

論文 鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度設定のための鉄粉散布法とその実証実験の改良

青木 優介*1・増田 洋介*2・嶋野 慶次*3

要旨：既設コンクリート中の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度の設定方法として、鉄粉散布法なる方法を考案し、実証実験を行ってきた。実験では、供試体となるコアの切断面上における鉄粉と鉄筋の腐食開始を確認することが重要となるが、従来の方法では鉄粉や鉄筋の発錆が遅く、安定しないため、腐食開始を確認することが難しかった。今回、鉄イオンの検出に用いられているヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を用いることで、この問題を解決できる可能性を見出すことができた。今後の課題は今回改良した方法を用いて実証実験の結果を蓄積することである。

キーワード：鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度、塩害、鉄粉散布法

1. はじめに

硬化コンクリート中の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度(以降、 C_{lim} と表す)は、塩化物イオンの侵入による鋼材の腐食開始時期の予測結果や以後の維持管理方針を左右する重要な値であり、その設定には常に合理性が求められる。既往の研究¹⁾により、 C_{lim} はコンクリートの使用材料や配合により変化することが明らかにされ、新設コンクリート構造物の設計の場面では、このことに対応した C_{lim} の設定方法が採られている²⁾。一方、既設コンクリート構造物の維持管理の場面では、対象となるコンクリートの情報が得られにくいこともあり、同様の設定方法を採用することは難しいと考えられる。

2013年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕³⁾には、「 C_{lim} は対象構造物における点検結果にもとづき、鋼材の腐食状態と鋼材表面におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度の関係から設定することを原則とする」と記されている。これは合理的な設定方法と考えられる。しかし、実際に行うとなれば、①実施時期の見定めが難しい(鋼材が腐食し始めた直後に調査しなければならない)、②実施位置の選定が難しい(腐食し始めた直後の鋼材の位置を特定しなければならない)、③試料の採取が難しい(はつり出し作業で鋼材を傷つける、鋼材表面に接するコンクリートを正確に採取できないなどの懸念がある)などの問題が生じると考えられる。

著者らは、これらの問題を解決する既設コンクリート中の C_{lim} の設定方法として、鉄粉散布法を用いる方法を検討してきた⁴⁾。同方法の概略については次章に示すが、同方法であれば①実施時期は比較的自由、②実施位置も比較的自由、③試料の採取も比較的容易となり、上述の問題はおおむね解決されると考えられる。

ただし、同方法にも解決すべき問題が残されている。その詳細も次章に示すが、要約して挙げれば、①結果を得るまでに時間がかかる、②結果の安定性に欠ける、という問題である。また、同方法の実用に向けては、同方法の実用性を実証する実験を繰り返す必要があるが、この際にも(鉄粉と鉄筋で対象は異なるが)上記①②と同様の問題が生じる。

今回、鉄イオンの検出に用いられている、ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を用いることで、これらの問題を解決できる可能性を見出すことができた。本論文では、まず、従来の鉄粉散布法と実証実験の概略と問題点について述べ、続いて、ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を用いた同方法の改良について述べる。最後に今後の課題について述べる。

2. 従来の鉄粉散布法の概略と問題点

2.1 従来の鉄粉散布法の概略

著者らが従来検討してきた、鉄粉散布法を用いる既設コンクリート中の C_{lim} の設定の流れを図-1に示す。なお、図-1は図-2とともに、従来の方法の問題点を明確にするために、既報⁴⁾より再掲載したものである。

図-1に沿って、本方法の流れを説明する。①対象コンクリートからコアを採取し、②それを乾式カッターでかぶり方向に平行に切断する。③切断面をエアダスターで清掃したのち、切断片を(切断面に達しない位置まで)水を入れた密閉容器内に置いて吸水させる。これ以降、周辺の温度を一定にする。④切断面に水膜が浮く状態になれば切断面に鉄粉を均等に散布し、⑤切断片を密閉容器内に再び置き、1日～数日後に鉄粉の発錆状況を目視で確認する。⑥鉄粉が発錆している領域の境界(以降、

*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 木更津工業高等専門学校専攻科 建設環境工学専攻 (学生会員)

