

# 論文 マイクロクラックの生じたコンクリートへのケイ酸塩系含浸材塗布が吸水性に及ぼす影響

森田 歩花\*1・塚越 雅幸\*2・山川 和輝\*3・中山 一秀\*4

**要旨:** 圧縮試験によりマイクロクラックを発生させた W/C=45%と 65%のコンクリートの表層への、ケイ酸塩系含浸材の浸透性状、およびその後の 3.0%濃度の塩水の浸入抑制効果について検討した。その結果、含浸材は W/C の違いおよびマイクロクラックの有無によらず 3.0mm 程度まで浸透していた。また、マイクロクラックは塩水の浸透量を増加させ、それに伴い鉄筋の腐食速度も加速した。ただし、含浸材塗布により塩水の浸透量は健全なコンクリートと同程度まで抑制された。あわせて数値解析による水分の移動解析を行った結果、マイクロクラックに対する含浸材の改質による拡散係数の低減効果は一般部と比べ大きいと予想された。

**キーワード:** ケイ酸塩系含浸材, マイクロクラック, 表層品質, 空隙構造

## 1. はじめに

コンクリートには様々な要因によってひび割れが生じる。コンクリートの維持管理においては、表層品質が耐久性に対して大きく影響することが知られている。しかし、マイクロクラックは発生の有無の判定自体も難しいため、見過ごされている危険性も考えられる。そこで、予防保全策として表面含浸工法に着目した。コンクリートの耐久性向上や美観保護のため、コンクリート表面に含浸材が施工される。特にケイ酸塩系含浸材はコンクリート中の水酸化カルシウムと反応し、C-S-H を生成することで、コンクリート表層の細孔構造を緻密化させ、劣化因子の侵入を抑制する効果があるとされている。ただし、既往の研究<sup>1)</sup>によると、含浸材の浸透深さや含浸量はコンクリート表層部の細孔構造により大きく異なることが報告されている。そのため、マイクロクラックのような微細な空隙は、含浸材の浸透量および拡散係数の低減率に影響を及ぼすと考えられる。

そこで本研究では、マイクロクラックが発生したコンクリートへのケイ酸塩系含浸材の浸透状況および、その後の塩水の浸入抑制効果と鉄筋腐食速度に及ぼす影響について明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験概要

### (1) 供試体の作製

コンクリート供試体の調合を表-1 に、供試体のパラメーターを表-2 に、形状と寸法を図-1 に示す。コンクリートは 10×10×10cm とし、かぶり厚さ 30mm の位置に D13 鉄筋(長さ 120mm)を 1 本配した。鉄筋の端部からコンクリート内 18mm 位置までエポキシでシールした。

表-1 コンクリートの調合

| W/C % | W                 | C     | S     | G      | Ad   |
|-------|-------------------|-------|-------|--------|------|
|       | kg/m <sup>3</sup> |       |       |        |      |
| 45    | 185               | 411.1 | 673.3 | 1028.8 | 1.03 |
| 65    | 182               | 280.0 | 835.1 | 980.1  | 0.98 |

表-2 コンクリート供試体のパラメーター

| 記号      | W/C     | マイクロクラック | 塗布量                       |
|---------|---------|----------|---------------------------|
| N-0     | 45, 65% | なし(N)    | 無塗布(0)                    |
| N-200   |         |          | 200g/m <sup>2</sup> (200) |
| Cra-0   |         | 有(Cra)   | 無塗布(0)                    |
| Cra-200 |         |          | 200g/m <sup>2</sup> (200) |
| Cra-400 |         |          | 400g/m <sup>2</sup> (400) |

※記号はマイクロクラックの有無と塗布量を示す。

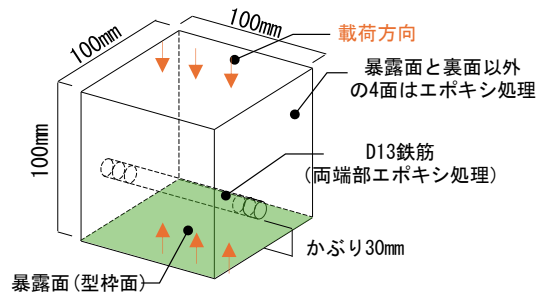


図-1 コンクリート供試体の形状と寸法

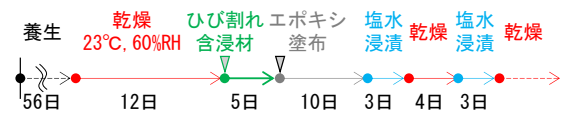


図-2 コンクリート供試体の作製と試験までの流れ

なお、暴露面はコンクリート打設時の型枠面とした。打設の翌日に脱型し、23°C環境下で 56 日間封緘養生した。養生終了後、圧縮強度と飽和含水率の測定を行った。

### (2) 含浸材塗布

供試体作製と養生、含浸材の塗布と塩水浸漬試験全体

\*1 福岡大学 工学部建築学科 (学生会員)

