

論文 Article

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—

原稿受付 2011年4月5日

ものつくり大学紀要 第2号 (2011) 36~41

澤本武博^{*1}, 飛内圭之^{*1}, 後藤正明^{*2}, 地頭菌博^{*3}, 田中久順^{*4}, 佐藤嘉一^{*4}^{*1}ものつくり大学 技能工芸学部 建設学科^{*2}ものつくり大学大学院 ものつくり学研究科 大学院生^{*3}ダイヤリフォーム株式会社^{*4}三菱マテリアル株式会社

A Study on Simple Testing for Measurement of Chloride Ion Penetration Depth of Hardened Concrete — Amount of Chloride Ion at Discolored Boundary —

Takehiro SAWAMOTO^{*1}, Keishi TOBINAI^{*1}, Masaaki GOTO^{*2},
Hiroshi JITOZONO^{*3}, Hisanobu TANAKA^{*4} and Yoshikazu SATO^{*4}^{*1} Dept. of Building Technologists, Institute of Technologists^{*2} Graduate student. Graduate school of Technologists, Institute of Technologists^{*3} Diareform Corporation^{*4} Mitsubishi Materials Corporation**Abstract**

We have been developed the simple testing to measure chloride ion penetration depth of concrete by using drilling powder and AgNO₃ solution. When the drilling powder is combined with the AgNO₃ solution, it is necessary that these two things are equal mass to combine. The strong point of this simple method is combination of the AgNO₃ solution spray method for measurement chloride ion penetration depth and the test for neutralization depth with drilling powder (NDIS standard). In this study, we drilled a hole every 10mm depth in the concrete specimen with blade whose diameter is 20mm. As a result when the drilling powder from the concrete surface to core was combined with AgNO₃ solution, two discolored boundary appeared. One was discoloration from light gray to light brown (discolored boundary1). The other was discoloration from light brown to dark brown (discolored boundary2). The discolored boundary1 was clearer than the discolored boundary2. The soluble chloride ion at discolored boundary1 showed about 4kg/m³, and the soluble chloride ion at discolored boundary2 showed about 2kg/m³. The total chloride ion at discolored boundary1 showed about 6kg/m³, and the total chloride ion at discolored boundary2 showed about 3kg/m³.

Key Words : Concrete, Testing, Drilling powder, AgNO₃ solution, Chloride ion, Penetration depth

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 A 1154 および(社)日本コンクリート工学協会の JCI-SC4, JCI-SC5 がある。これらの試験方法は、試料採取が可能な範囲であらゆる箇

所の塩化物イオン濃度の測定ができるという長所がある一方、分析試料の調整や試験方法が煩雑で、試験結果を求めるのにもかなりの時間を必要とするといった短所もある。そのため、飛来塩分によるコンクリート構造物の塩害を調査する場合、容易かつ工学的な意味の明確な塩化物イオン量の測

Table 1 Mix proportions and test results

W/C (%)	Slump (cm)	s/a (%)	Air content (%)	Unit content (kg/m ³)				Test results		
				W	C	S	G	Slump (cm)	Air content (%)	Compressive strength (N/mm ²)
45	8±2.5	42	4.5±1.5	183	407	701	1013	9.5	3.0	39.7
55		44			333	761	1014	10.5	3.1	29.6
65		46			282	815	816	7.5	3.8	23.9

定として、コンクリートの割裂面に 0.1mol/l の硝酸銀溶液を噴霧し、塩化物イオンの濃淡に応じた変色境界によって塩化物イオン浸透深さを判定する方法が提案されている^{1,2)} (以下、硝酸銀噴霧法と称す)。大即らは、塩化物イオン浸透部で硝酸銀により塩化銀を生成し白沈し、未浸透部では水酸化物イオンと反応して酸化銀を生成し褐沈することにより、変色境界の色が相反するとしており、変色境界の示す塩化物イオン量は、可溶性塩化物イオン量でセメント質量当たり 0.15wt%程度であるとしている。

