

# 論文 ドリル削孔粉を用いた硬化コンクリートの塩化物イオン浸透深さ簡易測定方法に及ぼす各種要因

澤本 武博\*<sup>1</sup>・青木 優介\*<sup>2</sup>・舌間 孝一郎\*<sup>3</sup>・地頭菌 博\*<sup>4</sup>

**要旨：**本研究では、コンクリート割裂面に 0.1mol/l の硝酸銀溶液を噴霧し、塩化物イオン浸透深さを測定する硝酸銀噴霧法を応用し、さらに簡易に浸透深さを測定する方法として、ドリル削孔粉を用いる方法を検討した。その結果、ドリル削孔粉を用いる場合に、試料が中性化していると、塩化物イオンが含まれていなくても塩化銀が生成されたように白色に見え、また試料が湿っていると、塩化物イオン浸透深さが大きく測定されることを明らかにした。硝酸銀噴霧法との比較では、ドリル削孔粉を用いる場合に硝酸銀溶液濃度を 0.05mol/l とすると、白色から薄褐色に変化する変色境界が、硝酸銀噴霧法の変色境界とほぼ一致した。

**キーワード：**コンクリート、塩化物イオン浸透深さ、ドリル削孔粉、硝酸銀、変色境界

## 1. はじめに

硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン量の測定には、JIS 法や JCI 法などがある。これらの試験方法はあらゆる箇所の塩化物イオン量を測定できるが、これらの試験方法は煩雑で試験結果を求めるのにかなりの時間を要するため、現場ですぐに結果を判断したり、多くの箇所を試験するには不向きである。

また、JIS 法や JCI 法よりも容易に塩化物イオン浸透の程度を測定する方法として、コンクリート割裂面に 0.1mol/l の硝酸銀溶液を噴霧し塩化物イオン浸透深さを測定する硝酸銀噴霧法<sup>1,2)</sup>（以下、噴霧法と称す）が提案されており、供試体レベルでは非常に実績も多いが、現場では試料としてコアを採取する必要があるため、容易に測定できるとは言い難い。

そのため、著者らはこれまでに噴霧法を応用し、NDIS 3419「ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法」の長所を取り入れ、コンクリート割裂面ではなくドリル削孔粉を用いる方法（以下、ドリル法と称す）を検討してきた<sup>3,4)</sup>。しかし、試料の中性化の影響、試料の乾湿の影響、変色境界を判定するまでの時間、硝酸銀溶液の濃度の影響などは明らかとなっていない。

本研究では、ドリル法の測定値に及ぼす各種要因について検討した。

## 2. 既往の研究

### 2.1 噴霧法に関する既往の研究

噴霧法では、コンクリート割裂面に 0.1mol/l の硝酸銀溶液を噴霧し、塩化銀を生成し暴露面から白く変色した領域までの深さを塩化物イオン浸透深さとする。なお、

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として、海外における既往の研究では、可溶性塩化物イオン濃度は単位結合材量の 0.1～1.7%程度、全塩化物イオン濃度は 0.2～1.0%程度になるとされている<sup>5)</sup>。これらの値は、仮に単位結合材量を 300kg/m<sup>3</sup>とすれば、可溶性塩化物イオン量で 0.3～5.1kg/m<sup>3</sup>、全塩化物イオン量で 0.6～3.0kg/m<sup>3</sup>に相当する。なお、可溶性塩化物イオン量のみ測定している研究もあるため、全塩化物イオン量より可溶性塩化物イオン量の範囲が大きい。また、国内における既往の研究の例では、単位セメント量の 0.15%程度の可溶性塩化物イオン濃度としており、単位セメント量を 300kg/m<sup>3</sup>とすれば 0.45 kg/m<sup>3</sup>の可溶性塩化物イオン量に相当する<sup>1,2)</sup>。また、可溶性塩化物イオン量で 2 kg/m<sup>3</sup>程度、全塩化物イオン量で 3 kg/m<sup>3</sup>程度になると報告している研究や<sup>4)</sup>、全塩化物イオン量で 1.5～4.5kg/m<sup>3</sup>になると報告している研究もある<sup>6)</sup>。

