T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	既設コンクリート構造物のドリル孔を対象とした塩化物イオンモニタリングセンサの設置方法の検討と性能検証
Title(English)	Examination and Evaluation of the Installation Method of Chloride Ion Monitoring Sensors Intended for use within Bored Holes of Existing Concrete Structures
著者(和文)	篠原桂介, 千々和伸浩, 岩波光保, 佐藤達三
Authors(English)	Keisuke Shinohara, Nobuhiro Chijiwa, Mitsuyasu Iwanami, Tatsuzou Satou
出典(和文)	コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp. 925-930
Citation(English)	Proceedings of JCI, Vol. 37, No. 1, pp. 925-930
発行日 / Pub. date	2015, 7

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

論文　既設コンクリート構造物のドリル孔を対象とした塩化物イオンモニタリングセンサの設置方法の検討と性能検証

篠原　桂介[*1]・千々和　伸浩[*2]・岩波　光保[*3]・佐藤　達三[*4]

要旨：効率的な劣化調査の実現のため，既設コンクリート構造物に削孔したドリル孔を活用し，塩化物イオンの浸透を検知するモニタリングセンサを孔内に設置する方法について検討を行った。実験によって，既設コンクリートとセンサの境界部における塩分浸透について，エポキシ樹脂の使用により物質移動抵抗性を付与できることを明らかにした。加えて，検討した設置方法を適用したモルタル供試体を用いて塩化物イオン浸透実験を行い，センサが塩化物イオンの浸透を深さ方向に検知できることを確認した。

キーワード：維持管理，モニタリングセンサ，鉄筋腐食，塩化物イオン浸透，界面浸透

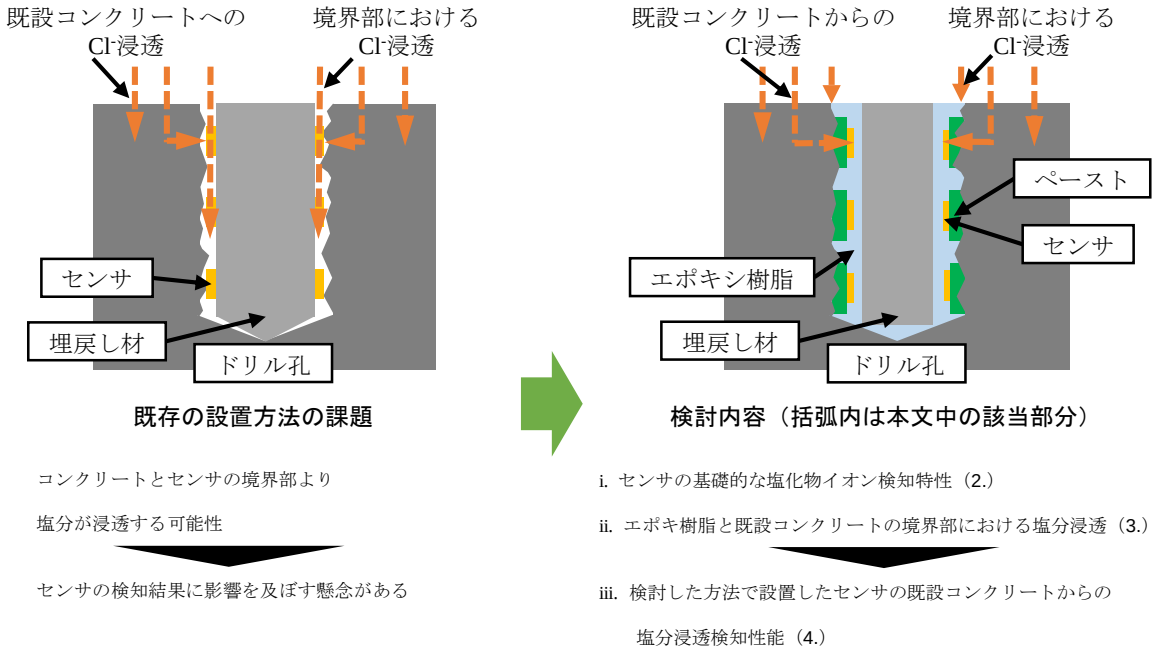
1. はじめに

1.1 背景と目的

現在，我が国では供用開始後 50 年以上が経過し，劣化が顕著となっているコンクリート構造物が増加しており，構造物の維持管理を適切に行う必要性がある。また，少子高齢化に伴って，構造物の維持管理に必要な労働力や予算の不足が深刻化することが懸念される。そこで，効率的な維持管理の実現のためのモニタリング技術の導入が期待されている。

