

論文 鋼繊維補強コンクリートの塩害環境における耐久性に関する研究

松元 淳一*1・堀口 賢一*2・丸屋 剛*3

要旨: 鋼繊維補強コンクリート中の鋼繊維および鉄筋の腐食メカニズムについては定量的に明らかにされておらず、耐久性照査は規準化まで至っていない。そこで本研究は、鋼繊維補強コンクリート供試体を用いて、鋼繊維および鉄筋の腐食性・防食性について電気化学的評価実験を行った。その結果、深さ5mm以上の鋼繊維は腐食しないことを確認した。一方、鉄筋については、腐食開始を通常のコンクリートより遅らせられることができ、腐食速度も抑えられるため、潜伏期、進展期を長くすることが可能となり、塩害対策として有効であることを確認した。

キーワード: 鋼繊維補強コンクリート, 腐食, 防食, 塩害

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリートは、コンクリートのはく離・はく落対策や曲げ強度、せん断強度および靱性などの力学的性能を向上させるだけではなく、脆性破壊の抑制効果やひび割れ分散性などの特性も有しており、構造的な役割の観点から、幅広く適用されている。また、耐久性に関する研究も古くから行われており、様々な知見が得られているが、定量的な評価までは至っていないのが現状である^{1)~8)}。

今後、鋼繊維を用いたコンクリートを塩害環境へ適用するためにも、鋼繊維の表層部における腐食領域および内部鉄筋の腐食量など、電気化学的な考え方に基づく定量的な評価から、鋼繊維の使用による内部鉄筋の腐食抑制メカニズムを明らかにし、通常の鉄筋コンクリートと同様に設計評価手法を確立しなければならない。

そこで本研究では、鋼繊維がコンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす影響ならびに鋼繊維自身の腐食性・防食性について実験的に検証を試みた。

なお、著者らは、先だって、鋼繊維を混入した鉄筋コンクリートを用いて塩水による乾湿繰返し環境で促進試験を行った⁹⁾。今回はその促進試験を受けて、新たに鋼繊維および鉄筋に直接コードを取り付けたモルタル供試体を用いて、電気化学的手法により評価を行った。その結果について報告する。

2. 既往の実験結果概要 (塩水乾湿繰返し試験)⁹⁾

2.1 実験供試体

実験に用いた供試体は、水セメント比を65%のコンクリート供試体である。供試体としては、鋼繊維を全断面と部分的に混入した鉄筋コンクリートおよび比較用の普通コンクリートの3ケース (普通1体, 全面混入1体, 部分

混入2体) とした。

使用材料として、セメントは普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm³)、鋼繊維としては密度7.85g/cm³ で繊維長43mm、繊維径φ0.75mm のものを使用した。試験に用いた配合における鋼繊維の混入率は、コンクリート体積の外割として1vol%とした。細骨材としては君津産山砂 (密度: 2.64g/cm³, 吸水率: 1.63%) を使用し、粗骨材に青梅産6号砕石 (密度: 2.65g/cm³, 吸水率: 0.61%) を用いた。供試体の形状としては、□100×100×400mmの角柱とし、試験面からかぶり25mmとなる様に異形鉄筋D19を1本配置した。また、鋼繊維を混入した供試体は、コンクリート全断面に様に混入するものと鉄筋のかぶり部分内のコンクリート表面から15mmまで混入するものの2ケースとし、混入範囲が実験結果に及ぼす影響についても同時に検討を行った。製作にあたっては、型枠への横方向による打込みを行い、脱型後、水温20°Cの恒温水槽にて28日間の初期水中養生を行った。

2.2 試験方法

試験方法としては、塩水浸せきと気中乾燥を併せた乾湿繰返しによる劣化促進試験とした。試験環境は表-1に示すように、塩水浸せき3日と気中乾燥4日の繰返しを1サイクルとし、95サイクルまで実施した。なお、塩水浸せきに用いた溶液はNaCl 10%水溶液とし、乾燥については一般大気中にて行った。また、鉄筋ならびに鋼繊維の自然電位の測定も行い、鉄筋については、供試体に埋設

表-1 促進試験環境条件

1サイクル	浸せき期間	3日
	乾燥期間	4日
温度		一般大気中(5~35°C)
湿度		一般大気中(40~70%)
浸せき溶液		NaCl 10%水溶液

*1 大成建設株式会社技術センター社会基盤技術研究部 材工研究室 工博 (正会員)