### 2.2 ドリル法に関する既往の研究

#### (1)ドリル法の試験方法<sup>3,4)</sup>

ドリル法は、ドリル径を 20mm としたハンマドリルを用いて、コンクリート表面から 10mm ずつ削孔して試料を採取する。まず、表層から 10mm の深さまで削孔して試料を採取し、次に 20mm まで削孔しコンクリート表面から 10mm～20mm の試料を採取するといった手順である。なお、NDIS 3419 の中性化深さ試験方法のように、ろ紙に硝酸銀溶液を染み込ませ塩化物イオン浸透深さの判定を試みたが、ろ紙の上に粉が乗る感じでは、変色境界の判別が困難であったため、10mm ずつ削孔して硝酸銀溶液と混合する方法とした。

塩化物イオン浸透深さの判定の際には、ドリル削孔粉

\*1 ものつくり大学 技能工芸部建設学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 木更津工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 前橋工科大学 工学部社会環境工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*4 ダイヤリフォーム(株) (正会員)

表-1 コンクリート倉庫の配合

| 配合の設計条件   |      |          |              |         | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |          |     |      |     |     |       |
|-----------|------|----------|--------------|---------|--------------------------|----------|-----|------|-----|-----|-------|
| コンクリートの種類 | 呼び強度 | スラブ (cm) | 粗骨材最大寸法 (mm) | セメントの種類 | 水セメント比 (%)               | 細骨材率 (%) | 水   | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤   |
| 普通        | 27   | 18       | 20           | N       | 53.5                     | 47.4     | 182 | 341  | 822 | 924 | 4.092 |

および 0.1mol/l の硝酸銀溶液を質量比で 1 対 1 に量り容器内で混合し、変色の程度を直ちに目視で判定する。なお、この比率は、これまでの研究で最も変色境界を判定しやすい比率である。塩化物イオン量が多い箇所は塩化物イオンと硝酸銀とが反応し塩化銀 (AgCl) を生成し白色 (粉碎されたコンクリートの色も混じる影響で薄い灰色に見える) に、塩化物イオン量の少ない部分を削孔した場合は、水酸化イオンと硝酸銀が反応し酸化銀 (Ag<sub>2</sub>O) の生成が卓越し褐色に変化する。そして、ドリル削孔粉を試料として用いると、塩化物イオン量が多い部分と少ない部分の試料が混合している可能性があるため、薄い褐色となる領域もある。なお、変色境界の判定は、白色 (薄い灰色) と薄褐色の変色境界が判定しやすく、薄褐色と褐色の変色境界は判定しづらいこともある。

### (2) ドリル法と噴霧法の変色境界の関係<sup>3)</sup>

ドリル法と噴霧法における塩化物イオン浸透深さを比較すると、ドリル削孔粉が白色 (薄い灰色) から薄褐色に変化する塩化物イオン浸透深さが、割裂面による塩化物イオン浸透深さに対して、おおよそ 0.6 倍程度、ドリル削孔粉が薄褐色から褐色に変化する塩化物イオン浸透深さは、概ね割裂面による塩化物イオン浸透深さと同等となるという結果を得ている。

### (3) ドリル法の変色境界における塩化物イオン量<sup>4)</sup>

ドリル削孔粉が白色 (薄い灰色) から薄褐色に変化する時の可溶性塩化物イオン量は、4kg/m<sup>3</sup> 程度、薄褐色から褐色に変化する時の可溶性塩化物イオン量は 2kg/m<sup>3</sup> 程度である。

また、ドリル削孔粉が白色 (薄い灰色) から薄褐色に変化する時の全塩化物イオン量は、6 kg/m<sup>3</sup> 程度、薄褐色から褐色に変化する時の全塩化物イオン量は 3 kg/m<sup>3</sup> 程度である。

## 3. ドリル法の測定値に及ぼす各種要因

### 3.1 試料が中性化している場合の影響

#### (1) ドリル法の測定方法

ドリル法の測定は、高さ 3500mm、幅 4550mm、奥行 4550mm の築 12 年のコンクリート倉庫において行った。コンクリート倉庫には、呼び強度 fc27 (W/C=53.5%) のレディーミクストコンクリートを使用し、配合表を表-1 に示す。セメントには、普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm<sup>3</sup>) を、細骨材には栃木県栃木市尻内町産山砂 (表乾密度 2.61 g/cm<sup>3</sup>、粗粒率 2.75) を、粗骨材には栃

