

## 鋼材腐食モニタリングセンサの開発

オリエンタル建設(株) 正会員 工修 ○二井谷教治  
オリエンタル建設(株) 正会員 小林 俊秋

### 1. はじめに

わが国においてはこれまで、数多くの公共構造物が建設されてきており、市民生活に供されている。それらの主要な構造材料として、鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートが使用されてきたが、比較的早期に劣化する構造物も見られ、維持補修のため財源を圧迫しつつある。損傷例としては、塩害および中性化に起因する鋼材腐食が顕著である。このひとつの原因は、設計手法にあると考えられる。従来の設計は許容応力度法が主体であり、厳しい環境条件下に建設されたものに関しては、鋼材のかぶりなど、耐久性に関連する事項が十分配慮されているとはいえない場合が多い。

これらの損傷を受けた構造物を維持するため、さまざまな補修・補強が施されている。しかしながら、一旦損傷を受けてからの事後保全では、多大な労力と費用を要するばかりでなく、構造物の機能を十分回復させることは難しいのも現実である。そこで、予防保全を行うことが有利であり、それを可能にするひとつの手段が、鋼材の腐食モニタリングである。構造物中にセンサを埋め込んでおき、鋼材がどの程度の腐食環境にあるかを予測・監視するシステムである。これまでに、いくつかのセンサおよびモニタリングシステムが開発されてきたが<sup>1)2)</sup>、まだ十分普及しているとはいえない。今回、新たなセンサを開発したので、その検証実験および適用性に関する検討結果について報告する。

### 2. 鋼材腐食モニタリングの概要

コンクリート中のような強アルカリ環境下では、鉄筋やPC鋼材は、その表面に不動態被膜と呼ばれる安定した酸化被膜が形成され、腐食から保護される。ところが、コンクリート中に塩分が浸入し、鋼材位置の塩化物イオン濃度が、腐食発生限界以上になったり、中性化によってコンクリートのpHが低下すると、不動態皮膜が破壊され、鋼材に腐食が発生し始める。

この腐食環境の変化を捉えて、鋼材腐食を検知するために開発されたのが、鋼材腐食モニタリング用のセンサである。

図-1に、外来塩分による塩害環境下での鋼材腐食モニタリングのイメージを示す。構造物本体の最外縁鋼材より浅いかぶりコンクリートにセンサを配置しておき、本体の鋼材が腐食する前に腐食環境の進行状態を把握する。一般的なセンサは、構造物と同等の鋼材(以下、試料極)と腐食に対して電気的に安定した金属(以下、参照極)との組合せを一对とし、かぶりの深さ方向に数段(図-1は3段の例)配置されている。塩害あるいは中性化によって、試料極の鋼材が腐食を開始すれば、参照極との間の電位差が変化し、この電位差あるいは両極の間に流れる腐食電流を捉えることによって、塩分の浸入やpH低下による腐食環境の変化が把握できる。さらに、センサが多段配置されていることから、腐食環境がコンクリート表面からどの程度の深さまで進行しているかという判断と、おおよその進行速度をつかむことができる。これにより、構造物本体の鋼材が腐食を開始するより早い段階で、十分な検討と適切な対策の策定が余裕を持って行える。

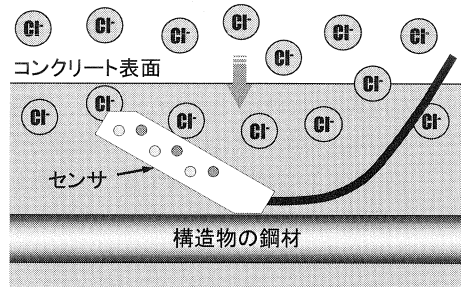


図-1 センサ配置とモニタリングの概要

### 3. 既存のセンサと開発したセンサの比較

写真-1は、既存のセンサのうちドイツで開発されたものである<sup>1)</sup>。このセンサは、6段の試料極と、全試料極に対して共通の1本の参照極で構成されており、外形寸法は310mm×160mmである。極を構成する鋼材を固定するための両側の保持材は、金属および樹脂で構成されている。測定には、専用の測定装置を使用し、腐食電流を基本とし、自然電位、コンクリート抵抗および温度も同時に計測される。測定は、マニュアル操作のため、遠隔モニタリングのような連続的な無人計測はできない。