*2 大成建設株式会社技術センター社会基盤技術研究部 材工研究室 (正会員)

*3 大成建設株式会社技術センター社会基盤技術研究部 工博 (正会員)

している鉄筋端部に鋼棒を取り付けて定期的に測定を行った。一方、鋼繊維については、かぶり15mm に外部電極用の鋼繊維を1本取り付けて定期的に測定した。自然電位の測定は、JSCE-E-601-2000「コンクリート構造物における自然電位の測定方法」に準拠し、25mm間隔の14箇所にて行った。

2.3 実験結果および考察

(1) 鉄筋の腐食状況

それぞれの供試体において塩水乾湿繰返し試験を95サイクルまで行った後の鉄筋腐食面積率を図-1に示す。測定方法としては、鉄筋の腐食部分をセロハンに書き写し、その面積を鉄筋の全表面積で除して算出した。これより、鋼繊維を全断面に混入した供試体中の鉄筋の腐食面積率では、普通コンクリートに比べて2%程度小さく、既往の文献等で言われている鉄筋腐食が顕著に抑制するような状況ではなかったが、若干の防食効果が認められた。これに対して、鋼繊維をかぶり部分に混入した供試体中の鉄筋の腐食面積率は、普通コンクリート供試体よりもかえって大きくなる結果であった。

(2) 鋼繊維の腐食状況

写真-1に鋼繊維をコンクリート全断面に混入したコンクリート中の鋼繊維の腐食状況を示す。コンクリート表層部(0~1.2mm)の範囲内においては、鋼繊維全面に渡った顕著な腐食が確認されたのに対し、鋼繊維のかぶりが1.2mm~4.05mmの範囲内では、コンクリート表層部の腐食状況とは明らかに異なり、部分的に腐食が確認されるのみであった。一方、鋼繊維のかぶりが深くなると、鋼繊維の腐食は少なくなる傾向にあり、深さ5.8mm以降では腐食は認められなかった。

3. 新たな電気化学的評価実験(塩分冠水試験)

既往の実験⁹⁾を受けて、鋼繊維補強コンクリート中の鉄筋および鋼繊維の腐食性・防食性を、より詳細に把握するため、鉄筋や鋼繊維を1本ないしは2本のみ埋設したモルタル供試体を製作し、塩分冠水試験を実施し、連続的に自然電位の測定を行った。

3.1 実験概要

(1) 実験供試体

実験に用いた供試体は水セメント比を60%として表-2に示す配合で製作したモルタル供試体である。

使用材料として、セメントや鋼繊維は先の塩水乾湿繰返し試験と同様のものを使用した。実験に用いた鋼繊維の使用量は、本実験の目的が鋼繊維や鉄筋の腐食に関する定量的な評価であることから、全断面に混入することはせずに、自然電位測定用の鋼繊維を1本ないし2本を所定の位置に埋設した。細骨材としては6号ケイ砂(密度)を使用した。ここで、細骨材に6号ケイ砂を用いた理

由として、鋼繊維を極表層部の2mm位置に埋設すると、モルタル表面との距離が僅かとなり、通常の細骨材では、表面と鋼繊維の間がペースト分のみになる可能性が考えられたためである。

実験供試体の形状を図-4に示す。鋼繊維はモルタル表面の極表層部(2mm)と所定の深さ位置に埋設することとし、鉄筋は一部供試体を除き、試験面からD19異形鉄筋がかぶり25mmになるように配筋した。これにより、