*3 木更津工業高等専門学校 技術教育支援センター

発錆境界と称する)が確認されれば、発錆境界上をドリルで削孔して(あるいは、発錆境界の最深部を含むようにコアをスライスして)試料を採取し、⑦試料中に含まれる塩化物イオン濃度を測定して、対象コンクリートの C_{lim} の基本値として設定する。なお、散布する鉄粉には粉末冶金用の還元鉄粉を用いており、今回用いているものの化学成分は、純鉄 95.9%、炭素 0.587%、酸素 0.924% (メーカーによる検査証明書より)である。

本方法であれば、実施時期はコンクリート中に適度に塩化物イオンが浸透している時期でありさえすればよい。実施位置にも基本的に制約はなく、鋼材の位置を避けることもできる。試料の採取は通常のコア採取作業となり、鋼材を傷つけることや、鋼材表面のコンクリートの採取に手間どることなどへの懸念も小さい。すなわち、本方法であれば、従来の既設コンクリート中の C_{lim} の設定方法が抱えている実施上の問題を、おおむね解消できると考えられる。

2.2 従来の実証実験の概略

上述のように、鉄粉散布法を用いる C_{lim} の設定方法は、「コア切断面において、鉄粉の発錆境界が現れる位置の塩化物イオン濃度が、当該コンクリート中の C_{lim} に一致する」という仮定が成り立つことを前提にしている。同方法の実用に向けては、この仮定が成り立つことを実証しなければならない。

その実証方法として著者が考えているのが、図-2 に示すような供試体を用いる実験である。塩害環境下に置かれていた実部材や暴露供試体などから鉄筋を含む形でコアを採取し、その切断面にて鉄粉散布法を行う。鉄粉の発錆境界と鉄筋周辺の発錆状況を目視で確認し、両者の関係を実験結果とする。たとえば、図-2 のように、発錆境界が鉄筋位置にまで達していれば鉄筋の周辺に発錆が見られるが、達していなければ鉄筋の周辺に発錆は見られない、という結果を確実に得ることができれば、上述の仮定が成り立つことを実証できると考えられる。

2.3 従来の鉄粉散布法の問題点

従来の鉄粉散布法を用いる C_{lim} の設定方法には、解決すべき問題点が残されている。

第一の問題点は、結果を得るために数日程度の時間を要することである。上述したように、コア切断面に散布した鉄粉の発錆を目視で確認できるようになるまでには、事前のコア切断片への吸水作業も含めると、数日程度の時間を要する。たとえば、著者らが本方法の以前に検討していた硝酸銀溶液噴霧法⁵⁾では、数分~1 時間程度で結果が得られることが長所とされていた。

第二の問題点は、結果の安定性に欠けることである。図-3 に示すのは、全塩化物イオン量が 5.0kg/m^3 となるように塩化ナトリウムを混入したコンクリート供試体の

