

表面改質材による既設コンクリート構造物の 延命補修システムの構築

名和 豊春¹

¹北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

本研究では、ホタテ貝殻未焼成カルシウム微粉末を主成分とした充填材とケイ酸塩系表面改質剤を併用することで、幅0.2mmまでのひび割れの閉塞工法を実現した。本技術を実施した試験体で、凍結融解や乾湿繰返し、塩分浸透の各劣化作用に対する耐久性試験の結果、十分な耐久性を有することを確認した。またシランカップリング剤を塗布しその箇所を加熱することにより、繰返し施工可能な撥水処理工法も確立した。上記の閉塞材料で処理した試験体で実環境に近いひび割れの0.1mmまでのムーブメントに対する追従性能の検証を検証した結果、50年相当の劣化作用にもムーブメント追従性を有することも立証された。

キーワード 既設コンクリート構造物、ひび割れ、ケイ酸塩系表面改質剤、シランカップリング剤、ムーブメント追従性

1. はじめに

コンクリート構造物は、かつては限りなくメンテナンス・フリーと考えられていたが、最近では塩害による鉄筋腐食やアルカリシリカ反応などによる早期劣化が表面化し、高度成長期以降に大量に建設された社会基盤の維持管理が大きな社会問題となっている。

本研究では、コンクリート構造物の延命化のために、0.2mmまでのひび割れを閉塞しそのひび割れに追従する性能を50年間持続するひび割れ閉塞材料およびケイ酸塩系改質材と、シラン系撥水材の再塗布可能技術を開発することにより、長期延命補修対策を構築することを目的としている。

個別目標は、「環境負荷が小さい表面改質材による幅0.2mmのひび割れ閉塞技術の開発」、「0.1mmまでのムーブメントに追従可能な表面改質材料および工法の開発」の2点である。

2. 環境負荷が小さい表面改質材による幅0.2mmのひび割れの閉塞技術の開発

本研究では、以下の2種類の材料を併用することにより「幅0.2mm以下のひび割れを閉塞する技術」を提案し、その性能・効果を検証した。1つは、「充填材」で、ホタテ貝殻未焼成カルシウム微粉末（平均粒径 $5\mu\text{m}$ ）を主成分とし、約0.05~0.2mm幅のひび割れに直接注入し、

表-1 充填材使用材料一覧

記号	材料摘要
E	エトリンガイト石灰複合系高性能膨張材
CH	水酸化カルシウム微粉末 (密度 2.34g/cm^3)
HTC	ホタテ貝殻未焼成カルシウム微粉末 (平均粒径 $5\mu\text{m}$)
W	水 (上水道水)
Ad	ポリカルボン酸コポリマー高性能減水剤

表-2 充填材の標準配合

W/B (%)	B(g)		S(g)	W(g)	
	E	CH	HTC	W	Ad ^{※1}
231	76.9	23.1	438	231	23.1

※1: Ad量は、Wの一部を含む

ひび割れを閉塞する目的で使用した。もう1つは、「ケイ酸塩系表面改質剤」で、ひび割れ幅0.05mm以下のひび割れの閉塞および発生抑制を目的として使用したもので、本研究ではケイ酸ナトリウム系（リチウム配合）の市販品を使用した。

(1) 充填材配合と施工方法の検討

表-1に充填材の使用材料を、表-2に充填材の標準配合を示す。充填材は主成分であるホタテ貝殻未焼成カルシ

ウム微粉末のほか、乾燥収縮低減材料（表中E）や流動性の調整に高性能減水剤（表中Ad）を添加した。

上記充填材配合の流動性や注入状況は、屋外模擬壁試験体（1×10×0.2m）に生じたひび割れに実際に注入することで検証した。注入には、「軽量で施工性が良い」「小型コンプレッサを用いることで低圧で注入可能」「UカットやVカットが不要で構造物表面からひび割れ中に直接注入できる」等の理由により専用の注入ガンを使用した。写真-1に使用した注入ガンとそれを用いたひび割れ閉塞工法の写真を示す。

