

論文 硝酸銀溶液の噴霧によって現われる変色境界と鋼材の腐食との関係

青木 優介^{*1}・森本 健太^{*2}・澤本 武博^{*3}

要旨：硝酸銀溶液の噴霧によって現われる変色境界と鋼材の腐食との関係を明らかにすることを目的として、実験的検討を行った。棒鋼を埋設したモルタル供試体の外部から塩水を供給し、棒鋼が腐食した直後に硝酸銀溶液を噴霧して、変色境界と棒鋼表面の位置関係を確認した。また、変色境界位置の全塩化物イオン量を測定した。その結果、変色境界が鋼材表面を3mm～7mm程度通りすぎたところで鋼材の腐食が開始されること、変色境界位置の全塩化物イオン量は鋼材腐食発生限界量と同程度かやや小さい量となることがわかった。ただし、これらの関係は常時塩水に浸漬されていたようなコンクリートにおいてのみ通用すると考えられた。

キーワード：硝酸銀溶液、塩化物イオン、鋼材の腐食、鋼材腐食発生限界塩化物イオン量

1. はじめに

外部からコンクリート内部に侵入した塩化物イオンの浸透状況を視覚的に確認する方法として、コンクリートの断面に硝酸銀溶液を噴霧する方法がある¹⁾。

対象となるコンクリートの断面に硝酸銀溶液を噴霧すると、直後から数分のうちに、断面は図-1のように白色に呈色する領域と褐色に呈色する領域とに分かれる。このうち、白色に呈色する領域には、硝酸銀溶液中の銀イオンとコンクリートの細孔溶液中の塩化物イオンとの結合によって生じた塩化銀沈殿が発現している。同沈殿の発現量は細孔溶液中に到達した銀イオン量に依存するため、白色の領域と褐色の領域の境界（以下、変色境界と称す）は、上述の銀イオン量に応じた、一定量以上の塩化物イオンが存在する領域の限界を示しているといえる²⁾。すなわち同方法は、容易に、短時間で、一定量の塩化物イオンが浸透している深さについて視覚的な結果を得ることができる方法だといえる。

このような同方法だが、その利用実態は試験方法として酷似する中性化深さ測定方法に比べても低調であると思われる。その原因は、試験方法として規格化されていないこともあるが、何より、硝酸銀溶液の噴霧によって現われる変色境界と鋼材の腐食との関係が明確になっていないことにあると考えられる。

本研究の目的は、構造物の塩害調査やコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性の評価の場面において硝酸銀溶液を噴霧する方法の利用価値が高まるよう、上述の関係を明らかにすることである。本論文では、まず、上述の関係に関する既往の知見を整理し、上述の関係について具体的な仮説を立てる。続けて、仮説の妥当性を検証するために行った実験とその結果について紹介し、上述の関係についての現段階での見解を示す。

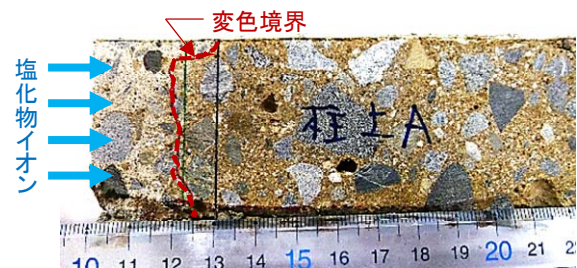


図-1 硝酸銀溶液を噴霧した断面の例

2. 変色境界と鋼材の腐食との関係に関する既往の知見

2.1 直接的関係と間接的関係の区別

本論文では、変色境界と鋼材の腐食との関係を直接的関係と間接的関係に区別して考える。前者は目視で確認される位置関係にもとづく関係である。たとえば、「変色境界が鋼材表面に達した時点で、鋼材の腐食が開始する」といった関係がこれに該当する。一方、後者はコンクリート中の鋼材腐食発生限界塩化物イオン量（以降、 C_{lim} と称す）が介在する関係である。たとえば、「変色境界位置のコンクリート中に含まれる塩化物イオン量が C_{lim} に一致する」といった関係がこれに該当する。以下、直接的関係、間接的関係に関する既往の知見について、著者らが知りえるところを述べる。

