

# 塩分吸着型エポキシ樹脂コンクリート補修材 (ハイブリッドエポキシ樹脂)の特性と適用事例

山内 匡<sup>1</sup> 千賀 年浩<sup>1</sup> 古田 雅和<sup>1</sup>

<sup>1</sup>日本国土開発(株) 土木事業本部 技術部

塩分吸着型エポキシ樹脂コンクリート補修材(ハイブリッドエポキシ樹脂)は、エポキシ樹脂に塩分(機能性)吸着材を添加し、エポキシ樹脂従来の品質に加え、塩分吸着性能および鉄筋腐食抑制効果を有したコンクリート補修材である。塩分吸着材が鉄筋腐食の原因となる塩化物イオンを吸着し、換わって放出された硝酸イオンが鉄筋腐食を抑制する。塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物(港湾構造物や凍結防止剤が散布された橋梁等)の補修材として、ひび割れ注入材や、断面修復工法における鉄筋防錆剤およびプライマー、また床版複合防水工法における浸透系防水材などに適用できる。本報では、本材料の特性、及び鉄筋腐食抑制効果のモニタリング結果を適用事例と併せて報告する。

キーワード: 塩分吸着, エポキシ樹脂, 塩害対策, ひび割れ, 断面修復, 床版複合防水

## 1. はじめに

塩害による鉄筋コンクリート構造物の劣化は、海洋からの飛来塩分や冬季に散布される凍結防止剤などによる外来塩分、また洗浄不十分な海砂の使用による内在塩分に起因する。このような塩害に対するコンクリート補修材料としては、無機系材料をバインダーとした塩分吸着剤や亜硝酸リチウムを用いた補修材が開発<sup>1)</sup>されており、断面修復工法などに適用されている。他方、補修材として広く使用されている有機系材料をバインダーとした、塩害対策用コンクリート補修材料は少ない。

本報で紹介する塩分吸着型エポキシ樹脂コンクリート補修材(以下、ハイブリッドエポキシ樹脂)は、有機系材料であるエポキシ樹脂をバインダーとし、これに塩分吸着材を添加して、エポキシ樹脂従来の品質に加え、塩分吸着性能および鉄筋腐食抑制効果を有した塩害対策用コンクリート補修材である。本材料は、断面修復工法において、無機系材料に比べて大きな付着強度が確保できるプライマーや鉄筋防錆材だけでなく、ひび割れ注入材としてや、更に床版複合防水工法における浸透系防水材など、塩害対策用コンクリート補修材料として多くの工法に適用できる特長を持っており、「社会資本のストック効果の最大化」に大きな貢献が期待できる材料といえる。ハイブリッドエポキシ樹脂の概要を、他の塩害対策用コンクリート補修材料と併せて表-1に示す。

表-1 ハイブリッドエポキシ樹脂の概要

	ハイブリッド エポキシ樹脂	塩分吸着剤	亜硝酸リチウム
バインダー	エポキシ樹脂	無機系材料	
性能	塩分吸着・鉄筋腐食抑制		鉄筋腐食抑制
断面修復	○	○	○
ひび割れ注入	○	×	○
床版複合防水	○	×	×

## 2. 塩分吸着材

塩分吸着材は層状複水酸化物の一種である。層間に塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)を吸着し、保持している硝酸イオン(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)とイオン交換する性能を有している。イオン交換のイメージを図-1に示す。

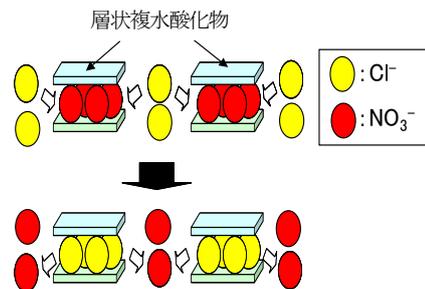


図-1 層状複水酸化物のイオン交換イメージ

### 3. ハイブリッドエポキシ樹脂の特性

#### (1) 品質

ハイブリッドエポキシ樹脂は、2液混合型熱硬化性エポキシ樹脂を用い、塩分吸着材をエポキシ樹脂の質量に対して20%置換したものである。製品は、-5°Cまでの低温環境で使用できる速硬化タイプ「ADOX1380WH」と、標準タイプ「ADOX1380LH」の2種類があり、いずれもJIS A 6024「建築補修用注入エポキシ樹脂」の硬質形低粘度形冬用の規格を満たしている。また、速硬化タイプ「ADOX1380WH」は、NEXCO構造物施工管理要領の「鉄筋防錆材の性能照査」の規格を満足している。物性値及び環境温度を表-2に示す。

