

報告 浸透性防錆剤を塗布したコンクリート中にある鉄筋の腐食

下澤 和幸*1・田村 博*2・永山 勝*2

要旨:コンクリート中の鉄筋のごく近傍に埋設ミニセンサを設置することで、かぶりコンクリートの悪影響をきわめて小さくした腐食モニタリング手法について検討した。本実験では、高濃度塩化物を含むコンクリート供試体中鉄筋の電気化学的特性値の挙動と同条件供試体に浸透性防錆剤を用いて補修した場合の特性値の挙動を比較検討した。この結果、本モニタリング手法によって、経時的な腐食傾向・腐食速度の解釈が可能であり、鉄筋腐食の挙動について多くの情報が得られる合理的なモニタリング手法であることが判った。

キーワード:鉄筋腐食, ミニセンサ, 腐食モニタリング, 自然電位, 分極抵抗

1. はじめに

コンクリート構造物における鉄筋の腐食状態・腐食速度・腐食環境を定量的に評価するため、埋設ミニセンサを用いた腐食モニタリング手法の検討を重ねている¹⁾²⁾。既報²⁾において、本モニタリング手法で得られた電気化学的特性値から、コンクリート中の鉄筋の腐食状態・腐食速度・腐食環境の定量的評価が可能であることを報告した。本報の実験は、約4年間の連続モニタリングによって得られた結果をまとめたものであり、塩害コンクリートを対象とした防錆補修の効果を電気化学的特性値から確認することを目的として実施したものである。

本実験では、欧米で劣化構造物に対して使用されはじめた有機系の塗布浸透性防錆剤(両極形防錆剤)を用いて、コンクリート中の塩化物イオン量 3 kg/m^3 の鉄筋コンクリート供試体に対して、初期に補修を施したもの(以下、補修供試体と呼ぶ)と無処理の供試体(以下、非補修供試体と呼ぶ)を製作し、腐食促進環境下における鉄筋腐食実験を行った。あらかじめ供試体中の鉄筋近傍にミニセンサを埋設し、約4年間の実験期間中を連続して腐食モニタリングを行い、電気化学的特性値の経時変化を詳細に

検討した。また、実験期間の要所で供試体を破壊して鉄筋の腐食状態を確認した。

本報では、筆者らのミニセンサを用いた腐食モニタリング手法は、長期間の電気化学的特性値の挙動にもとづく、経時的な腐食傾向・腐食速度の解釈が可能であることが判り、また実験に使用した有機系の塗布浸透性防錆剤の防錆効果が確認されたことを報告する。

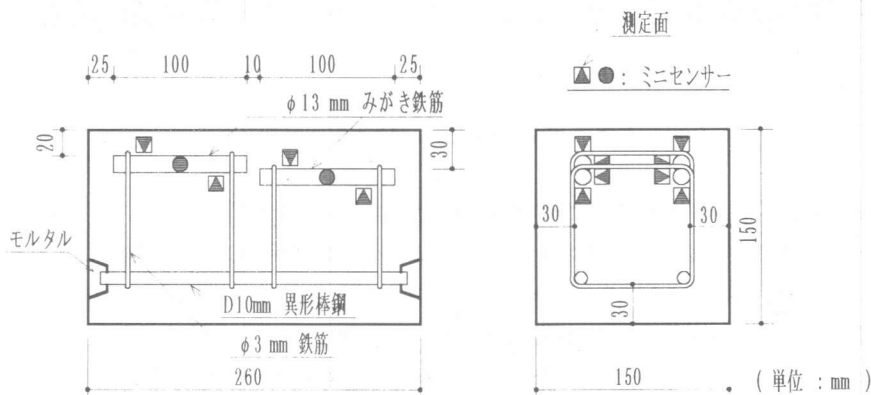
2. 実験方法

供試体は、測定対象鉄筋($\phi 13\text{ mm}$ みがき鉄筋:長さ 10 cm)をかぶり厚さ 2 cm および 3 cm に各2本ずつ水平に埋設させた鉄筋コンクリート供試体であり、形状および寸法を図-1および写真-1に示す。使用したコンクリートは、 $W/C=65\%$ とし、塩化物イオン含有量は、 3 kg/m^3 とした。また、鉄筋には電気化学的特性値を測定するために筆者らが開発したミニセンサを取り付けた。ミニセンサは、外径 13 mm の大きさで、照合電極と対極を一体化したものである(写真-2参照³⁾)。