一方、コンクリートの中性化の調査に関しては、コンクリートの割裂面に JIS K 8001 に規定されたフェノールフタレイン溶液を噴霧し、変色境界から中性化深さを判定する方法として JIS A 1152 がある。しかし、この試験方法では、構造物からコアを採取したり、はつったりする必要があるため、さらに簡易な試験方法としてドリル削孔粉を試料として用いる方法が(社)日本非破壊検査協会の NDIS 3419 に制定されている。

そこで、著者らはこれまでに、硝酸銀噴霧法を応用して、ドリル削孔粉と硝酸銀溶液を混合しその変色境界から塩化物イオン浸透深さを測定する簡易な方法(以下、ドリル法と称す)を検討してきた^{3,4,5)}。その結果、ドリル法では変色領域が 3 つ存在し、塩化物イオン量が多い順に、薄い灰色、薄い褐色、褐色となることが明らかとなった。そして、薄い灰色と薄い褐色の変色境界(コンクリート表面からの距離)は、硝酸銀噴霧法の 6 割程度と小さくなり、薄い褐色と褐色の変色境界(コンクリート表面からの距離)は硝酸銀噴霧法と同程度であることを明らかにした。しかし、ドリル法の変色境界における塩化物イオン量を求めるには至っていない。

本研究では、ドリル法における変色境界の塩化

物イオン量をあらかじめ求めておくことで、塩化物イオン浸透深さの簡易測定方法としてのドリル法の有用性を明らかにした。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントには普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)を、骨材には鬼怒川産川砂(表乾密度 2.59g/cm³, 粗粒率 2.68, 吸水率 2.33%)および山梨産碎石(最大寸法 20mm, 表乾密度 2.72g/cm³, 粗粒率 6.50, 吸水率 0.66%)を用いた。また、空気量の調整には AE 剤を用いた。コンクリートの配合は表 1 に示した通りであり、水セメント比を 45%, 55%および 65%の 3 種類とした。なお、表 1 に示した圧縮強度は、標準水中養生を行った材齢 28 日における強度である。

2.2 供試体の作製方法および塩水浸漬試験

実験に用いた供試体は、150×150×530mm の角柱であり、材齢 2 日まで封かん養生を行った後、材齢 3 年まで気中養生を行った。なお、φ100×200mm の円柱供試体の圧縮強度は、水セメント比が 45%, 55%および 65%の場合で、それぞれ 39.7N/mm², 29.6N/mm²および 23.9N/mm²であった。また、塩水浸漬試験では、気中養生を終えた供試体を NaCl 濃度 10%の塩水中に 1 ヶ月間浸漬することとした。

2.3 ドリル法の概要^{3,4,5)}

ドリル法では、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 ずつ削孔することとした。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、供試体



Fig.1 Drill concrete specimen

の削孔箇所は3箇所とした。図1にドリル削孔の様子を示す。

塩化物イオン浸透深さの判定の際には、ドリル削孔粉および0.1mol/lの硝酸銀溶液をそれぞれ5gずつ量り容器内で混合し、変色の程度を直ちに目視で判定した。水セメント比45%の場合の変色境界を、図2に示す。コンクリート表層付近すなわち表層から10mm、10mm~20mmのドリル削孔粉のように、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、また供試体の中心部すなわち表層から30mm~40mm、40mm~50mmのように塩分の未浸透部を削孔した場合は、水酸化イオンと硝酸銀が反応し酸化銀(Ag₂O)を生成し褐色に変化する。そして、ドリル削孔粉を試料として用いると、塩化物イオン浸透部と未浸透部の2つの領域が混合して採取される可能性があるため、表層から20mm~30mmのように薄い褐色となる領域もある。

2.4 ドリル法の変色境界における塩化物イオン量の測定

塩化物イオン量の測定のために、2.3と同様の手順で試料を採取した。そして、それぞれの採取箇所における可溶性塩化物イオン量および全塩化物イオン量をJCI-SC4によって求めた。なお、