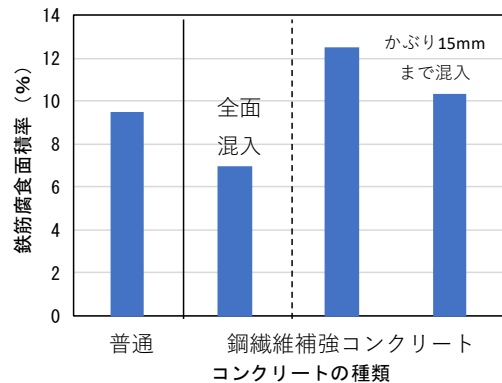


図-1 95サイクル終了後の鉄筋腐食面積率

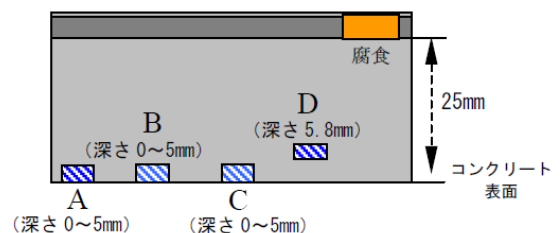
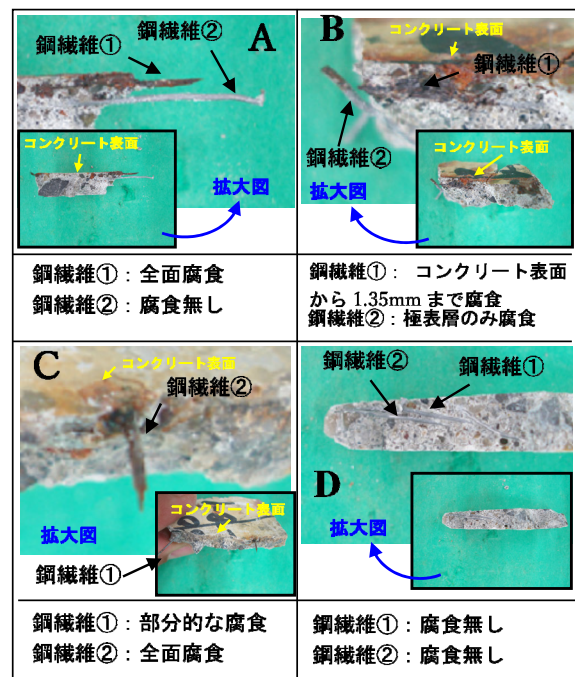


写真-1 鋼繊維の腐食状況

表-2 モルタル供試体の配合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)			
	水	セメント	細骨材	混和剤
60	270	450	1528	1.13

鋼繊維同士の位置関係、鉄筋と鋼繊維の位置関係についても同時に評価した。

製作にあたっては、10×10×40cmの型枠への横方向による打込みとし、型枠脱型後、水温20℃の恒温水槽にて28日間の初期水中養生を行い、最終的に材齢56日時点で試験を開始した。

(2) 試験方法

写真-2に塩化物イオンの供給方法を示す。供試体中央の側面には、鉛重合電極を1本配置した。塩化物イオンの供給は、供試体上面の幅36cm×奥行き8cmの範囲に中空の角型プラスチック容器を固定し、これに濃度10%の塩水を満たして行った。また、供試体側面からの水の散逸を防ぐため、供試体4面にはエポキシ樹脂を塗布し、下面を開放面とした。本実験では、予め測定用コードを取り付けて埋設した鋼繊維および鉄筋の自然電位を3時間間隔で650日間連続的にモニタリングを行った。なお、試験は冬期より開始し、温度は10℃～35℃、湿度は35～65%の室内で実施した。

3.2 実験結果および考察

(1) 鋼繊維の腐食について

一例として、供試体⑥（鋼繊維：深さ2mm、20mm 鉄筋：深さ25mm）に埋設した鋼繊維および鉄筋の自然電位の経時変化を図-5に示す。

試験開始直後の段階から、鋼繊維の自然電位は鉄筋に比べて卑な値となっており、この傾向は既往の著者らの研究結果⁹⁾と一致していた。また、モルタル中の全塩化物イオン量は、図-6に示すように、腐食発生限界塩化物イオン量を大幅に上回っているにも拘らず、表層の深さ2mm位置の鋼繊維のみ腐食しており、内部の20mmの鋼繊維は腐食が認められなかった。

ここで、図-7に表層2mmとは別に、供試体内部に埋設した鋼繊維の自然電位の経時変化を示す。また併せて、写真-3に鋼繊維の腐食状況を示した。これより、供試体内部の鋼繊維深さ位置が5mm、10mm、15mmおよび20mm（供試体③、④、⑤、⑥）のいずれであっても、鋼繊維に腐食は認められておらず、先に実施した塩水乾湿繰返し試験の深さ5.8mm以深の鋼繊維は腐食していない結果と同様であった。これより、本実験の1本ないし2本埋設した供試体でも、あるいは先の塩水乾湿繰返し試験におけるコンクリート全面に鋼繊維を混入した場合でも、鋼繊維の腐食発生範囲は同じであることから、鋼繊維の腐

