

報告 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

青木 優介^{*1}・穴井 啓太^{*2}・高橋 諒^{*2}・菅原 隆^{*3}

要旨：塩化物イオンが浸透しているコアを切断し、その切断面に鉄粉を散布し、それを適度な水分条件下におけば、切断面は鉄粉が発錆する領域と発錆しない領域に分かれる。両領域の境界がそのコンクリート中で塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達している位置に一致するとすれば、この境界上から採取した試料に含まれる塩化物イオン濃度を既設コンクリート中の鋼材腐食発生限界濃度に設定することができると考えられる。報告者らはこの方法の確立を目的としていくつかの検討を行ってきた。本報告では、その検討結果とともに、この方法を発想するに至った経緯や今後の課題について報告する。

キーワード：鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度、既設コンクリート、鉄粉散布法

1. はじめに

硬化コンクリート中の鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度（以降、 C_{lim} と称す）は、コンクリート構造物中への塩化物イオンの浸透による鋼材の腐食開始時期の予測結果を左右する重要な値である。2013 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕¹⁾では、 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。たとえば東田ら²⁾は凍結防止剤による塩害症状が見られる鉄筋コンクリート橋脚のかぶりコンクリートをはつり取り、鉄筋の腐食状態と鉄筋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を整理して、「調査した構造物や類似の構造物では C_{lim} を 2.4kg/m^3 として対策工法の検討を行うことが可能」と報告している。

既設コンクリート構造物中の C_{lim} の設定方法として、東田ら²⁾の方法は示方書¹⁾に忠実にもとづいた理想的方法だと考えられる。ただし難点として、①鋼材の腐食状態を確認するためのはつり作業が必要になる、②鋼材の腐食が開始した直後でなければ C_{lim} を設定できない、ということがある。また、同方法により設定される C_{lim} には、③酸素供給量の影響が含まれていることに注意が必要となる。山路ら³⁾はかぶりを変えて鉄筋を埋設したコンクリート供試体を 15 年間にわたって干満帯および海中に暴露した結果として、かぶりが深い場合や供試体を海中に置いた場合には鉄筋位置における塩化物イオン濃度が高くとも腐食していない鉄筋が目立つと報告している。その理由は、かぶりの増大やコンクリートの飽水率の増加により鉄筋への酸素供給量が減少するためだと考察している。このことをふまえると、鋼材の腐食状態

を確認する方法により設定された C_{lim} を同程度未満の酸素供給量となる鋼材について適用することは可能だと考えられるが、それ以上の酸素供給量となる鋼材について適用することは危険側の予測結果を生じさせる可能性があると考えられる。

次善の策として示方書¹⁾には、構造形式や環境条件が類似した構造物の点検結果から C_{lim} を設定する、または、セメント種類ごとに定められている水セメント比の関数式から C_{lim} を設定する方法が示されている。しかし、前者の場合には対象の構造物と類似の構造物との類似性の確認が、後者の場合には対象構造物のコンクリートの使用材料や配合の確認が必要とされる。既設コンクリート構造物の中にはこれらの確認が困難なものも少なくないと考えられる。

以上の背景から報告者らは、①構造物の鉄筋近傍から、②鉄筋の腐食状態にかかわらないタイミングで採取されたコアを用いて、③酸素供給量の影響を受けない（安全側になるように最大の酸素供給量が想定された） C_{lim} を設定できる方法を確立しようとしている。具体的には、コアをかぶり方向に平行に切断し、切断面に鉄粉を散布し、その発錆状況を目視することで、コア内部にて塩化物イオン濃度が C_{lim} に達している位置を特定する方法（以降、鉄粉散布法と称す）を確立しようとしている。そして、同方法にて C_{lim} に達していると特定された位置から試料を採取し、それに含まれる塩化物イオン濃度を測定し、その値を対象構造物の C_{lim} として設定することを考えている。ただし、鉄粉散布法ははまだ検討段階にある。本報告では今後の確立につなげるべく、同方法に関する現在までの検討結果とともに、発想の経緯や今後の課題について報告する。

*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科 博士（工学）（正会員）

*2 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科

*3 八戸工業高等専門学校 建設環境工学科 博士（工学）（正会員）

2. 鉄粉散布法の発想の経緯

2.1 鉄粉散布法とは

鉄粉散布法は、後述するように、硝酸銀溶液噴霧法を用いた既設コンクリート中の C_{lim} の設定に困難を感じた報告者が発想し、検討している方法である。現段階で想定している、鉄粉散布法を用いた既設コンクリート中の C_{lim} 設定までの流れを図-1 に示す。

