

論文 ケイ酸塩系表面含浸材を用いたひび割れ補修による止水効果に関する検討

樋原 弘貴*1・武若 耕司*2・山口明伸*3・白澤 直*4

要旨：本研究では、コンクリートのひび割れ部にケイ酸塩系表面改質材を注入した場合のひび割れ部からの漏水の抑止効果を期待し、その効果について検討を行った。その結果、ひび割れに表面含浸材を直接注入することで、透水係数が2~3オーダー程度低減でき、その止水効果は3年経過しても持続していることを確認した。また、中性化しているひび割れに対しては、透水係数の低減が見られなかった。中性化しているひび割れを補修する場合には、表面含浸材と水溶性カルシウム化合物を混合し、予めゲル化したものを注入することにより、止水効果が得られることが分かった。

キーワード：ひび割れ、補修、表面含浸材、透水係数、中性化、水溶性カルシウム化合物

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性向上、劣化抑制の観点から数多くの補修材料、工法が提案されている。その中で本研究では、表-1に示す組成および物性値であるケイ酸塩系の表面含浸材に着目した。この表面含浸材はNa, Siを主成分とした材料であり、コンクリート表面に塗布後、散水および乾燥を繰り返すことでコンクリート内部に浸透し、コンクリート中に存在するCa²⁺および水と反応して細孔空隙中にC-S-H結晶を生成することでコンクリート表層部を緻密化し、コンクリートの品質を改善するものである¹⁾。また、ひび割れ内部に表面含浸材が浸透することで、写真-1に示すようにひび割れを修復することも可能であり²⁾、実際にひび割れからの漏水や劣化因子の進入の抑制を目的として、この含浸材を用いたひび割れ補修もなされている。そこで、本研究では、コンクリートのひび割れ部に表面含浸材を塗布あるいは注入した場合のひび割れ部からの漏水の抑止効果（以下、遮水効果と称す）について検討した。なお、表面含浸材はNa等のアルカリを含んでいるため、既設コンクリートの骨材が反応性であった場合には、ASRを促進する懸念があるものの、むしろ表面含浸材の改質効果によって、水分の侵入を抑制することで、ASR膨張を抑制する傾向にあることが既に確認されている³⁾。

2. 試験方法

ひび割れを有するコンクリートの透水試験を実施し、ひび割れ部への表面含浸材の有無による透水性の違いから遮水効果を検討した。実験には、図-1に示す中心部にΦ2cmの円筒状の空洞を設けたΦ15×30cmの円柱供