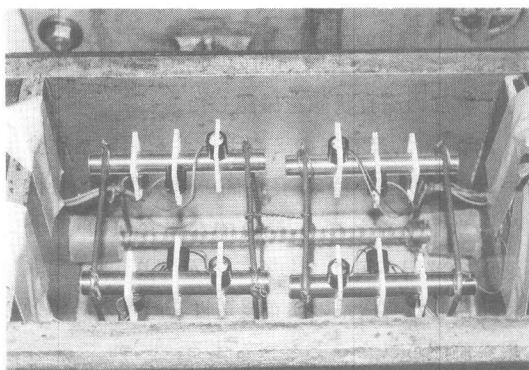
ミニセンサは、かぶり厚さ 2 cm および 3 cm の測定対象鉄筋の上面、下面および側面に取付け、鉄筋表面からの距離を 1 mm に固定した。製

*1日本建築総合試験所 材料試験室 研究員(正会員)

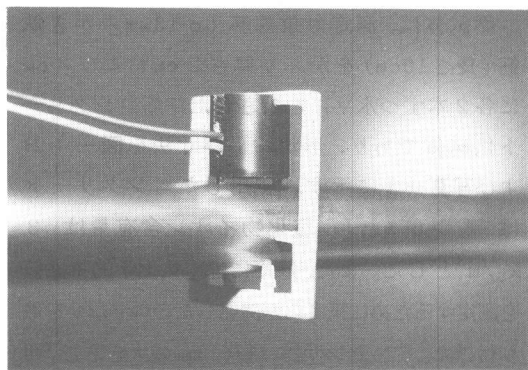
*2日本建築総合試験所 材料試験室 主任研究員 工博(正会員)



図－１ 鉄筋コンクリート供試体



写真－１ 埋設ミニセンサと配筋状況



写真－２ 埋設ミニセンサの固定状況

作を終えた供試体は、あらかじめ鉄筋を腐食させるために、脱型直後から60日間20℃100%RHで湿潤養生(以下、初期養生と呼ぶ)を行った。

初期養生後、14日間20℃65%RHの室内で空气中養生し、7日目にコンクリート表面から塗布浸透性防錆剤を、本剤の標準仕様(333g/m²)に

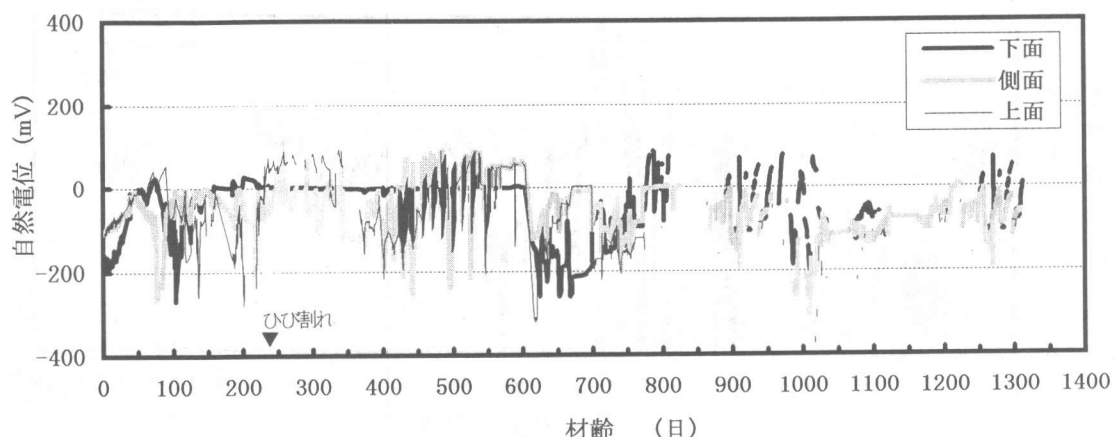
従って塗布し、補修供試体を製作した。本防錆剤は、アミノアルコールを主成分とし、気化拡散することで浸透速度が早いとされているものである。補修供試体および非補修供試体の養生条件は、同一とし、乾燥(50℃30%RH)と湿潤(40℃100%RH)を1週間ごとに繰り返す、乾燥湿潤繰返しによる促進腐食養生とした。