2.2 直接的関係

直接的関係に関する既往の知見として、著者らが知りえる例は次の2件に留まる。Otsuki ら¹⁾は、水セメント比（以下、 W/C と表す）を40%、50%、60%の3水準に設定したモルタルの中心に丸鋼を埋め込んだ円柱供試体を作製し、それらを塩水に浸漬したのち、断面に0.1mol/L硝酸銀溶液を噴霧して、現われる変色境界の深さと丸鋼の自然電位との関係を測定した。その結果、白色に呈色した領域内に位置する丸鋼の不動態皮膜は、約50%の確

*1 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科教授（正会員）

*2 木更津工業高等専門学校 専攻科環境建設工学専攻

*3 ものつくり大学 技能工芸学部建設学科教授（正会員）

率で失われていたと報じている。Schoeppel ら³⁾は、断面に紫外線を照射することで白色に呈色した領域を検出しやすくなると提案する論文の中で、白色に呈色した領域に接していた鋼材は腐食していたと報じている。

2.3 間接的關係

間接的關係に関する既往の知見は、数多く存在する。He ら⁴⁾は、それらの知見を取りまとめたレビューの中で、変色境界位置での塩化物イオン量と C_{lim} との関係について論じている。そのうち全塩化物イオン量と C_{lim} との関係に着目すると、0.1mol/L の硝酸銀溶液を噴霧した場合、変色境界位置のコンクリート中に含まれる全塩化物イオン量はセメント質量に対して 0.28%~1.69%の割合となる。一方、Building Research Establishment が C_{lim} として報じている値は、上記の割合が 0.4%未満なら低リスク、0.4%~1.0%なら中リスク、1.0%超なら高リスクというものであり、両値は概ね重なり合うとのことである。

また、上記の 0.28%~1.69%という値を単位セメント量 300kg/m^3 のコンクリートでの値に換算すれば、変色境界位置での全塩化物イオン量は $0.84\text{kg/m}^3 \sim 5.07\text{kg/m}^3$ となる。堀口ら⁵⁾は、実測されたコンクリートの C_{lim} の平均値は、全塩化物イオン量として W/C45%では 3.74kg/m^3 、W/C55%では 3.37kg/m^3 、W/C65%では 2.29kg/m^3 であったと報じている。このことから、変色境界位置での全塩化物イオン量は実測されるコンクリートの C_{lim} と同程度になる可能性があるといえる。

2.4 変色境界と鋼材の腐食との関係についての仮説

以上の知見をもとに、変色境界と鋼材の腐食との関係について次のような仮説を立てる。直接的関係でいえば、変色境界が鋼材表面に達した時点か、変色境界が鋼材表面を少し通り過ぎたところで鋼材の腐食が開始される。間接的關係でいえば、変色境界位置のコンクリート中に含まれる全塩化物イオン量は実際のコンクリートの C_{lim} と同程度か、それよりも若干小さい量である、とする。

2.5 仮説の検証を進めるにあたっての留意点

次章以降、上記仮説に関する検証実験を進めていくが、留意しておくべき点がある。それは、硝酸銀溶液を噴霧する手順や条件が違えば、結果が容易に変動するという点である。He ら⁴⁾は、変色境界位置の塩化物イオン量(同時に変色境界が現われる位置)はコンクリートのアルカリ性、細孔溶液量、硝酸銀溶液の濃度および噴霧量などの違いによって変動すると指摘している。著者ら⁶⁾は、硝酸銀溶液を噴霧してから変色境界の位置を特定するまでの時間の違いも変動要因となると指摘している。つまり、変色境界の位置や同位置での塩化物イオン量を安定させ、直接的関係および間接的關係の検証を進めるためには、硝酸銀溶液を噴霧する方法の手順や条件を可能な限り標準化しておくことが重要といえる。