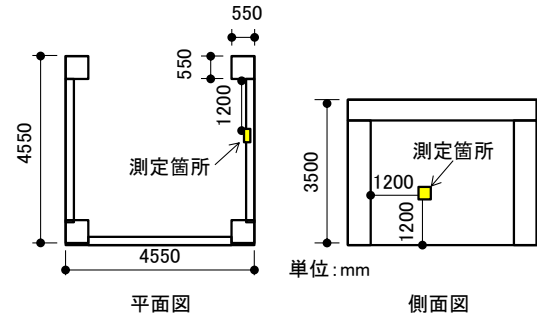


図-1 コンクリート倉庫の形状および測定位置

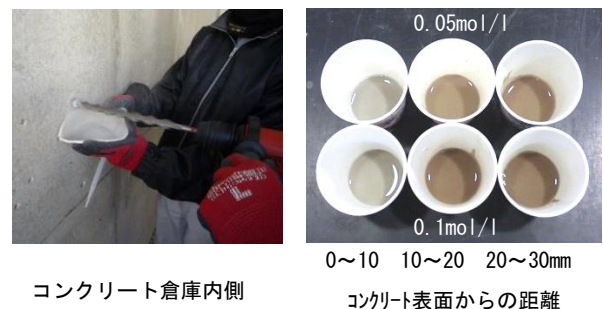


図-2 削孔の様子

図-3 中性化した試料の変色

木県栃木市尻内町産砕石 (最大寸法 20mm、表乾密度 2.64g/cm<sup>3</sup>、実積率 59.0%) を用いた。また、混和剤として AE 減水剤を用いた。なお、コンクリート自体は、JIS A 5308 に適合したコンクリートであるため、塩化物イオンはほとんど含まれておらず、またコンクリート倉庫の立地は、海岸から 60km 程度離れた埼玉県行田市ものつくり大学内であり、学内で凍結防止剤の散布も行っていないため、塩化物イオンはほとんど含まれていない。

実験では、ドリル径 20mm のハンマドリルを用いて 10mm ずつ削孔して試料を採取した。削孔箇所は、図-1 に示した通りコンクリート倉庫壁 (厚さ 200mm) 内側の床から高さ 1200mm、倉庫入口から 1750mm 付近の 3 箇所 (水平方向に 100mm 間隔で倉庫入口から 1650mm、1750mm、1850mm の 3 箇所) とした。試料採取の様子を図-2 に示す。採取した試料 5g と 0.1mol/l または 0.05mol/l の硝酸銀溶液 5g を混合・攪拌してから変色境界の判定を行った。

コンクリート倉庫の中性化は、NDIS 3419 に準拠して 3 箇所測定し、平均値は 13.3mm (12.7mm, 13.3mm, 13.8mm) であった。なお、中性化深さの測定位置は、塩化物イオン浸透深さ測定位置から 100mm 下に離れた箇所とした。

#### (2) 実験結果

ドリル法における中性化した試料の変色境界を図-3

表-2 コンクリート供試体の配合

| 配合の設計条件   |      |                  |              |         | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |          |     |      |     |     |       | 試験結果               |         |                           |
|-----------|------|------------------|--------------|---------|--------------------------|----------|-----|------|-----|-----|-------|--------------------|---------|---------------------------|
| コンクリートの種類 | 呼び強度 | スランブ (cm)        | 粗骨材最大寸法 (mm) | セメントの種類 | 水セメント比 (%)               | 細骨材率 (%) | 水   | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤   | スランブ (cm)          | 空気量 (%) | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |
| 普通        | 24   | 18               | 20           | N       | 58.5                     | 48.5     | 181 | 310  | 856 | 919 | 3.720 | 16.0               | 3.0     | 34.1 <sup>*2</sup>        |
|           | 40   |                  |              |         | 42.0                     | 46.1     | 170 | 405  | 791 | 935 | 4.050 | 20.5               | 4.9     | 53.6 <sup>*2</sup>        |
| 高強度       | 60   | 60 <sup>*1</sup> |              |         | 31.0                     | 48.4     | 170 | 549  | 773 | 851 | 7.686 | 57.0 <sup>*1</sup> | 5.0     | 84.1 <sup>*2</sup>        |

\*1 スランブフロー

\*2 標準水中養生した材齢 28 日の圧縮強度

に示す。0.1mol/l および 0.05mol/l いずれの硝酸銀溶液を用いた場合でも、コンクリート表面から 10mm の範囲における試料が、塩化物イオンが浸透していないに関わらず白色（薄い灰色）に見え、10～20mm、20～30mm の試料は褐色となった。そして、3 箇所の削孔箇所いずれも同じ結果になった。これは、コンクリートが中性化すると水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化し、水酸化イオンが失われるため酸化銀が生成されず、また塩化物イオンも含まれていないため塩化銀も生成されず硝酸銀溶液は無色のままとなり、結果として試料の色すなわちコンクリートの色として見えるためと考えられる。

