

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760347

研究課題名(和文) コンクリート中の鉄筋腐食に与える環境の影響

研究課題名(英文) Influence of environment on reinforcement corrosion in concrete

## 研究代表者

高谷 哲 (Satoshi, TAKAYA)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40554209

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)：コンクリート構造物では、ひび割れが劣化度の指標として用いられることも多い。これまで腐食ひび割れの影響要因として主にかぶりや鉄筋径が考えられてきたが、近年では生じる腐食生成物の影響が大きいことも指摘されている。しかし、コンクリート中における腐食生成物の生成プロセスについては不明な点も多く、構造物の置かれている環境条件から生じる腐食生成物を推定するのは難しいのが現状である。そこで本研究では、様々な腐食環境でコンクリート中の鉄筋に生じる腐食生成物の分析を行い、コンクリート中における腐食生成物の生成プロセスを整理するとともに腐食生成物の違いがひび割れ幅と腐食量の関係に与える影響について検討した。

研究成果の概要(英文)：Sometimes cracks are used as an index of deterioration grade. For this reason, crack opening weight loss or relationship between crack width and weight loss have been studied by many researchers. Recently, however, it is reported that not only cover thickness or bar diameter which have been thought to be main factor for crack opening but also corrosion products may have large influence. However, formation process of corrosion products in concrete is still unclear and it is difficult to predict corrosion products formed in concrete constructed in various environment. Then in this study, in order to arrange formation process of steel corrosion products in concrete, XRD analysis of steel corrosion products formed under various corrosion environment was carried out. Additionally, influence of corrosion products on relationship between crack width and corrosion weight loss was investigated.

研究分野：土木材料学

キーワード：鉄筋腐食 腐食生成物 体積膨張倍率 ひび割れ

1. 研究開始当初の背景

コンクリート中の pH は 12~13 であり、コンクリート中の鉄筋は通常不動態被膜に保護されている。しかし、塩化物イオンの侵入や中性化により不動態被膜が破壊されると、鉄筋腐食が生じることが知られている。コンクリート中の鉄筋が腐食すると膨張圧が発生し、かぶりコンクリートにひび割れが発生する。このひび割れは、劣化の加速や美観・景観の点で問題となるだけではなく、かぶりコンクリートの剥落による第三者被害や耐荷力低下の原因ともなる。そのため、コンクリート中の鉄筋の腐食状態を推定することは、コンクリート構造物を維持管理する上で非常に重要であり、これまでも数多くの実験的・解析的研究が行われてきている。その結果、かぶりコンクリートに生じたひび割れの幅からコンクリート中の鉄筋腐食量を推定する手法なども提案されている。しかし、実験・解析結果と実構造物における測定結果の差は大きく、推定手法の精度向上が求められている。

この原因としては、腐食環境の違いがあると考えられる。さびの生成には、塩化物イオンや酸素、水が複雑に関与しているため、コンクリート構造物における鉄筋の腐食要因として代表的な中性化や塩害でもさびの生成プロセスが異なる可能性があり、さらに同じ塩害でも海岸構造物と凍結防止剤を散布する山間部の構造物では生じるさびが異なる可能性がある。一方、研究においては、短い時間で腐食させる手法として電食が用いられることが多く、電食と実構造物の腐食生成物も異なる可能性が高い。生成されるさびの主な成分としては、 $\alpha$ -FeOOH や  $\gamma$ -FeOOH、 $Fe_3O_4$  などであると考えられ、さらに塩化物イオン存在下では、 $\beta$ -FeOOH が生成する可能性が考えられる。これらのさびはそれぞれ結晶構造が異なり、密度や体積膨張倍率なども違うことが知られている。様々な環境下において生成するさびの成分が腐食膨張量や腐食量に与える影響を明らかにできれば、各種環境下でのコンクリート中の鉄筋腐食量の予測精度を高められると考えられる。

2. 研究の目的

コンクリート中の鉄筋が腐食すると、かぶりコンクリートの剥落による第三者被害や耐荷力の低下を引き起こすため、鉄筋の腐食量を予測することはコンクリート構造物を維持管理する上で非常に重要となる。しかし、コンクリート構造物は様々な環境下に置かれるため、中の鉄筋の腐食性状も多様であり、劣化予測が難しいものとなっている。そこで、本研究課題では、様々な環境下における鉄筋の腐食特性を明らかにし、使用環境の違いが腐食ひび割れ発生腐食量に与える影響を検