表-1 表面含浸材の組成および物性値

成分(%)		密度 (g/cm ³)	粘度 (mPa·S)	pH
Na	Si			
5.7	10.6	1.1	4.5	11.23

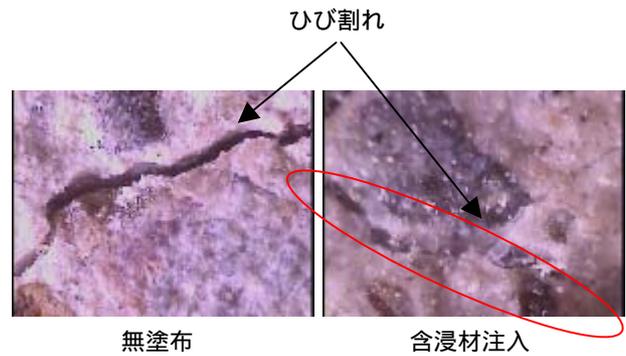


写真-1 表面含浸材を注入した供試体のひび割れ閉塞状況（ひび割れ幅0.1mm）

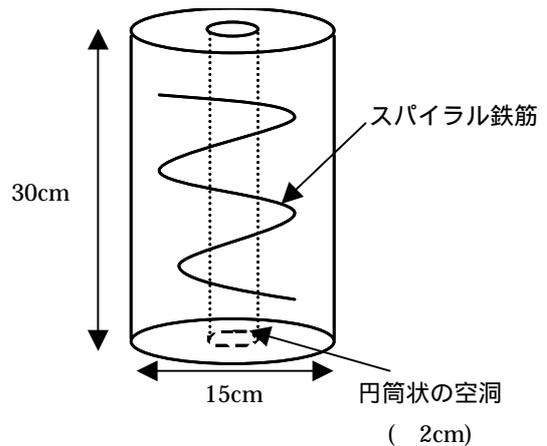


図-1 透水試験用供試体形状

*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科物質生産工学専攻 工修（正会員）

*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科 教授 工博（正会員）

*3 鹿児島大学大学院 理工学研究科 准教授 工博（正会員）

*4 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻（正会員）

試体を用いた。また、この供試体を割裂することにより所定の幅でひび割れを導入するために、スパイラル鉄筋を配筋した。使用したコンクリートは細骨材に富士川産川砂（表乾密度 2.63kg/cm³、吸水率 1.93%）セメントに普通ポルトランドセメントを使用し、骨材を隅々まで行き渡らせるため、最大寸法を 13mm とした鹿児島産碎石（密度 2.61g/cm³）を用いた。コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表 - 2 に示す。供試体は全部で 30 本作製し、作製後 3 ヶ月間水中養生した後、供試体毎に平均ひび割れ幅が 0.1mm ~ 0.5mm の範囲で異なるひび割れを導入し、初期ひび割れを補修する場合を想定して、ひび割れ導入後 30 日以内に図 - 2 に示す 2 つの方法で表面含浸材によるひび割れ補修を行った。その 1 つは、コンクリート表面に塗布することでひび割れ部に自然浸透させる方法であり、もう 1 つはバルーン式の注入器を用いて低圧をかけ、ひび割れ部に直接注入させる方法で表面含浸材によるひび割れ補修を行った。なお、塗布のものに関しては表面含浸材が流れないように、パテで囲んで塗布を行っている。

さらに、経年ひび割れに補修する場合も想定して、ひび割れ導入から 3 年間屋内気中に供試体を静置させ、経年ひび割れに対する含浸材の遮水効果を検討するとともに、初期ひび割れに注入を施した供試体の遮水効果の持続性や初期ひび割れに含浸材を注入したものに再び含浸材を注入し、再補修性についても検討を行った。なお、経年ひび割れへの注入方法は、初期ひび割れに含浸材を注入する方法とは異なり、図 - 3 のようにひび割れまでドリルで供試体側面から穴を開け注入器を取り付けて、そこからコンプレッサーによって高圧で注入する方法を用いた。その後、ドリル穴をモルタルで閉塞し、試験供試体とした。なお、この注入方法が図 - 2 で示したバルーン式の注入工法と異なる理由は、図 - 2 のバルーン式で行った最初の注入から図 - 3 の方法で行った再注入までの 3 年の間に、実施工での注入方法にも改良が加えられており、本研究では、実験実施時点で実際に用いられている補修方法を検討の対象としたことによる。

水量は図 - 4 に示すようにコンクリート側面から浸透し、中央にある円筒空洞まで達した水量から流量を算出し、これから、ひび割れを有する供試体の見かけの透水係数を算出した。透水係数の算出式を以下の式 (1) に示す。

また、すべての透水試験が終了した後に供試体を解体し、ひび割れ面の中酸化状況やゲルの生成状況を観察した。中酸化状況はフェノールフタレイン法に準じて行い、また、ゲルの生成状況については SEM によって観察した。

なお、上記のいずれの供試体においても、補修後は屋

表 2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

W/C (%)	s/a (%)	単位水量(kg/m ³)				スランブ (cm)	Air (%)
		W	C	S	G		
60	50	204	340	885	902	10	1.9

