

ROOFING / SIDING / INSULATION / RENEWAL

防水ジャーナル

2021

7

No.596



特集1 『建築保全標準』の概要と解説

特集2 いま使ってみたい施工機械と道具

THE BOUSUI JOURNAL

コンクリート構造物の耐久性を向上させる方策

十河 茂幸

近未来コンクリート研究会 代表 / (一社)コンクリートメンテナンス協会 顧問

1 はじめに

コンクリートは、本来耐久性が高い材料である。それを実証しているのが写真に示す小樽港北防波堤である。この堤防は、1897年から1908年にかけて構築され、およそ120年間という長きにわたり北国の過酷な環境に耐え続けている。この防波堤に先駆けて構築された横浜港で生じた不具合の反省を活かして、材料の選定、配合の決定、施工技術の工夫を重ね、耐久性の確認のための供試体も後世に残している。この構造物は、コンクリートが技術により耐久性を高めることを示した。



写真 1908年竣工の小樽港北防波堤¹⁾

しかし、形あるものは壊れるという概念から依然、維持管理は重要視され、維持管理計画を立て、点検、診断が義務化される時代になった。

劣化がどこから進むのかを考えた時、コンクリート自体は表面から進行することは明白である。一方で、塩化物イオンや二酸化炭素など、劣化因子の中にはコンクリート自体に影響を及ぼさないものもある。これらは塩化物イオンの濃度を高めるが、コンクリート自体の強度を低下させるわけではなく、二酸化炭素によりコンクリートが中性化されても炭酸化により、むしろ強度を高めることになる。これらの劣化因子は内部の鉄筋を腐食させ劣化に至るといった経緯をたどる。腐食についても、酸素と水が必要となり、腐食環境にあっても腐食因子がなければ劣化することはない。

そこで本稿では、コンクリートの耐久性を向上させる(劣化因子を抑制する)方策について概説することとする。

では、なぜ近年になってコンクリートの維持管理の重要性が叫ばれるようになったか。それには二つの理由がある。一つは材料面の課題、もう一つは、内部の鉄筋が早期に腐食して膨張破壊を生じさせた事例が頻発したことである。

材料面では、河川環境の保護のため、海砂の利用や、骨材を砕石・砕砂に依存するようになった。海砂の利用で塩化物イオンの濃度が高くなり、鉄筋の早期腐食につながったが、これは瀬戸内海における採取禁止やレディーミクストコンクリートの塩化物イオンの総量規制などの方策で解決している。また、砕石・砕砂については、単位水量の増加をひき起こし、初期ひび割れの問題につながった。これも高性能AE減水剤などの活用で、抑制が可能になった。このように、さまざまな対策を講じることにより、近年では耐久性が確保されるようになった。

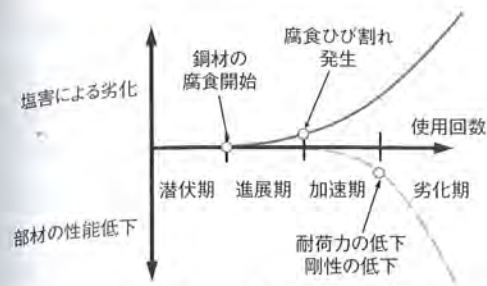


図1 コンクリート構造物の劣化進行の概念

2 耐久性を阻害する要因

近年、コンクリート構造物からの破片の剥落や崩落により、人的・物損被害が生じる事例が後を絶たない。被害の大きい事例としては、1999年の福岡トンネルにおいて新幹線の上に約200kgに及ぶ二次覆工コンクリートが落下した事例や、2012年に起きた中央自動車道笹子トンネルにおける天井板の崩落事故がある。これらの事故をきっかけに、維持管理の重要性が叫ばれるようになったと言える。しかし、本質はこれらの事例ではなく、多くの橋梁に見られるように、塩化物イオンの濃度が高いために鉄筋が次第に腐食し、腐食膨張により、かぶり部分が剥落する事例が頻発していることである。