討することを目的とする。

3. 研究の方法

さびの生成に酸素や水、気温などが複雑に関与することから、電食、促進、自然暴露の3種類の方法で鉄筋腐食を生じさせる。また、塩化物イオンの存在により生成するさび成分が変わると考えられるため、塩化物イオンを混入した試験体についても試験を行う。腐食が進み、所定のひび割れ幅に到達した時点で、鉄筋を取り出し、腐食量や腐食膨張倍率の測定、さび成分の分析を行う。分析は X 線回折により行う。以上の実験により、生成するさび成分の違いがひび割れ幅と腐食量の関係などに与える影響を検討する。

4. 研究成果

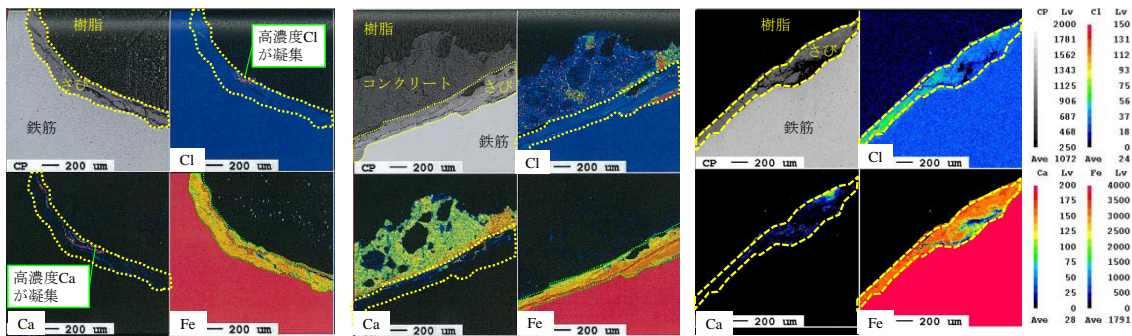
本研究においてコンクリート中の鉄筋腐食で生じることが確認された腐食生成物およびその体積膨張倍率を表-1 に示す。

表-1 各腐食生成物の体積膨張倍率

腐食生成物		密度(mg/cm <sup>3</sup> )	体積膨張倍率
Goethite	$\alpha$ -FeOOH	4.3	2.9
Akaganeite	$\beta$ -FeOOH	3.6	3.5
Lepidocrocite	$\gamma$ -FeOOH	4.1	3.1
Magnetite	$Fe_3O_4$	5.2	2.1
塩化酸化鉄(III) カルシウム	$CaFeO_2Cl$	3.4	6.9

表中の体積膨張倍率は密度を元に算出した単位結晶の理論体積膨張倍率であるが、コンクリート中で生じる腐食生成物は周囲のコンクリートの拘束により空気層が少なく、コンクリート中における体積膨張倍率は理論体積膨張倍率に近いと考えられる。

$CaFeClO_2$  は、実構造物でも生じることがあるが、主にコンクリート中の鉄筋を電食により腐食させたときに生成しやすい腐食生成物であることが確認された。この理由を考察するために、電食試験で生成したさび層および実構造物で  $CaFeClO_2$  の生成が確認されたさび層、 $CaFeClO_2$  の生成が確認されなかったさび層の EPMA 観察を行った。その結果を図-1 に示す。図を見ると、実構造物で  $CaFeClO_2$  の生成が確認されたさび層では、局所的に塩化物イオンやカルシウムイオンが高濃度で存在している箇所が見られる。一方で電食を行った場合には、さび層全体に塩化物イオンやカルシウムイオンが分布していることが確認できる。 $CaFeClO_2$  の生成条件については明らかになっていないが、 $Fe(OH)_2$  からの酸化過程は溶存酸素量に律速されると考えられ、Fe の溶解速度が大きい場合には、未酸化の  $Fe(OH)_2$  が蓄積されると考えられる。そのような場合に、周囲の溶液に塩化物イオンやカルシウムイオンが溶解していると、酸化過程でこれらのイオンが取り込まれ、 $CaFeClO_2$  が生成すると考えられる。電食試験で生成しやすい理由としては、供試体の材齢が若いいため未水和のセメントが多く、カルシウムイオンが溶出しやすいこと、予め塩化物イオンを