\*2 福岡大学 工学部建築学科准教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 株式会社フジタ建設コンサルタント (正会員)

\*4 東京科学大学 助教 博士 (工学) (正会員)

のフローを図-2 に示す。コンクリートの養生終了から 12 日間、供試体底部の通気性が確保できるように格子状底板のラック上で 6 面全体を 23℃、60%R.H. 環境下で乾燥させた。乾燥後、荷重装置によって図-1 に示す荷重方向で圧縮力をコンクリートの破壊荷重の 2/3 まで荷重し、コンクリートにマイクロクラックを発生させた。直ちに暴露面には、固化型ケイ酸塩系含浸材を 200g/m<sup>2</sup> または 400g/m<sup>2</sup> 塗布し、4 日間養生した。含浸材の養生終了後、エポキシ樹脂を側面に塗り 9 日間養生した。

### (3) 1 面塩水浸漬試験

供試体の暴露面側を、濃度 3.0% の塩化ナトリウム溶液を 2.0mm の深さで張った桶に 3 日間浸漬させ、その後、暴露面を上面にして乾燥の、塩水浸漬・乾燥の繰り返し試験を行った。これら、全体の行程の間の供試体の質量変化を測定した。試験条件は、23℃、60%R.H. 環境下とした。

### (4) 含浸材の浸透状況の測定

近赤外分光法を用いて、コンクリート表層からの含浸材の浸透状況を測定した。コンクリート表層をドリルで深さ方向に 1, 2, 3, 5mm ずつ削孔し、各深さに対してコンクリートに分光装置（波長域：350～2500 nm）を用いて近赤外分光を照射し、得られた吸光度スペクトルからコンクリート中の物質含有量の推定を行った。測定状況を写真-1 に示す。用いた試験体は、塩水浸漬試験と同条件と同寸法で作製した無鉄コンクリート供試体とした。吸光度スペクトルを、φ6mm の測定プローブを用いて、各深さに 3 点の吸光度スペクトル測定を実施した。測定は含浸材塗布後 7 日時点とした。

### (5) 電気化学的モニタリングによる腐食状況の測定

鉄筋の腐食環境として、かぶりコンクリートの電気抵抗、鉄筋の極極抵抗を測定した。測定状況を写真-2 に示す。測定を行う際、照合電極には飽和銀塩化銀電極（Ag/AgCl）を、対極にはチタン板を用いた。測定前に、暴露面を濡れたガーゼで 90 分間湿布し、このガーゼを介して電極と対極を設置した。対極の中心には穴が開いており、照合電極が直接濡れガーゼと接する。塩水浸漬試験後は暴露面に直接濡れガーゼをおいて測定した。分極抵抗は矩形電流分極法で求め、印加電流は 10 μA の一定、周波数 800 Hz と 0.1 Hz のインピーダンス値から、コンクリート抵抗は高周波数側（800Hz）のインピーダンス値として求めた。

