

# 硫酸ナトリウムの作用により劣化した住宅基礎コンクリートの補修

Repair of residential concrete foundations deteriorated by sodium sulfate attack

吉田 夏樹\*1、三田 卓\*2、望月 泰史\*3、土屋 恵美\*4

## 1. はじめに

黄鉄鉱 ( $\text{FeS}_2$ ) などの硫化物を含む地盤が造成されると、硫化物が急激に酸化されて硫酸塩 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4$  など) を含む土壌が形成される場合がある。このような土壌に住宅基礎が建築されると、床下の土壌中で硫酸塩が高濃度化することがあり、基礎コンクリートが化学的に侵食される可能性がある。

2011年の本誌 (GBRC、Vol.36、No.3) において、吉田<sup>1)</sup> は、このようなコンクリートの劣化現象の事例を各地で調査した結果や劣化のメカニズムを実験的に検討した成果などを報告した。これに続き本報告では、補修工法を実験的に検討し、実施工に適用した事例を報告する。

コンクリートの劣化度合いや劣化の進行速度は、土壌中の硫酸塩濃度や含水状態、温湿度などの環境条件、コンクリートの調合条件などの多要素の影響を受けるため、現状では将来を予測することは難しい。ただし、この劣化現象が進行すると断面が大きく欠損する例があり、建築物の耐久性能を低下させることが懸念される。そのため、早期に補修を行い、劣化の進行を止めることが望まれる。この際、特に狭い床下での補修作業は困難を強いられるため、作業性が良く効果的な補修方法を考える必要がある。

そこで本検討では、劣化の進行が初期段階の補修にターゲットを絞り、施工が比較的簡便で持続的効果が期待できる補修方法を確立することを目的として、コーティング材によりコンクリート表面を被覆する工法を検討し

た。なお、本報告は、2012年の日本建築工学会学術講演会において発表した内容<sup>2)</sup> を中心に報告するものである。

## 2. 住宅基礎コンクリートの劣化現象の概要

硫酸塩を含んだ土壌に建築された住宅基礎コンクリートの劣化現象を概説する。

写真-1は、住宅基礎コンクリートの被害状況の一例である。各事例に共通して見られる現象は、布基礎コンクリート表層のはく離 (いわゆる、スケーリング) や束石の崩壊であり、劣化部の表面には写真のように白色の結晶が析出する。これは、コンクリートに浸透した土壌中の水分から結晶化した硫酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) であり、劣化現象に深く係わる。



写真-1 住宅基礎コンクリートの劣化状況の一例

\*1 YOSHIDA Natsuki : (一財)日本建築総合試験所 博士 (工学)

\*2 SANDA Taku : (株)ミサワホーム総合研究所 博士 (工学)

\*3 MOCHIZUKI Yasushi : オート化学工業(株)

\*4 TSUCHIYA Megumi : オート化学工業(株)

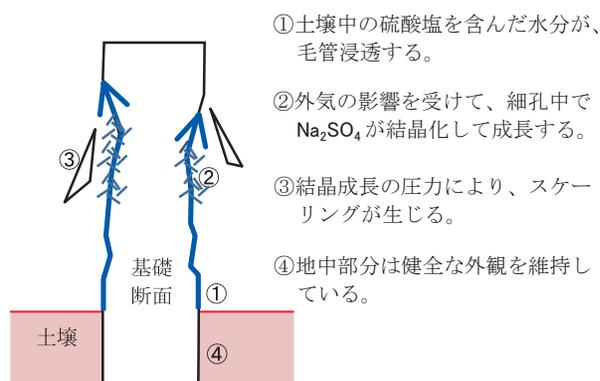


図-1 想定される住宅基礎コンクリートの劣化メカニズム

コンクリートの劣化メカニズムを図-1に模式的に示す。土壌中の硫酸塩を含んだ水分が、毛管上昇により基礎コンクリートの地上部分へと浸透すると、乾燥や温度変化の影響を受けて細孔中で硫酸ナトリウムが結晶化して成長する。この成長する結晶がコンクリートの組織に物理的な圧力を与えてスケーリングが生じるものと考えられる。一方、コンクリートの地中部分は湿潤であり、硫酸ナトリウムが結晶化しないため同様の劣化現象は生じない。

