論文　RC 構造物における鉄筋腐食の劣化原因のモニタリング用腐食センサーの開発

李　翰承[*1]・申 成雨[*2]

要旨：ＲＣ構造物のかぶりコンクリートに埋め込んで，コンクリート表面からの塩分浸透深さを非破壊的に実時間でモニタリングできるシステムを開発するため腐食センサーを製作した。腐食センサーを NaCl 水溶液，塩分含有モルタルおよび塩分が浸透するモルタル試験体に埋め込んた後，促進腐食実験によってセンサーを腐食させながら抵抗変化を測定した。その結果，腐食センサーは，腐食程度が大きいほど抵抗が大きくなり，塩分濃度が大きいほど，モルタル表面から近いほど，最初の抵抗変化時間が早く，腐食程度及び抵抗が大きくなったことから，腐食センサーは塩分浸透の深さを十分モニタリングできることが確認された。

キーワード：鉄筋腐食，腐食センサー，モニタリング，塩分浸透，非破壊試験

1.　はじめに

鉄筋コンクリート（ＲＣ）造は，耐震性，耐火性，耐久性に優れた経済的な構造で，住宅，病院，発電所などの建築構造物ばかりでなくダム，橋梁，空港，原子力構造物など社会間接施設である土木構造物に幅広く適用されている。

一般的に，ＲＣ構造物に発生する劣化現象は，炭酸化及び塩害などの外部環境条件による影響が大きく，このような劣化現象は鉄筋腐食へ帰着する。そのため，現在，鉄筋腐食の予防次元の鉄筋腐食抑制工法や補修次元の鉄筋腐食補修工法が現場で幅広く適用されている。

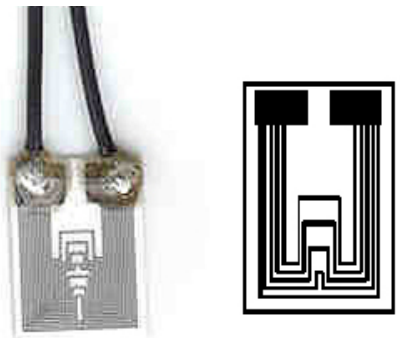
しかし，鉄筋が腐食した後でＲＣ構造物を補修することは莫大な経費がかかるとともにその機能を元の性能に回復させるのは非常に難しいのが現実である。それで，事前に鉄筋腐食劣化原因である CO_2 や塩化物イオンなどがコンクリートかぶりに浸透することを実時間でモニタリングすることができれば鉄筋が腐食する前に鉄筋腐食による重要構造物の耐久性低下を予防することができると考えられる[1)]。

本研究では，このような背景で鉄筋コンクリート構造物の主な鉄筋腐食原因である塩分の浸透をモニタリングする腐食センサーを開発し，これをコンクリートに埋め込んで塩分浸透に対する腐食センサーの反応及び応答を基礎的な実験で評価し，腐食センサーの実用化の可能性を検討した。

2.　モニタリング用腐食センサーの概要

2.1　腐食センサーの形状及び原理

腐食センサーの写真及び形状を**図－１**に示す。腐食センサーはアルミナ基板の上に鉄をコーティングして回路を構成したものであり，寸法は 13mm×15mm×0.5mm である。



図－１　腐食センサーの写真及び形状

*1 韓国，漢陽大学校研究助教授 超大型構造システム研究センター 工博　（正会員）
*2 韓国，漢陽大学校教授 建築学部 工博

表－１に製作した腐食センサーの初期抵抗値を示す。腐食センサーの初期抵抗は，約１～６Ωであり，腐食原因によって基板上の鉄が腐食すると抵抗が変わるシステムになっており，鉄で構成された細線が１本切れると100KΩの抵抗変化になるように設計し，約 1000KΩに到達するとすべての細線が切れたことになる。