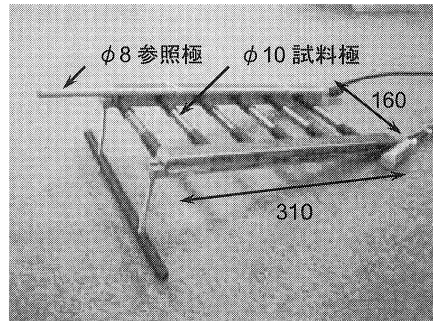


写真-1 既存のセンサの例

写真-2は、新たに開発したセンサの外観である。試料極1本に対して参照極が各1本ずつ平行に配置されており、3段で構成されている。既存のセンサの試料極および参照極の外径は10mm程度であるのに対し、開発したセンサは外径を2mmとして、構造物内で試料極が腐食しても、周囲のコンクリートに過度の膨張圧が生じないように考慮している。また、構造物内へ配置を容易にするため、センサの外形寸法は65mm×85mm、厚さ20mmと小型化している。さらに両側の保持材も、既存センサでは、金属と樹脂を組み合わせた材料を使用しているのに対して、開発したセンサは、ポリマーセメントモルタル製とした。これは、コンクリート構造物中において、センサができるだけ異種材料物質とならないこと、樹脂とコンクリートとの温度膨張係数差に起因する温度変化時のコンクリートに生じる膨張圧を抑制すること、および耐久性の向上を意図したものである。また、後述するが、腐食を判定するための基準となる物理量も、既存センサとは異にしている。なお、試料極には鉄製材料を、参照極には貴金属をめっきした金属材料を使用している。

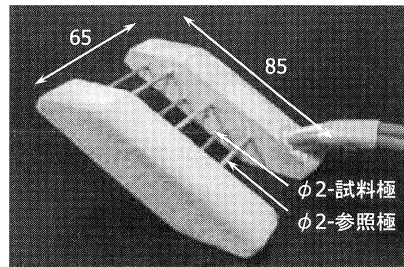
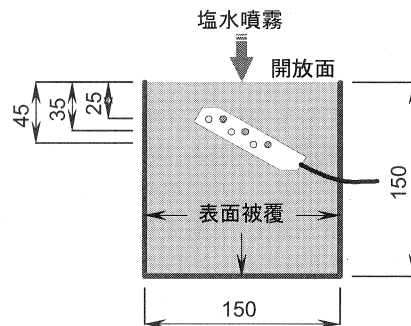


写真-2 新たに開発したセンサの概要



(平面寸法：150×150mm)

図-2 促進試験用供試体の例

### 4. 促進試験によるセンサの検証

#### 4.1 試験方法

既存システムの適用性の評価および開発したセンサの妥当性の検証を目的として、供試体を用いた塩水噴霧による腐食促進試験を行った。図-2に開発したセンサの検証に用いた供試体を示す。供試体の外形は立方体であり、供試体コンクリートの中に、試料極および参照極のかぶり高が25mmから10mmずつ増加するようにセンサを配置した。また、供試体の上面からのみ塩分が浸透するように、上面以外の5面には表面被覆を施した。これらの供試体を促進試験装置内に設置し、乾湿繰り返しによる促進試験を行った。試験条件は、5%NaClの塩水を3日間噴霧し、続いて4日間乾燥(RH50%程度)する1週間のサイクルとした。また、環境温度は40℃一定とした。測定は、既存センサでは専用の測定装置を用い、また、開発したセンサでは専用に改良したデータロガーおよび電圧計を用いて、腐食電流や自然電位を観測した。なお、既存センサ検証用の供試体は、平面寸法420×250、厚さ150mmの立方体形状で、センサのかぶり高は15mmとした。

