

論文 硫酸侵食による鉄筋コンクリートの劣化に関する基礎的研究

伊藤 真利子^{*1}・宮本 慎太郎^{*1}・皆川 浩^{*2}・久田 真^{*3}

要旨：本研究では、硫酸侵食に起因する鉄筋腐食の劣化機構解明のために、劣化深さとセメント硬化体に浸透する硫酸イオン量に注目し、硫酸が侵入してから鉄筋が腐食するまでについて総合的に検討した。変質層および中性化フロントから深さ方向に 2 mm ごとに硫酸イオンの浸透量を測定したところ、中性化フロントから 2 mm より深部では硫酸イオンはほとんど浸透していなかった。また、中性化残りが 2 mm 以下の供試体では、鉄筋近傍に浸透した硫酸イオン量により、鉄筋腐食の可能性が高くなることが明らかになった。また、ひび割れの有無が硫酸侵食による鉄筋腐食に与える影響についても検討した。

キーワード：硫酸，鉄筋腐食，中性化残り，浸透硫酸イオン量，ひび割れ，高炉スラグ微粉末

1. はじめに

コンクリートは様々な環境に曝されているが、人々の生活に身近なものとして、下水道施設環境下が挙げられる。下水道施設においては、下水汚泥中の硫酸塩物質に由来する硫酸がコンクリートを侵食する。近年、硫酸により侵食された下水管に係る道路陥没事故が数多く発生しており、老朽化した下水道施設の改築、更新は急務である。コンクリートの硫酸侵食についての研究は多く、様々な知見が得られているものの、劣化予測手法の確立に至っていないのが現状であり、正確かつ簡便な劣化予測手法を確立しなければならない。

硫酸濃度とセメント硬化体の侵食の関係について、硫酸濃度がおおよそ 1.0 % 以上では水セメント比（以下、W/C）が小さいほど侵食が促進される¹⁾のに対し、硫酸濃度が 0.1 % 程度では高 W/C ほど侵食が促進される²⁾ことが明らかになっている。また、3.0 % の硫酸に浸漬した場合と、0.5 % および 1.0 % 硫酸に浸漬した場合では中性化深さの経時変化が異なるという結果も明らかにされている³⁾。実際の下水道環境下の硫酸濃度は 0.1～1.0 % 程度であるので、このように硫酸濃度による劣化形態の違いをどのように劣化予測に取り入れるかということが今後、重要である。

また、既往の研究⁴⁾においては、硫酸濃度が 3.0 % の場合、硫酸侵食に起因する鉄筋の腐食は、鉄筋近傍のモルタル中硫酸イオン濃度と最小中性化残りによって整理できる可能性が示されている。硫酸によるセメント硬化体の劣化のみならず、鉄筋の腐食発生条件を考慮することにより、実環境に即した劣化予測が可能であると考えられる。しかしながら、硫酸によるセメント硬化体の劣化、硫酸による鉄筋腐食それぞれに着目した研究が多く、硫酸による鉄筋コンクリートの劣化機構について総合

的に検討した例は少ない。

以上をふまえ、本研究では硫酸による鉄筋コンクリートの劣化機構解明のために、硫酸がセメント硬化体に侵入し、鉄筋腐食するまでの過程を整理することを目的とした。劣化深さおよび中性化残りに加え、中性化フロントより深部に浸透した硫酸イオン量に着目し、これらが硫酸濃度や配合によってどのような影響を受けるかについて検討した。また、鉄筋コンクリート構造物において耐久性を低下させる主要因としてひび割れを導入した供試体を作製し、ひび割れの有無によって硫酸侵食および鉄筋腐食が受ける影響についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究では、結合材として普通ポルトランドセメント（密度 3.17 g/cm³，比表面積 3320 cm²/g）と、硫酸侵食の抑制効果が期待される高炉スラグ微粉末（密度 2.91 g/cm³，比表面積 7980 cm²/g）を使用した。また、細骨材として宮城県大和町鶴巣産の山砂（密度 2.57 g/cm³，吸水率 1.06 %）を使用した。

2.2 配合

本研究では、水結合材比（以下、W/B）を 35 %，55 %，65 %，砂結合材比（以下、S/B）を 2.5 とする 3 水準の配合のモルタルを基本とし、さらに W/B = 55 % のみ、S/B = 0.0 とした配合と、S/B = 2.5 で混和材として高炉スラグ微粉末を使用した配合を設けた。高炉スラグ微粉末を使用した配合は、結合材の 50 % を重量置換した。供試体の配合および記号を表 - 1 に示す。