コンクリート構造物を劣化させる要因としては、塩化物イオンや二酸化炭素による鉄筋の不動態皮膜の破壊、凍結融解作用の繰返しによる劣化、硫酸塩などによる化学的腐食、さらには、アルカリシリカ反応を生じる骨材の使用などが挙げられる。これらの劣化要因はそれぞれ劣化進行のパターンが異なる。図1および表1は、劣化の進行を潜伏期、進展期、加速期、劣化期と分けて示したものであるが、塩化物イオンや二酸化炭素による劣化は、潜伏期では兆候はない。つまり、この段階で劣化因子を止めれば、鉄筋の腐食は生じないといえる。

一方で、凍結融解作用の繰返しによる劣化や化学的腐食は、コンクリートの表面から次第に侵食されるパターンである。こちらも潜伏期に劣化因子を抑制するか、コンクリートに抵抗性

表1 劣化の進展とコンクリートの状態

劣化要因	潜伏期	進展期
塩化物イオン	外観上の変状なし 腐食発生限界Cl ⁻ イオン量以内	外観上の変状なし 塩化物イオンによる腐食開始
中性化	外観上の変状なし 発錆限界以上の中性化残り	外観上の変状なし 中性化による腐食開始
ASR	外観上の変状なし 膨張によるひび割れなし	膨張ひび割れの発生 変色、アルカリシリカゲルの滲出
凍結融解作用	外観上の変状なし 凍結融解の繰返しを受ける	スケーリング、ひび割れ、ポップアウトの発生など
化学的腐食	外観上の変状なし 表面の変質が認められない期間	表面が荒れた状態 ひび割れの発生

を付与させれば劣化を止めることができる。また、アルカリシリカ反応を起こす骨材を使用した場合の劣化を止めるには、始めからそのような骨材を使用しないか、あるいは反応を起こさせない環境にすることが対策となる。

凍結融解作用の繰返しによる劣化は、コンクリート内部の水の凍結膨張圧であり、水の存在がなければ圧力は生じない。これは、耐凍害性を評価する試験方法で気中凍結させた供試体では、なかなか劣化が進まないことで証明されている。また、コンクリート中に微細な気泡が連行されていると凍害を受けにくいことも示されており、レディーミクストコンクリートに必要な空気量を増加させることが義務化されている。

化学的腐食に対しては、先述したように表面からの劣化を防止する対処方法があるが、現在は、主としてコンクリート自体に抵抗性を付与することが行われている。また、アルカリシリカ反応による膨張ひび割れは、アルカリシリカゲルの吸水膨張によるひび割れが原因と考えられ、水の存在をなくすことで対処が可能となる。

これらのさまざまな要因に対する劣化抑制策は、基本的にコンクリート表面からの劣化因子の侵入を抑制することで可能となると考えられる。

3 耐久性を高める技術

コンクリート構造物の耐久性を高める方法に

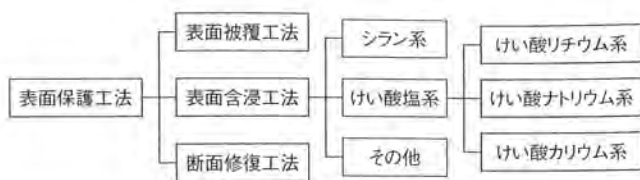


図2 表面保護工法の分類

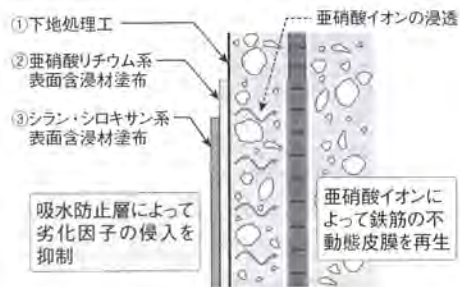


図3 表面含浸工法の一例³⁾

は、大きく二つある。劣化因子の侵入を防ぐ方法と、コンクリート自体の劣化因子に対する抵抗性を高める方法である。

後者は、凍害に対して気泡を連行させる方法、化学的腐食に対して化学的腐食抵抗性を高める材料を用いる方法がある。また、アルカリシリカ反応を抑制する対策としては、コンクリート中の総アルカリ量を低減する方法などがある。