これらの結果は、噴霧法でも報告されており<sup>7)</sup>、噴霧法またはドリル法で塩化物イオン浸透深さを測定する場合には、必ず中性化深さも測定しておく必要がある。そして、変色境界が中性化深さより大きい場合は、塩化物イオンが浸透していると考えてよいが、変色境界と中性化深さが同じくらいの場合には、中性化の影響により、試料が白色（薄い灰色）に見えている可能性があるので注意が必要である。

### 3.2 試料の乾湿および変色境界判定までの時間の影響

#### (1) コンクリート供試体の作製

コンクリート供試体は 150×150×530mm とし、呼び強度 fc24 (W/C=58.5%), fc40 (W/C=42.0%), fc60 (W/C=31.0%) のレディーミクストコンクリートを使用した。配合表を表-2 に示す。なお、使用材料は、fc40 および fc60 の混和剤に高性能 AE 減水剤を、fc60 の粗骨材に栃木県佐野市会沢町産石灰岩碎石（最大寸法 20mm、表乾密度 2.70g/cm<sup>3</sup>、実積率 60.0%）を用いた以外は、3.1(1) と同じである。

供試体は、材齢 4 年まで室内で管理し、供試体の打込み面および底面をエポキシ樹脂でシールした。なお、今回の実験では、塩水に浸漬する前のコンクリート供試体の養生（温度・湿度）の影響は考慮していないため、供試体は空調のない室内で管理した。その後、同じ室内で 2014 年 6 月の 1 カ月間、濃度 10% の塩水に浸漬した。供試体の塩水浸漬は、密閉した容器の中で行っているため塩水はほとんど蒸発せず、また 6 月に浸漬したため、浸漬期間中の塩水の平均温度は 20℃を少し超えるくらい

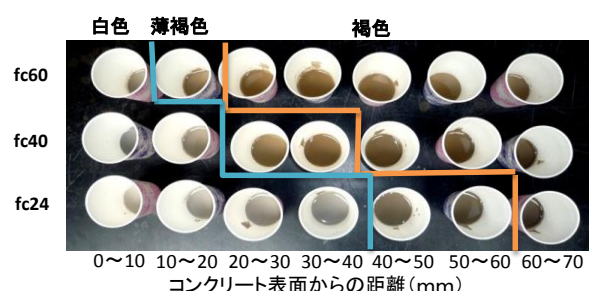


図-4 ドリル法における試料の変色境界の一例

と考えられる。

供試体の中性化深さは、3.3(2)の噴霧法の測定を行う際に、150×150×530mm の供試体を割裂した片側の断面を、JIS A 1152 に準じて各供試体 10 点ずつ測定し、平均値が fc24 で 10.8mm, fc40 で 8.9mm, fc60 で 6.8mm であった。なお、材齢 4 年で中性化深さがやや大きくなっているのは、角柱供試体を材齢 7 日で脱型後、絶えず気中養生を行ったことが考えられる。

#### (2) ドリル法の測定方法

供試体を塩水から取り出した直後、1 週間後、2 週間後、3 週間後、4 週間後、5 週間後に、それぞれドリル径 20mm のハンマドリルを用いて試料を採取した。なお、供試体の乾燥は、室内で所定の日数まで自然乾燥させる方法とした。また、今回の実験では、各供試体、各乾燥期間で供試体側面の 1 箇所のみ削孔した。削孔においては、供試体側面からの塩化物イオンの浸透のみを測定することとし、打込み面および底面はエポキシ樹脂でシールしているため、供試体長辺方向側面の中心から上下 50mm の範囲、供試体短辺方向はエポキシ樹脂でシールしていないため、供試体長辺方向側面の中心から左右 150mm の範囲とした。

変色境界判定時刻の影響としては、試料 5g と 0.1mol/l の硝酸銀溶液 5g をカップ内で混合・攪拌してから直後、30 分後、1 時間後に変色境界の判定を行った。

#### (3) 実験結果

ドリル法における試料の変色境界の一例を図-4 に、試料の乾湿および変色境界判定までの時間の影響を図-5 に示す。まず、変色境界判定時刻が攪拌直後において白色（薄い灰色）から薄褐色に変化する場合（図-5(1)左）