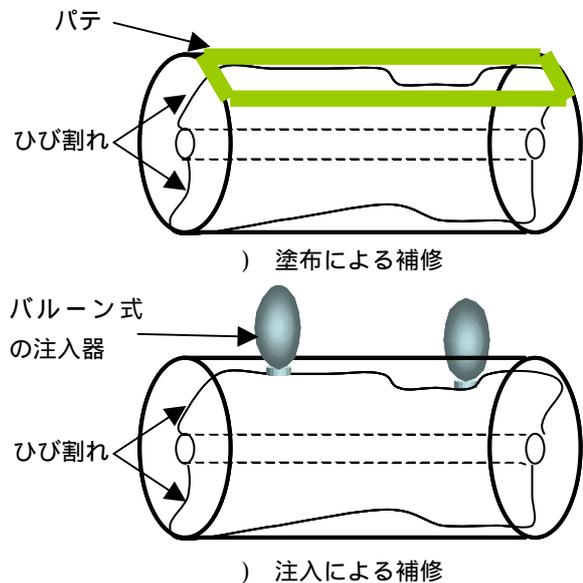


図 - 2 表面含浸材塗布および注入による初期ひび割れ補修方法

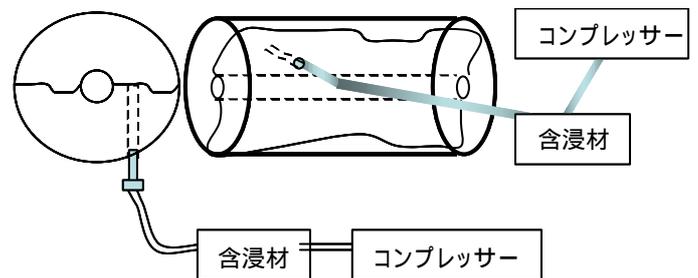


図 - 3 表面含浸材注入による経年ひび割れ補修方法

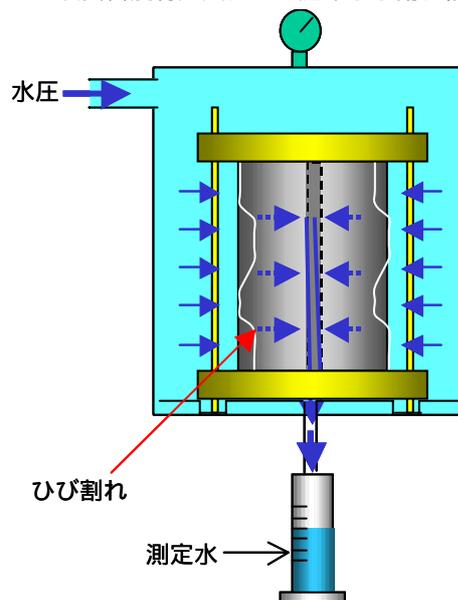


図 - 4 透水試験機概略図

内気中に静置し、補修から 30 日程度で透水試験を行い、試験時期の違いによる誤差をできるだけ小さくするとともに、無塗布供試体と併せて試験を行った。

$$K = \frac{\log \frac{R_0}{R_i}}{2 \cdot 2h} \cdot \frac{Q}{\rho_i} \quad (1)$$

- ρ_i: 試験に用いた水の密度(g/cm³)
- Q: 流量(cm/s)
- Pi: 透水圧力(kgf)
- Ro: 供試体の半径(cm)
- Ri: 供試体中央孔の半径(cm)
- h: 供試体高さ(cm)
- (ひび割れが2箇所あるので、式では2hとした)

3. 実験結果および考察

3.1 初期ひび割れに対する補修性に関する検討

図 - 5 に、平均ひび割れ幅 0.26mm を有する供試体に対して、透水圧力 0.4N/mm² で試験をおこなった無処理、含浸材塗布あるいは注入を施した供試体における見かけの透水係数の経時変化を示す。ひび割れ部に表面含浸材を塗布しただけの供試体においては、透水開始初期は無処理とほぼ同程度の透水係数であり、30 分程度経過した辺りから、僅かながらその値が減少する程度であった。これに対して、注入したものは、透水開始初期から透水係数は無処理のものに比べ幾分小さかったが、試験開始から 30 分程度経過した辺りで、透水係数が急激に減少する傾向を示した。さらに、その後 5 日間試験を継続したが、その遮水性は保持されたままの状態であった。これは、ひび割れ部に水が供給されることで、注入された含浸材のゲル化が時間経過と共に進行し、ひび割れを閉塞したことによるものと考えられた。

図 - 6 には、ひび割れ幅 0.08mm の供試体について、無処理あるいはひび割れ注入を施した状態で、透水圧力 2.0N/mm² で試験を行った時の見かけの透水係数の経時変化を示す。ひび割れ幅が微小であるので、初期透水量は全体的に少ないものの、含浸材を注入したものでは、遮水効果が試験開始直後から現れ、その効果は時間と共に増大することが確認された。このことから、比較的高い圧力を受けても、生成されたゲルはひび割れ中で十分にコンクリートと一体化し強固なものになっているものと考えられた。

透水係数とひび割れ幅の関係を図 - 7 に示す。ちなみに、ひび割れ幅に関わらず注入した供試体に関しては、図-5 および 6 に示したように透水係数は時間と共に低下することから、ある程度の含浸材の効果が発揮される試験開始 30 分からの結果を平均したものである。この結果、含浸材による処理の有無や処理方法に関わらず、いずれの供試体においても見かけの透水係数は、ひび割