充填材の注入性状の検証は、注入面及び注入部を含む



写真-4 表面透気試験状況 (TORRENT法)



写真-1 ひび割れ閉塞工法

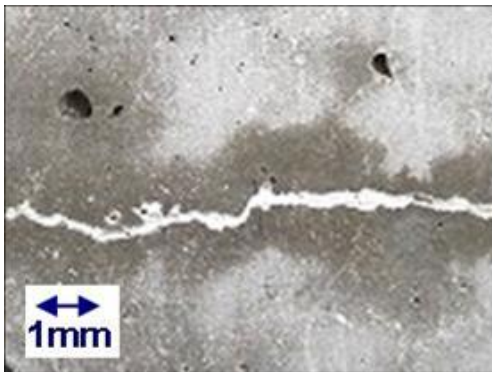


写真-2 閉塞後の注入面の状況

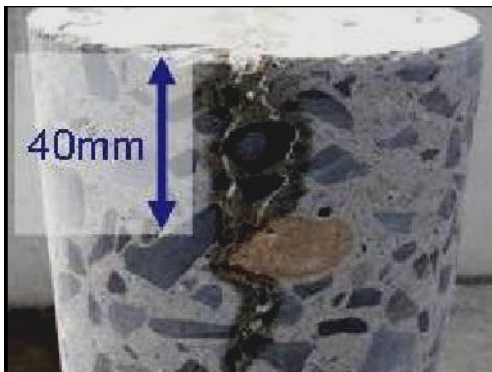


写真-3 閉塞後状況と注入深さ (コア採取断面)

表-3 透気係数による品質のグレード

透気係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	0.001 ～ 0.01	0.01 ～ 0.1	0.1 ～ 1	1 ～ 10	10 ～ 100
透気性 グレード	1	2	3	4	5
透気性 評価	優	良	一般	劣	極劣

ように採取したコアの採取断面を目視によって確認した。写真-2に注入面の、写真-3にコア採取断面の写真をそれぞれ示す。写真より注入面ではほぼ均一的にひび割れが充填されている様子が確認され、コア断面から充填材は深さ40mm程度まで注入可能であることが確認された。

(2) 充填材の注入の検証方法の検討結果

前述の材料・工法の品質管理のためには、非破壊で確認する方法が望ましく、本研究ではTORRENT法と呼ばれる表面透気試験装置を適用することを方法を検討した。写真-4に透気試験装置の写真を、表-3に透気試験による品質のグレードを示す。

透気試験の結果、「ひび割れの無い部分」では一般（グレード3）、「充填材を処理したひび割れ部分」は極劣（グレード5）、「無処理のひび割れ部分」では、試験機のチャンバーに十分な負圧を与えられず測定不可であった。これより、TORRENT法は、施工後の品質管理すなわち充填材が適切に注入されているかの確認方法として適用可能であることが確認された。

(3) ひび割れ閉塞処理後の各劣化作用に対する耐久性の検証

前述のひび割れの閉塞工法を実施した試験体について、実環境で想定される種々の劣化作用、その中でも本研究では凍結融解作用、乾湿繰返し作用、塩化物イオン浸透作用の3種に対して促進耐久性試験を行い、その効果を検証した。