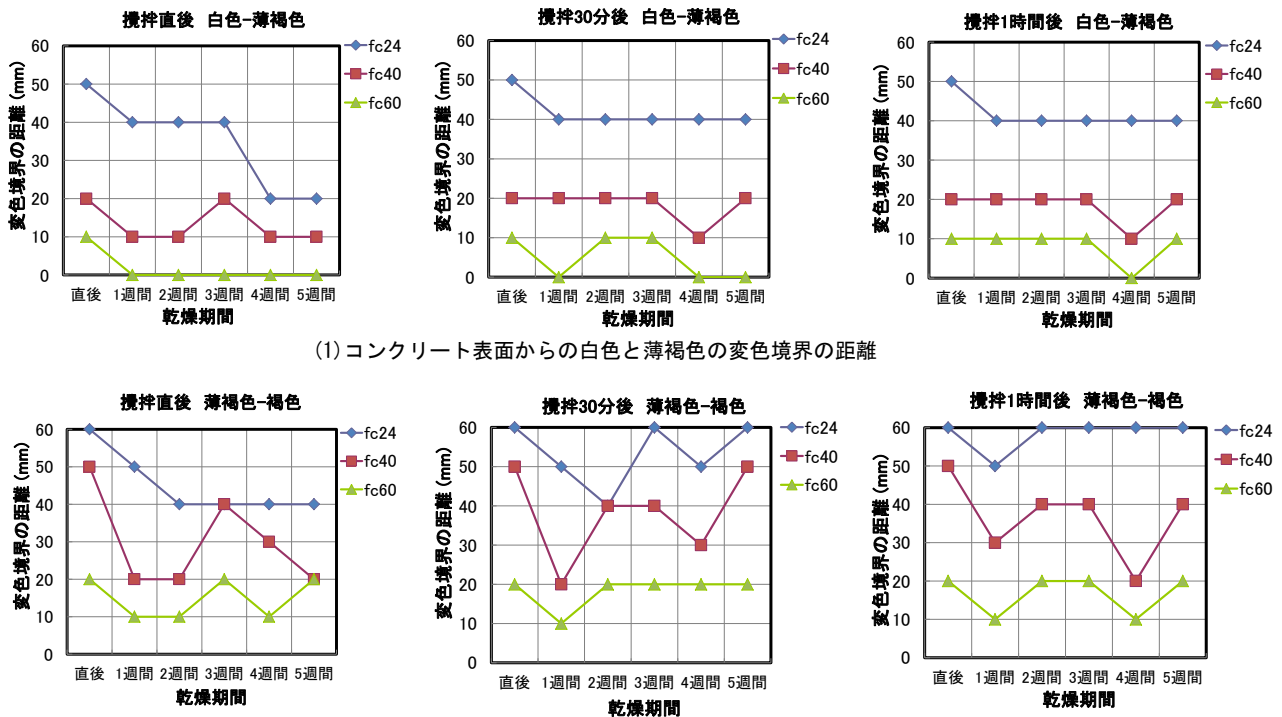


図-5 ドリル法による試料の乾湿および変色境界判定までの時間の影響

を見ると、いずれの配合においても供試体を塩水から取り出した直後に測定するとコンクリート表面からの変色境界の距離は大きく測定される傾向にあり、乾湿の影響は水セメント比の大きい fc24 で顕著であった。これは、試料が湿っていると、試料付近の硝酸銀溶液の濃度が薄くなるため、塩化物イオン量が少ないところまで優先的に白色沈殿する塩化銀を生成するためと考えられる。すなわち、逆に試料が乾燥することで硝酸銀溶液の濃度が濃くなると、塩化物イオン量が多い部分で塩化銀を生成しても、塩化物イオンと反応していない硝酸銀溶液が余るため酸化銀を生成し、浸透深さが小さく測定されると考えられる。その結果、硝酸銀溶液の濃度が濃いほど、白く変色した境界の塩化物イオン量は多くなる<sup>2)</sup>。硝酸銀溶液の濃度が変色境界に及ぼす影響のイメージを図-6に示す。塩化銀と酸化銀が混在する沈殿が生成される箇所においては、沈殿中に占める塩化銀の割合がほぼ100%となれば沈殿は白色となるが、それより低くなるにつれ褐色となる<sup>7)</sup>。

また、変色境界の判定までの時間が攪拌直後において薄褐色から褐色に変化する(図-5(2)左)場合においても、同様の傾向が見受けられた。なお、薄褐色と褐色の変色境界のばらつきが大きくなったのは、白色と薄褐色の変色境界に比べて判定しづらいことが原因と考えられる。