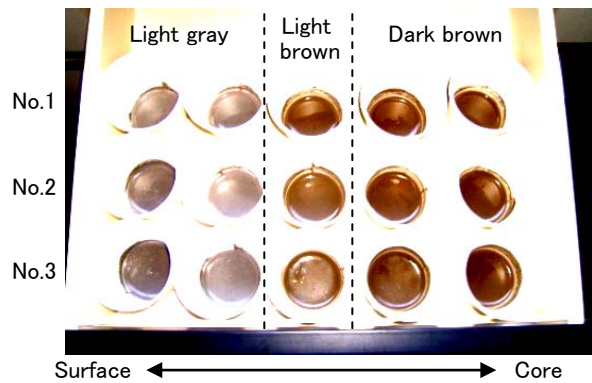


Fig.2 Discolored boundary by using drilling powder

JCI-SC4では試料が40gと規定されているが、今回の実験では1回の削孔による試料(約5g)に含まれている塩化物イオン量を求めることを目的としているため、可溶性塩化物イオンを求める場合には3~4g、全塩化物イオン量を求める場合には1gの試料とした。また、試料の量が少ないため、ろ過においては、ろ紙5種Bではなく0.45μmのメンブランフィルターを使用し、分取できる限りの量を分取した。試料が少ないことによる試験結果への影響については、ほとんどないことを事前に確認している。

3. 実験結果および考察

3.1 ドリル法の変色境界における可溶性塩化物イオン量

コンクリート表面からの距離と可溶性塩化物イオン量の関係は、図3に示す通りである。今回の実験では、水セメント比が45%および55%の場合に、薄い灰色となる領域がコンクリート表面から20mmまで、薄い褐色となる領域が20mm~30mm、褐色となる領域が30mm~50mmとほぼ同じ領域に判定された。一方、水セメント比が65%になると、その領域がコンクリート内部に10mmシフトした。

