

報告 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

永山 勝*¹・田村 博*²・下澤和幸*¹

要旨：コンクリート構造物に埋設したミニセンサーで測定した三種類の電気化学的特性値で、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には、それらの測定値と腐食の関係についてデータベースを作成する必要がある。埋設ミニセンサーによって三種類の電気化学的特性値を測定する一方、腐食電流計によりマクロセル腐食電流を連続的に測定し、両者の関係を求める鉄筋腐食試験方法を提案する。

キーワード：腐食モニタリング、ミニセンサー、腐食電流、電気化学的特性値、試験方法

1. はじめに

コンクリート構造物における鉄筋腐食モニタリングの確立を目指して、埋設ミニセンサーによる方法を検討している [1, 2]。本報では、ミニセンサーで測定した三種類の電気化学的特性値で、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には、それらの測定値と腐食の関係についてデータベースを作成する必要があるとの見地に立ち、埋設ミニセンサーによって三種類の電気化学的特性値を測定する一方、腐食電流計によりマクロセル腐食電流を連続的に測定し、両者の関係を求める鉄筋腐食試験方法を提案する。

2. ミニセンサー

ミニセンサーの特徴は、下記のとおりである。

①鉄筋近傍に埋設することにより、かぶりコンクリートの影響を最小限化した測定値が得られる。従来の方法によると、自然電位のみならず分極抵抗・液抵抗もかぶりコンクリートの影響を受ける。鉄筋表面から1～数mmの距離に埋設したミニセンサーで、測定値に及ぼすかぶりコンクリートの影響を最小限化できる。

②腐食状態・腐食速度・腐食環境を評価するための三種の電気化学的特性値を測定できる。ミニセンサーは、直径4mmの円形偽参照電極と内径6mm外径10mmの環状対極を有し、自然電位、分極抵抗、液抵抗を測定する(写真-1参照)。本報告では、分極抵抗・液抵抗の単位は、ともに $\Omega \text{ cm}^2$ でなく Ω で表示している。その理由は、このセンサーは電流制御用ガードリングはなく、電流分布を決定できないためである。したがって、測定データの取りまとめに当たっては、測定対象とした鉄筋の形状・寸法別に行う必要がある。

③対極や偽参照電極には金を用いている。金は、小型製品製作技術が確立しており、耐久性もあるので採用した。銀塩化銀電極のような従来の参照電極では、金を用いた偽参照電極の場合とは異なり、電解液の漏出によるセンサーの精度低下や鉄筋腐食環境の汚染が生じる。偽参照電極の場合には、従来の参照電極との電位差に及ぼす、pHや溶存酸素濃度ならびに塩化物イオン濃度の影響を明らかにする必要があるが現在別途検討中である。

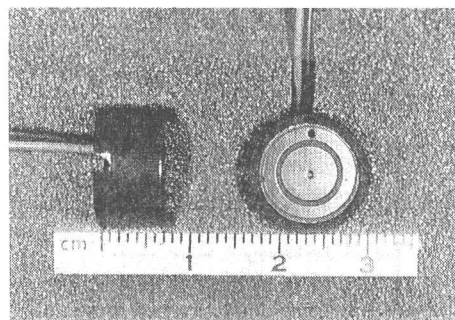


写真-1 ミニセンサー

*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 材料試験室長, 工博 (正会員)

④センサーは小粒の粗骨材と同程度の大きさである。円筒状のセンサーの外径は13mm、高さは7mmである（図-1、写真-2参照）。センサーがかぶりコンクリートのひび割れ性状に与える影響はない、言い換えれば、コンクリート構造物の構造耐力や耐久性に影響を与える心配はない。

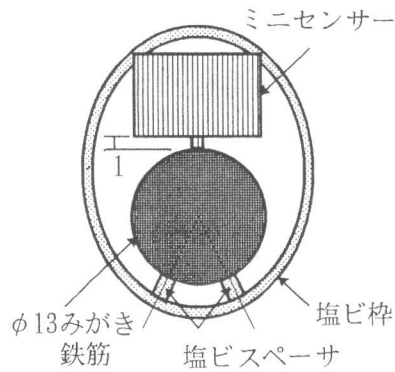


図-1 ミニセンサー設置概要

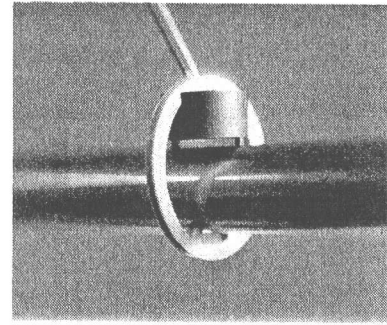


写真-2 ミニセンサー設置状況

⑤新設構造物のみならず既設構造物にも適用可能な新設構造物の場合、固定用治具を用いてミニセンサーを鉄筋近傍に固定する。既存構造物の場合には、鉄筋近傍にコアを穿孔し、センサーを埋設する。充填材の適切な選択は今後の課題の一つである。