なお、練混ぜ直後のフロー値を 220±20 の範囲に収まるようにするため、NC35、NC35c では減水剤（主成分：ナフタレンスルホン酸塩）を用い、NCP55 では材料分離

*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻助教 工博（正会員）

*3 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻准教授 工博（正会員）

表-1 供試体の配合および記号

記号		W/B (%)	S/B	単位量 (kg/m3)			
ひび割れ 無	ひび割れ 有			水 W	結合材 B		細骨 材 S
					セメン ト C	高炉ス ラグ微 粉末 F	
NC35	NC35c	35	2.5	210	601	0	1501
NC55	NC55c	55	2.5	299	535	0	1338
BB55	BB55c	55	2.5	299	268	268	1338
NC65	NC65c	65	2.5	330	508	0	1269
NCP55	－	55	0	625	1135	0	0

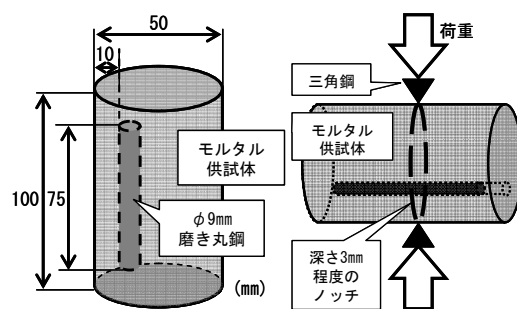


図-1 供試体の寸法 図-2 ひび割れの導入

を抑制するために増粘剤（メチルセルロース系）を用いた。

2.3 供試体の作製

供試体の寸法は $\phi 50 \times 100$ mm とし、図-1 に示すように、かぶりを 10 mm として供試体軸方向に直径 9 mm、長さ 75 mm の磨き丸鋼を配置した。

全ての供試体は JIS R 5201 に準拠して打設し、湿気箱にて 24 時間初期養生を行った後、脱型した。脱型した供試体は、20℃一定で材齢 28 日まで水中養生させた。

ひび割れを導入しない供試体については水中養生終了後、供試体側面が暴露面となるように供試体底面および打設面をアクリル樹脂系ライニング材にて被覆した。また、ひび割れを導入する供試体については図-2 に示すように、目標ひび割れ幅 0.2 mm として割裂ひび割れを発生させた後、同様に被覆した。なお、各供試体のひび割れ幅を測定したところ、0.15~0.35 mm の範囲であった。

2.4 浸漬方法

本研究で浸漬実験に用いた硫酸の濃度は重量パーセント濃度で 0.5 %、0.7 %、1.0 %、3.0 % である。浸漬実験には内寸 290×450×170 mm の蓋付プラスチック容器を使用し、各容器に設置する全供試体の体積と硫酸の容積の比はおおむね 7 とした。供試体は打設時の型枠底面を下にして、供試体の全体が硫酸に浸漬されるように設置した。硫酸は 1 週間に 1 度全量交換し、20℃の恒温条件下にて浸漬実験を行った。なお、全ての供試体は暴露面およびひび割れ断面を飽水状態にするため、浸漬開始直前まで水中に浸漬させた。これは、浸漬開始時に乾燥による吸水作用を抑制する目的で行った。

2.5 測定項目

(1) 侵食深さ

侵食深さは、浸漬開始前と所定材齢の供試体の直径の差を 1/2 にした値と定義した。供試体の直径の測定は 1 週間に 1 度、ノギスを用いて行った。測定箇所は供試体

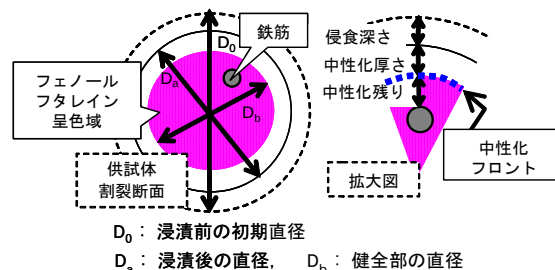


図-3 劣化深さの定義

中央と中央部から上下 30 mm の箇所の 3 点とし、その平均を供試体の直径とした。所定材齢の供試体の直径が初期の直径よりも小さい場合、侵食深さを正の値、一方、膨張して所定材齢の供試体の直径が初期直径よりも大きい場合は侵食深さを負の値とした。