(1) 実構造物 (CaFeO<sub>2</sub>Cl 生成あり) (2) 実構造物 (CaFeO<sub>2</sub>Cl 生成なし) (3) 電食

図-1 さび層の EPMA 分析結果

多量に混入しているため腐食初期の段階で鋼材周辺に高濃度の塩化物イオンが存在すること、供試体を水溶液に浸漬して電食を行うため、鉄筋近傍の空隙が常に飽和状態にあり、塩化物イオンやカルシウムイオンが溶解しやすいこと、が考えられる。

ひび割れ幅と腐食量の関係に与える腐食生成物の影響を図-2 に示す。図中の腐食量、ひび割れ幅ともにそれぞれの試験体の平均値を表している。また、図中の暴露試験結果は、26年間三重県の防波堤で暴露されていた供試体を用いた結果である。図を見ると、塩水散布では Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の体積膨張倍率に近い  $\gamma=2.1$  を用いて表現できるが、暴露試験では  $\beta$ -FeOOH や  $\gamma$ -FeOOH に近い  $\gamma=3.1$  程度となっている。

腐食生成物に与える pH の影響は大きいと考えられたため、腐食反応によりどの程度 pH が低下するかを確認したところ図-3 に示すように 5~7 程度まで低下することが確認された。これは電食試験の結果であり、Fe の溶解速度が大きかったために鋼材表面の OH<sup>-</sup> の消費速度が大きく、特に pH が低下しやすかったと考えられる。したがって、腐食速度が大きな環境ではコンクリート中であっても鋼材表面の pH が低下する可能性は高いと考えられる。高アルカリ環境下では Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> が生成しやすいが、腐食が進行してきて鋼材表面の pH が低下してくると  $\beta$ -FeOOH や  $\gamma$ -FeOOH が生成しやすくなると考えられる。塩水散布と暴露試験で違いが生じた原因は、塩水散布試験の方が腐食速度は大きかったと考えられ、pH の違いだけでは説明ができない。腐食生成物の生成には pH だけでなく溶存酸素の影響も大きいため、塩水散布試験では定期的に塩水を噴霧するためにコンクリートの含水率が常に高く保たれており、鋼材表面の水層が酸素の拡散抵抗となり腐食の進行に伴い酸素不足になったために  $\beta$ -FeOOH や  $\gamma$ -FeOOH が生成しにくかったと考えられ、一方暴露試験では、比較的乾燥環境下にあったために  $\beta$ -FeOOH や  $\gamma$ -FeOOH の生成に必要な酸素が十分に供給され、体積膨張倍率の大きな  $\beta$ -FeOOH や  $\gamma$ -FeOOH が生成したと考えら

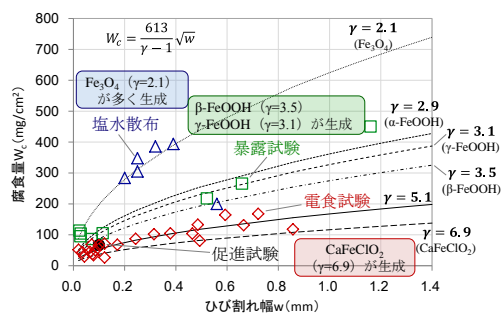


図-2 ひび割れ幅と腐食量の関係に与える腐食生成物の影響



図-3 電食試験後の鋼材の pH

れる。また、電食試験では体積膨張倍率の大きい CaFeClO<sub>2</sub> が生成するために塩水散布や暴露試験とは大きく異なる結果となった。

#### 5. 主な発表論文等

(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 1 件)

1. 高谷哲, 西澤彩, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章: コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性, 土木学会論文集 E2, 2015 (掲載決定済み)

〔学会発表〕（計 1 件）

1. 西澤彩, 高谷哲, 中村士郎, 宮川豊章 :  
腐食生成物の違いがひび割れ幅と腐食  
量の関係に与える影響, コンクリート  
工学年次論文集, Vol.35, pp.1051-1056,  
2013

〔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 ( )

研究者番号 :

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号 :

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号 :