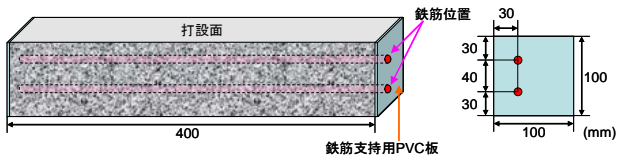


図-1 ひび割れ閉塞後の凍結融解作用後吸水試験結果

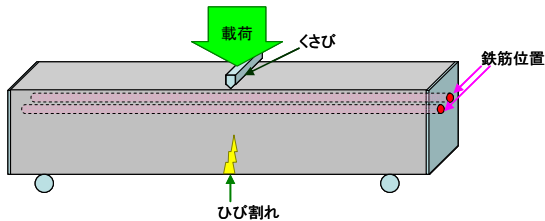


図-2 ひび割れ閉塞後の乾湿繰返し作用後吸水試験結果

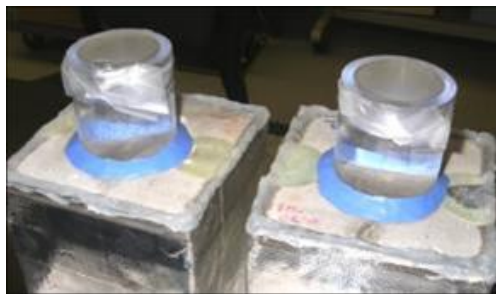


写真-5 吸水試験実施状況

使用した供試体は、各試験とも普通ポルトランドセメントコンクリート (W/C50%) とし、10×10×40cm角柱の中にD10鉄筋を2本配置し圧縮試験機による曲げ載荷で人工的に約0.2mm幅のひび割れを導入後、ひび割れを中心に両端を切断し幅10cmに成形したものをを用いた。尚ひび割れのある面以外の5面は劣化作用が及ばないようにシーリング処理を施した。図-1に供試体中の鉄筋配置位置の概略図を、図-2にひび割れ導入法概略図を示す。

また後述の検証で行う吸水試験は、ひび割れ部分を含むように接着したアクリル円筒に所定量 (本試験では40mL) の水を入れ、所定時間後の残量から吸水量を求めたものである。尚試験では「充填処理した試験体」と「ひび割れの無いコンクリート」で同時に実施し、双方の差分から充填材正味の吸水量を算出した。写真-5に試験状況を示す。

a) 凍結融解作用が想定される環境条件

凍結融解作用 (12時間+20℃~-20℃を1サイクルとする) を28サイクル与えた後に吸水試験により耐久性を評価した。試験は「無処理」および「前述のひび割れ充填後にケイ酸塩系改質剤で処理した試験体」の2種で実施した。図-3に試験結果を示す。図より凍結融解作用が想定される環境条件では、上記の閉塞材を注入した後に