#### 4.2 試験結果

塩水噴霧による促進試験の結果を図-3~4に示す。図-3は、写真-1に示した既存センサの結果である。このシステムでは、主に腐食電流を判定基準としており、 $15\mu\text{A}$ 以上の電流が発生した場合に腐食が疑われる。試験の結果、経過日数が100日程度から電流が順次増加し、ほぼかぶりの浅い方から順に腐食が開始しているのが伺える。なお、既存センサの供試体では、最も浅い極のかぶりは15mmとした。また、試験結果は、試料極6段のうち、かぶりの浅いほうから3段の結果のみ示した。

新たに開発したセンサは、試料極の自然電位を腐食の判定基準としている。ASTM C876<sup>3)</sup>によれば、硫酸銅電極に対して $-350\text{mV}$ 以下で90%以上の確率で鋼材腐食が疑われるとしている。自然電位は、温度などの影響を若干受けるが、腐食が開始すると電位に急激な相対変化が生じるため判断が容易なこともあり、開発したセンサもASTMの値を腐食発生の判定基準とした。図-4に、開発したセンサの試験結果を示す。同図より、試験開始後約220日、290日および450日で、かぶりの浅い方から順に自然電位が急激にマイナス方向に変化しており、試料極の腐食が開始していることがうかがえる。なお、既存センサとの腐食開始時の違いは、コンクリート打設時期などのコンクリートに関する条件の相違と、既存センサのみ、初期の2ヶ月の環境温度を $50^\circ\text{C}$ に設定したことによる促進効果の相違に起因するものと思われる。

自然電位を測定する方法は、既存のセンサの腐食電流を測定する方法に比べ、測定装置を簡略化できることや、連続計測が容易にできるなどの利点がある。したがって、省力化が可能な無人遠隔モニタリングを行う場合には、非常に有利である。

試験終了後、供試体を解体してセンサに使用した試料極の腐食状況を確認した。そのときの状況を写真-3に示す。かぶり25mmおよび35mmの試料極は完全に腐食しており、かぶり45mmの試料極は腐食が開始した状況が確認できた。これらのことから、自然電位のモニタリングによる腐食判定が十分可能であることが確認できた。

#### 5. 遠隔操作による鋼材腐食モニタリング

腐食電流を測定する場合、一般に抵抗値の非常に小さい無抵抗電流計を使用するため、センサに計測器

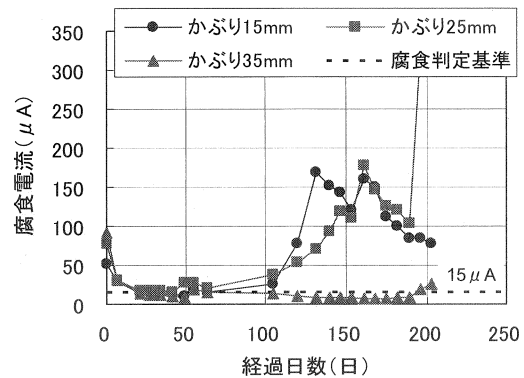


図-3 促進試験の結果(既存センサの例)

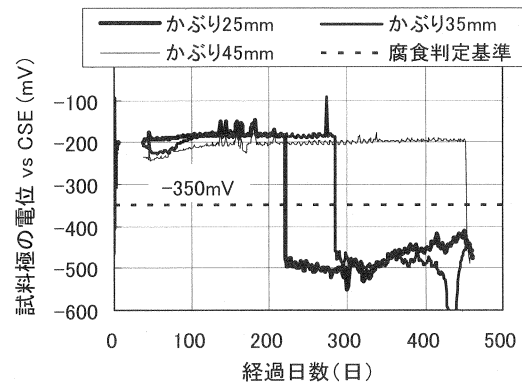


図-4 促進試験の結果(開発したセンサの例)