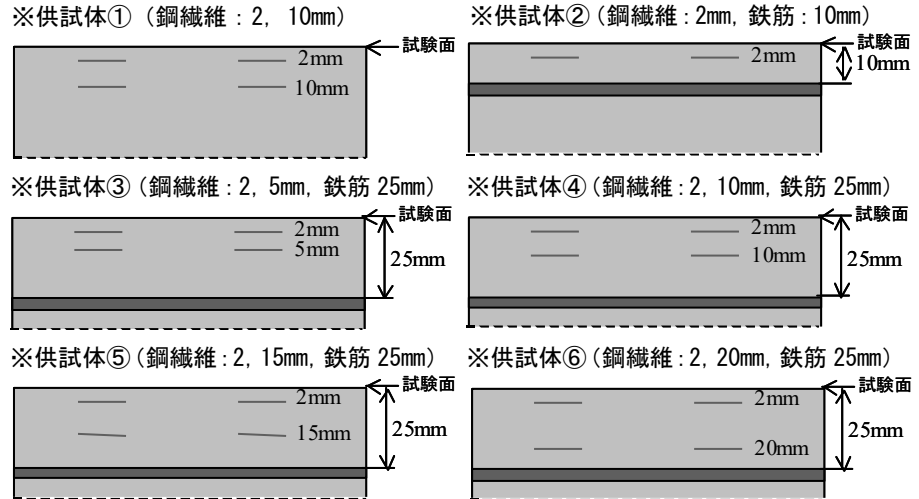


図-4 鋼繊維および鉄筋の埋設位置

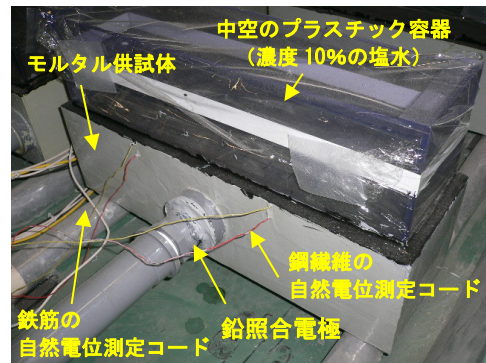


写真-2 供試体と塩化物イオンの供給方法

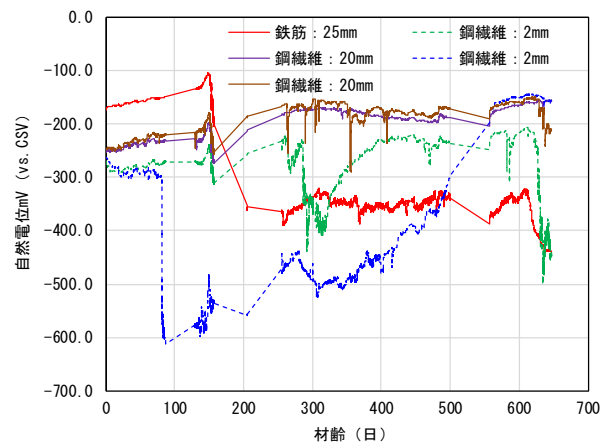


図-5 自然電位の経時変化 (供試体⑥)

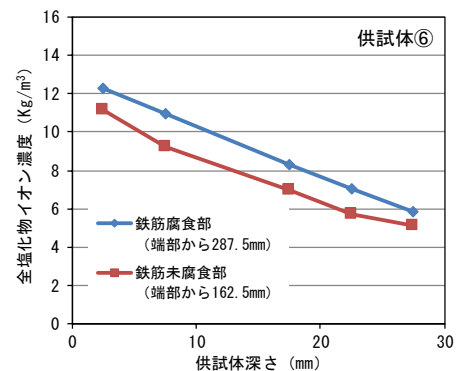


図-6 全塩化物イオン濃度分布 (供試体⑥)