腐食モニタリングは促進腐食養生開始から2時間ごとで連続的に行った。

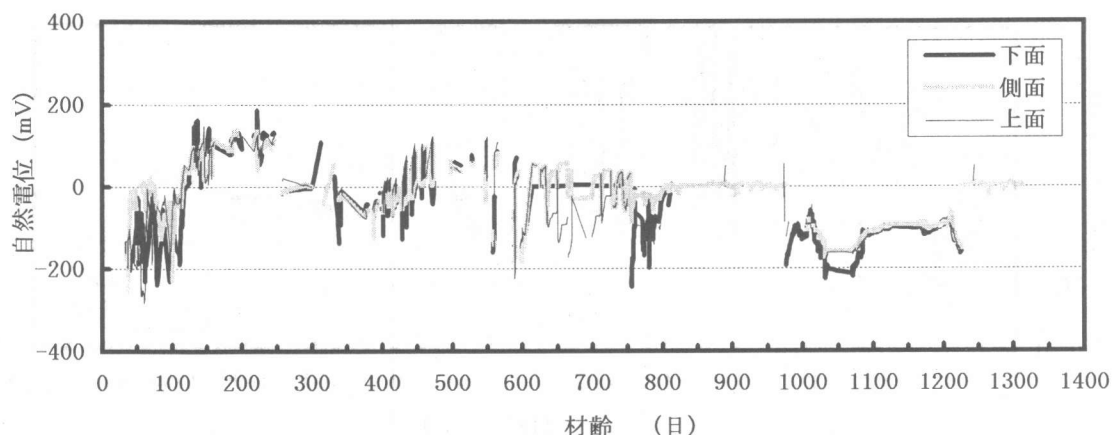
なお、初期養生時や補修実施時などの材齢経過の要所において、実際の鉄筋腐食状態を確認するため、補修と非補修のそれぞれの同条件で製作したコントロール用供試体(ミニセンサは取り付けしていない供試体)を破壊して、腐食状態の定量化を行った。この結果を用いて電気化学的特性値の経時変化の解釈を行った。

3. 実験結果と考察

本実験では、高温環境下における乾燥湿潤繰返し養生を行ったため、屋外暴露などの自然環境下よりも厳しい腐食環境に相応した測定値が得られている。電気化学的特性値による腐食状態の推定および補修効果の確認については、補修したものと非補修のものとの相対比較から、有意差や防錆効果を考察することとした。なお、電気化学的特性値の経時変化については、早期に腐食が生じた、かぶり厚さ2cmの測定結果のみを示すこととし、自然電位および分極



図－2.1 自然電位測定値の経時変化（非補修供試体：かぶり厚さ2 cm）



図－2.2 自然電位測定値の経時変化（補修供試体：かぶり厚さ2 cm）

抵抗について考察した。液抵抗については割愛した。また、図－2.1、2.2および図－3.1、3.2の横軸”0”は、供試体製作後の材齢では60日目にあたる。

3.1 自然電位の経時変化について

本実験に使用したミニセンサの電位基準は、銅-硫酸銅電極基準(CSE)に対して、 -230mV にあるため、ASTM C876による腐食発生確率が90%以上と評価される -350mV は、ミニセンサ基準では、 -80mV になる。