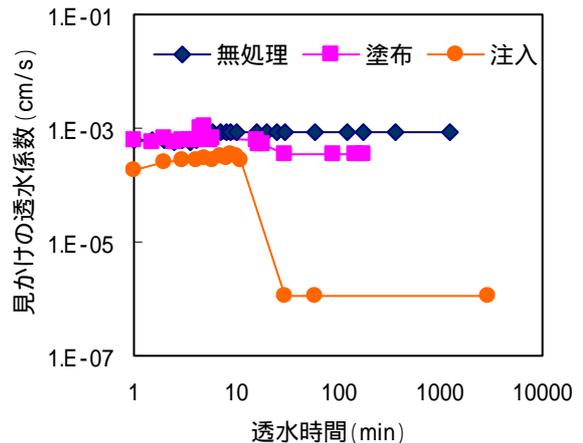


図 - 5 見かけの透水係数の経時変化
(ひび割れ幅 0.26mm, 透水圧力 0.4N/mm²)

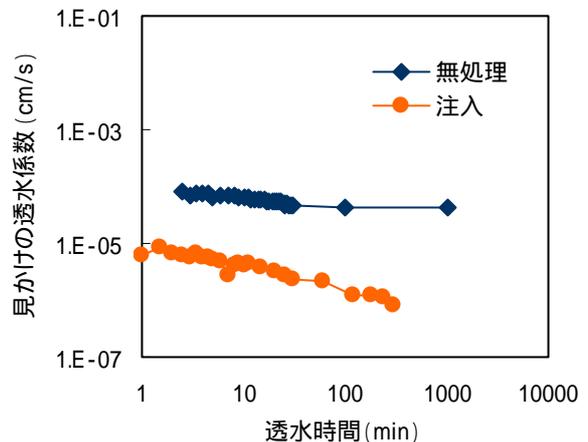


図 - 6 見かけの透水係数の経時変化
(ひび割れ幅 0.08mm, 透水圧力 2.0N/mm²)

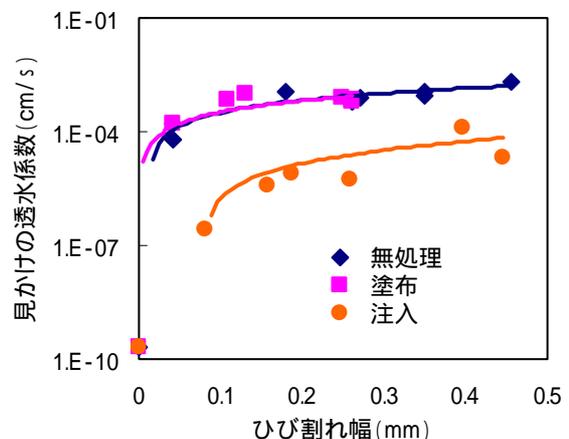


図 - 7 見かけの透水係数とひび割れ幅の関係

れ幅が大きくなるに従って増大する傾向にあった。供試体の種類ごとの違いについてみると、無処理と含浸材をひび割れ部に塗布したものでは、いずれのひび割れ幅においても透水係数にほとんど差は見られなかった。これは、塗布するだけでは表面含浸材がひび割れ内部までは浸透しきれずに、このために十分な遮水効果が発揮されなかったものと考えられる。一方で、ひび割れ部に直接含浸材を注入した供試体については、無処理や塗布のものに比べ透水係数はいずれのひび割れ幅においても2~3オーダー程小さくなる結果を示した。これは、注入することでひび割れ内部に表面含浸材が十分に供給されたためだと考えられる。このことから、ひび割れからの漏水に対しては表面含浸材をひび割れに直接注入させる方法を用いることによって遮水効果が得られることを確認できた。

3.2 遮水効果の持続性および再注入による抑制効果改善に関する検討

含浸材のひび割れに対する遮水効果の持続性および再補修性について検討を行うために、3.1の透水試験から3年間屋内気中に試験供試体を曝露した後、図-4と同様の方法で透水試験を行った。図-8には、この供試体の透水係数とひび割れ幅の関係を図-7で示した無塗布および注入を施した供試体と併せて、それぞれ示す。