コンクリート構造物中の鉄筋腐食の主な要因の一つとして，塩化物イオンの浸透が挙げられる。塩化物イオンによる鉄筋腐食が進行した場合，大規模修繕を要することが多い。そのため，塩化物イオンの浸透を，鉄筋に到達する前にセンサで検知し，予防保全的に対処できれば，構造物の維持管理費用の削減が可能となる。

図－1(a) で示すように，既存のモニタリングセンサ[1),2)]を既設コンクリート構造物に対して設置する場合，埋戻し材と一緒にドリル孔に挿入することでコンクリート内部の塩化物イオンの浸透を捉える。その際，コンクリートーセンサ境界部より塩化物イオンが浸透する懸念があ



（a）既存の設置方法　　（b）検討する設置方法

図－1　モニタリングセンサの既存の設置方法と本論で検討する設置方法の比較

*1 東京工業大学大学院　理工学研究科土木工学専攻　(学生会員)
*2 東京工業大学大学院　理工学研究科土木工学専攻　助教　工博　(正会員)
*3 東京工業大学大学院　理工学研究科土木工学専攻　教授　工博　(正会員)
*4 太平洋セメント（株）　中央研究所　第二研究部　インフラ保全技術チーム　工修　(正会員)

る。センサはコンクリートセンサ境界部を介してコンクリート内部の塩化物イオンの浸透を検知するため，センサの検知結果がコンクリートーセンサ境界部の影響を受ける可能性がある。そのため，コンクリート中を浸透する塩化物イオンの適切な評価において，センサの設置方法の改善が課題となる。

そこで，本研究ではコンクリートーセンサ境界部における塩化物イオンの浸透に留意した設置方法を検討する。**図－1(b)**に示した，既設コンクリート構造物のドリル孔にセンサを貼付け，遮塩性を有する材料でドリル孔を充填するモニタリングセンサの設置方法を実験的に検証する。本論においては充填材として，遮塩性を有する低粘度のエポキシ樹脂を用いることで，エポキシ樹脂－既設コンクリート境界部の隙間を抑え，境界部における塩化物イオン浸透を防止する。センサには，コンクリート中を浸透した塩化物イオンのみが到達し，センサは境界部の影響を受けることなく，コンクリート中の塩化物イオンを検知できる。また，コンクリートーセンサ間に介在するセメントペーストは，塩化物イオンの浸透を妨げず，センサとコンクリートを密着させる役割を果たす。

このセンサの利点は 1）劣化調査の工程で既設コンクリート構造物に頻繁に設けられるドリル削孔部を利用することで設置作業の省力化，低費用化を実現できること，2）既設構造物への適用が可能であること，3）複数のセンサを深さ方向に設置することにより，塩化物イオンの浸透を鉄筋表面に到達する前に，深さ方向に時系列で検知することができることである。

本研究におけるセンサの検知部には佐藤ら[3]の研究において用いられた鉄箔を使用する(**図－2**)。本センサは，ごく薄い純鉄がポリイミド樹脂製シート上に 25mm 四方で形成されており，表面に塩化物イオンが到達すると，鉄箔が腐食して断線し，電気抵抗が増加する。鉄箔の電気抵抗に，塩化物イオン検知の閾値を定め，閾値を超えた時点で検知と判定する。なお，使用したセンサにはカソードとして機能する金薄膜がポリイミド樹脂シート上に形成されており，鉄部分の不動態被膜が破壊された後，異種金属接触の作用によって腐食性を高めるように設計されている。