表-2 ハイブリッドエポキシ樹脂の物性値及び環境温度

試験項目	試験方法	速硬化タイプ ADOX1380WH	標準タイプ ADOX1380LH
混合物比重 (容積比2:1)	JIS K 7232	1.21	1.21
可使時間 (20°C) 分	温度上昇法	14	71
環境温度		-5°C以上	5°C以上

#### (2) 塩分吸着性能

ハイブリッドエポキシ樹脂の塩分吸着性能を検証した結果を以下に示す。

検証方法は、塩分を含有するセメントペーストにハイブリッドエポキシ樹脂を打継ぎ、45日間の23°C養生後、30日間の60°C促進養生を行い、電子線マイクロアナライザ（以下、EPMA）分析によって、打継ぎ周辺範囲の塩化物（Cl）の可視化を実施した。試験体の概要を図-2に、EPMAによる塩化物（Cl）の可視化を図-3に示す。

促進養生後の塩分含有セメントペーストの塩化物（Cl）は促進養生前に比べて減少している。一方、促進養生後のハイブリッドエポキシ樹脂の塩化物（Cl）は促進養生前に比べて増加している。つまり、塩分含有セメントペーストの塩化物が、ハイブリッドエポキシ樹脂に吸着されたものと判断できる。

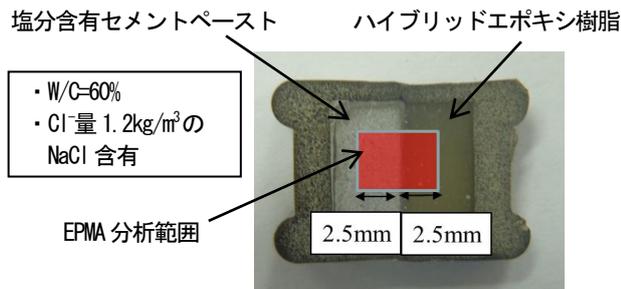


図-2 試験体の概要

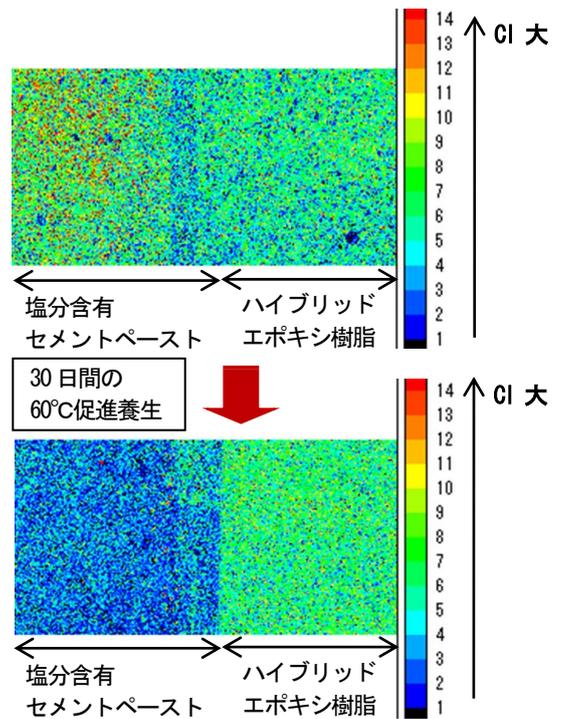


図-3 EPMA分析による塩化物（Cl）の可視化図

#### (3) 鉄筋腐食抑制効果

ハイブリッドエポキシ樹脂の鉄筋腐食抑制効果を検証した結果を以下に示す。

検証方法は、直径100mm、高さ200mmのVP塩ビ管を型枠とし、長さ150mmの異形鉄筋D13を、塩ビ管の高さ中央位置に水平に設置し、コンクリートを打設した供試体を用いた。供試体は脱型を行わず28日間気中養生した後、割裂引張荷重により、鉄筋の直角方向に0.7~1.0mmのひび割れを発生させた。供試体の概要を図-4に示す。