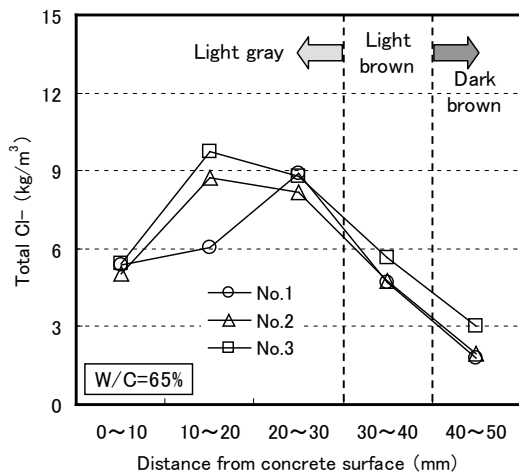
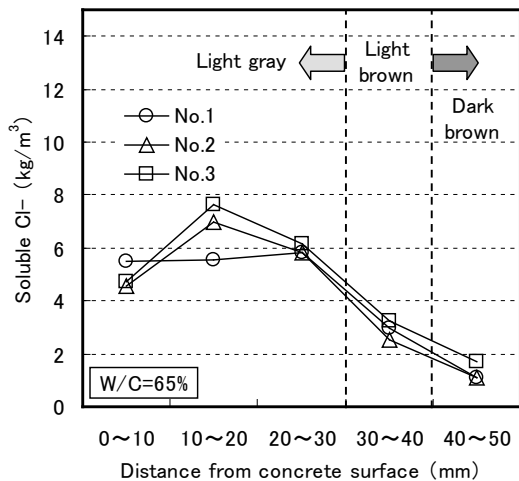
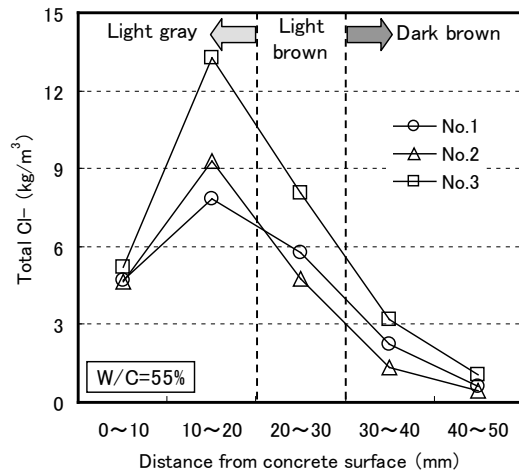
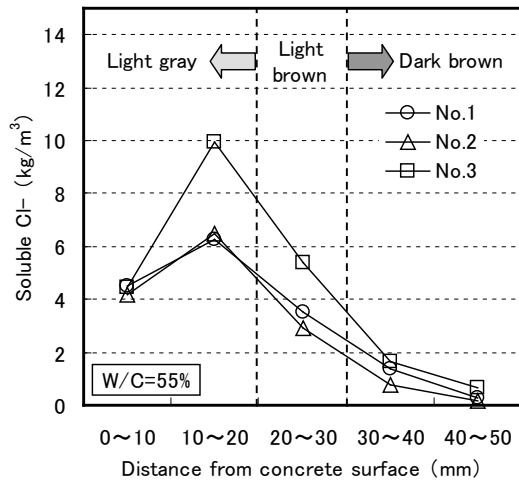
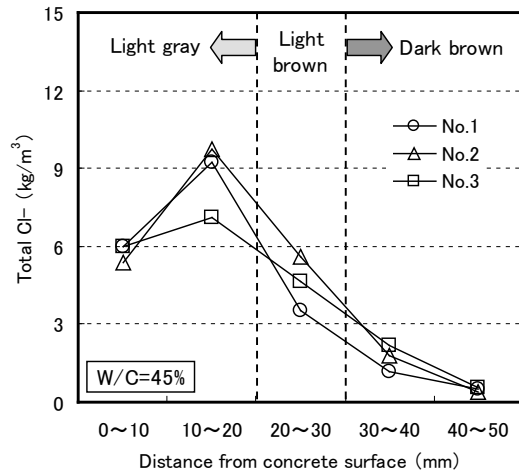
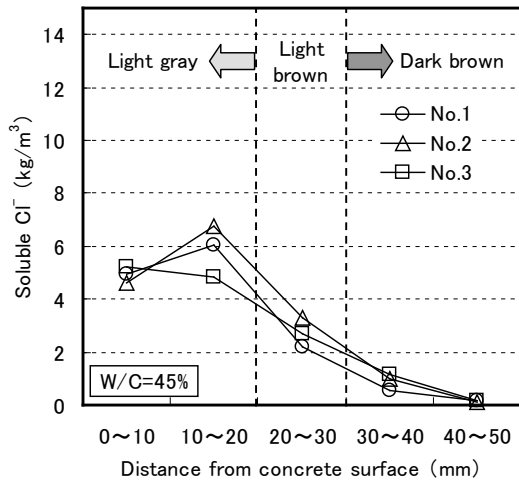


Fig.3 Relation between distance from concrete surface and soluble Cl⁻

Fig.4 Relation between distance from concrete surface and total Cl⁻

表層部のように塩化物イオン量が多く含まれる薄い灰色となる領域の可溶性塩化物イオン量は、概ね 4 kg/m³以上となった。また、薄い褐色となる領域は、水セメント比 55%の3箇所目の削孔の1つを除き概ね 2~4 kg/m³となった。これらのこ

とより、ドリル法において、10mm ずつ削孔しながら試料と硝酸銀溶液を混合することによる色の変化を確認していく際に、薄い灰色から薄い褐色に変わるところが最も変色境界として判定しやすく、その境界は可溶性塩化物イオン量が 4 kg/m³