⑥コンクリート表面に絶縁体があっても測定が可能である。従来の可搬式プローブでは、仕上げ材が絶縁体の場合、測定不能であった。

⑦実環境下での実構造物の連続腐食モニタリングが可能となる。腐食は敏感な反応で、実環境下で時々刻々変化しており、連続的なモニタリングは腐食問題の解決に有用である。埋設ミニセンサー使用腐食モニタリングにより、コンクリート構造物の維持管理が容易となる可能性が高い。

3. ASTM腐食試験法

マクロセル腐食状態を作り、断続的にはあるが腐食電流を測定することにより、コンクリート中の鉄筋の腐食状態をモニタリングし、防錆剤の性能評価を行う試験方法として、ASTM C 109-92による試験方法（以下、これをASTM腐食試験法と呼ぶ）がある。

ASTM腐食試験法は、鉄筋コンクリート供試体の上面に塩水池を設けて塩化物イオンをコンクリート中に浸透させることにより、アノード鉄筋の腐食を促進し、その時カソード鉄筋との間に流れるマクロセル腐食電流を測定するものである。このASTM腐食試験法を改善して、三種類の電気化学的特性値を埋設ミニセンサーによって測定する一方、腐食電流計によりマクロセル腐食電流を連続的に測定し、両者の関係を求める鉄筋腐食実験方法（以下、これをGBRC腐食試験法と呼ぶ）を作成することとした。

4. GBRC腐食試験法

4. 1 GBRC腐食試験法の特徴

ASTM腐食試験法を改良したGBRC腐食試験法には、以下のような特徴がある。

①非破壊試験として、腐食電流計によりマクロセル腐食電流を、ミニセンサーにより電気化学的特性値を、ともに連続的に測定する。

②破壊試験として、腐食面積・孔食深さ・腐食減量を測定する。

③非破壊試験と破壊試験の相互比較など試験結果の総括により、コンクリート中の鉄筋の腐食に関する精度の高いデータベースが作成できる。

④同データベースに基づいて、コンクリート構造物の埋設ミニセンサーによる腐食モニタリングで得られる測定値、自然電位・分極抵抗・液抵抗から、腐食状態・腐食速度・腐食環境を精度良く推定できる可能性がある。