## 3. 実験結果

### 3.1 コンクリート供試体の物性

塩水浸漬試験と同条件と同寸法で作製した無鉄コンクリート供試体の材齢 56 日における圧縮強度を測定した。荷重面は打設時の型枠面とした。圧縮荷重時の破壊強度



写真-1 近赤外分光法の測定状況

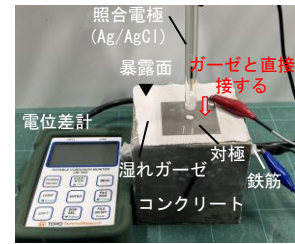


写真-2 電気化学的モニタリングの状況

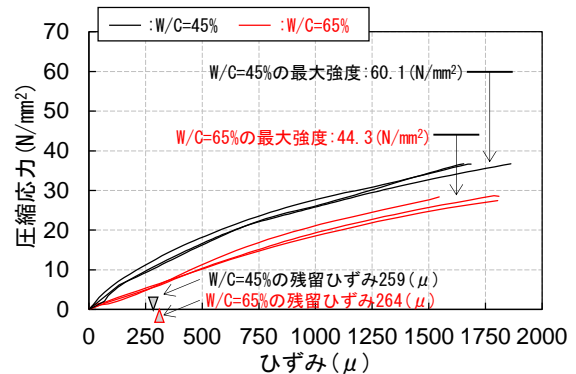


図-3 コンクリートへの破壊荷重の2/3荷重時の応力-ひずみ関係

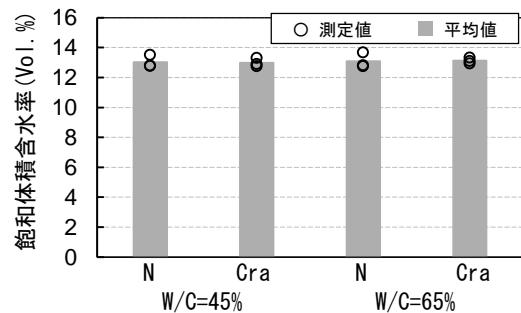


図-4 コンクリート供試体の飽和体積含水率

は、W/C=65%で 44.3N/mm<sup>2</sup>、W/C=45%で 60.1N/mm<sup>2</sup>であった。また暴露試験用コンクリート供試体へは、破壊荷重の 2/3 程度の圧縮荷重を与えた。W/C=65%には 28N/mm<sup>2</sup>、W/C=45%には 37N/mm<sup>2</sup>程度荷重し、マイクロクラックを発生させた。この時の応力-ひずみの関係を図-3 に示す。W/Cによらず 2/3 荷重時のひずみは 1600 μ程度、また除荷後の残留ひずみは 260 μ程度であった。両 W/C のコンクリートのひずみが同程度であったことから、両 W/C のコンクリートに相対的に同じ割合の荷重荷重を与え、同程度のマイクロクラックを発生させることができたと考えられる。ただし、マイクロクラックの幅と本数については検討ができていないため、今後の課題としたい。

塩水浸漬試験と同条件と同寸法で作製した無鉄コンクリート供試体を用いて、アルキメデス法（飽和含水時の水中質量、気中質量、105℃乾燥による絶乾質量）によって飽和体積含水率を求めた。飽和体積含水率を図-4 に示す。飽和体積含水率は W/C とマイクロクラックの有

無によらず 13 vol.%程度であった。また、封緘養生後の体積含水率は、W/C=45%ではクラックあり供試体で 8.3 vol.%、健全では 8.7 vol.%、W/C=65%ではクラックあり供試体で 7.1 vol.%、健全では 7.3 vol.%であった。マイクロクラックの有無による体積含水率の大きな差は見られなかったがマイクロクラック有の方がやや乾燥傾向にあった。また、W/C=65%の方が乾燥傾向にあり、乾燥にはマイクロクラックよりも細孔構造の影響の方が大きいと考えられる。

### 3.2 近赤外分光法による含浸材の浸透深さ測定

近赤外分光法により含浸材を  $200\text{g/m}^2$  塗布した場合のコンクリート表層への浸透状況を測定した結果の例を図-5 に示す。既往研究<sup>2)</sup>を参考に、まず波長 1430nm にベースライン（ゼロ点に補正）を合わせた。また、波長 1412nm 付近の吸光はセメント硬化体中の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含有量との相関が高いとされており、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含有量に比例して波長 1412 nm のピークは高い値となる。一方で、ケイ酸塩系含浸材はコンクリート内に浸透すると  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  と反応し C-S-H を生成し表層を緻密化する。すなわち、含浸材が浸透している部分では  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の含有量が減少することで波長 1412 nm のピークが下がる。そこで本研究では、波長 1412 nm とベースラインの波長 1430nm の吸光度の差を差吸光度と定義し、差吸光度を比較することによって含浸深さの推定を行った。このような手順で、コンクリート表層から一定の距離ごとに測定、計算した差吸光度を図-6 に示す。W/C=45%では 3mm 付近では無塗布のコンクリート(N-0)の差吸光度とほぼ同程度となっていることから、含浸材の浸透は表層から 3mm 以内の範囲までであったと推測される。同様に W/C=65%では、2mm から 3mm の間で無塗布のコンクリート(N-0)の差吸光度とほぼ同程度の値となっている。5mm の位置では若干のばらつきはあるものの、どちらの W/C においても概ね 3mm よりも深い位置では無塗布の差吸光度と同程度となっている。このことから、C-S-H の生成は表層から 2~3mm の範囲であったと推測される。これは、W/C=65%の方が、コンクリート表層に疎な空隙が多く存在することにより、含浸材が表層付近に留まったものと考えられる。また、コンクリート内部の毛細管空隙は一般的に W/C=45%の方が狭い細孔径の量が多くなっており、毛細管現象により深さ方向まで含浸している可能性も考えられる。