1.2 本論の構成

本論におけるセンサ設置方法の検討内容は，**図－1(b)**に示す通り，3 点ある。2.において，塩分を予め添加したモルタル内にセンサを埋設して，センサの基礎的な塩化物イオン検知特性を確認し，3.においてエポキシ樹脂と既設コンクリート境界部における塩化物イオン浸透を塩水圧入試験によって検証した。4.では本論で検討した方法で設置したセンサの既設コンクリートからの塩化物イオン浸透検知性能を検証した。

2. センサの基礎的な塩化物イオン検知特性の確認

2.1 実験概要

本実験では，塩分を予め添加したモルタルに矩形のセンサを埋設し，センサの基礎的な塩化物イオン検知特性を確認する。実験の詳細を**表－1** に示す。

供試体の寸法を**図－3** に示す。センサのかぶりは開放面から 1cm とし，浸透面のみ水分と酸素の出入りを可能にした。開放面以外の 4 面はエポキシ樹脂でシールした。センサの形状は矩形であり，各塩分水準に 5 つのセンサを埋設した。

本研究全般において，粗骨材の影響を避けるためモルタルを使用した。使用材料は普通ポルトランドセメント（密度：3.16kg/m^3），細骨材（密度：2.61kg/m^3），石灰石微粉末（密度：2.69kg/m^3）である。本実験で使用したモルタルの配合を**表－2** に示す。

モルタルに添加する塩化物イオン濃度は，コンクリート標準示方書[4]に定められている，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート内の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度の算出式である次式を元に決定した。

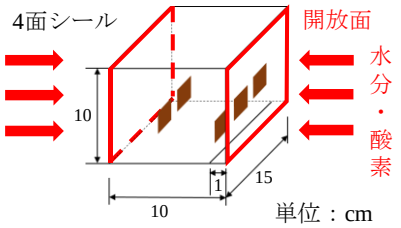
$$C_{lim}=-3.0(W/C)+3.4 \quad (1)$$

ここで C_{lim}:鋼材発生限界塩化物イオン濃度，W/C:水セ

図－2　本研究で検知部として使用する鉄箔

表－1　センサ検知特性試験詳細

検知部形状	矩形
N 数	各水準 5
塩分水準 (kg/m^3)	3 水準 0.875，1.75，3.50
測定項目	鉄箔電気抵抗



図－3　センサ検知特性試験供試体寸法

表－2　センサ検知特性試験配合

W/C	細骨材率	単位量(kg/m^3)		
		W	C	S
55%	58%	244	443	1503

メント比である。

式(1)を用いると，水セメント比 55%の場合の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度は 1.75kg/m^3 である。この添加量に加え，1/2 倍量として 0.875kg/m^3，2 倍量として 3.50kg/m^3 の合計 3 水準を設定した。標準的なコンクリート中のモルタル部分の容積率を 62.5%とみなし，コンクリート中の塩化物イオン濃度をモルタルのものに換算して，1.40，2.80，5.60 kg/m^3 の塩化物イオンを添加した。

暴露環境は，室温 20℃，湿度 60%を乾燥環境，水中浸漬を湿潤環境として，湿潤 3 日，乾燥 4 日を 1 サイクルとする乾湿繰返し環境に暴露した。本実験の測定項目は検知部の電気抵抗とし，24 時間に 1 度，テスターによって測定した。38 日経過後，乾燥環境に放置し，30 日後，再度電気抵抗を測定した。

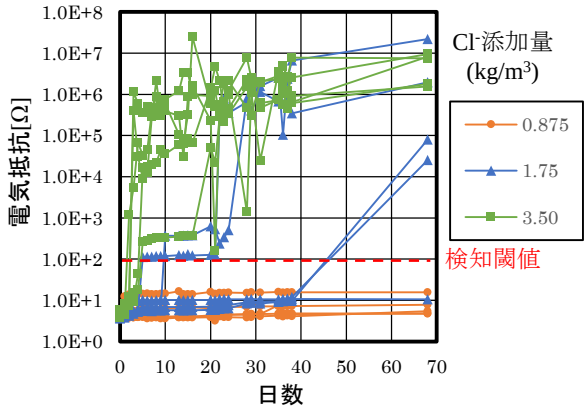
2.2 試験結果および考察

試験開始からの経過日数と検知部の電気抵抗の関係を**図－4** に示す。時間の経過とともに鉄箔の腐食により電気抵抗が著しく増加して，塩化物イオンの存在を検知していることが分かる。この傾向は塩化物イオンの濃度に応じて変化し，濃度が高いほど早期に抵抗が増大した。