①図－2.1に示す非補修供試体の場合、測定期間の70～200日、400日以降の特に620～770日に、電位が -80mV より卑な値にあ

り、腐食発生傾向の強弱が繰り返し変化している状況が判る。

②非補修供試体の鉄筋の上面、側面および下面のそれぞれの電位変化をみると、ひび割れが発生するまでの期間では、上面が特に卑な電位であるが、ひび割れ発生後は逆に最も貴な電位に急変するなど、腐食状態の詳細な解釈が可能であることが判る。

③約800日以降の測定値は、鉄筋の側面ミニセンサのみが連続採取できている。上面および下面においては、ひび割れの成長に伴い、鉄筋またはミニセンサの界面に剥離が生じたため測定が困難になった経過が現れていると考える。

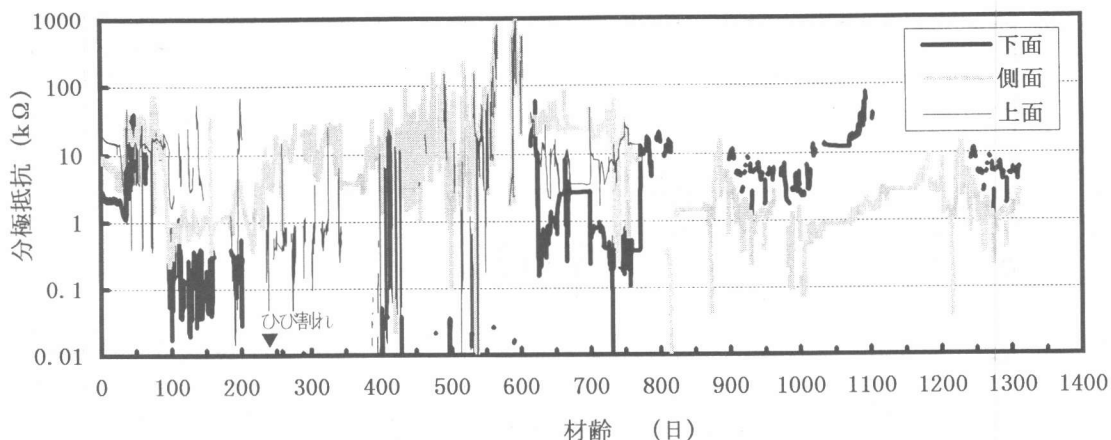


図-3.1 分極抵抗測定値の経時変化（非補修供試体：かぶり厚さ2 cm）

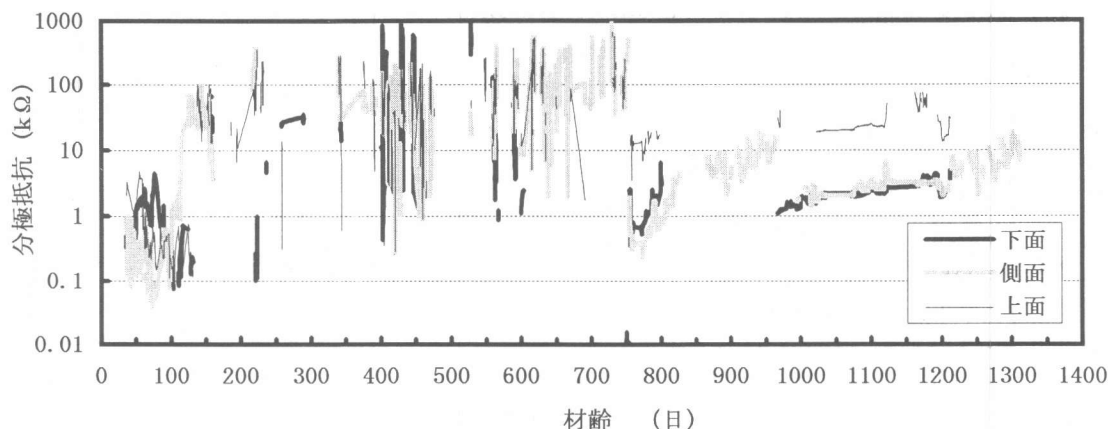


図-3.2 分極抵抗測定値の経時変化（補修供試体：かぶり厚さ2 cm）

④図-2.2に示す補修供試体の場合、塗布補修の後、約120日までの期間は、 -80mV より卑な電位であり、腐食発生傾向がみられるが、それ以降は電位が貴な方へ移行し、概ね『不確定』の領域で長期間推移している。

