

# 防木ジャーナル

THE BOSUI JOURNAL

ROOFING/SIDING/INSULATION/RENEWAL

# 7

2019

No.572



特集

- 生産性を高める技術や道具
- 急がれるインフラのひび割れ対策

## コンクリートひび割れ補修の先端技術

江良 和徳

### 1 はじめに

近年、塩害や中性化などの劣化により鋼材が著しく腐食し、ひび割れやコンクリートの剥離などの変状が顕在化しているコンクリート構造物が増加している。また、アルカリシリカ反応（以下、ASR）による劣化を生じたコンクリート構造物も全国に存在する。

このように、さまざまな劣化原因によって耐久性能、耐荷性能が低下した膨大なコンクリート構造物をすべて更新することは、経済的に困難であり、適切な補修を施すことで構造物の長寿命化、延命化を図ることが急務である。

ひび割れ注入工法は、劣化を生じたコンク

リート構造物に適用される頻度が特に高い補修工法のひとつであるが、過去の適用事例を見ると、単にひび割れを物理的に閉塞することだけを目的と捉え、ひび割れ幅のみを指標として、工法や材料が選定されるケースが多いように見受けられる。しかし、ひび割れ発生の原因が異なれば、補修工法の要求性能も異なるはずであり、劣化機構に応じた適切な補修工法を選定することは、極めて重要であると考えられる。

本稿では、塩害、中性化およびASRによるひび割れ発生メカニズムを整理し、それら原因によって発生したひび割れの補修方法について述べる。また、劣化の補修技術として近年注目を集めている、亜硝酸リチウムを用いた手法について紹介する。

### 2 劣化機構に応じたひび割れの発生メカニズム

#### 2-1 塩害、中性化によるひび割れ

塩害とは、コンクリート中への塩化物イオンの侵入に起因する鋼材の腐食によって、コンクリート構造物の性能が低下する劣化現象である。

一般に、コンクリートはpH値が12~13の強アルカリ性を示し、そのような高アルカリ環境の



写真1 塩害によるひび割れの事例

(一社)コンクリートメンテナンス協会 技術委員長

中にある鋼材の表面には、厚さ数nm程度の不動態皮膜 ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) が形成される。この不動態皮膜によって、コンクリート中の鉄筋は腐食から守られている。しかし、コンクリート中に腐食発生限界濃度以上の塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) が存在する場合、鋼材表面の不動態皮膜は破壊される<sup>1)</sup>。

コンクリート中への塩化物イオンの侵入経路としては、沿岸部の海水の飛沫や、冬季間の凍結防止剤の散布による塩化物の浸透(飛来塩分)、または、海砂や塩化物含有混和剤を使用したことで生じる、コンクリート材料に由来する塩化物(内在塩分)などが考えられる。これらのコンクリート中の塩化物イオン量が腐食発生限界濃度を超えた場合、鋼材周囲の不動態皮膜は破壊され、鋼材の腐食が発生する。

鋼材が腐食すると、腐食箇所が2.5倍程度に膨張するため、その膨張圧によってコンクリートにひび割れが発生する。そのひび割れを通じて水分、酸素、塩化物イオンなど劣化因子の侵入が容易になるため、さらに鋼材の腐食が促進され、コンクリートのひび割れはますます増大する。これが、塩害によるひび割れ(写真1)の発生メカニズムである。

一方、中性化とは、強アルカリ性であるコンクリートに大気中の二酸化炭素が侵入し、水酸化カルシウムなどのセメント水和物と炭酸化反応を起こすことで、細孔溶液のpHを低下させる劣化現象である。



写真2 ASRによるひび割れの事例

高アルカリ環境のコンクリート中にある鋼材の表面には不動態皮膜が形成されているが、pHがおおむね11以下に低下すると、不動態皮膜が破壊され、鋼材が腐食環境下に置かれる。その後の鋼材の腐食の進行については塩害の項で述べたとおりであり、中性化によるひび割れも、鋼材の腐食による腐食生成物の体積膨張に起因する。

すなわち、塩害も中性化も鋼材の腐食により構造物の性能低下が進行するという点で共通しており、その起点となる現象は、鋼材の不動態皮膜の破壊であると言える。不動態皮膜の破壊による鋼材の腐食の概念を図1に示す。

