

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760346

研究課題名(和文)凍結防止剤散布地域におけるアルカリ骨材反応と鉄筋腐食の複合劣化現象の解明

研究課題名(英文) Study on the corrosion of steel bar in ASR affected concrete structure affected by de-icing salts

研究代表者

久保 善司 (Kubo, Yoshimori)

金沢大学・環境デザイン学系・准教授

研究者番号：50324108

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：アルカリ骨材反応および塩害による劣化したコンクリート構造物の維持管理はきわめて重要な課題である。両者が複合した場合については、その劣化進行は十分に明らかにされていない。本研究では、塩害およびアルカリ骨材反応による複合劣化を生じた構造物に対しても最も大きな課題とされている塩分浸透および鉄筋腐食に関する研究を実施した。その結果、アルカリ骨材反応による膨張によって生じたひび割れは、塩害を促進する要因となることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：It is serious and important problem on maintenance of concrete structure deteriorated by Alkali-silica reaction (ASR) and chloride induced corrosion. On the occurrence of the combined deterioration of concrete structure due to ASR and chloride induced corrosion, the evolution of degradation of concrete structure is not cleared. In this study, the main scope was forced on the permeation of chloride ion and the corrosion in concrete structure affected by the combined deterioration. As the results, it is indicated that cracks caused by the expansion due to ASR may promote the degradation due to chloride induced corrosion.

研究分野：コンクリート工学，材料科学，維持管理工学

キーワード：コンクリート アルカリ骨材反応 塩害 複合劣化 維持管理

1. 研究開始当初の背景

我が国におけるインフラ整備は、高度成長期を通じて急速に進められ、インフラの一つであるコンクリート構造物においてのストックは膨大な数にのぼる。当初、メンテナンスフリーと考えられてきたものの、厳しい使用・環境条件等によって早期劣化や供用期間の長期化などの問題を経て、適切な維持管理、予防保全型の維持管理へ移行しつつある。

早期劣化などが生じた構造物においては、劣化原因の特定、劣化状況の把握、さらには、劣化進行予測が適切な対策の実施がその鍵となる。我が国の代表的な劣化原因の一つとして挙げられる塩害においては標準的な維持管理対策が確立されつつある。

他方、コンクリート材料中の骨材に起因するアルカリ骨材反応については、その劣化機構が複雑であるため、対策が確立されていると言えない状況にある。さらに、これまで安山岩、チャートなどの限定された地域で産出される骨材による事例が多く、限定された地域の問題として扱われることが多かったものの、近年では、地質学的知見から反応性を有する骨材は全国の広範な地域において存在する可能性が指摘されており、これまで報告のなかった地域においてもアルカリ骨材反応に対する対応が必要となることが懸念される。

上記に加えて、スパイクタイヤ禁止以降、凍結防止剤散布を起因とした塩害の事例も報告されており、多量の散布によって深刻な劣化を生じている構造物も報告されている。これらの散布は塩害を促進すると同時に、外部からアルカリと水分を供給することによって、アルカリ骨材反応も促進することが知られている。すなわち、寒冷地などの凍結防止剤を散布する地域において、アルカリ骨材反応による劣化が構造物に生じた場合には、両者の影響による ASR と塩害の複合劣化を生じることとなる。凍結防止剤散布下のアルカリ骨材反応により劣化した構造物においては腐食を生じているケースもあり、アルカリ骨材反応と塩害の複合劣化の進行過程については十分に明らかにされていないのが現状である。これらの対策確立のためには、ASR および塩害により複合劣化を生じた場合の劣化過程を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、凍結防止剤散布地域におけるアルカリ骨材反応および塩害の複合劣化を生じた場合の劣化現象を明らかにするため、凍結防止剤散布下における塩分浸透および複合劣化を生じた場合の腐食に着目し、以下を研究目的とした。