なお、マイクロクラックの有無による、含浸材の浸透分布に違いは見られなかった。これは、含浸材の塗布量は  $200\text{g/m}^2$  と限られた量であるため、コンクリート表層付近の空隙に含浸材がとどまったためではないかと考えられる。また、マイクロクラックは骨材とペーストの界面などで部分的に発生しやすく、また微細であるのに対し、近赤外分光法のプローブは  $\phi 6\text{mm}$  と測定範囲が広範囲であるため、局所的に発生したマイクロクラックの影響

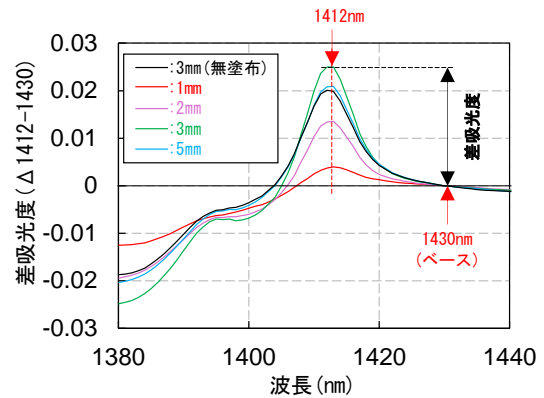


図-5 差吸光度の定義 (W/C=65%, N-200)

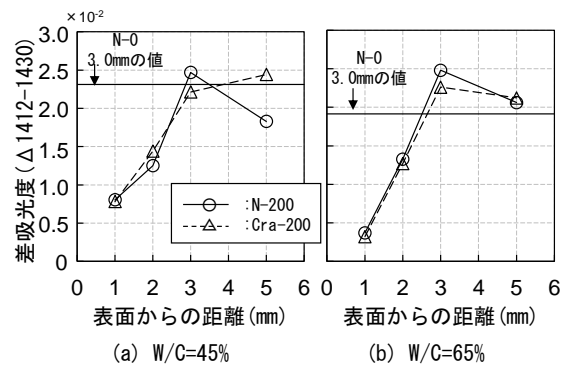


図-6 コンクリート供試体中の差吸光度分布

を測定することができなかったのではないかと考えられる。

### 3.3 1 面塩水浸漬・乾燥試験結果

コンクリート供試体の封緘養生後から塩水浸漬の間の吸水と乾燥による質量の変化を図-7 に示す。

#### (1) 吸水性に及ぼす W/C の影響

全体的に W/C=65%の方が乾燥と塩水浸漬による質量の変化割合は大きい。これは、高 W/C の方が疎な細孔構造だからである。また、マイクロクラックありの  $200\text{g/m}^2$  塗布(Cra-200)と、 $400\text{g/m}^2$  塗布(Cra-400)を比較すると、W/C=45%では乾燥と塩水浸漬による質量の変化量はほぼ同程度となっているが、W/C=65%では塩水浸漬による質量の変化量は  $400\text{g/m}^2$  塗布(Cra-400)の方が 1/2 程度まで抑制している。これは、表層の疎な空隙に含浸材が浸透し、細孔を緻密化することで吸水抑制効果が発揮されたと考えられる。

#### (2) 吸水性に及ぼすマイクロクラックの影響

無塗布の場合、マイクロクラックを発生させることで塩水浸漬時の質量増加量が大きくなったが、乾燥による質量減少量は健全なコンクリートと同程度であった。これは、コンクリート表層および内部のマイクロクラックが水みちとなることで吸水量が増加したのと考えられる。また、乾燥は、外気に接する表層部分の影響が大きいため、コンクリート内部のマイクロクラックの影響はそれほど大きく表れなかったのではないかと考えられる。