(2) 中性化厚さ

ひび割れの無い供試体については、浸漬開始から 4 週、8 週、16 週経過した時点で一水準につき 2 本ずつ、供試体中央部で供試体軸方向と垂直に割裂した。ただし、鉄筋が露出してしまった場合は、鉄筋の露出を確認する度にその供試体を割裂した。また、ひび割れを導入した供試体については浸漬開始から 8 週経過した時点で一水準につき 3 本ずつ供試体を割裂した。

供試体割裂後、直ぐにフェノールフタレイン 1 % 溶液を噴霧した。フェノールフタレイン 1 % 溶液によって呈色する部分を健全部、呈色しない部分を中性化領域とした。健全部の直径を測定することにより、割裂時の供試体の直径と健全部の直径との差の 1/2 を中性化厚さとした。(図-3)

(3) 中性化残り

ひび割れの無い供試体については、侵食領域および中性化領域を同心円状とみなし、中性化残りを図-3 に示したように定義し、かぶり厚さから中性化厚さと侵食深さを引いて中性化残りを求めた。またひび割れを導入した供試体については中性化フロントと鉄筋との距離をノギスで測定し、最も小さい値を中性化残りとした。

(4) 浸透硫酸イオン量

供試体を割裂した後、図-4 に示すように、変質層と

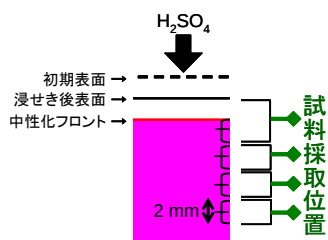


図-4 試料採取間隔および位置

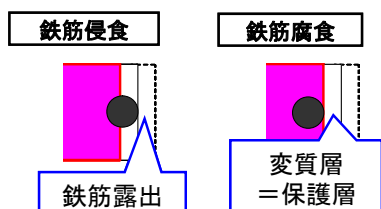


図-5 鉄筋侵食と鉄筋腐食

中性化フロントから内部 2.0 mm 部分のモルタルをグラインダーで削り取り、粉末試料を採取した。粉末試料 2.0 g に塩酸 HCl (1+6) 70 mL を加え、マグネティックスターラーで 30 分間攪拌後、5 分間静置した。その後、ろ紙を用いてろ過し、ろ液を 200 倍に希釈して、試料中の硫酸イオン濃度をイオンクロマトグラフィーにより測定した。硫酸浸漬前の初期の供試体からも同様に試料を採取し、初期の硫酸イオン濃度を測定した。そして、測定したモルタル中の硫酸イオン濃度と初期の硫酸イオン濃度との差を浸透硫酸イオン濃度 C_L (mol/L) と定義した。

また、重量差法によって浸漬前の供試体の空隙率および真密度を測定した。その後、浸透硫酸イオン濃度 C_L 、浸漬前の供試体の空隙率および真密度を用いて浸透硫酸イオン量 C_V (mol/cm³) を求めた。浸透硫酸イオン量の算定式を式(1)、(2)に示す。

$$C_M = C_L \times \frac{V}{M} \quad (\text{mol/g}) \quad (1)$$

$$C_V = C_M \times \frac{\rho_{con} \times V \times \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)}{V} \quad (\text{mol/cm}^3) \quad (2)$$

ここで、 C_M ：イオンクロマトグラフィーにより測定した浸透硫酸イオン量(mol/g)、 C_L ：イオンクロマトグラフィーにより測定した浸透硫酸イオン濃度(mol/L)、 V ：測定溶液の体積（本研究では 70 mL）、 M ：粉末の質量（本研究では 2.0 g）、 ρ_{con} ：モルタルの真密度(g/cm³)、 V ：セメント硬化体の単位体積(cm³)、 ε ：空隙率(%)

さらに、一部の水準では、中性化フロントから内部 2.0 ～4.0 mm、4.0～6.0 mm というように、深さ方向 2.0 mm ずつ深部のモルタルについても同様の手順で浸透硫酸イオン量を求めた。これを浸透硫酸イオン量が 0 (mol/cm³)となる深さまで続けた。(図-4)