住宅基礎では、床下で硫酸塩が高濃度化するため劣化環境が厳しくなりやすい。図-2に、住宅基礎における硫酸塩の高濃度化のメカニズムを示す。降雨の影響を受けない床下では、乾燥した地表面に向かって硫酸塩を含んだ水分が毛管上昇して濃縮する。土壌の表面には、硫酸塩の結晶が堆積する場合もある。なお、床下の土壌表面がコンクリートに覆われている場合（ベタ基礎や、防湿コンクリートが打設されている布基礎）は、硫酸塩の濃縮現象は生じず、コンクリートの劣化現象も生じない。

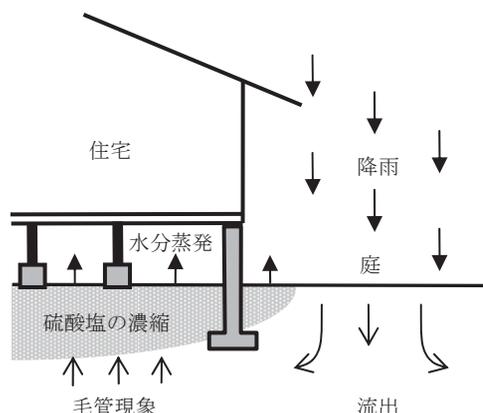


図-2 住宅基礎における硫酸塩の濃縮現象

### 3. 実験方法

#### 3.1 検討内容の概要

本実験では、前述した住宅基礎コンクリートの劣化現象について、劣化の進行が「初期段階」のものを対象として、コーティング材を用いた補修工法を検討する。なお、劣化の初期段階とは、白色物質の析出が見られるが、スケーリングはあまり進行しておらず、スケーリング深さは、最大でも5mm程度の状態のものとする。

本実験で検討する内容は、下地の処理方法、コーティング材の塗布位置、コーティング材の材質の影響とした。

#### 3.2 浸漬試験方法

本実験で用いた試験方法は、吉田らが提案する部分浸漬試験方法である<sup>3)</sup>。この試験方法により、住宅基礎コンクリートと同様の劣化現象を室内実験において再現させることができる。

部分浸漬試験方法の概要を図-3に示す。試験方法について、供試体寸法は4×4×16cmとし、恒温槽内で供試体の下部4cmを5%硫酸ナトリウム溶液に浸漬させた。供試体の溶液面より上部の12cm部分は、外気の影響により乾燥するため、試験溶液は毛管現象により供試体上部へと浸透し、この部分で住宅基礎と同様なスケーリングを生じさせる。また、5℃、40%RHの恒温槽に24時間静置したのち、40℃、40%RHの恒温槽に24時間静置するサイクルを1サイクルとした繰返しの温度変化を与えた。温度変化を与えることにより毛管浸透の促進効果と、結晶成長の促進効果が期待できる。

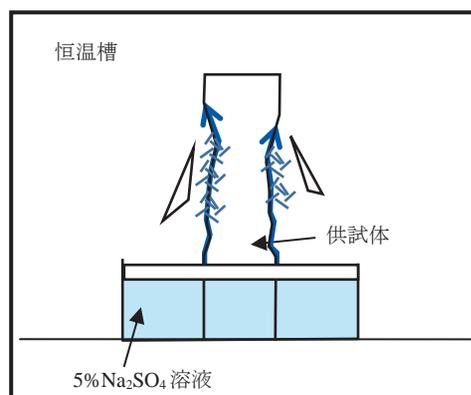


図-3 部分浸漬試験方法の概要

### 4. 実験条件

実験は、実験Ⅰと実験Ⅱの2つに分けて実施した。

実験に用いた供試体は、4×4×16cmのモルタルを下地として、コーティングを施したものである。実験Ⅰに

用いた下地モルタルの調合は、低強度の住宅基礎を想定した調合で練り混ぜたコンクリート（表-1）からウェットスクリーニングにより採取したものである。実験Ⅱに用いた下地モルタルの調合は、水：セメント：砂を0.65：1：2で練り混ぜたものである。いずれのモルタルも、28日間水中養生したものを下地に用いた。

実験ⅠおよびⅡの条件の詳細を以下に示す。

#### 4.1 実験Ⅰの条件

実験Ⅰでは、表-2に示す工程Ⅰ～Ⅳの条件の組合せから、①～⑥の6条件で実験を行った。

工程Ⅰについて、③～⑥の条件では、モルタル下地を7サイクル（2週間）の部分浸漬試験に供し、劣化した住宅基礎を模擬して下地にスケーリングを生じさせた。

工程Ⅱについて、現場での作業を想定し、劣化部分の処理方法を2つ検討した。「削り処理」では、劣化部表層の脆弱化した箇所をスクレーパーで可能な限り削り落とした。「軽度な処理」では、析出している結晶や、はく離片を、刷毛で簡単に落とすのみとした。