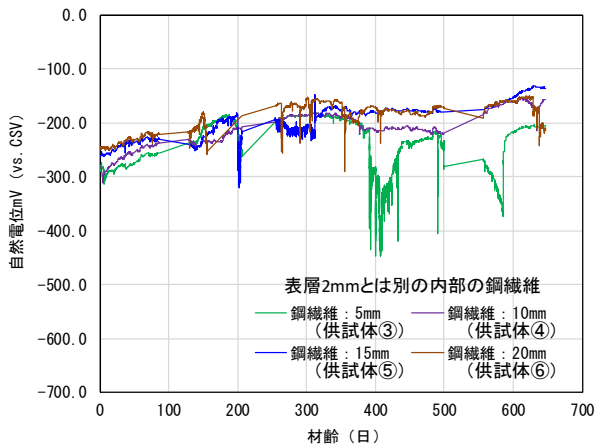


図-7 供試体内部に埋設した鋼繊維の自然電位

腐食は、表層の鋼繊維との内部の鋼繊維の位置に関係性はなく、表層に存在する鋼繊維内でのマクロセル回路による腐食の可能性が高いと考えられる。

(2) 鉄筋の腐食について

図-8にそれぞれの供試体中の鉄筋において、3時間ごとに650日間の連続計測を行った自然電位の経時変化を示す。自然電位の卑変は内部に埋設した鋼繊維の位置が鉄筋に近いほど早くなる傾向が認められた。ここで、同様の曝露条件において、通常の鉄筋コンクリート中の鉄筋の自然電位の計測を行った著者らの研究結果¹⁰⁾と比較すると、かぶり25mmの場合、普通セメントコンクリート中の鉄筋の自然電位は、試験開始初期は今回の実験に近く、自然電位の卑変時期は、水セメント比65%、55%でそれぞれ試験開始から63日、100日経過後であった。本実験は水セメント比が60%のモルタル供試体であることや、酸素の供給速度が必ずしも一致しているとは言えないが、自然電位の卑変が確認されたのは早いもので、試験開始150日経過後であり、鋼繊維混入により鉄筋腐食の開始を遅らせることが可能であることを確認した。

また、通常の鉄筋コンクリートでは、腐食開始が想定される自然電位の卑変は200mV以上であり、卑変後も自然電位は緩やかに卑へと推移し、マクロセル腐食が進行している状況が認められている¹¹⁾。これに対し、本実験における鉄筋の自然電位の卑変は150mV程度以上であり、卑変後はほぼ横ばいとなっている。また、今回の供試体は下面のみが開放面となっているため、溶存酸素量が低下していることも考えられるが、自然電位の値が極端に小さくはならず、酸素はある程度存在していると考えられる。以上のことから、今回の実験においては、鋼繊維使用コンクリート中の鉄筋の腐食速度は、通常の鉄筋コンクリートに比べて小さくなるものと考えられた。