また，検知部鉄箔の抵抗値には増減が認められたが，100Ω を超えた後に，再び 100Ω 以下になることは無かった。そのため，センサの抵抗変化に関する閾値を 100Ω とし，閾値を超えた場合を塩化物イオンの検知時期とした。

塩化物イオン濃度ごとの，実験終了までに塩化物イオンの検知を示したセンサの個数は，0.875kg/m^3 では 0 個，1.75 kg/m^3 では 4 個，3.50 kg/m^3 では 5 個であり，塩化物イオン濃度の上昇に伴い検知率が高くなっている。0.875kg/m^3 では検知を示した検知部が無いのに対し，1.75 kg/m^3 以上では 90%のセンサが検知していることから，検知部として用いた鉄箔の腐食発生限界塩化物イオン濃度は，本試験の範囲において示方書に記載されている 1.75 kg/m^3 付近であることが明らかになった。

塩化物イオンを検知した検知部鉄箔の中で，検知までの時間にばらつきが見られる。これはモルタルの材料不均一性に起因すると考えられるが，そのメカニズムは明確に検証されていないため，今後検討が必要である。



図－4　センサ検知特性試験電気抵抗経時変化

3. エポキシ樹脂と既設コンクリート境界部における塩化物イオン浸透の検討

3.1 エポキシ樹脂の充填材としての使用

検討する設置方法において，充填材は 1）遮塩性，2）充填材－コンクリート境界部における塩化物イオンの界面浸透を防ぐことが求められる。

充填材－既設コンクリート境界部の塩化物イオンの浸透を防ぐために，境界部の隙間の形成を防がなければならない。このため，充填材の粘度を低くし，ドリル孔に充填材を密着させることで，界面における塩化物イオンの浸透を防ぐことを考えた。

以上の 2 つの性質を持った材料として，遮塩性を有し，低粘度のエポキシ樹脂を充填材として選定した。本研究で用いたエポキシ樹脂の諸元を**表－3** に示す。

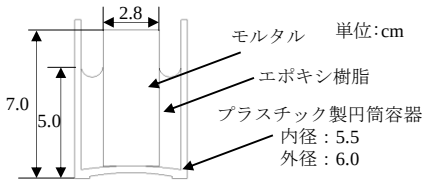
3.2 実験概要

本実験では，エポキシ樹脂とモルタル境界部を有する供試体を作製し，高水圧下において塩水を圧入した。塩水の圧入後，塩化物イオンの浸透分布を EPMA によって面分析し，界面浸透の有無を確認した。界面浸透は，モルタル部分と，エポキシ樹脂－モルタル境界部分の塩化物イオン分布を比較して確認した。

実験には，**図－5** に示す供試体を使用した。供試体は円筒のプラスッチック製の容器にモルタルの角柱を挿入

表－3　充填材エポキシ樹脂諸元

	主剤	硬化剤
成分	ビスフェノール A エポキシ樹脂	変性脂環式ポリアミン
密度（g/cm3）	1.16	1.00
混合物粘度	500Pa･s	
離型可能時間	24~36 時間	



図－5　塩水圧入試験供試体寸法

表－4　塩水圧入試験モルタル配合表

W/C	細骨材率	単位量(kg/m^3)		
		W	C	S
55%	58%	244	443	1503

し，容器と角柱試験体の隙間をエポキシ樹脂で充填して作製し，樹脂の硬化後に実験に使用した。

実験に使用したモルタル供試体の配合を**表－4** に示す。脱型後，設置を行うドリル孔壁表面の粗度を再現するため，モルタル供試体を乾式コンクリートカッターによって切断し，実験に使用する寸法に加工した。

