

セメント・ コンクリート

2021
No.897

11

CEMENT&CONCRETE



塩害対策[SSI工法]を施工した コンクリート橋における経年20年 の防錆効果

松尾 賢 池田 泰博

1. はじめに

JR東日本管内のコンクリート橋(以下、橋桁と称す)における塩害は、海からの飛来塩分に起因した外的塩害が主となっている。特に新潟県から秋田県にかけての日本海沿岸での塩害変状は多く発生し、維持管理に苦勞してきた。

塩害環境下にある橋桁では、かぶりは塩害に配慮して設計されている。このため、ひび割れやかぶりコンクリートの剥落など大きな外観変状が顕在化した時には鉄筋の腐食は断面欠損に至る程度に進行していることがある。当社では2000年頃までの塩害を受けた橋桁の補修方法は、コンクリートに生じたひび割れ部や浮き部をはつり取り、鉄筋の錆落としを行ってポリマーセメントモルタルにより断面を修復していた。しかしながら、塩害を受けた鉄筋の錆を工具などで落とすも、塩化物イオンを十分に取り除くことは難しく、鉄筋に残留した塩化物イオンによって再び劣化していた。橋桁の補修では、作業足場を活用しなければならない

Corrosion suppression of reinforcing bars applied SSI-method to concrete bridge for 20 years (by MATSUO Satoshi et al.)



まつお さとし
東日本旅客鉄道(株)
構造技術センター 主席



いけだ やすひろ
同上
副課長

ことも多く、費用が増大する課題もあった。

そこで、当時開発されていた塩化物イオン吸着剤を用いた断面修復工法¹⁾(以下、SSI工法と称す)を日本海沿岸に位置するRC造の鉄道橋において1998年に当社で初適用した。本稿では、SSI工法の鉄筋防錆効果および耐久性の検証を2018年に実施した結果について述べる。

2. 橋桁概要とSSI工法について

2-1. 橋桁概要

対象構造物を写真1, 2に示す。日本海沿岸に位置する橋桁で、構造形式は上下線分離のRC単純2主桁橋(支間長15.9m)、軸方向鉄筋のかぶりは、80mmである。取得年度は1969年で経年約50年である。補修履歴では、記録が残っている範囲で1987年(経年18年)にポリマーセメントモルタル(以下、PCMと称す)による断面修復を上下線で実施しているが、詳細は不明である。その後、上り線では、1997年に再びPCMによる断面修復工と表面被覆工を、下り線では、1998年にSSI工法による断面修復工と表面被覆工を実施している(図1)。