この結果、含浸材の注入を施した供試体の見かけの透水係数は、いずれのひび割れ幅においても、注入後3年経過しても同程度となり、含浸材の遮水効果は変わらないことが確認された。無塗布供試体は、自己治癒などによるものと思われるが、ひび割れ導入初期のものに比べて、いずれのひび割れ幅においても見かけの透水係数が幾分低下する結果となった。しかし、含浸材を注入した供試体は、経年的に透水係数の低下が認められた無塗布と比べても、全てのひび割れ幅において、依然として透水係数は低い結果を示している。このことから、含浸材によるひび割れ部の遮水効果の持続性が認められるとともに、今後も含浸材によるその効果は持続されるものと予想された。

次に、図-9には、初期に注入を施した供試体に3年経過時に再び含浸材で注入を施した再注入供試体の透水係数とひび割れ幅の関係を、無塗布ならびに、初期に注入を施し3年経過時点での結果と併せてそれぞれ示す。再注入供試体の透水係数は、初期に注入を施した供試体と比較して、いずれのひび割れ幅においても、同程度となる結果を示した。このことから、再注入を施しても、最初に注入を行った時以上の透水係数の低減は見られず、このことから、含浸材により改善された漏水部に同じ含浸材で再補修を実施してもさらなる遮水効果はあまり期待できないことが示唆される。この原因には、2

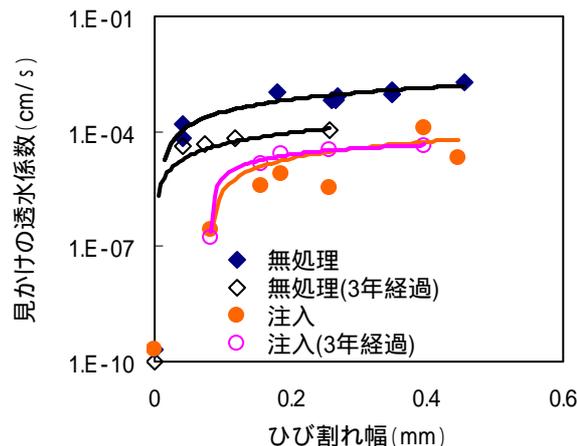


図-8 3年経過した供試体の透水係数とひび割れ幅の関係

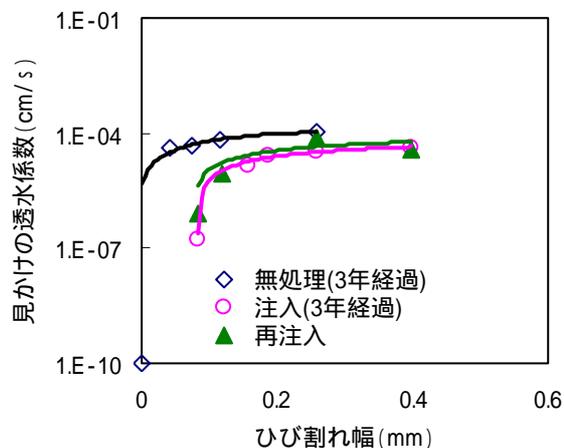


図-9 再注入をした供試体の透水係数とひび割れ幅の関係



写真-2 ひび割れ幅0.075mmの中性化状況



写真-3 ひび割れ幅0.082mmの含浸材の浸透状況

つことが考えられた。すなわち、1つは、補修後の中性化の進行で Ca^{2+} が不足し、新たに注入された含浸材が緻密な組織を作り得ないこと、もう1つは、初期に注入を施しているために、含浸材がひび割れ内部に供給されにくかったことが考えられた。そこで、まず、含浸材によるゲル生成には、コンクリートの中性化の有無が密接に関わってくるため⁴⁾、初期に注入を施した供試体を解体し、再注入前のひび割れ内部の中性化状況をフェノールフタレイン溶液散布によって調べた。一例として、写真-2にひび割れ幅0.075mmの中性化状況を示す。この結果、一部に未中性化部も見られるが、大部分が中性化していることが確認された。次に、再注入した供試体を用いて含浸材の供給状況を調べるために、ひび割れ面にフェノールフタレイン溶液散布を行い、その呈色状況で確認することとした。含浸材は表-1に示すように、高アルカリ材料であるために、今回のように中性化している場合には、その呈色領域がほぼそのまま、含浸材が供給された部分と見なすことができる。写真-3(ひび割れ幅0.082mm)には、再注入供試体後のひび割れ内部へフェノールフタレイン溶液を散布した結果であり、これを写真-2と比較することで、含浸材の供給状況を確認できる。すなわち、この結果ではひび割れ面の大部分が呈色していることから、初期に含浸材が注入されていたとしても、再補修時には十分にひび割れ内部に再度含浸材が供給されていることがわかる。以上のことから、含浸材が十分に供給されたにも関わらず、透水係数がさらに改善されなかったのは、再注入を行った時にすでにひび割れ内部が中性化していたことによるもので、含浸材の反応に必要なコンクリート中の Ca^{2+} が十分に供給されなかったことが考えられた。

