# 論文 各種曝露環境下におけるけい酸塩系表面含浸材の微細ひび割れへの 長期的補修性能に関する研究

#### 久保田 崇嗣<sup>\*1</sup>· 櫨原 弘貴<sup>\*2</sup>· 添田 政司<sup>\*3</sup>· 阿部 稜<sup>\*1</sup>

要旨: 0.2mm 以下のひび割れを対象に,反応型けい酸塩系表面含浸材を塗布あるいは注入を行った供試体を 酸性雨環境および海洋環境下に最大で10年間の曝露を行った。その結果,いずれの環境においてもひび割れ からの劣化因子の浸入を抑制できることを確認できた。酸性雨環境においては,表面含浸材を注入すること で,ひび割れ面の中性化深さは,曝露1年から6年にかけての進行は認められなかった。一方の,海洋大気 中においては,曝露10年目において塩化物イオンの浸入を無塗布の30~60%に抑制できていた。また,曝露 3年目で再塗布を施したものは,更なる劣化因子の抑制を示し,ひび割れ部のかぶり3cm位置における塩化 物イオン量は,1.0kg/m<sup>3</sup>以下であり腐食も認められなかった。

キーワード:けい酸塩系表面含浸材,ひび割れ,中性化深さ,塩化物イオン,鉄筋腐食,曝露試験

#### 1. はじめに

コンクリート構造物は,経年劣化や初期欠陥等によっ て,ひび割れの発生が散見される。発生したひび割れを 介して,酸素や塩化物イオン,水などの浸入が容易にな るため,早期の鉄筋腐食が懸念されている。そのため, 0.2mm以上のひび割れに対しては,ひび割れ補修を行う など対策が講じられているが,必ずしも注入材がひび割 れ深部にまで行き届いているとは言えず,写真-1に示 すように下面側から注入した場合には,補修材料の注入 深さが 1,2cm程度である場合が散見されてきている。 また,例え 0.2mm以下のひび割れであっても場合によっ ては,表面張力が大きく働くため,むしろ内部に水分や 塩化物イオンが浸透しやすくなる場合がある。そのため, 将来的に耐久性の低下を招く恐れがある微細ひび割れに 対しても何らかの対策を講ずる必要があると思われる。

そこで近年では、微細なひび割れに対するけい酸塩系 表面含浸材の補修効果が注目されてきている<sup>1), 2), 3)</sup>。こ のけい酸塩系表面含浸材は、エポキシ系樹脂等に比べて 粘性が低いため、微細なひび割れであっても容易に材料 を深部にまで供給できる利点がある。材料が供給される と、コンクリート中の Ca<sup>2+</sup>および水と反応して結晶を生 成する働きと材料自体がガラス質の固化物によってひび 割れを閉塞するため<sup>2)</sup>、微細なひび割れに対しては、十 分に閉塞できる可能性が高い。また、水が存在している ひび割れに対しても閉塞を期待できる。これまでの知見 として、促進試験や透水試験によって、0.2mm 幅程度ま でのひび割れに対しては、効果が認められており、さら に徐々にひび割れ部に水が供給されることでけい酸塩系



写真-1 ひび割れ注入材の充填性

表面含浸材の反応が進み閉塞性が高まることや,反応に 必要な Ca 材料とけい酸塩系表面含浸材を組み合わせる ことでひび割れ内部に人工的に結晶を作りだせるため<sup>2),</sup> <sup>4)</sup>,安定したひび割れ閉塞効果を期待できる。ただし, 実環境下におけるけい酸塩系表面含浸材の注入による微 細ひび割れのからの劣化因子の浸入に対する知見が少な く,長期的な性能や効果の持続性と言った情報が少ない のが現状である。

そこで本研究は,各種環境下における長期的なひび割 れ閉塞性能を確認することを目的とし,酸性雨環境なら びに海洋大気中で曝露を行うことで,長期的な劣化因子 の抑制効果および経年で再注入を施すことによる再補修 の有効性について検討を行った。

## 2. 実験概要

各種曝露環境における供試体の要因と水準を表-1 に 示す.