2-2. SSI工法施工時(1998年)の下り線劣化状況

主桁下フランジに橋軸方向のひび割れや錆汁が確認された(写真3)。かぶりをはつりとった状況を写



写真1 橋桁の立地環境

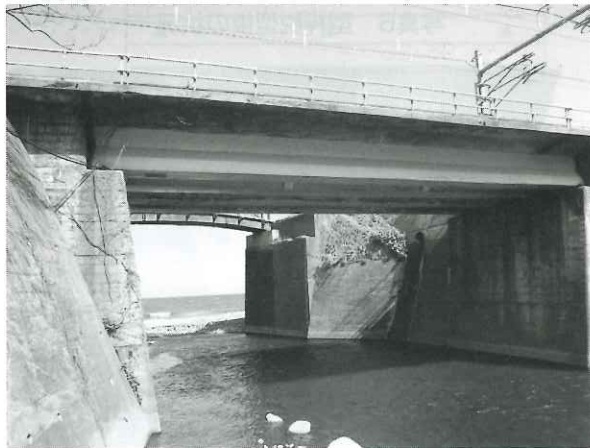


写真2 橋桁全景

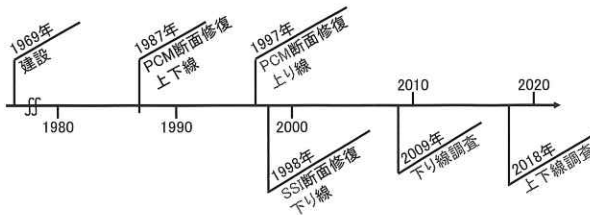


図1 橋桁の補修・調査履歴

真4に示す。下フランジの鉄筋は全体的に錆が生じ、軸方向鉄筋には断面欠損は生じていなかったが、スターラップには生じていたと記録されている。

2-3. SSI工法と補修工事の概要

SSI工法とは、ポリマーセメントをベースに塩化物イオン吸着剤を配合した防錆材を使用し、劣化状況に応じて防錆材の組み合わせが選択できる断面修復工法である。防錆材の材料仕様は変遷しており、防錆モルタルペーストおよび防錆モルタルの2層構成で採用され始め、2013年から2015年頃にかけて高防錆型モルタルペーストのみを塩化物イオン量に応じて数mm塗布する仕様に変更され、現在に至っている²⁾。本橋桁で使用したものは当初の2層構成防錆材である。

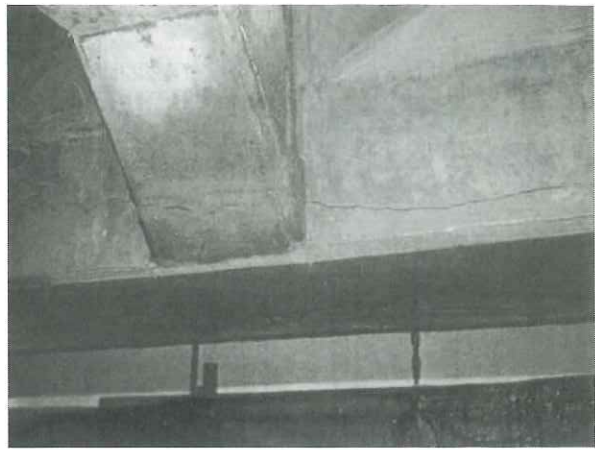


写真3 主桁のひび割れ(橋軸方向)



写真4 はつり後の鉄筋腐食状況

塩化物イオン吸着剤は、層状構造のカルシウム・アルミニウム複合水酸化物であり、カルシウム・アルミニウムの水酸化物層が正(+)に帯電するため、負(-)に帯電した亜硝酸イオンを層間に保持する。吸着剤に塩化物イオンが接するとイオン交換反応により亜硝酸イオンを放出し、塩化物イオンを取り込み固定化する。放出された亜硝酸イオンは、鋼材の不動態皮膜を再形成し鉄筋腐食を抑制することができる。イオン交換による塩化物イオン固定化の概念を図2に示す。

補修工事は、変状が生じている主桁下フランジの最外縁軸方向鉄筋裏までを対象とした。作業工程の概要は、次の通りである。

- (1) はつりおよび鉄筋のケレン

はつり範囲を図3に示す。最外縁の軸方向鉄筋まではつりだし、サンドブラストによりケレンした。

- (2) 防錆材の塗布

母材との界面および露出しているすべての鉄筋に、

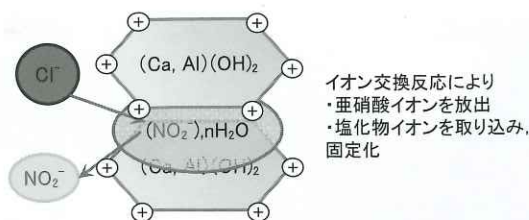


図2 塩化物イオン固定化の概念図

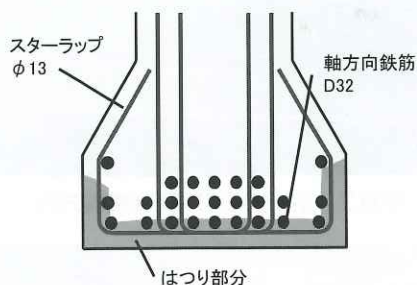


図3 はつり範囲イメージ



写真5 防錆材塗布後の状況

塩化物イオン吸着剤を多く含む防錆ペーストを約1mm刷毛で入念に塗布した。その後、防錆ペーストを塗布した鉄筋を覆うように約20mmの厚さで防錆モルタルを施工した。鉄筋周りの細かい部分は手で充填し、その他の範囲はコテ施工とした(写真5)。

(3) 断面修復

残りの断面修復は、一般的なPCMにより行った。スターラップまでの範囲はコテ施工、残りの表面までの範囲は、型枠設置後に上向きに湿式吹付施工とし、最後に左官仕上げを行い、型枠を脱型した(写真6)。

