

コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な 取扱いに関する研究委員会

報 告 書

- 第1編 委員会設立趣旨
 - 1. 本研究委員会設立の背景と目的
- 第2編 文献調査WG (WG1) の活動報告
 - 1. 腐食が起きる条件
 - 2. 腐食の形態
 - 3. コンクリート環境下での鉄筋腐食の特徴
 - 4. コンクリート中の水の挙動について
 - 5. コンクリート中で鉄筋腐食が進行する条件
 - 6. コンクリート外部の環境と内部の温湿度および鉄筋腐食
- 第3編 構造物調査WG (WG2) の活動報告
 - 1. はじめに
 - 2. 現地調査の概要
 - 3. 実大規模試験体
 - 4. 高速道路橋A
 - 5. 鉄道高架橋
 - 6. 高速道路橋B
 - 7. 高速道路橋C
 - 8. 集合住宅実験建物
 - 9. 現地調査結果の考察
 - 10. まとめ
- 第4編 コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する
シナリオデザイン
(腐食の取扱い体系化WG (WG3) の活動報告)
 - 1. はじめに
 - 2. 鉄筋腐食の統一的な取扱いに関するシナリオデザイン

2024年 9月

序

我が国の社会インフラは高度経済成長期に建設されたものも多く、建設から 50 年以上経過した構造物の割合が全体の約 50 %を占めるようになってきており、社会インフラの老朽化に伴う維持管理費用の増大が懸念されている。また、既存建築物、例えば分譲マンションストックは、2022 年時点で約 700 万戸近くにのぼり、そのうち、築 40 年超のマンションは 10 年後に約 2.1 倍、20 年後に約 3.5 倍となる見込みとなっている。これらのストックを長期に供用し続けるためには、適切な維持管理を行っていく必要があり、当初想定されていなかった費用が発生する可能性が懸念される。

特に、四方を海に囲まれ冬季に凍結防止剤を散布する山間部も多い我が国においては、鉄筋腐食はコンクリート構造物の抱える深刻な課題のひとつであるといえる。一方で、土木学会コンクリート標準示方書（維持管理編）のように、コンクリート構造物の維持管理の合理化や標準化を目的とした指針類の整備が進められてきている。適切に構造物を維持管理するためには、劣化機構を推定し、劣化予測を行うことが重要である。コンクリート標準示方書（維持管理編）の中で鉄筋腐食は、中性化と水の浸透に伴う腐食と塩害の 2 つの劣化機構に分けられており、予測手法などが異なっている。

また、劣化予測に必要な調査をする上で、水の移動や鉄筋腐食の影響因子を考慮しないと適切な調査項目や調査箇所を選定できない可能性がある。しかし、腐食に影響を与える水の形態や、コンクリート中での水分の浸透経路などについては不明な点も多いのが現状である。

本研究委員会では、鉄筋腐食の影響因子やコンクリートに作用する水の形態、水が鉄筋腐食に与える影響を整理し、鉄筋腐食を統一的に取り扱うためのシナリオを作成することを目的として 2022 年度から 2 年間活動を行ってきた。その活動は多岐に渡っており、鉄筋腐食の影響因子や水の影響を整理するだけでなく、実構造物の調査も精力的に行い、実際のコンクリート構造物における鉄筋腐食の起点や、コンクリートにおける水分の浸透に与える影響因子、コンクリートの外部環境と鉄筋の腐食環境との関係などについても整理を行っている。本報告書はその成果をまとめたものであり、鉄筋腐食を統一的に取り扱うための理論、実構造物で鉄筋腐食が生じた場合の調査方法や調査箇所の選定方法、鉄筋の腐食環境の推定方法などを分かりやすく整理したつもりである。本報告書が今後のコンクリート構造物の維持管理の発展に貢献できれば幸いである。

最後に、本研究委員会の運営や報告書作成などに多大な尽力をいただいた各 WG 主査である左藤眞市幹事、上田洋元幹事ならびに後任の染谷望幹事、幹事団、各 SWG 副主査および委員の皆様には、本来の業務もある中で、数多くの会議に出席いただき、活発に議論いただいたことに対して心より御礼を申し上げます。