その後、供試体は促進環境を想定した40°Cの恒温室にて、3%の塩化ナトリウム水溶液に、1日浸漬、1日乾燥を2サイクルを繰り返した。そして、鉄筋の腐食を確認した後、ハイブリッドエポキシ樹脂「ADOX1380WH」をひび割れに注入した。また、比較データとして、塩分吸着材を添加していないエポキシ樹脂を注入した供試体と、何も注入を施していない供試体についても、計3ケースを同時に実施した。なお、各ケースともデータ数は3とした。

注入後、40°Cの促進環境において、3%の塩化ナトリウム水溶液に3日浸漬、4日乾燥を1サイクルとした乾湿繰返し試験を実施し、鉄筋腐食抑制効果の検証を行った。鉄筋腐食の評価は、鉄筋の腐食状況を推定できる供試体の分極抵抗と自然電位とした。分極抵抗は10kHz~1mHzの範囲で設定した交流インピーダンス法により測定し、自然電位は照合電極として飽和銀塩化銀電極により測定した。

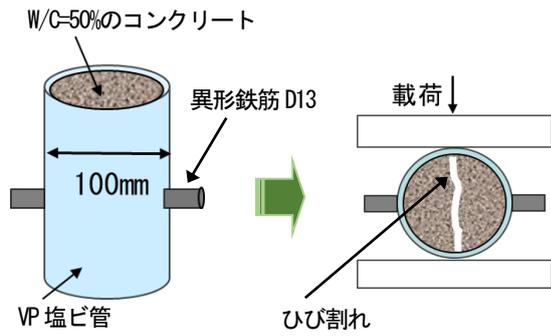


図-4 供試体の概要

分極抵抗の測定結果を図-5に示す。塩分吸着材を添加していないエポキシ樹脂を注入した供試体（EP）は、何も注入を施していない供試体（注入無し）と同様に、分極抵抗は $20\sim 50\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の値で推移している。一方、ハイブリッドエポキシ樹脂（HEP）は、注入後から大きく分極抵抗が増加し、13サイクルまで $130\sim 150\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の値で推移している。一般的に分極抵抗値が大きい方が、腐食速度は低いとされており、ハイブリッドエポキシ樹脂の鉄筋腐食抑制効果が検証できていると考えられる。

測定値を飽和硫酸銅換算した自然電位の結果を図-6に示す。塩分吸着材を添加していないエポキシ樹脂を注入した供試体（EP）は、何も注入を施していない供試体（注入無し）と同様に、サイクル数の増加に伴い、自然電位は卑化する傾向となっている。一方、ハイブリッドエポキシ樹脂（HEP）は、注入後から自然電位が貴化しており、13サイクルまで $-350\text{mV}$ 程度を推移している。自然電位による腐食判定では電位が卑化するほど腐食の可能性が高いことになり、自然電位の結果からも、ハイブリッドエポキシ樹脂の鉄筋腐食抑制効果が検証できているといえる。