(4) 表面被覆工

パテで下地処理後、表面被覆工を施工した。

3. 調査の方法

図4, 5の位置において下記の項目を調査した。

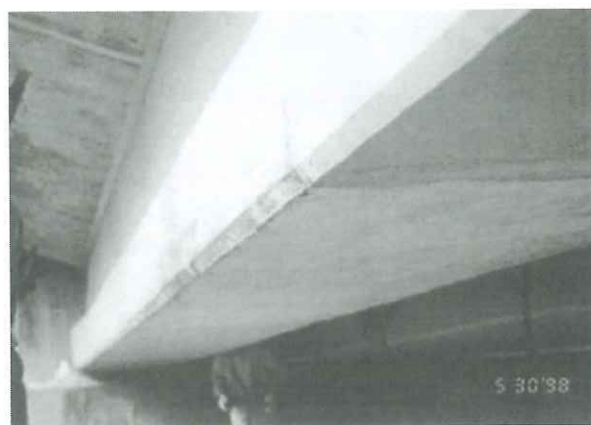


写真6 型枠脱型後の状況



写真7 表面被覆工劣化の状況

3-1. 自然電位測定

「JSCCE-E601-2007コンクリート構造物における自然電位測定方法」により測定した。測定位置は、下り線(2主桁)と上り線(2主桁)のそれぞれで、起点方、中央、終点方の下面3箇所を対象に各個所で7点測定した。

3-2. 鉄筋状態目視調査

下り線では、表面被覆材に剥がれなどが全体的に生じていた(写真7)。また、海側主桁中央部の一部には、最大で2mm程度の橋軸方向ひび割れが生じていた。この位置で軸方向鉄筋およびスターラップを目視調査した。

上り線は、劣化が激しい山側主桁の中央部を海側側面から下面にかけての隅角部において一部はつり落として鉄筋を目視調査した。

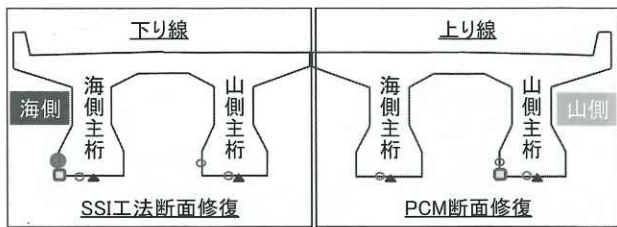


図4 調査位置断面図

□はつり調査 ▲自然電位測定 ○ドリル削孔(Cl⁻) ●ドリル削孔(Cl⁻, NO₂⁻)

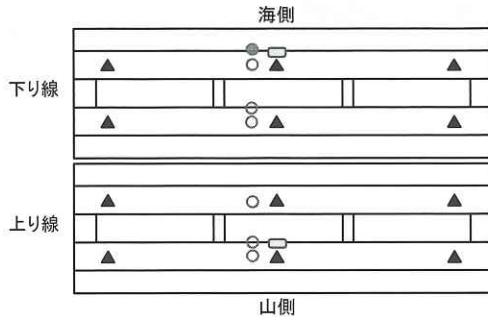


図5 調査位置展開図

□はつり調査 ▲自然電位測定 ○ドリル削孔(Cl⁻) ●ドリル削孔(Cl⁻, NO₂⁻)

表1 自然電位測定結果

線別	測定箇所	測定位置							平均値	標準偏差
		1	2	3	4	5	6	7		
下り	海側									
	起点下面	-324	-377	-296	-373	-395	-293	-356	-345	40.8
	中央下面	-291	-328	-256	-280	-314	-231	-246	-278	35.8
	終点下面	-142	-146	-143	-111	-130	-146	-101	-131	18.3
上り	海側									
	起点下面	-252	-258	-289	-270	-289	-244	-284	-269	18.5
	中央下面	-210	-185	-235	-198	-202	-221	-207	-208	16.2
	終点下面	-278	-290	-246	-273	-271	-269	-267	-271	13.3
下り	山側									
	起点下面	-389	-355	-339	-485	-302	-408	-401	-383	58.7
	中央下面	-424	-476	-422	-421	-434	-428	-444	-436	19.6
	終点下面	-718	-713	-685	-610	-653	-544	-608	-647	63.7
上り	海側									
	起点下面	-233	-199	-188	-130	-225	-200	-103	-183	48.4
	中央下面	-515	-559	-530	-564	-511	-341	-454	-496	77.6
	終点下面	-591	-574	-578	-562	-520	-570	-578	-568	22.8