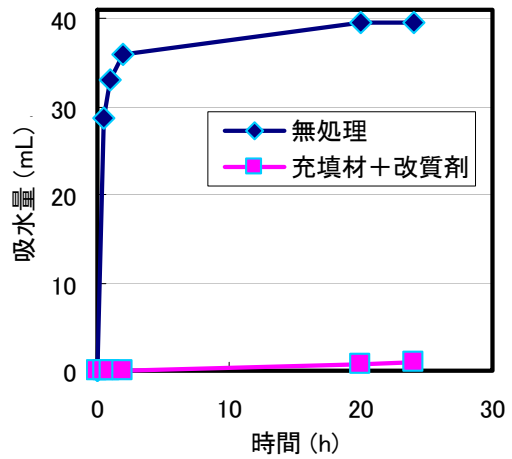


図-3 ひび割れ閉塞後の凍結融解作用後吸水試験結果

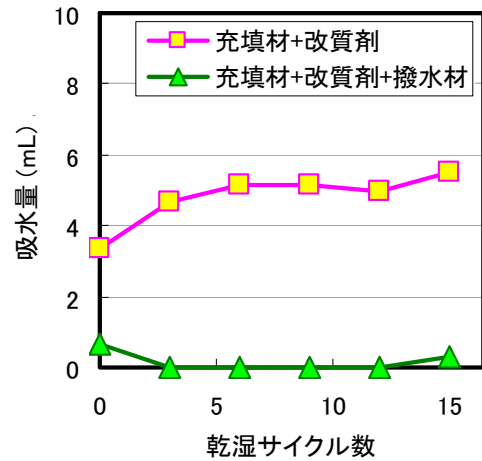


図-4 ひび割れ閉塞後の乾湿繰返し作用後吸水試験結果

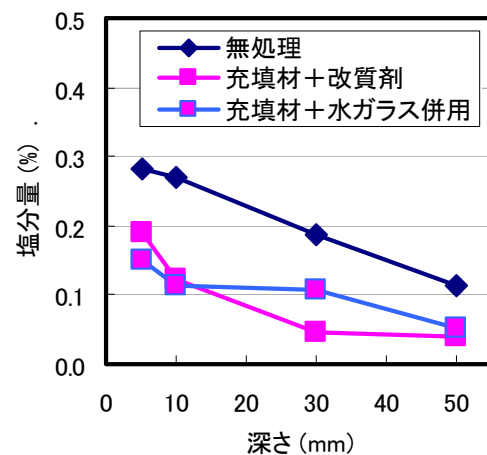


図-5 ひび割れ閉塞後の塩分浸漬試験結果

ケイ酸塩系改質剤による処理を施すことで十分な耐久性が得られることが確認された。

b) 乾湿繰返し作用が想定される環境条件

乾湿繰返し作用（40℃・95%RHを3日，20℃・60%RHを4日を1サイクルとする）を所定サイクル与え，その際の吸水量から耐久性を評価した．測定は乾湿15サイクルまで行い，「前述のひび割れ充填後にケイ酸質系改質剤を塗布したもの」と「同様の処理後シラン系含浸材（撥水剤）を上塗りしたもの」の2種で実施した．**図-4**に試験結果を示す．乾湿繰返し作用が想定される環境条件では，上記閉塞材にケイ酸塩系改質剤およびシラン系撥水剤の上塗り処理を加えることで，より高い耐久性を発揮することが確認された．

c) 塩化物イオン浸透作用が想定される環境条件

塩化物イオン浸透作用（10%NaCl水溶液に4週間浸漬）を与え，充填材注入面に対して垂直に切断し，所定の深さの充填材部分の塩分量をXRF（蛍光X線分析装置）で測定して耐久性を評価した．測定は「無処理」および「ひび割れ充填後にケイ酸塩系改質剤で処理した試験体」，「ひび割れ充填後に水ガラス（ケイ酸ナトリウム3号）を上塗りしたもの」の3種で実施した．**図-5**に試験結果を示す．塩化物イオン浸透作用が想定される環境条件でも，上記閉塞材とケイ酸塩系表面改質剤処理に加え，水ガラスを上塗りすることで，より耐久性を向上させることが確認された．

(4) シラン系表面含浸材の再塗布方法の検証

一般にシラン系含浸材（撥水材）は，外的環境において長期間紫外線にさらされると，表面に形成した含浸層が劣化し撥水性が損なわれていく．しかしこの劣化はコンクリートのごく表面について起こるものであり，内部においては撥水成分が残存するので，再度撥水処理を行おうとしても，バージン材と同程度の十分な撥水は得られない場合があると考えられる．そこで本研究では，劣化した撥水層のごく表面にシランカップリング剤を反応させる表面処理により撥水性を回復させる工法について検討を行った．

実験では，予めシラン系含浸材を塗布後，紫外線灯を照射して撥水性を喪失させたコンクリートを用意した．その表面にシランカップリング剤を塗布後加熱処理を行い，その処理面の接触角を測定することで撥水性を検証した．シランカップリング剤はアルキルアルコキシシラン単体の物質を用い，加熱はハロゲンヒーターを用い表面温度が130℃程度になるまで処理した．**写真-6**に本研究で用いたハロゲンヒーターを，**写真-7**に「紫外線劣化後無処理」および「再撥水化処理後」の撥水性状および接触角測定結果を示す．写真より，劣化後無処理で接触角が約60°に対し，再撥水化処理後では接触角が90°を超え撥水性を示すことが確認され，繰返し施工が可能な撥水処理工法を確立した．