試験期間650日後における供試体解体時に確認した埋設鉄筋の腐食面積率および腐食量を図-9に示す。また、写真-4には腐食状況を併せて示した。鉄筋腐食面積率と

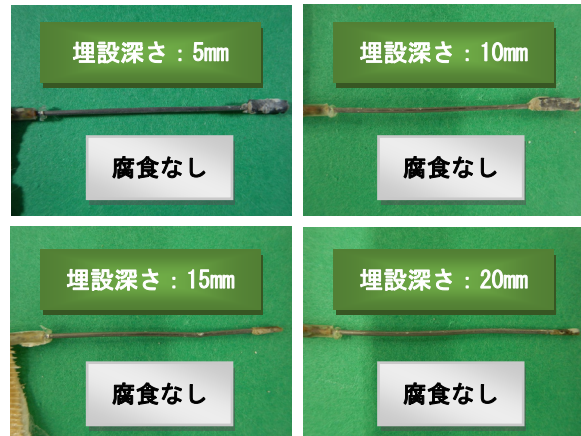


写真-3 供試体内部の鋼繊維の腐食状況

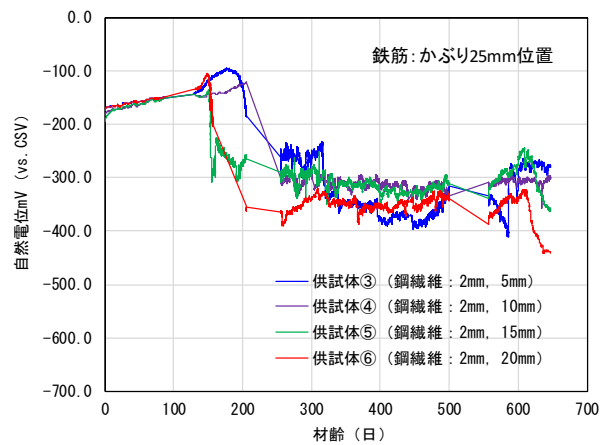


図-8 鉄筋の自然電位の経時変化

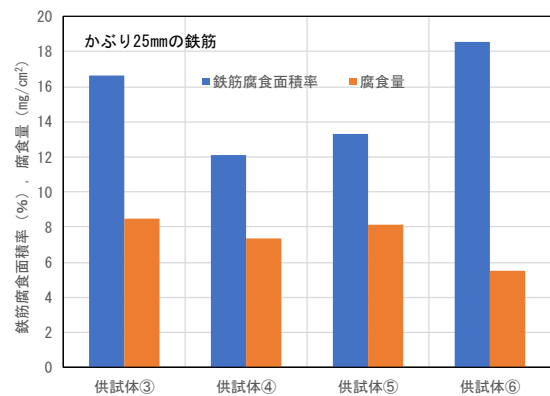


図-9 鉄筋腐食面積率および腐食量

腐食量の測定方法として、鉄筋腐食面積率は、鉄筋の腐食部分をセロハンに書き写し、その面積を鉄筋の全表面積で除して算出した。一方、腐食量は、先端の尖ったハンマーとワイヤーブラシを用いて錆部分の付着物を落とし、腐食生成物とモルタルを取り分けた。その量が少量であるため、取り分けに磁石に対し磁性を持っている必要があること、腐食の大部分が赤錆であることなどを考慮すると、腐食生成物は様々な形態であるが、文献¹²⁾に

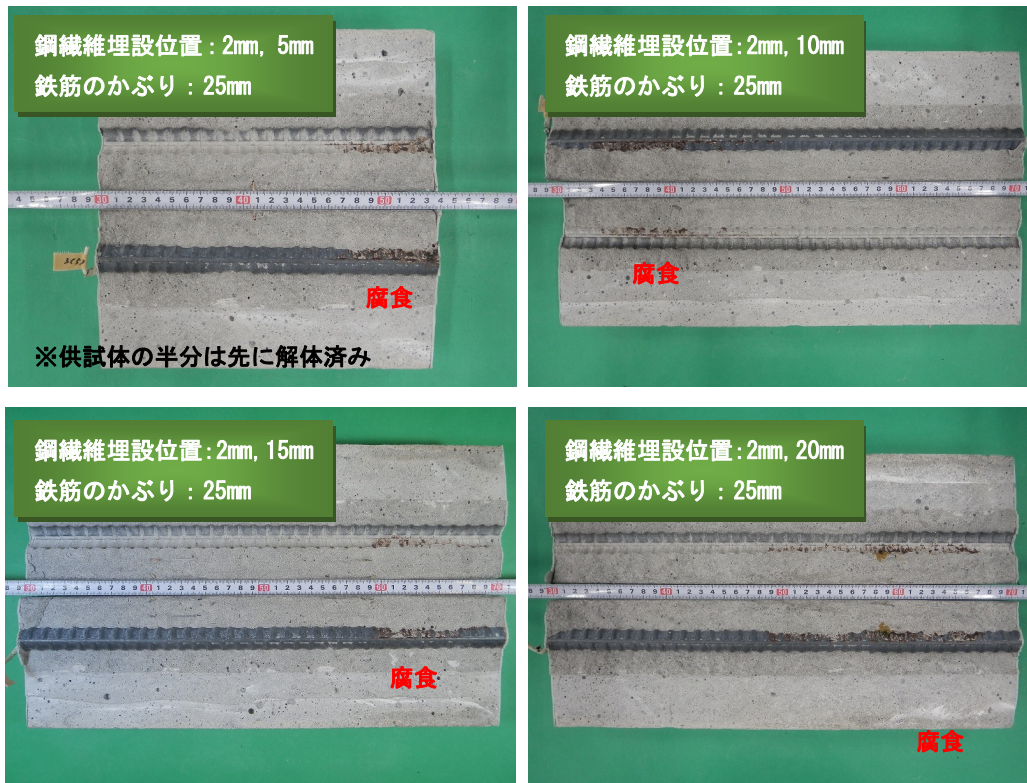


写真-4 供試体中のかぶり25mmの鉄筋の腐食

よれば β -FeOOH の形態を主にしている。このようにして測定した腐食生成物の質量に、FeOOH（分子量88.8）中のFe（原子量55.8）の割合を算出した比率（0.628）を乗じて、これを腐食面積で除して腐食量とした。