2024 年 9 月

コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会

委員長 高谷 哲

JCI-TC222A

コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会
委員名簿

委員長	高谷 哲	京都大学
幹事	上田 洋	鉄道総合技術研究所 (2024年6月まで)
	左藤 眞市	大阪産業技術研究所
	染谷 望	ナカポーテック
	福山 智子	立命館大学
	松沢 晃一	明治大学
委員	五十嵐 豪	名古屋大学
	金光 俊徳	電力中央研究所
	黒川 浩嗣	西日本旅客鉄道
	齊藤 亮介	清水建設
	酒井 雄也	東京大学
	崎原 康平	琉球大学
	塚越 雅幸	福岡大学
	土井康太郎	物質・材料研究機構
	中田 清史	建築研究所
	村中 誠	中日本高速道路
	渡邊 晋也	日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所

文献調査WG（WG 1）

主査	左藤 眞市	大阪産業技術研究所
幹事	染谷 望	ナカボーテック（SWG1-2）
幹事	松沢 晃一	明治大学（SWG1-2 副主査）
委員	五十嵐 豪	名古屋大学（SWG1-3）
委員	齊藤 亮介	清水建設（SWG1-2）
委員	酒井 雄也	東京大学（SWG1-3 副主査）
委員	崎原 康平	琉球大学（SWG1-2）
委員	土井康太郎	物質・材料研究機構（SWG1-1 副主査）
委員	中田 清史	建築研究所（SWG1-3）

構造物調査WG（WG 2）

主査	上田 洋	鉄道総合技術研究所（2024年6月まで）
幹事	染谷 望	ナカボーテック（2024年6月から主査）
幹事	福山 智子	立命館大学
委員	金光 俊徳	電力中央研究所
委員	黒川 浩嗣	西日本旅客鉄道
委員	塚越 雅幸	福岡大学
委員	村中 誠	中日本高速道路
委員	渡邊 晋也	日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所

腐食の取扱い体系化WG（WG 3）

主査	高谷 哲	京都大学
幹事	全幹事	
委員	全委員	

目 次

第1編 委員会設立趣旨

1. 本研究委員会設立の背景と目的	1
1. 1 本研究委員会設立の背景と経緯	1
1. 2 本研究委員会の目的	2
1. 3 本研究委員会の体制	3
1. 4 本報告書の構成	4

第2編 文献調査WG (WG1) の活動報告

1. 腐食が起きる条件	5
1. 1 はじめに	5
1. 2 鉄の酸化反応と対をなす還元反応の存在	6
1. 2. 1 はじめに	6
1. 2. 2 酸素還元反応	6
1. 2. 3 第二鉄イオンの還元反応	7
1. 2. 4 水素イオンの還元反応	8
1. 2. 5 大気環境における金属表面に形成される水膜と腐食速度との関係	9
1. 2. 6 大気中で乾湿繰返しが起きる場合の還元反応 (Evans モデルについて)	10
1. 2. 7 還元反応の電気化学測定による特徴	12
1. 3 腐食電池の形成	16
1. 3. 1 はじめに	16
1. 3. 2 酸化反応を中心に (必要条件として, 正電荷の移動)	16
1. 3. 3 腐食電池の形成 (必要条件として, 液体としての水の存在)	17
1. 4 不動態皮膜の破壊	19
1. 4. 1 はじめに	19
1. 4. 2 不動態皮膜とは	19
1. 4. 3 不動態皮膜の破壊	19
1. 4. 4 標準電極電位と不動態皮膜	21
1. 4. 5 鉄筋表面に形成される腐食生成物と黒皮について	22
1. 5 塩化物イオンなどの腐食性物質の腐食反応での役割	24
1. 5. 1 はじめに	24
1. 5. 2 腐食電池の形成と酸素還元反応との関係	24
1. 5. 3 不動態皮膜の破壊との関係	24
2. 腐食の形態	26