\*1 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 (学生会員)
\*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 博士 (工学)(正会員)
\*3 福岡大学大学院 工学研究科資源循環・環境工学 博士 (工学)(正会員)
\*4 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 (学生会員)

#### 2.1 火山性酸性雨環境への曝露概要

表-2 に酸性雨環境に曝露した供試体のコンクリート 配合を示す。セメントは、普通ポルトランドセメント(密 度 3.15g/cm<sup>3</sup>), 細骨材として富士川産川砂(密度 2.65g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.93%), 粗骨材には鹿児島産砕石(密度 2.63g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.63%)を使用した。水セメント比は 70%である。

図-1 に供試体概要を示す。作製にあたっては、 φ 100×200mmの型枠に型枠底面から 70mm, 130mmの位置 に異形鉄筋を埋設してコンクリートを打設し, 28 日間の 水中養生を行った後に、高さ 100mm 位置でコンクリー トカッターを用いて切断した。互いのかぶり 30mmの面 を試験面とした。ひび割れは、万能試験機とデータロガ を用いてひび割れ幅 0.1~0.2mm を導入した。いずれの 供試体も試験面を除く側面および底面をエポキシ樹脂に よって被覆している。曝露は、ひび割れ無しおよびひび 割れ有の供試体を写真-2 に示す桜島の昭和火口付近に 設置した。曝露期間は、塗布および注入供試体は、1, 6, 10 年とし、無処理のものは、1, 6 年とした。

試験に用いた含浸材種類として,ひび割れ無し供試体 においては,含浸材 A,Bの2種類を塗布し,ひび割れ 有り供試体には,含浸材 A,Bに加えて含浸材 Aとカル シウム含有溶液を混合し,予めゲル化させたものを用い た<sup>2,4</sup>。表-3には,実験に用いた含浸材の物性および 組成を示す。いずれも Na,Siを主成分とした pH11以上 の高アルカリ材料であり,判定試験においては反応型に 分類されたものである<sup>1)</sup>。

ひび割れ無し供試体へ塗布方法は,製品規定に従って 図-2 に示す手順で試験面に塗布している。一方の,ひ び割れ有り供試体は,図-3 に示す方法でひび割れ中央 部に注入器をシリコーン樹脂で固定した後に,水鉄砲の 原理を用いた空気圧によって,含浸材をひび割れ内部に 供給した。なお,注入器設置の際にひび割れ内部へシリ コーン樹脂が浸入しないように,ひび割れ注入箇所以外 は全てガムテープでひび割れを覆っており,含浸材の注 入量は,ひび割れ幅に関係なく一律 2.3cm<sup>3</sup>とした。いず れの供試体も,注入面と対面のエポキシ樹脂を一部はが して,含浸材のひび割れ深部への供給を確認している。 注入終了後は,シリコーンおよび注入器,ガムテープを 外して,ひび割れ面以外も図-2 に示した手順で塗布を 行った。

## 2.2 海洋大気中への曝露概要

表-4 には、海洋大気中に曝露したコンクリート供試体の配合を示す。セメントは、普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm<sup>3</sup>)を、細骨材には、鹿児島県鹿児島市産川砂(密度 2.48g/cm<sup>3</sup>、吸水率 3.03%)、粗骨材は、鹿児島産砕石(密度 2.64g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.03%)をそれぞれ使用した。水セメント比は 50%である。目標スランプ 10cm、

空気量 4.6% とした。

図-4には、供試体概要を示す。供試体は 10×10×60cm の角柱コンクリートであり、かぶり 3cm 位置に φ 10mm の異形鉄筋を埋設した。水中養生 28 日後に、供試体を曲 げにより中央部にひび割れを導入後、互いの供試体を抱 合せて、拘束用ボルトを調節することで目標ひび割れ幅

表-1 要因と水準(酸性雨環境,海洋大気中)

曝露環境	火山性酸性雨				海洋大気中
W/C	70%			50%	
ひび割れ	隽	展	有	Ī	有
含浸材補修	有	無	有	無	有
含浸材種類	含浸材A 含浸材B	-	含浸材A 含浸材B 反応ゲルA	_	含浸材A 含浸材B
含浸材施工方法	塗布	_	塗布,注入	_	塗布
曝露期間(最大)	10年間	6年間	10年間	6年間	10年間

表-2 コンクリート配合(酸性雨環境)

W/C	s/a	単位量(kg/m³)				空気量
(%)	(%)	W	С	S	G	(%)
70	49	191	273	906	936	1.5







写真-2 曝露環境

表-3 表面含浸材の組成および物性値

含浸材	成分	成分(%)		粘度	
種類	Na	Si	(g/cm³)	(mPa∙S)	рп
Α	5.7	10.6	1.1	4.5	11.23
В	8.9	17.3	1.23	6.5	11.21

