

論文 コンクリート中の塩化物浸透過程非破壊モニタリングシステムの開発研究

武若 耕司*1・山本 悟*2

要旨: 塩害環境下のコンクリート構造物において予防保全を前提とした維持管理を合理的に実施するためには、モニタリングシステムの開発が不可欠である。本研究では、コンクリート中への塩化物イオンの浸透過程を非破壊的に把握することを目的として開発された埋設型腐食センサーについて、その測定精度ならびに塩害劣化予測モニタリング手法への利用可能性を実験的に検討した。その結果、本センサーによって、外部環境からかぶりコンクリート中に浸透蓄積する塩化物イオン量が鉄筋腐食発生限界量に達した深さを経時的に把握でき、また、実際に鉄筋が腐食を開始する時期を予測することも可能であることを確認した。

キーワード: 埋設型腐食センサー、コンクリート構造物、塩害、維持管理、モニタリング

1. はじめに

昨今の早期劣化問題の顕在化によって、コンクリート構造物においてもきちんとした維持管理が必要であると認識されるようになってきた。特に、これまではほとんどが事後保全という観点から行われてきた対策を予防保全という観点から行おうとする考え方や、構造物を新設する際、供用期間中の維持管理計画も含めた設計を行うといったことは、この表れである。そして、このようなコンクリート構造物における新たな維持管理への取り組みの中で、構造物の劣化をいち早く検出するモニタリング手法の開発も大きなテーマの1つとなっている。

本研究は、コンクリート構造物にとって極めて厳しい劣化環境となる塩害環境下において、予防保全という観点から構造物の劣化の可能性をモニタリングする手法を開発し、その有効性について検討を行うものである。すなわち、塩害は、コンクリート中に蓄積した塩化物イオンの影響によって内部鉄筋が腐食することに起因する劣化現象である。したがって、予防保全の観点からは、鉄筋腐食の発生ではなく、コンク

リート中の塩化物イオンの存在状況をモニタリングすることの方がより妥当であるといえる。ここでは、海洋環境下のように外部環境からコンクリート中へ浸透する塩化物イオンの状況をかぶりコンクリートに埋設した腐食センサーによってモニタリングすることを考え、このセンサーの塩化物量感知精度について実験的に確認するとともに、これを用いた塩害劣化モニタリングシステムの実用可能性を検討した。

2. 埋設型腐食センサーの概要

2.1 センサーの形状

Fig.1 に、今回検討を行った腐食センサー（以下、本センサーと称す）の概要を示す。本センサーは、ポリマーセメントモルタルで作られた円筒形の本体と、この本体側面にリング状に設けられた4箇所（深さ、幅ともに約1.5mm）の中に巻き付けられた0.1mm径の極細鉄線、およびステンレス製の取っ手から構成されている。また、各極細鉄線の両端はそれぞれリード線とつながっており、鉄線の情報を外部計測器へ読み取ることが可能である。

*1 アジア工科大学院助教授 土木工学部 工博 (正会員)

*2 日本防蝕工業(株)コンクリートプロジェクト課長 (正会員)

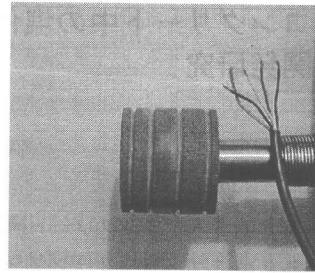
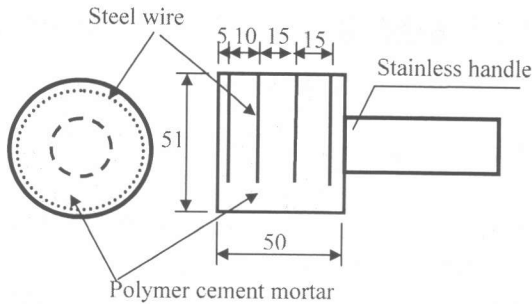


Fig. 1 Outline of sensor for measuring chloride penetration depth

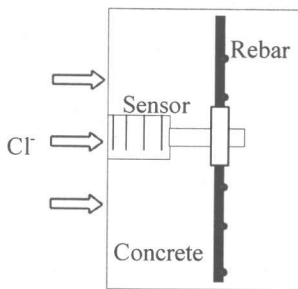


Fig. 2 Application of sensor in concrete structure

2.2 センサーの原理

Fig. 2 に、本センサーをコンクリート構造物への埋設した状況の概念図を示す。センサーは主に新設構造物に設置することを目的として開発されたもので、図に示すように、本体端面をコンクリート表面に合わせるようにして、ステンレス製の取っ手を鉄筋と固定させセンサーをかぶりコンクリート内に設置する。