を下回ったときに現れると考えられる。

硝酸銀噴霧法による境界と同程度に判定されるドリル法の褐色となる領域における可溶性塩化物イオン量は、概ね 2 kg/m^3 未満となった。大即ら

究⁶⁾に照らし合わせるとかなりの確率で鉄筋が腐食する塩化物イオン量を含んでいると考えられる。また、褐色となる領域では、全塩化物イオン量が概ね 3 kg/m^3 未満となった。

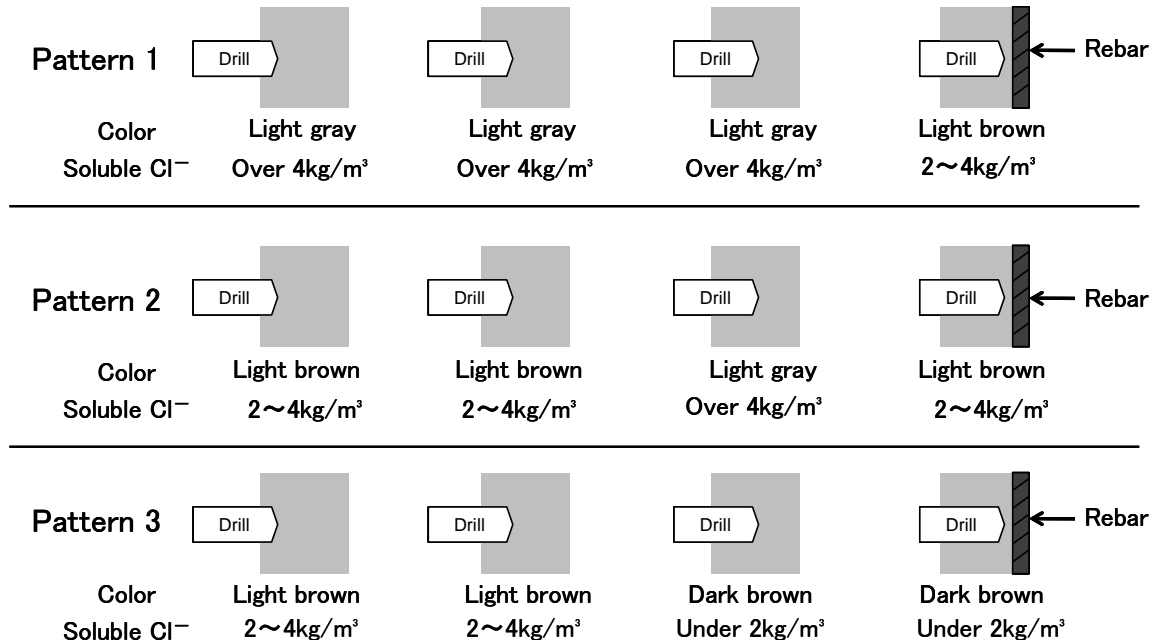


Fig.5 Pattern of simple testing to measure chloride ion penetration depth of concrete by using drilling powder and AgNO_3 solution

は硝酸銀噴霧法の変色境界の可溶性塩化物イオン量は $0.4 \sim 0.75 \text{ kg/m}^3$ と示しており^{1,2)}、今回の実験の方がやや多めになった。

また、それぞれの供試体の3箇所を削孔した結果から、可溶性塩化物イオン量のばらつきは小さく、削孔箇所は3箇所です十分であると考えられる。

3.2 ドリル法の変色境界における全塩化物イオン量

コンクリート表面からの距離と全塩化物イオン量の関係は、図4に示す通りである。塩化物イオン量が多く含まれる薄い灰色となる領域の可溶性塩化物イオン量は、概ね 6 kg/m^3 以上となった。薄い褐色となる領域の全塩化物イオン量は概ね $3 \sim 6 \text{ kg/m}^3$ であるが、これはコンクリート表面から 10 mm の間での全塩化物イオン量とも近い値を示した。このことは、ドリル法は全塩化物イオン量よりも、可溶性塩化物イオン量との相関性が良いことを示していると考えられる。しかし、今回のドリル法の実験では、薄い灰色から薄い褐色になるところは、全塩化物イオン量が概ね $3 \sim 6 \text{ kg/m}^3$ が境目になると考えられ、森本らの発錆限界の研