塩水の圧入は，高水圧加力装置を使用して行った。**図－6** にその原理を示す。装置はポンプと容器で構成されており，水で満たされた容器内に，さらにポンプで水を送り込むことで容器内の圧力が上がる。圧力容器内に，塩水および供試体を封入した袋を入れ，加圧することで供試体に静水圧が作用する。本実験では圧力を 20MPa，圧入時間を 20 分間とし，塩水は 10%NaCl 溶液を用いた。

実験後，粗度を持った側面とエポキシ樹脂の界面の塩化物イオンの分布を測定するため，供試体を切断し，**図－7** に示したように EPMA 分析の前処理として試料面を研磨して炭素蒸着を行った。EPMA の測定条件は，加速電圧 15kV，試料電流 2400nA，ピクセルサイズ 0.1mm，プローブ径 0.05mm とし，骨材の影響を除外するため，Cl に加えて Ca，Si，S の 4 元素分析を実施した。なお，測定断面は，打設面および底面を除いた側面方向とした。

3.3 試験結果および考察

EPMA による樹脂，骨材，空隙を除いたペースト部分の塩化物イオンの面分析結果を**図－8** に示す。開放面からの距離が離れるほど，塩化物イオン濃度が低く，深さ方向で端部近傍まで浸透していることが分かった。塩水を高水圧で圧入しているため，本実験の塩化物イオンは，濃度勾配による拡散ではなく，液状水の移流に伴う移動である。そのため，より多くの水分が浸透した部分程塩化物イオンが多く分布したため，このような分布になったと考えられる。

また，面分析結果からエポキシ樹脂－モルタル境界部では，開放面と比較して塩化物イオンの急速な浸透箇所や局所的な濃縮部位は認められなかった。

モルタルとエポキシ樹脂界面との塩化物イオンの分布を定量的に比較するため，左側界面，右側界面，中央部分の塩化物イオン量を平均化し，それぞれ深さ方向別に整理した（**図－9**）。供試体の左右の界面における塩化物イオンは，モルタルとエポキシ樹脂界面から幅 1mm の範囲の値を平均し，また，モルタル内の塩化物イオンは，供試体中央 2cm の範囲を平均して算出した。全体の傾向として，開放領域から深さ方向に従って塩化物イオン濃度が低く，70mm 位置まで浸透する結果となった。

エポキシ樹脂－モルタル境界面とモルタル中央部分の塩化物イオン分布を比較すると，開放面よりも内部では大きな差は認められなかった。また，モルタル内中央の塩化物イオン分布を包絡線として，境界面の塩化物イオンが同様に分布する結果となった。

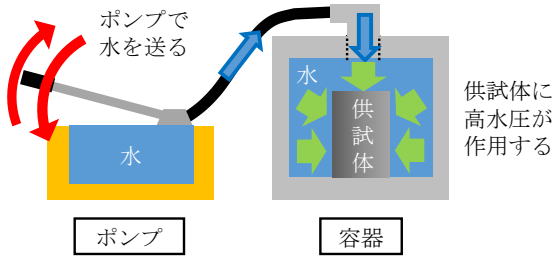
以上より，エポキシ樹脂－モルタル境界部には，塩化物イオンが急速に浸透するような隙間は生じておらず，物理的な物質移動抵抗性が高いことが確認された。

この特性は，低粘度のエポキシ樹脂がモルタル表面に密着し，また連続空隙が形成されなかったことによるもと考えられ，当該の樹脂を適切に施工すれば，塩分浸透を抑制することが可能であると考えられる。

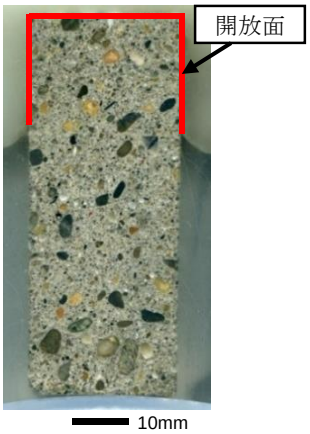
4. 検討した方法で設置したセンサの既設コンクリートからの塩化物イオン浸透検知性能