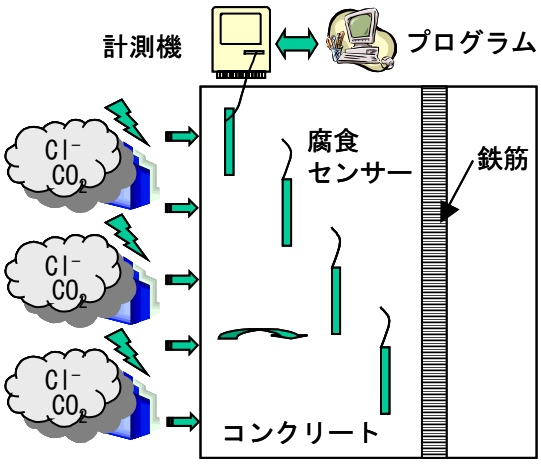
表－１ 腐食センサーの初期抵抗値

番号	センサーの初期抵抗値
1	1.6 Ω
2	3.0 Ω
3	5.6 Ω
4	3.3 Ω
5	1.9 Ω
6	1.9 Ω
7	1.5 Ω
8	3.2 Ω

2.2 腐食センサーの活用分野

図－２にＲＣ構造物における腐食センサーのモニタリングシステムの概要を示す。腐食センサーはコンクリートの表面から一定の位置のかぶりに固定させることによって表面から浸透するCO_2や塩素イオンによって鉄が腐食し抵抗が変化するのをモニタリングする。従って，新築構造物の場合，腐食センサーは外部から浸透する劣化原因が鉄筋まで届く前にそれの浸透程度を非破壊的にモニタリングすることができる。また，既存の構造物の場合，コンクリートかぶり部分に腐食センサーを埋め込んだ基準物質を埋めることによって間接的に劣化原因の浸透を測定することが可能である判断される。

一方，モニタリングシステムはコンクリート表面から塗布する浸透性防錆剤の防錆効果を検証するとか，腐食センサーが腐食しないように表面をコーテイングして鉄筋に直接連結すると鉄筋の腐食程度によって変わる抵抗を定量的に測定することも可能であると判断される。



図－２ モニタリングシステムの構成

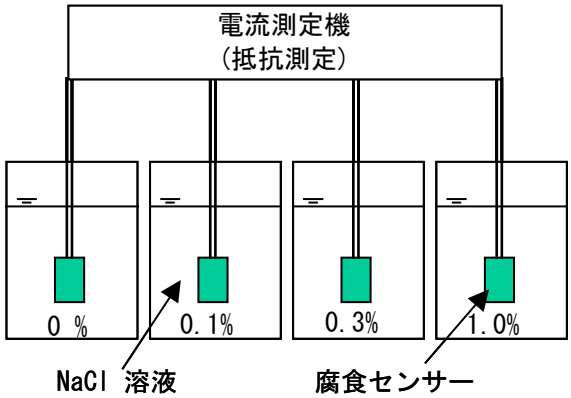
3. 腐食センサーの性能評価実験

3.1 NaCl 水溶液での腐食センサー応答実験

塩分によって腐食センサーが腐食し，抵抗が変化する程度を検討するため，表－２のように塩分濃度を 0%，0.1%，0.3%，1.0%とした水溶液にセンサーを 12 時間浸せきした後，12 時間気中で乾燥するのを１サイクルとしてセンサーの腐食を促進させ水溶液中で抵抗を測定した。

表－２ 塩分溶液での実験構成

番号	塩分 濃度
1	0% NaCl
2	0.1% NaCl
3	0.3% NaCl
4	1.0% NaCl



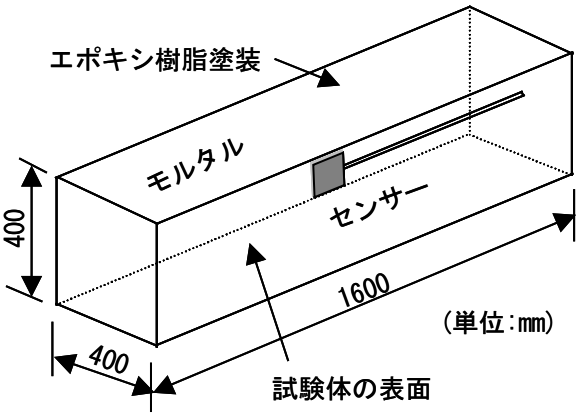
図－３ 腐食センサーの実験（NaCl 水溶液）

3.2 塩分混入モルタルでの腐食センサーの応答実験

モルタル内の塩分濃度がセンサーの応答に与える影響を調べるため，**表－３**のように塩分混入量が違うモルタル（砂に対する NaCl の質量）を製作し，図－４に示すようにその真ん中にセンサーを埋め込み，７日間水中養生した後，恒温恒湿機で温度 60℃，相対湿度 95%で 12 時間，温度 60℃，相対湿度 45%で 12 時間を 1 サイクルとして腐食センサーの腐食を促進させた直後の所定の期間で腐食センサーの抵抗を測定した。