2. 1	はじめに	26
2. 1. 1	湿式プロセスと乾式プロセス	26
2. 1. 2	腐食形態の分類	26
2. 2	全面腐食と孔食	28
2. 2. 1	はじめに	28
2. 2. 2	不動態皮膜の性状と全面腐食・孔食との関係	28
2. 2. 3	不動態皮膜の性状と腐食環境との関係	30
2. 2. 4	黒皮に見られる孔食のような腐食形態	30
2. 3	酸素濃淡電池腐食とすきま腐食	32
2. 3. 1	はじめに	32
2. 3. 2	酸素濃淡電池腐食	32
2. 3. 3	すきま腐食	33
2. 3. 4	すきま腐食を起因とした酸性環境の腐食の可能性	37
2. 4	異種金属接触腐食と応力腐食割れ・水素脆化割れ	38
2. 4. 1	はじめに	38
2. 4. 2	異種金属接触腐食	38
2. 4. 3	応力腐食割れと水素脆化割れ	39
3.	コンクリート環境下での鉄筋腐食の特徴	40
3. 1	酸素還元反応の特徴	40
3. 1. 1	はじめに	40
3. 1. 2	酸素拡散限界電流密度の評価	41
3. 1. 3	コンクリート中の酸素拡散モデル	42
3. 2	第二鉄イオンの還元反応の特徴	45
3. 3	アノード反応の特徴	48
3. 4	磨き鋼と黒皮付き鋼のアノード反応の特徴	49
4.	コンクリート中の水の挙動について	53
4. 1	乾燥状態から湿潤状態へ	53
4. 1. 1	はじめに	53
4. 1. 2	試算における仮定	53
4. 1. 3	試算の結果	54
4. 1. 4	コンクリート中における吸水速度との比較	55
4. 2	湿潤状態から乾燥状態へ	57
4. 2. 1	はじめに	57
4. 2. 2	鈴木らの検討	57
4. 2. 3	桂らと松村らの検討	58
4. 2. 4	左藤らの検討	58

4.2.5	ナノ流路を用いた検討	58
4.3	潮解性塩の存在について	60
4.3.1	はじめに	60
4.3.2	早稲田大学の研究グループを中心とした検討	60
4.3.3	長岡技術科学大学の研究グループを中心とした検討	60
4.3.4	Young and Skalny による検討	61
4.3.5	左藤ら, 高谷らによる検討	61
4.3.6	論文間の結果の比較	62
4.4	塩化物イオンなどのイオンの物質移動について	65
4.5	湿度センサによる水の挙動の測定とその注意点	68
4.5.1	はじめに	68
4.5.2	温度の影響	68
4.5.3	湿度センサの劣化の影響	69
5.	コンクリート中で鉄筋腐食が進行する条件	70
5.1	はじめに	70
5.1.1	アルカリ環境の鉄の腐食の特徴	70
5.1.2	コンクリート中の鉄筋腐食の開始とその後の進行	72
5.2	水がかりのあるコンクリートの鉄筋腐食の進行	74
5.2.1	はじめに	74
5.2.2	かぶり(厚さ)との関係	74
5.2.3	ひび割れとの関係	75
5.2.4	乾湿繰返しが発生する場合の鉄筋腐食の特徴	75
5.3	乾燥環境にあるコンクリートの鉄筋腐食の進行	77
5.3.1	はじめに	77
5.3.2	かぶり(厚さ)・ひび割れとの関係	77
5.3.3	乾燥環境にあるコンクリートにおける水の浸入	77
5.4	コンクリート中の鉄筋の腐食環境の分類	79
5.4.1	はじめに	79
5.4.2	健全なコンクリートの場合の鉄筋腐食の環境分類	79
5.4.3	湿潤環境のコンクリートにひび割れなどの欠陥がある場合の鉄筋腐食の環境分類	80
5.4.4	湿潤環境のコンクリートに潮解性塩が内在する場合の鉄筋腐食の特徴	82
5.4.5	乾燥環境の特殊性を付加したコンクリート中の鉄筋腐食の環境分類	83
5.4.6	加速期以降を想定したコンクリート中の鉄筋腐食の環境分類	83
5.5	水がかりのあるコンクリート中への酸素侵入	85
5.5.1	はじめに	85