(1) 凍結防止剤散布によるコンクリートへの塩分浸透の特徴の解明を行う。

(2) 凍結防止剤影響下の構造物への塩分浸透

実態およびその影響度推定方法に関する検討を行う。

(3) 凍結防止剤およびアルカリ骨材反応が構造物中の鉄筋腐食(複合劣化)に与える影響を明らかにする。

3. 研究の方法

研究は大きく以下の3つのテーマで実施した。各テーマの研究方法を以下に示す。

(1) 凍結防止剤による塩分浸透の特徴の解明

① 供試体

コンクリート供試体(φ100×200mm)はW/C=65%とし、打設1日後、5日間封緘養生を行った。養生後、脱型を行い、検討面以外からの水分の出入りを防ぐために側面と底面に塗膜処理を施した。

② 実験要因 塩分濃度

塩分濃度がコンクリート中への塩分浸透(速度・分布)に与える影響を検討するために、塩分濃度を3%、10%、15%、および飽和(約26%)の4水準を設定した。3%は海水の塩分濃度を想定し、他の10%、15%、および飽和(約26%)は凍結防止剤による高濃度の塩分濃度を想定した。

③ 乾湿サイクル試験

乾燥条件(乾燥サイクル)として40°C、30%R.H.の恒温槽に23時間静置、吸水条件(吸水サイクル)として、所定の濃度の浸漬溶液に検討面を水面下10mmの状態に30分間静置した。乾燥サイクルから始め、乾燥および吸水サイクルを1サイクルとして、乾湿繰返し試験を実施した。

④ 測定項目

供試体質量を測定し、各サイクル(乾湿)における乾燥量により減少した質量、および吸水により増加した質量をサイクル毎に求めた。それらの総和をそれぞれ乾燥量および吸水量として算出した。乾湿サイクル終了後の供試体を割裂し、割裂面に0.1mol/l硝酸銀溶液を噴霧し、呈色範囲を、ノギスを用いて0.1mmまで測定した。また、深さごとの塩分量を測定した。

(2) 凍結防止剤影響下の構造物への塩分浸透実態に基づく影響度推定

① 概要

凍結防止剤散布下の橋脚を対象としたモニタリング結果に基づき、それらの計測データと塩分浸透状況との関係性を分析し、簡易な点検結果に基づく、かぶり深さの塩化物イオン量(影響度)の推定を試みた。

② 外観評価

ひび割れ、漏水の影響による変色の有無(濡れ色含む)、剥離・剥落の有無を主に近接目視によって確認した。それらに基づき、各橋脚の劣化程度(外観評価)を大、中、小の3段階で評価した(小:外観変状なし、大:錆汁、浮きなどの変状、ひび割れ顕著、中:

大小の中間程度)。

③水分率

表面水分率計を用いて、水分率を測定した(同一箇所 3 点, 平均値を代表値とした)。数年間(年 2-3 回)の測定値の平均を推定に用いた。

④塩分分析

ドリル法によって試料を採取し、当該構造物のかぶり深さ(8cm 位置)の塩化物イオン量を求めた(JCI-SC5)。

(3)凍結防止剤およびアルカリ骨材反応が構造物中の鉄筋腐食(複合劣化)に与える影響

①調査概要

ASR と塩害の複合劣化を受けるコンクリート構造物中の鉄筋腐食について、凍結防止剤散布下の ASR 劣化を生じた橋台構造物を対象として、現地調査を実施した。

ASR によるひび割れのみによる影響を検討するため、未補修あるいは未補修部の橋台を選定し、橋台前面部において調査を行った。そのため、対象橋台の ASR によるひび割れ発生は比較的軽微なものであり、0.5mm 以上のひび割れは少なかった。なお、対象橋台全面部において、腐食による錆汁等は外観観察からは見られなかった。

ASR の進行程度については、表面のひび割れ密度を指標とすることとした。ひび割れ調査の結果から、詳細な検討を行う箇所を 10 箇所選定した。

②調査項目

ひび割れ密度を ASR の進行の指標とした。対象橋台の地表から約 0.8m~約 1.8m の範囲の高さ(1m 幅)を水平方向に 1m ごとの区間に分け、ひび割れを幅 0.2mm~0.4mm、および 0.5mm 幅以上に分けて検出し、1m×1m の区画ごとにひび割れ密度(m/m²)を算出した。