写真-6 ハロゲンヒーターによる再撥水化処理

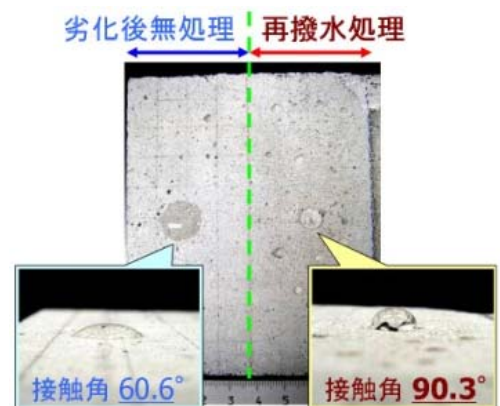


写真-7 処理後のコンクリートの撥水性状

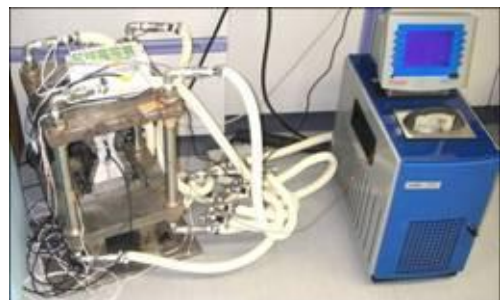


写真-8 熱変化による膨張収縮疲労試験機

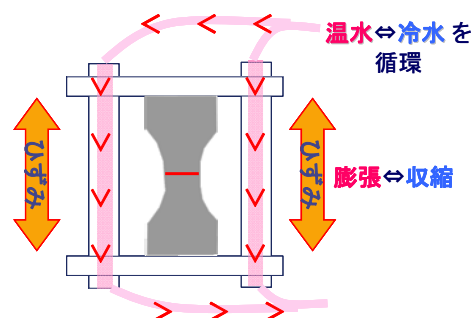


図-6 ムーブメント挙動の発生原理

3. ムーブメントに追従可能な表面改質材料および工法の開発

(1) ムーブメントに対する追従性能の検証と閉塞後の耐久性の確認

前述のひび割れ閉塞工法を処理したひび割れについて、その充填材箇所が実際の環境条件で想定される膨張および収縮のムーブメントに対して追従する性能を有しているか、その性能が50年相当の耐久性を有しているかを検証した。実験では、実環境に近いひび割れのムーブメントを「熱変化による膨張収縮疲労試験機」によって再現した。写真-8に試験機を、図-6にそのムーブメントの発生原理を示す。

本試験機では、4本の中空となっている鋼製支柱に、温度制御された水を循環させることで、支柱自体が熱膨張および収縮を生じる。供試体は試験機の鋼製板に固定されており、支柱のムーブメントに追従する形で同じく膨張および収縮挙動を示す仕組みとなっている。

供試体には普通ポルトランドセメントモルタル（W/C50%）を用い、供試体長200mm、厚さ40mm、幅は最大80mm、最小40mmとした。供試体を試験機に装着後、200 μ 程度のひずみを繰返し与えて、供試体の長手方向の中心箇所にはひび割れを生じさせ、前述のひび割れ閉塞材料で処理した。

ひずみの計測について、支柱は4本すべてをひずみゲージを用いて行い、供試体部分は供試体の打設面側と底面側の2面でクリップゲージを用いて行った。

試験条件について、「50年耐久相当のムーブメント作用」を試験装置で再現するにあたり、以下の数式と実際の気象データをもとに算出したところ、「変位を10 μ 、サイクル数を42」（一日3サイクル）でムーブメントを与えることとした。この試験条件の根拠を以下のとおりである。