まず、①対象構造物からコアを採取し、②これを乾式コンクリートカッターにてかぶり方向に平行に切断する。③切断面に残った細粉などをエアダスターなどで清掃したのち、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中に置く。④切断面に水膜が浮く状態になれば、切断面に均等に鉄粉を散布する。⑤再び密閉容器内に置いておき、1 日～数日後に鉄粉の発錆状況を目視する。⑥鉄粉の発錆境界（発錆している領域と発錆していない領域との境界）が確認できれば、その境界上をドリルで削孔して粉末試料を採取する。⑦粉末試料に含まれる塩化物イオン濃度を測定し、これを対象構造物のコンクリート中の C_{lim} と設定する。

すなわち、鉄粉散布法とは、コア切断面上において可溶性塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生条件に達している位置を、散布した鉄粉の発錆境界を目視することにより特定しようとする方法だといえる。ただし、この方法を実用レベルにまで引き上げるためには、①確実かつ短時間のうちに明瞭な鉄粉の発錆境界が現れるようにする、②現れた鉄粉の発錆境界が構造物中の鉄筋の腐食状態と一致することを確かめる、という検討課題をクリアしなければならない。

図-2 にある供試体の写真は、上記①②の検討課題が理想的にクリアされた状況を示している。この状況は、試行として、D16 鉄筋を含む形で採取されたコアを乾式カッターで鉄筋ごと切断し、2 つに別れた切断片をそれぞれ水位の異なる（左の切断片：鉄筋下縁より 40mm 下までの水位、右の切断片：鉄筋下縁より 20mm 下までの水位）濃度 10% の塩水中に浸漬させ、24 時間が経過したのちに、鉄粉散布法に供したものである。

両切断片ともに鉄粉の発錆境界が明瞭に現れている。そして、その発錆境界が鉄筋の腐食開始と一致している。すなわち、発錆境界が鉄筋位置に達していない左の切断片では鉄筋周辺に発錆が見られない。一方、発錆境界が鉄筋位置に達している右の切断片では鉄筋周辺に発錆が見てとれる。これと同様の状況が、長年、塩害環境下に曝されていた既設コンクリートから採取されたコアにおいても確実に現れるのであれば、鉄粉の発錆境界上から採取した試料中に含まれる塩化物イオン濃度を既設コンクリート中の C_{lim} として設定することに合理性が認められると考えられる。