このように、試料の乾湿はコンクリート表面からの変色境界の距離の測定に大きく影響を及ぼすため、湿潤状態にある構造物から試料を採取する場合には、塩化物イ

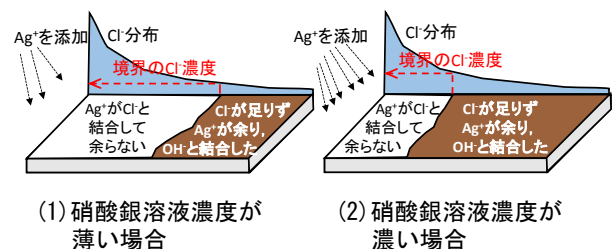


図-6 硝酸銀溶液の濃度が変色境界に及ぼすイメージ図

オン浸透深さが大きく測定される可能性がある。

次に、図-5(1)および図-5(2)を左、中、右の順で見ると、変色境界の判定までの時間が攪拌してから30分または1時間になると、判定時間が攪拌直後に比べてコンクリート表面からの変色境界の距離が若干大きく測定され、乾湿の影響は少なくなる傾向にあった。これは、試料が乾燥していると塩分が溶け出しにくいと考えられ、試料と硝酸銀溶液を混合してからある程度時間が経過してから変色境界を判定した方が乾湿の影響を受けにくくなると考えられる。

### 3.3 硝酸銀溶液の濃度の影響

#### (1) コンクリート供試体の作製

コンクリート供試体は、3.2(1)と同様の供試体を使用し、濃度10%の塩水に1カ月間浸漬した。その後、供試体を5週間以上乾燥させた。

#### (2) ドリル法および噴霧法の測定方法

ドリル法は、3.2(2)と同じ手順で行い、硝酸銀溶液の濃度を0.1mol/lまたは0.05mol/lとした。なお、各供試体側

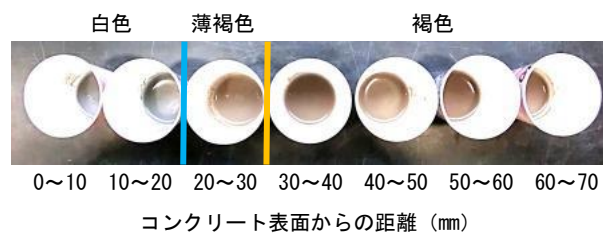


面の削孔箇所は3箇所ずつとし、平均値を求めた。なお、供試体の削孔箇所の範囲は、3.2(2)と同様である。

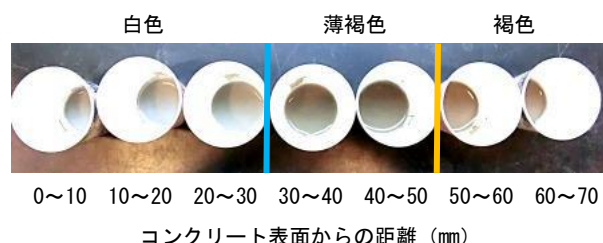
噴霧法では、供試体のドリル法で削孔した箇所付近を割裂し、断面に0.1mol/lの硝酸銀溶液を噴霧し、各供試体の側面10箇所ずつノギスを用いて変色境界を測定し、平均値を求めた。

### (3) 実験結果

ドリル法における試料の変色境界の一例を図-7に、噴霧法における試料の変色境界の一例を図-8に示す。ドリル法の硝酸銀溶液の濃度と噴霧法におけるコンクリート表面からの変色境界の距離の関係を図-9に示す。なお、各供試体の変色境界は、いずれの場合も3.2(1)に示した中性化深さより深いため、いずれも塩化物イオンによる変色である。硝酸銀溶液の濃度がともに0.1mol/lの場合(図-9(1))は、ドリル法の変色境界の白色から薄褐色に変化する攪拌して30分以降の変色境界は噴霧法の0.6倍程度となり、既往の研究<sup>3)</sup>と同程度となった。これは、ドリル法の場合、白色に見える塩化銀(AgCl)を沈殿した試料と、褐色に見える酸化銀(Ag<sub>2</sub>O)を沈殿した試料が、容器内で混合されることにより、褐色と見える境界より浅い箇所に薄褐色の境界が存在することによって考えられる。一方、薄褐色から褐色に変化する変色境界は0.8倍程度となり、既往の研究<sup>3)</sup>より若干小さめに測定された。これは、薄褐色から褐色に変色する境界が判定しづらいことを表している。既往の研究<sup>3)</sup>では、ドリル法

