

V-123

コンクリートの中性化による内部鉄筋の腐食生成物の分析

早稲田大学大学院理工学研究科 学生会員 石澤 一二
 早稲田大学大学院理工学研究科 学生会員 Qi Lukuan
 東日本旅客鉄道株式会社 正会員 高木 言芳
 早稲田大学理工学部 正会員 関 博

1. はじめに

塩化物の浸透や中性化の進行によりコンクリート中の鉄筋が腐食すると、その体積膨張のために、鉄筋の周りのコンクリートに引張応力が発生し、ひび割れが発生する。塩害によりコンクリート中に生成される鉄筋の腐食生成物は検討されているが、中性化によりコンクリート中に生成される鉄筋の腐食生成物に関するデータは非常に少ない。ここでは、中性化促進試験の後、乾湿繰返し試験に供した鉄筋コンクリート供試体の腐食生成物についてX線回折を行い、鉄筋の腐食生成物の定性分析と、成分間の回折線の強度比をとり半定量分析を試みた。また、鉄筋/コンクリート界面のEPMAによるFe元素分析を行い、Feイオンの浸透現象を検討した。

2. 実験概要

図1に供試体形状を示す。中性化促進面1面を除き、他の5面をコーティングし、促進面からかぶり高が15mmとなるように鉄筋を配置した。また、表1にコンクリートの配合条件を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、埋設鉄筋の直径は9mmである。供試体の設定条件は、表2に示すように3パターン設定した。中性化促進は材齢14日より開始した。

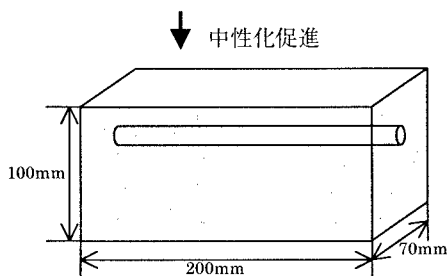


図1. 供試体形状

表1. コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤(ml)	
70	54.8	8	182	260	926	785	減水剤	AE調整材
							650	12

表2. 供試体の設定条件

鉄筋名	鉄筋配置	黒皮	Cl-※1	中性化深さ	中性化促進期間※2	乾湿繰返し期間※3
A	コンクリートかぶり15mm	有	有	25mm	6週	18週
B	コンクリートかぶり15mm	無	無	25mm	8週	18週
C	裸鉄筋	無	無	—	—	18週

※1 NaCl として配合時に 0.78kg/m³ を練り混ぜ水と共に混入

※2 中性化促進期間 CO₂濃度 10% 温度 40℃ 湿度 50%

※3 乾湿繰返し期間 高温高湿 3日間：温度 60℃ 湿度 95%
 低温低湿 4日間：温度 15℃ 湿度 60%

キーワード 中性化 腐食生成物

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保3丁目4番地1号 早稲田大学理工学部51号館16階09室
 TEL.03-5286-3407 FAX.03-3208-8749

3. 腐食生成物のX線回折結果

表 3. 腐食生成物の分析結果

鉄筋名	部位	主成分	副成分	少量成分
A	錆上層		FeFe_2O_4 (Magnetite)	α -FeOOH(Goethite) FeO(Wustite) α -Fe $_2$ O $_3$ (Hematite) β -FeOOH(Akaganeite)
	錆下層	FeFe_2O_4 (Magnetite)	α -FeOOH(Goethite) α -Fe $_2$ O $_3$ (Hematite) FeO(Wustite)	β -FeOOH(Akaganeite)
B	錆上層	FeFe_2O_4 (Magnetite)		α -FeOOH(Goethite)
	錆下層	FeFe_2O_4 (Magnetite)	α -FeOOH(Goethite)	
C	錆上層	FeFe_2O_4 (Magnetite)	γ -FeOOH(Leipidocrocite)	
	錆下層	FeFe_2O_4 (Magnetite)	γ -FeOOH(Leipidocrocite)	

腐食生成物の成分の同定結果を表 3 に示した。なお、表 3 で主成分とは強度 I/I_0 が 90～100 の成分とし、副成分は I/I_0 が 30～90 の成分、また少量成分とは I/I_0 は小さいが明らかに区別される成分を示す。ここで I_0 は CaCO_3 の強度を 100 としている。また、腐食生成物間の強度比を表 4 に示す。表 3 によると、鉄筋 A では α -Fe $_2$ O $_3$ 及び FeO が明らかに検出された。ただこれは錆成分ではなく黒皮成分とみられる。また、鉄筋 A では β -FeOOH が検出された。コンクリート中に Cl 分を添加したことによると考えられる。鉄筋 B では FeFe_2O_4 及び α -FeOOH が検出された。鉄筋 C(裸鉄筋)では錆成分の主体は FeFe_2O_4 であるが、コンクリート中の鉄筋とは異なり、 γ -FeOOH の生成が認められた。表 4 をみると、鉄筋 A では α -FeOOH/ β -FeOOH の強度比は錆下層より錆上層のほうが小さい。このことは β -FeOOH は鉄筋に近い錆下層よりも錆上層に多いことを示している。鉄筋 B では FeFe_2O_4 は錆下層よりも錆上層に多く含まれ、逆に α -FeOOH は錆下層に多く含まれることを意味する。また、鉄筋 C(裸鉄筋)では γ -FeOOH の含有量は錆上層よりも錆下層の方に多いことを示している。

表 4. 腐食生成物の強度比

鉄筋名	部位	強度比	α -FeOOH/ β -FeOOH	α -FeOOH/ FeFe $_2$ O $_4$
A	錆上層	I_1/I_2	5.8	0.54
	錆下層	I_1/I_2	15.5	0.36

鉄筋名	部位	強度比	α -FeOOH/ FeFe $_2$ O $_4$
B	錆上層	I_1/I_2	0.32
	錆下層	I_1/I_2	0.67

鉄筋名	部位	強度比	FeFe $_2$ O $_4$ / γ -FeOOH
C	錆上層	I_1/I_2	25.8
	錆下層	I_1/I_2	59.6

4. 鉄筋/コンクリート界面の EPMA による Fe 元素分析

鉄筋 A において、鉄筋/コンクリート界面の EPMA による Fe、Si、Al 及び Ca の元素分析を行った。これによると Fe 分布から黒皮の残存が認められた。また、Si、Al 及び Ca 分布との対比から、黒皮の外側にコンクリートが接しその中には 24～40%程度の Fe を含んでおり、コンクリート中に Fe イオンが浸透して錆化していることが確認できた。

5. まとめ

本分析の範囲内で、以下のことが明らかとなった。

- (1) 中性化したコンクリートの内部鉄筋の腐食生成物の主成分は FeFe_2O_4 であり、黒皮があるときには α -Fe $_2$ O $_3$ や FeO が認められ、さらに塩化物を混入すると β -FeOOH が存在した。
- (2) 鉄筋/コンクリート界面の EPMA 分析から、コンクリート中に Fe イオンが浸透することが確認された。