

V-21

腐食環境下のRC部材の亜鉛メッキ鋼繊維混入による防食効果

北海道大学大学院 学生員 堀口 至

北海道大学大学院 学生員 Abdullah Keybani Someh

北海道大学工学部 正 員 堀口 敬

北海道大学工学部 7人制員 佐伯 昇

1. はじめに

コンクリートに鋼繊維を混入する主目的はコンクリートの弱点の1つである引張強度や曲げ強度などを改善することである。しかし、その鋼繊維に亜鉛メッキを施したガルバニック鋼繊維を使用することによって亜鉛の犠牲防食作用により鉄筋を腐食作用から保護することになれば一石二鳥である。本研究はガルバニック鋼繊維(以下 GaSF と呼ぶ)を混入したコンクリートの防食効果を把握することを目的として人工的に腐食に厳しい環境を作り、その腐食挙動の観察と検討を行ったものである。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は 100mm×100mm×400mm の角柱を使用し、必要ときに自然電位を測定できるように長さ 350mm の D10 鉄筋 2 本にリード線をつけて曝露表面より 16~17mm の所に位置するように埋めてある(図-1)。なお、鉄筋とリード線を接続した箇所はエポキシ樹脂で絶縁した。配合は表-1 に示すように W/C=55%、s/a=45%で、腐食を促進させるために 3 水準の塩分量を混入した。表中の PC は普通コンクリートで SF は GaSF を混入したコンクリートである。繊維には亜鉛をコーティングした GaSF を用いた(表-2)。全ての供試体は打設してから 24 時間後に脱型をして 28 日間水中養生を行った。その後人工的に腐食に対して厳しい環境を作るため腐食促進装置に供試体を入れた。この腐食促進装置は供試体の腐食を早めるために平均温度 35℃で 5%の塩化ナトリウム水溶液を噴霧して(湿潤状態)、その後湿度 30~35%、35℃で乾燥させる(乾燥状態)装置である。今回の実験では 12 時間湿潤状態の後、乾燥状態を 12 時間に設定し、これを 1 サイクルとした。

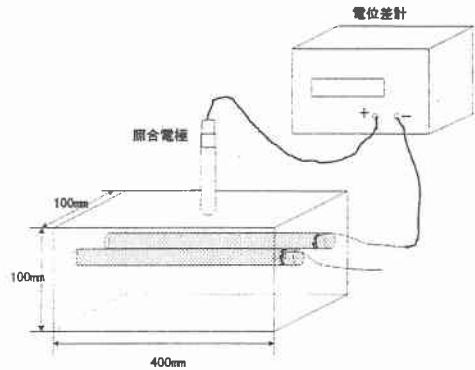


図-1 実験供試体

表-1 供試体の配合

	W/C (%)	s/a (%)	塩分 (kg/m³)	繊維 (kg/m³)
PC03	55.0	45.0	0.3	0
PC10	"	"	1.0	"
PC30	"	"	3.0	"
SF03	"	"	0.3	120
SF10	"	"	1.0	"
SF30	"	"	3.0	"

表-2 鉄筋と鋼繊維

		サイズ (mm)	Znコーティング (mm)
鉄筋	SD295A	Φ 10	-
鋼繊維	-	0.5 × 0.5 × 30	0.01

Effect of zinc coated steel fiber reinforcement on corrosion protection of RC members