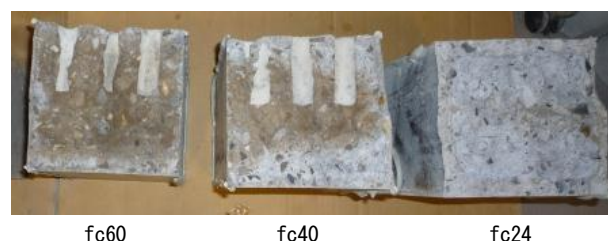


(1) 硝酸銀溶液濃度が0.1mol/l, fc40, 攪拌30分後に判定



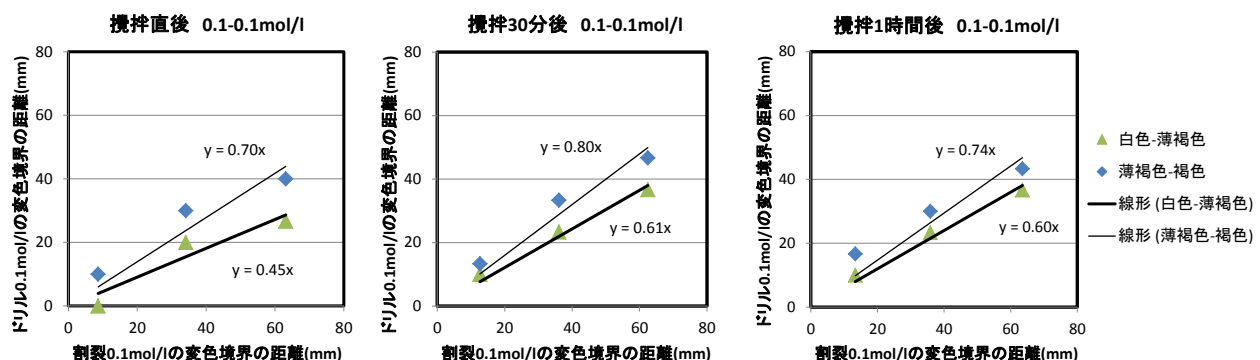
(2) 硝酸銀溶液濃度が0.05mol/l, fc40, 攪拌30分後に判定

図-7 ドリル法における試料の変色境界の一例

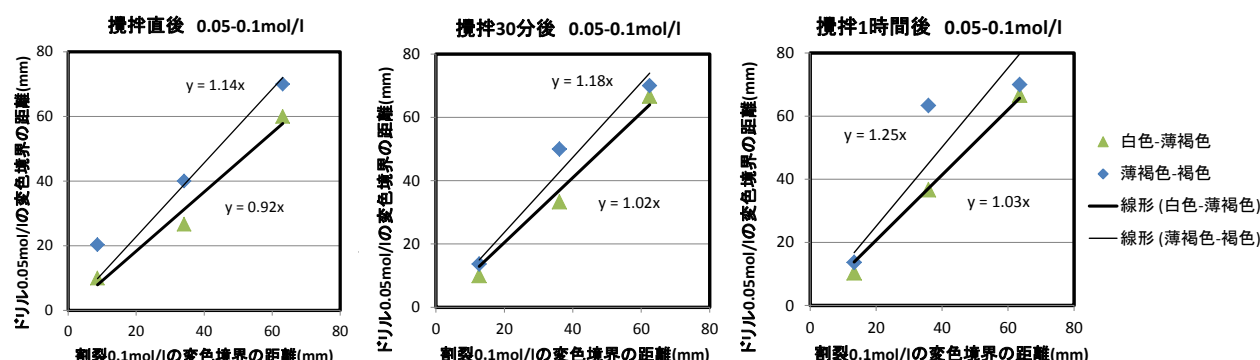


硝酸銀溶液濃度が0.1mol/l, 噴霧30分後に判定

図-8 噴霧法における試料の変色境界の一例



(1) ドリル法の硝酸銀溶液の濃度が0.1mol/lの場合



(2) ドリル法の硝酸銀溶液の濃度が0.05mol/lの場合

図-9 ドリル法の硝酸銀溶液の濃度と噴霧法におけるコンクリート表面からの変色境界の距離の関係

の薄褐色から褐色に変色する境界が噴霧法の変色境界と一致したため、ドリル法と噴霧法に用いた硝酸銀溶液の濃度がともに 0.1mol/l の場合は、褐色に見える境界における塩化物イオン量は、両者で同程度になると考えられる。