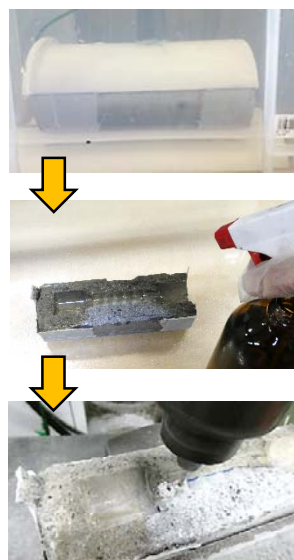


図-2 実験の流れの概要

この点について、著者らは、2017年4月に一般社団法人日本非破壊検査協会標準化委員会 RC 専門別委員会のもとに設置された「NDIS 3437 硝酸銀溶液の噴霧による硬化コンクリートの塩化物イオン浸透深さ試験方法原案作成準備 WG (委員長：澤本武博)」に参加し、同試験方法の規格化に向けた協議を重ねてきた。本研究で採用する手順や条件は、2018年12月段階において上記 WG 内で作成されている同規格の原案にもとづくものである。無論、現段階では原案に過ぎず、今後変更が加えられる可能性も残されている。また、同試験方法は1970年代に欧州で開発されて以来、多くの研究者らによって検討されてきており⁴⁾、今後規格化に至ったとしても、それが絶対的な試験方法となる確証はない。つまり、本研究で採用した手順や条件も現段階では標準化されたもののだと言い切れない。以降に示す検証実験の結果を確認するにあたっては、以上ことへの留意が必要となる。

3. 変色境界と鋼材の腐食との関係に関する検証実験

3.1 実験の流れ

2.4節で立てた仮説の妥当性を検証するために、以下の流れに沿った実験を行う。モルタル供試体の外部から塩水を供給し、内部に埋設した鋼材の腐食が開始した直後に供試体の断面に硝酸銀溶液を噴霧し、変色境界と鋼材表面との位置関係を目視で確認する。そして、変色境界上から試料を採取し、それに含まれる全塩化物イオン量を測定して C_{lim} と比較する。以上の流れの概要を図-2に示す。なお、供試体にモルタルを用いた理由は変色境界と鋼材表面との位置関係を確認しやすくすること、また、変色境界位置の全塩化物イオン量の測定結果におよぼす粗骨材の存在の影響を除去することにある。

3.2 供試体の詳細

本実験では、モルタル供試体の内部に埋設した鋼材の腐食開始時点を正確に特定する必要がある。これを実現する実験方法として、著者らは堀口ら⁵⁾が提案する鋼材の自然電位連続計測方法に倣うこととした。同方法は、コンクリート角柱供試体の上面に設置した塩分供給セルから塩水を供給する一方で、内部に埋設した棒鋼の自然電位を連続的に計測し、その自然電位が急落した時点で棒鋼の腐食が開始したと判定する方法である。同方法で得られた C_{lim} の測定結果は、現行の土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に規定される C_{lim} の根拠ともなっており、鋼材の腐食開始を判定する方法として信頼性の高い方法であると考えた。

ただし、この方法では供試体を数ヶ月から数年程度にわたり静置しておく必要が生じる。著者らは実験場所の都合上、供試体を小型化したいと考えた。また、棒鋼の周囲に滞留するブリーディングの影響を避けるためには、型枠内部に棒鋼を直立させ、モルタルを縦方向に打ち込む必要がある。この際、型枠に使い捨てタイプの圧縮強度試験用型枠を利用できれば便利だと考えた。さらに、供試体の上方から塩水を供給する際、塩分供給セルと供試体上面との隙間から塩水が漏れ出ることを懸念し、供試体の下方から塩水を供給する形を採りたいと考えた。以上の意図から採用した型枠が図-3 に示すものである。予備実験にて、同型枠で作製した供試体でも堀口ら⁵⁾と同様の自然電位計測結果が得られることを確認した。

3.3 モルタルの配合および使用材料、供試体の本数

本実験では、W/C を 45%、55%、65% の 3 水準に設定したモルタルで供試体を作製した。各モルタルの配合および使用材料を表-1 に示す。表中の空気量は実測値である。なお、供試体の本数は配合ごとに 3 本とした。供試体の呼称も表-1 にあわせて示す。