By Itaru Horiguchi, Abdullah Keybani Someh, Takasi Horiguchi, Noboru Sasaki

2.2 自然電位測定

自然電位測定とは、コンクリート中の鉄筋とコンクリート表面上の照合電極との電位差を測定することである。なぜならコンクリート中における鋼材の腐食は、通常電気化学反応によって生じており鋼材は腐食状態に対応した電位分布を示すからである。本研究では、照合電極として塩化銀電極を、電位差計にはデジタルマルチメータ TR6846 を用いた。測定間隔は鉄筋に沿って、20mm 間隔程度である。測定にはコンクリートの含水量が大きな影響を与えるのであらかじめコンクリート表面をぬらし、測定値の変動を最小限に抑えるべく努力した。測定値はすべて硫酸銅基準(CSE)に換算した。ASTM C 876 によれば、電位 $E(V_{vs}CSE)$ が測定されたその箇所での鉄筋の腐食状態は次のような状態にある。電位 $E \geq -0.20V$ ならば 90%以上の確率で腐食が生じておらず、電位 $E < -0.35V$ ならば 90%以上の確率で腐食が生じ、 $-0.35V < E < -0.20V$ のときは不確定としている²⁾。

2.3 塩分濃度測定

促進装置に入れた供試体中にどれだけの塩化物が浸透しているかを塩分濃度測定により調査した。供試体の曝露表面から鉛直下方向に 5mm 間隔で 50mm の深さまで試料を採取した。少なくとも 10~15g の粉が出るようにドリルで穴を開け、その粉を No.100 のふるいにかけて余分なものを取り除き、これを試料とした。採取した試料は 5g 程度を広口ビンに採り、これに 50℃の蒸留水を 9cc 加え、湯煎をして 30 分間攪拌させ、攪拌後濾過した。濾液の塩分濃度を 5 回測定し、その最大値・最小値を捨てて残った 3 個のデータの平均を取った値を $Cl(\%)$ とした。その $Cl(\%)$ をもとに $Cl(kg/m^3)$ を次式により求めた：

① $Cl_W=Cl \times W_t/100$
② $Cl=Cl_W \times M_c/M_t$

W_t : 蒸留水の重さ(kg)、 M_c : コンクリートの重さ(kg/m³)
 M_t : 試料の重さ(kg)、 Cl_W : 蒸留水中の Cl の重さ(kg)

3. 実験結果

3.1 自然電位測定結果

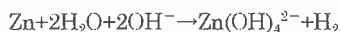
表-3 自然電位測定結果のまとめ

		28日 +1ヶ月	28日 +2ヶ月	28日 +3ヶ月	28日 +5ヶ月			28日 +1ヶ月	28日 +2ヶ月	28日 +3ヶ月	28日 +5ヶ月
PC03-1	No.40	×	×	—	—	SF03-1	No.23	△	△	—	—
	No.39	×	×	—	—		No.24	△	△	—	—
PC03-2	No.48	×	×	×	×	SF03-2	No.7	△	△	×	△
	No.47	×	×	×	×		No.8	△	△	×	×
PC03-3	No.28	×	×	×	×	SF03-3	No.38	△	○	×	×
	No.27	×	×	×	×		No.37	△	△	×	×
PC03-4	No.29	×	×	×	×	SF03-4	No.19	△	×	×	×
	No.30	×	×	×	×		No.20	×	×	×	×
PC10-1	No.15	×	×	—	—	SF10-1	No.3	×	×	—	—
	No.16	×	×	—	—		No.4	△	×	—	—
PC10-2	No.25	×	×	×	×	SF10-2	No.6	×	×	×	×
	No.26	×	×	×	×		No.5	△	△	×	×
PC10-3	No.9	×	×	×	×	SF10-3	No.14	×	×	×	×
	No.10	×	×	×	×		No.13	△	×	×	×
PC10-4	No.21	×	×	×	×	SF10-4	No.18	△	×	×	×
	No.22	×	×	×	×		No.17	×	×	×	×
PC30-1	No.33	△	×	—	—	SF30-1	No.36	△	△	—	—
	No.34	△	×	—	—		No.35	△	△	—	—
PC30-2	No.46	×	×	×	×	SF30-2	No.41	△	△	×	×
	No.45	×	×	×	×		No.42	△	×	×	×
PC30-3	No.44	×	×	×	×	SF30-3	No.32	×	×	×	×
	No.32	×	×	×	×		No.31	△	△	×	×
PC30-4	No.50	△	×	×	×	SF30-4	No.51	×	×	×	×
	No.49	△	×	×	×		No.52	△	×	×	×