5.5.2	潮解性塩を含まないコンクリート中における湿度 100 %R. H. の意味について	85
5.5.3	潮解性塩を含むコンクリート中における湿度値の意味について	86
5.5.4	酸素還元反応の観点から見た乾燥の定義	86
6.	コンクリート外部の環境と内部の温湿度および鉄筋腐食	88
6.1	コンクリート外部環境とコンクリート内部の鉄筋近傍環境の関連性	88
6.1.1	はじめに	88
6.1.2	既往文献における非腐食環境および腐食環境の分類	88
6.1.3	コンクリート外部環境とコンクリート内部の鉄筋近傍環境との関連性の概念	90
6.2	JCI-SC3 腐食促進試験法の概要および制定の経緯について	95
6.2.1	はじめに	95
6.2.2	促進試験法 JCI-SC3 の概要	95
6.2.3	促進試験法 JCI-SC3 の制定前に実施された腐食促進試験法について	96
6.3	乾湿繰返し環境に置かれたモルタル内部の乾湿挙動に関する実験的検討	98
6.3.1	はじめに	98
6.3.2	実験概要	98
6.3.3	質量変化率に与える塩化物イオンの影響	100
6.3.4	測定から得られる相対湿度の変化と内部の水分散逸および酸素供給の考え方	101
6.3.5	モルタル内部の相対湿度変化	101
6.3.6	電気化学測定による腐食評価	103
6.3.7	モルタル内部の水分移動に伴う塩化物イオン濃度分布の発生	104
6.3.8	取り出した鋼材の腐食状況	106
6.3.9	JCI-SC3 の条件で乾湿繰返しを与えた際のモルタル内部の乾湿挙動	107
6.4	温湿度一定環境で乾燥を受けたモルタル内部の水分散逸に関する実験的検討	109
6.4.1	はじめに	109
6.4.2	実験概要	109
6.4.3	モルタルの質量変化率	110
6.4.4	モルタル内部の相対湿度変化	111
6.4.5	モルタルのインピーダンス変化	112
6.4.6	水和反応の進行に伴うモルタルのインピーダンス増加	116
6.5	コンクリート外部および内部の環境と鉄筋腐食	119

第3編 構造物調査WG(WG2)の活動報告

1. はじめに	121
2. 現地調査の概要	122
2. 1 調査対象構造物	122
2. 2 調査内容	123
2. 2. 1 調査項目	123
2. 2. 2 調査手法	124
2. 2. 3 調査体制	134
2. 3 現地調査で得られた結果の概要	135
3. 実大規模試験体	137
3. 1 はじめに	137
3. 2 試験体概要	138
3. 2. 1 大型試験体の概要	138
3. 2. 2 腐食促進条件	139
3. 3 調査の流れ	140
3. 4 第1回調査	141
3. 4. 1 調査概要および調査結果	141
3. 4. 2 鉄筋とコンクリートとの界面が水の移動に与える影響	156
3. 4. 3 まとめ	159
3. 5 第2回調査	160
3. 5. 1 調査箇所の概要および塩化物イオン濃度分布	160
3. 5. 2 電気化学測定による腐食状況の確認	161
3. 5. 3 解体調査による腐食状況の把握	166
3. 5. 4 まとめ	179
3. 6 第3回調査	180
3. 6. 1 第3回調査の概要	180
3. 6. 2 電気化学測定による腐食状況の確認	182
3. 6. 3 解体調査による腐食状況の把握	187
3. 6. 4 まとめ	196
4. 高速道路橋A	197
4. 1 はじめに	197
4. 2 構造物概要	198
4. 3 第1回調査	199
4. 3. 1 調査概要	199
4. 3. 2 調査結果	201
4. 3. 3 第1回調査結果のまとめ	209

4. 4	第2回調査	211
4. 4. 1	調査概要	211
4. 4. 2	調査結果	211
4. 4. 3	第2回調査結果のまとめ	216
5.	鉄道高架橋	217
5. 1	はじめに	217
5. 2	調査の概要	217
5. 2. 1	調査構造物	217
5. 2. 2	調査方法	219
5. 3	調査結果と考察	220
5. 3. 1	第1回調査	220
5. 3. 2	第2回調査	229
5. 4	まとめ	234
6.	高速道路橋B	235
6. 1	はじめに	235
6. 2	構造物概要	236
6. 3	調査概要	237
6. 4	調査結果	238
6. 4. 1	外観観察および温湿度	238
6. 4. 2	配筋およびかぶり（厚さ）	238
6. 4. 3	塩化物イオン量調査	239
6. 4. 4	含水率測定	240
6. 4. 5	中性化深さ	241
6. 4. 6	表面電気抵抗率	242
6. 4. 7	自然電位測定	243
6. 4. 8	分極抵抗測定	244
6. 5	調査結果のまとめ	245
7.	高速道路橋C	247
7. 1	はじめに	247
7. 2	調査概要	248
7. 2. 1	目視調査および腐食環境調査	248
7. 2. 2	中性化深さ	248
7. 2. 3	塩化物イオン含有量	248
7. 2. 4	自然電位	249
7. 2. 5	非破壊分極抵抗法（4電極法）	250