次に、噴霧法の硝酸銀溶液の濃度を 0.1mol/l とし、ドリル法の濃度を 0.05mol/l とした場合（図-9(2)）は、変色境界を判定しやすい白色（薄い灰色）から薄褐色に変化する変色境界が、噴霧法とほぼ一致した。これは、硝酸銀溶液の濃度を薄くすると、図-6 に示したように、コンクリート表面からの変色境界の距離が大きく測定されることが影響していると考えられる。使用する硝酸銀溶液の濃度が薄くなると、変色境界の距離が大きくなる現象は、噴霧法でも報告されている<sup>1,2)</sup>。変色境界の判定までの時間は、3.2(3)の試料の乾湿の影響や、変色境界の移動を考えると、30 分～1 時間程度がよいと考えられる。ドリル法の硝酸銀溶液の濃度を 0.05mol/l としても、変色境界の判定のし易さは、濃度を 0.1mol/l とした場合と同じであり、この組み合わせであると、実績のある噴霧法に対してドリル法を有効に活用できると考えられる。

また、0.05mol/l の硝酸銀溶液を用いたドリル法の判定しやすい白色（薄い灰色）と薄褐色の変色境界が 0.1mol/l の硝酸銀溶液を用いた噴霧法の変色境界とほぼ同じになると、既往の研究より変色境界のおおよその塩化物イオン量も推定できる。著者らの既往の研究では、可溶性塩化物イオン量で 2 kg/m<sup>3</sup> 程度、全塩化物イオン量で 3 kg/m<sup>3</sup> 程度となり、鋼材が腐食する可能性のある塩化物イオン量に相当すると考えられる<sup>4)</sup>。

#### 4. まとめ

ドリル削孔粉を用いた硬化コンクリートの塩化物イオン浸透深さ簡易測定方法に及ぼす各種要因を検討した結果、(1)～(3)が明らかとなった。

- (1) ドリル法において、試料が中性化していると、塩化物イオンが含まれていなくても塩化銀が生成されたように白色（薄い灰色）に見えるため、塩化物イオン浸透深さ測定の際には、中性化深さも確認する必要がある。
- (2) ドリル法において、試料が湿っていると、コンクリート表面からの変色境界の距離が大きく測定される。
- (3) ドリル法の硝酸銀溶液濃度を 0.05mol/l とした場合、判定しやすい白色（薄い灰色）から薄褐色に変化する変色境界が、硝酸銀溶液濃度を 0.1mol/l とした実績のある噴霧法の変色境界とほぼ一致する。また、変色境界の判定は、試料と溶液を混合して 30 分～1 時間程度がよいと

考えられる。

今後は、供試体のセメントの種類や粗骨材の最大寸法を変化させて、ドリル法の実験を行う予定である。

#### 謝辞

本研究を行うにあたり、油田航平氏をはじめとする、ものづくり大学の澤本研究室の学生に多くの実験を実施して頂きました。また、塩化物イオン量の化学分析にあたり、三菱マテリアル株式会社の鳴瀬浩康氏、田中久順氏、ならびに佐藤嘉一氏に多大な御協力を頂きました。

#### 参考文献

- 1) Nobuaki Otsuki, Shigeyoshi Nagataki, Kenji Nakashita: Evaluation of AgNO<sub>3</sub> Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials, ACI Material Journal / November-December, Title no.89-M64, pp.587-592, 1992
- 2) 大即信明：硝酸銀噴霧法によるセメント硬化体の塩化物イオンの意味，東京工業大学土木工学科研究報告，No.42, pp.11-18, 1990.12
- 3) 澤本武博，藤原翼，湯浅昇，笠井芳夫：ドリル削孔粉と硝酸銀溶液を混合することによるコンクリートの塩分浸透深さの簡易測定方法に関する研究，セメント・コンクリート論文集, No.64/2010, pp.196-202, 2011.2
- 4) 澤本武博，菊田弘之，地頭菌博，湯浅昇，舌間孝一郎：ドリル削孔粉を用いた硬化コンクリートの塩化物イオン浸透深さの簡易測定方法に関する研究-変色境界における塩化物イオン量の検討-，第 4 回シンポジウムコンクリート構造物の非破壊検査論文集，pp.357-362, 2012.8
- 5) Fuqiang He. et al.: AgNO<sub>3</sub>-base colorimetric methods for measurement of chloride penetration in concrete, Construction and Building Materials, Vol.26, pp.1-8, 2012
- 6) 青木優介，佐藤一也，嶋野慶次：硝酸銀溶液噴霧法の諸条件の変化による影響と鋼材腐食原因推定方法としての実用性に関する考察，コンクリート工学年次論文集，第 34 巻，No.1, pp.832-837, 2012.7
- 7) 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