

中性化により腐食した鉄筋の詳細分析

東急建設株式会社 正会員 ○前原 聡
芝浦工業大学 正会員 伊代田岳史

1. はじめに

中性化に起因するかぶりコンクリートの剥離・剥落は、高架橋の高欄などのかぶりが小さい箇所において、多く発生することが報告されている。この中性化による剥離・剥落には、かぶりの厚さ、品質や中性化、鉄筋腐食の進行程度および雨掛かりの有無などが影響を及ぼすと考えられる。そこで、筆者らは、この剥離・剥落に及ぼす要因として、主に環境条件の雨掛かりの有無に着目し、実構造物 36 基（調査測点 221 点）の調査結果に基づいて、それらの影響を整理した¹⁾。その結果、中性化残りが 10mm 以下で鉄筋の腐食度がⅡa であっても、雨掛かりがない場合には剥離・剥落に至らない箇所が多く存在することが確認され、表-1 に示すように腐食度Ⅱa における平均想定経過年数は、雨掛かりがある場合 14.8 年となり、ない場合よりも約 1/3 程度短いことが分かった¹⁾。

本報では、雨掛かりの有無がコンクリートの剥離・剥落に影響を及ぼすメカニズムを解明することを目的として、実構造物より腐食した鉄筋を採取し、詳細分析を行った。ここで、コンクリート中の鉄筋腐食では、オキシ水酸化鉄や酸化鉄などの腐食生成物が確認されている。それらの腐食生成物はそれぞれの密度が異なることから、腐食生成物の割合によって体積膨張倍率が変化する。雨掛かりの有無により水分供給量が異なり、腐食生成物の種類、割合に影響を及ぼすと考え、採取した鉄筋の腐食生成物の結晶相を XRD 分析にて同定した。また、雨掛かりの有無と中性化の進行がかぶり側のみの場合と鉄筋背面まで進行している場合とでは、鉄筋のかぶり側と内部において、腐食のし易さは異なると考えられる。そこで、分析対象の鉄筋断面を光学顕微鏡で観察し、腐食の偏りを把握した。

2. 分析方法

2.1 分析試料

表-2 に分析試料とする腐食した鉄筋の諸元を示す。分析試料 No.1 は、採取時の中性化残りが 2.3mm で中性化の進行が鉄筋背面まで到達していない状況であった。No.2 および No.3 は、中性化残りが-34mm、-22.4mm で鉄筋背面まで中性化が進行していた。環境条件としては、No.1 および No.2 は雨掛かりのある箇所で、No.3 は雨掛かりのない箇所である。なお、それぞれの分析試料は、目視で確認すると外観上は腐食度Ⅱa であり、目視による判別は同程度の腐食状況であった。

2.2 XRD 分析

鉄筋表面に付着したコンクリートを可能な限り除去した後、腐食生成物を採取した。採取した腐食生成物に内部標準試料として ZnO を 15wt%添加してメノウ乳鉢にて粉碎、混合し、測定用試料とした。X 線回折法による結晶相の定性分析および内部標準試料を用いたリートベルト解析により結晶相の定量分析を行った。

2.3 断面観察

分析試料は、真空脱気環境下にて樹脂包埋した。その後、目視では孔食のように局所的に著しく腐食している箇所は見られなかったため、任意の断面にて切断した。そして、切断面を粒度 320～4000 番の耐水研磨紙と 1μ ダイヤモンドスプレーを用いて鏡面研磨を行った。倍率 12.5～500 倍の光学顕微鏡にて、断面の全形とかぶり側、左右、内部の方向で断面組織観察を行い、断面減少量と各箇所での最大腐食深さを求めた。

表-1 想定腐食開始からの経過年数¹⁾

	腐食度	最小値(年)	最大値(年)	平均値(年)
雨掛かりあり	Ⅲ	67.2	70.2	68.7
	Ⅱb	2.9	83.1	53.7
	Ⅱa	-34.6	77.3	14.8
雨掛かりなし	Ⅱa	16.5	80.2	49.4

表-2 分析試料の鉄筋、構造物およびコンクリートの諸元

分析試料 No.	構造物種類	部材	経過年数 (年)	鉄筋径 (mm)	腐食度	かぶり (mm)	中性化深さ (mm)	中性化残り (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	全塩分量 (kg/m ³)	雨掛かりの有無	備考
No.1	A 高架橋	スラブ	10 ^{※1}	φ8	Ⅱa	25.0 ^{※2}	22.7 ^{※2}	2.3	13.0	0.14	あり	健全部
No.2			55	φ8	Ⅱa	8.1	42.1	-34				剥離・剥落
No.3	B 高架橋	スラブ	64	φ19	Ⅱa	70.0 ^{※3}	92.4 ^{※3}	-22.4	22.7	—	なし	補修部

※1 A 高架橋が供用年数 45 年時に実構造物から 1×2m 範囲のスラブを切出して保管、※2 切断面からのかぶり値と中性化深さ、※3 吹付け補修箇所での補修厚さを含む
キーワード：中性化，剥離，剥落，雨掛かり，腐食生成物