設計疲労強度式として、一般に(1a)式が知られている。また本試験条件では、 $k_{1f}=1.0$ （引張）、 $K=17$ （水中・軽量骨材コンクリート以外）、 $\sigma_p=0$ であり、強度 f は単位面積あたりの応力、すなわち（面積×ヤング係数×ひずみ）であるので、式(1b)のように表すことができる。

$$f_{rd} = k_{1f} \cdot f_d \left(1 - \frac{\sigma_p}{f_d} \right) \left(1 - \frac{\log N}{K} \right) \quad (1a)$$

$$\log N = 17 \left(1 - \frac{f_{rd}}{f_d} \right) = 17 \left(1 - \frac{\epsilon_{rd}}{\epsilon_d} \right) \quad (1b)$$

ここに、 f_{rd} : 設計疲労強度 [N/mm²]、 k_{1f} : 圧縮・引張の種別による係数〔無次元〕、 f_d : 設計強度 [N/mm²]、 σ_p : 永久荷重による応力 [N/mm²]、 N : 疲労寿命（但し $N \leq 2 \times 10^6$ 回）〔無次元〕、 K : 疲労定数〔無次元〕、 ϵ_{rd} :

N 回疲労で f_{rd} に達するひずみ [μ]、 ϵ_d : f_d に達するひずみ [μ]

実際の環境および今回実施した試験条件においては、 N と ϵ_{rd} はそれぞれ固有の値をとるため、式(1b)は次のように表される。

$$\frac{\epsilon_{rd}(\text{実環境})}{\epsilon_{rd}(\text{試験条件})} = \frac{17 - \log N(\text{実環境})}{17 - \log N(\text{試験条件})} \quad (1c)$$

ここで、 $N(\text{実環境})$ を 365×50（膨張収縮挙動が1日に1サイクルで50年）、 $\epsilon_{rd}(\text{試験条件})$ を 10 [μ] とし、 $\epsilon_{rd}(\text{実環境})$ を、2009年の札幌市の気象データ¹⁾と既往の文献²⁾³⁾から算出した値 8.278 [μ] として代入すると、

$$\log N(\text{試験条件}) = 17 + \frac{10 \{ \log(365 \times 50) - 17 \}}{8.278} \quad (1d)$$

よって、

$$N(\text{試験条件}) \doteq 10^{1.611} = 40.86 \quad (1e)$$

従って、本試験機でひずみの変位を10 μ とする場合、約42サイクルの膨張収縮を与えることにより、実環境の50年に相当するムーブメントを与えることができると判断した。

図-7に供試体の繰返しひずみ試験結果を示す。なお、測定中に供試体の乾燥による収縮挙動が見られたため、その乾燥分の変位を差し引いた値を用いている。また、打設面側のデータは平滑面が得られえず、得られたひずみデータノイズが大きかったため割愛した。

図より、供試体底面側の変位は、振幅は支柱変位（振幅10 μ ）のおよそ半分ではあるものの、試験終了の42サイクル時においても、支柱の膨張および収縮に追従する挙動を示しており、同配合が50年相当のムーブメント追従性能を有していることが実証された。

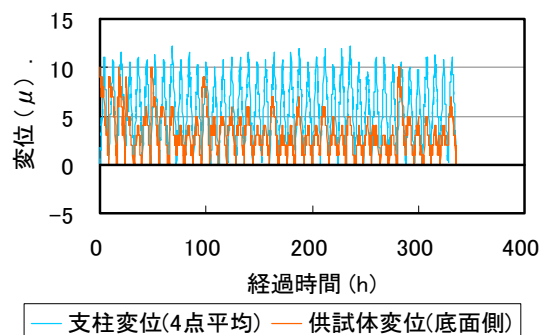


図-7 繰返しひずみ試験結果

(2) シラン系表面含浸材のスケーリング進行抑制効果および塩化物イオン浸透抑制効果について評価

前述のひび割れ閉塞処理をした後に、防水目的でコンクリートの表面に塗布するシラン系表面含浸材のスケーリング進行抑制効果および塩化物イオン浸透抑制効果について評価を行った。