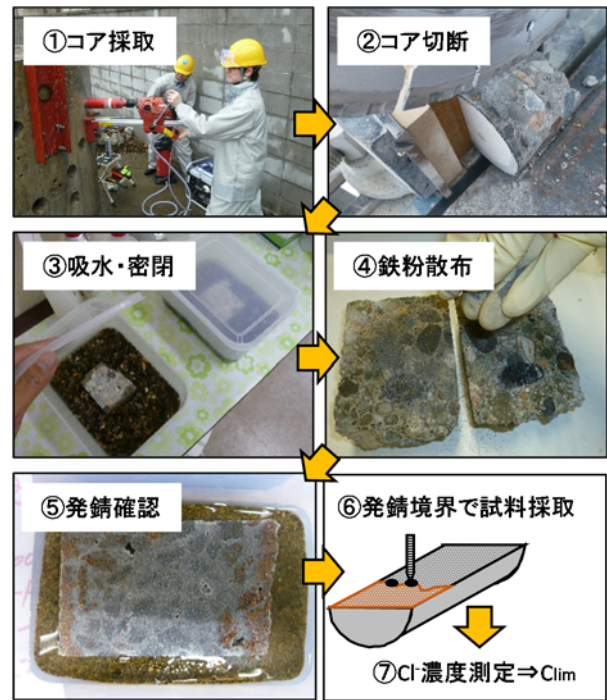


図-1 鉄粉散布法を用いる C_{lim} の設定の流れ⁴⁾

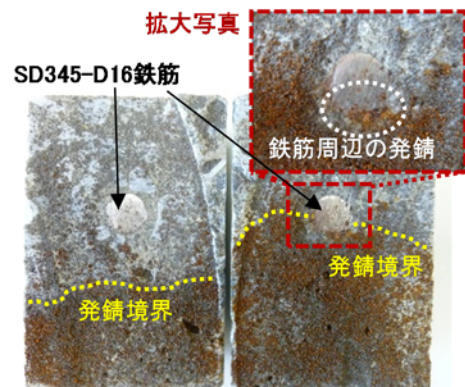


図-2 実証実験の例(理想的な結果の様子)⁴⁾

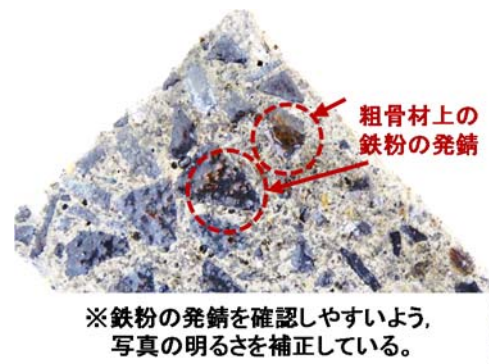


図-3 鉄粉の発錆が確認されない様子

切断面で鉄粉散布法を行い、5 日間経過した様子である。一部の粗骨材上の鉄粉には発錆が確認されるが、それ以外の鉄粉には発錆は確認されない。このように高濃度の塩化物イオンが含まれている供試体でありながら鉄粉の発錆を確認されないことがたびたび生じた。

2.4 従来の実証実験の問題点

従来の実証実験における問題点も、鉄粉散布法の問題点と同様である。すなわち、鉄筋周辺の発錆を確認できるようになるまでに時間がかかること、また、その発錆が安定しないことである。

鉄粉の発錆境界と同時に鉄筋周辺の発錆を確認することは、本実験の最重要項目である。たとえば、図-4のように、コアの切断時点で鉄筋周辺に発錆が確認される場合には、後者の確認はすでに終了していることになる。しかし、図-5 左側のように、鉄筋周辺は実は発錆していながら、切断時点ではそれが確認されないような場合には（図-5 右側は取り出した鉄筋の様子）、その後の実験にて、鉄筋周辺に新たな発錆を確認しなければならないことになる。しかし、鉄筋周辺の条件も基本的に鉄粉のそれと同じであるので、発錆の遅さや不安定さなど、鉄粉と同様の問題が生じる。

この問題の解決策として、図-5 右側のように、鉄粉散布法の実施後に供試体から鉄筋を取り出し、その表面の発錆を確認することで鉄筋の腐食開始を確認することも考えられた。しかし、発錆量がわずかな場合、それを目視で確認することは容易ではなく、また、その発錆が塩化物イオンの供給によるものなのか、それとも構造物の施工段階で存在していたものなのかを見分けることも難しい。また、構造物が受けていた温度や水分の条件によっては、 C_{lim} を超えていながら鉄筋が発錆していない場合も想定される。以上に鑑みて、鉄筋を取り出してみたところで、その表面に本方法で対象とする発錆を確認できるかは保証されないと考えられる。

3. ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウムを用いた鉄粉散布法および実証実験の改良

3.1 問題点の原因に関する考察

従来の鉄粉散布法、および、実証実験の問題点を解決するために、それぞれの原因についての考察を試みた。その結果、双方の問題に共通する原因として、①コア切断面上の高アルカリ環境下における鉄粉・鉄筋の発錆の確認しづらさ、②コア切断面の水分状態の制御の難しさ、が関係していると考察した。

①の考察に至った経緯について述べる。図-6 に示す3枚の写真は、通常的环境下における鉄粉の発錆速度を観察しようとした実験の結果である。濃度3%の食塩水を含ませたろ紙の上に鉄粉を散布し、これを密封容器内に入れ、1時間後と17時間の様子を観察した。実験中の温度は25℃程度とした。