表－３ 実験構成及びモルタルの配合

番号	塩分濃度	ｾﾝｻｰ初期抵抗値	モルタルの配合
1	0%	1.6 Ω	セメント：砂（１：３）W/C＝0.5
2	0.04%	3.0 Ω	
3	0.1%	5.6 Ω	
4	0.3%	3.3 Ω	



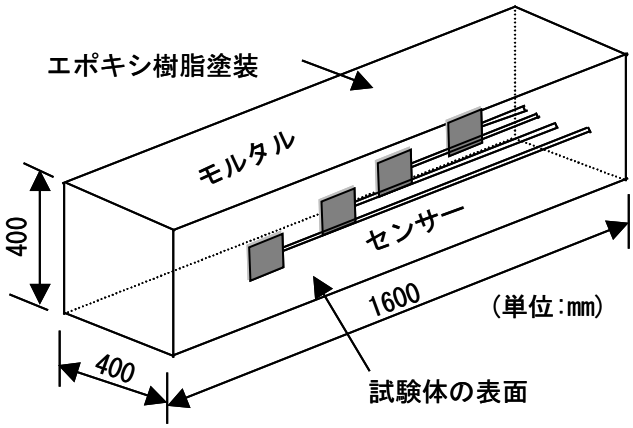
図－４ 塩分混入モルタル試験体の形状

3.3 モルタル中への塩分浸透による腐食センサーの応答実験

モルタル中への塩分浸透によるセンサーの応答を調べるために，**図－５**に示すようにモルタル表面から 5mm，10mm，20mm，30mm 位置に腐食センサーを埋設した試験体を 7 日間水中養生した後，塩分浸透面以外はエポキシでコーテイングした。その後，恒温恒湿機で温度 60℃，相対湿度 95%で 12 時間，温度 60℃，湿度 45%で 11 時間，3%NaCl 水溶液で 1 時間浸せきを 1 サイクルにして腐食センサーの腐食を促進させた直後の所定の期間でセンサーの抵抗を測定した。

表－４ 実験構成及びモルタルの配合

番号	表面からの位置	ｾﾝｻｰ初期抵抗値	モルタルの配合
1	5mm	1.9 Ω	セメント：砂（１：３）W/C＝0.5
2	10mm	1.9 Ω	
3	20mm	1.5 Ω	
4	30mm	3.2 Ω	



図－５ モルタルへの塩分浸透試験体の形状

4. 実験結果及び考察

4.1 NaCl 水溶液での腐食センサーの応答

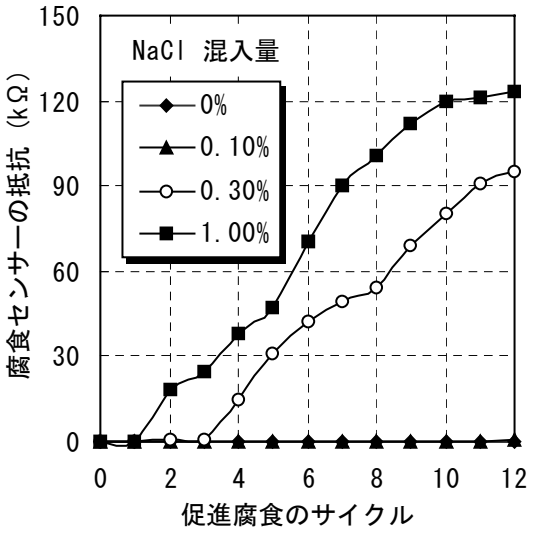
図－６に塩分濃度別の NaCl 水溶液中での腐食センサーの抵抗の経時変化を示す。NaCl 1.0%水溶液では 2 サイクルでセンサーの半分に赤錆が発生した。また，センサーの抵抗も 18.38KΩに急激に増加しており，その後腐食の進行に伴って抵抗や赤錆の面積が増加した。これは，NaCl 0.3%水溶液でも同一であり，4 サイクルで急にセンサーの抵抗が 15.00KΩに増加し，腐食促進によって抵抗や赤錆の面積が増加した。しかし，NaCl 濃度が低い NaCl 0.1%水溶液では，同じ期間でもセンサーの一部分に赤錆が生じる程度で抵抗の増加も小さかった。一方，NaCl を添加し