Fig. 3 には、本センサーによるコンクリート中の塩化物浸透深さ測定の基本原理を示す。外部から浸透する塩化物イオンは、コンクリート表面から徐々に内部に蓄積し、まず、コンクリート表面に最も近い鉄線位置でその防食上の許容値を超え、鉄線の腐食が始まることになる。鉄線が腐食すると、断面が減少しその電気抵抗は増加することから、この抵抗を精度良く連続的に測定することが可能であれば、鉄線の腐食発生をモニタリングすることができる。問題は電気抵抗の測定精度であるが、実際には鉄線が極細 (0.1mm) であるために腐食後直ちに破断すると考えられ、また、破断時には電気抵抗が

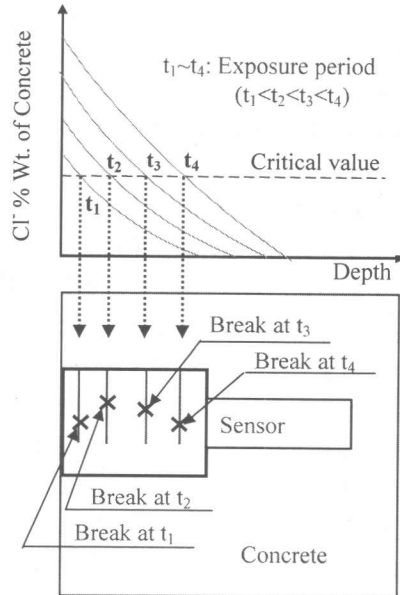


Fig. 3 Mechanism of sensor

急変することから、この時点をもって腐食開始時とみなしても差し支えないものと思われる。このようにして、センサーに設置された4つリング状鉄線の電気抵抗をモニタリングし、それぞれの測定値が急変した時点で、その位置のコンクリートの塩化物イオン混入量が許容値を超えたことを把握できる。

3. 腐食センサーの性能評価実験

3.1 概要

本センサーではその原理から、コンクリート中の塩化物イオン量を直接測定するのではなく、センサー中の鉄線の腐食発生を感知することによって間接的にコンクリート中の塩化物イオン

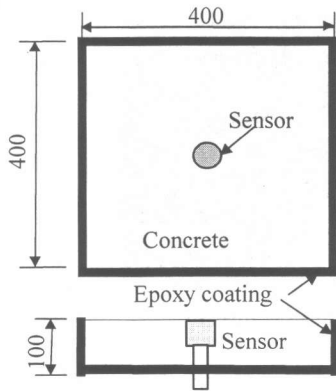


Fig. 4 Outline of Specimens for the experiment

Table 1 Conditions of specimens

Specimen No.	Conditions		Comments
	W/C (%)	Initial Cl ⁻ content (kg/m ³)	
1	70	1.2	---
2		0.6	---
3		0	After 18 cycles of the exposure, small current was supplied to the wires of the sensors
4			
5			
6	55	---	

Table 2 Concrete mix proportions

W/C	Slump (cm)	Compressive strength (Kg/cm ²)	Unit content (Kg/m ³)			
			W	C	S	G
0.7	6	296.3	202	288.5	855.5	1001
0.55	12	393.8	202	367.2	791.3	1001

浸透過程を推定しようとするものである。このことは、内部鋼材の腐食開始時期を予測するという意味では塩害劣化モニタリングとしてより実用的であるともいえる。その一方で、塩化物イオン浸透過程の定量評価という点では、測定される情報と塩化物イオン量との関係を明確させなければならない。

3.2 供試体の概要

本センサーの性能評価を行うために、Fig.4に示す形状のコンクリート供試体を6体作成した。供試体は、400×400×100mmの無筋コンクリートスラブの中央にセンサーを埋設したものである。なおセンサーは、端面がスラブ表面と一致するように設置してある。実験にあたっては、供試体への塩化物の浸透を一方向からに限定させるため、センサーの端面を含むコンクリート面以外の面はエポキシ樹脂で被覆した。

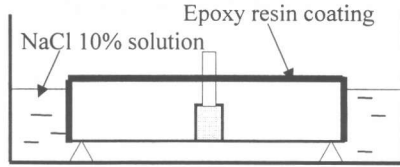
作成した供試体の中には、コンクリートの水セメント比あるいは初期含有塩化物イオン量が異なるものがある。それぞれの概要と使用したコンクリートの配合をTable 1および2に示す。コンクリートの作製には、セメントとして普通ポルトランドセメント、細骨材および粗骨材はそれぞれ、川砂(密度：2.57g/cm³)と最大寸法