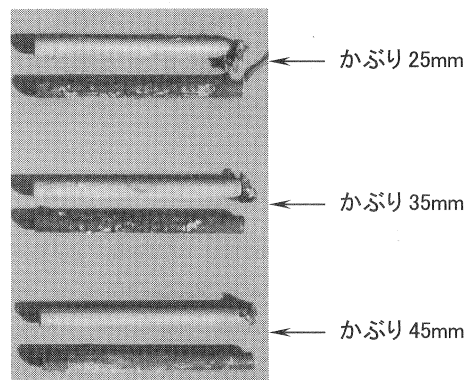


写真-3 試験終了後の解体調査

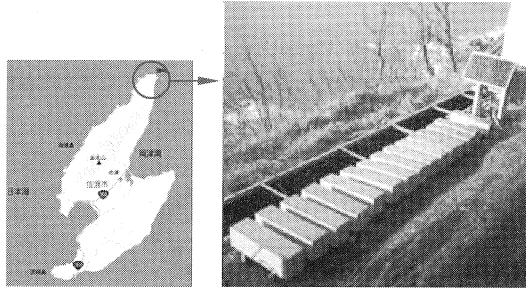


写真-4 暴露試験の状況

を継続的に接続することができない、もしくは、特殊な装置が必要となる。それに対して、電位計測の場合、抵抗値の非常に大きな電圧計を用いるため、継続的に接続しても、センサの腐食系に大きな影響を与えない。したがって、遠隔操作による腐食モニタリングでは、電位計測を基準とするほうが有利であるといえる。

実際の塩害環境でのセンサの妥当性の検証と、遠隔操作によるモニタリングシステムの実用性を検証するため、暴露試験を開始した。暴露場所と暴露状況を写真-4に示し、図-5に遠隔モニタリングの回路図を示す。暴露場所は、佐渡島の北端付近の海岸線から100m程度の位置である。暴露試験に用いた供試体は、150×150×530mmの角柱供試体で、写真-4に示す供試体のうち1体に、2個のセンサをかぶり25mmとして設置した。暴露現場と事務所とのデータのやり取りは電話回線により行い、計測されたデータの転送だけでなく、暴露場に設置したデータロガーの設定などについても、遠隔の事務所から制御が可能である。データ収集の間隔は、1日に1回とした。

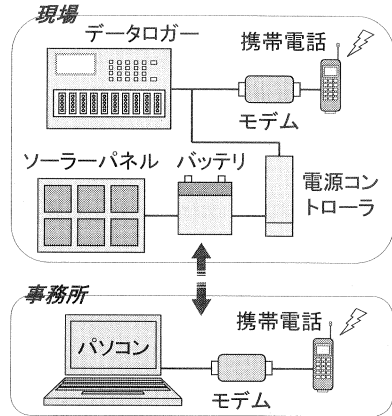


図-5 遠隔操作によるモニタリングの回路図

## 6. おわりに

新たな鋼材腐食モニタリング用のセンサを開発し、妥当性の検証を行った。室内における促進試験の範囲ではあるが、開発したセンサは、コンクリート中の腐食環境を十分な精度で検知できる性能を有していることが確認された。また、実環境での暴露試験と遠隔操作によるモニタリングも開始した。この結果については、別の機会に報告することとする。最後に、本技術がコンクリート構造物の維持管理の一助になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) Michael Raupach : Durability of Marine and Coastal Structures for 100 Years the High Quality Cover Plus Monitoring Approach, Proceedings of Durability and Maintenance of Concrete Structures, pp.527-534, October, 2004, Dubrovnik, Croatia
- 2) 辻伸幸ほか : エクспанション・リングを用いた鋼材腐食モニタリング, 土木学会第59回年次学術講演会, pp189-190, 2004年9月
- 3) ASTM : Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, pp. 434-439, 1995