3.3 経年ひび割れに対する含浸材の遮水効果に関する検討

3年経過した無塗布供試体のひび割れに注入を施して、経年ひび割れに対する含浸材の遮水効果について検討を行った。図-10に、無塗布供試体と併せて、透水係数とひび割れ幅の関係をそれぞれ示す。3年経過した無塗布供試体に注入を施した供試体は、ひび割れ幅0.2mm以下では、透水係数の低減が確認されたものの、図-7で示した初期段階で注入を施した供試体の透水係数と比べると透水係数の低減効果が小さいことが分かる。また、ひび割れ幅0.2mm以上のひび割れ幅になると、無塗布供試体と同程度となる結果を示し、遮水効果は確認されなかった。そこで、上記で述べたように、含浸材の反応とコンクリートの中性化状況の間には密接な関係があるため、無塗布供試体の解体を行い、フェノールフタレイン溶液を散布しその中性化状況を調べた。遮水効果が得られたひび割れ幅0.2mm以下の供試体の一例として、ひ

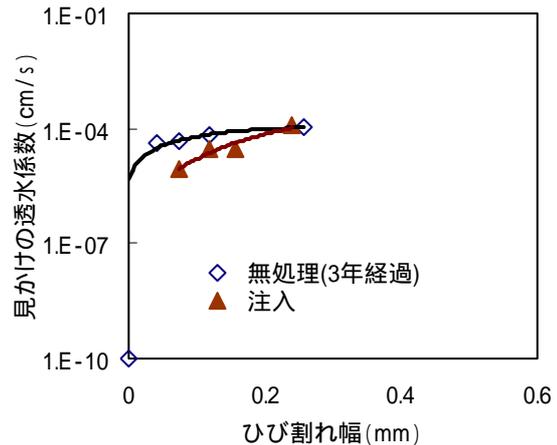


図-10 3年経過した無塗布供試体に注入を施した場合の透水係数とひび割れ幅の関係



写真-4 ひび割れ幅0.042mmの中性化状況



写真-5 ひび割れ幅0.263mmの中性化状況

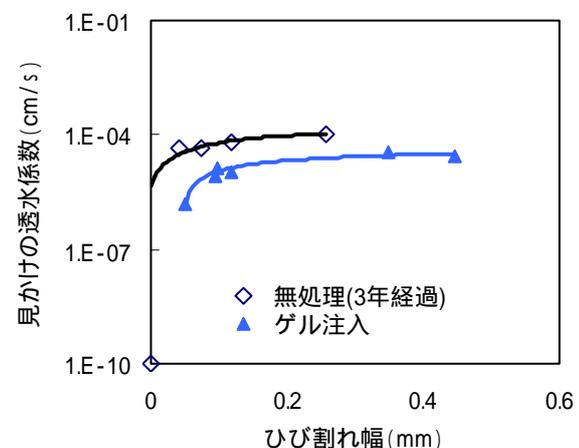


図-11 含浸材とカルシウム化合物によるゲル注入供試体の透水係数とひび割れ幅の関係

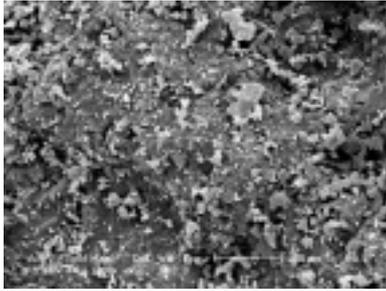


写真 - 5 無塗布供試体の SEM 写真(×1000)