3.4 練混ぜ、打込み、養生

各モルタルは、容量 20 リットルの強制練りミキサで練り混ぜた。練混ぜ後、1 時間～2 時間ほど静置と練返しを繰り返し、ブリーディングが収束したところを見計らって、図-3 に示す型枠内に打ち込んだ。

打込み後、型枠上面にビニルラップを被せて、室温 $20 \pm 1.0^\circ\text{C}$ の室内に 24 時間静置した。静置後、型枠の片側（電極挿入口がない側）のみを取り外し、露出した供試体表面を水道水に浸漬する形として、材齢 28 日まで同室内で養生した。養生後、塩水に接する区間を限定させるため、両端から 50mm の区間をエポキシ樹脂で被覆した。この状態で 7 日間、室温 $20^\circ\text{C} \pm 1.0^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5.0\%$ の室内に静置した。その後、供試体を室温 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ の室内に置いたポリプロピレン製容器の中に移し、下面側を水道水に接する形にして、さらに 5 日間静置した。

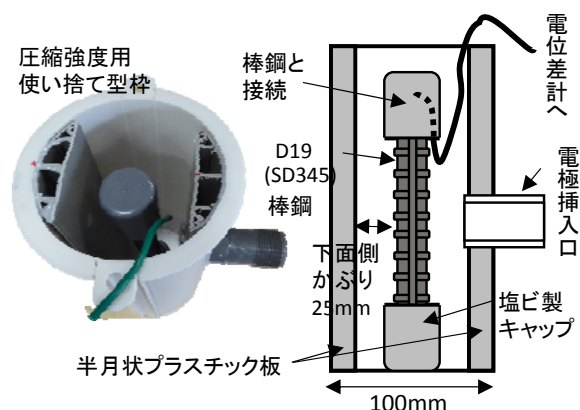


図-3 本実験で用いた型枠の外観とその断面図

表-1 モルタルの配合および使用材料と供試体の呼称

W/C (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	Ad.1	Ad.2
45	7.6	255	567	1277	1.77	0.0284
55	6.5	260	472	1399	1.48	0.0236
65	8.0	263	404	1385	1.26	0.0202
W 上水道水						
C 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm^3)						
S 君津産山砂 (表乾密度 2.63g/cm^3 , 粗粒率 2.31)						
Ad.1 リグニンスルホン酸系 AE 減水剤						
Ad.2 アルキルエーテル系 AE 剤						
供試体の呼称 (各3本)	W/C45% ⇒	WC45-A, WC45-B, WC45-C				
	W/C55% ⇒	WC55-A, WC55-B, WC55-C				
	W/C65% ⇒	WC65-A, WC65-B, WC65-C				

3.5 鋼材の自然電位連続計測

以上の作業を終えたあと、水道水を 10% 塩化ナトリウム水溶液に置換する形で供試体下面側からの塩水供給を開始した。その状況については、図-2①の写真を参照されたい。同時に、供試体上面側の電極挿入口から先端に導電性グリースを塗布した鉛照合電極を挿入し、電位差計と計測用パソコンを用いて、各供試体に埋設した棒鋼の自然電位の連続計測を開始した。計測時間の間隔は 30 分とした。計測時の状況を図-4 に示す。

3.6 鋼材の腐食の確認

各供試体の棒鋼の自然電極が急落したことを確認したのち、供試体を割裂し、埋設していた棒鋼を取り出して、表面の発錆状態を目視で確認した。

3.7 硝酸銀溶液の噴霧および位置関係の確認

棒鋼を取り出したあとの供試体の断面をエアダスタで清掃し、直ちに、同断面に 0.1mol/L 硝酸銀溶液を表面に溶液がやや浮くぐらいの量で噴霧した。その際の状況については図-2②の写真を参照されたい。噴霧後は供試体を静置しておき、噴霧から 60 分後に変色境界の位置が確定したとして、変色境界と棒鋼表面との位置関係を目視で確認した。

3.8 変色境界位置の塩化物イオン濃度の測定

確定された変色境界上を直径 3mm のコンクリートドリルで削孔して、塩化物イオン濃度測定用の粉末試料を採取した。この際の状況については図-2③の写真を参照されたい。採取した粉末試料を JIS A 1154 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法のうち、塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法に供して、試料中に含まれる全塩化物イオン濃度を測定した。