4.1 実験概要

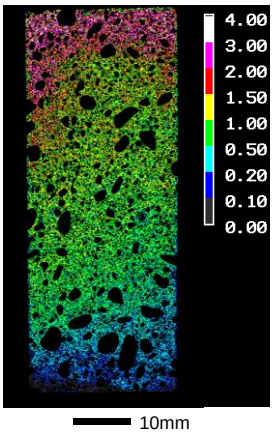
本実験では，検討した方法でセンサを設置したモルタ



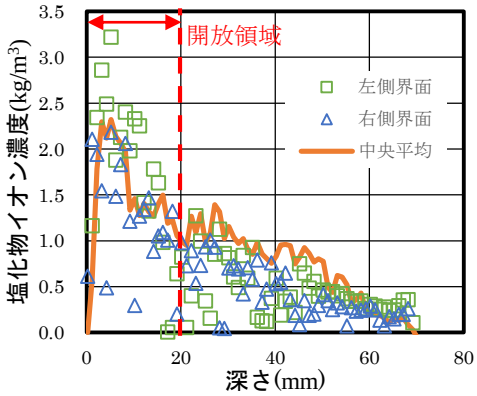
図－6　高水圧加力装置原理



図－7　EPMA 用試験体



図－8　塩水圧入実験 Cl 分布



図－9　モルタル内と界面の Cl^- 分布の比較

ル供試体に塩化物イオンを浸透させた。試験の詳細を**表－5** に示す。

モルタルの配合を**表－6** に示す。モルタル供試体は，ドリル孔内のコンクリート面の粗度を再現するため，脱型後にセンサ設置面をコンクリートカッターで切断した。また，供試体の可溶性塩化物イオンの分布測定のため，円柱供試体を同時に作製した。可溶性塩化物イオンは，JCI 法（JCI-SC4）に準拠して測定した。

供試体の外観を**図－10** に示す。センサは供試体側面に設置した。センサの電気抵抗はリード線を配して測定した。塩化物イオン浸透面以外の面はエポキシ樹脂でシールし，物質のモルタル供試体内への移動を遮断した。

センサ設置の詳細を**図－11** に示す。センサは同一供試体の 3 箇所に配置し，各々の箇所において浸透面から 1.5，3.5，5.5cm の 3 水準の深さに設置した。なお，深さ方向の塩化物イオンを検知する目的で，L 字型のセンサを使用した。L 字型のセンサは，L 字の長手方向に鉄箔を配置し，矩形センサより正確な深さ位置の検知を行うため，検知部分の幅を細くし，塩化物イオンを検知する深さ方向の範囲を限定した。短手方向は，電気抵抗計測用リード線の配線部とし，この部分の腐食を防ぐために自己融着テープでシールした。

既設コンクリート構造物のドリル孔は粗度を持っていると想定され，センサを直接貼り付けると隙間が生じる懸念がある。そのため，**図－12** のようにセンサペーストを介してコンクリートから検知部鉄箔へ塩化物イオンが浸透するように設置することとした。センサを貼付，および被覆するセンサペーストは，設置の際の工期短縮を勘案し，超速硬性セメントを使用した。設置時の利便性に留意し，既設コンクリートからの塩分浸透を妨げないペーストの水セメント比は 100%とした。

設置の際の手順を**図－13** に示す。まずモルタル供試体表面に検知部を貼付けるための型枠を設置し，その内部に鉄箔を設置して，型枠内を充填するようにセメントペーストを打設した。セメントペーストを用いてセンサを貼付した後，低粘度エポキシ樹脂でセンサ設置面を覆って界面浸透を防止した。

促進試験は，乾燥は室温 60℃のチャンバー内に静置，湿潤は濃度 10%食塩水浸漬とした。実験は，2 週間は 6 時間湿潤 18 時間乾燥，それ以降は 12 時間湿潤 12 時間乾燥として，38 日目まで行った。