■ -250mV以上 ■ -350~-250mV □ -450~-350mV ■ -450mV以下

3-3. 塩化物イオン量測定

鉄筋間からドリルにより採取したコンクリート粉を試料とした。ただし、下り線の海側主桁側面では、防錆材中の亜硝酸イオンを測定するため鉄筋近傍を狙いドリル削孔した。表面から80mm深部までの試料は、10mm間隔で、80~120mmまでの試料は20mm間隔で採取した。「JIS A 1154硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験方法」により試料中の塩化物イオン量を測定した。

3-4. 亜硝酸イオン量測定

防錆材中の亜硝酸イオンを測定するため、下り線の海側主桁側面の鉄筋近傍を狙いドリル削孔した。

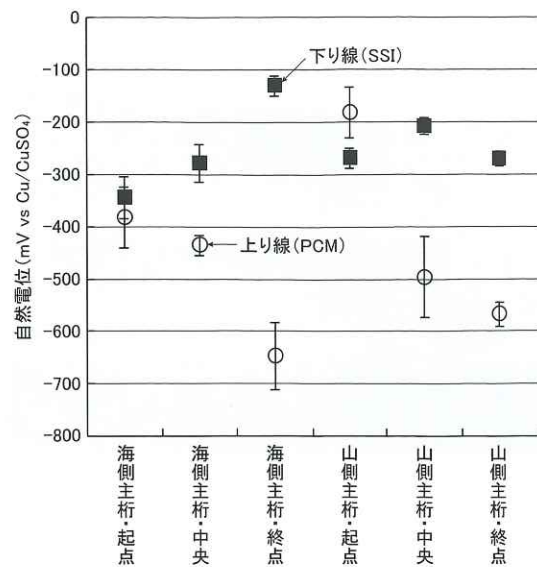


図6 自然電位の上下線比較

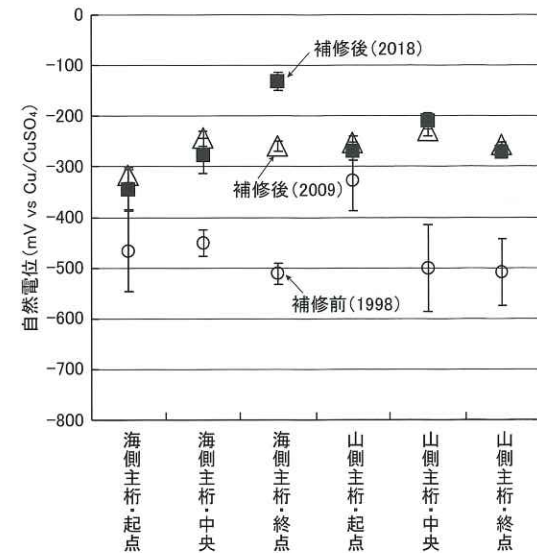


図7 下り線自然電位の経時変化

試料は、100℃で30分間温水抽出して亜硝酸イオンをイオンクロマトグラフィにより測定した。

4. 調査・分析の結果

4-1. 自然電位測定

自然電位の全測定値を表1に、上下線の比較を平均値で図6に示す。SSI工法を施工した下り線では、自然電位は、海側主桁の起点側で若干卑側の値を示す測点もあるが、それでも平均値の鉄筋腐食度はIIの「鉄筋表面に僅かな点錆びが生じている状態」³⁾であり、全体的には、僅かな点錆びが生じているか不動態にあると考えられる。一方、上り線では、-450mVより卑側の測点も多く、鉄筋には膨張性

