

論文 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

松元 淳一*1・丸屋 剛*2

要旨：鋼繊維を用いたコンクリートは、混入した鋼繊維の腐食範囲ならびに内部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、鋼繊維使用コンクリートの耐久性照査は規準化まで至っていない。そこで本研究は、鋼繊維を用いたコンクリート供試体を用いて、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について実験的検討を行った。その結果、鋼繊維の腐食は表層 5mm 以降では生じていないにも拘らず、鉄筋の腐食は既往の研究と異なり、通常の RC とほぼ同程度であった。ただし、鋼繊維使用による鉄筋の腐食促進作用は認められず、RC と同様の耐久性照査に適するものと考えられた。

キーワード：鋼繊維, 鉄微粉末, 塩害, 鉄筋腐食, 鋼繊維腐食

1. はじめに

鋼繊維を用いたコンクリートは、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の向上効果だけでなく、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、構造的な役割を担っていることから、自然環境でも幅広く適用されている^{1)~3)}。その一方で、耐久性に関する研究も古くから行われており、特に、塩害環境における耐久性に関しては、様々な知見が得られている^{4)~6)}。例えば、小林らは⁷⁾、コンクリート極表層部に存在する鋼繊維が犠牲アノードとして働き、鋼繊維自身が腐食することから、外部環境より侵入した塩素イオンや酸素などの腐食因子は鉄筋かぶり部分で捕捉され、消費されてしまうと述べている。また、幸佐らの研究成果では⁸⁾、鋼繊維を用いたモルタル供試体で 10 ヶ月間の塩水乾湿繰返し試験を行ったところ、コンクリート表層部に介在している鋼繊維の直径は 30% 程度減少していたものの、供試体表面に腐食によるひび割れは認められず、その後に行った曲げ試験では、ピーク応力ならびに靱性とも増加するなどの知見が得られている。ただし、これらの研究成果は、いずれも曝露期間が短いケースで実験的に検討なされた場合であり、その鉄筋腐食抑制メカニズムについても具体的なデータも得られておらず、定量的な評価までは

至っていないのが現状である。しかしながら、鋼繊維を用いることによる鉄筋の防食効果は明らかであり、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耐久性評価手法を確立しなければならない。

そこで本研究では、鋼繊維量や鋼繊維の混入範囲を変化させたコンクリート供試体を用いて、塩水による乾湿繰返し環境で促進試験を実施し、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について実験的に検討を試みた。また併せて、鉄微粉末を用いたコンクリートについても同様の試験を行い、鋼繊維との比較についても検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

実験に用いた供試体は、水セメント比を 65% として表-1 に示す配合で作製したコンクリート供試体である。なお、配合の決定方法としては、通常の鉄筋コンクリート供試体（以下、普通コンクリート供試体と称す）は、目標スランブを 10±2cm、空気量 4.5±1.5% として配合

表-1 供試体の配合

供試体の種類	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	S	G	鋼繊維	鉄微粉末	AE減水剤 (C×) %
普通コンクリート	65	52	8.0	4.4	165	254	974	904	-	-	0.25
鋼繊維使用コンクリート			2.4	5.2	165	254	974	904	78.5	-	0.25
鉄微粉末使用コンクリート			2.6	4.3	165	254	974	904	-	91.88	0.25

*1 大成建設株式会社技術センター土木技術研究所 土木構工法研究室 工博 (正会員)

*2 大成建設株式会社技術センター土木技術研究所 土木構工法研究室 工博 (正会員)

を定めた。一方、鋼繊維あるいは鉄微粉末を混入した供試体については、促進試験結果の要因をより明確にするため、単位水量および細骨材率を普通コンクリート供試体と同様のものとした。その結果、鋼繊維や鉄微粉末を用いることによるスランプ低下は顕著であることが改めて確認できた。

使用材料を表-2 に示す。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。鉄微粉末については、表-3 に示す粒度分布のものを使用し、コンクリート体積の外割として 4vol% 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。