鉄筋腐食面積率は12%~18%であり、鋼繊維との位置関係も明確ではなかったが、腐食量については、鉄筋と鋼繊維の位置が近い方が小さくなる傾向を示し、特に供試体⑥（鋼繊維：2mm，20mm 鉄筋：25mm）は、鉄筋腐食面積率は大きかったが、腐食量は小さく、孔食のような激しい腐食には生じていなかった。

図-1に示したように、先の塩水繰返し試験において、鋼繊維をかぶりの一部分に混入した（かぶり25mmのうち、深さ15mmまで混入）した供試体の鉄筋腐食面積率が全断面混入した供試体よりも大きくなる結果であったが、これは、本実験の腐食量のように、鋼繊維と鉄筋の位置関係が影響していると考えられた。

本実験では供試体解体時の試験日数650日時点において、コンクリート表面に照合電極を当てて、鋼繊維および鉄筋の自然電位分布を測定した。測定方法としては、鉄筋および鋼繊維のいずれもJSCE-E-601-2000「コンクリート構造物における自然電位の測定方法」に準拠し、鉄筋は25mm間隔の15箇所にて行った。

鉄筋の自然電位の分布状況における電位差の程度を定量的に評価するため、鉄筋の自然電位変動係数を算出した。算出結果を図-10に示す。なお、自然電位変動係数は、標準偏差を平均で除したものであり、相対的なば

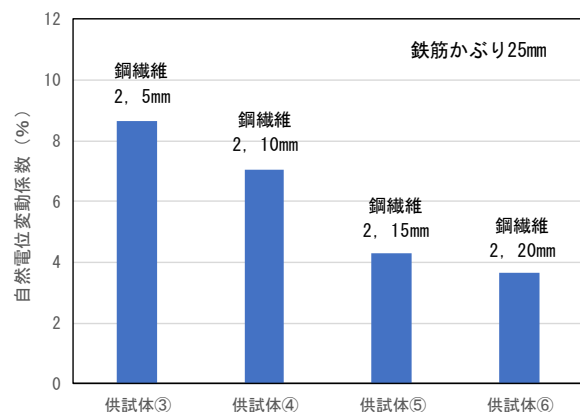


図-10 自然電位変動係数（試験日数 650 日）

らつきを表している。すなわち、変動係数が大きいほど、測定値の差が大きく、鉄筋内でマクロセル回路が卓越していると考えられる。自然電位変動係数は鉄筋と鋼繊維の距離が近いと小さいことから、鉄筋近くに鋼繊維がある場合、鉄筋内においてマクロセル回路を形成しにくい状況になると推察された。これより、鉄筋がアノード反応を起こしたとしても、鉄筋のみの導通であれば鉄筋内でマクロセル回路を形成して腐食速度が大きくなるが、鉄筋と鋼繊維の距離が近く、コンクリートを介してマクロセル回路が形成される場合は、鉄筋がアノード反応、鋼繊維がカソード反応、コンクリートが抵抗となるため、鉄筋の腐食速度を抑制したものと推察される。なお、今回の実験においては、鉄筋直上の鋼繊維に腐食は認められていなかった。

図-11には、鉄筋のかぶり厚が10mmと小さい場合の鋼繊維（2mm位置）および鉄筋の自然電位の経時変化を示した。かぶり厚が小さいと、鉄筋の腐食が開始したと想定される自然電位卑変後も自然電位は卑な方向へ推移していることから、鉄筋間でマクロセル回路が卓越して腐食速度は大きくなったと考えられる。ただし、表層2mmの鋼繊維の卑変開始が遅くなっていることから、鋼繊維と鉄筋でも回路を形成していたのではないかと推察された。

4. まとめ

本研究では、塩害環境における鋼繊維補強コンクリートの鋼繊維および鉄筋の腐食性・防食性を定量的に明らかにすることを目的に幾つかの実験を行った。以下に得られた結論を示す。

(1) 本実験で検討した範囲内では、鋼繊維の腐食は、コンクリート表層から5mmまでの範囲内で認められた。それ以降の深さにある鋼繊維に関しては、ひび割れが発生しない限り腐食が生じることはない。