鉄筋探査機によって主筋と配力筋の交差部を検出し、周辺部(0.3m×0.3m 程度の範囲)をはつり出し、かぶり深さおよび鉄筋の状態(腐食状況)を調査した。鉄筋の腐食状況については、「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2003:(社)日本コンクリート工学協会」の鉄筋の腐食グレードにより判定した。

はつり箇所(鉄筋交差部から 15cm 位置内)においてドリル法によって塩分分析用試料を採取した。採取深さは 120mm までとし、20mm ごとに試料を採取した。採取後、チャック付きのビニール袋に密封し、塩分分析実施まで保管した。採取した試料は JCI-SC5 法により塩化物イオン量を測定した。

4. 研究成果

(1)凍結防止剤による塩分浸透の特徴の解明

①吸水量および乾燥量

質量測定結果から各サイクルの吸水量と乾燥量を求めた。各サイクルの吸水量および

乾燥量を図-1 および図-2 に示す(それぞれ吸水、乾燥を正とした)。サイクル数の増加に伴い吸水量および乾燥量のいずれも小さくなった。その傾向は濃度の高いものほど顕著となった。

乾湿が繰り返されることで、表層部の塩分濃度が高くなり、これらが浸漬溶液の浸透を妨げる作用を生じたものと考えられ、濃度の高いものほどその影響が顕著に現れたものと考えられる。

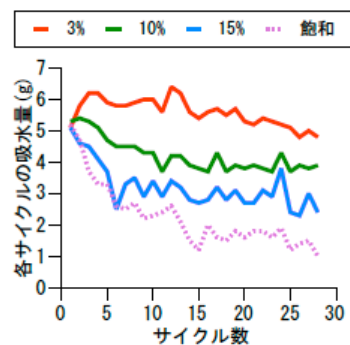


図-1 各サイクルの吸水量

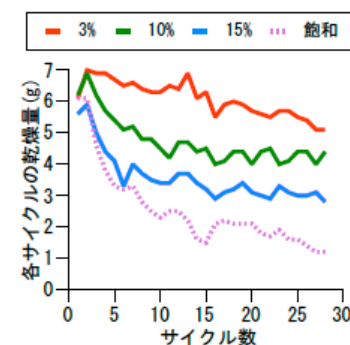


図-2 各サイクルの乾燥量

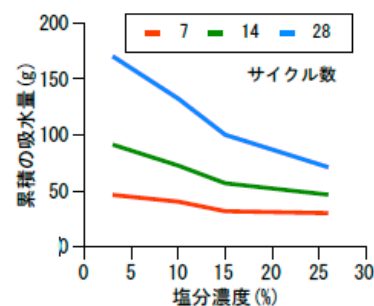


図-3 累積の吸水量

②塩分浸透量

累積の吸水量を図-3 に示す。濃度が低いものほど、吸水量は大きくなった。同一の乾湿繰返し条件においては、濃度の低いものほど溶液が多量に内部に浸透するものと考えられる。同一深さにおける溶液の浸透する空隙量(浸透する空間)が同一であると仮定すると、濃度が低いものほど、内部への塩分浸透深さが大きくなる可能性が高い。

7, 14, および 28 サイクル後の吸水量(累積)に濃度を乗じたものから塩分浸透量を推定

した。塩分浸透量（推定）を図-4に示す。浸透する溶液の量自体は濃度が低いものほど大きくなるのに対して、濃度が高いものほど塩分浸透量の推定値は大きくなった。濃度が塩分浸透に与える影響はきわめて大きいものと考えられる。