0.2mm を導入した。また, 妻面からの塩化物イオンの浸入を防ぐ目的から拘束ボルトより外側の端部 100mm は, エポキシ樹脂により被覆した。試験に用いた含浸材は, いずれも粘性が低く,供試体を拘束することでひび割れ 面が開いていたことから,塗布のみでも十分にひび割れ 内部へ供給が可能であった。そのため, 表-3 に示した 含浸材 A, Bを製品規定に従ってひび割れ箇所およびそ の他全面に塗布を行った。曝露期間は 10 年とし,一部の 供試体には,曝露 3 年目にひび割れおよびその他の供試 体全面に同様の方法で再塗布を行った。

## 2.3 測定項目および測定方法

供試体解体時には、以下のいずれかの測定を行った。 表-5に曝露環境ごとの測定項目を示す。

## (1) 自然電位の測定(海洋大気中)

ひび割れを中心に,前後 5cm, 15cm 位置の自然電位を 測定した。測定には,鉛照合電極を用いて行った。

# (2) 中性化深さ(酸性雨環境)

割裂し,ひび割れ面にフェノールフタレイン溶液を噴 霧して,呈色反応によって中性化深さを測定した。なお, 供試体ごとに所定の間隔で5箇所測定し平均した値を中 性化深さとした。

## (3) pHの測定(酸性雨環境)

供試体のひび割れ箇所を中心にドリル孔径 φ 20mm を 用いて,鉄筋かぶり位置のコンクリート粉末試料 0.30g と蒸留水を混合して全試料重量を 30g とし,スターラー で 24 時間撹拌することで可溶性イオンを溶出し,pHの 測定を行った。

### (4) 全塩化物イオン量(海洋大気中)

ドリル孔径 \$ 20mm を用いて,ひび割れ部およびひび 割れ無し箇所から表面から10mm ごとに深さ30mm まで 粉体を採取し,JCI-SC4 に準拠して全塩化物イオン量を 測定した。

# (5) 腐食量面積率(酸性雨環境,海洋大気中)

曝露供試体から鉄筋を取り出し,取り出した鉄筋にセ ロハンテープを巻きつけ腐食部分を書き出した。その後, フリーソフトを用いて画像処理を行い,腐食面積を鉄筋 全表面積で除して鉄筋腐食面積率を算出した。

# (6) 腐食重量(酸性雨環境,海洋大気中)

(5)を行った後に、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の 腐食評価方法」に準じて、濃度10%クエン酸二アンモニ ウム水溶液に2日間浸漬して腐食生成物を除去した。そ の後、重量減少量を測定し鉄筋腐食量を算出した。

#### 3. 結果および考察

#### 3.1 火山性酸性雨環境

図-6に、火山性酸性雨環境下に1,6,10年間曝露した供試体の中性化深さとひび割れ幅の関係を示す。まず、



図-2 表面含浸材の塗布工程



図-3 ひび割れへの注入方法および状況

# 表-4 コンクリート供試体の配合(海洋大気中)

W/C	s/a	単位量(kg/m³)			空気量	
(%)	(%)	W	С	S	G	(%)
50	45	195	390	785	949	4.6



0.2mm程度

図-4 供試体の概要および曝露状況

## 表-5 曝露環境ごとの測定項目

測定項目	酸性雨環境 (桜島)	海洋大気中環境 (谷山)	
中性化深さ	0	—	
рН	0	—	
鉄筋腐食面積率	0	0	
鉄筋腐食量	0	0	
全塩化物イオン量	—	0	
自然電位	—	0	



曝露期間1年では、ひび割れ無し供試体における無処理 のものは、中性化深さ4mm 程度であったのに対し、含 浸材を塗布した供試体は、いずれの種類においても中性 化は確認されなかった。一方の、ひび割れ有り供試体で は、いずれの供試体も中性化の進行が確認されたが、含 浸材を注入したものは、無注入よりも小さくなる結果を 示した。また、中性化深さは、反応ゲルAのものが最も 抑制されていた。これは、注入直後からひび割れをゲル で充填できたことによると思われる。ただし、少なから ず中性化の進行は認められることから、乾燥によってゲ ルが次第に収縮した可能性が考えられる。