⑤補修供試体の約950日以降は、再度、腐食傾向が現われ始めており、腐食発生時期は初期の約120日までと約950日以降と考えられる。

⑥上面、側面および下面、それぞれの電位変化から、非補修のものでは、アノード部の移行が見られるマクロセル状態と推測できるのに対して、補修供試体では測定面による違いはあまり認められず、ミクロセル状態と推測される。

⑦非補修供試体と補修供試体の電位変化を比較すれば、 -80mV より卑な電位の発生頻度や測定値の振幅など、いずれも有意な差が認められる。

3.2 分極抵抗の経時変化について

本実験で使用した 3kg/m^3 の塩化物量を含むコンクリートにおいては、ミニセンサの分極抵抗測定値は、鉄筋表面の概ね 1cm^2 を対象に測定している³⁾⁴⁾。図-3.1、3.2に示す分極抵抗の単位は、 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と解釈しても問題ない。

なお、実験では高温環境下での促進腐食養生を行っているため、分極抵抗の絶対値を評価することが困難である。補修の有無を比較するこ

表－１ 鉄筋の腐食面積および腐食減量

供試体	材齢 (日)	かぶり厚さ (cm)	ひび割れ幅 (最大:mm)	腐食面積 (cm^2 :%)	腐食減量 (g:%)	浸食度* ($\mu\text{m}/\text{year}$)
初期養生	60	2	なし	15.1:37	0.57:0.55	108
			なし	17.7:43	0.80:0.77	152
		3	なし	15.1:37	0.53:0.51	101
			なし	16.7:41	0.51:0.50	97
非補修	303	2	0.2	39.3:96	2.87:2.78	108
			0.2	34.5:84	1.56:1.51	59
		3	0.1	32.2:79	1.93:1.87	73
			0.1	26.9:66	2.21:2.14	83
	1371	2	1.0	40.8:100	6.05:5.84	51
			0.6	40.8:100	6.24:6.02	53
		3	1.4	40.8:100	10.66:10.31	91
			1.0	40.8:100	11.97:11.56	102
補修	488	2	なし	22.8:56	1.02:0.90	24
			なし	23.9:59	1.13:1.09	26
		3	なし	24.0:59	1.22:1.17	29
			なし	22.5:55	0.70:0.68	16
	1371	2	なし	32.5:80	2.35:2.26	20
			なし	29.6:72	1.60:1.54	13
		3	なし	24.1:59	1.33:1.28	11
			なし	32.5:80	2.36:2.31	20

*:腐食減量から、1年あたりの鉄筋表面浸食厚さに換算した値

とで相対的な腐食速度の違いを考察した。

①図－3.1に示す非補修供試体の場合、測定開始後、約90日頃から分極抵抗が小さな値に変化し始め、約550日付近までは、0.01～0.1k Ω の極めて小さい測定値が継続している。この期間は、腐食が活性にあり、相対的に腐食速度が早い期間であると考えられる。

②また、鉄筋の下面側の分極抵抗が小さい期間は、同期間の上面側では比較的大きな分極抵抗であることから、交互に入れ代わる関係が認められ、アノード部の移行が上下で繰り返されていると考えられる。

③図－3.2に示す補修供試体の場合、初期の130日頃までは、小さな分極抵抗値であるが、その後2桁から3桁ほど大きな測定値へ変化している。約750日頃まで大きな分極抵抗が継続し、防錆剤による腐食抑制効果が継続していることが推測される。その後の分極抵抗は、小さな値へと変化し、非補修供試体の同時期の測定値と大きな違いはない。