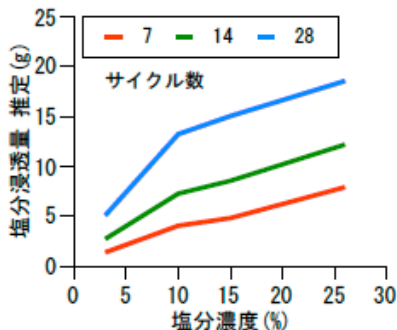


図-4 塩分浸透量（推定）

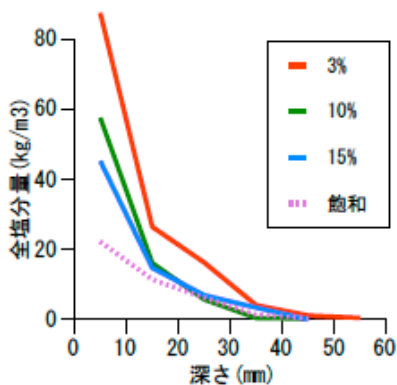


図-5 塩分浸透分布

③塩分浸透分布

28 サイクル後の塩分浸透分布を図-5に示す。いずれのものも深さ 0-10mm の表層部の塩分量は大きく、濃度が高いものほどその影響は顕著であった。塩分を含む溶液の乾湿が繰り返され、表層部に塩分が濃縮されたためと考えられる。他方、内部においては、濃度が高いものの方が塩分量は大きい傾向となった。しかし、その影響は表面から深くなるほど小さくなった。塩分濃度の低いものほど、コンクリート中への溶液の浸透深さは大きくなり、塩分浸透量が小さいにもかかわらず、内部にまで塩分が浸透したものと考えられる。

(2)凍結防止剤影響下の構造物への塩分浸透実態に基づく影響度推定

①外観評価と塩化物イオン量

外観評価と塩化物イオン量の関係を図-6に示す。劣化程度小であれば、腐食発生限界の目安とされる 1.2kg/m^3 を超えるものはなかった。外観評価が中または大のものでは、 2.4kg/m^3 を超えるものが多かった。また、塩化物イオン量の範囲は大きい、この原因は劣化程度中および大においてばらつきが生じた要因として、上部の継手の補修の実施し

た橋脚があり、それにより漏水が解消されたこと、あるいは、その他の理由で漏水経路が変化した箇所であることが水分率の経時変化から推察される。なお、漏水なしと判断されたものでは、 2.4kg/m^3 を超えるものはなかった。したがって、外観評価によって概ね塩化物イオン量の大小 (1.2kg/m^3 未満, $1.2\sim 2.4\text{kg/m}^3$, 2.4kg/m^3 より大きい) などの大まかな推定が可能であるものと考えられる。

②水分率と塩化物イオン量

水分率と塩化物イオン量の関係を図-6に示す。水分率が5%以下のものでは、 1.2kg/m^3 を超えるものはなく、漏水無しのものでは、それらよりも小さい。水分率が8%を超えるものでは、 2.4kg/m^3 を超えるものが多い。ただし、その範囲は大きい。

③影響度推定

①②の結果から、外観評価、漏水の有無から概ね塩化物イオン量の推定は可能であるものと考えられる。ただし、継ぎ手の補修、漏水経路の変化については、評価結果に誤りが生じる原因となるため、水分率の測定によって情報を補完することでより確度の高い推定結果を得ることが可能であるものと考えられる。

対象橋脚における外観評価、漏水の有無、水分率の区分に基づく塩化物イオン量の推定案を表-1に示す。継ぎ手の補修の有無、漏水経路の変化などの情報の補完、測定データの拡充などを行い、本推定案の信頼性についてさらなる検討を行う必要がある。

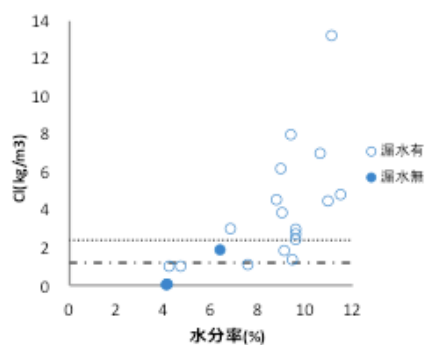


図-6 外観評価と塩化物イオン量

表-1 推定塩化物イオン量

C (kg/m³)		外観評価		
水分率	漏水	小	中	大
5%以下	無	~1.2	~1.2	1.2~2.4
	有			
5~8%	無		1.2~2.4	2.4~
	有			
8%以上	無		1.2~2.4	2.4~
	有			