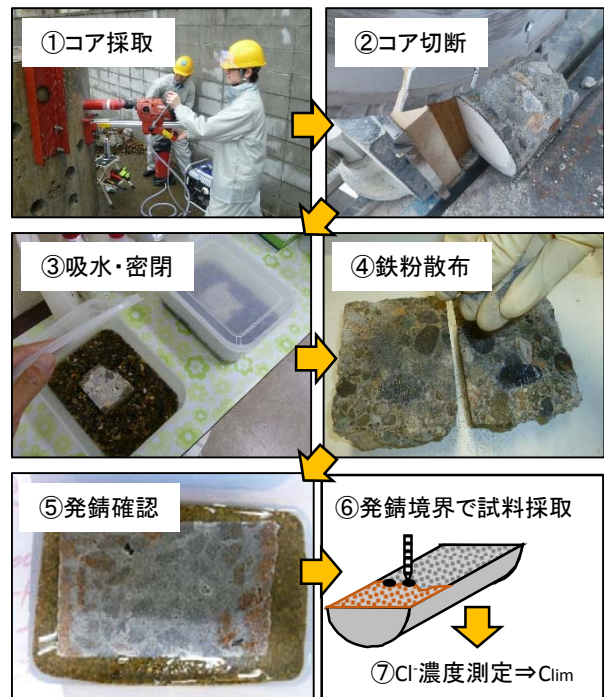


図-1 鉄粉散布法を用いた C_{lim} 設定までの流れ

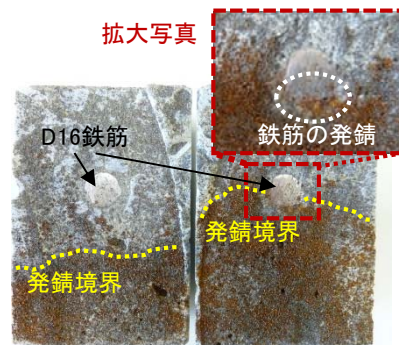


図-2 鉄粉散布法の理想的な結果例

2.2 発想の経緯

報告者は、既設コンクリート中の C_{lim} の設定方法としては、示方書¹⁾に記される方法が理想的だと考えている。ただし、前章でも述べたように、①鋼材のはつり出しが必要になる、②実施のタイミングが難しい、③ C_{lim} に酸素供給量の影響が含まれる、ことが問題になる場面も少なくないと考えられる。ここではこれら①②③の問題を解決する観点から鉄粉散布法を発想するに至った経緯を説明する。

まず、①鋼材のはつり出しを行わない方法を考えた。できれば他の作業も行わないことが望ましいが、 C_{lim} がコンクリートの使用材料や配合によって変化することが明らかにされている以上⁴⁾、対象構造物からコアなどの試料を採取することは避けがたいと考えた。ここでは、鉄筋を避けてコアを採取し、 C_{lim} 設定の試料とすることにした。なおこの場合、対象構造物の鋼材の腐食状態は確認されていないため、コア内部にて C_{lim} の条件に一致している位置を特定する方法が必要となる。

②に挙げた実施のタイミングの問題は、①の問題が解決されれば自動的に解決されると考えた。つまり、コア内部にて C_{lim} の条件に一致している位置を特定する方法を確立できれば、対象構造物のコンクリート内にいくらか塩分が浸透している状況であれば、鋼材の腐食状態にかかわらず、自由なタイミングで C_{lim} を設定することができると考えた。

③に挙げた酸素供給量の影響による問題については、以下に記した 2.3 節、2.4 節の中で説明する。

2.3 硝酸銀溶液噴霧法を用いる方法

当初、①の問題を解決できる方法、つまり、鉄筋を避けて採取したコアの内部にて C_{lim} の条件に一致している位置を特定する方法として、硝酸銀溶液噴霧法を用いることを考えた。

塩害環境下にある構造物から採取されたコアの切断面に 0.1mol/l 硝酸銀溶液を噴霧したあとの様子を図-3に示す。塩化物イオンが浸透しているコンクリートの表面に硝酸銀溶液を噴霧すると、細孔溶液中の塩化物イオンと水酸化イオンの比がある値以上の領域ではほぼ全量が塩化銀で構成される白色沈殿が生成され、それ未満の領域ではこれに酸化銀が混じる褐色沈殿が生成される⁵⁾。双方の領域には明瞭な境界（以降、変色境界と称す）が認められることが多く、このことを利用して、同方法はコンクリート内への塩化物イオン浸透深さ測定に用いられることがある。

ここで、Otsuki ら⁶⁾ は同方法により生じる変色境界上のセメント硬化体には、おおむねセメント質量の 0.15% に相当する可溶性塩化物イオン量が含まれており、この値は偶然にも ACI が提唱する C_{lim} に一致すると報告している。また、モルタルに丸鋼を埋め込んだ供試体を塩水に浸漬し、丸鋼の自然電位と分極抵抗を測定した結果、丸鋼の不動態皮膜は褐色沈殿域ではほぼ存在し、白色沈殿域では 50%程度存在することから、硝酸銀溶液噴霧法により不動態皮膜が消失した領域を安全側に判定できると報告している。

このことをふまれば、既設コンクリート中の C_{lim} を設定する方法として硝酸銀溶液噴霧法の適用を考えることは自然なことだと考えられる。すなわち、構造物からコアを採取し、それをかぶり方向に平行に切断あるいは割裂し、その表面に硝酸銀溶液を噴霧すれば変色境界が現れる。変色境界上から試料を採取し、それに含まれる塩化物イオン濃度を C_{lim} と設定すればよいことになる。加えて同方法は、比較的容易に実施でき、結果も即座に得られ、見た目にわかりやすいという利点を持っている。なお、前節③に挙げた酸素供給量の影響の問題に対して、同方法の結果はそもそも酸素供給量に影響されないため不問となる。