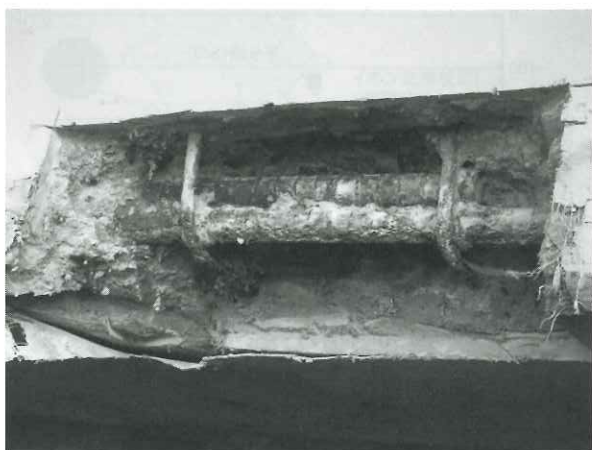


写真8 下り線の鉄筋状態

の錆が生じていると考えられる。

下り線の自然電位の経時変化を図7に示す。SSI工法による補修前の1998年、補修後の2009年と2018年の測定値を比較すると海側主桁の終点側では、2009年から2018年までに貴側に推移しているが、それ以外では自然電位の変動はほとんどなく、全体的に腐食抑制効果が保たれていると考えられる。

4-2. 鉄筋状態目視調査

4-2-1. 下り線 (SSI工法)

はつり出した鉄筋状況を写真8に示す。軸方向ひび割れが生じていた箇所の鉄筋(軸方向鉄筋およびスターラップ)には、一部に軽微な腐食が確認されたが、鉄筋は断面欠損や腐食膨張は生じていなかった。

コンクリート表面に生じていたひび割れは、鉄筋腐食により生じたものではなく、断面修復のさいに材料を重ね継いだ境界に生じた層間剥離であると推察する。

4-2-2. 上り線

はつり出した鉄筋は節が消失しており、層状の錆びや断面欠損が生じていた(写真9)。また、かぶりコンクリートにひび割れや剥離が生じていた。

4-3. 塩化物イオン量の分布

4-3-1. 下り線 (SSI工法)

塩化物イオン量の分布を図8に示す。塩化物イオン量は海側主桁では下面で最大10.9kg/m³、山側主桁では側面で最大3.1kg/m³であった。1998年の断



写真9 上り線の鉄筋状態

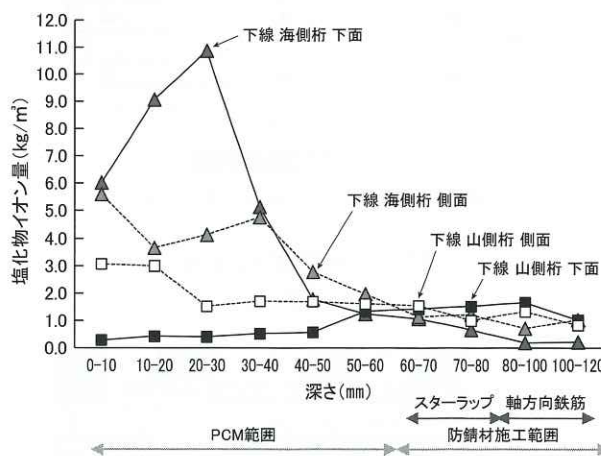


図8 下り線塩化物イオン量の分布

面修復では軸方向鉄筋の背面まで断面修復を行っており、修復材のPCMには塩化物イオンは含まれていないため、断面修復後に飛来塩分の付着により塩化物イオンが再浸透していることが分かる。しかしながら、一般的にPCMはコンクリートと比較して遮塩性は高いので再浸透した塩化物イオン量は非常に多い印象である。この理由に、表面被覆工の剥がれや一部に生じていたひび割れが影響し塩化物イオンの浸透が進行したと考えられる。

その他、山側主桁の下面では補修時に軸方向鉄筋まではつり断面修復しているが、50-60mm以深で塩化物イオン量が微増し最大で1.7kg/m³検出された。これは、吸着剤が機能し、軸方向鉄筋やスターラップに残留した塩化物イオンを吸着したためと考えられる。このことからサンドブラストを行っても鉄筋には発錆限界を超える塩化物イオンが残留すると考えられる。

