水分の蒸発が遅い内部の鋼繊維において先に腐食が発生する傾向にあると推定された。SFRMおよびSSFRMは、いずれも卑な値ではあるが、かぶり厚さの違いによる測定値の差は認められなかった。

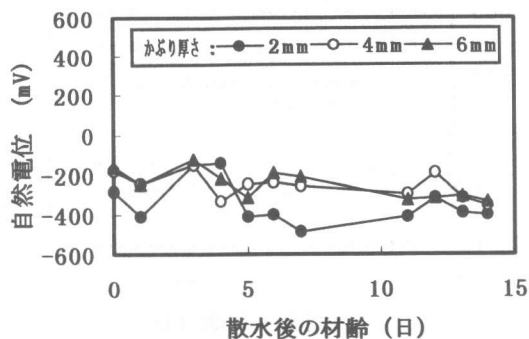


図-5.1.2 自然電位の経時変化 (SFRM, 鋼繊維, $Cl^- = 3\text{kg/m}^3$)

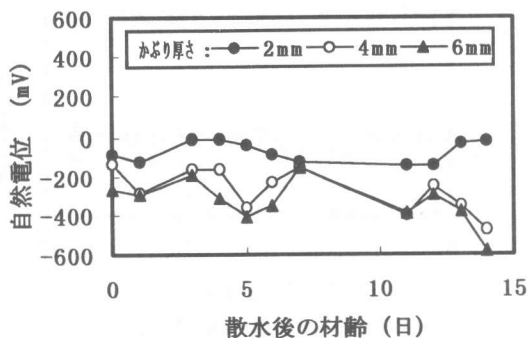


図-5.1.1 自然電位の経時変化 (PM, 鋼繊維, $Cl^- = 3\text{kg/m}^3$)

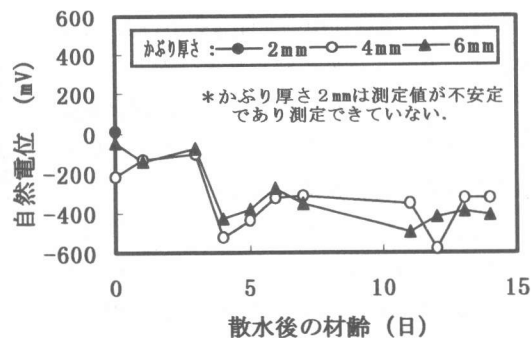


図-5.1.3 自然電位の経時変化 (SSFRM, 鋼繊維, $Cl^- = 3\text{kg/m}^3$)

②分極抵抗測定値は、いずれの供試体も100 kΩと大きな値であった。液抵抗測定値もいずれの供試体も1 kΩ前後の一定値であった。鋼繊維のかぶり厚さの違いによる差も認められなかった。現時点では、まだ供試体表面の鋼繊維にも腐食が観察されておらず、内部の鋼繊維もまだ腐食していないものと考えられる (図-5.2.1～5.3.3 参照)。

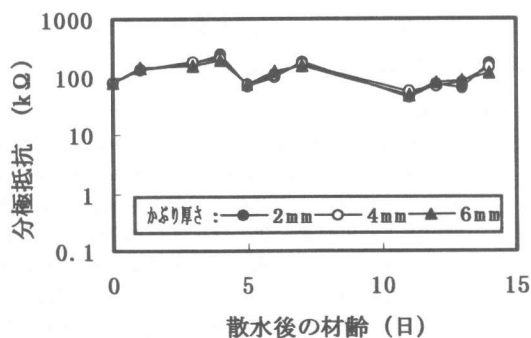


図-5.2.1 分極抵抗の経時変化 (PM, 鋼繊維, $Cl^- = 3\text{kg/m}^3$)

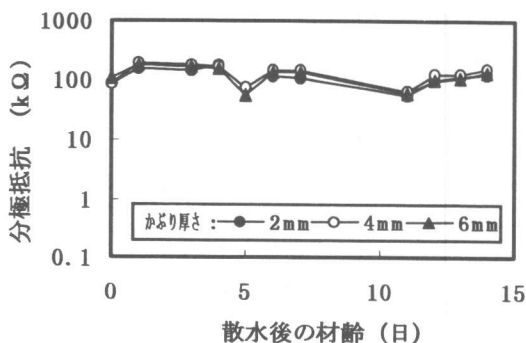


図-5.2.2 分極抵抗の経時変化
(SFRM, 鋼繊維, $Cl=3\text{kg/m}^3$)