(5) 腐食面積

供試体割裂後、鉄筋を取り出し、目視で腐食発生の有無を確認した。腐食が確認できた場合、鉄筋の腐食程度

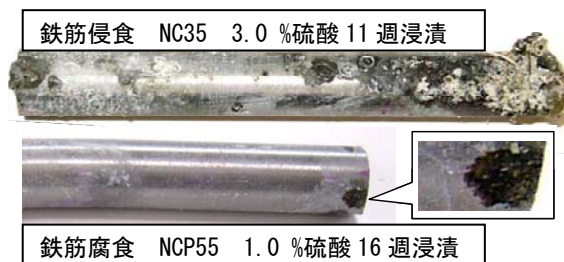


写真-1 鉄筋の腐食状況

表-3 鉄筋腐食の結果

記号	硫酸濃度 (%)	浸漬期間 (週)	形態	中性化残り (mm)	腐食面積率 (%)	中性化フロント内部 2.0mmの浸透硫酸イオン量 (mol/cm ³)
NC35	3.0	11	鉄筋侵食	0	5.97	0.0017
NC55	3.0	11		0	1.88	0.0019
NC65	3.0	11		0	6.17	0.0019
NCP55	1.0	16	鉄筋腐食	0	0.099	0.0052

を把握するために JCI - SC1 に準拠して腐食面積率を測定した。

3. 結果と考察

3.1 硫酸濃度や配合が鉄筋腐食に与える影響（ひび割れ無）

(1)鉄筋腐食と鉄筋侵食の違い

ひび割れの無い供試体で、NC35, NC55, NC65 の 3.0 % 硫酸浸漬で、すべて浸漬 11 週で、1 本ずつ鉄筋が露出して侵食し、また NCP55 の 1.0 % 硫酸浸漬では浸漬 16 週で 1 本の鉄筋が腐食した。本研究では、鉄筋が露出して侵食されたものを「鉄筋侵食」、鉄筋が露出することなく鉄筋腐食が確認されたものを「鉄筋腐食」と呼ぶことにする。鉄筋侵食と鉄筋腐食の概念図を図-5 に示す。同一水準で鉄筋侵食や鉄筋腐食が生じた供試体は他になかった。同一水準で侵食深さおよび中性化厚さに違いはなかったが、鉄筋侵食や鉄筋腐食が生じた供試体に限り、鉄筋位置が数 mm ずれてしまっていたために、かぶりが 10 mm に満たなかった。鉄筋侵食が生じた供試体の中性化残りは 0 mm、鉄筋腐食が生じたものは変質層が残っていたものの、中性化残りは 0 mm であった。

本研究で得られた鉄筋腐食に関する諸結果を表-2 に腐食状況を写真-1 に示す。鉄筋の露出によって生じた腐食面積率は露出を伴わない鉄筋腐食の腐食面積率と比較して大きく、また、露出部分のみならず、露出していない深部まで侵食が進行していた。よって、一旦鉄筋が露出すると、鉄筋侵食は深部にわたって急速に進行していくことがわかる。また、鉄筋侵食が生じた供試体の中性化フロント近傍の硫酸イオン量よりも鉄筋腐食が生じた供試体の中性化フロント近傍の硫酸イオン量の方が 4 倍以上大きかった。よって、鉄筋侵食は変質層の剥落により、中性化フロント近傍の浸透 SO₄²⁻量が少なくても生じていることが認められる。一方、変質層が残っている場合、変質層が中性化フロントの保護層として