び割れ幅 0.042mm の中性化の状況を写真 - 4 に、また、効果が得られなかったひび割れ幅 0.2mm 以上の供試体の例として、ひび割れ幅 0.263mm のものを写真 - 5 にそれぞれ中性化状況を示す。この結果、ひび割れ幅 0.263mm の無塗布供試体は、供試体ひび割れ面全体が中性化している状況であったのに対し、透水係数の低下が認められたひび割れ幅 0.2mm 以下の無塗布供試体のひび割れ面では、未中性化部分が残っている状況であった。つまり、含浸材による遮水効果の有無は、ひび割れ幅によって異なる中性化状況が影響したものと考えられ、中性化の状況によっては、遮水効果が小さくなり、場合によっては効果が得られないことを示唆している。

そこで、中性化しているひび割れに対して、含浸材で補修を行う場合の新たな対策として、含浸材と水溶性カルシウム化合物を混合し、予め反応させゲル化したものを注入することで、ひび割れを閉塞できないかと考えた。今回の実験では、事前の検討で最も含浸材と良好な反応性を示したカルシウム化合物を用いた。図 - 11 に含浸材とこの化合物を反応させて、生成したゲルを注入した供試体の透水係数とひび割れ幅の関係を無塗布供試体の結果と併せて示す。この結果、いずれのひび割れ幅においても無塗布供試体に比べて、透水係数の低減が認められた。また、図 - 10 に示した経年ひび割れに含浸材を注入した場合には、0.2mm 以上のひび割れ幅では、遮水効果は得られなかったものの、この方法では、0.4mm 以上のひび割れ幅においても効果が確認され、透水係数は、無塗布のひび割れ幅 0.1mm 以下のものより小さい結果を示した。このように、中性化が生じているひび割れを含浸材で補修する場合には、ゲル化したものを注入することにより、ひび割れ補修が可能であることが分かった。

さらに、透水試験終了後に供試体の解体を行い、SEM によってひび割れ面の観察を行った。写真 - 5 に無塗布供試体、写真 - 6 にはゲルを注入した供試体をそれぞれ示す。無塗布供試体と比べるとひび割れ面を覆うように多数のウロコ状の反応生成物が確認された。これは、含浸材とカルシウム化合物によって生成されたゲルと考えられる。また、高い圧力の作用する透水試験終了後の供試体であるにも関わらず、このようなウロコ状の反応生成

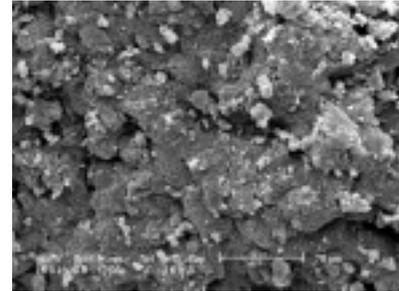


写真 - 6 ゲル注入を施した供試体の SEM 写真(×1000)

物が観察でき、この生成物は十分なコンクリートとの付着力を有する強固なものであると推察された。

4. まとめ

本研究では、コンクリートのひび割れ部にケイ酸塩系表面改質材を注入した場合のひび割れ部からの漏水の抑止効果を期待し、その効果について検討を行った結果以下の知見が得られた。

- (1) ひび割れに直接注入を施すことによって、無塗布供試体に比べて、透水係数が 2~3 オーダー程度の低減し、止水効果があることが分かった。また、生成されたゲルはコンクリートと一体化し強固なものとなっている。
- (2) 止水効果は少なくとも 3 年間は保持されており、その効果は今後も持続するものと考えられる。
- (3) 中性化しているひび割れに対しては、含浸材による遮水効果が得られ難い。
- (4) 中性化したひび割れに対しては、予め含浸材の反応に必要な Ca を付与させて、ゲル化したものを注入することで、遮水効果を得られることが確認された。

謝辞：本研究は(株)環境美建との共同研究の成果の一部について報告したものである。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会：119 コンクリートライブラリー表面保護工法，設計施工指針(案)
- 2) 審良善和ほか：コンクリート用表面改質材の材料特性と劣化抑制効果に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol. 26，No.1，pp1719-1724，2004.7
- 3) 樋原弘貴ほか：ケイ酸質系表面含浸材の浸透深さと浸透域でのコンクリート品質改善に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，第 29 巻，pp.547 - 552，2007.7
- 4) 樋原弘貴ほか：ケイ酸塩系表面含浸材の浸透特性および保護性能に関する基礎的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 8 巻，pp77-84，2008.10