図-6 より、ろ紙上の鉄粉は、1時間後にはほぼ均等に発錆し、17時間後にはより明瞭に発錆していることがわかる。この結果から、通常的环境下における鉄粉の発錆

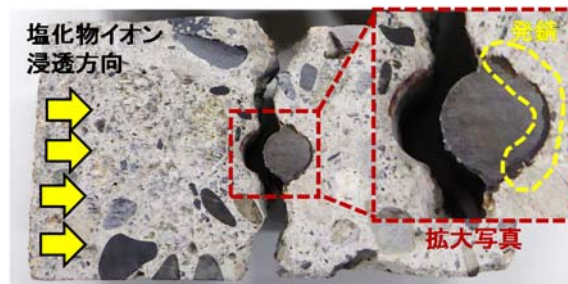


図-4 コア切断時に鉄筋周辺の発錆が確認される例



図-5 切断時に鉄筋周辺の発錆が確認できない例

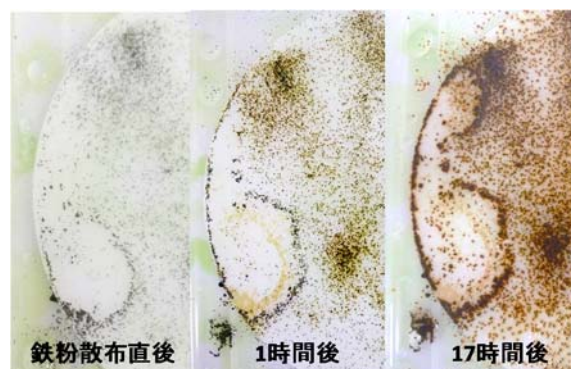


図-6 通常的环境下(3%食塩水上)での鉄粉の発錆

速度は本方法で求められるそれに比して遅くないと判断される。また、この結果から、鉄粉散布法や実証実験において鉄粉や鉄筋の発錆が遅れること、安定しないことの原因は、図-6 の実験では再現されていない、コア切断面上の高アルカリ環境にあると考えられる。

コア切断面上ではその高アルカリ環境により、鉄粉表面および鉄筋表面の不動態皮膜の破壊が（皮膜が再生⁶⁾されることも含めて）小規模に留まることが考えられる。あるいは、不動態皮膜の破壊は進むものの、そのことが目視で確認しやすい形となって（図-6 の鉄粉のように赤茶色の発錆となって）現れにくくなることも考えられる。現段階ではこれらの機構を明らかにできていないため、本節冒頭ではこれらを、「高アルカリ環境下における鉄粉や鉄筋の発錆の確認しづらさ」と表現している。この問題を解決するには鉄粉や鉄筋の不動態皮膜の破壊や発錆を敏感かつ明確に確認できる方法が必要となる。

続いて、②の考察に至った経緯について述べる。鉄粉の散布面となるコア切断面の水分状態が、鉄粉の発錆に大きく影響することについては既報⁴⁾でも述べた。従来の鉄粉散布法は、このことをふまえ、切断面上に薄い水膜が浮く程度の水分状態を保つこととしてきた。しかし、その状態を保つことは実際には難しく、水膜が必要以上に厚くなってしまい、鉄粉の発錆が滞ることがしばしば生じた。なお、このことは実証実験における鉄筋周辺の発錆にも同様の影響を与えると考えられる。この問題を解決するにはコア切断面の水分状態の調整方法の簡易化が必要であり、その最たるは、水分状態の調整を必要とする実験時間の大幅な短縮化だと考えられる。

3.2 ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液の利用

著者は、以上の考察をふまえて、鉄粉散布法における鉄粉の発錆や、実証実験における鉄筋周辺の発錆の確認方法を変えることにした。具体的には、無機化学の分野で鉄イオンの検出などに用いられている、ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を鉄粉や鉄筋の周辺に噴霧し、鉄粉や鉄筋周辺からの鉄イオンの溶解を確認することで、発錆の確認に代えることにした。

ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を用いた鉄イオンの検出方法や同水溶液の取り扱い、処理方法などについては参考となる資料⁷⁾が発行されている。これらを参考にしながら、同水溶液の鉄粉散布法への利用を想定して行った実験の結果を紹介する。図-7に示す写真は、図-6の実験と同様の実験の結果である。つまり、濃度3%の食塩水を含ませたろ紙の上に鉄粉を散布し、これを密封容器内に入れておいた様子である。ただし、鉄粉を散布した直後に、ろ紙上に黄色を呈した2%ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を噴霧している。実験中の温度は25℃程度とした。

図-7より、同水溶液を噴霧した直後から鉄粉の周辺が青く発色していることがわかる。1時間後には青色の発色がより明瞭になっているが、一部では退色が始まっており、同時に、ろ紙についていた黄色も退色してきている。17時間後には一部に青色の発色が残ってはいるが、全体的に退色が進み、鉄粉には図-6の17時間後と同じような発錆が現れている。

この青色の発色が、鉄粉から鉄イオンが溶解した証となる。すなわち、同水溶液は鉄粉から溶解した2価の鉄イオンに反応して青色沈殿を生成する性質をもっており、その反応の速さは噴霧直後の発色をみても明らかである。同水溶液を用いれば、コア切断面において、鉄粉や鉄筋周辺の不動態皮膜が小規模にでも破壊され、鉄イオンが溶解したことを即座に確認できる可能性がある。このことには、従来の鉄粉散布法と実証実験が抱えてきた問題を解決できる可能性が認められる。

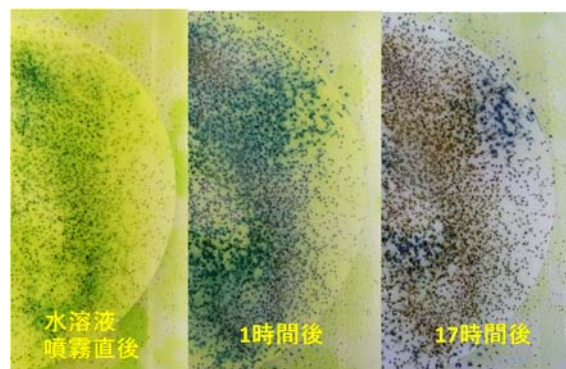


図-7 ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を噴霧した3%食塩水上での鉄粉の様子

なお、ここで、鉄粉散布法と実証実験における鉄粉や鉄筋の腐食開始の定義を、発錆から不動態皮膜の破壊に変更したことを注記しておく。

鉄粉散布法や実証実験で本来確認すべき事項は、鉄粉や鉄筋の腐食開始である。その定義は、大きく2種類に分かれると考えられ⁸⁾、1つは表面の不動態皮膜が破壊された時点、もう1つは表面に発錆が認められた時点である。たとえば、酸素量が少ない条件下では、両時点は必ずしも一致しないと指摘されている⁸⁾。

これまで本研究では、鉄粉散布法や実証実験において鉄粉や鉄筋に供給される酸素量は、それらが発錆するに十分な量であり、不動態皮膜が破壊される時点と発錆が認められる時点は一致すると考え、目視での確認が容易な発錆の方で腐食開始を確認しようとしてきた。しかし、実際には、鉄粉や鋼材の発錆は遅く、確認しがたかった。その一方で、ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を用いることで不動態皮膜が破壊される時点を早く、確実に確認できることがわかった。したがって、腐食開始の定義を後者に変えることとした。

3.3 鉄粉散布法の改良

図-8に、ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を用いた、改良後の鉄粉散布法の流れを示す。なお、対象コンクリートからコアを採取し、それを切断し、切断面を清掃するまでの流れは図-1と共通する。ここでは、それ以降の流れを示す。

まず、①コア切断面に蒸留水を軽く噴霧し、②蒸留水がわずかに浮いている状態で切断面に鉄粉を散布する。続いて、③吸水性をもつ白くて薄い紙（ここでは市販の油こし紙を使用）をコア切断面にかぶせ、④その上から2%ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を噴霧する。紙が浮かないように手袋をはめた指先などで軽く押さえ、そのまま静置しておく。⑤は静置してから2分後に紙をはがして裏側を確認した様子である。切断面下側の鉄粉の周辺には青色の沈殿が現れている。⑥ははがした紙をそのままにして30分後の様子であり、青色の沈殿が現