曝露期間6年目になると、いずれの供試体もひび割れ 幅が大きくなるに従って、中性化深さも大きくなる傾向 を示した。ただし、含浸材を注入した供試体は、いずれ のひび割れ幅においても明確に無処理よりも中性化深さ が小さくなっていた。また、無処理の中性化深さは、曝 露期間1年から6年の間に大きく進展していたのに対し、 含浸材を注入した供試体においては、曝露期間による中 性化深さに差がなく、いずれの含浸材種類においても中 性化の進行速度が低下しているのが分かる。これは、含 浸材がひび割れ内部に供給された後に、雨水等があたる ことで水分が供給され、長期的にコンクリート中のCa<sup>2+</sup> との反応が進んだことで、ひび割れを徐々に閉塞したと 考えられる。水分供給後のひび割れ閉塞性については既 往の研究<sup>2)</sup>においても確認されている。また,反応ゲル Aにおいても,曝露1年目から6年目における中性化の 進行は確認されていない。これは,反応ゲルAを作製す る際に未反応であった含浸材の成分が,雨水の供給によ って反応が進んだものと考えられる。曝露6年目におけ るひび割れ幅0.15mmでの中性化速度係数は,無処理で 19.2mm/√yearであるのに対し,含浸材では,概ね4.1mm/ √yearであった。含浸材を注入することで中性化の進行 速度を1/4程度に抑制できることが分かった。

さらに、曝露期間10年になると、一部の供試体は火 山の噴火等によって損失したものの、回収できた範囲で は、含浸材を塗布したひび割れ無し供試体においても中 性化が確認された。また、ひび割れ有りの場合でも、曝 露期間に伴って中性化が進行している状況が確認された。 ただし、曝露6年目における無処理供試体の中性化深さ よりも小さくなっている。

図-7に曝露期間1年,6年および10年でのpHとひ び割れ幅の関係を示す。曝露1年目から6年目を比較す ると、いずれの供試体も曝露1年目よりも全体的にpH は低下している傾向にあるものの、含浸材を注入した供 試体のpHは、無注入に比べて高く、ひび割れ幅0.15mm までの範囲においては、ひび割れ無しのpHと同程度の



値を示している。曝露10年目になると、pHは低下して いたものの、いずれもpH11~11.5の間で保持されていた。

図-8には、曝露期間1年、6年および10年でのひび 割れ幅と鉄筋腐食面積率の関係を示す。この結果、曝露 期間1年における鉄筋腐食面積率は、曝露期間が短いこ ともあり、いずれも明確な腐食の発生は確認されなかっ た。曝露期間6年になると、ひび割れ幅が大きくなるに 従って、いずれも鉄筋腐食面積率が大きくなる傾向を示 しているが、含浸材を注入したものは、ひび割れ幅 0.15mm 以下の範囲において、明確な腐食を確認するこ とはできなかった。ひび割れを閉塞したことで、中性化 の進行を抑制した結果、無処理に比べて腐食抑制がなさ れたと考えられる。さらに、曝露期間10年目になると、 いずれのひび割れ幅においても注入供試体に腐食が確認 されたが、腐食面積率は、曝露6年目の無処理と同程度 となっている。

図-9に曝露期間1年,6年および10年でのひび割れ 幅と鉄筋腐食重量の関係を示す。曝露期間6年目までは, いずれの供試体においても明確な腐食重量は確認されな かったが,曝露期間10年目になると,ひび割れ幅の増加 に従って腐食量も大きくなる傾向が見られた。

以上のことから,火山性酸性雨環境下におけるけい酸 塩系表面含浸材のひび割れ補修効果を確認することがで きた。含浸材の効果は,経時的に発揮され,6年目まで は長期的にひび割れの閉塞により劣化因子の浸入を抑制 できるものと考えられる。

#### 3.2 海洋大気中環境

図-10 に、ひび割れから±5cm、±15cm 位置における 自然電位の測定結果を示す。いずれも含浸材を塗布した ものは、全ての測定位置で無塗布よりも自然電位が貴で あり、鉄筋の腐食抑制がなされていると推察された。ま た、再塗布を施したものは、いずれも初期塗布のみより も電位が貴となっており、更なる腐食抑制がなされてい るものと考えられる。