### 2-2 ASRによるひび割れ

ASRとは、コンクリート中の骨材の周囲に生成した、ゲル状生成物の吸水膨張反応によって、コンクリート構造物の性能が低下する劣化現象である。

コンクリートの材料として反応性骨材が使用された場合、コンクリート中のアルカリ金属イオンと、反応性骨材中のある種の反応成分とが化学反応を起こし、アルカリシリカゲルを生成する。日本で確認されている反応性骨材の主なものとしては、火山岩が起源の骨材(安山岩、流紋岩)や、堆積岩が起源の骨材(チャート、砂岩、頁岩)などが挙げられる。

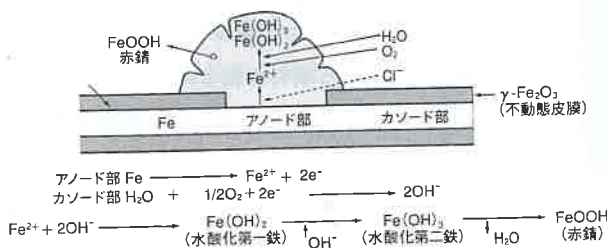


図1 不動態皮膜の破壊による鋼材腐食の概念







写真3 亜硝酸リチウムの外観

溶けやすい性質を持っており、亜硝酸リチウム水溶液として製品化されている。亜硝酸リチウムの成分のうち、亜硝酸イオンには2価の鉄イオン ( $\text{Fe}^{2+}$ ) と反応してアノード部からの  $\text{Fe}^{2+}$  の溶出を防止し、不動態皮膜 ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) として鋼材表面に着床することで、鋼材腐食反応を抑制する効果があり<sup>4)</sup>、塩害や中性化などの鋼材の腐食に起因する劣化の補修材料として活用されている。

一方、リチウムイオンには、アルカリシリカゲ

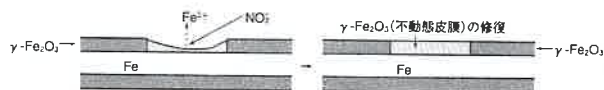


図2 亜硝酸イオンによる不動態皮膜再生の概念

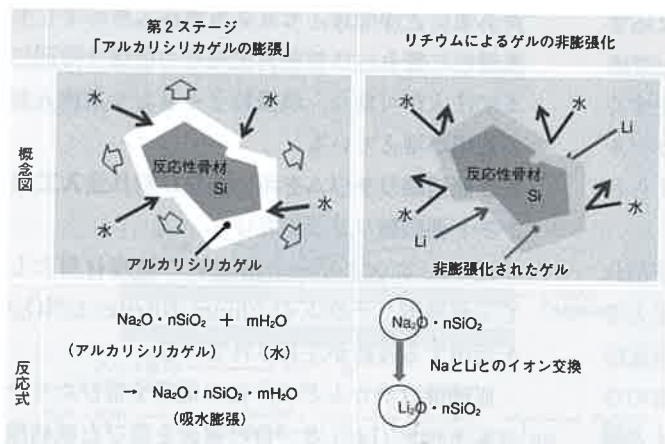


図3 リチウムイオンによるアルカリシリカゲルの非膨張化の概念

ル ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ) と反応することによって、水に対する溶解性や吸湿性を持たないリチウムモノシリケート ( $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ) またはリチウムジシリケート ( $\text{Li}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ ) に置換され、アルカリシリカゲルを非膨張化させる効果があり<sup>5)</sup>、ASR劣化の補修材料として活用されている。

亜硝酸リチウムの外観を写真3、亜硝酸イオンによる不動態皮膜再生メカニズムの概念を図2、リチウムイオンによるアルカリシリカゲルの非膨張化の概念を図3に示す。

### 3-2-2 亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法

塩害や中性化によるひび割れの補修対策として適用される、一般的なひび割れ注入工法の目的は、外部からの「劣化因子の遮断」のみである。しかし、塩害や中性化により発生したひび割れの奥には、腐食が進行中の鋼材が存在するはずであり、根本的な解決を図るためには、鋼材の不動態皮膜再生を促して、鋼材の腐食そのものを抑制することが重要である。