3.3 ドリル法の現場での適用

ドリル法を現場で適用する場合には、図5に示した例で、鉄筋の腐食の可能性を判断するとよいと考えられる。パターン1は、コンクリート表面から順次薄い灰色を示し、コンクリート内部に埋め込まれている鉄筋付近で薄い褐色に変化した場合で、鉄筋が腐食する可能性がある。また、パターン2は、コンクリート表面で薄い褐色を示したが、その後の削孔で薄い灰色に変化する場合である。これは、コンクリート表層部の中性化による塩化物イオンの内部への濃縮現象によるもので、コンクリート構造物の中性化が進行している場合に見受けられると考えられる。すなわち、1回目の削孔で薄い灰色に変色しなくても、中性化による塩化物イオンの内部への濃縮を考慮して、削孔を続け、鉄筋の腐食の可能性を判断する必要がある。一方、パターン3のように、薄い灰色を示す箇所がなく、鉄筋付近でも褐色を示す場合には、鉄筋が腐食する可能性は低いと考えられる。

4. まとめ

- (1) ドリル法による変色境界における可溶性塩化物イオン量を調べた結果, 薄い灰色となる領域は概ね 4kg/m^3 以上, 薄い褐色となる領域は概ね $2\text{kg/m}^3 \sim 4\text{kg/m}^3$, 褐色となる領域は概ね 2kg/m^3 未満であった.
- (2) ドリル法による変色境界における全塩化物イオン量を調べた結果, 薄い灰色となる領域は概ね 6kg/m^3 以上, 薄い褐色となる領域は概ね $3\text{kg/m}^3 \sim 6\text{kg/m}^3$, 褐色となる領域は概ね 3kg/m^3 未満であった.
- (3) ドリル法による変色境界の塩化物イオン量は, 全塩化物イオン量より可溶性塩化物イオン量との相関性が良いと考えられる.
- (4) ドリル法において, 10mm ずつ削孔しながら試料と硝酸銀溶液を混合することによる色の変化を確認していく際には, 薄い灰色から薄い褐色に変わるところが最も変色境界として判定しやすく, かなりの確率で鉄筋が腐食する境界と考えられる.
- (5) ドリル法は, コンクリート構造物の塩化物イオンの浸透状態を把握する試験の中でかなり簡易な方法であるため, 構造物のモニタリングにも適用できると考えられる.

謝 辞

本研究を行うにあたり, 三菱マテリアル株式会社の鳴瀬

浩康氏, 井上敏克氏, ならびに澤本研究室の大学院生, 卒論生に多大なご協力をいただきました. ここに記して深謝いたします.

文 献

- 1) 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
- 2) Nobuaki Otsuki, Shigeyoshi Nagataki, Kenji Nakashita: Evaluation of AgNO_3 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
- 3) 藤原翼, 澤本武博, 舌間孝一郎, 湯浅昇, 笠井芳夫: ドリル削孔粉を用いた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, (社)日本非破壊検査協会, シンポジウムコンクリート構造物の非破壊検査論文集(Vol.3), pp.313-318, 2009.8
- 4) 藤原翼, 澤本武博, 舌間孝一郎, 地頭菌博, 湯浅昇, 笠井芳夫: ドリル削孔粉を用いた塩分浸透深さの簡易測定に及ぼすドリルの影響, (社)日本非破壊検査協会, 平成 22 年度春季講演大会講演概要集, pp.129-132, 2010.5
- 5) 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, (社)セメント協会, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.196-202, 2011.2
- 6) 森本登志也, 小堀光憲, 高木兼士: 塩分を含んだコンクリート中の鉄筋腐食に関する研究, (社)日本コンクリート工学協会, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.351-355, 1987