れていた領域の境界がさらに明瞭になっている。以降、⑦この境界にあたる位置からドリル削孔（あるいはスライス）により試料を採取し、⑧試料中の塩化物イオン濃度を測定して、その値を対象コンクリートの C_{lim} の基本値として設定する。なお、図-8 の供試体は、凍結防止剤が散布されていたPC橋の地覆部分（撤去部材）より採取したコアの切断片であり、①～⑥の写真を通して、切断片の下側が暴露面であった。

途中、切断面に紙をかぶせた理由は、鉄粉周辺の青色の沈殿の生成を確認しやすくするためである。図-8 の③で紙をかぶせずに、切断面に直接 2%ヘキサシアノ鉄（Ⅲ）酸カリウム水溶液を噴霧した場合、凝視すれば鉄粉の周辺に青色の沈殿が現れてくるのが確認できるのだが、セメントペーストや骨材の地色との識別は難しい。また、それ以降のコア切断面では、青色の沈殿を生成し終えた鉄粉が金属光沢を失っていたり、その周辺のセメントペーストがわずかに青く変色していたりするのだが、その識別も難しい。すなわち、水溶液の噴霧直後であろうとそれ以降であろうと、コア切断面で青色の沈殿の生成を直接確認することは難しいと考えられたことから、紙をかぶせて間接的に確認することにした。

以上のように、本方法であれば鉄粉の腐食開始を早く、確実に、供試体の水分状態の複雑な制御などをせずとも、確認することができる。従来の鉄粉散布法が抱えてきた問題点を十分に解決できると考えられる。

3.4 実証実験の改良

図-9 に示す写真は、ヘキサシアノ鉄（Ⅲ）酸カリウム水溶液を用いた、コア切断面での鉄筋周辺の腐食開始確認実験の結果である。

各供試体に用いられているコンクリートは、普通ポルトランドセメント、山砂、碎石を用い、水セメント比を60%とし、それぞれ全塩化物イオン量が0, 0.6, 1.2, 2.4, 5.0kg/m³ になるように、塩化ナトリウムを混入したものである。いずれのコンクリートも、SD345-D13 の鉄筋が中央に埋め込まれる形になるように型枠（内径 100mm, 深さ 50mm の硬質塩化ビニル製容器）内に打込んだ。打込み後、いずれの供試体にも室温 20±1.0℃, 湿度 40±10%の恒温室内で7日間の封かん養生を施し、それ以降、同室内で7日間サイクルの乾燥・水中浸漬条件を与えた。図-9 に示す各供試体の切断面の様子は、これらの供試体を材齢 60 日超の時点で鉄筋の直交方向に乾式カッターで切断し、現れた鉄筋の切断面の周辺に蒸留水を軽く噴霧し、そこに市販の油こし紙の切れ端をおき、その上から 2%ヘキサシアノ鉄（Ⅲ）酸カリウム水溶液を噴霧して、5分後のものである。