写真-9に北海道内の道路橋地覆のスケーリング状況を、写真-10に北海道沿岸部の暴露実験場に設置した供試体の塩化物イオンの浸透深さのEPMA測定結果を示す。尚、写真-9の地覆は、打設2週間後に含浸材を塗布しその後5年経過時点の状況であり、写真-10の試験体は含浸材の塗布後4年経過時点の測定結果である。

これら写真より、塗布4～5年経過後もスケーリング進行抑制効果および塩化物イオン浸透抑制効果はともに持続していることが確認された。なお、地覆コンクリートのスケーリングは、無塗布の場合は全面的に均等に生じているに対し、塗布した場合は舗装面近傍に集中して発生しており、路面水が地覆の舗装面近傍に集水しやすい部分にはスケーリングが発生するものの、融雪水が飛散する程度の非集水部においては、シラン系表面含浸材がスケーリングの進行を抑制することが明らかとなった。

4. まとめ

- ・ホタテ貝殻未焼成カルシウム微粉末を主成分とするひび割れ充填材とケイ酸塩系表面改質剤を併用することで、幅0.2mm以下のひび割れを閉塞する工法を確立した。
- ・前述の工法の品質管理に表面透気試験装置が適用可能であると確認された。
- ・凍結融解作用が想定される環境条件では、前述の工法で十分な耐久性が得られることが確認された。
- ・乾湿繰り返し作用が想定される環境条件では、前述の工法にシラン系含浸材を上塗りすることで、より高い耐久性を発揮することが確認された。
- ・塩化物イオン浸透作用が想定される環境条件では、前述の工法に水ガラスを上塗りすることで、より高い耐久性を発揮することが確認された。
- ・シランカップリング剤を塗布し、その表面を加熱することで、シラン系含浸材が紫外線劣化したコンクリートに対して繰り返し施工可能な撥水処理工法を確立した。
- ・前述のひび割れ閉塞工法は、0.1mmまでのムーブメ

【無塗布】

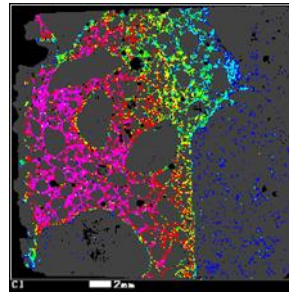


【塗布】



写真-9 塗布5年後の地覆のスケーリング状況

【無塗布】



【塗布】

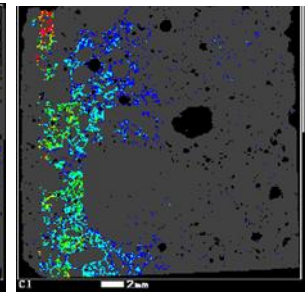


写真-10 塗布4年後の塩化物イオン浸透深さ

ントに対して、50年相当の追従性能を有していることが確認された。

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 2) 田中享二, 申洪澈, 安藤紀明: エポキシ樹脂注入によるコンクリート・モルタルのひび割れ補修部の疲労試験方法, 日本建築学会構造系論文集, No.554, pp.21-27, 2002.4.
- 3) 申洪澈, 田中享二, 宮内博之: エポキシ樹脂注入によるひび割れ補修部の耐疲労特性に及ぼすムーブメントと温度の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.573, pp.37-44, 2003.11.
- 4) 林大介, 坂田昇, 田口史雄, 遠藤裕丈: 浸透性吸水防止材を用いたコンクリートの塩害および凍害環境下における耐久性に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.649-654, 2008.7.
- 5) 宮本修司, 遠藤裕丈, 田口史雄, 川中敏朗, 村中智幸, 藤田裕司: 北海道におけるシラン系表面含浸材によるコンクリート複合劣化対策の現地追跡調査, 寒地土木研究所月報, No.683, pp.9-23, 2010.4.
- 6) 遠藤裕丈, 田口史雄, 小野俊博, 登靖博: シラン系含浸材で保護されたコンクリートの塩化物イオン浸透予測—暴露試験2年目の評価—, 寒地土木研究所月報, No.662, pp.2-10, 2008.7.