表-1 コンクリートの調合および圧縮強度

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				28日強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		W	C	S	G	
70	53.0	198	283	960	884	19.9

表-2 実験Ⅰの条件

実験条件	工程Ⅰ	工程Ⅱ	工程Ⅲ	工程Ⅳ	工程Ⅴ
	下地の劣化処理	劣化部の処理	樹脂の選択	塗布位置の検討	浸漬試験
①	無し		無塗布		部分浸漬試験 最大 30 サイクル (最大 60 日間)
②			溶剤系プライマー (塗布量 100g/m <sup>2</sup> ) + ウレタン樹脂 (塗布量 400g/m <sup>2</sup> )		
③		削り処理 (劣化部表層を除去)			
④		軽度な処理 (結晶を除去)			
⑤		削り処理 (劣化部表層を除去)	アクリル樹脂 (塗布量 350g/m <sup>2</sup> )	溶液面下 2cm～	
⑥					

表-3 実験Ⅱの条件

実験条件	工程Ⅰ	工程Ⅱ	工程Ⅲ	工程Ⅳ	工程Ⅴ	
	下地の劣化処理	下地の処理	プライマーの選択	主剤塗布、塗布位置	浸漬試験	
⑦	無し		無塗布		部分浸漬試験 最大 30 サイクル (最大 60 日間)	
⑧			湿潤処理	溶剤系プライマー (塗布量 100g/m <sup>2</sup> )		ウレタン樹脂 (塗布量 400g/m <sup>2</sup> )
⑨				水系プライマー (塗布量 50g/m <sup>2</sup> )		溶液面下 2cm～

### 4.2 実験Ⅱの条件

実験Ⅱでは、現場環境をさらに想定し、下地が湿っている場合と、プライマーに水性プライマーを用いた場合の効果を確認した。前者は、実建物においては、施工時に基礎が結露などで湿っている場合があることを想定したものであり、後者は、溶剤系プライマーでは揮発性有機化合物の放散による悪臭や健康被害が懸念されるため、これらの心配の低い水系プライマーの効果を確認するものである。

表-3に、実験Ⅱの工程を示す。⑦～⑨の3条件で実験を行った。下地の劣化処理（工程Ⅰ）は行わず、下地モルタルを24時間以上水中に浸漬させた後、モルタル表面が湿った状態でプライマーを塗布した（工程Ⅱ、工程Ⅲ）。プライマーには、溶剤系と水系のものを用いた。塗布位置は、溶液面より2cm下部から上方とし（工程Ⅳ）、プライマーを塗布して30分養生後にウレタン樹脂を塗布し、23℃、50%RHの室内にて14日間養生させたものを部分浸漬試験に供した（工程Ⅴ）。

### 4.3 検討項目および評価方法

①～⑨の各条件で得られた結果を比較することにより、表-4に示す項目を検討した。なお、評価方法は、電子線マイクロアナライザ（以降、EPMAと呼ぶ）による硫黄の面分析、または、目視観察とした。EPMAの測定条件は、供試体断面を分析対象とし、鏡面研磨してカーボン蒸着させたのち、加速電圧15kV、照射電流 $1 \times 10^{-7}A$ 、ビーム径150 $\mu m$ 、ピクセルサイズ200 $\mu m$ の条件で、断面内の硫黄の面分析を行った。

表-4 検討項目

検討項目	比較する実験条件	評価方法
コーティング材の塗布による溶液の浸透抑制効果	①と②	EPMA
スケーリング箇所の処理方法が補修効果に及ぼす影響	③と④	目視観察
コーティング材の塗布位置が補修効果に及ぼす影響	③と⑤	目視観察
コーティング材の物性が補修効果に及ぼす影響	③と⑥	目視観察
下地の湿潤状態が補修効果に及ぼす影響	⑧と②	目視観察
水系プライマーの効果	⑦、⑧、⑨	目視観察

### 5. 実験結果および考察

#### 1) コーティング材塗布による溶液浸透抑制について

ウレタン樹脂無塗布の条件（条件①）と、ウレタン樹脂を塗布した条件（条件②）の浸漬試験後の外観を写真-2に示す。これらを比較すると、前者は、16サイクルで供試体の上部が崩壊するに至ったが、後者は、30サイクルの浸漬試験後にも変化は現れなかった。