表-1 ASTM腐食試験法とGBRC腐食試験法の比較

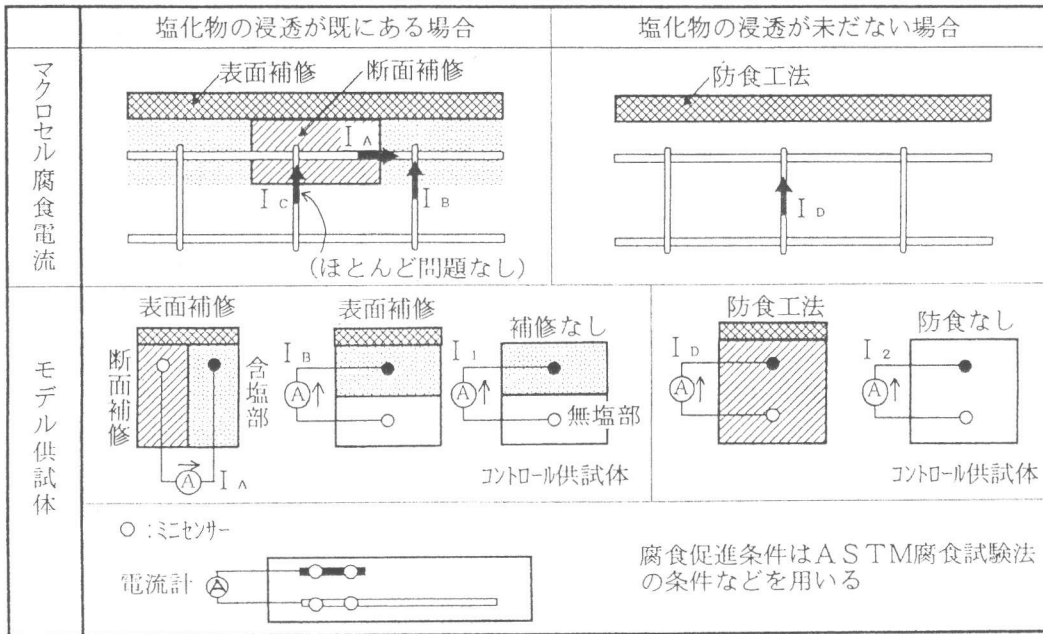
項目	ASTM腐食試験法	GBRC腐食試験法	
装置 試薬 および 材料	電圧計 100Ω抵抗	<ul style="list-style-type: none"> ・自動腐食電流測定装置（精度：0.01μA） ・自動腐食モニター（E, Rp, Rsを測定） （内部抵抗10¹²Ω，電位測定範囲±2V） 	
	粗骨材		鉄筋のかぶり厚さの関係で粗骨材は12.5mmとしている
	鉄筋		13mm異形棒鋼
	10%硫酸		鉄筋の表面処理に使用
参照電極	加ル電極または銅硫酸銅電極で鉄筋の電位を測定する	・ミニセンサーで鉄筋の自然電位，分極抵抗液抵抗を測定する	
	供試	混和剤の防錆効果を確認するためペーパースコクリートのパラメータを定めている ・セメント：356±3kg/ℓ ・W/C：50±1% ・空気量：6±1% ・最小スパン：50mm	試験目的に応じて定める
体 準 備	供試体数量	1回の試験で最小3体製作する種類ごとにコントロール用を同数製作	試験目的に応じて定める
	供試体形状	・112×150×275mmの直方体 ・図-2参照	・100×100×400mmの直方体 ・図-3参照
	鉄筋の前処理	・10%硫酸溶液に10分浸漬 ・乾燥後ブラシかけ ・端部に電気メッキ用テープを巻く	・#600サトウペ-ハ-磨き，アセトン脱脂，質量測定 ・鉄筋は全域埋設するため端部処理なし ・試験後の錆落しに脱酸素錆除去剤を使用
	初期養生	脱型後28日間は霧室養生	・脱型後14日間は湿空養生、その後7日間は気乾養生 ・試験目的に応じて定める
手 順	腐食促進養生	下記を1サイクルとし繰り返す ・3%NaCl塩水池を2週間 ・塩水を除去し2週間乾燥（23±3℃，50±5%）	下記を1サイクルとして繰り返す ・3%NaCl塩水池を1週間（20℃，65%） ・塩水を除去し50℃乾燥室で1週間（高温とし促進効果を高める）
	腐食電流測定	塩水池養生の第2週目に100Ω抵抗を介し電圧を測定し、腐食電流を求める	自動腐食電流測定装置で全期間中を1時間間隔で電流値を測定する
	電位測定	塩水池の中に参照電極を置き、鉄筋の腐食電位を測定する（ASTM C 876による）	鉄筋近傍に埋設したミニセンサーと自動腐食モニターにより、自然電位，分極抵抗，液抵抗を全期間中1時間間隔で自動測定する
試験期間	コントロール試験体の平均腐食電流値が10μAかそれ以上に、または試験体の半数以上が10μA同等かそれ以上になるまでとし、その後さらに3サイクル継続し、評価する	試験目的に応じて定める	
埋設鉄筋の評価	試験体を破壊し、次の評価を行う ・腐食発生面積測定，面積率 ・腐食状況の記録写真撮影	試験体を破壊し、次の評価を行う ・腐食マップ，腐食発生面積測定，面積率 ・鉄筋の腐食減量測定，孔食深さ測定 必要に応じて、次の測定を行う ・コンクリート中の塩化物濃度の分布測定	

4. 3 補修工法性能評価試験方法

塩害やかぶり不足などにより鉄筋が腐食して劣化したコンクリート構造物の補修が、左官的な補修工法により実施されている。しかし、これらの補修工法の性能評価は、充分には行われてはおらず、JCI補修工法研究委員会でも大規模な暴露実験により補修工法の比較などにより検討がされており[3]、未だ補修工法性能評価試験方法は確立されていない。