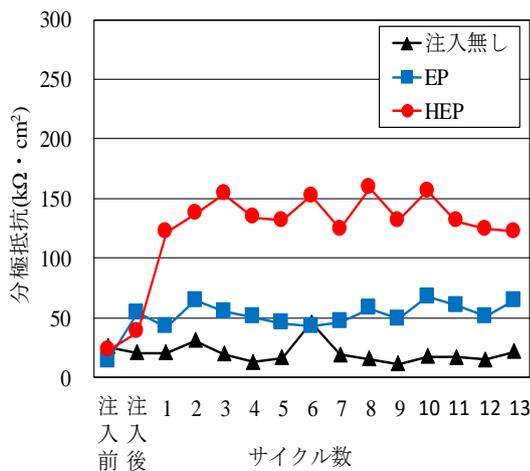


図-5 分極抵抗測定結果

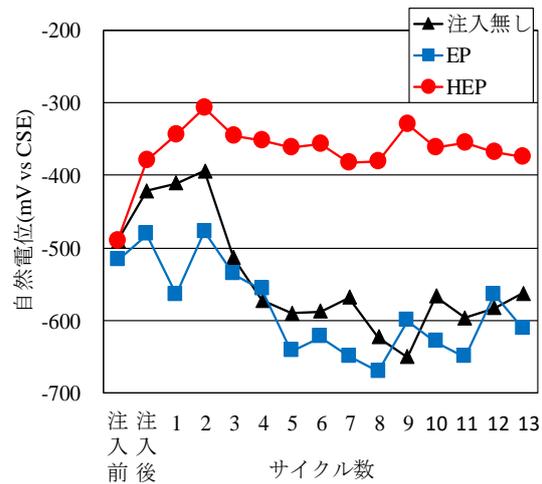


図-6 自然電位測定結果

#### 4. 各種工法への適用内容及び事例

##### (1) ひび割れ注入工法

ハイブリッドエポキシ樹脂製品の標準タイプ「ADOX1380LH」は、ひび割れ注入材として、 $5^\circ\text{C}$ 以上の作業環境において、低速で時間をかけて注入する自動式低圧注入工法や、短時間で注入できる機械式注入工法に適用できる。一方、速硬化タイプ「ADOX1380WH」は、 $-5^\circ\text{C}$ 以上の作業環境において、機械式注入工法への適用はもちろん、 $-5\sim 5^\circ\text{C}$ の作業環境においては、自動式低圧注入工法への適用も可能である。ハイブリッドエポキシ樹脂の適用ひび割れ注入工法を表-3に、ひび割れ注入材への適用イメージを図-7に示す。

表-3 ハイブリッドエポキシ樹脂の適用ひび割れ注入工法

	速硬化タイプ ADOX1380WH		標準タイプ ADOX1380LH	
環境温度	$-5\sim 5^\circ\text{C}$	$5^\circ\text{C}$ 以上	$-5\sim 5^\circ\text{C}$	$5^\circ\text{C}$ 以上
注入工法	機械式 自動式	機械式	—	機械式 自動式

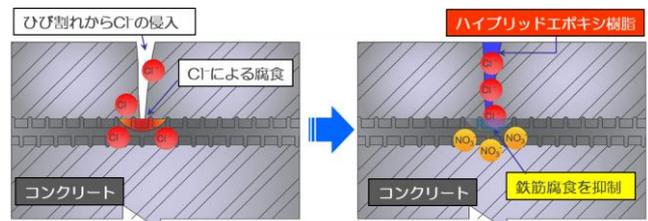


図-7 ひび割れ注入材への適用イメージ

図-4に示す同様の供試体3本を、直接、北海道増毛町にある暴露場において暴露試験を開始した。暴露場は日本海に面し、常に塩分が飛来する環境にある。暴露場の飛

来塩分量は、土研法により2015年10月から1年間調査した結果、 $12.0\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ であった。また、コンクリート標準示方書に示される式<sup>3)</sup>を用いたコンクリート表面の塩化物イオン濃度は $11.4\text{kg}/\text{m}^3$ であり、標準示方書に示される汀線付近の塩化物イオン濃度 $9.0\text{kg}/\text{m}^3$ よりも高く、暴露場が特に厳しい塩害環境におかれていることがわかる。暴露状況を写真-1に示す。



写真-1 供試体の暴露状況

供試体の飽和硫酸銅換算による自然電位の測定結果を図-8に示す。暴露前の供試体の自然電位は $-100\text{mV}$ 程度であったが、暴露後には徐々に卑化する傾向となり、暴露後1年4ヶ月には、ASTM C 876の鋼材腐食性評価で「90%以上の確率で腐食あり」と判定される $-350\text{mV}$ より卑の値を示した。その時点において、ハイブリッドエポキシ樹脂「ADOX1380WH」をひび割れに注入し、鉄筋腐食抑制効果の確認を目的としたモニタリング調査を開始した。自然電位は貴化して、 $-150\sim-250\text{mV}$ を推移している。注入後2年8ヶ月において、ハイブリッドエポキシ樹脂の鉄筋腐食抑制効果が検証されている状態である。