なお、硝酸銀溶液が噴霧された表面の付近では、細孔溶液中に溶解していた塩化物イオンが塩化銀沈殿として固結しているため、そこから採取した試料を用いて塩化物イオン濃度の測定を行うと測定値が低くなる可能性がある。そこで、表面から 5mm の深さまでドリルで削孔したところで一度粉末を除去し、再び同じ孔を表面から 10mm 程度の深さまで削孔して、削り出された粉末を試料とすることとした。

ここで、W/C65%の3本の供試体では当初採取した試料での塩化物イオン濃度の測定に失敗したため、試料の再採取と塩化物イオン濃度の再測定を行った。ただし、その時点で当初の試料採取から 10 ヶ月程度が経過しており、この間、供試体はビニル袋内に保存されていたが、かなり乾燥していた。そのため、硝酸銀溶液を噴霧する直前に供試体断面に精製水を繰り返し噴霧し、同面の表乾状態が数分以上は継続するようになってから、硝酸銀溶液を噴霧した。噴霧の条件や試料の採取方法、全塩化物イオン濃度の測定方法などは当初と同じである。なお、変色境界が現われる位置は細孔溶液中にまで到達できる銀イオン量とそれに応じる塩化物イオン量の存在によって決定されと考えられるため²⁾、10 ヶ月程度の経過による細孔構造の変化や塩化物イオンの固定化の程度では変色境界位置の全塩化物イオン濃度はほとんど変化しないと考えられる。しかし、実際にはその測定値に変化が現われたことを 4.4 節で後述する。

4. 実験結果および考察

4.1 鋼材の自然電位連続計測結果

各供試体で測定された棒鋼の自然電位連続計測結果を図-5に示す。なお、いずれの値も飽和硫酸銅電極 (CSE) での値に換算している。また、図中には ASTM C876 に記載されている鋼材の自然電位値と腐食確率との関係を示す点線を描いてある⁷⁾。

棒鋼の自然電位は、供試体間で日数に差はあるものの、いずれも明確に急落している。急落後の値も鋼材の腐食開始と判断して相応しいといえる。なお、図中の計測値が途切れた時点が、供試体を割裂し、硝酸銀溶液を噴霧した時点である。本実験の目的からすれば、供試体の割裂から硝酸銀溶液の噴霧までの作業は自然電位の急落後