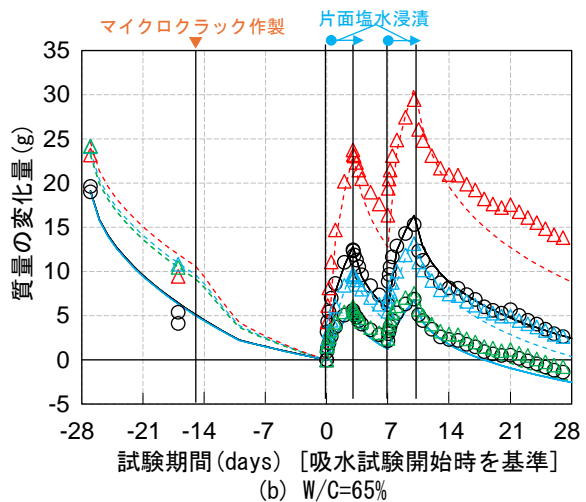
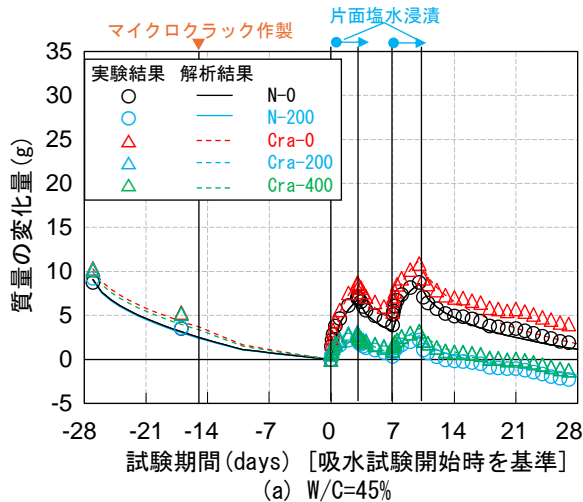


図-7 コンクリート供試体の質量変化の測定結果とシミュレーション予測結果

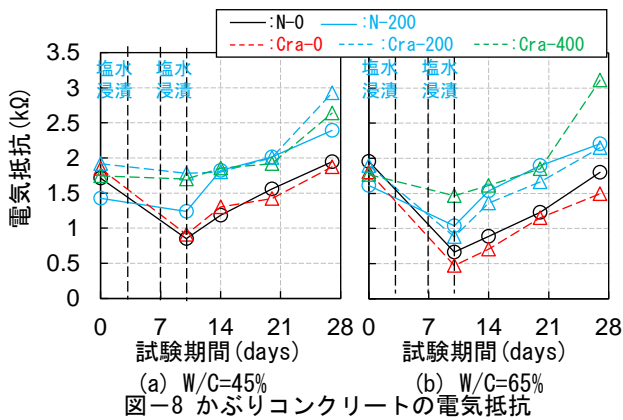


図-8 かぶりコンクリートの電気抵抗

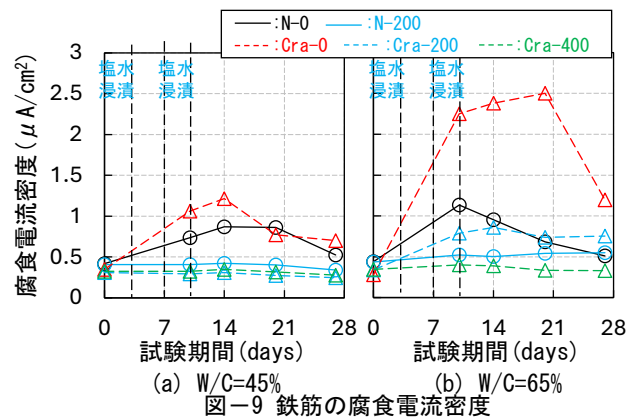


図-9 鉄筋の腐食電流密度

### 3.4 電気化学的モニタリング

電気化学的測定の結果として、かぶりコンクリート部分の電気抵抗と鉄筋の腐食電流密度をそれぞれ図-8, 9に示す。塩水浸漬時の電気抵抗の変化量は、含浸材を塗布することで、無塗布の場合よりも小さく抑えられている。また、乾燥時には、含浸材を塗布した場合、電気抵抗値が初期の値よりも高い値となった。これは、含浸材の作用で吸水が抑制され、鉄筋付近に水分が到達しなかつたためであると考えられる。

腐食電流密度は、既往の研究<sup>3)</sup>の計算方法を参考に測定した分極抵抗の値より求めた。腐食電流密度は鉄筋腐食速度と比例関係にあることが知られている。マイクロクラックを発生させた W/C=65%のコンクリートで、かつ含浸材無塗布(Cra-0)の場合、腐食電流密度が急激に上昇した。これは、図-7の質量変化の測定結果で示した通り、マイクロクラックの影響によって塩化物イオンの侵入が促進されたため、塩化物イオンが鉄筋付近まで移動したことで不動態被膜を破壊し、鉄筋の腐食が開始されたものと思われる。一方で、含浸材を塗布したものは腐食電流密度の値はほぼ横ばいであり、無塗布のコンクリート以下の値となっていることから、コンクリート表層の緻密化によって塩化物イオンの侵入が抑制された結果、鉄筋の腐食抑制効果が得られたものと推測される。