(3)凍結防止剤およびアルカリ骨材反応が構造物中の鉄筋腐食（複合劣化）に与える影響

①塩分分布

塩分分析結果から得られた塩化物イオン分布からは、かぶり深さの塩化物イオン量が 2.0kg/m^3 を下回る場合にも、深さ 50mm においては 4kg/m^3 を上回る塩化物イオンに達しており、かぶり深さの塩化物イオン量が小さい場合でも、凍結防止剤の影響は小さいものではないものと考えられる。

得られた分布の全てではないものの、D 橋台(2)およびD 橋台(4)の塩化物イオン分布のように、表面近傍よりもやや深部の深さ $20\sim 40\text{mm}$ 範囲の塩化物イオン量の方が大きくなる塩化物イオン分布が、はつり箇所のおよそ半分程度で認められた。他方、D 橋台(1)および D 橋台(3)の塩化物イオン分布のように、表面から徐々に小さくなるような分布が、残りの半分程度のはつり箇所でも認められた。これらは凍結防止剤散布期以外の漏水による洗い流しによるものと考えられる。

②鉄筋腐食グレード

はつり調査による鉄筋の腐食グレードを図-8に示す。いずれの橋台のはつり箇所においても、主筋と配力筋の腐食グレードは同じ程度であった。また、腐食グレード I および II のものがほとんどであり、著しい腐食を示すグレード IV のものはなかった。設計かぶり深さにおいて、塩化物イオン量が 2.0kg/m^3 未満のものがほとんどであったことによる。橋台においては大きなかぶりが確保されているため、現時点では腐食の発生はそれほど顕著ではない状態にあると言える。しかし、表面付近においては多量の塩化物イオンが浸透しているものも半分程度の箇所でも認められたため、凍結防止剤の影響は小さくないことには注意が必要である。

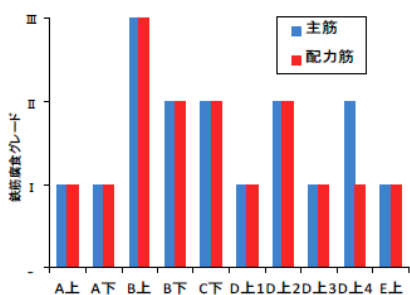


図-8 鉄筋腐食グレード

③ASR 膨張ひび割れが塩化物イオン浸透に与える影響

はつり調査位置のひび割れ密度と設計かぶり位置の塩化物イオン量（主筋および配力筋）の関係を図-9に示す。ばらつきも認められるものの、ひび割れ密度が大きくなるほど、設計かぶり深さの塩化物イオン量が大きくなる傾向を示した。ばらつきはあるものの、ASR 膨張によるひび割れが進展しているものほど、塩化物イオン量の浸透は大きいものと考えられる。

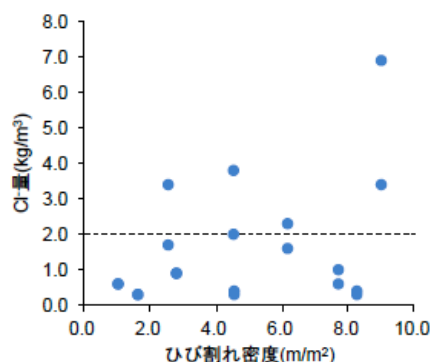


図-9 ひび割れ密度と塩化物イオン量

④塩化物イオン量と鉄筋腐食グレード

かぶり深さの塩化物イオン量が 2.0kg/m^3 程度以上のものにおいて、腐食グレード II および III のものが認められた。既往の橋台下部工における塩化物イオン量と鉄筋の腐食グレードに関する検討においては、塩化物イオン量 2.4kg/m^3 を超えた場合は鉄筋腐食グレード III 以上の著しい腐食が発生する傾向があるとされている。 2.0kg/m^3 前後でも腐食グレードの高いものが一部あった。ASR のひび割れによって、水分および酸素の供給が促進された可能性が示唆された。