図-11 にひび割れ面から深部方向への全塩化物イオ ン量分布を示す。含浸材を塗布した供試体は、いずれの 測定箇所においても塩化物イオン量が無塗布に比べて少 なく、ひび割れを Ca<sup>2+</sup>および水との反応生成物あるいは、 ガラス固化体として閉塞したことで浸入を抑制できたも のと考えられる。また、かぶり 25mm 位置付近の全塩化 物イオン量は、無塗布で 5.4kg/m<sup>3</sup>であるのに対し、含浸 材 A で 2.0kg/m<sup>3</sup>、含浸材 B で 3.6kg/m<sup>3</sup>程度であった。曝 露 10 年目にて、かぶり 25mm 位置の全塩化物イオン量 を無塗布の 30%~60%程度に抑制する結果を示した。含 浸材種類の違いでは、含浸材 A の方が含浸材 B に比べて 塩化物イオン量が少ない結果を示している。これは含浸



図 - 11 全塩化物イオン量分布

図-12 電位と腐食面積率の関係

材 A の方が含浸材 B に比べて粘性が低いため、ひび割れ 深部への浸透量に違いが現れたものと考えられる。

一方の、再塗布を施したものは、初期塗布のみよりも さらに塩化物イオン量が少なく、いずれの含浸材におい ても1.0kg/m<sup>3</sup>以下であった。これは、初期塗布では十分 に閉塞しきれなかったひび割れ内部を再塗布を行うこと で、さらに閉塞性が高まったものと考えられ、表面含浸 材の長期的なひび割れ補修効果と再塗布の有効性につい て確認することができた。

図-12には、自然電位と鉄筋腐食面積率の関係をそれ ぞれ示す。解体時の目視による腐食状況は、含浸材の有 無により明確な違いが確認されており、いずれの供試体 もひび割れに起因する腐食であった。特に、再塗布を施 した供試体は、明らかに他のものよりも腐食が少なく点 錆程度であった。実際の腐食面積率は、自然電位が卑に なるに従って大きくなる傾向を示した。無塗布の腐食面 積率は7.2%であったのに対し、初期塗布のみでは、それ ぞれ含浸材 A で 0.7%, 含浸材 B で 1.8%程度であった。 一方の、再塗布を施したものは、塩化物イオンの浸入を 抑制したことで、0.2%程度と顕著な腐食抑制を確認する ことができた。

以上のことから、いずれの環境においてもひび割れ幅 0.2mm 程度までの範囲において、けい酸塩系表面含浸材 の劣化因子に対する抵抗性ならびに防錆効果を確認する ことができた。これらの結果を踏まえると、今回検討し たひび割れ幅は、充填工法や注入工法を適用するような ひび割れではないが、将来的に耐久性への影響が懸念さ れる微細なひび割れに対して,このけい酸塩系表面含浸 材は有効な補修技術として利用できるものと考えられる。

# 4. まとめ

表面含浸材のひび割れ補修効果を長期的な曝露試験 によって、その効果を確認した結果、以下の知見を得る ことができた。

(1) 火山性酸性雨環境において,時間の経過に伴って閉

塞性が高まり、含浸材で補修した供試体は、曝露1 年目から6年目の間で中性化深さ, pH, 鉄筋腐食面 積率, 鉄筋腐食重量のいずれも劣化の進行は確認 されなかった。

- (2) 火山性酸性雨環境において,曝露6年目のひび割れ 幅 0.15mm の中性化速度係数は、無処理で 19.2mm/ √year であるのに対し, 含浸材では概ね 4.1mm/√ year であり、含浸材を注入することで中性化の進行 速度を 1/4 程度に抑制できた。
- (3) 海洋環境において、初期塗布のみでかぶり位置にお ける塩化物イオン量を 30%~60%, 腐食面積率を 7% ~25%程度の抑制を示し長期的なひび割れ補修効果 を確認することができた。
- (4) 海洋環境において,再塗布を行うことで,含浸材種 類に関らず、初期塗布に比べ更なる補修効果が得ら れ,再補修の有効性と長期性能が確認された。

謝辞:本実験は鹿児島大学武若耕司教授をはじめ鹿児島 大学の方々のご協力を頂いた。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

1) 土木学会: コンクリートライブラリー137 号 けい酸 塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)2012.7

2) 櫨原 弘貴, 武若 耕司, 山口 明伸, 白澤 直: 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,コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1933-1938, 2009.7

3) 櫨原 弘貴, 武若 耕司, 松元 淳一, 前田 聡: 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, Vol.29, No.2, pp.547-552, 2007.7

4) 金堀雄伍, 櫨原弘貴, 添田政司, 西嶋大貴: けい酸塩 系表面含浸材とカルシウム溶液を併用したコンクリート の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, Vol.37, No.1, pp.1657-1662, 2015.7