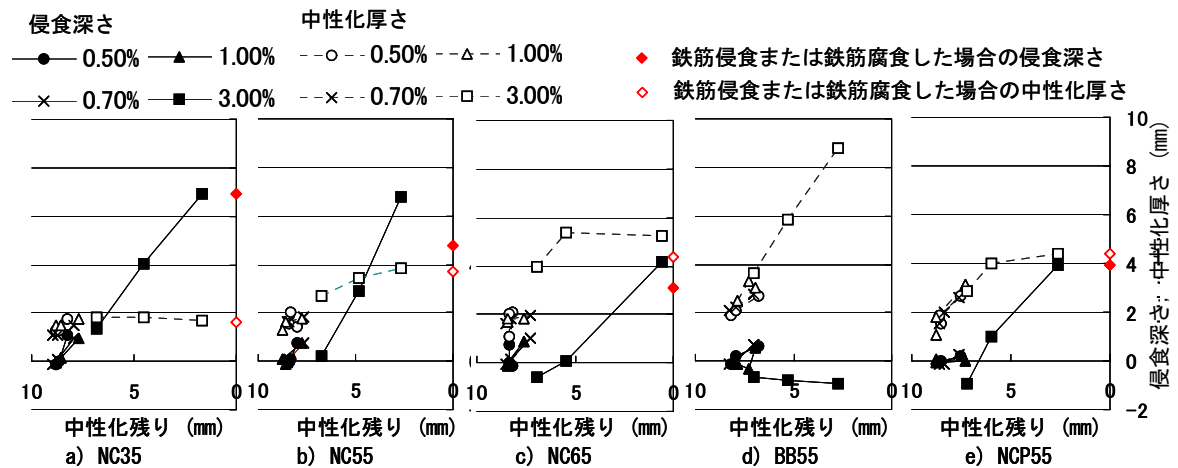


図 - 6 侵食深さおよび中性化厚さと中性化残りとの関係

機能する³⁾だけではなく、鉄筋の保護層として機能したために、中性化フロント近傍の浸透 SO_4^{2-} 量が 0.0052 mol/cm^3 程度になるまで、鉄筋腐食しなかったと考えられる。以下、中性化残りと浸透硫酸イオン量を鉄筋腐食の影響因子として考察する。

(2) 侵食深さおよび中性化厚さと鉄筋腐食との関係

図 - 6 に浸漬期間 4～16 週の暴露材齢で得られた侵食深さおよび中性化厚さと中性化残りとの関係を示す。すべての水準で最長暴露材齢時の中性化残りが最も小さかった。

本研究の浸漬期間では、NCP55 の 1.0 % 硫酸浸漬を除き、1.0 % 以下硫酸浸漬での中性化残りは 7.0 mm 以上であった。したがって、3.0 % 硫酸浸漬と比較して 1.0 % 以下硫酸浸漬では、中性化残りが大きいため、鉄筋腐食も生じなかった。

NC35, NC55, NC65 (以下、まとめて NC 系の 3 配合) の 3.0 % 硫酸浸漬を見ると、低 W/C ほど侵食深さは大きく、中性化厚さおよび中性化厚さの変化量は小さくなり、既往の知見^{1),3)}と同様であった。また、NC 系の 3 配合の 3.0 % 硫酸浸漬では、侵食深さの増加量 (図 - 6 の実線の傾き) と比較して、中性化厚さの増加量 (図 - 6 の点線の傾き) が大変小さいことから、本研究の条件下では、3.0 % 硫酸浸漬 NC 系の 3 配合の中性化残りは侵食深さの増加の影響を大きく受けている。なお、本研究の浸漬期間での 3.0 % 硫酸浸漬 NC 系の 3 配合のうち、鉄筋が腐食しなかった供試体の中性化残りの最小値は NC35 で 1.64 mm (最終材齢 11 週)、NC55 で 2.7 mm (最終材齢 14 週)、0.59 mm (最終材齢 16 週) であった。

一方、BB55 の 3.0 % 硫酸浸漬は、侵食深さが負で侵食深さの絶対値が小さいのに対し、中性化厚さが大きいのが特徴である。したがって 3.0 % 硫酸浸漬の BB55 の中性化残りは中性化厚さの影響を大きく受けることが明らかになった。3.0 % 硫酸浸漬の BB55 および NC55 と合わせて考えると、高炉スラグ微粉末を使用した場合には、

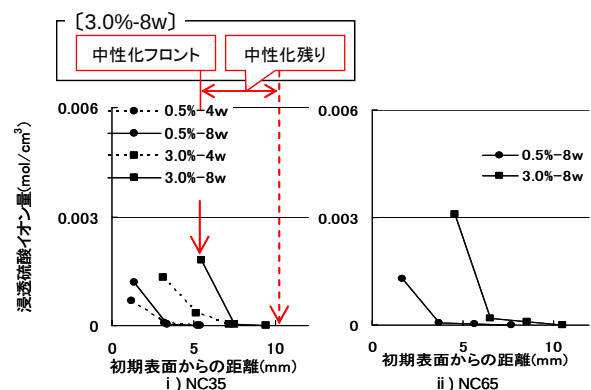


図 - 7 初期表面からの距離と浸透硫酸イオン量との関係

中性化残りは中性化厚さと関係が強く、使用しない場合では、中性化残りは侵食深さと関係が強いことがわかった。

(3) 浸透硫酸イオン量と中性化残りの関係

NC35 と NC65 における中性化フロントから鉄筋近傍までの浸透硫酸イオン量の深さ方向の分布を図 - 7 に示す。試料を採取した位置の中性化フロントからの深さを浸漬前の初期表面からの距離を基準として考察した。また、図 - 7 では、各系列の左端の点から順に、変質層と中性化フロント内部 2.0 mm まで、中性化フロントから 2.0～4.0 mm に 2 mm 間隔で浸透硫酸イオン量をプロットしたものである。