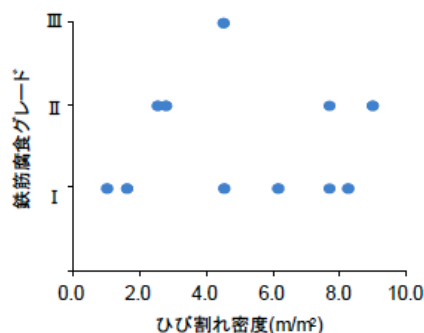


図-10 ひび割れ密度と鉄筋腐食グレード

⑤ひび割れ密度と鉄筋腐食グレード

ひび割れ密度と鉄筋腐食グレードの関係を図-10に示す。ひび割れ密度が大きいものでは、腐食グレード II および III のものが認められる。他方、ひび割れ密度が大きいものでも、腐食グレード I と腐食が発生していないものも認められた。ひび割れ密度が高いもので、腐食が発生していないものについては、凍結防止剤の影響はあるものの、かぶり深さにおける塩化物イオン量で 2.0kg/m^3 を上回るものが現時点では少なかったためと考えられる。ひび割れ密度が大きいものほど、塩化物イオン量の浸透が大きく、腐食グレードの大きいものが認められた。したがって、ASR の進行に伴い、ひび割れ密度が増加すると、塩化物イオンの浸透を促進するとともに、鉄筋の腐食が生じやすくなる可能性が示唆された。

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 矢野峻規, 久保善司, 橋爪康憲, 竈本武弘, 凍結防止剤影響下の実構造物の塩分浸透分布に基づく簡易予測手法, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.36, pp926-931, 2014.7
- ② 井端志帆, 久保善司, 橋爪康憲, 竈本武弘, 凍結防止剤の影響を受けた構造物におけるモニタリング結果に基づく凍結防止剤の影響度の推定, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.36, pp934-938, 2014.7

③

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 矢野峻規, 松田めぐみ, 久保善司, 石川裕一, 菊池徹, 凍結防止剤影響下の ASR 橋台におけるひび割れ性状と塩分浸透に関する基礎的研究, 平成 26 年度土木学会中部支部研究発表会, 2015.3.6, 豊橋
- ② 松田めぐみ, 矢野峻規, 久保善司, 石川裕一, 菊池徹, 塩害と ASR による複合劣化を生じた構造物の劣化変状に関する研究, 平成 26 年度土木学会中部支部研究発表会, 2015.3.6, 豊橋
- ③ 矢野峻規, 橋本庄一郎, 久保善司, 橋爪康憲, 現場モニタリング結果に基づく実構造物の凍結防止剤の影響度推定に関する研究, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014.9.10~12 大阪
- ④ 井端志帆, 久保善司, 竈本武弘, 橋爪康憲, 簡易な点検結果に基づく凍結防止剤の影響度の推定, 平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会, 2014.3.7, 岐阜
- ⑤ 久保善司, 奥裕里衣, 橋本庄一郎, 橋爪康憲, 樺山好幸: 凍結防止剤を想定したコンクリート中の塩分浸透に関する実験的検討, 2012.9.5~7 平成 24 年度土木学会全国大会, 名古屋

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 件)

名称:
発明者:
権利者:

種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保 善司 (KUBO Yoshimori)
金沢大学・環境デザイン学系・准教授

研究者番号: 50324108

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

橋爪康憲 (Hashizume Yasunori)
竈本武弘 (Kamamoto Takehiro)
樺山好幸 (Momiyama Yoshiyuki)
石川裕一 (Ishikawa Yuichi)
菊池徹 (Kikuchi Toru)