7. 3	調査結果	251
7. 3. 1	目視調査および腐食環境調査	251
7. 3. 2	中性化深さ	252
7. 3. 3	塩化物イオン量	253
7. 3. 4	自然電位および非破壊分極抵抗（4電極法）	254
7. 4	腐食のメカニズム	256
7. 5	調査結果のまとめ	257
8.	集合住宅実験建物	259
8. 1	はじめに	259
8. 2	調査概要	259
8. 2. 1	調査対象	259
8. 2. 2	調査位置および調査日	259
8. 2. 3	調査項目	261
8. 3	調査結果および考察	262
8. 3. 1	コンクリートの性質	262
8. 3. 2	含水率	262
8. 3. 3	かぶり（厚さ）	264
8. 3. 4	自然電位	266
8. 3. 5	鉄筋腐食状況	267
8. 4	まとめ	270
9.	現地調査結果の考察	271
9. 1	はじめに	271
9. 2	調査位置および調査手法の選定	272
9. 2. 1	はじめに	272
9. 2. 2	調査位置の選定	273
9. 2. 3	調査手法の選定	276
9. 3	調査手法に関する考察	278
9. 3. 1	配筋・かぶり（厚さ）調査	278
9. 3. 2	含水率調査	280
9. 3. 3	自然電位法	286
9. 3. 4	分極抵抗法（3電極法）	289
9. 3. 5	非破壊分極抵抗法（4電極法）	293
9. 4	鉄筋腐食に関する考察	304
9. 4. 1	はじめに	304
9. 4. 2	現地調査で得られた結果の概要	305
9. 4. 3	現地調査で得られた成果	312

10. まとめ	316
---------	-----

**第4編 コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関するシナリオデザイン
(腐食の取扱い体系化 WG (WG3) の活動報告)**

1. はじめに	317
2. 鉄筋腐食の統一的な取扱いに関するシナリオデザイン	318

付録 通水試験動画 (第3編3.4.2項参照)

1. 丸鋼
2. 異形棒鋼

3. コンクリート環境下での鉄筋腐食の特徴

3. 1 酸素還元反応の特徴

3. 1. 1 はじめに

1. 2節で整理したとおり、コンクリート中の鉄筋腐食は酸素還元反応によって律速されることが多い。酸素還元反応の大小は、環境中（ここではコンクリート細孔溶液中）の酸素の拡散速度（正確には拡散にかかる時間）によって決定されるため、酸素の拡散速度（時間）がコンクリート鉄筋腐食を律速すると言い換えることができる。ここで、一般的に、大気開放状態にある溶液中の酸素の拡散速度は $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダであることが知られている[1]。この値を用いて Fick の拡散方程式から酸素拡散限界電流密度を求めると、約 $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ が得られる。これは鉄が水溶液中では $0.1 \text{ mm}/\text{year}$ で腐食することを意味している。一方で、コンクリート中の鉄筋腐食は水溶液中よりもはるかに緩やかである。これは、コンクリート中ではかぶり（厚さ）全体が酸素の拡散層となるため、外部から供給された酸素が鉄表面に届くまでの時間が長くなるからである。

ここで、コンクリートが雨がかり環境にある、すなわち鉄筋表面およびコンクリート細孔溶液中に水が存在している環境（＝コンクリートが濡れ状態）を考える。水溶液中であれば、鉄表面に形成される酸素の拡散層厚さは約 $500 \mu\text{m}$ である[1]が、濡れ状態にあるコンクリートではかぶり（厚さ）全体が拡散層になるため、細孔溶液中の酸素の拡散速度が水溶液中と変わらないと仮定すると、鉄筋表面までの酸素の到達時間が長くなる。そのために、鉄筋表面が酸素欠乏状態となり腐食は抑制される。鉄表面における酸素還元反応を定量的に評価する手法として動電位カソード分極が挙げられる（1. 2. 7項）。図-3. 1. 1に水溶液中で鉄をカソード分極した際に得られるカソード電流の概略図を示す。水溶液中で鉄を自然電位からカソード分極すると、はじめは電位の卑化とともにカソード電流が増加する。このときのカソード電流は酸素還元反応量を表しており、電位が卑になるにつれ酸素還元反応が増大するため、得られるカソード電流は増加する。一方で、ある程度卑な電位に達すると今度はそれ以上電位を卑化させてもカソード電流が増大しない（一定値を示す）領域が現れる。この領域では鉄上で消費される溶存酸素量と沖合から拡散により供給される溶存酸素量が釣り合うため、カソード電流が一定値となる。この時の電流を酸素拡散限界電流と呼ぶ。一般的に分極によって得られる電流は反応面積によって増減するため、得られた電流値は反応面積で除して電流密度として評価する。よって、ある系における酸素還元反応は酸素拡散限界電流密度を評価することにより得られる。