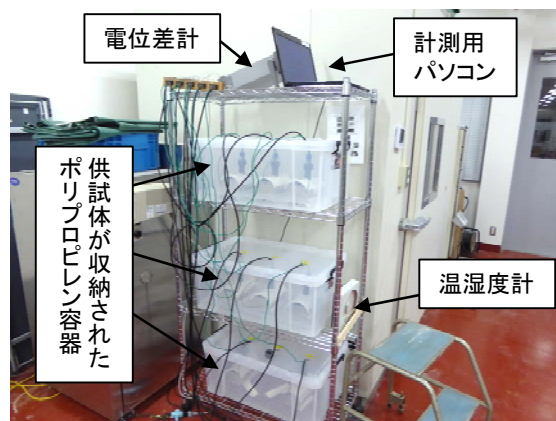


図-4 塩水供給および自然電位連続計測の状況

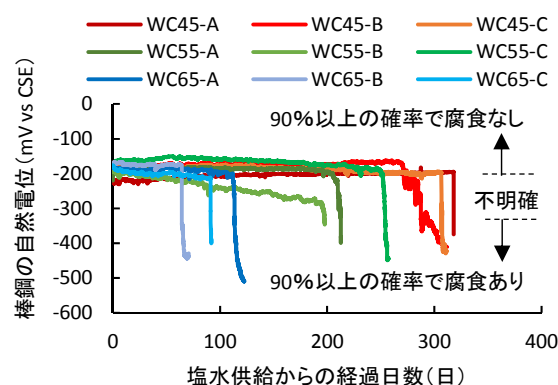


図-5 各供試体の棒鋼の自然電位連続計測結果

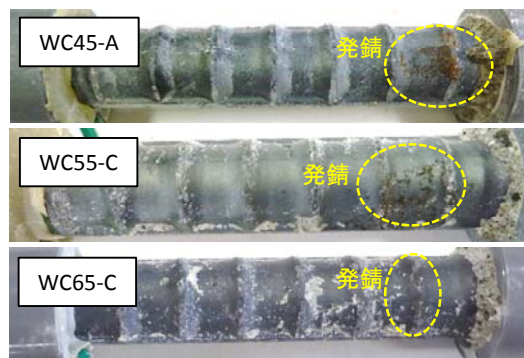


図-6 各 W/C の供試体における棒鋼の発錆状況

直ちに行うべきである。たとえば、WC45-A 供試体では急落から 0.05 日後に作業を行っている。しかし、WC45-B 供試体のように、自然電位の急落に気づけず、急落から 41.6 日を経過してから作業を行った例もあった。

4.2 鋼材の腐食確認結果

自然電位の急落後に確認された各供試体の棒鋼の発錆状況を図-6に示す。ここでは、各 W/C の供試体の中でも、自然電位の急落から比較的早く確認作業を行えた WC45-A 供試体、WC55-C 供試体、WC65-C 供試体の棒鋼の表面の状況を示している。いずれの棒鋼にも発錆が認められたが、WC65-C 供試体の場合は凝視しなければ発見しがたいものであった。