供試体の形状を図-1 に、実験の要因と水準を表-4 に示す。試験面からかぶり 25mm となる様に異形鉄筋 D19 を配置した。また、鋼繊維あるいは鉄微粉末を混入した供試体は、コンクリート全断面に一樣に混入する方法と鉄筋かぶり部分であるコンクリート表面から 15mm まで混入する方法の 2 種類とし、これらの材料の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。作製にあたっては、10×10×40cm の型枠への横方向による打設および脱型後、水温 20℃ の恒温水槽にて 28 日間の初期水中養生を行った。その後、いずれの供試体も供試体端面からの腐食因子の侵入を阻止するため、写真-1 に示すように、アクリル板を圧着処理した。

2.2 促進試験方法

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-5 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



写真-1 端面の状況

表-2 使用材料

水	上水道水
セメント	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm ³)
鋼繊維	鋼繊維A(密度:7.85g/cm ³) (繊維長:43mm, 繊維径:φ0.75mm)
鉄微粉末	鉄微粉末A (粒度分布:表-3に記載)
細骨材	君津産 山砂 (密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:1.63%)
粗骨材	青梅産 6号砕石 (密度:2.65g/cm ³ , 吸水率:0.608%)
混和剤	リグニスルホン酸系AE減水剤 (密度:2.34g/cm ³)

表-3 鉄微粉末の粒度分布

粒経(μm)	180以上	150 ~180	106 ~150	75 ~106	63 ~75	45 ~63	45以下
粒度分布(%)	5.5	4.6	16.2	19.4	12.1	17.6	24.6

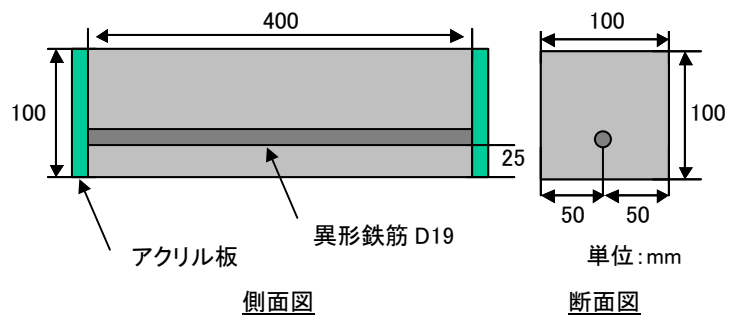


図-1 供試体の形状

表-4 要因と水準

要因	水準		
	普通 コンクリート	鋼繊維 使用コンクリート	鉄微粉末 使用コンクリート
W/C	65%		
鋼繊維量	0 vol%	1 vol%	0 vol%
鉄微粉末量	0 vol%	0 vol%	4 vol%
混入範囲	-	・コンクリート一様 ・かぶり15mm部分 	・コンクリート一様 ・かぶり15mm部分

表-5 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℃)
湿度		一般大気中(40~70%)
浸せき溶液		NaCl 10%水溶液

の測定は、鉄筋および鋼繊維のいずれについても 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、25mm 間隔の 14 箇所にて行った。

によるひび割れ抑制効果は極めて高いものと推察され、鋼繊維をコンクリート全断面に混入することで、ひび割れ発生を大幅に遅らせることができ、進展期に相当する期間を引き延ばすことができると考えられる。

3. 試験結果および考察

3.1 表面劣化性状

(1) コンクリートの変色状況

鋼繊維をあるいは鉄微粉末を用いたコンクリート供試体において初期養生期間 28 日後、塩水乾湿促進試験を 95 サイクルまで行った後のコンクリート側面の劣化状況を写真-2 に示す。コンクリート表層部分の鋼繊維の腐食に伴う錆汁が表面に認められたのに対し、鉄微粉末を使用した場合、表面に錆汁こそ顕著に現れていないものの、緩やかなスケーリングが認められた。いずれにしても、構造物に鋼繊維や鉄微粉末を適用する場合、美観・景観が要求される性能として重要であるならば、何らかの対策が必要になる。

(2) コンクリートのひび割れ状況

写真-3 には、塩水乾湿試験を 95 サイクル行った後の表面ひび割れ状況の一例を示した。まず、普通コンクリート供試体を見ると、コンクリート表面に 0.05～0.15mm の鉄筋方向の腐食ひび割れが認められた。これに対して、鋼繊維あるいは鉄微粉末をコンクリート表層 15mm の領域に混入した供試体では、0.1～0.5mm のひび割れが鉄筋方向ならびに直角方向で確認された。一方、鋼繊維をコンクリート全断面に混入した供試体の場合については、ひび割れは確認されず、鋼繊維全断面使用