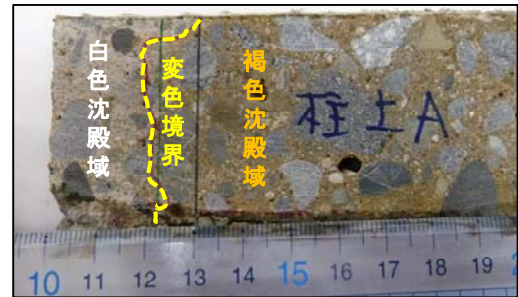


図-3 コア切断面に硝酸銀溶液を噴霧した例

そこで報告者らは、硝酸銀溶液噴霧法で現れる変色境界上の塩化物イオン濃度と C_{lim} との関係を調べることにした。詳細については既報⁷⁾に述べるが、変色境界が現れる位置はコンクリート中の含水状態や硝酸銀溶液の噴霧量などにも左右される⁵⁾とのことから、変色境界上の塩化物イオン濃度が C_{lim} に一致することを確認することは現段階では難しいと判断した。つまり、硝酸銀溶液噴霧法による C_{lim} の設定は現段階では難しいと判断した。

2.4 鉄粉散布法の発想

コア内部にて C_{lim} の条件に一致している位置を特定する方法として、硝酸銀溶液噴霧法を採用することは見送ることとした。ただし、同方法がもつ容易さ、結果のわかりやすさ、などの利点は重要と考えた。同方法にとって最大の問題は変色境界上の条件が C_{lim} に一致することに信頼が得られにくい点にあった。同方法の利点を失うことなく変色境界上の条件を C_{lim} に一致させることができる方法はないものかと発想したのが、2.1 節で説明した鉄粉散布法である。

作業としては硝酸銀溶液の噴霧が鉄粉の散布に代わるだけであり、容易さは失われない。鉄粉の発錆境界が現れるまでに 1 日～数日を要するため、結果を得るまでの早さは劣るが、それが結果の安定性を生んでいる一面もある（硝酸銀溶液噴霧法では変色境界が数分で移動することもある⁷⁾）。結果のわかりやすさは同等といえる。

本方法の最大の利点は鉄粉の発錆境界上の条件が C_{lim} に一致することに信頼が得られやすい点にあると考えられる。無論、それが真であるかを検証することが今後の最大の課題であるが、硝酸銀溶液噴霧法で現れる変色境界が細孔溶液中の塩化物イオンと銀イオンとの反応の結果であることに対し、鉄粉散布法で現れる鉄粉の発錆境界は塩化物イオンにより鉄が腐食した結果であることの意味は小さくないと考えられる。

なお、前々節の③に挙げた酸素供給量の影響の問題に対して、本方法では切断面に散布された鉄粉には最大の酸素供給量が与えられることから、酸素供給量の影響を考慮できなくなる。ただし、設定される C_{lim} は酸素供給量の面からは最大限に安全側の値となると考えられる⁴⁾。

3. 鉄粉散布法を用いた C_{lim} 設定のための基礎的検討

3.1 具体的な実施の流れ

鉄粉散布法を用いた既設コンクリート中の C_{lim} 設定の流れは図-1 に示したとおりである。以降、各作業段階について検討した結果を説明する。

3.2 コアの採取について

当初は既設コンクリートにドリルであけた孔の内面で鉄粉散布法を行うことを考えていた。そうすることで、試験条件を可能な限り現実近づけられると考えていた。また、おそらく同時に塩化物イオン分布の測定がなされることから、その試料を採取するためにドリルであけられる孔を利用できると考えていた。

しかし、実際の構造物調査の場面を考えると、ドリルであけた孔の内面を確認するために数日後に再び現場を訪れることや、そのために足場を残しておくことなどは難しいと考えられた。よって、構造物からコアを採取しそれを持ち帰って鉄粉散布法に供することにした。

3.3 コア側面での実施について

採取したコアの側面で鉄粉散布法を実施できるなら、その後、同コアから塩化物イオン分布測定の試料を採取しやすくなるなど、便利だと考えられる。

しかし、湿式法で採取されたコア側面の塩化物イオン分布は乱れやすいと、硝酸銀溶液噴霧法での検討結果⁷⁾からも懸念された。よって、コア側面での実施は断念し、コア断面での実施を基本とすることにした。

3.4 コア断面のつくり方について

コア断面のつくり方には、割裂と乾式カッターでの切断とが考えられる。乾式カッターでの切断では切断時に生じる刃とコアとの摩擦熱により切断面が急激に乾燥してしまう。コア断面のつくり方としては割裂を採用するほうが望ましいと考えていた。