(2) 鋼繊維の腐食について、本実験の1本ないし2本埋設した供試体でも、あるいは既往のコンクリート全面に鋼繊維を混入した場合でも、鋼繊維の腐食発生範囲は同じであることから、鋼繊維の腐食は、表層の鋼繊維との内部の鋼繊維の位置に関係性はなく、表層に存在する鋼繊維内でのマクロセル回路による腐食である可能性が高いと考えられた。

(3) 本実験の検討範囲内において、鋼繊維補強コンクリート中の鉄筋の自然電位の卑変は通常の鉄筋コンクリートよりも遅く、鋼繊維を混入することで鉄筋の腐食開始を遅らせることが可能であることを確認した。

(4) 鉄筋の自然電位の卑変後はほぼ横ばいに推移する状況であることから、鋼繊維補強コンクリート中の鉄筋の腐食速度は、通常の鉄筋コンクリートに比べて小さくなるものと考えられた。

(5) 腐食速度抑制メカニズムとしては、鋼繊維使用コンクリート中の鉄筋がアノード反応を起こしたとしても、鉄筋と鋼繊維の間のコンクリートが抵抗となることが挙げられた。

(6) 本研究の実験結果の範囲内では、鋼繊維補強コンクリートは、潜伏期および進展期を通常のコンクリートよりも長くすることが可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 武田康司, 松岡茂, 益田影久, 土井至朗: 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.3, pp.1231-1236, 1998.7
- 2) 幸佐賢二, Antoine NAAMAN: ファイバーコンクリートの耐久性に関する研究, コンクリート工学年次

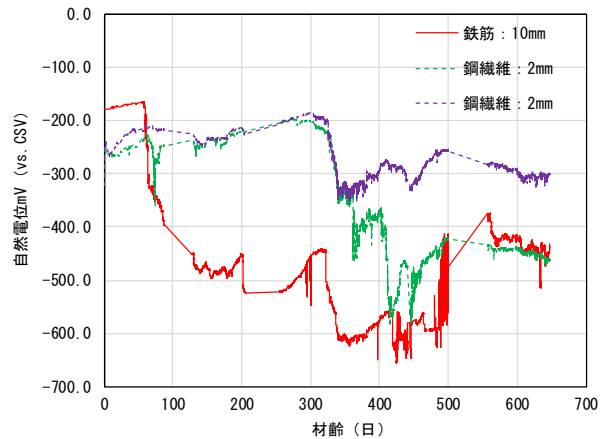


図-11 供試体②における自然電位の経時変化

論文集, Vol.12, No.1, pp.1227-1232, 1990.7

- 3) 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案), コンクリートライブラリー, 第50号, 1983.3
- 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, コンクリート工学, Vol.24, No.1, pp.801-806, 2002.7
- 5) 田中博一, 栗田守朗: 鋼繊維混入による鉄筋腐食抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.777-782, 2002.7
- 6) 眞島光保, 宮川豊章, 小林茂広, 角田忍: 鋼繊維コンクリートの劣化に関する追跡調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.1003-1008, 1997.7
- 7) 小林一輔, 星野富夫, 辻恒平: 海洋飛沫帯に5年間曝露した鉄筋コンクリート梁の性状-鋼繊維補強コンクリートの防食効果-, 生産研究, 41巻, 11号, pp.73-76, 1989.11
- 8) 幸佐賢二, Antoine NAAMAN: 腐食によるスチールファイバーコンクリートの力学的性質の変化, 土木学会論文集, 420号/V-13, pp.143-152, 1990
- 9) 松元淳一, 丸屋剛: 鋼繊維を用いた鉄筋コンクリートの塩害環境における耐久性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1013-1018, 2010.7
- 10) 堀口賢一, 丸屋剛, 武若耕司: 腐食発生限界塩化物イオン濃度に及ぼすコンクリート配合の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1077-1082, 2007.7
- 11) 丸屋剛, 武田均, 堀口賢一, 小山哲: コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する再現実験と数値解析, 土木学会論文集E, Vol.61, No.4, pp.500-514, 2008.10
- 12) 金貞辰, 朴同天, 兼松学, 野口貴文: 鉄微粉末混入によるモルタル中の鉄筋の腐食抑制メカニズムに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.1, pp.1037-1042, 2006