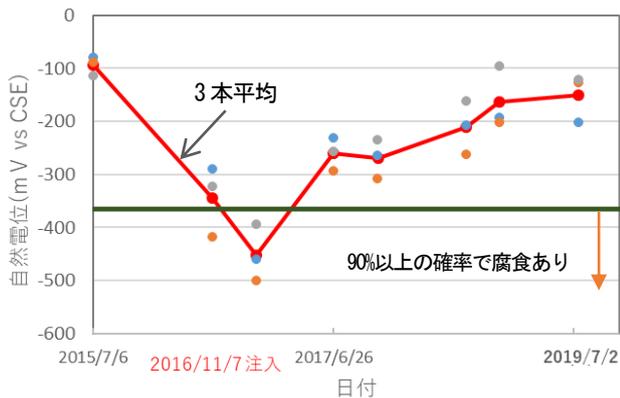


図-8 自然電位測定結果（暴露場）

## (2) 断面修復工法

断面修復工法における、ハイブリッドエポキシ樹脂のプライマーおよび鉄筋防錆材への適用イメージを図-9に示す。図-10には施工フローを、また併せてハイブリッドエポキシ樹脂の適用に当たっての施工上の特長を示す。

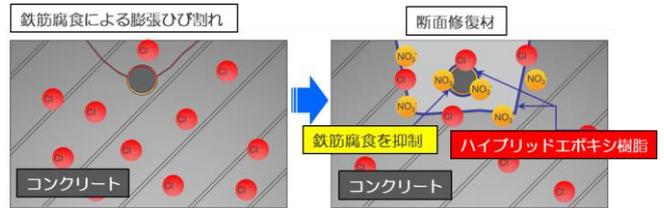


図-9 プライマー及び鉄筋防錆材への適用イメージ

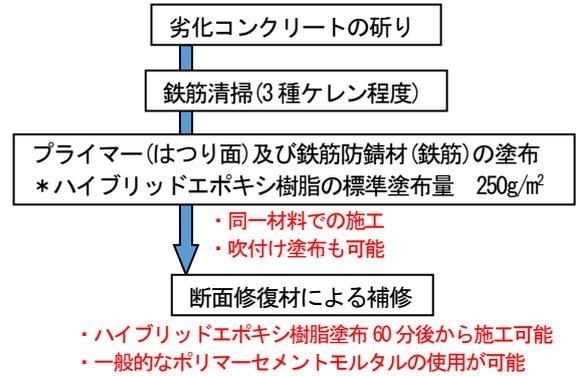


図-10 施工フロー

ハイブリッドエポキシ樹脂「ADOX1380WH」を、断面修復工法のプライマーおよび鉄筋防錆材として、塩害環境の実構造物で使用し、鉄筋腐食抑制効果の確認を目的としたモニタリング調査を実施している。

対象構造物は、昭和37年に供用された青森県の日本海に面した、海岸から30m程度にある側道橋である。床版地覆部のコンクリートが飛来塩分によって塩害劣化しており、研り出したかぶり部のコンクリート片の塩化物イオン量は $6.4\text{kg}/\text{m}^3$ であった。施工前および施工後の状況を写真-2, 3に示す。

鉄筋腐食の評価は、鉄筋の腐食状況を推定できる自然電位とした。自然電位の測定結果を図-11に示す。なお、測定は研り時に予め鉄筋に設置したリード線を使用した。コンクリートを研り出した際の鉄筋は明らかに腐食しており、施工後の自然電位は $-570\text{mV}$ であった。その後、自然電位は貴化して、 $-300\text{mV}$ 程度を推移している。注入後2年において、ハイブリッドエポキシ樹脂の鉄筋腐食抑制効果が検証されている状態である。