NC35 について、0.5 % 硫酸の浸漬 4 週と浸漬 8 週を比較すると、変質層と中性化フロント内部 2.0 mm の浸透硫酸イオン量 (以下、中性化フロント近傍の浸透 SO_4^{2-} 量) はそれほど大きくなっておらず、侵食深さおよび中性化厚さが小さいために、中性化フロントの位置もあまり変化していない。また、浸漬期間によらず、中性化フロント近傍の浸透 SO_4^{2-} 量は大きいのに対し、中性化フロントから 2.0～4.0 mm よりも深部の浸透 SO_4^{2-} 量はかなり小さく、中性化フロントから 4.0～6.0 mm の浸透 SO_4^{2-} 量は 0 mol/cm^3 となった。NC35 の 3.0 % 硫酸の 4 週浸漬と 8 週浸漬を比較すると、侵食深さおよび中性化厚

さが大きいために、中性化フロントの位置が鉄筋に近づいたが、中性化フロント近傍の浸透 SO_4^{2-} 量の 4 週と 8 週での変化は小さい。また、中性化フロントから 2.0～4.0 mm の浸透 SO_4^{2-} 量はかなり小さく、中性化フロントから 4.0 mm より深部には硫酸イオンは浸透していなかった。なお、この傾向は、NC55 および NC65 でも同様のことがいえる。

また、NC65 について、3.0 %硫酸 8 週浸漬を見ると、中性化フロントから 4.0～6.0 mm は初期表面から 10 mm 前後の位置であり、鉄筋近傍にまで硫酸イオンが浸透していて、浸透 SO_4^{2-} 量は $8.1 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3$ であった。3.0%硫酸 8 週浸漬では鉄筋腐食は発生しなかったため、鉄筋に硫酸イオンが到達しても、浸透量が $8.1 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3$ 程度では鉄筋は腐食しないことが明らかになった。

以上より、中性化フロントから 2.0 mm より深部では、浸透 SO_4^{2-} 量はかなり小さく、 0 mol/cm^3 では鉄筋腐食は生じないとみなすと、硫酸イオンの浸透については中性化フロントから内部 2.0 mm まで考えればよいことになる。つまり、鉄筋位置が中性化フロントから内部 2.0 mm の範囲にあり、この範囲の浸透 SO_4^{2-} 量がある値を超えると鉄筋腐食が生じると考えられる。したがって、今後、鉄筋腐食が発生する限界 SO_4^{2-} 量を特定する必要がある。

図 - 8 に中性化フロント近傍の浸透 SO_4^{2-} 量と中性化残りの関係を示す。この他に中性化残りが 0 mm より大きく、2.0 mm 以下となったのは NC35 および NC65 の 3.0 %硫酸浸漬の 2 ケースで、中性化フロント近傍の浸透硫酸 SO_4^{2-} 量は 0.0019 mol/cm^3 および 0.0017 mol/cm^3 であったが、いずれも鉄筋腐食は生じなかった。

ほとんどの水準で、供試体内部の鉄筋に変化は少なく、中性化残りも大きいため、鉄筋腐食の条件を特定することは難しいが、中性化フロント近傍の SO_4^{2-} 量について以下のことがわかった。すなわち、各配合の 1.0 %硫酸浸漬と 3.0 %硫酸浸漬を比較すると、その差は最大でも 2 倍程度であり、外部溶液の硫酸濃度と中性化フロント近傍の SO_4^{2-} 量は比例しない。また、BB55 について見ると、硫酸濃度および中性化残りによらず、中性化フロント近傍の SO_4^{2-} 量は小さい。したがって、高炉スラグ微粉末の使用により、中性化フロントより深部への硫酸イオンの浸透が抑制されることが明らかになった。

本研究の浸漬期間では鉄筋が侵食および腐食された本数は少ないものの、中性化残りと中性化フロント近傍 SO_4^{2-} 量を用いて腐食条件が整理できると考えられる。