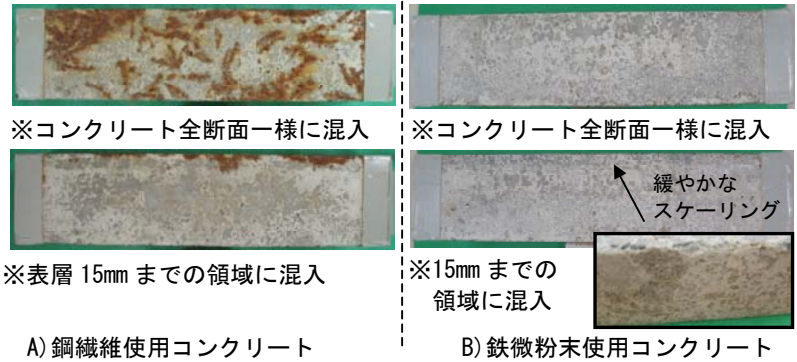


写真-2 塩水乾湿試験 95 サイクル後のコンクリート側面の劣化状況

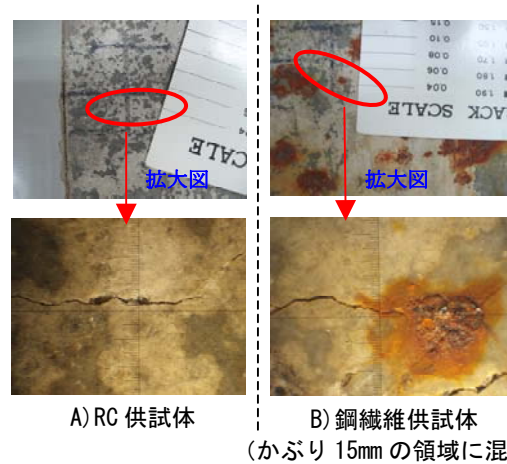


写真-3 95 サイクル後のコンクリートひび割れ状況

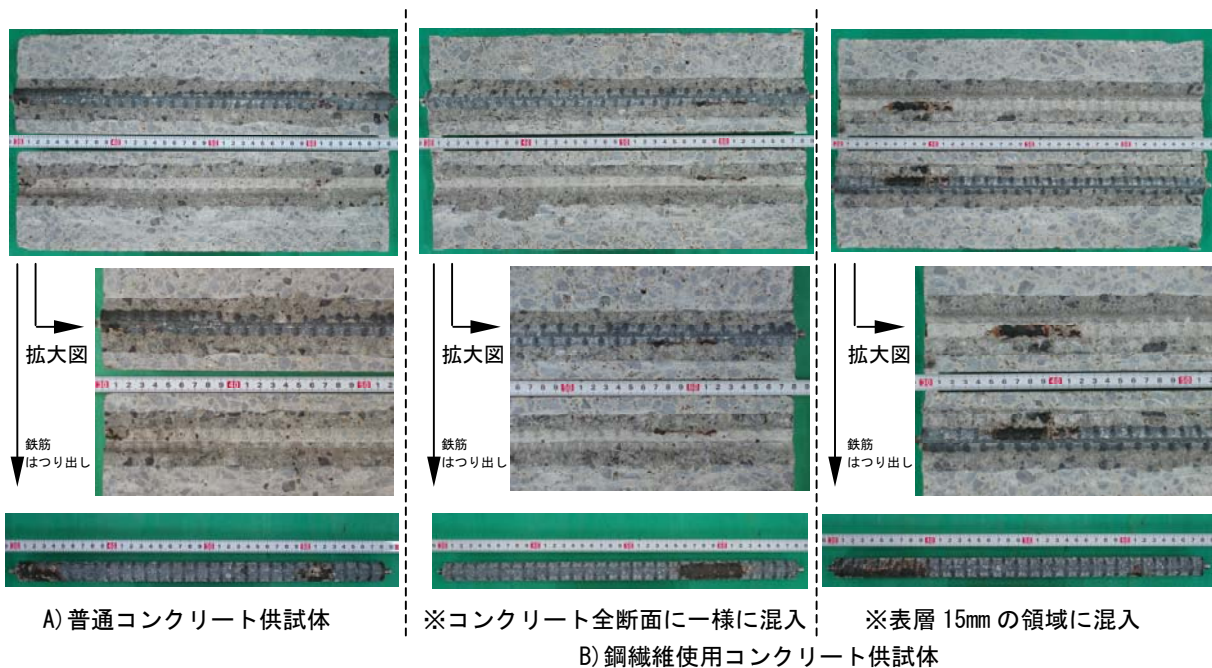


写真-4 95 サイクル終了後の鉄筋腐食状況

3.2 鉄筋の腐食状況

それぞれの供試体において塩水乾湿試験を 95 サイクルまで行った後の鉄筋の腐食状況を写真-4 に示す。普通コンクリート供試体ならびに鋼繊維をコンクリート表面から深さ 15mm までの範囲内に混入した供試体は、ひび割れの確認された領域において極めて激しい腐食が認められており、さらに、ひび割れの発生していない領域でも微小な腐食が確認された。これに対して、鋼繊維をコンクリート全断面に一樣に混入した供試体の場合では、3.1 に示したように腐食性のひび割れは確認されなかったものの、鉄筋には腐食が認められた。ここで、これらの腐食状況を定量的に評価するため、鉄筋腐食面積率の測定を行った。