左官的補修工法では、劣化した部分を部分的に撤去して修復する工法が一般的に行われているが、補修後の鉄筋の再腐食は、パッチングした箇所と下地コンクリートの境界部分などで懸念され、マクロセル腐食電流に注目した補修性能評価方法として、表-2に示す計5種類の供試体を用いる「GBRC腐食試験法を用いた補修性能評価試験」を提案する。

表-2 GBRC腐食試験法を用いた補修性能評価試験



4. 4 鋼繊維補強コンクリートに関する腐食試験方法

鋼繊維補強コンクリートは、ひび割れがない場合、過酷な条件に晒されても表面の鋼繊維のみが腐食し、内部にある鋼繊維はもとより鉄筋も全く腐食しないことが指摘されている[4]。しかし、その腐食防食機構の解明は、充分には行われていないのが現状である。

そこで、GBRC腐食試験法を用いて図-4に示す実験を開始したところである。同図に示すように、鋼繊維の腐食モニタリングもミニセンサーを用いて試みている。これまでに得られた実験結果は、図-5、6のごとくである。ミニセンサーによって得られた測定値は環境の変化に応じて順調に推移していることが判る。未だ塩化物イオンの供試体への浸透が充分でなく、ミニセンサーの測定値によれば鋼繊維ではわずかに表面近くにあるものが内部のものより腐食傾向があることが伺える程度であり、鉄筋には全く腐食傾向はなく、腐食電流測定値の図示も割愛した。