図-9 を見ると、全塩化物イオン量 0 kg/m³, 0.6kg/m³ 想定供試体であっても鉄筋付近に青色の沈殿が現れて

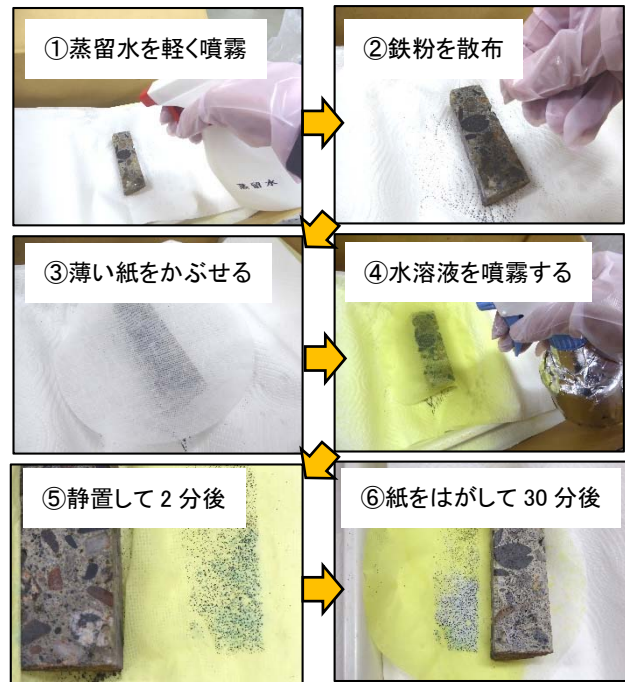


図-8 ヘキサシアノ鉄（Ⅲ）酸カリウム水溶液を噴霧する改良後の鉄粉散布法の流れ

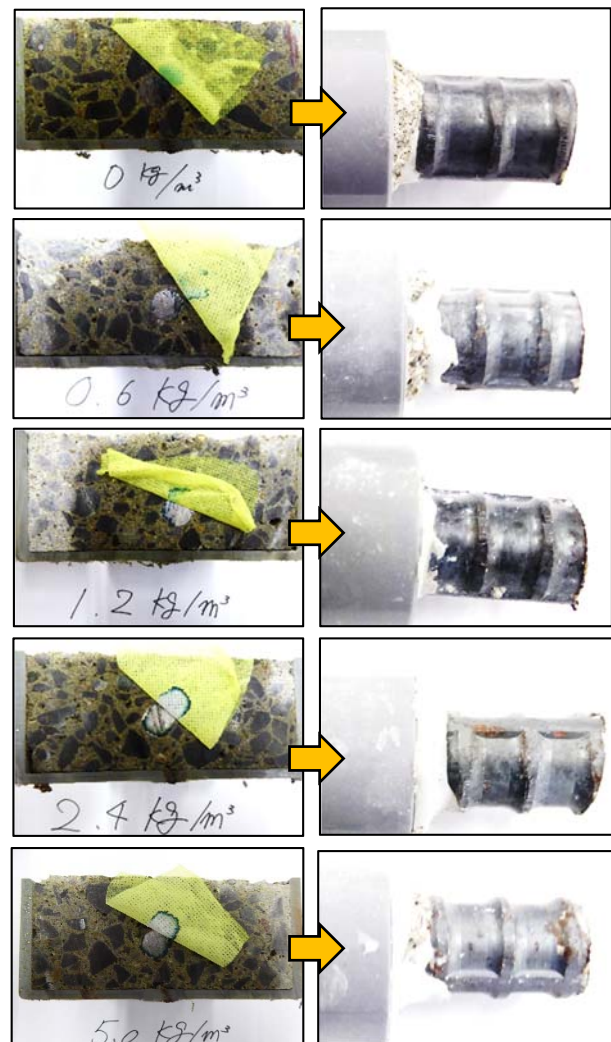


図-9 ヘキサシアノ鉄（Ⅲ）酸カリウム水溶液を用いた鉄筋周辺の腐食開始確認実験の結果

いる。凝視すれば、これらは鉄筋の周辺に現れているのではなく、鉄筋の切断面についていた傷の部分から現れていることがわかる。このあたりの識別には課題が残るところだが、 2.4 kg/m^3 、 5.0 kg/m^3 想定供試体では鉄筋周辺に青色の沈殿が現れていることを明確に確認できる。 1.2 kg/m^3 想定供試体にもそれを確認できるが、 2.4 kg/m^3 、 5.0 kg/m^3 想定供試体に比べると小規模である。すなわち、今回の実験では、 2.4 kg/m^3 、 5.0 kg/m^3 想定供試体では明らかな程度で、 1.2 kg/m^3 想定供試体では微妙な程度で、鉄筋周辺の腐食開始が確認されたといえる。