結果を図-2 に示す。なお、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 2%程度小さく、既往の文献等で行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ものの、若干の防食効果が認

められた。ただし、鋼繊維の全断面混入に伴う鉄筋腐食の促進は認められていないことから、通常の鉄筋コンクリート構造物と同様の塩害照査に適するものと考えられた。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腐食面積率は、普通コンクリート供試体よりも大きくなる傾向を示したことから、鋼繊維をコンクリートに部分的に使用する場合には、さらに検討が必要

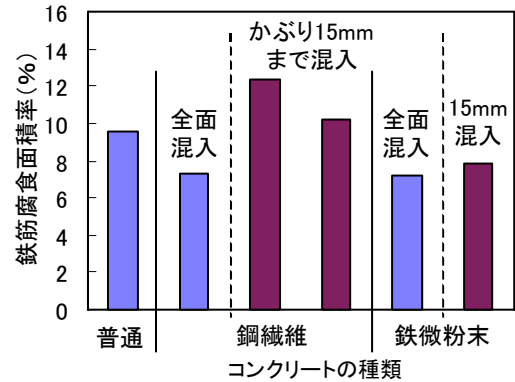


図-2 塩水乾湿試験 95 サイクル終了後の鉄筋腐食面積率

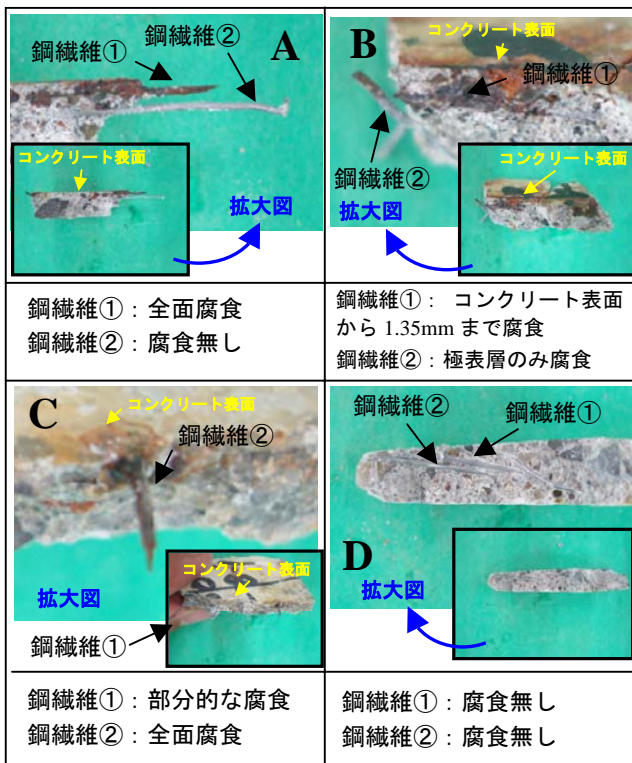


写真-5 鋼繊維の腐食状況 (鉄筋腐食が認められなかった領域)