しかし、実際にコアを割裂しようとする、採取時に生じた側面の凹凸のためスムーズに割裂できないことがあった。また、割裂面の凹凸により散布した鉄粉の量に偏りが生じたり、(吸水された)水が凹部にたまったりすることがあった。これらのことから、乾式カッターでの切断面でも割裂面と同じ結果が得られるのであれば、コア断面のつくり方としては乾式カッターでの切断を採用する方がよいと考えるようになった。

図-4にあるのは、水セメント比 50% のモルタル円柱供試体の側面から塩水を浸透させ、これを横倒しにして、深さの半分まで乾式カッターで切断し、残り半分を割裂して生成した断面で鉄筋散布法を実施した結果である。双方の領域で発錆境界は連続している。すなわち、乾式カッターでの切断面でも割裂面と同じ結果が得られるといえる。よって現段階では、コア断面のつくり方として乾式カッターによる切断を採用することにした。

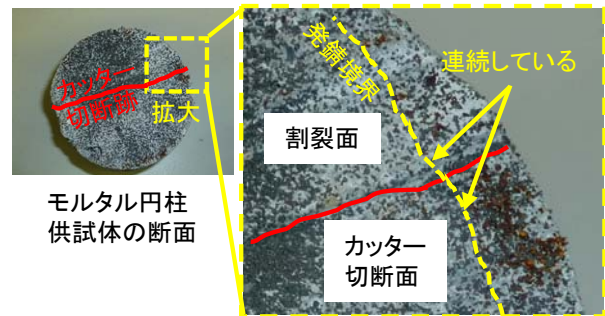


図-4 割裂面と乾式カッター切断面での結果の比較

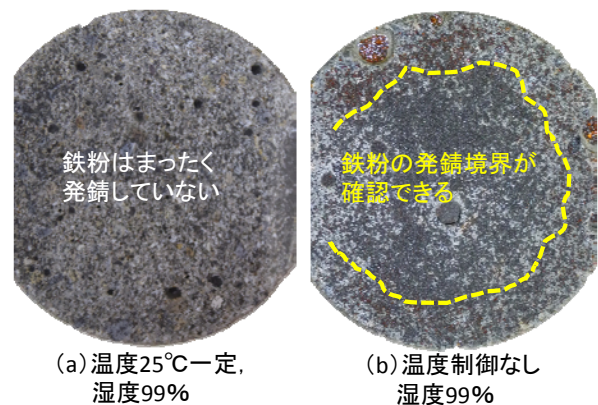


図-5 切断面の水分状態による鉄粉の発錆の違い

3.5 供試体への吸水について

コア断面に散布した鉄粉が発錆するには、コア内から供給される塩化物イオンを含む溶液により不動態皮膜が破壊され、そこに酸素が供給される必要がある。ここで、鉄粉への酸素供給量は問題ないと考えられるが、コア内から鉄粉に塩化物イオンを含む溶液を適度に供給させることが難しい。以下にここまでの検討結果を報告するが現在もこの方法は明確に定まっていない。

まず、図-5(a)に示すのは図-4 に示したものと同一モルタル供試体を乾式カッターで切断し、切断面にやや水が浮く程度で蒸留水を噴霧し、それが浸み込んだ後に鉄粉を散布し、その後、温度 $25 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 99% の密閉空間に入れておき、48 時間が経過した後の状況である。散布された鉄粉にはまったく発錆がみられない。このとき切断面に指で触れると、わずかに湿気を感じる程度であった。

一方、報告者らが別室で行った同じ供試体を用いた実験では、図-5(b)のように鉄粉が発錆し、発錆境界が確認される結果となった。この違いについて考えたところ、別室では温度制御がなされていなかったため深夜や早朝の低温時に切断面に結露が生じ、それが鉄粉への塩化物イオンの供給を促したのと考えられた。このことから鉄粉を発錆させるためには、切断面にいくらか液状水がある状態を保持する必要があると考えた。

無論、この役割を温度変化により生じる結露に期待することはできない。また、温度変化の大きさから大量の結露が生じ、切断面に多量の水が浮いていた供試体では、鉄粉の配置が乱れると同時に、鉄粉周辺の塩化物イオン濃度が薄められたのか、鉄粉が発錆しないという結果が多く確認された。このことから加湿器などを用いることも難しいと考えた。