ASTM の基準を用いて鉄筋の腐食を推測して○、△、×で区別して表にしたものが表-3 である。ASTM の基準に基づき、90%以上の確率で腐食が生じていない場合($E \geq -0.20V$)を○、90%以上の確率で腐食が生じている場合($E < -0.35V$)を×、不確定の場合($-0.35V < E < -0.20V$)は△で分類した。表-3 によれば全体的に PC の方が SF よりも腐食の進行が早いと言える。また塩分量の面から考えると塩分が最も少ない SF03 が最も腐食が遅れており、これより塩分量と腐食の傾向は比例関係にあると考えられる。

3.2 塩分濃度測定結果

図-2~4 は、5 ヶ月間腐食促進環境下に曝露した供試体の塩分量を測定した図である。図から、5 ヶ月間曝露した供試体では繊維を混入した供試体の方が塩分が多く浸透していることが分かる。この原因には鋼繊維を混入することで空隙率が高くなることや繊維の腐食の結果さびの膨張圧によって微小なひび割れが発生すること、繊維の亜鉛メッキがコンクリート硬化前にアルカリ溶液中で以下の反応を起こしていることなどが考えられる。



コンクリート硬化前にこの反応が起きると水素ガスにより微小な空隙ができ、それによって塩分が普通コンクリートに比べて浸透するのではないかと考えられる。

3.3 圧縮強度試験結果

図-5~7 は養生終了後と 1 ヶ月間、5 ヶ月間腐食促進環境下に曝露した供試体の圧縮強度を測定した図である。図より、全体的に鋼繊維の腐食が進行しても強度が低下しないことが分かる。これは鋼繊維が曲げ強度、引張強度の向上に寄与するのに対して、圧縮強度の鋼繊維による効果が少ないことが一因であると考えられる。圧縮強度 03、圧縮強度 10 では SF の供試体の方が PC よりも強度が低い。この原因としてはスランブ試験から分かるように鋼繊維を混入することによって空隙率が高くなることや、亜鉛とアルカリ成分の反応で発生する水素ガスによる空隙、荷重と繊維の方向性などが関係すると考えられる。しかし、空気量の結果から分かるように PC、SF とともに空気量の目立った違いは見られず、鋼繊維の腐食進行しても強度が低くなることは無いことから荷重と繊維の方向性などの因子の影響が考えられる。また図より、腐食環境下でも材齢の経過と共にコンクリートの強度が増加することが分かる。

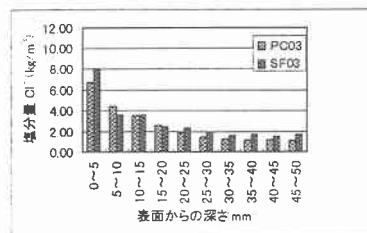


図-2 塩分濃度測定結果 (塩分 0.3kg/m³)

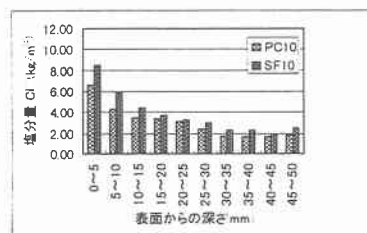


図-3 塩分濃度測定結果 (塩分 1.0kg/m³)

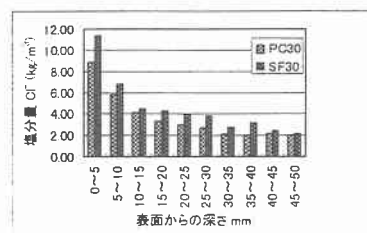


図-4 塩分濃度測定結果 (塩分 3.0kg/m³)