図-4に、供試体断面についてEPMAにより硫黄の面分析を行った結果を示す。条件②の供試体は、装置で分析可能な試料寸法に調整するため、高さ方向の中央位置で2分割して分析を行った。各データにおいて、黒く色付いている部分が、溶液が浸透した部分である。

無塗布の条件では、溶液が供試体の上部まで浸透しているが、ウレタン樹脂を塗布した条件は、溶液面付近の表層に幾らか浸透が見られるものの、上部へは浸透しておらず、スケーリングを抑制していることが分かった。

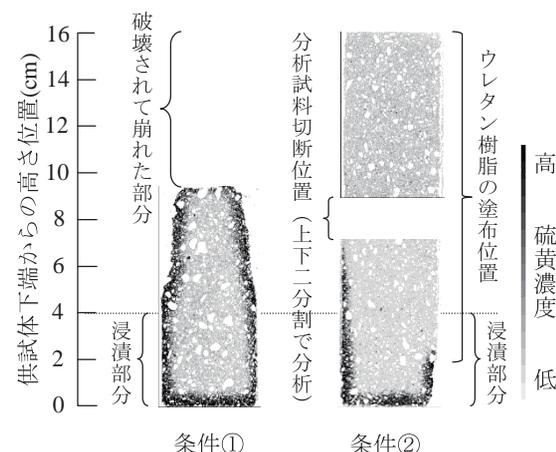
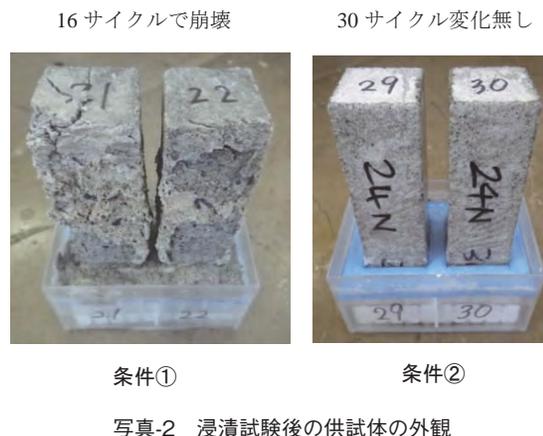


図-4 EPMAによる供試体断面の硫黄の面分析結果

2) スケーリング箇所の処理方法の影響について

スケーリング箇所の表層を削り取る条件(条件③)と、結晶などを簡単に取り除くのみ(条件④)の浸漬試験後の外観を写真-3に示す。これらを比較すると、後者では、塗膜に割れや膨れが生じた。後者の条件では浸透成分は除去しきれずに、時間が経過すると浸透成分が結晶化して成長し、浮きや膨れを導いているものと推定される(図-5参照)。

これより、スケーリング箇所は、白色物質や表層の損傷部分を削り取る必要があることが分かった。

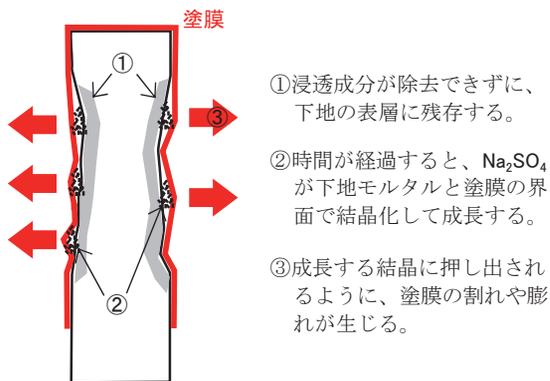
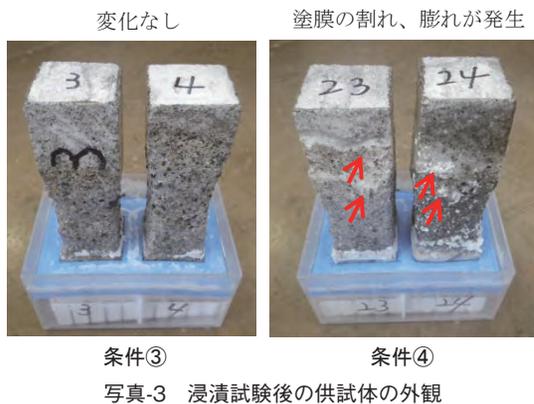


図-5 条件④で想定される劣化メカニズム

3) コーティング材の塗布位置の影響について

ウレタン樹脂を溶液面より下部から塗布した条件(条件③)と、溶液面より上部から塗布した条件(条件⑤)の浸漬試験後の外観を写真-4に示す。これらを比較すると、後者では、塗膜の割れや下地モルタルの劣化が生じた。