なお、図-9にて右側に示した写真は、実験後に各供試体より取り出した鉄筋の表面の様子である（実験には錆のない鉄筋を選んで用いた）。0、0.6、 1.2 kg/m^3 想定供試体中にあった鉄筋の表面には発錆は確認されず、 2.4 、 5.0 kg/m^3 想定供試体中にあった鉄筋の表面には若干の発錆が確認された。以上の結果から、ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を用いることで、コア切断面における鉄筋周辺の腐食開始を早く確実に確認できるようになること、すなわち、従来の実証実験が抱えてきた問題点を解決できる可能性を見出すことができたといえる。

4. まとめと今後の課題

既設コンクリート中の C_{lim} の設定方法として、鉄粉散布法とその実証実験について検討し、それぞれの改良を試みた。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 従来の鉄粉散布法では、鉄粉の発錆が遅く、安定しないことがあり、実験時間の長さ、結果の不安定さを招いてしまっていた。
- (2) 従来の実証実験でも、鉄筋周辺の発錆が遅く、安定しないことがあり、適切な結果が得られてこなかった。
- (3) (1)(2)の原因には、コア切断面上の高アルカリ環境下での鉄粉や鉄筋の発錆の確認しづらさと、同面上の水分状態の制御の難しさが関係していると考えた。
- (4) ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液を鉄粉や鉄筋周辺に噴霧することで、それらの不動態皮膜が破壊され、鉄イオンが溶解しはじめる様子を早く、確実に確認できることがわかった。
- (5) 同水溶液を鉄粉散布法や実証実験に利用することで、それぞれが抱えてきた問題点を解決できる可能性を見出すことができた。

今後の課題は、実証実験の結果を蓄積することである。図-10はその一例だが、ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液の噴霧により、コア左側から浸透した塩化物イオンにより鉄粉が腐食している様子と、鉄筋周辺が腐食している様子が確認できる。このような結果を蓄積し、本方法の実用化を目指していきたいと考えている。

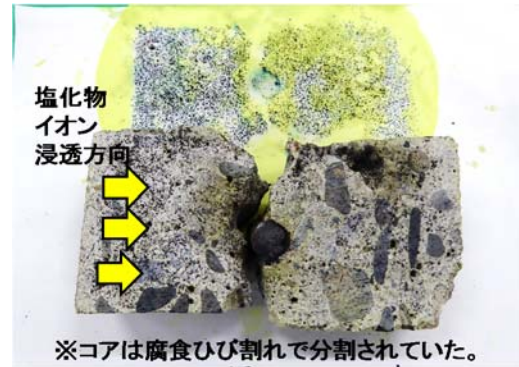


図-10 改良した実証実験の結果例

謝辞

本研究に用いた鉄粉はJFEスチール株式会社様に提供いただきました。また、一部の供試体は独立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター様に提供いただきました。深く感謝いたします。

本研究は、科学技術振興機構研究成果展開事業研究成果最適展開プログラム(A-STEP)(プロジェクトコード:0416)、日本学術振興会科学研究費助成(課題番号:26020444)の支援を受けて行われています。

参考文献

- 1) たとえば、堀口賢一、丸屋剛、武若耕司：腐食発生限界塩化物イオン濃度に及ぼすコンクリート配合の影響、コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1377-1382, 2007
- 2) 土木学会編：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2013.3
- 3) 土木学会編：2013年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], 2013.10
- 4) 青木優介、穴井啓太、高橋諒、菅原隆：鉄粉散布法を用いた既設コンクリート中の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度設定のための基礎的検討、コンクリート工学年次論文集, 第37巻, No.1, pp.1723-1728, 2015.7
- 5) 青木優介、澤本武博、嶋野慶次：硝酸銀溶液噴霧法による塩化物イオン浸透深さ測定におけるいくつかの経験的知見、コンクリート工学年次論文集, 第35巻, No.1, pp.1843-1848, 2013.7
- 6) 堀口賢一、丸屋剛、武若耕司：自然電位連続モニタリングによる発錆時期推定手法の検討と腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定、コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1007-1012, 2006
- 7) 腐食防食学会編：やさしい金属腐食の本(ダウンロード版)、および、その実験キット使用における注意事項, http://www.jcorr.or.jp/fushoku_kit/
- 8) 土木学会編：2012年制定コンクリート標準示方書改定資料[基本原則編・設計編・施工編], 2013.3