コンクリート中にある鉄筋表面での酸素還元反応を評価するのにカソード分極測定が有効である。ただし、得られるカソード電流はコンクリートのかぶり（厚さ）、濡れ状態、測定条件に大きく影響を受ける。ここでは、濡れ状態にあるコンクリート中の鉄筋表面における酸素拡散限界電流

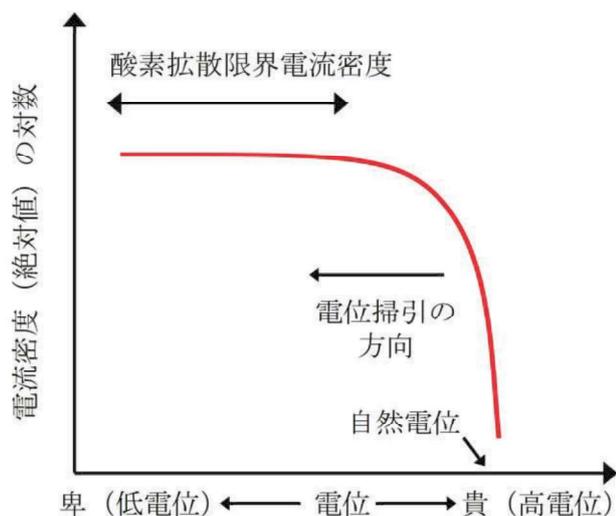


図-3. 1. 1 カソード分極曲線概略図

密度の評価結果を紹介する[2]。

3. 1. 2 酸素拡散限界電流密度の評価

直径 19 mm の黒皮付き丸鋼（長さ 350 mm，両端 75 mm エポキシ塗装，無塗装部 200 mm）をかぶり（厚さ）20 mm の位置に埋設したコンクリートを供試体とした。詳細な供試体のコンクリート配（調）合や作製条件，養生条件は参考文献[2]を参照されたい。コンクリート中の水に十分空気を溶存させるため，各電気化学測定を行う前に供試体を 60 °C の恒温槽内で 7 日間乾燥させたのち，室温の水道水に 1 日間浸せきして湿潤状態とした。供試体のかぶり（厚さ）面に対しステンレス鋼板（パンチングメタル）を含水した紙ワイパーを介して接触させ対極とした。また，同じかぶり（厚さ）面に対し，参照極として銀・塩化銀電極（NaCl 濃度：3M，0.195 V vs. SHE）を含水したスポンジを介して接触させた。埋設した鉄筋を作用極（反応面積： $1.9 \times 3.14 \times 20 = 119.32 \text{ cm}^2$ ）とし，室温の大気中にて自然電位から -1.2 V を目安に動電位法でカソード分極を行った。

分極速度は 20 mV/min を基準にそれよりも 10 倍，100 倍速い分極速度（200 mV/min，2000 mV/min）と，1/10，1/100 となる遅い分極速度（2 mV/min，0.2 mV/min）の 5 水準を行った。何れの水準も供試体 2 体に対して行った。

図-3.1.2 に分極速度を 20 mV/min，200 mV/min，2000 mV/min とした結果を示す。20 mV/min の分極速度を基準にした場合，これよりも速い分極速度で供試体をカソード分極すると，同じ電位に対して電流密度が増加する傾向が見られた。分極速度が

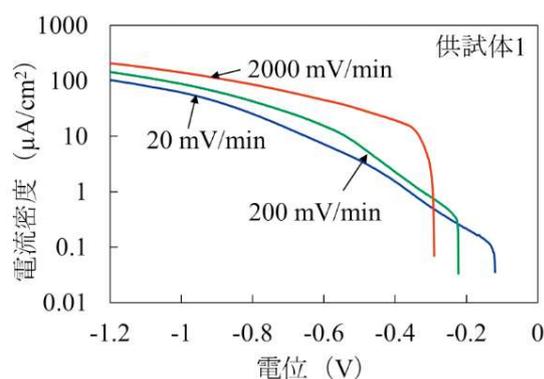


図-3.1.2 カソード分極曲線（分極速度が速い場合）[2]