以上をふまえて、現段階では図-1中に示したように、周辺の温度を一定とし、コア切断片の底面側（切断前のコア側面）から吸水させて、切断面に水膜が浮く程度の水分状態を保持できるようにしている。さらに効率的な方法について今後も検討していく。

3.6 鉄粉の種類について

国内で製造・販売されている鉄粉には、ミルスケールを還元して製造される還元鉄粉と、溶鋼を水でアトマイズして製造されるアトマイズ鉄粉とがある⁸⁾。図-6に示すのは、双方の鉄粉に蒸留水、水道水、塩水を噴霧し、そのまま室内に置いた24時間後の様子である。

両鉄粉ともに発錆しているが、還元鉄粉の方が発錆が早いことがわかる。鉄粉メーカーの担当者によれば両鉄粉の成分に大きな違いはないが、製造工程上、還元鉄粉の方がアトマイズ鉄粉に比べて組織が粗く、比表面積が大きくなる。また、アトマイズ鉄粉ではアトマイズ時に水が噴霧されるが、その際表面が急激に酸化し、それが以降の酸化を防ぐように働くとのことである。図-6で見られる発錆早さの違いは、このことに起因していると考えられる。現段階では結果の早期判定を狙うために、散布する鉄粉として還元鉄粉を用いることにした。

3.7 断面のpH低下について

現段階の方法では、コアを切断してから切断片に吸水させる時間として1日程度を見込んでいる。また、鉄粉を散布してから発錆境界が現れるまでの時間として1日～数日程度を見込んでいる。つまり、発錆境界が確定されるまでにコア切断面は、密閉された高湿度の空間内とはいえ、数日間空气中に曝される。この間、切断面のpHが低下することは避けられないと考えられる。

問題はその低下程度である。コンクリート中の溶液中の塩化物イオンと水酸化イオンの比が鋼材の腐食発生に影響することは明らかにされている⁹⁾。切断面のpHが無視できない程度まで低下するのであれば本方法は確実に失敗する。そこで、密閉された高湿度の空間内でコア切断面のpHがどの程度低下するのかを確かめることにした。普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比50%のコンクリートから採取したコアを乾式カッターで切断し、2つに分かれた切断片の切断面にpH指示薬を塗りつけ、1つは鉄粉散布法と同様にコア底面側から吸水させる形で密閉容器内に置き、残る1つは同様に吸水さ

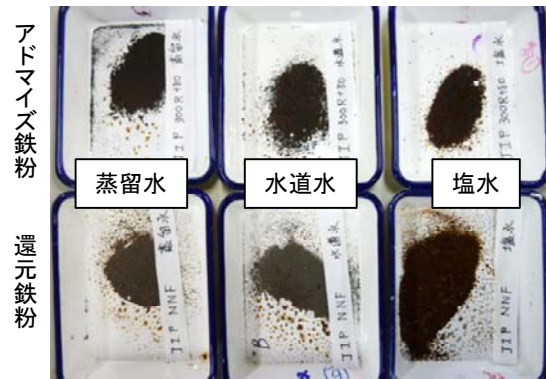


図-6 鉄粉種類の違いによる発錆早さの違い



図-7 高湿度・密閉空間内でのpH低下測定結果

せながら容器のふたをはずして切断面を空气中に曝した。両切断面の24時間後の様子を図-7に示す。

当初13を越えていたと目される切断面のpHは、空气中に曝したものでは7～10程度まで低下していたが、密閉容器内にあったものではほとんど低下していなかった。無論、一切低下していないわけではないと考えられるが、低下程度が軽微であり、結果的に鉄粉の発錆境界が既設コンクリート中での鋼材の腐食開始と一致するのであれば、実用上の問題にはならないと考えた。

3.8 試験中の温度について

他の条件が同等であるなら鋼材の腐食は温度が高くなるほど早くなると考えられる。また、コンクリート中の塩化物イオンの溶解も温度が高くなるほど盛んになると考えられる。つまり、本方法にて早く、かつ、安全側の結果をもとめたいのであれば、試験中の温度を高くすることが考えられる。

ただし、報告者は鉄粉散布法における試験温度を50℃としたところ、供試体を吸水・密閉状態にしたにもかかわらず切断面が乾いていたことや、逆に切断面に多量の水が噴出していたことなどを経験した。これらの現象はもともとのコアの含水状態やコアの吸水しやすさによるものと考えている。本方法の難点は切断面の水分状態の制御にある。それを難しくする試験温度の大きな変動は現段階では望ましくないと考えている。