25mmの砕石(密度：2.68g/cm³)を用いた。

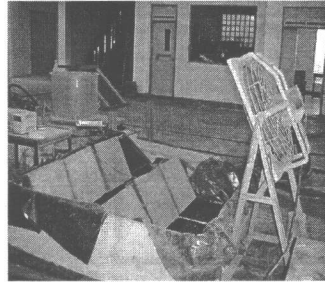
3.3 実験方法

作製した供試体は、Fig.5に示すような10% NaCl水溶液への浸漬1日とその後2日間の乾燥を1サイクルとする塩化物浸透促進環境に暴露した。暴露試験中は、毎日、センサー中の各鉄線の電気抵抗を測定した。また、この測定結果から鉄線の破断が確認された供試体においては、その都度φ50mmのコアを採取し、各鉄線深さ位置を中心とした1cm幅のコンクリート中の全塩化物イオン量をJCI試験方法(案)²⁾に準じて測定した。また、一部の供試体については、所定の期間の試験終了後、センサーを含むコンクリートコアを採取し、センサーのごく近傍(センサーから約1cmの範囲)のコンクリートの塩化物イオン量についても測定した。

なお、No.4および5の供試体に埋め込まれたセンサーについては、暴露試験19サイクル目から、センサー内の全ての鉄線にTable 3に示す条件で微小直流電流を供給しアノード分極させた状態で、暴露試験を継続させた。この電流は、Fig.6に示すように、ステンレス製の取っ手を対極として用い、鉄線電位を定電位状態に保ちながら通電した。



a) Wetting condition



b) Drying condition

Fig.5 Exposure test

Table 3 Condition of currents and imposed potential on the wires

Sensor No.	Supplied current (μA)	Target potential (mV*)	Imposed potential (mV*)
4	1~5	+150	70~160
5	18~25	+650	660~690

*: vs. Ag/AgCl

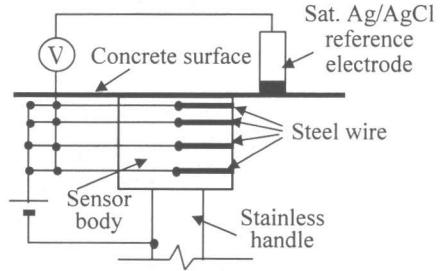


Fig.6 Current supplying method to the wires in the sensor

4. 実験結果および考察

4.1 通電を行わないセンサーの感度

Fig.7 に示すように、暴露実験開始から 14 サイクル目に、No.2 供試体中のセンサーの最浅部（コンクリート表面から深さ 5mm）に位置する鉄線の抵抗値が急増し、腐食破断が確認された。なお、この時点で、同センサー中の他の鉄線および、その他のセンサー中の鉄線においては抵抗の変化が認められなかった。Fig.8 は、14 サイクル目の暴露実験終了後、幾つかの供試体からコンクリートコアを採取し、全塩化物イオン量を測定した結果を示した。この結果、No.2

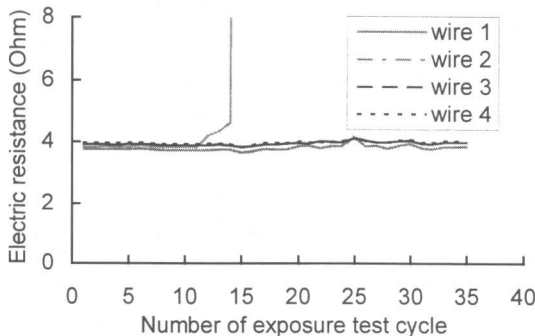


Fig.7 Measurement results of resistances of steel wires in No. 2 Sensor

供試体のかぶり 5mm 位置の塩化物イオン量は、他のいずれの供試体あるいはいずれの個所よりも多く、これによってこの位置の鉄線が腐食破断を起こしたものと考えられた。しかし、この場合の塩化物イオン量は 12kg/m^3 近くにも達しており、コンクリート中の鉄筋腐食発生限界量とされる $1.2\sim 2.4\text{kg/m}^3$ ³⁾ に比べて極めて大きな値であった。また、他の供試体においても、