ない NaCl 0.0%に浸せきした腐食センサーは，同じ期間でもほとんど錆びが生じていないし，腐食センサーの抵抗変化も小さかった。従って，NaCl 水溶液の濃度が高いほど腐食センサーの抵抗変化は早く起こり抵抗も高いことから，開発した腐食センサーは，水溶液中で塩分に対して応答するばかりでなく，塩分濃度によってその腐食反応や抵抗も変化することがわかった。

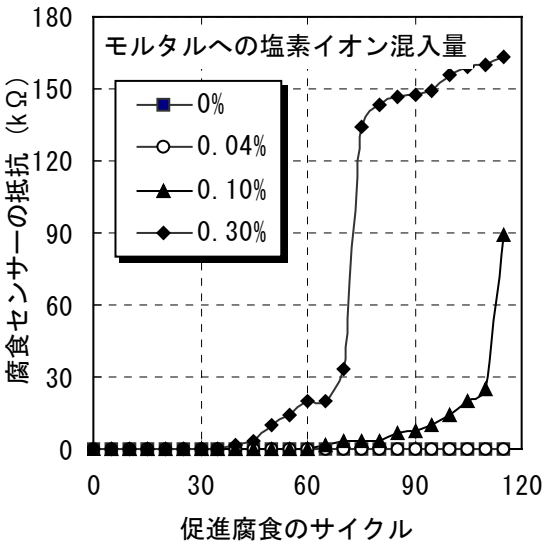
4.2　塩分混入モルタルの腐食センサー応答

図－７に 塩分濃度別のモルタル中での時間経過による 腐食センサーの抵抗変化を示す。塩分が 0.3%混入された試験体に埋め込んだ腐食センサーは,促進腐食 30 サイクルで最初の抵抗変化が生じており，腐食の進行に伴って抵抗が増加した。 塩分が 0.0%混入された試験体は，実験が終わるまで抵抗変化がなかったが，塩分が 0.04%混入された試験体及び 0.1%混入された試験体は，各々65 サイクル及び 45 サイクルで最初の抵抗変化が生じており，促進腐食することによって抵抗が漸次増加した。特に，塩分が 0.3%混入された試験体の場合は 70 サイクルで，0.1%混入された試験体は 110 サイクルで急激に抵抗が増加した。これは，腐食の進行によって，センサーの細線が１本切れたためである。また，塩分が 0.3%混入された試験体の場合，細線が切れた後も，抵抗は若干増加する傾向を示しており，全体を通じて抵抗は階段状に変化した。このことから，センサーは表面で軽微な腐食が生じている時は抵抗がゆるやかに増加するが，断面欠損が大きくなりセンサーの細線が切れることによって抵抗が急激に増加すると判断される。また， **図－８**にモルタル中の塩分濃度別と腐食センサーが応答した最初の時間との関係を示す。モルタル中の塩分濃度が大きいほど腐食センサーの最初の抵抗変化時間は早く現れている。これは，鉄で細線を製作した腐食センサーが塩分濃度が高いほど腐食が早く起きたためであると判断される。

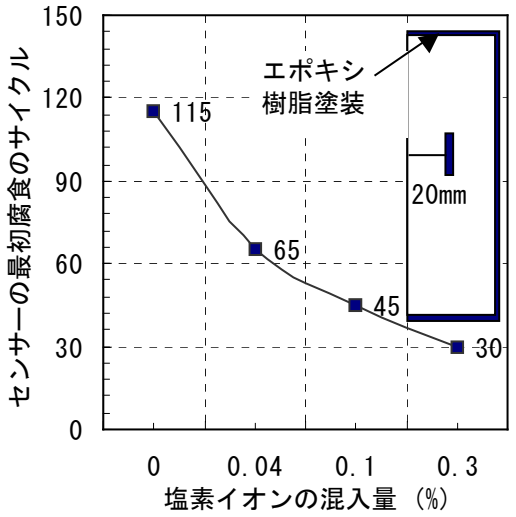
従って，本研究で開発した腐食センサーは，モルタル中での塩分に対して腐食反応するばかりでなく，モルタル中での塩分濃度によってその腐食反応や応答時間が違ってくることから，腐食センサーの抵抗変化及び時間を定量的に測定すれば，モルタルの塩分濃度を逆に求めることができると判断される。