写真-2 施工前



写真-3 ハイブリッドエポキシ樹脂による断面修復完了状況

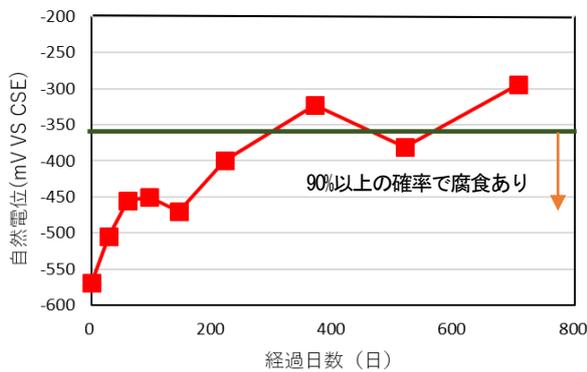


図-11 自然電位測定結果（側道橋地覆）

### (3) 床版複合防水工法

既設道路橋での舗装打換などの修繕工事に伴い、床版防水層を設置する場合には、交通規制に伴う施工時間の制約、また既設床版にひび割れが発生している場合の対策などについて、十分に考慮した施工が求められている。

舗装打換時の床版防水層としては、アスファルト加熱型の塗膜系床版防水層の使用実績が多い<sup>4)</sup>。しかし、近年では、特に積雪寒冷地において、床版の損傷原因である凍害による床版上面のスレーキングに対して、より防水効果が高く、またひび割れ含浸性能を有する浸透系防水材（低粘度のエポキシ樹脂やアクリル樹脂など）をプライマーとして活用し、塗膜系防水材と併用した複合防水層が施工されるケースも多くみられる。

しかし、スレーキングの原因となる凍害の発生箇所においては、凍結防止剤が多く散布されており、塩害による複合劣化も発生している。そこで、複合防水層の浸透系防水材に塩分吸着性能および鉄筋腐食抑制効果を有したハイブリッドエポキシ樹脂の適用が期待されている。

床版複合防水工法における、ハイブリッドエポキシ樹脂の浸透系防水材への適用イメージを図-12に示す。

なお、ハイブリッドエポキシ樹脂を適用した複合防水層の品質は、「道路橋床版防水便覧（平成19年3月）」にある各種試験の規格値を満足し、実施工においても問題のないことが確認されている。

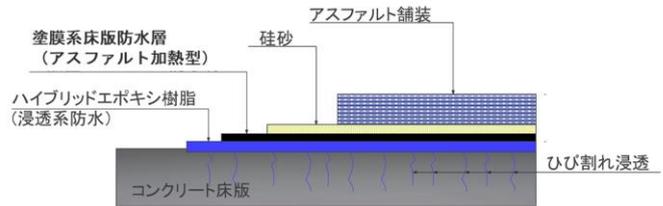


図-12 浸透系防水材への適用イメージ

## 5. まとめ

本報では、塩分吸着型エポキシ樹脂コンクリート補修材（ハイブリッドエポキシ樹脂）の品質や、塩分吸着性能および鉄筋腐食抑制効果の特性を報告した。また、塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物（港湾構造物や凍結防止剤が散布された橋梁等）の補修材として、ひび割れ注入材や、断面修復工法における鉄筋防錆剤およびプライマー、また床版複合防水工法における浸透系防水材などへの適用内容、及び事例の一部を報告した。

室内による促進試験では、長期的な効果についてのデータは取得済であるが、実際の暴露環境における効果検証データの蓄積を目的に、モニタリング調査を引き続き実施していく予定である。

### 参考文献

- 1) 武内道雄, 須藤裕司, 渡辺二夫: 飛来塩分環境下に 20 年間暴露したコンクリート供試体に対する亜硝酸系防錆剤の効果. コンクリート工学年次論文集. vol.32. No.1, 2010
- 2) 山田あずさ, 西信衛, 村上祐貴: 厳しい塩害環境下における塩分吸着剤を添加した補修材の鉄筋腐食抑制効果. コンクリート工学年次論文集. vol.38. No.1. 2016
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編]. pp.157. 2012
- 4) 道路橋床版防水便覧: (社)日本道路協会. 平成 19 年 3 月, p.61