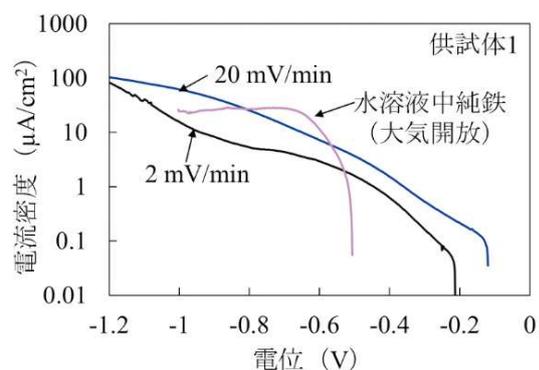


図-3.1.3 カソード分極曲線（20 mV/min と 2 mV/min）[2]

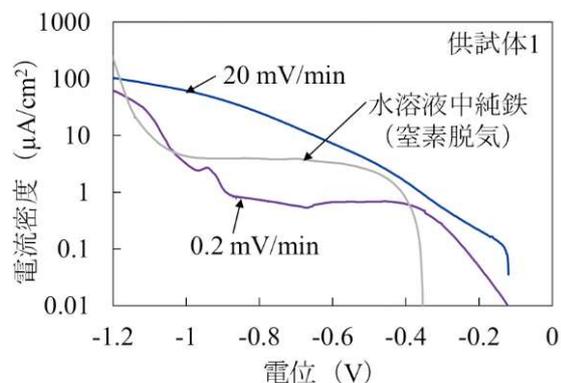


図-3.1.4 カソード分極曲線（0.2 mV/min）[2]

大きくなると、その電位の本来の定常状態に追いつくことができない状態となり、見かけより貴な（高電位な）電位状態の電流密度計測になる。また、分極速度を大きくすると、ある電位で作用極界面で起きる酸素還元反応の絶対量が、時間が短いために減り、作用極界面で消費されないまま残存する酸素量が多くなる。その結果、その後の動電位法による測定中の電位に対して、反応する物質（酸素）が相対的に多くなるため作用極界面での反応量、正確には電流密度が大きくなったと考えることができる。

図-3.1.3 に分極速度を 20 mV/min, 2 mV/min とした結果を示す。合わせて比較のために 20 mV/min で室温の大気開放下にある 0.1 M の NaOH 水溶液中でカソード分極を行った純鉄（99.5%以上）のカソード分極曲線を示す。水溶液中の拡散限界電流密度は 20 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度となった。一方、供試体については、上述の図-3.1.2 と同じ傾向となった。すなわち、分極速度の上昇に伴い（低下に伴い）、同じ電位に対して電流密度が増加する（減少する）傾向が見られた。また、水溶液中では拡散限界電流密度が確認された分極速度である 20 mV/min の 1/10 である分極速度（2 mV/min）を供試体に適用しても、分極に対して得られる電流密度が一定にはならなかった。このことは、本実験の供試体に対して分極速度として 2 mV/min を適用してカソード分極を行っても、酸素の拡散限界現象をとらえることができなかったことを意味する。 -0.8 V より卑な（低電位な）電位では、水溶液中で見られる酸素拡散限界電流密度より大きな電流密度が得られたことから、電荷移動律速から拡散律速に移行する途中段階を計測したと考えることができる。分極速度を 0.2 mV/min まで落としたときのカソード分極曲線を図-3.1.4 に示す。ここではじめて明確な酸素拡散限界電流が得られた。このときの拡散限界電流密度は 0.65 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度であり、大気開放下にある水溶液中の拡散限界電流密度のおよそ 1/30 であった。この酸素拡散限界電流密度は、本実験で比較のために行った窒素脱気下の水溶液中で得られる酸素拡散限界電流密度（4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 程度、図-3.1.4 中に示す）より小さいことから、水で満たされたコンクリート中では、水溶液中の窒素脱気よりも酸素欠乏が容易に起こると推察することができる。

3.1.3 コンクリート中の酸素拡散モデル

上記の実験結果より、コンクリートには酸素拡散の抑制となる作用が確認された。本項では、このことを反映するコンクリート中の酸素拡散モデルを検討する。コンクリート中の鉄筋に対しては、鉄筋と接触している水の水膜による酸素拡散抵抗とその外側に存在するコンクリートによる酸素拡散抵抗とを検討する必要がある。このとき、定常状態では鉄筋と接触している水膜中の酸素拡散速度と、その外側に存在するコンクリート中の酸素拡散速度とが同じになると考えることができる。このような定常状態近似を適用することで、コンクリート中の酸素拡散モデルを検討した。