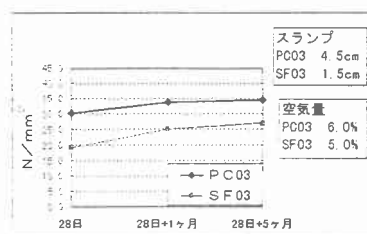


図-5 圧縮強度試験結果 (塩分 0.3kg/m³)

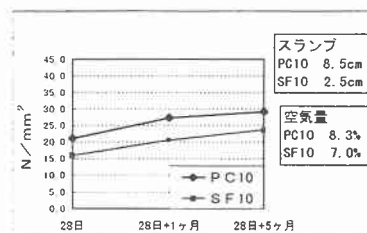


図-6 圧縮強度試験結果 (塩分 1.0kg/m³)

3.4 鉄筋表面観察結果

自然電位の測定と共に、本実験では供試体を実際に壊して鉄筋を取り出し、防食効果の検討を行った。鉄筋の表面観察は、腐食促進試験を開始後2ヶ月に実施した。2ヶ月間曝露の結果では30-1、03-1のSFではさびが見られず、10-1でもSFのさびは深刻なものではなかった(図-8)。

これらの結果と前述した自然電位の測定結果とを比較すると普通コンクリートでは全ての供試体で部分的な腐食が認められこの結果は自然電位でも×印を示し両者の結果は一致している。GaSFを混入したコンクリートの場合もさびが生じたSF10-1で×印を示し、全くさびが見られなかったSF03-1、30-1は△印を示し両者の結果は一致している。しかし、さびの起きている場所、程度を特定することは難しく、また腐食が進行して鉄筋に接している繊維が腐食した場合に一致した結果が得られるかは分からない。

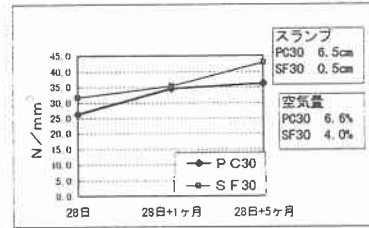


図-7 圧縮強度試験結果(塩分 3.0kg/m³)

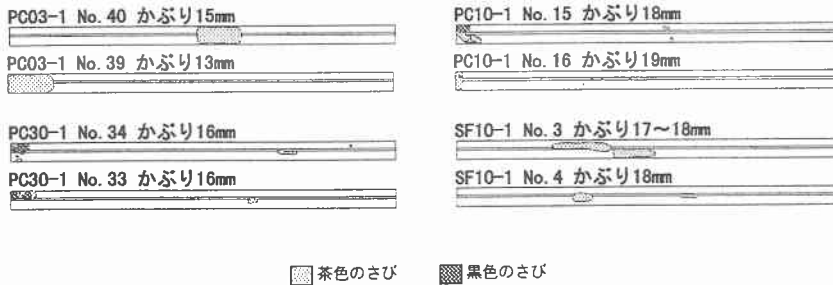


図-8 2ヶ月間曝露鉄筋表面観察結果

4. まとめ

本研究によって以下のことが判明した。

- 1.亜鉛メッキ鋼繊維を混入したコンクリートはプレーンコンクリートよりも鉄筋の腐食を遅らせることができる。
- 2.亜鉛メッキ鋼繊維の一部は腐食するがそれによる圧縮強度の低下はなく、腐食環境下でも材齢の経過と共にコンクリートの強度が増加する。
- 3.非破壊試験法である自然電位法による鋼材の腐食診断は実際に壊して観察する方法とほぼ一致した結果となるが、さびの程度や場所を特定するのは困難である。

<参考文献>

- 1)Abdullah Keyvani Someh,Noboru Saeki,Takenori Notoya:Corrosion protection shield of steel bars,due to steel fibers in concrete,ACI SP-171,pp.227-248.1997
- 2)Half cell potentials of reinforced of reinforcing steel in concrete,ASTM Philadelphia.1977