4.2 実験結果と考察

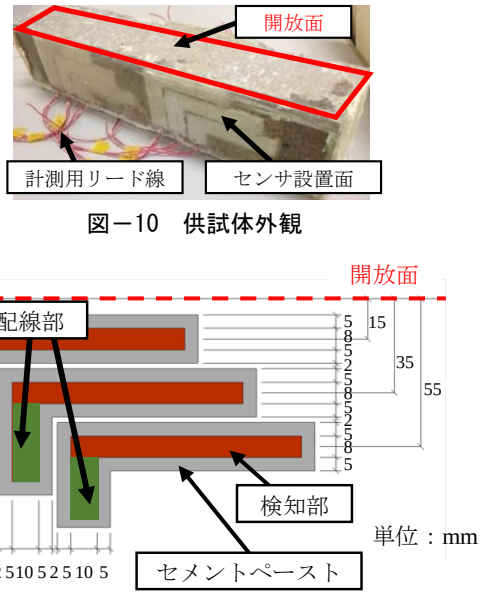
浸漬時間が 60，144，348 時間の時点での可溶性塩化物イオン分布を**図－14** に示す。時間の経過に伴い塩化物イオンが深さ方向に浸透していることが確認された。センサの電気抵抗と経過時間の関係を**図－15** に示す。なお，図中の表記は，設置箇所を A，B，C と表記し，深さ位置と組み合わせて，A1.5，A3.5 のように区別する。促進試験の時間経過に伴い，各センサの電気抵抗の増加が認められた。また，電気抵抗の増加は，浸透深さ 1.5cm のセ

表－5　センサ性能検証試験詳細

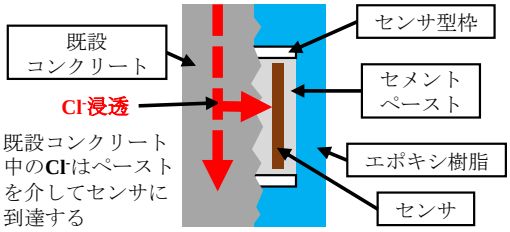
検知部形状	L 字
センサ設置水準 (cm)	3 水準 1.5，3.5，5.5
N 数	各水準 3
測定項目	鉄箔電気抵抗 モルタル可溶性塩化物イオン濃度

表－6　センサ性能検証試験モルタル配合

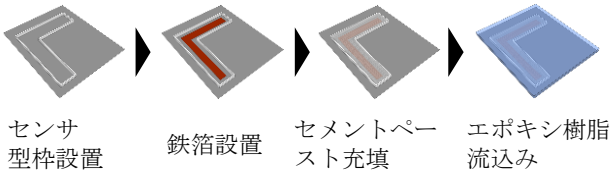
W/C	細骨材率	単位量(kg/m³)			
		W	C	S	LF
100%	60%	304	304	1560	220