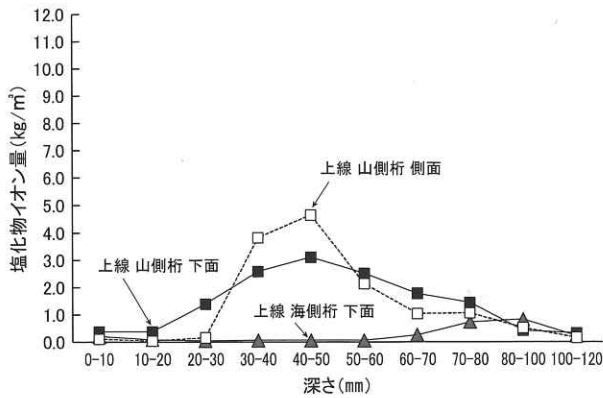


図9 上り線塩化物イオン量の分布

4-3-2. 上り線

塩化物イオン分布を図9に示す。表面から10-20mmまでは塩化物イオン量が少ないことから上り線では飛来塩分の付着は少ないと考えられる。

山側主桁では塩化物イオン量は20mm以深で多く分布し、側面の40-50mmで4.7kg/m³で最も高い。これは、はつり落としおよび断面修復を表層20mm程度までしか実施していないためと考えられる。詳細は1997年施工時の資料がないため不明である。

4-4. 亜硝酸イオン量の分布

亜硝酸イオン量の分布を図10に示す。側面において、表面から80-100mmの軸方向鉄筋位置で亜硝酸イオン量は6.1kg/m³であった。防錆材は、かぶり80mmの主筋D32とスターラップφ13の周囲に約20mm施工している。このことから、亜硝酸イオンが表面より70mm程度より内部で多いことは、経年20年においても鋼材周辺に残存しているものと考えられる。また、表面から深さ70mmまで亜硝酸イオンが漸増していることから、亜硝酸イオンが拡散していることが分かった。

5. SSI工法による防錆効果

亜硝酸イオンの防錆効果は、塩化物イオンとのモル比で1程度以上⁴⁾で得られる。海側主桁側面における亜硝酸イオンと塩化物イオンのモル比([NO₂⁻]/[Cl⁻])を図10に示す。軸方向鉄筋近傍でモル比が6.71であり十分な防錆効果が確認できる。

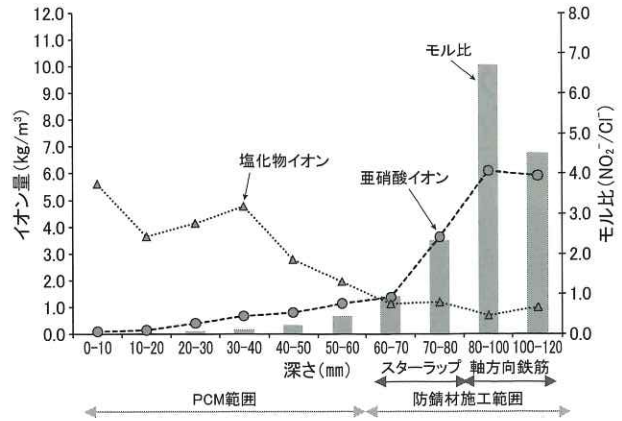


図10 下り線海側主桁側面の亜硝酸イオン量とモル比[NO₂⁻]/[Cl⁻]

また、軸方向鉄筋近傍の亜硝酸イオン量6.1kg/m³に対する防錆効果が保たれる塩化物イオン量をモル比1の場合で計算すると4.6kg/m³である。2018年時点のこの深さの塩化物イオン量は1.0kg/m³未満であるため、防錆効果は今後もしばらくは持続すると考えられる。なお、別の塩害橋りょうでもSSI工法による約20年間の鉄筋防錆効果を亜硝酸イオンと塩化物イオンのモル比により確認している⁵⁾。

6. まとめ

本調査で得られた結果を記す。

- 1) 塩害を受けた橋桁にSSI工法を適用した結果、20年経過後も鉄筋の腐食抑制効果が保たれている。
- 2) 飛来塩分が厳しい環境であってもSSI工法による断面修復工は少なくとも20年以上の耐久性を期待できる。
- 3) 断面修復材に層間剥離が生じ、ひび割れが顕在化することがある。
- 4) 鉄筋をサンドブラストしても鉄筋には塩化物イオンが残留する。