後者の条件では、溶液面付近の塗膜の下端から下地モルタルとの界面へと溶液が徐々に毛管浸透し、下地モルタルと塗膜の界面で硫酸ナトリウムの結晶成長が進むことで、塗膜の割れなどが生じたものと推定される(図-6参照)。

これより、コーティング材は、溶液面(実施工では地表面)より下から施工する必要があることが分かった。

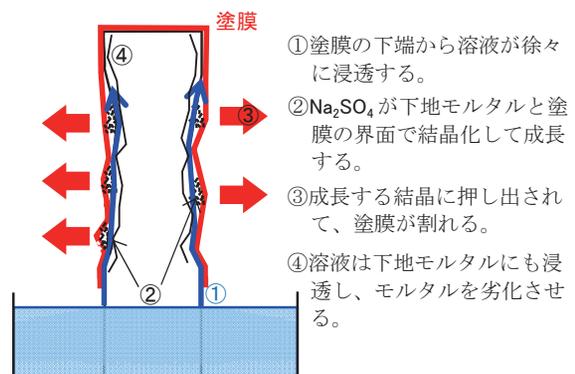
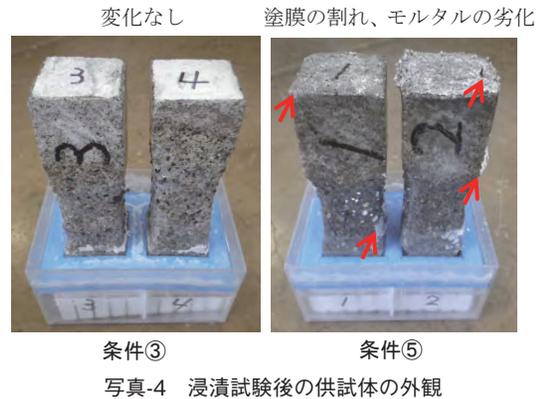


図-6 条件⑤で想定される劣化メカニズム

4) コーティング材の物性の影響について

ウレタン樹脂を塗布した条件(条件③)と、アクリル樹脂を塗布した条件(条件⑥)の浸漬試験後の外観を写真-5に示す。これらを比較すると、後者では塗膜の破れが進み、供試体が破壊された。

これに関し、ウレタン樹脂とアクリル樹脂の基礎的な物性を試験した結果を表-5に示す。

これより、硫酸ナトリウムの作用によるスケーリングを抑止するには、ウレタン樹脂のように、強度や接着性が高く、透水性の低い樹脂を用いて、溶液の浸透を抑止する必要があることが分かった。



表-5 ウレタン樹脂とアクリル樹脂の物性試験結果

試験項目	ウレタン樹脂	アクリル樹脂
引張強さ (JIS K 6251 参考)	3392N/cm <sup>2</sup>	104N/cm <sup>2</sup>
透水試験 (JIS A 6909 B 法)	透水量 0.09ml	透水量 1.71ml

アクリル樹脂製品の例から分かるように、住宅基礎で施工実績のある樹脂（中性化抑制用）とはいえ、これを無計画に施工すると、当該劣化現象の抑止効果を得られない場合があるため、注意が必要である。

#### 5) 下地の湿潤状態の影響について

実験Ⅱの各条件について、浸漬試験後の外観を写真-6に示す。また、比較のため、実験Ⅰの条件②の外観を合わせて示す。

湿潤状態の供試体にウレタン樹脂を塗布した条件（条件⑧）と、表面が乾燥した後にウレタン樹脂を塗布した条件（条件②）を比較すると、いずれも変化は表れず、同等の結果であった。

これより、本実験に用いた溶剤系プライマーについては、湿潤状態の下地に塗布しても問題の無いことが分かった。

#### 6) 水系プライマーの効果について

プライマーに溶剤系を用いた条件（条件⑧）およびプライマーに水系を用いた条件（条件⑨）は、ウレタン樹脂無塗布の条件（条件⑦）と比較して、著しく劣化現象を抑制することが分かった。

溶剤系プライマー（条件⑧）と水系プライマー（条件⑨）を比較すると、後者では、軽度ではあるが溶液面付近の塗膜に割れや膨れが生じた。ただし、劣化現象の抑制効果が大きいことや、揮発性有機化合物が放散する心配が少ないことなどのメリットを考慮すると、本実験に用いた水系プライマーは実施工に十分使用できるものと考えられる。