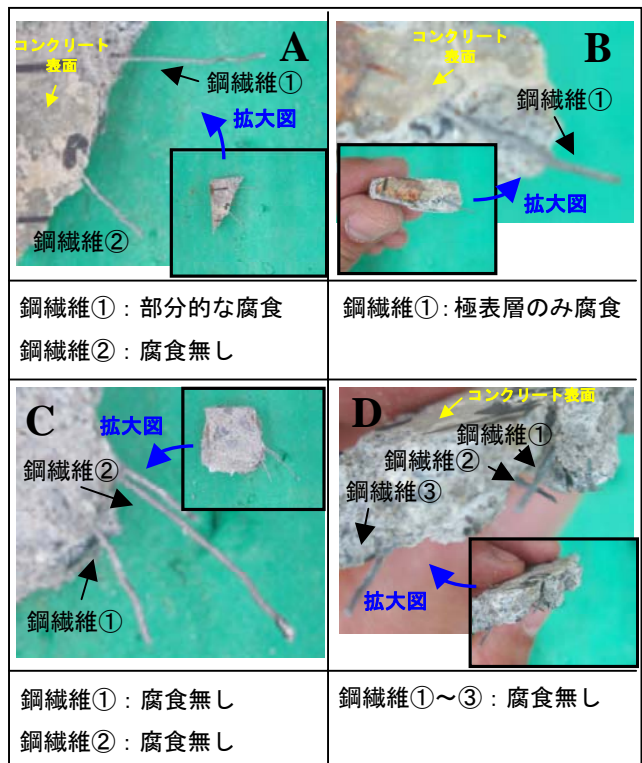


写真-6 鋼繊維の腐食状況 (鉄筋腐食が認められた領域)

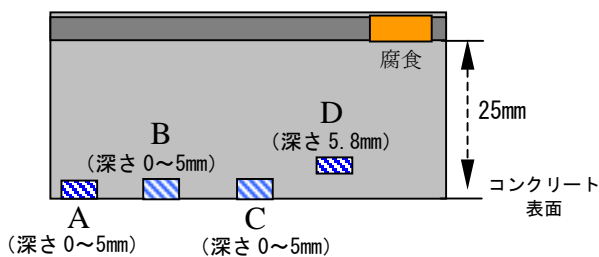


図-3 観察位置の対応図 (表-6 と対応)

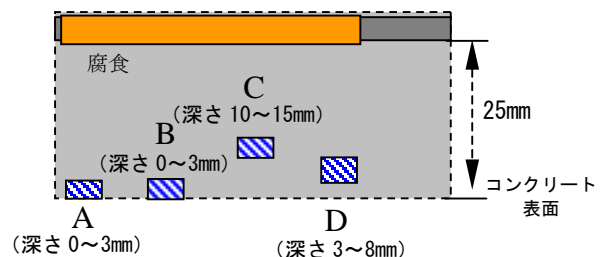


図-4 観察位置の対応図 (表-7 と対応)

であると考えられた。一方、鉄微粉末を混入した供試体の場合については、混入範囲の如何に拘らず、普通コンクリート供試体よりも腐食面積率は幾分か小さかった。

3.3 鋼繊維の腐食状況

鋼繊維を用いたコンクリート中の鋼繊維の腐食量を定量的に求めることは極めて難しい。したがって、本研究では、コンクリート深さ方向にどの範囲まで鋼繊維が腐食を呈しているのかについて目視観察による検討を試みた。なお、観察範囲は、鉄筋に腐食が認められた領域と腐食が認められなかった領域の鉄筋かぶり部分とした。

写真-5 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。なお、この写真はいずれも鉄筋に腐食が認められなかった領域のものである。また、観察位置の対応図を図-3 に併せて示している。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。また、鋼繊維のかぶりが深くなるにつれ腐食は小さくなる傾向にあり、深さ 5.8mm 以降では腐食は認められなかった。