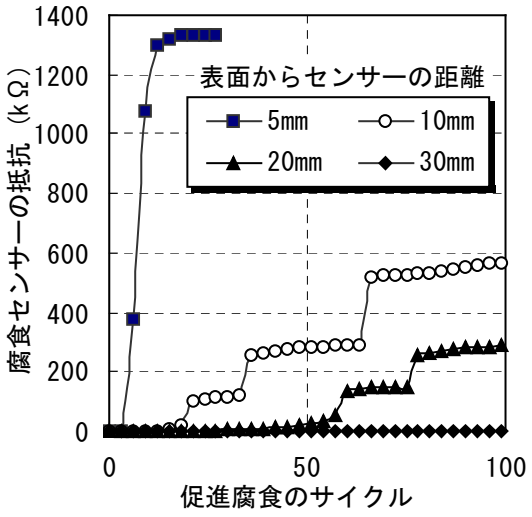
図－６ 時間経過によるセンサーの抵抗変化
(NaCl 水溶液での実験)



図－７ 時間経過によるセンサーの抵抗変化
(塩分混入モルタルでの実験)



図－８ 塩分濃度と腐食センサーの最初の抵抗変化時間との関係
（塩分混入モルタルでの実験）



図－９ 時間経過によるセンサーの抵抗変化
（モルタル中への塩分浸透実験）

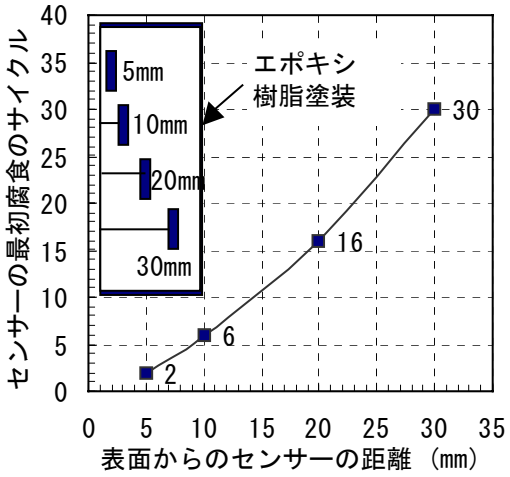
4.3 塩分浸透による腐食センサー応答

図－９は，モルタル試験体の一面から 5mm，10mm，20mm，30mm の位置に腐食センサーを埋め込んだ後，3%NaCl 水溶液に浸せきし促進腐食実験を行った場合，モルタル表面から塩分浸透によって腐食するセンサーの抵抗変化を時間経過により表したものである。モルタル表面から一番近い 5mm 位置での腐食センサーは，2 サイクルで最初の抵抗変化が生じ，その後急激に抵抗が増加し，12 サイクルからセンサーの細線が全部切れたことを意味する抵抗値約 1300KΩを示した。一方，内部の他の腐食センサーの抵抗変化はほとんど現れていない。これは，モルタル表面からの塩分浸透によって各々の腐食センサー位置での塩分濃度が違うためその影響でセンサーの腐食程度が違うためであると判断される。また，モルタル表面から 10mm 及び 20mm に位置した腐食センサーは，促進腐食 6 サイクル及び 16 サイクルで最初の抵抗変化が生じており，その後は促進腐食の進行に伴って階段状に抵抗が増加した。これは，腐食センサーの細線が塩分濃度の増加とともに腐食を起こし，腐食の進行に伴って順次切れたため腐食センサーの抵抗が階段状に変化したと判断される。一方，**図－10** にモルタル表面から腐食センサーの埋め込み位置と腐食センサーの最初応答時間との関係を示す。腐食センサーの埋め込み位置がモルタル表面から近いほど腐食センサーの最初の抵抗変化時間は早い。これは，モルタル表面から塩分が浸透して各々の位置での塩分濃度が違ったため腐食センサーの腐食反応と応答時間が変化したためである。従って，開発した腐食センサーは，モルタル表面からの塩分浸透に対して敏感に応答しており，環境条件から浸透する塩分浸透深さを非破壊的にモニタリングできることが可能であると判断される。