### 4. 含水率分布予測と考察

実験ではコンクリートの塩水浸漬・乾燥の総和としての質量変化は得られるが、コンクリート内の含水率分布、鉄筋位置での含水率変化について測定することは難しい。そこで、シミュレーションによりコンクリートの吸水と乾燥、内部の水分分布の予測を行い、コンクリートの拡散係数の変化を推定した。

コンクリートの水分移動予測モデルは実験用供試体と同様の寸法を想定し厚さ方向に 10 cm の断面 1 次元方向の移動を微小区間  $\Delta y = 1.0\text{mm}$ 、時間間隔  $\Delta t = 10\text{sec}$  ごとに計算した。本モデルでは水分移動は式(1)の Fick の法則に従うとし、液状水と水蒸気を同一として扱った。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (1)$$

ここで、 $W$ : 水分量 ( $\text{g}/\text{mm}^3$ )、 $t$ : 単位時間 (sec)、 $D$ : 拡散係数 ( $\text{mm}^2/\text{sec}$ )、 $y$ : 単位幅 (mm)

境界条件として、大気と接する暴露面での水分流速は以下の式(2)で表す<sup>4)</sup>。

$$J = \alpha(w_c - w_a) \quad (2)$$

ここで、 $J$ : 境界での水分流速 [ $\text{g}/\text{mm}^2 \text{sec}$ ]、 $\alpha$ : 水分

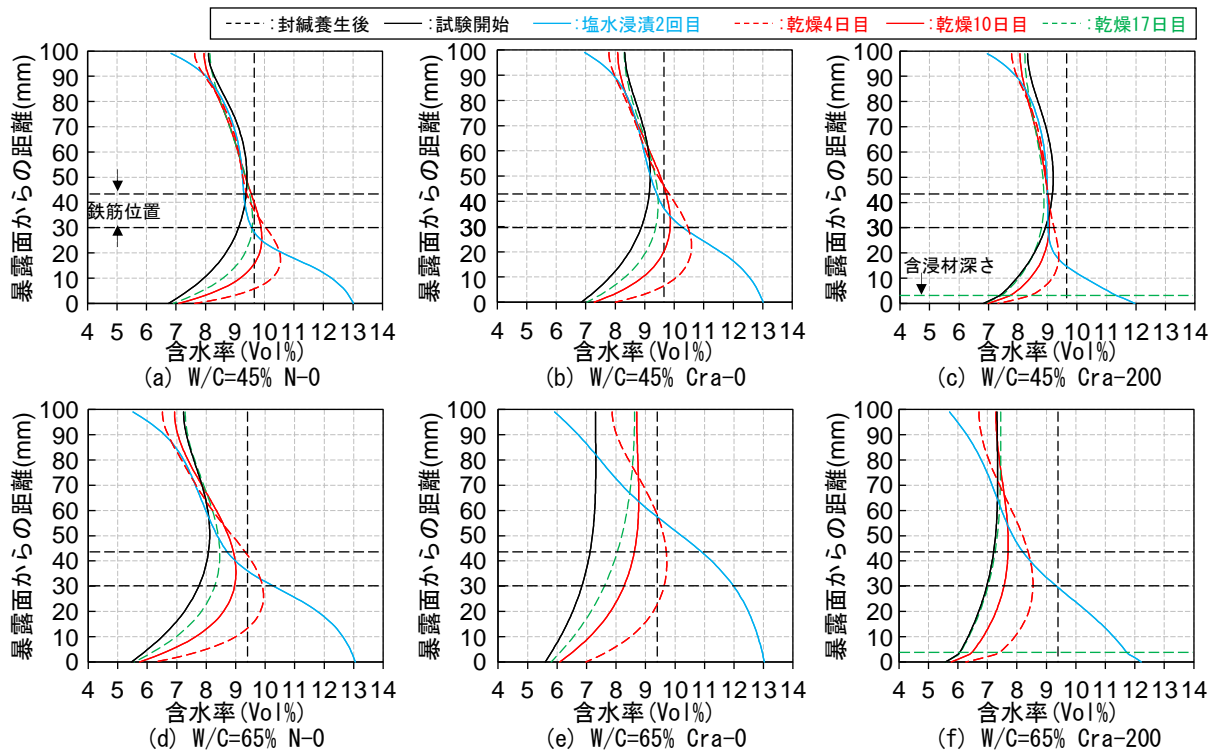


図-10 コンクリート供試体の内部含水率の予測結果

伝達係数 [m/sec],  $w_c$ : コンクリート表面での液状水量 [g/mm<sup>3</sup>],  $w_a$ : 雰囲気相対湿度に平衡する液状水量 [g/mm<sup>3</sup>]