7. おわりに

外的塩害を受けた橋桁でSSI工法の防錆効果は20年継続することを確認した。一方で、断面修復部に層間剥離や浮き、ひび割れが生じている現場が見られる。SSI工法の防錆効果を長期に発現させるためにも断面修復部に弱点をつくらない施工管理が必要である。

例えば、スラブや主桁の下面の施工では、見上げ施工となるため断面修復材が硬化するまでの間に垂れてしまうことや、補修面積が大きい場合には材料の収縮によりひび割れるといったこともある。そのような弱点をつくらない品質管理に努めるとともに、塩害環境にある橋桁のさらなる効果的な維持管理方法を検討していく。

【参考文献】

- 1) 立松英信, 佐々木孝彦, 高田潤/塩害による鉄筋腐食の診断と抑制に関する研究, コンクリート工学論文集, 第11巻第2号, pp.11~20, 2000.5
- 2) 鈴木昭仁, 水野清, 立松英信, 飯島亨/塩分吸着剤を配合した防錆材の高性能化による効果, 土木学会第71回年次学術講演会概要集, pp.479~480, 2016.9
- 3) 佐々木孝彦, 飯島亨, 立松英信/自然電位による鉄筋腐食判定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, vol.18, No.1, p801~806, 1996
- 4) コンクリートメンテナンス協会/「コンクリート構造物を対象とした亜硝酸リチウムによる補修の設計・施工指針(案)」
- 5) 松尾賢, 小林孝元/塩化物イオン吸着剤を配合して断面修復した実構造物における防錆効果の調査方法, 土木学会第76回年次学術講演会, [VI-361]

無料でお届けします

英文パンフレット “CEMENT IN JAPAN 2021”をお届けします

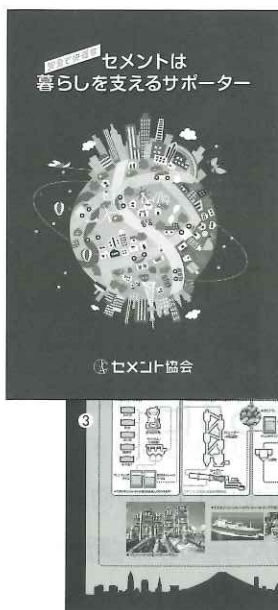


セメント協会は海外向けにわが国セメント産業をダイジェストしたパンフレットを発行しました(A4版・16ページ)。需要と供給・分野別販売先・輸出と輸入・物流関連・建設投資状況・エネルギー・世界のセメント情報などを図表で紹介。海外の方に日本のセメント産業を理解いただくためのツールとしてご活用下さい。

ご希望の方には送料ご負担(着払い)でお届けいたします。申し込みは部数と送付先を明記の上、下記までファクスをお願いします。

(一社)セメント協会 広報部門 ☎03-5200-5062

[おもな内容] 1.JCA MEMBER COMPANIES 2.DEMAND AND SUPPLY 3.CEMENT SALES BY CUSTOMER 4.IMPORT AND EXPORT 5.CEMENT DELIVERY FLOW 6.CONSTRUCTION INVESTMENT 7.ENERGY CONSUMPTION, RAW MATERIALS 8.CEMENT PLANTS LOCATION



一般向け環境パンフレット セメントは暮らしを支えるサポーター

セメント協会はとかく難しくなりがちな社会資本整備への取り組みや循環型社会への貢献を楽しみやすいイラストや写真・グラフを多用してわかりやすく解説したパンフレットを作成しています。

大人から子供たちまで、あらゆる世代の方々にご理解いただける内容です。ご希望の方には無料でお届けいたします。申し込みは部数と送付先を明記の上、下記までファクスでお申込み下さい。

(一社)セメント協会 広報部門 ☎03-5200-5062

[おもな内容] 1.みんなの安全な暮らしを守るコンクリート 2.セメントってどんなもの? 3.世界トップクラスの省エネ技術 4.廃棄物をセメントの原料に 5.セメント工場がなかったら日本はゴミの山? 6.未来を守るセメント工場