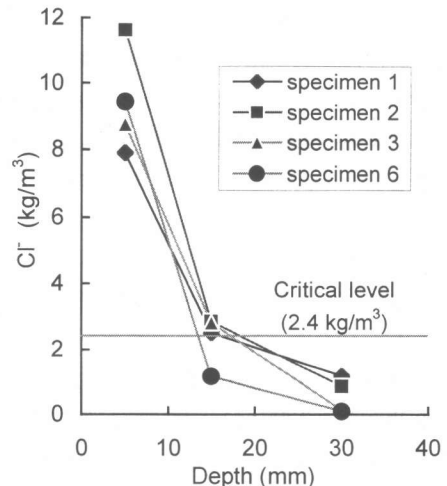


Fig.8 Chloride content in specimens after 14 cycles of exposure test

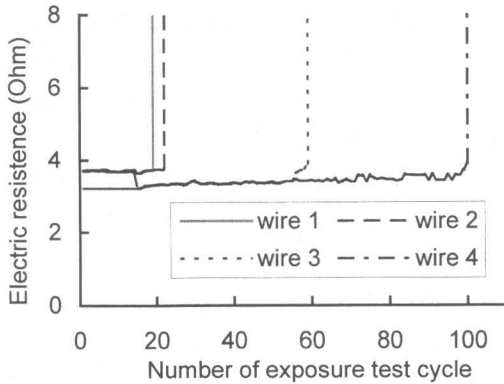


Fig.9 Measurement results of resistances of steel wires in No. 5 Sensor

深さ 5mm 位置の塩化物イオン量は 8~10kg/m³に達し、これは、通常、非常に高い確率でコンクリート中の鋼材に腐食が予想される量であるにもかかわらず、その位置の鉄線の抵抗測定結果には何の変状も認められなかった。以上の結果は、本センサーをそのまま使用しても、塩害予知の目的としてはそれほど感度の良いものではないことを示している。

4.2 通電状態でのセンサーの感度

上記 4.1 の結果を考慮して、センサーの感度を高めるためにセンサー鉄線部をアノード分極させることを考え、No.4 および 5 供試体に設置されたセンサーに暴露試験 19 サイクル目から微小電流を通電させた。その結果、Fig.9 に示すように、この 2 つのセンサーともに深さ 5mm 位置の鉄線は暴露再開直後に、また深さ 15mm 位置の鉄線についても 22 サイクル目（通電後 3 サイクル目）までに、いずれも腐食破断を示す電気抵抗の急増が見られた。その後、No.4 供試体については、35 サイクルまで暴露実験を行った後、センサー周辺の塩化物イオン量を測定するために解体したが、No.5 供試体については暴露実験を継続

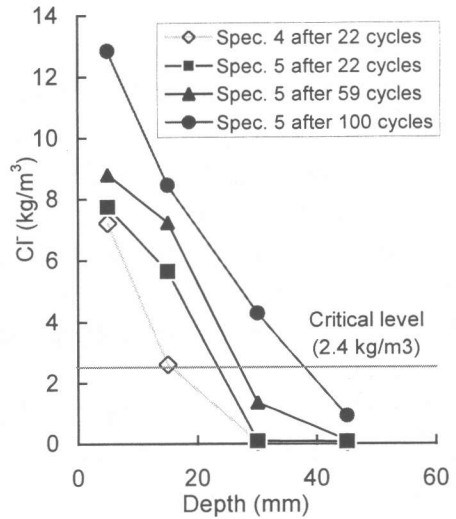


Fig.10 Chloride content in No.4 and 5 specimens

し、その結果、深さ 30mm に位置する鉄線には 58 サイクル目の暴露実験中に、また、深さ 45 mm の鉄線については 100 サイクル終了直後に、それぞれ腐食破断を示す電気抵抗の急増が認められた。

Fig.10 に、No.4 および 5 供試体に埋設されたセンサーにおいて、15、30 および 45mm 深さ位置の鉄線がそれぞれ破断した直後に測定したコンクリート中の塩化物イオン量分布を示す。このうち、深さ 15mm 位置の鉄線破断時にこの位置に存在していた塩化物イオン量は 2.4~5.5kg/m³と高かった。これについては、この鉄