写真-6 には、鋼繊維使用コンクリート中の鉄筋の腐食が認められた領域における鋼繊維の腐食状況を示した。なお、先ほどの図-3 と同じく、図-4 に測定位置の対応図を示している。コンクリート表層部 (0~1.2mm) の範囲内においては、全面に渡って大きく腐食しているものもあれば、腐食の起こっていないものもあり、1本の鋼繊維もしくは鋼繊維近傍にある鋼繊維同士の間でマクロセル回路が形成されているものと考えられる。また、鋼繊維かぶり 4.05mm の鋼繊維でも若干の腐食が認められたことから、前述の鉄筋腐食が認められなかった領域の鋼繊維腐食状況と併せて評価すると、コンクリート中の鋼繊維の腐食は深さ 5mm までの領域で発生すると考えられた。ただし、このようにコンクリート表層において鋼繊維に腐食が発生しているにも拘らず、鋼繊維の腐食によるコンクリートのはく離、はく落が起る状況は認められなかった。

3.4 塩化物イオンの浸透状況

図-5 には、塩水乾湿繰返し試験 95 サイクル時の内部の全塩化物イオン量分布を示した。なお、測定方法は、

土木学会規準 JSCE - G573 - 2003 に準じた。また、測定位置としては、RC 供試体は鉄筋腐食が認められた領域と認められない領域の 2 点、鋼繊維混入コンクリートについては、鉄筋に腐食の認められた領域について行った。まず、普通コンクリート供試体について見てみると、腐食領域と未腐食領域では明らかに塩分量が異なっており、鉄筋間でマクロセル回路が形成されているものと考えられた。これに対して、鋼繊維を用いた場合では、腐食領域の結果であるため、コンクリート中の Cl^- 量は極めて多い結果を示し、さらに、RC 供試体の鉄筋腐食領域と同程度の塩分量であったことから、未腐食部分の塩分量においても RC 供試体と同程度であったものと推察される。