また、ASRによるひび割れの補修対策として適用される一般的なひび割れ注入工法の目的も、外部からの「劣化因子の遮断」のみである。ASR膨張は、長期にわたって続くことが知られており、再劣化を繰り返す構造物も多い。このため、一度補修した箇所の再劣化を遅らせるために、ひび割れ追従性のある柔軟型の注入材を使用する場合もあるが、ASRにより発生したひび割れの奥には、吸水膨張反応が進行中のアルカリシリカゲルが存在するはずであり、こちらもアルカリシリカゲルの非膨張化を促して、ゲルの膨張そのものを抑制することが重要である。

そこで、ひび割れ補修材料に亜硝酸リチウムを併用することにより、ひび割れ注入工法による補修効果を

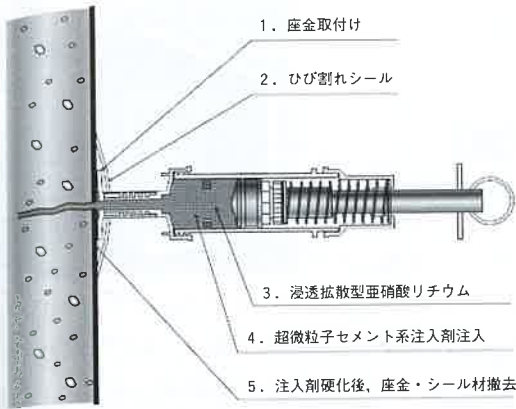


図4 亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法の概念<sup>6)</sup>

「劣化因子の遮断」だけでなく、「鋼材の腐食の抑制」もしくは「アルカリシリカゲルの膨張抑制」まで拡大することを目指した。亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法<sup>6)</sup>の概念を、図4に示す。

前述の目的を持つ亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法では、まず、コンクリートのひび割れ内部に亜硝酸リチウムを先行注入する。これにより、ひび割れ内部をプレウエッティングすると同時に、ひび割れ深部にある腐食した鋼材に亜硝酸イオンを供給して、鋼材の腐食抑制効果を付与する（塩害・中性化の場合）。もしくは、ひび割れ深部にあるアルカリシリカゲルにリチウムイオンを供給して、ゲルの膨張抑制効果を付与する（ASRの場合）。

亜硝酸リチウムを先行注入した後、ひび割れ内部が乾燥しないうちに、超微粒子セメント系注入材を本注入する。同材料は流動性に優れるため、ひび割れの先端まで確実に充填することができる。

注入作業には、先行注入、本注入ともに自動低圧注入器を用いる。写真4に、亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法の施工状況を示す。

#### 4 おわりに

ひび割れ注入工法は、コンクリート構造物の



写真4 亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法の施工状況

維持管理の中でも、特に使用頻度の高い補修技術である。塩害や中性化、ASRなどで劣化したコンクリート構造物の増加に伴い、単なるひび割れの物理的閉塞にとどまらず、劣化機構を考慮した付加価値を持つひび割れ注入工法が適用されることは、コンクリート構造物の長寿命化を図る上で有効であると考えられる。

ここで述べた亜硝酸リチウム併用型ひび割れ注入工法もそのひとつであり、本稿が構造物の維持管理分野に携わる技術者にとって、一助となれば幸いである。

#### 【参考文献】

- 1) 土木学会『コンクリート標準示方書[維持管理編] 2018年10月
- 2) 土木学会『アルカリ骨材反応対策小委員会報告書—鉄筋破断と新たな対応—, 2005年9月
- 3) 日本コンクリート工学会『コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針—2013—, 2013年4月
- 4) 高谷哲, 須藤裕司, 内藤智大, 江良和徳, 山本貴士, 宮川豊章:「コンクリート中における亜硝酸イオンの腐食抑制メカニズムおよびその効果に関する基礎的研究」『Journal of the Society of Materials Science, Japan』Vol.63, No.10, pp722-728, 2014年
- 5) 江良和徳, 三原孝文, 山本貴士, 宮川豊章:「リチウムイオンによるASR膨張抑制効果に関する一考察」『Journal of the Society of Materials Science, Japan』Vol.58, No.8, pp697-702, 2019年
- 6) コンクリートメンテナンス協会『コンクリート構造物の維持管理～塩害・中性化・ASR補修の考え方～』, 2017年4月