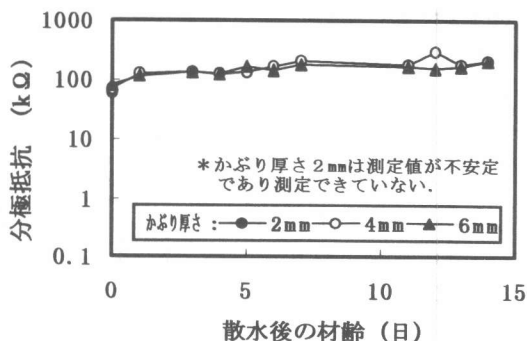


図-5.2.3 分極抵抗の経時変化
(SSFRM, 鋼繊維, $Cl=3\text{kg/m}^3$)

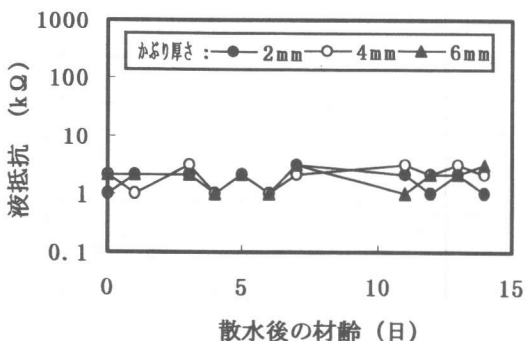


図-5.3.1 液抵抗の経時変化
(PM, 鋼繊維, $Cl=3\text{kg/m}^3$)

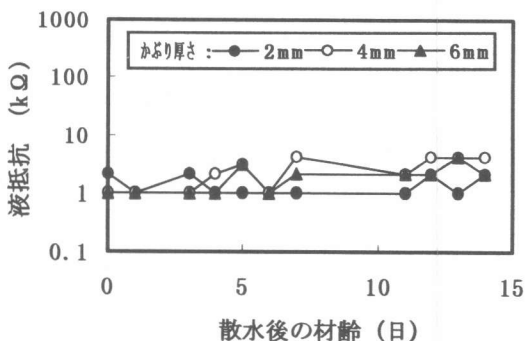


図-5.3.2 液抵抗の経時変化
(SFRM, 鋼繊維, $Cl=3\text{kg/m}^3$)

4. まとめ

本報はまだ実験途中の中間報告ではあるが、埋設ミニセンサーの連続腐食モニタリングにより得られた電気化学的特性値と、腐食電流計により連続的に測定されたマクロセル腐食電流測定値から、鋼繊維補強モルタルを用いて鉄筋腐食を抑制することができる可能性の高いことが明らかとなった。本実験は、屋外暴露を5年間継続して行なう。また、海洋環境下でも同じ実験を行う予定であり、以後の実験結果についても今後報告を行う予定である。

なお、本実験は、(社) 鋼材倶楽部スチールファイバー委員会と (財) 日本建築総合試験所の共同研究として実施したものである。

<参考文献>

- [1] Schupack, M.: Durability of SFRC exposed to severe environments, STEEL FIBER CONCRETE US-SWEDEN joint seminar (NSF-STU) Stockholm, pp479-496, 3-5 June, 1985
- [2] 永山勝・田村博・下澤和幸: 腐食電流計および埋設ミニセンサーを併用した鉄筋腐食試験方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol18, No. 1, pp. 807-812, 1996
- [3] 下澤和幸・田村博・永山勝: 小型埋設ミニセンサーによる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, Vol16, No. 1, pp. 793-798, 1994
- [4] 下澤和幸・田村博・永山勝: 埋設ミニセンサーによる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, Vol18, No. 1, pp. 813-818, 1996

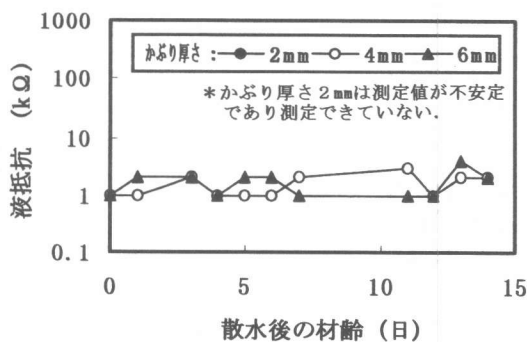


図-5.3.3 液抵抗の経時変化
(SSFRM, 鋼繊維, $Cl=3\text{kg/m}^3$)