3.5 鋼繊維あるいは鉄筋の自然電位測定結果

一例として、促進試験サイクル中に測定を行った普通

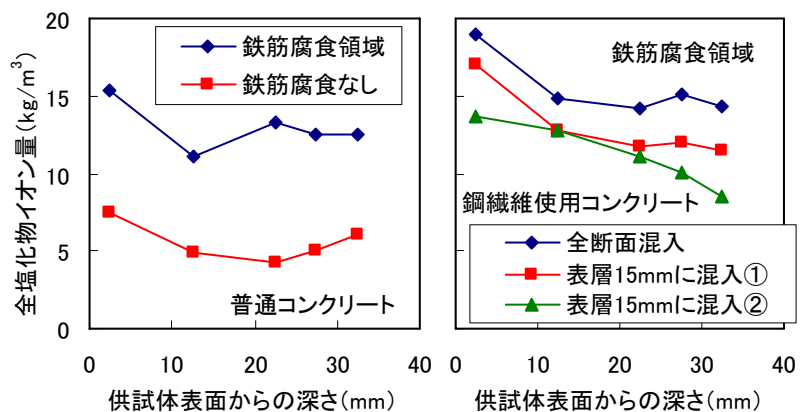


図-5 95 サイクル終了後の塩化物イオン量分布

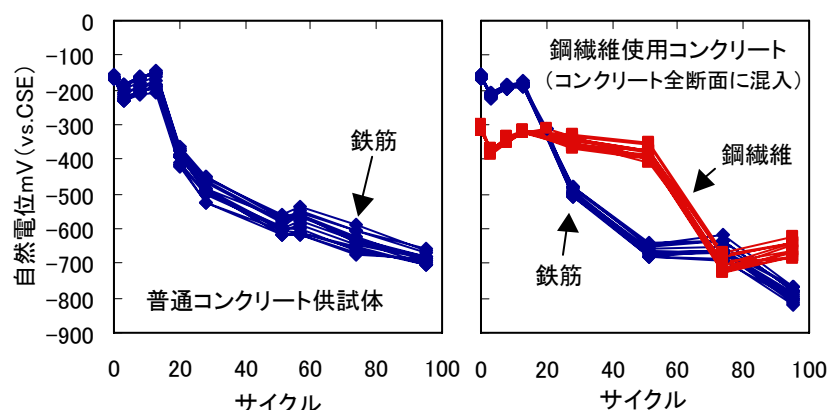


図-6 鉄筋ならびに鋼繊維自然電位の経時変化

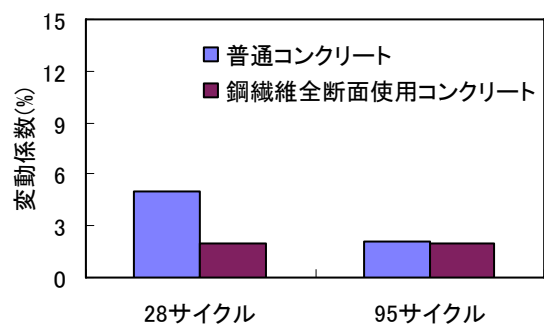


図-7 各供試体中の鉄筋の自然電位変動係数

コンクリート供試体および鋼繊維全断面使用供試体の鉄筋ならびに鋼繊維の自然電位の経時変化を図-6に示す。なお、測定は乾湿繰返しにおいて、供試体が最も高い湿潤状態となった状態と言える塩水浸せき直後に行った。鉄筋の自然電位の経時変化は、鋼繊維の有無や鋼繊維の混入範囲の如何に拘らず、サイクルが進行するにつれ徐々に卑な方向へ向かっており、95サイクルでは腐食判定値を大きく下回る傾向を示した。これに対して、鋼繊維の自然電位の場合については、サイクル初期の段階から、腐食判定値である-350mV付近を推移し、50サイクル以降で急激に卑変する傾向にあり、乾湿繰返しサイクル初期の段階では、鉄筋を貴とし、鋼繊維を卑としたマクロセル回路が形成されていると考えられた。これに対して、鉄筋が腐食を開始したと判断できる20サイクル以降を見てみると、鋼繊維が貴、鉄筋が卑となる状況が確認できる。ここで、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、鉄筋自然電位変動係数を算出した。腐食判定値-350mVを下回った28サイクルと95サイクルの算出結果を図-7に示す。これより、鋼繊維使用コンクリート供試体における28サイクル時点の自然電位変動係数は普通コンクリート供試体に比べて明らかに小さく、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り腐食速度を抑制し、鉄筋の防食効果は顕著であったものと考えられる。一方、95サイクルの結果を見てみると、鋼繊維コンクリート中の鉄筋の自然電位変動係数は、腐食がある程度進行しているにも拘らず、28サイクルの結果とほぼ同程度であり、自然電位の分布はフラットな状況にあった。したがって、鋼繊維コンクリート中の鉄筋の腐食は、マクロセル回路が影響を及ぼすマイクロセル腐食である可能性が高いと考えられる。また、この回路の影響により、腐食が確認された鉄筋の近傍にある鋼繊維の腐食が認められなかった理由についても、鋼繊維がカソード反応にあったことが考えられた。

4. まとめ

本研究では、塩害環境下において、鋼繊維を用いたコンクリートの適用性を明確にするため、実験的に検討を行い、鋼繊維あるいは内部鋼材を腐食の観点から定量的に評価を行った、以下に得られた結論を示す。

(1) 鋼繊維の混入範囲については、かぶりに部分的に混入するよりもコンクリート全断面に一樣に混入する方が鉄筋の腐食に対する抵抗性に関しては、より有効であることを確認した。

(2) 鋼繊維の腐食は、コンクリート表層部から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することは

なく、1本の鋼繊維もしくは鋼繊維近傍にある鋼繊維同士の間でマクロセル回路が形成されているものと考えられる。

(3) 鋼繊維をコンクリート全断面に混入すると、普通コンクリート中の鉄筋に比べ、腐食抑制作用が若干認められた。ただし、この作用は、ひび割れが発生するまでの効果であり、ひび割れが発生すると、通常のコンクリートと同様に一気に腐食速度は大きくなる恐れがある。

(4) 腐食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ため、通常の鉄筋コンクリートより腐食速度を抑制することが挙げられた。

(5) 鋼繊維を用いたコンクリートは、表層にある鋼繊維が腐食してもはく離・はく落の影響も無く、鋼繊維使用による鋼材腐食の促進も認められない。

(6) 本研究の実験とその結果の考察においては、鉄筋腐食の発生時点までの規準である現行の鉄筋コンクリート構造物の塩害照査が鋼繊維を用いたコンクリートにも適するものと考えられた。

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