3. 分析結果および考察

3.1 腐食生成物

図-1 に XRD 分析による腐食生成物の定量分析結果とそれぞれの結晶相の密度と分子量から算出した腐食生成物の体積膨張倍率を示す。なお、非晶質の腐食生成物はコンクリートの細孔溶液中に液化し、腐食膨張には寄与しないと想定して、非晶質+未同定相を除外して算出した。No.1 と No.2 では、塩化物イオンの共存により生成される β -FeOOH が検出され、膨張倍率が 2.77 と 2.70 で、No.3 の 2.60 よりも若干大きくなった。電食実験や塩害を模擬した腐食促進実験では、条件によって密度が小さく膨張倍率に大きく寄与する塩化酸化鉄や塩化水酸化鉄が生成されると報告がある²⁾。今回の分析においては、それらの生成物は検出されなかった。コンクリート中の全塩分量は 0.14kg/m^3 と少なく、中性化による鉄筋腐食では、塩化酸化鉄や塩化水酸化鉄は生成されないと推測する。膨張倍率は、2.60~2.77 と多少の違いが見られたが、試料採取箇所や採取方法によるバラツキを考慮するとこれらの膨張倍率は同程度であり、雨掛かりの有無によって腐食生成物に大きな違いは現れないと考える。

3.2 断面観察

図-2 に断面観察結果の一例を、図-3 に腐食深さと断面減少量の測定結果を示す。なお、図-3 には断面減少量と腐食生成物の体積膨張倍率から算出した膨張率を示す。膨張率は、腐食前の元鉄筋断面に対する腐食後の鉄筋断面の増加割合である。雨掛かりのある No.1 と No.2 では、かぶり側の腐食深さが、左右および内部よりも大きくなり、鉄筋断面において腐食がかぶり側に偏る傾向を示した。雨掛かりのない No.3 では各 4 方向での腐食深さは同程度となり、鉄筋断面において均一的に腐食している。また、中性化の進行が鉄筋背面まで達していない No.1 の内部では腐食深さは著しく小さいが、No.2 および No.3 より中性化の進行が鉄筋背面に達することで、内部においても腐食が開始することが分かる。なお、断面減少量は、雨掛かりのある No.2 で 2.36mm^2 と雨掛かりのない No.3 の 1.98mm^2 よりも多くなった。No.2 と No.3 では、左右および内部の腐食深さは同程度であることから、No.2 ではかぶり側の腐食が大きくなることで断面減少量が増加したと考える。

以上、腐食生成物の分析と断面観察の結果より、雨掛かりがある場合には、水分供給に伴いかぶり側の腐

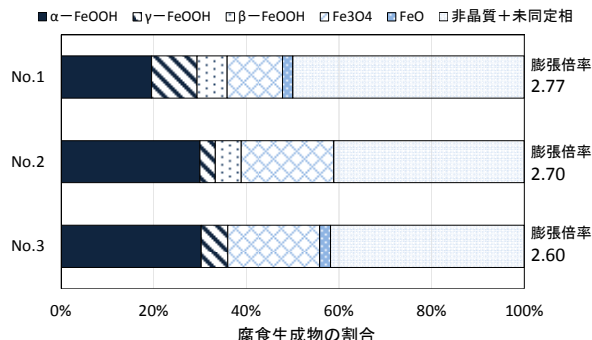


図-1 腐食生成物の重量割合および膨張倍率

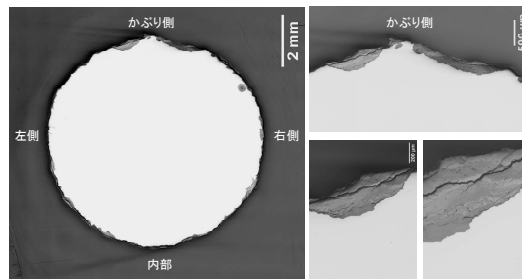


図-2 断面観察結果 (No. 2)

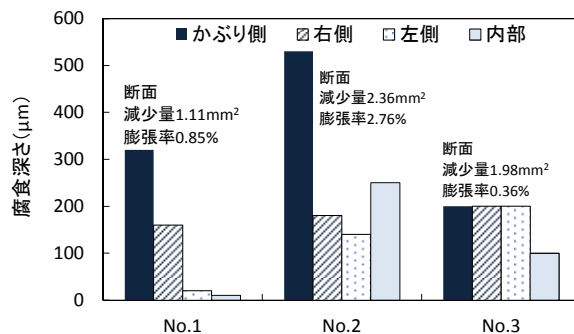


図-3 断面減少量および腐食深さ

食が速くなり腐食量が多くなることで、雨掛かりがない場合よりもかぶりコンクリートが剥離・剥落し易くなることが考えられる。なお、今回の分析では任意の箇所において断面観察を行った。目視では鉄筋の軸方向での腐食程度は同じであり違いは少ないと考えるが、断面観察位置の違いによる影響に関しては、今後、より詳細な分析を行う予定である。

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 雨掛かりのある場合では、かぶり側の腐食深さが大きくなり、鉄筋断面において腐食がかぶり側に偏ることが確認された。
- (2) 中性化による鉄筋腐食では、雨掛かりの有無によって、腐食生成物に大きな違いはみられない。

参考文献

- 1) 前原聡, 鈴木将充, 早川健司, 伊藤正憲: RC 構造物の調査結果に基づくかぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす要因に関する一考察, 東急建設技術研究所報 No.41, 2016.3
- 2) 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, No.1, 2013