また、水分伝達係数と含水率の影響については、濃度勾配を駆動力とした非常におけるコンクリート中の水分移動は次の式(3)で表す<sup>4)</sup>。

$$D/D_1 = 1/\left\{22\left(1 - \frac{R}{100}\right) + 1\right\}^{1.4} \quad (3)$$

ここで、 $D_1$ : 相対含水率 100%の時の水分拡散係数 (mm<sup>2</sup>/sec),  $R$ : コンクリートの相対含水率 (%)

以上の仮定のもと、行ったコンクリートへの吸水と乾燥、内部の含水率分布の予測結果の一例を図-10に、供試体の質量変化を予測した結果を図-7に示す。なお、計算では実験で行ったコンクリートの塩水浸漬・乾燥試験時の質量変化の結果にフィットするように逆解析的に拡散係数および暴露面からの水分流速、ここでは吸水速度係数、乾燥速度係数と定義しそれぞれ求めた。さらに、近赤外分光法による含浸材の浸透深さ測定の結果から、浸透深さは 3mm と仮定し、この範囲が改質されたコンクリート部分であるとして求めた係数を図-11に示す。

図-10のうち W/C=45%の(b)についてみると、マイクロクラックの発生によって、無塗布の試験体(Cra-0)では塩水浸漬2回目時点にかぶりコンクリート部分が高含水状態になっていることが予測された。その後の乾燥期間

で、徐々にかぶり部分の含水率は低下し、鉄筋位置では上昇している。これは乾燥4日の間に、コンクリートかぶり部に存在した水分が、表面からの乾燥および鉄筋方向に拡散したためである。この結果、先の鉄筋の腐食電流密度の測定結果と合わせてみると、鉄筋付近の含水率の上昇が要因で、乾燥4日の間では腐食電流密度が上昇したものと考えられる。一方で、コンクリートのかぶり部分は乾燥したため、電気抵抗は上昇したものと考えられる。

W/C=65%のマイクロクラックあり無塗布の試験体(Cra-0)では、図-10(e)に示すように、塩水浸漬試験後は鉄筋の裏面付近まで高含水状態となった。その後、乾燥4日では、W/C=45%とは異なり、鉄筋付近の含水率は減少している。ただし、この時の鉄筋の腐食電流密度は他の試験体に比べ大きな値となった。これは、塩水浸漬時に他の条件の試験体よりも吸水量が2倍程度あり、鉄筋付近まで塩化物イオンが多量に浸入したためではないかと考えられる。

両W/Cにおいて、含浸材の塗布によってかぶり部分への水分の移動が抑制され、同時に塩化物イオンの浸入量も抑制されたことで鉄筋腐食速度の上昇が抑制された。

図-11より、予想されたコンクリートの水分拡散係数は、高W/Cほど大きく、マイクロクラックの発生によって大幅に増加した。また、含浸材の塗布によって低減効

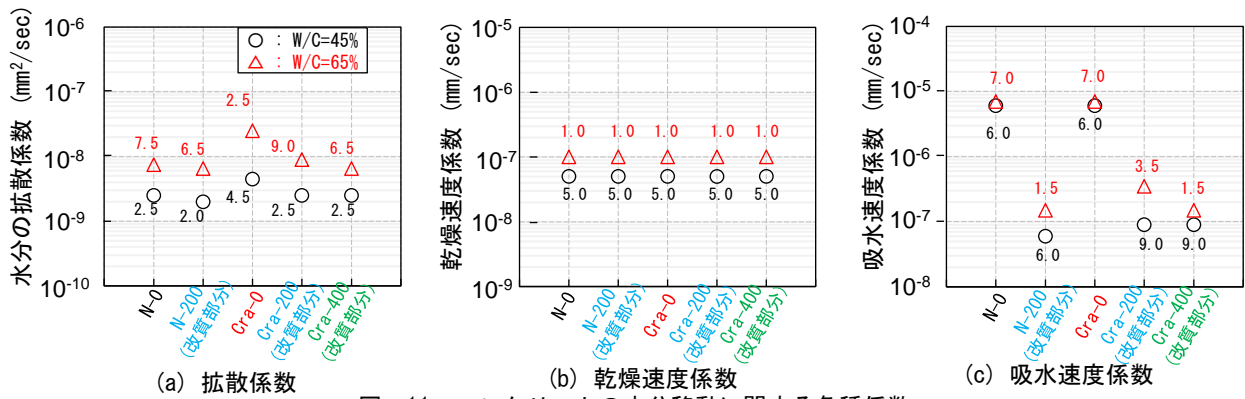
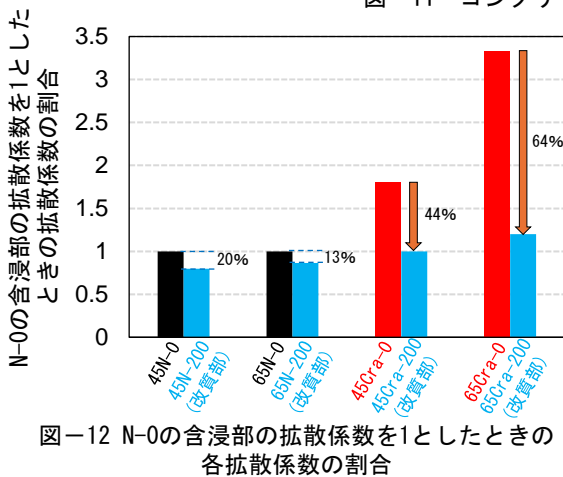