3.2 ひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響

(1) 鉄筋腐食

浸漬開始から 8 週を経たひび割れを導入した供試体では、NC55c の 3.0%硫酸浸漬の供試体のうち 1 本で腐食が

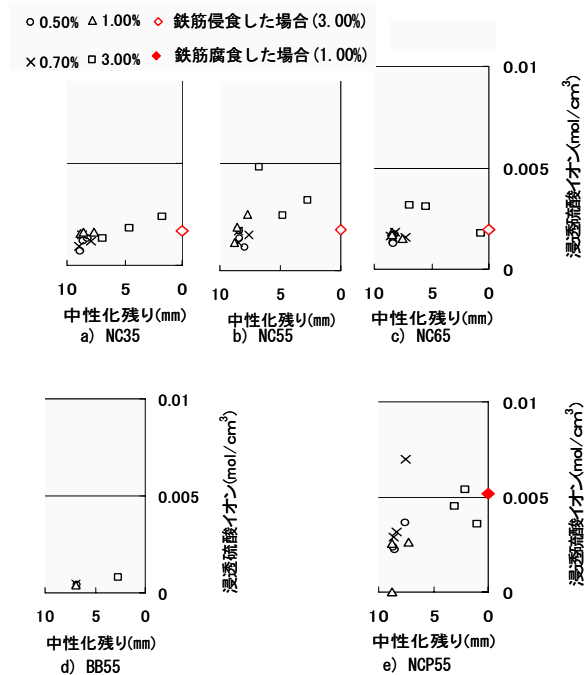


図 - 8 中性化残りと浸透硫酸イオン量の関係

確認された。鉄筋は露出しておらず、腐食面積率は 0.089 %であり、ひび割れ無供試体の鉄筋腐食の面積率と同様に小さかった。また鉄筋腐食部分の中性化残りは 0 mm であった。鉄筋腐食はひび割れ断面で生じており、ひび割れが鉄筋近くまで到達していたために、硫酸がひび割れ断面に浸透し、中性化残りが 0 mm となるとともに、中性化フロント近傍の浸透 SO_4^{2-} 量が大きくなって鉄筋が腐食したと考えられる。

(2) 中性化厚さおよび中性化残り

目視でひび割れの閉塞を観察したところ、配合によらず、3.0 %硫酸浸漬ではすべての配合で浸漬 1 週目、0.5 %, 0.7 %, 1.0 %硫酸浸漬では浸漬 1～3 週目でひび割れが閉塞した。既往の研究⁵⁾により、硫酸がひび割れ断面に作用すると、硫酸イオンの浸透によりカルシウム成分が溶出することが得られているが、本研究においても、ひび割れ断面にて硫酸と水酸化カルシウムが反応したことにより、ひび割れが閉塞したと考えられる。写真 - 2 はひび割れを導入した供試体の浸漬開始 8 週の供試体割裂写真である。なお、写真で確認できる供試体の割れは、鉄筋を採取するために割裂した結果、生じたものであるため、今回の考察対象外である。写真とともに、初期導入ひび割れ幅、中性化厚さの最小値と最大値を示した。

NC35c の 0.5 %, 0.7 %硫酸浸漬の中性化領域は同心円状であるが、NC35c の 1.0 %, 3.0 %硫酸浸漬では同心円状ではない。また、硫酸濃度が一定で、配合による影響について見ると、NC35c の中性化厚さの最大値および最小値は、NC55c, NC65c の最大値および最小値より小さい。NC 系の 3 配合では、低 W/C ほど中性化厚さの進行

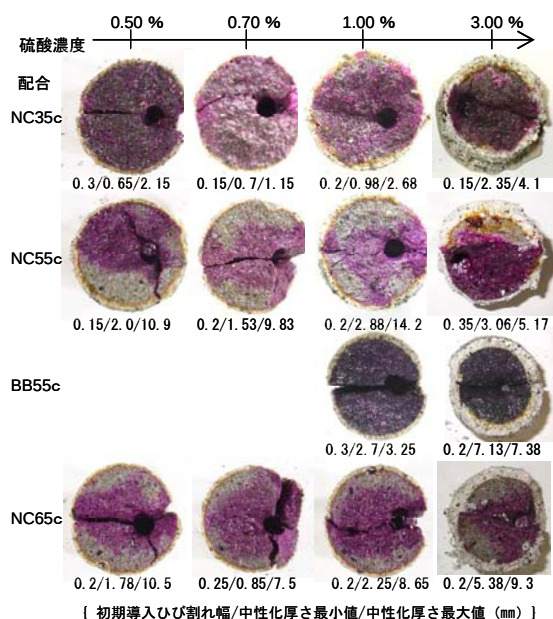


写真 - 2 浸漬 8 週でのひび割れ内部

(ひび割れ供試体)