図－11　センサ設置の詳細

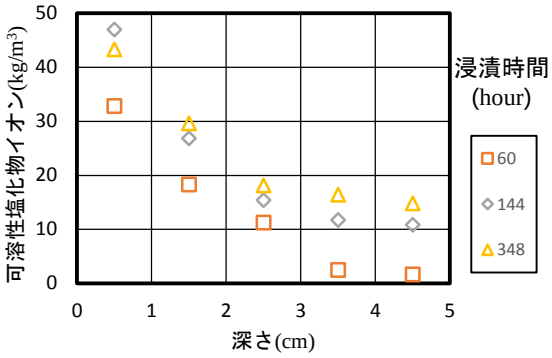


図－12　鉄箔被覆セメントペースト

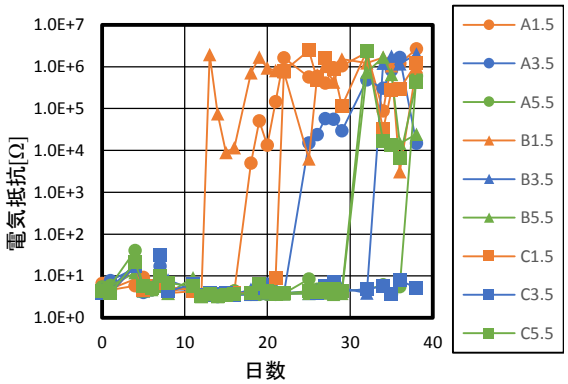


図－13　センサ設置の手順

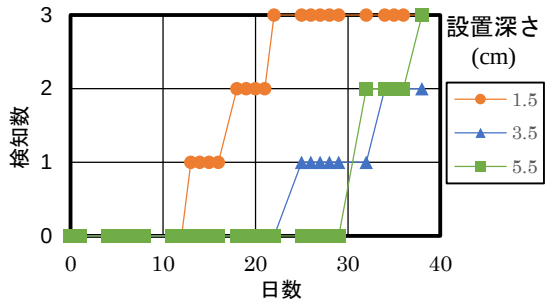
図－10　供試体外観



図－14　センサ性能検証実験の塩化物イオン分布



図－15　センサ性能検証実験の電気抵抗変化



図－16　センサの検知数の経時変化（閾値：100Ω）

ンサで早期に認められた。これはモルタル中の塩化物イオンが鉄箔表面に達し，腐食による断線が起こったためだと考えられる。

各水準において，個別のデータを比較すると，3.5cm の深さのセンサと 5.5cm の深さのセンサでは検知が前後するものが認められた。これは，使用したセンサの検知原理として，腐食開始から抵抗増大までに所要の時間を要すること，およびモルタルの塩分浸透性が高いことにより，検知部における塩化物イオン到達から断線による検知までの時間のばらつきが生じたことに起因するものであると考えられる。このことから，貼付に使用したペーストの配合やセンサの設置間隔についてさらなる検討が必要であると考えられる。なお，設置箇所による明確な差異は認められなかった。

一方，センサの電気抵抗が 100Ω 以上となったセンサの検知数の経時変化を**図－16** に示す。各深さ位置におけるセンサの検知時期は，全体として，深さ位置に準じて早期となっていることがわかる。この結果から，センサの検知確率を加味した評価を行うことで，深さ方向の検知を適切に行える可能性を示唆しているといえる。

以上のことから，深さ位置ごとにばらつきは認められるものの，本研究において検討した設置方法によって，深さ方向に配置したセンサが塩化物イオン浸透を検知できる可能性が示された。

5. まとめ

本研究では，既設コンクリート構造物中の塩化物イオン浸透を捉えるために，エポキシ樹脂を使用したドリル孔壁へのセンサの設置方法の検討を行った。

以下に本研究で得られた結論を述べる。

1) 検知部に使用した鉄箔は，コンクリート標準示方書に示されている鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度付近で塩化物イオンを検知した。
2) 検知部に使用した鉄箔は，塩化物イオン到達から検知までの時間にばらつきがあることが確認された。
3) 充填材に使用したエポキシ樹脂とモルタルの界面は，母材となるモルタルと比較して塩化物イオンの物質移動性が高く，圧入のような物理的な物質の移動は起きにくいことが確認された。
4) 複数のセンサを配置し検知確率を加味すれば，検知結果のばらつきを許容できる可能性が示唆された。

今後の課題として，検知部鉄箔の塩化物イオン到達から検知までの時間のばらつきのメカニズムやセンサの設置間隔を検討する必要がある。また，実用化に際しては，センサの設置時に使用するセンメントペーストの塩分浸透特性と，実際のコンクリートの相関性の検証を行う必要があると考えられる。

参考文献

1) M. Raupach, J. Gulikers and K.Reichling: Condition survey with embedded sensors regarding reinforcement corrosion, Materials and Corrosion 2013, 64, No. 2, pp.141－146, Dec. 2013
2) M. Raupach and P. Schessl: Marcrocell sensor for monitoring of the corrosion risk of the reinforcement in concrete structures, NDT & E international, Volume 34, Issue 6, pp. 435－442, Sep. 2001
3) 佐藤達三ほか：コンクリート中鉄筋の腐食環境検知センサに関する検討，土木学会第 65 回年次学術講演会，pp. 693－694，2010.9
4) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2012