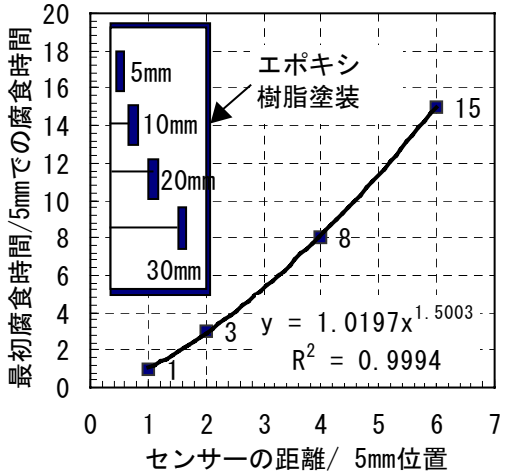
また，**図－11** は，センサー5mm 位置とその位置での最初の抵抗変化時間を基準として無次元化した，センサー埋め込み位置とセンサーの最初の抵抗変化時間との関係を表したものである。両者の間には 1.5 乗の非常に高い相関関係があり，これは，モルタル表面から浸透してきた塩分によってセンサーが腐食して抵抗が変化したことを意味している。モルタル中での塩分浸透によって敏感に反応するセンサーの開発と各々の位置での塩分濃度を定量的に測定することができれば，塩分拡散係数ばかりでなく，塩分に

よって鉄が腐食する時間を定量的に究明することができると判断される。

従って，この一連の研究を発展させると鉄筋コンクリート構造物を対象に，コンクリートへの塩分浸透を非破壊的にモニタリングできる可能性ばかりでなく，塩分が到達して鉄筋が腐食するメカニズムを時間的に究明することができると判断される。



図－10 センサー埋め込み位置と腐食センサーの最初抵抗変化時間との関係
（モルタル中への塩分浸透実験）



図－11 無次元化したセンサー埋め込み位置と腐食センサーの最初抵抗変化時間
（モルタル中への塩分浸透実験）

5. まとめ

鉄筋コンクリート構造物のかぶりコンクリートに埋め込んで，コンクリート表面からの塩分浸透の深さを非破壊的に実時間でモニタリングできるシステムを開発するために，まず，塩分によって腐食する腐食センサーを製作した。これを NaCl 水溶液,塩分含有モルタルおよび塩分が外部から浸透するモルタル試験体に埋め込んだ後，腐食促進実験によってセンサーを腐食させながら抵抗変化を測定した結果，次のような基礎的な知見が得られた。

(1) 腐食センサーは，NaCl 水溶液及び塩分含有モルタル中で，腐食によって抵抗も変化するばかりでなく，塩分濃度が大きいほど最初の抵抗変化時間が早く，同じ腐食促進期間で腐食程度及び抵抗が大きかった。

(2) モルタル表面から塩分を浸透させ，表面から深さ別に埋め込んだ腐食センサーの抵抗変化を測定した結果，表面から近いほど最初の抵抗変化時間が早く，同じ腐食促進期間で腐食程度及び抵抗が大きかった。

(3) 以上の基礎実験から，開発した腐食センサーは，塩分によって腐食し抵抗が変化するばかりでなく，塩分浸透の深さを十分モニタリングできることが確認された。これから，コンクリート及び現場での実験を行う予定である。

謝辞

本研究は，2001 年度産学研の研究「ＲＣ構造物の耐久性維持管理のための非破壊・実時間の鉄筋腐食診断システムの開発」の研究成果の一部であり，韓国ガス公社配管研究センター及び漢陽大学校 STRESS のご支援をいただきました。

参考文献

1) 武若耕司，山本 悟：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.1，pp.1183-1188，2001.7