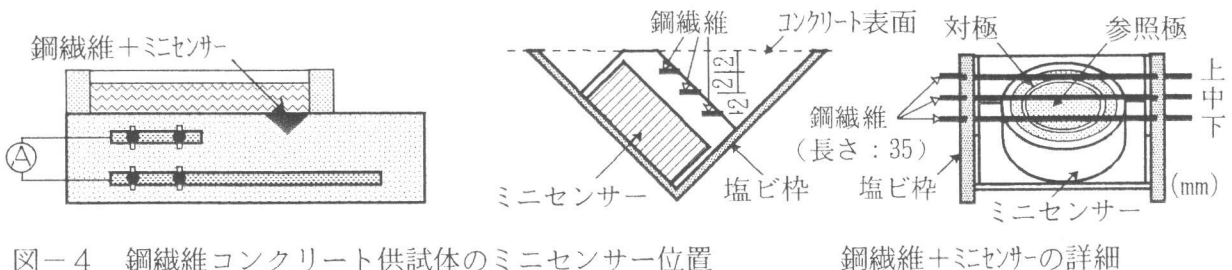


図-4 鋼繊維コンクリート供試体のミニセンサー位置

鋼繊維+ミニセンサーの詳細

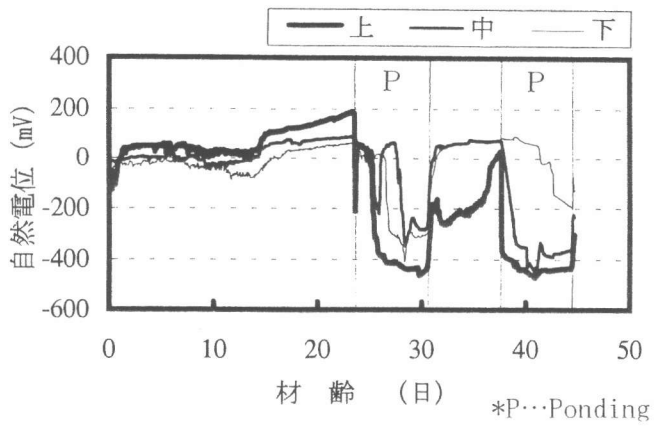


図-5.1 自然電位の経時変化（鋼繊維）

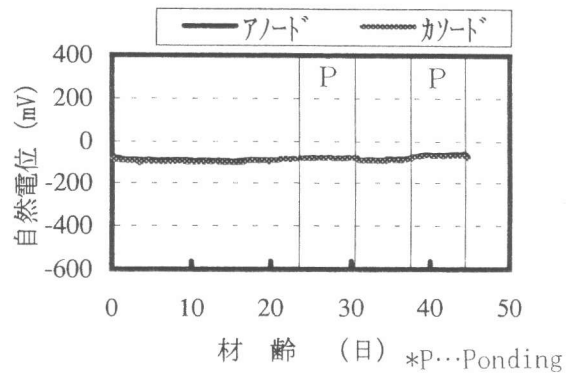


図-6.1 自然電位の経時変化（鉄筋）

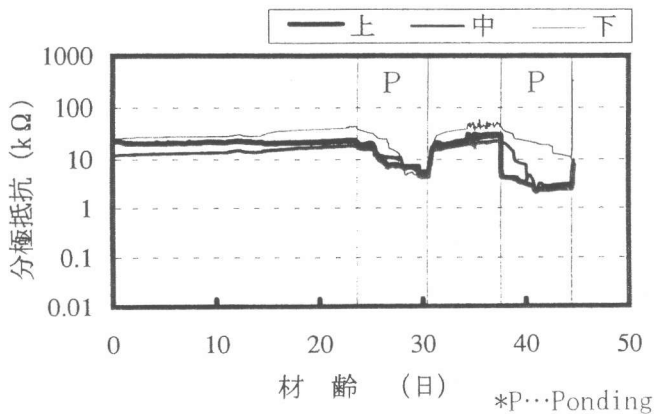


図-5.2 分極抵抗の経時変化（鋼繊維）

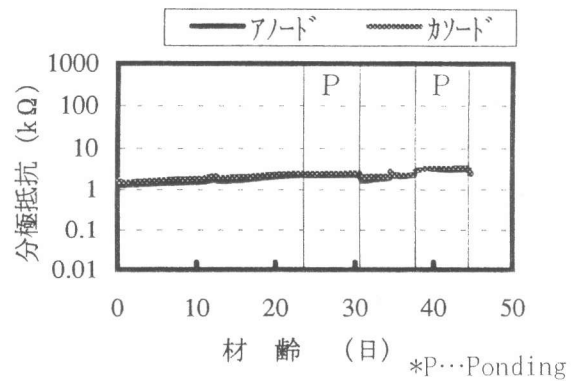


図-6.2 分極抵抗の経時変化（鉄筋）

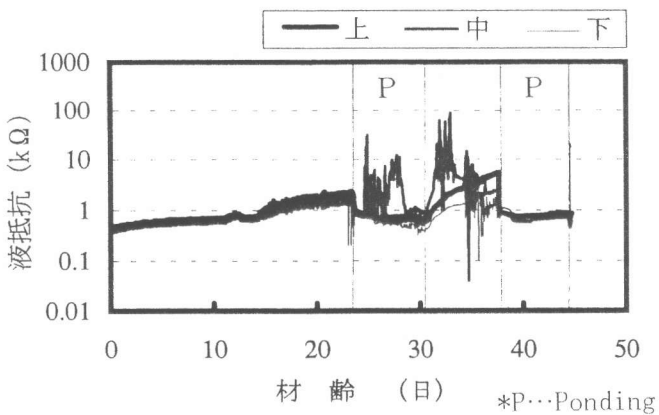


図-5.3 液抵抗の経時変化（鋼繊維）

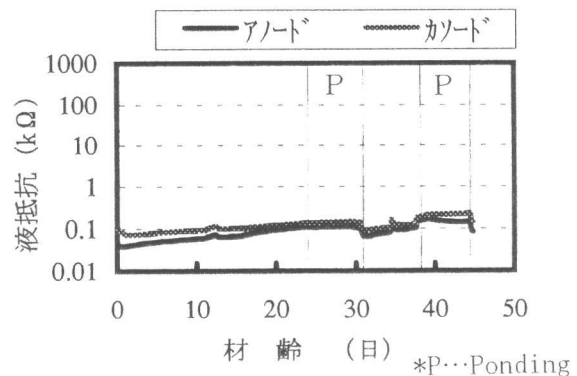


図-6.3 液抵抗の経時変化（鉄筋）

5. おわりに

腐食電流計と埋設ミニセンサーを用いて腐食現象を連続的に観測する、GBRC腐食試験法を提案した。同試験法を用いた補修性能評価試験法を実施することにより、コンクリート構造物の補修工法の確立に寄与したい。また、GBRC腐食試験法を用いた各種試験により鉄筋腐食データベースを作成し、埋設ミニセンサーによる腐食モニタリング手法による、腐食状態・腐食速度・腐食環境の定量的評価基準の策定を行いたい。

〈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論文報告集，Vol.16，No.1，pp.793-798，1994
2. 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，Vol.18，No.1，1996
3. コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書（Ⅱ），日本コンクリート工学協会，1994.10
4. 小林一輔他：海洋環境下における鋼繊維補強コンクリートの鉄筋防食効果，土木学会論文集，第414号/V-12，pp195-203，1990.2