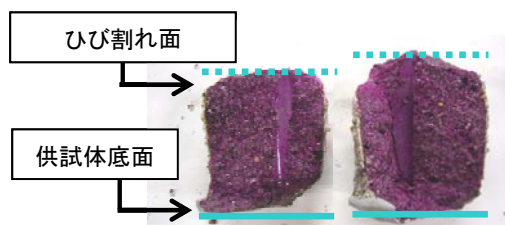


写真 - 3 浸漬 8 週での軸方向割裂断面

(NC55c - 1.00 %)

速度が小さい³⁾ので、ひびわれが閉塞するまでの期間で、NC55c および NC65c と比較して、NC35c の中性化した領域が小さかったためであると考えられる。

また、BB55c においても、中性化領域は同心円状となった。図 - 6 の BB55 についてみれば、他の配合と比較して、BB55 の中性化厚さの進行速度は速い。したがって、BB55c ではひび割れ断面の中性化よりも供試体側面からの中性化が速く、中性化領域が同心円状になったと考えられる。

さらに供試体を軸方向に割裂し、ひび割れ断面の供試体軸方向にもフェノールフタレイン 1.0 % 溶液を噴霧したところ、写真 - 3 に示すように、いずれの供試体も軸方向断面では全領域が呈色した。浸漬開始からひび割れが閉塞するまでに、硫酸がひびわれ断面内部へ浸透し、ひび割れ断面は中性化したものの、ひび割れ断面の深さ方向は中性化しなかった。

本研究では導入ひび割れ幅の最大値を 0.2 mm 程度としただけであるので、個々の供試体でのひび割れ深さに違いがある可能性があり、ひび割れ深さと中性化厚さの大小の関係は不明である。しかしながら、ひび割れのあ

る供試体ではひび割れが閉塞するまでに、ひび割れ断面で中性化が進行していることが確認できた。

4. 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 硫酸によるセメント硬化体中の鉄筋の腐食形態について、鉄筋の露出の有無により、二通りに分類した。「鉄筋腐食」は変質層が鉄筋の保護層として働く場合であり、「鉄筋侵食」は変質層の剥落により保護層を失う場合で、鉄筋侵食の腐食面積は鉄筋腐食の腐食面積よりも大きかった。
- (2) 侵食深さおよび中性化厚さと中性化残りの関係について、中性化フロントへの浸透硫酸イオン量を配合および硫酸濃度によって整理した。その結果、中性化残りが 2.0mm 以下のとき、中性化フロント近傍の浸透硫酸イオン量により、鉄筋腐食の可能性が大きくなることがわかった。
- (3) 本研究の条件下では、ひび割れを導入した場合、ひび割れのない場合と比較して、ひび割れ内部の中性化領域は広がるものの、鉄筋腐食について顕著な違いはなかった。硫酸侵食による鉄筋腐食に対して、ひび割れが与える影響を検討するには、さらに長期間の浸漬実験が必要である。
- (4) 高炉スラグ微粉末を混和材として使用した場合、ポルトランドセメントのみの場合と比較して、硫酸による侵食深さは小さくなるが、中性化厚さが大きくなり、中性化残りは中性化厚さと関係が強く、また、中性化残りおよび硫酸濃度によらず、中性化フロント近傍の浸透硫酸イオン量は少なくなることが明らかになった。

参考文献

- 1) 蔵重勲：硫酸によるコンクリート劣化メカニズムと予測手法，東京大学博士論文，2002
- 2) 寺林明日美ほか：セメント硬化体の硫酸による劣化に硫酸濃度が与える影響についての研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.921-926，2007.7
- 3) 宮本慎太郎ほか：セメント硬化体の硫酸劣化メカニズムに関する基礎的研究，Vol.30，No.1，pp.627-632，2008.7
- 4) 納口恭太郎ほか：硫酸侵食が鉄筋の腐食発生条件に及ぼす影響，Vol.30，No.1，pp.1077-1082，2008.7
- 5) 伊藤真利子ほか：ひび割れを有する鉄筋コンクリートの化学的侵食に関する基礎的研究，Vol.29，No.1，pp.927-932，2007