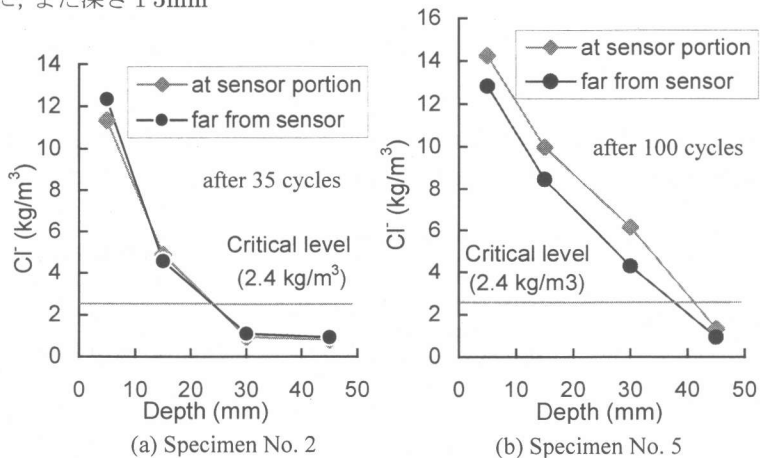


Fig.11 Comparison of chloride content in concrete surrounding sensor with one at the portion far from sensor

線の破断が 5mm 位置の鉄線の破断に引き続いて直ちに生じたことから考えて、通電を開始する前から既にこの位置の塩化物イオン量は腐食が開始する塩化物イオン量を超えていた可能性が高い。一方、No.5 供試体中のセンサーの深さ 30 および 45mm 位置の鉄線は、それぞれ 1.35 および 1.00kg/m³ の塩化物イオン量で破断しており、この量は、通常鉄筋腐食発生の限界量と考えられる塩化物イオン量 1.0~2.4kg/m³ の範囲と一致した。

以上の結果から、本センサーに通電を行うことによって、センサー鉄線部の塩化物イオンによる腐食の感度が高まるとともに、塩化物イオン量が鉄筋腐食発生限界量となる位置を検出することも可能となることが確認された。

なお、Fig.11 には、供試体中の平均的な塩化物イオン量分布とセンサー周辺 1 cm 以内のコンクリート中の塩化物イオン量分布を比較して示した。この結果、今回の実験からは、センサーとコンクリートの境界面に顕著な塩化物イオンの蓄積が生じるような状況は認められなかった。ただし、センサーをアノード分極させた場合、その近傍に陰イオンの塩化物イオンが若干引き寄せられる傾向にあることも確認された。

4.3 塩化物浸透過程推定の可能性

コンクリート中の塩化物イオンの浸透過程が Fick の拡散方程式の解である式(1)に従うと考

$$C(x, y) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (1)$$

え、No.5 供試体中のセンサーについて、15mm 位置の鉄線破断までの時間から 30mm 位置の鉄線の破断時期を予測し、また、30mm 位置の

鉄線の破断後には、その結果から 45mm 位置の鉄線破断時期を予測した。これらの予測結果を実際の破断までに要した期間と比較して Table 4 に示す。今回の結果では、本センサーによる塩化物イオン浸透過程の推定精度は必ずしも高くはない状況となったが、1)推定に用いた式(1)は塩化物溶液浸漬状態における拡散解であり、今回のように乾湿繰り返しの状況を必ずしも反映していないこと、2)センサーへの通電を暴露の途中から開始したこと、3)暴露試験を一時中断した期間があることなどを考慮すると、本センサーを用いたモニタリング結果から、センサー設置環境のコンクリート中の塩化物イオン浸透過程をある程度の精度で推定することは十分に可能であると考えられた。

5. 結論

センサー内の微細鉄線の腐食を感知することによって鉄筋腐食を予測することを目的として開発された埋設型腐食センサーを使用して、コンクリート中の塩化物イオン浸透モニタリングシステムの構築を考え、実験的な検討を行った。その結果、次のことを確認した。

- 1) 今回使用したセンサーを用いることによって、1.0~1.35kg/m³程度の塩化物イオン量が浸透、蓄積されている深さを経時的にモニタリングすることが可能である。
- 2) このモニタリング結果から鉄筋腐食発生時期をある程度の精度で予測可能である。

以上から、本センサーは、コンクリート構造物の塩害劣化に対して、そのモニタリング手法として有効に活用できるものと期待される。

【参考文献】

- 1) 土木学会編：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，2001. 1
- 2) JCI-SC5：硬化効果コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法
- 3) 例えば、大即信明ほか著：コンクリート構造物の耐久性シリーズ-塩害(1)-，技報堂出版，1986

Table 4 Estimation of corrosion start time on wire

Wire No.	Corrosion start times of wire (day)	Corrosion start times estimated by the result at shallower position (day)	Ratio between estimated and actual times
2	65	--	
3	177	260	1.47
4	300 (366*)	398	1.33 (1.09*)

* Including suspension period of exposure test