④補修供試体では、分極抵抗が約750日付近まで徐々に大きくなっていることが、特徴であ

り、非補修供試体との違いである。

⑤本実験における非補修と補修供試体の相対的な違いは、試験期間の前半部分において分極抵抗の推移範囲が概ね一桁異なることである。また、非補修供試体と補修供試体の分極抵抗測定値の振幅についても、有意な差が認められ、非補修供試体の腐食状態がより活性なものといえる。

3.3 分極抵抗と腐食状態の関係について

補修および非補修供試体のそれぞれと同条件で製作し養生したコントロール供試体(ミニセンサは付けていない)を破壊し、鉄筋腐食状態を求めた結果を表－1に示す。また、鉄筋の3面に設置したミニセンサが、いずれも途切れることなく計測された約475日までについて、分極抵抗の逆数の時間積分値を算出し、平均分極抵抗値を求めた結果を表－2に示す。これらの結果から以下のことが明らかとなった。

①表－2の平均分極抵抗値から、補修鉄筋は上面・側面・下面のいずれでも、概ね1k $\Omega \cdot \text{cm}^2$ であるが、非補修鉄筋では、特に上面および下面で補修鉄筋に比べ1桁小さな平均分極抵抗値で

表－２ 分極抵抗の逆数の時間積分値から求めた平均分極抵抗値
(材齢475日目までの比較)

供試体	かぶり厚さ	測定面	Rpの逆数の時間積分値 RRD: $\int (1/R_p) \cdot dt$ (day/k Ω ・cm ²)	RRDから求めた平均 分極抵抗値 *1 av.Rp(k Ω ・cm ²)
非補修	2cm	上面	4471	0.11
		側面	189	2.50
		下面	14305	0.03
補修	2cm	上面	442	1.07
		側面	482	0.98
		下面	413	1.14

*1: 平均分極抵抗値 av.Rp = 1 / (RRD / 475日)

あった。このことから、補修の効果を腐食速度で検討すると、1桁程度腐食速度を抑制していることが推測される。

②303日目および488日目に破壊したコントロール供試体のかぶり厚さ2cm鉄筋の浸食度は、補修と非補修を比較すると2～5倍の差がある。ミニセンサを取り付けた供試体と同一の供試体ではないものの、ミニセンサによる電気化学的特性値は、実際の腐食状態を概ね把握できている判断される。

4. まとめ

筆者らが開発したミニセンサ使用鉄筋腐食モニタリング手法で行った本実験の結果より、以下のことが明らかとなった。

- ①ミニセンサを用いて電気化学的特性値を連続測定することで、経時的な腐食発生傾向および腐食速度の情報を詳しく把握することが可能である。
- ②自然電位測定値は、例えば-80mVより卑な電位の発生頻度や測定値の振幅などを指標にして腐食発生傾向が把握できる。
- ③分極抵抗測定値は、経時的な変化や測定値の振幅などから相対的評価が可能である。また、コントロール供試体などで鉄筋腐食量を検量することで、分極抵抗値から腐食速度を評価できる可能性が高い。

以上の結果から、コンクリート中の鉄筋近傍に埋設したミニセンサにより、長期間腐食モニ

タリングすることで得られた自然電位や分極抵抗測定値が、鉄筋の腐食状態や腐食速度の推定に関して多くの情報が得られる合理的なモニタリング手法であることが確認できた。今後も、同手法の確立を目指し、モニタリングデータの収集・整理に努めたい。

参考文献

- 1) 下澤和幸・田村博・永山勝：小型埋設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大会論文報告集，Vol. 16，No. 1，pp. 793-798，1994. 6
- 2) 下澤和幸・田村博・永山勝：埋設ミニセンサによる鉄筋腐食モニタリング，コンクリート工学年次大会論文報告集，Vol. 18，No. 1，pp. 813-818，1996. 7
- 3) 永山勝・田村博・谷川恭雄：コンクリート中の鉄筋モニタリング用ミニセンサの基礎的性能に関する水溶液実験，日本建築学会構造系論文集，No. 510，pp23-28，1998. 8
- 4) 永山勝：コンクリート構造物における鉄筋腐食の非破壊モニタリングに関する研究，名古屋大学学位請求論文，1999. 1