一方、前者は、既設のコンクリート構造物に対応できる方法として注目されている。この方法は、表面保護工法として定義され、土木学会から刊行された『表面含浸工法設計施工指針(案)』²⁾が参考となる。

図2は、表面保護工法を分類したものである。表面処理を行う方法として、表面被覆工法と表面含浸工法があり、表面被覆工法は表面に保護膜を形成して劣化因子の侵入を防ぐ方法で、表面含浸工法は表層部に浸透性のある材料を含浸させることにより劣化因子の侵入を防止する工法である。表面含浸工法の一例を図3に示す。

また、断面修復工法も表面保護工法に分類されるが、この方法は、劣化がかなり進行した段階で適用される方法である。

表面含浸工法のうち、コンクリート表面に皮

膜する材料として、水ははじくが酸素や二酸化炭素は透すシラン系撥水材などがある。一方、けい酸リチウムやけい酸ナトリウムなどの、けい酸塩系材料は、コンクリート表面で浸透して硬化することを期待する材料である。完全な皮膜の形成は困難としても、一定の抑制効果が期待できる。

特に水の侵入を抑制することは、あらゆる劣化の抑制に効果があり、コンクリート構造物の耐久性の向上に不可欠な対策といえる。

図4は、けい酸塩系表面含浸材の主成分と改質機構を示したものである。ここで挙げられる劣化因子とは、水、酸素、二酸化炭素、塩化物イオンのほか化学的腐食をさせる劣化因子がある。

表面含浸工法のうち、図3の亜硝酸リチウムを含浸させる方法は、亜硝酸イオンによる鉄筋の防食を目的にしたもので、亜硝酸イオンが不動態皮膜を修復する効果を期待する工法である。コンクリート表面から内部に拡散させて防食効果を期待する方法と、ひび割れを利用して直接鉄筋に亜硝酸イオンを付与する方法などがある。また、シラン・シロキサンなどの撥水材も同様に表面改質が可能となり、水を遮断して保護層となる。

水の遮断方法としては、コンクリート内部の水分が少ないと凍害を生じにくいいため、コンクリートを乾燥状態に置くことを目的としてシラン系などの撥水材を用いる方法のほか、外部からの水の浸透を防止する表面被覆工法も効果的である。

施工時の留意点としては、まず前処理として表面が施工できるレベルにすることが必要である。表層部の水分率を固化型の場合は乾燥状態にし、反応型の場合は一定の湿り気のある状態とする。ただし、コンクリート表面の水分率を制御することはなかなか困難であると考えておきたい。塗布する材料は刷毛塗り、ローラー塗り、噴霧器を使う方法があるが、塗布面積などで表層部に確実に含浸させることを考慮して行うとよい。また、塗布後の養生や、固化あるい