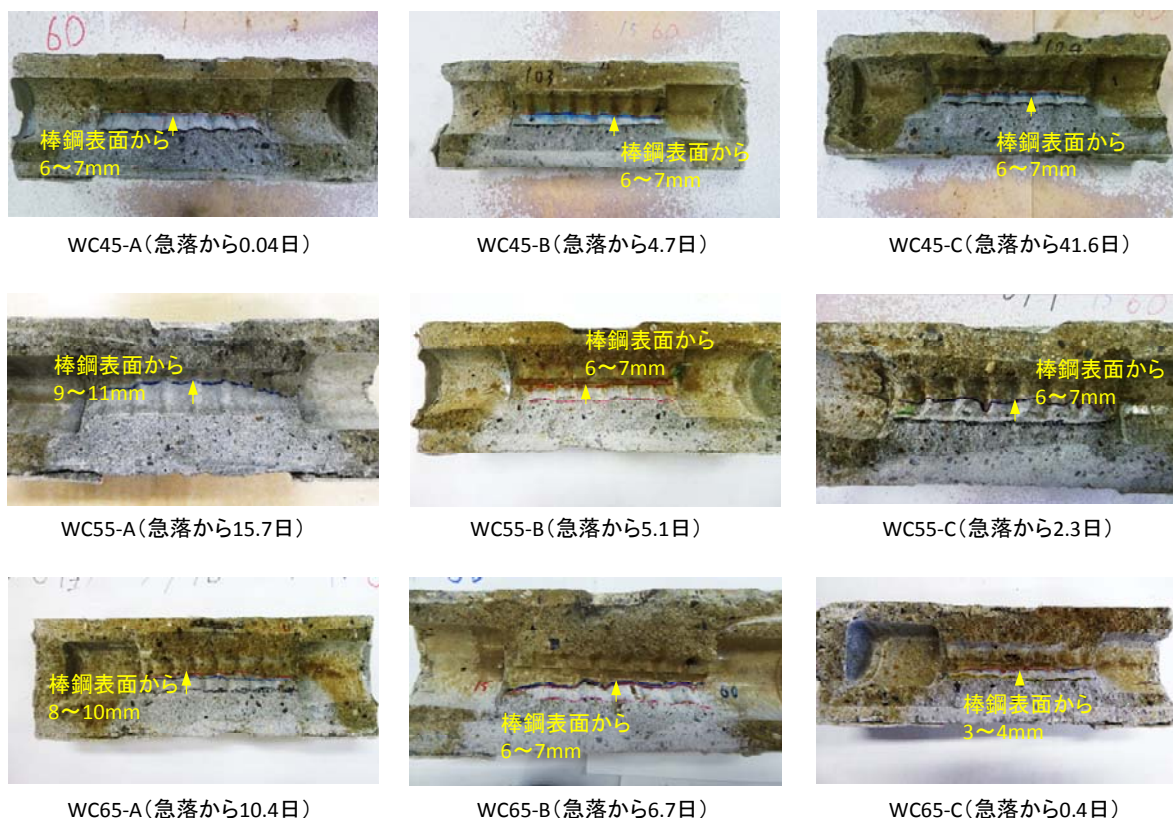


図-7 各供試体の断面における変色境界と棒鋼表面の位置との関係

4.3 変色境界と鋼材表面の位置との関係

硝酸銀溶液の噴霧によって現われた変色境界と棒鋼表面の位置との関係を図-7に示す。いずれも硝酸銀溶液の噴霧から60分後の断面の様子である。なお、供試体名の横の括弧内に書かれている日数は棒鋼の自然電位が急落した時点から断面に硝酸銀溶液を噴霧するまでに経過した日数である。

いずれの供試体でも変色境界が現われた位置は棒鋼表面の位置を通過している。自然電位の急落から比較的早く硝酸銀溶液を噴霧できた供試体での結果に注目すれば、W/C45%およびW/C55%の供試体では変色境界が棒鋼表面を6mm~7mm通過したところで棒鋼の腐食が開始されたといえる。W/C65%の供試体では自然電位急落からの経過日数が少ないことが特に重要なためWC65-C供試体のみに注目するが、変色境界が棒鋼表面を3mm~4mm通過したところで棒鋼の腐食が開始されたといえる。

2.4節で立てた仮説では、変色境界が鋼材表面に達した時点か、変色境界が鋼材表面を少し通り過ぎたところで鋼材の腐食が開始されるとしていたが、本実験の結果からは後者の関係が妥当といえる。なお、モルタルのW/Cが65%になると、変色境界が鋼材表面を通過する量が小さくなるようである。これは、W/Cが65%まで高くなったとして、変色境界位置の塩化物イオン量は原理的にその影響を受けにくい、 C_{lim} は低減する⁵⁾ため、両者の差が縮小することによって考えられる。

表-2 各供試体の変色境界位置の全塩化物イオン濃度

供試体 名称	全Cl- (mass%)	×絶乾単 (kg/m ³)	×0.6 (kg/m ³)	平均 (kg/m ³)
WC45-A	0.242	4.95	2.97	
WC45-B	0.181	3.70	2.22	2.31
WC45-C	0.141	2.88	1.73	
WC55-A	試料採取方法に誤り			
WC55-B	0.184	3.61	2.17	2.14
WC55-C	0.179	3.51	2.11	
WC65-A [※]	0.436	8.39	5.04	
WC65-B [※]	0.402	7.74	4.64	4.94
WC65-C [※]	0.444	8.55	5.13	

※再採取された試料にて測定

4.4 変色境界位置での塩化物イオン量と C_{lim} との関係

各供試体の変色境界位置から採取した試料に含まれる全塩化物イオン濃度の測定結果を表-2に示す。ここで、表中の「×絶乾単」という値は、測定された全塩化物イオン濃度(mass%)に別途測定した各モルタル供試体の絶乾状態での単位体積質量(kg/m³)を乗じたものである。また、「×0.6」という値は、左記の値にコンクリート中でモルタルが占める体積の割合として0.6を乗じたものであり、一般的なコンクリート中の全塩化物イオン量に相当する値と考えている。なお、WC55-A供試体では、3.8節に述べた方針に反して表面付近も含む形で試料を採取してしまったため、測定結果を除外している。また、W/C65%の3本の供試体の値は、3.8節で述べたように、再採取した試料にて測定された値である。

W/C45%およびW/C55%の供試体での測定値の平均値を見る限り、変色境界位置での全塩化物イオン量はW/Cの違いによる影響を受けにくく、一般的なコンクリート中の値として2.2kg/m³前後であると見込まれる。仮に、単位セメント量を300~350kg/m³として同値との割合をとれば0.73~0.63%となり、この値はHeら⁴⁾が取りまとめた0.28%~1.69%という値の範疇に収まる。また、Building Research Establishmentが報じているC_{lim}に照らし合わせると、中リスクの範囲に該当する。