図-11 コンクリートの水分移動に関する各種係数



果が得られた。ここで、マイクロクラックと含浸材の影響について比較するため、無塗布でかつ健全なコンクリート試験体(N-0)の拡散係数を1とした場合の、そのほかの条件の拡散係数の割合について計算した結果を図-12に示す。マイクロクラックの発生により W/C=45%では拡散係数は1.8倍に、W/C=65%では3.3倍に増加した。また含浸材を塗布することで、拡散係数は大幅に低下し、ほぼ健全なコンクリート(N-0)と同程度まで抑制された。これは、マイクロクラックは非常に粗な空隙構造であり、含浸材が浸透しやすく、組織の緻密化が進行したものと推測される。コンクリートの含浸材の改質による拡散係数の低減効果は健全なコンクリートより、マイクロクラックに対する含浸材の低減効果の方が高いと予測される。

## 5. まとめ

W/C=45%, 65%のコンクリートにマイクロクラックを発生させ、ケイ酸塩系含浸材を塗布した後に、塩水浸漬・乾燥試験を行った際の、水分の移動と鉄筋の腐食環境について実験的検討を行った。

(1) 含浸材の浸透深さを、近赤外分光法を用いて測定した結果、W/C=45%では3mm付近、65%では2~3mm付近まで浸透していると推測された。なお、マイクロクラックの有無により浸透深さには大きな

違いは見られなかった。

- (2) マイクロクラックの発生により吸水量は増加し、特にW/C=65%のものでは増加割合は大きくなった。含浸材を塗布することで吸水量は抑制された。W/Cの違いによらず含浸材の塗布により健全なコンクリート(N-0)と同程度まで吸水量が抑制された。
- (3) 鉄筋の腐食電流密度は、水分の浸透量と比例関係にあった。特にW/C=65%のコンクリートにマイクロクラックを発生させた試験体(Cra-0)では腐食電流密度が上昇し、鉄筋付近が腐食環境にあると推測される。一方、マイクロクラックを発生させたものに含浸材を塗布することで吸水量が抑制され、腐食電流密度は健全なコンクリート(N-0)と同程度となった。
- (4) マイクロクラックの発生による拡散係数の増加は1.8倍から3.3倍と大きかった。含浸材を200g/m<sup>2</sup>以上塗布することによって健全なコンクリート(N-0)と同等の見かけの拡散係数となり、これは健全部分の拡散係数の低減効果よりも大きかった。

## 参考文献

- 1) 浦川奈実, 塚越雅幸, 中山一秀, 樋原弘貴: ケイ酸塩系含浸材の浸透および吸水防止効果に及ぼす素地モルタルの性質の影響, 2023年度(第63回)九州支部研究報告, pp.129-132, 2024. 3
- 2) 上田隆雄, 松田彩妙, 山本晃臣, 塚越雅幸: フライアッシュの混和と中性化が反応性骨材含有コンクリートの近赤外分光スペクトルに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1816-1821, 2012
- 3) 上田隆雄, 田中慎吾, 進藤義勝, 七澤章: フライアッシュの混和が塩によるセメント硬化体中の鉄筋腐食環境に与える影響, 土木学会論文集E, Vol. 66, No. 3, pp. 255-267, 2010. 7
- 4) 秋田宏, 藤原忠司, 小西俊之, 尾坂芳夫: コンクリート中の水分移動における水分伝導率の評価, コンクリート工学年次報告集, Vol.12, No.1, 1990