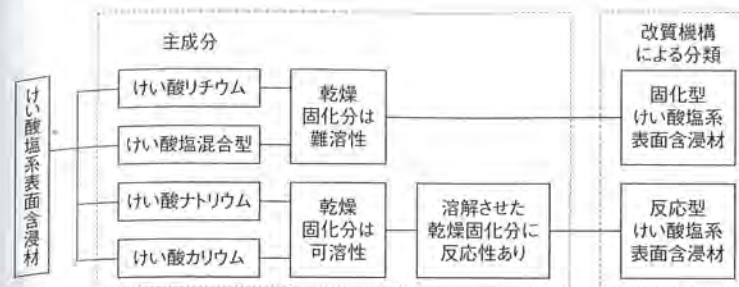


図4 けい酸塩系表面含浸材の主成分と改質機構による分類⁴⁾

表2 コンクリート構造物の耐久性向上のための方策

劣化要因	劣化現象	劣化因子	抑制技術	対策工法の一例
塩化物イオン	鉄筋の腐食膨張と減肉	塩化物イオン 水と酸素	表面被覆工 表面含浸工 鉄筋の防食工	亜硝酸イオンの浸透 シラン・シロキサン塗布 けい酸塩系材料の塗布
中性化(炭酸化)	鉄筋の腐食膨張と減肉	二酸化炭素 水と酸素	表面被覆工 表面含浸工 鉄筋の防食工	亜硝酸イオンの浸透 シラン・シロキサン塗布 けい酸塩系材料の塗布
アルカリシリカ反応	吸水膨張によるひび割れ発生	反応性骨材 総アルカリ量 水	アルカリシリカ反応の抑制工 水の遮断	リチウムイオンの浸透 遮水工法(撥水材塗布、ほか)
凍結融解の繰返し作用	スケールンおよび強度低下	凍結水(氷圧) 微細気泡未混入	水の遮断 微細気泡の連行	遮水工法(撥水材塗布、ほか)
化学的腐食	コンクリートの脆弱化と鋼材の腐食	各種化学物質	耐化学薬品性材料の塗膜 劣化因子の遮断	表面保護工 (表面被覆工・表面含浸工)

は反応を促進させるために適切な期間を置くことが重要である。各種の劣化因子に対応した抑制技術を、表2に示す。

4 早めの診断が効果的

新設・既設を問わず、構造物の劣化は図1に示したように、進行が始まると早い。できるだけ早期に察知することが望ましい。例えば、内部の鉄筋が腐食を始めると腐食膨張が生じて、ひび割れが発生し、次第にひび割れが拡大するとともに鉄筋が減肉して強度および耐久性を低下させる。腐食の初期段階(進展期)では、腐食が生じてひび割れには至らない。早めの対策が功を奏することになる。鉄筋の腐食を早期に発見するためには、腐食環境を評価しなければならないため、塩化物イオン濃度が腐食限界濃度に達していないか、中性化して腐食環境になっていないかを確認しなければならない⁵⁾。

凍害や化学的腐食の場合、表面からの劣化進行になるので、点検していれば早期発見できる。劣化環境であると想定された場合は、点検を怠らないことが重要であるが、初期段階で表面化していなければ点検頻度を落としてもよいと考えられる。

アルカリシリカ反応による劣化は、建設後2年程度で生じる場合と、かなり長期になって反応する場合(遅延膨張性を示す骨材が存在する)があり、いずれにせよ、ひび割れ発生の有無に対する点検が重要である。

5 おわりに

コンクリート構造物の耐久性を延ばすには、当初から高耐久なコンクリートとするか、

既設構造物の場合は延命化のための点検を怠らないことが重要である。早期の対応が補修費用を低減することにつながるからである。なお、コンクリート構造物を劣化せしめる要因にはさまざまなものがあり、適材適所の対策も必要となる。

本稿が参考となり、コンクリート構造物の耐久性向上に寄与できれば幸いである。

参考文献

- 1) 十河茂幸・信田佳延・栗田守朗・宇治公隆:『現場で役立つコンクリート名人養成講座改訂版』日経コンストラクション, 2008.10
- 2) 土木学会編:『表面保護工法設計施工指針(案)』, コンクリートライブラリー119号, 2005.4
- 3) (一社)コンクリートメンテナンス協会編:『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)』2020.4
- 4) 土木学会編:『けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)』, コンクリートライブラリー137号, 2012
- 5) 十河茂幸:『小規模RC橋の点検要領とその事例』, 防水ジャーナル, 2020.5