3.9 試験時間について

図-8にあるのは、鉄粉散布法に供したある供試体の27時間後および67時間後の様子である。経験上、1日後の段階で認められる鉄粉の発錆境界は、その後、時間の経過にともない明瞭になるものの、その位置は1日後の段階と変わらないと感じられる。発錆境界に特段の明瞭さを求めないのであれば、(鉄粉散布からの)試験時間を1日程度に設定できる可能性がある。

4. 鉄粉散布法を用いた C_{lim} 設定のための課題

4.1 試験方法の確立

第一の課題は試験方法の確立である。特にコア切断面の水分状態の制御方法と試験時間の設定に検討の必要があると考えている。

4.2 実用性の検証

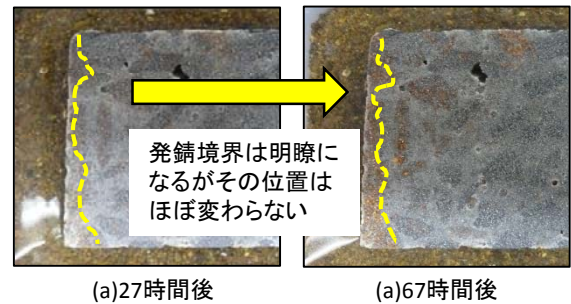
第二の課題は実用性の検証である。コアの切断面に散布された鉄粉が腐食する状況は、そもそも、既設コンクリート中で鉄筋が腐食する状況とは多くの面で異なる。鉄粉散布法は、その異なりがあったとしても、コア切断面に散布した鉄粉に表れる発錆境界が既設コンクリート中の鉄筋の腐食開始と一致することを期待するという、楽観的な考えから発想されている。

よって、重要となるのはその実用性を証明することである。具体的には、図-2にあるように、鉄粉の発錆境界と鉄筋の腐食開始とが一致するという試験結果が、塩害環境に曝されていた既設コンクリートから採取されたコアにおいて確実に得られるということを、多数の実験により証明する必要があると考えている。

5. まとめ

本研究では、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について検討してきた。ここまでに得られた検討結果を以下にまとめる。

- (1) 既設コンクリートからコアを採取し、それを乾式カッターで切断した切断面において同方法を実施する。
- (2) コア切断面に散布した鉄粉が発錆するためには、切断面を水膜が浮く水分状態に保つ必要がある。
- (3) 散布する鉄粉には、還元鉄粉を用いる。
- (4) 高湿度の密閉容器中に置かれたコア切断面の pH は、24時間程度ではほとんど低下しない。
- (5) 試験温度の変動は、コア切断面の水分状態の制御を難しくする。
- (6) 鉄粉散布から1日後に確認される鉄粉の発錆境界は時間の経過にともない明瞭になるものの、その位置は変わらないことが多いと感じられる。
- (7) 今後の課題として、試験方法の確立および実用性の検証が挙げられる。



※発錆境界より内側で発錆している鉄粉は、下方からアルカリ分が供給されない粗骨材上のもの。

図-8 27時間後と67時間後の発錆境界の比較

謝辞

本研究に用いた鉄粉はJFEスチール株式会社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支援プログラム(A-STEP)(プロジェクトコード:0416)、および、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) 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
- 2) 東田，細矢，川口：塩害による鉄筋の腐食グレードと塩化物イオンの関係について，土木学会第65回年次学術講演会講演概要集，65巻，pp.127-128，2010.9
- 3) 山路，横田，中野，濱田：実構造物調査および長期暴露試験結果に基づいた港湾RC構造物における鉄筋腐食照査手法に関する検討，土木学会論文集E，Vol.64，No.2，pp.335-347，2008.5
- 4) 土木学会編：2012年制定コンクリート標準示方書改訂資料，コンクリートライブラリー138，2013.3
- 5) Fuqiang He. et al.: AgNO₃-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete, Construction and Building Materials, Vol.26, pp.1-8
- 6) N.Otsuki, et.al.: Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementitious matrix materials, ACI Materials Journal, No.84, pp.587-592, Nov.1992
- 7) 青木，澤本，嶋野：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
- 8) <http://www.jfe-steel.co.jp/products/tetpun/>
- 9) 細川，森，山田，大竹：コンクリート中における塩化物イオンの鋼材発錆限界濃度の表記に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.909-914，2004.7