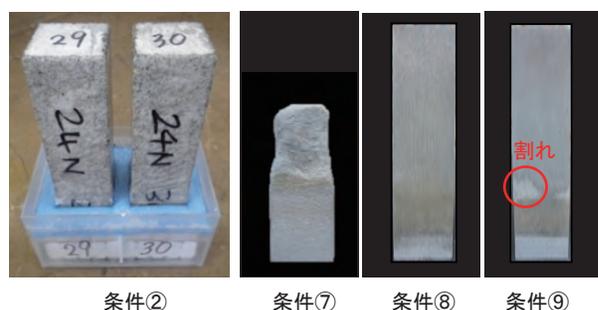


写真-6 浸漬試験後の供試体の外観

## 6. 実建物における施工

実験結果から得られた最適条件をもとに手順を定め、劣化を生じた実建物で施工を行った例を示す。対象とした住宅基礎の断面欠損は小さく、症状は初期的であった。以下に作業手順の概略を示す（写真-7参照）。

- 1) 基礎周囲の土壌を10cm以上掘り下げ、コンクリート面を露出させる。
- 2) スケーリング部分を、スクレーパーやワイヤーブラシなどを用いて丁寧に取り除く。
- 3) 地表面下部からプライマーを塗布し乾燥を待つ。
- 4) 地表面下部からウレタン樹脂を塗布し乾燥を待つ。
- 5) 掘った土を埋め戻す。

一液硬化型の樹脂を使用したため、期待された通り作業性は良く、無色透明としたため、コンクリート表面が観察でき、再劣化の有無などを確認しやすい。プライマーについて、溶剤系プライマーを用いる場合は、施工時に十分な換気対策が必要である。

補修効果の持続性について、室内実験において実施工と同条件で施工した供試体（条件③）が全く劣化しなかったことや、施工したウレタン樹脂の耐候性が50年以上（サンシャインウェザーメータによる評価）であることから、少なくとも50年の持続的効果を期待している。ただし、施工実績が少ないことから、補修効果を継続的に観察することが重要であり、少なくとも住宅の定期点検時（例えば、10年に1回）には、補修箇所の観察が必要と考えられる。



写真-7 コーティング材の施工手順

## 7. まとめ

硫酸ナトリウムの作用により劣化した住宅基礎コンクリートについて、コーティング材の塗布による補修方法を検討した結果、以下の結論が得られた。

- 1) コーティング材を塗布する前に、スケーリング箇所の白色物質や表層の損傷部分を限り削り取る必要がある。
- 2) コーティング材を塗布する際には、基礎周囲の土壌を掘り下げてコンクリートを露出させたのち、地表面より下部から塗布する必要がある。
- 3) ウレタン樹脂のように、高い強度や接着性、低い透水性などの特長を持つコーティング材の塗布は、硫酸ナトリウム溶液の浸透やコンクリートのスケーリングを抑制する効果が高い。

なお、樹脂の種類、プライマーや主剤の調合条件によっては、劣化現象の抑制効果が得られない場合が考えられる。使用前には本実験のように、実施工を想定した試験によって性能を確かめることが望ましい。

また、本実験で検討した補修方法は、劣化現象の初期段階を想定したものである。断面が大きく欠損している場合などは、ポリマーセメントモルタルなどを用いた断面修復の効果を検討することや、劣化度合いによっては、基礎の再構築を考慮することが必要と考えられる。

新築時の対策としては、既報<sup>1)</sup>において整理したように、基礎地盤において硫酸塩の濃縮現象を生じさせない対策（基礎の構造、土壌の対策など）や、コンクリートの調合による対策などが挙げられる。劣化メカニズムを十分に理解したうえで、予防対策や補修方法を慎重に検討する必要がある。

## 【参考文献】

- 1) 吉田夏樹：硫酸ナトリウムの結晶成長によるコンクリートの劣化現象, GBRC, Vol.36, No.3, pp.13-23, 2011
- 2) 吉田夏樹ほか：Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>の作用により劣化した住宅基礎コンクリートの補修, 日本建築工学会2012年大会学術講演会研究発表論文集, pp.195-198, 2012
- 3) 吉田夏樹ほか：モルタルの塩類風化に及ぼす細孔構造および引張強度の影響, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.398-405, 2010

## 【執筆者】



\*1 吉田 夏樹  
(YOSHIDA Natsuki)



\*2 三田 卓  
(SANDA Taku)



\*3 望月 泰史  
(MOCHIZUKI Yasushi)



\*4 土屋 恵美  
(TSUCHIYA Megumi)