一方、W/C65%の供試体での測定値はW/C45%およびW/C55%の供試体でのそれを大きく上回っている。これほどの値であれば変色境界が鋼材表面に達する以前に鋼材の腐食が開始されるはずだが、図-7に示したように、W/C65%の供試体でも変色境界は鋼材表面の位置を通過していた。このことから考えても、今回のW/C65%の供試体で測定された値は、W/C45%およびW/C55%の供試体で測定された値とは異質のものといえる。

上述のように、W/C65%の供試体の試料は当初から10ヶ月程度が経過し、乾燥が進んでいた供試体から採取されている。今回、硝酸銀溶液を噴霧する直前に断面に精製水を繰り返し噴霧したことで乾燥の影響を除去したつもりでいたが、それが十分ではなかった可能性が高い。具体的には、精製水を噴霧したことで細孔溶液量を回復させたものの、そこに塩化物イオンが元どおりの量だけ溶け出すまでの時間を確保できていなかった。そのため、当初よりも全塩化物イオン量が大きい位置に変色境界が現われ、その位置から試料を採取したことで、測定値が大きくなってしまったと考えられる。

2.4節で立てた仮説では、変色境界位置の塩化物イオン量は実際のコンクリートのC_{lim}と同程度か、それよりも若干小さい量としていた。2.3節に示した、堀口ら⁵⁾が実測したコンクリートのC_{lim}の平均値に照らし合わせれば、本実験の結果から、上記の仮説はそのまま妥当といえる。ただし、それは常時塩水に浸漬されているようなコンクリートにおいて通用する関係だと考えられる。経年などによって乾燥が進んだコンクリートにおいては、硝酸銀溶液を噴霧する前に細孔溶液量を回復させ、その中に塩化物イオンが十分に溶け出せるような手段を採らなければ、上記の関係は通用しないと考えられる。そしてこのことは、4.3節に述べた変色境界と鋼材表面の位置との関係に対しても共通することだと考えられる。

5. まとめ

硝酸銀溶液の噴霧後に現われる変色境界と鋼材の腐食との関係を明らかにする目的で実験を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 変色境界が鋼材表面を少し通過した時点で鋼材の

腐食が開始された。その通過量は、W/C45%の供試体で6mm~7mm、W/C55%の供試体で6mm~7mm、W/C65%の供試体で3mm~4mm程度であった。

- (2) 変色境界位置のコンクリート中に含まれる全塩化物イオン量は、(W/C65%の場合の確認は十分ではないが)一般的なコンクリート中の値として2.2kg/m³前後であると見込まれる。この値は、堀口らによって実測されたコンクリートのC_{lim}と比較してほぼ同程度か、それよりも若干小さい値といえる。
- (3) (1)、(2)に示した関係は、常時塩水に浸漬されていたようなコンクリートにおいて通用するものである。乾燥が進んだコンクリートにおいては、硝酸銀溶液を噴霧する前に細孔溶液量を回復させ、その中に塩化物イオンが十分に溶け出せるような手段を採らなければ、同様の関係は通用しないと考えられる。

謝辞

大成建設株式会社 堀口賢一様、また、NDIS3437 準備WG 幹事 森濱和正様、川俣孝治様より貴重なご教示をいただきました。深く感謝いたします。本研究の一部はJSPS 科研費 JP26420444 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 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
- 2) 青木優介, 板倉あい, 天野誠次郎, 澤本武博: 硝酸銀溶液の噴霧量が硝酸銀溶液噴霧法の結果に及ぼす影響, コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集, Vol.6, pp.13-16, 2018.8
- 3) Schoeppel K, et al.: Indication of free chloride ions on concrete surfaces by the UV test, Betonwerk +Fertigteil -Technik, Vol.54, No.11, pp80-85, 1988.11
- 4) Fuqiang He. et al.: AgNO₃-based colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete, Const. and Build. Materials, Vol.26, pp.1-8, 2012
- 5) 堀口賢一, 山口明伸, 丸屋剛, 武若耕司: 腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定方法とその定量評価に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.71, No.2, pp.107-123, 2015
- 6) 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
- 7) 小林一輔編著: コンクリート構造物の総合診断方法, オーム社