ここで、簡単のために水溶液中の電極界面に生成する酸素の静止拡散層厚み δ を 500 μm とし、鉄筋と接触している水の水膜厚さ t が 500 μm 以上の場合を考える。このとき、この水膜の外側に存在するコンクリートの厚みを L とすると、かぶり（厚さ）は $t+L$ となる。水、コンクリート中の酸素の拡散係数をそれぞれ D_w , D_c とし、水及びコンクリート全体に対する平均的な酸素の拡散係数を D とする。さらに、鉄筋と接触している水膜とコンクリートとの界面での溶存酸素濃度を C_D とし、コンクリートが空気と接触する表面側の溶存酸素濃度を C とする。このとき、定常状態近似を適用すると式(3.1.1)のとおりとなる。

$$D_w \frac{C_D}{\delta} = D_c \frac{C - C_D}{L} = D \frac{C}{t + L} \quad (3.1.1)$$

ただし、簡単のため、鉄筋界面での酸素濃度はゼロとした。ここで式(3.1.1)の右の等号の右辺について、式(3.1.2)のとおり近似する。

$$D \frac{C}{t + L} = D \frac{C}{L} \quad (3.1.2)$$

この両者の式から、以下の関係式が導出できる。

$$D_c = D \frac{C}{C - C_D} \quad (3.1.3)$$

また、鉄筋と接触している水の水膜厚さ t が $500 \mu\text{m}$ 以下の場合（酸素の静止拡散層厚み δ 以下の場合）を考えると、酸素の拡散限界電流密度 J_D は、式(3.1.1)の左の等号の左辺について、 δ が $500 \mu\text{m}$ 、 C_D が 8 ppm のときに $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であることが既往の文献や実験結果で分かっていることから、以下の関係式が成立する。

$$C_D = J_D \times t \times 8 \times 10^{-4} \quad (3.1.4)$$

この式(3.1.4)において、 C_D 、 J_D 、 t の各単位は、それぞれ ppm 、 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、 μm である。この式(3.1.4)は、鉄筋と接触している水の水膜厚さ t が $500 \mu\text{m}$ 以上の場合は $t = 500$ (t の最大値を 500) とすれば t と δ との間のすべての関係で（すなわち水膜厚さに関係なく）使用することができる。以上の概要を示すと図-3.1.5 のようになる。

次に、式(3.1.4)に対して、本実験の供試体から得られた酸素拡散限界電流密度 ($0.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) を適用する。ここで t を最大値 $500 \mu\text{m}$ とすると、 C_D は 0.26 ppm となる。また、 t が $500 \mu\text{m}$ 以下の場合、 C_D は式(3.1.4)にしたがって 0.26 ppm 以下となる。室温の水溶液中に溶存可能な最大の酸素濃度が 8 ppm 程度であることから、本実験の鉄筋と接触している水膜とコンクリートとの界面における溶存酸素濃度 (0.26 ppm 以下) は、非常に小さいことが分かる。また式(3.1.3)において C に 8 ppm を適用すると、 C_D の最大値が 0.26 ppm であることから、電気化学測定で直接的に得られる D が近似的に D_c に等しいと考えることができる。このことから、本実験の供試体 (かぶり (厚さ) 20 mm) に対して得られた酸素拡散限界電流密度 ($0.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) を、式(3.1.1)に対して C を 8 ppm として適用すると、 D (D_c) として $1.3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ を得る。これは水溶液中の酸素拡散係数が、同じ計算で $1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ となることから、本実験のコンクリートの酸素拡散係数が、水溶液中の酸素拡散係数と同等のオーダーになることを示している。よって、コンクリート中の酸素拡散について以下の結論が得られる。コンクリート中では酸素は細孔溶液中を通過するため、その拡散係数は水溶液中とほとんど変わらない。鉄筋腐食を律速する酸素の供給がコンクリート中で極めて遅いのは、拡散係数が小さいためではなく、拡散層の厚さ、すなわちかぶり (厚さ) の大きさが水溶液中と比べて極めて大きいからである。

本節の内容は参考文献[2]を中心に再編集したものである。より詳細な考察が参考文献[2]には記載されているのでぜひそちらを参照されたい。

<参考文献>

- [1] 腐食防食協会編：材料環境学入門，丸善出版，1993
- [2] 左藤眞市・土井康太郎・高谷 哲：コンクリート工学年次論文集，Vol. 46, pp. 781-786, 2024

[担当 土井康太郎，左藤眞市]

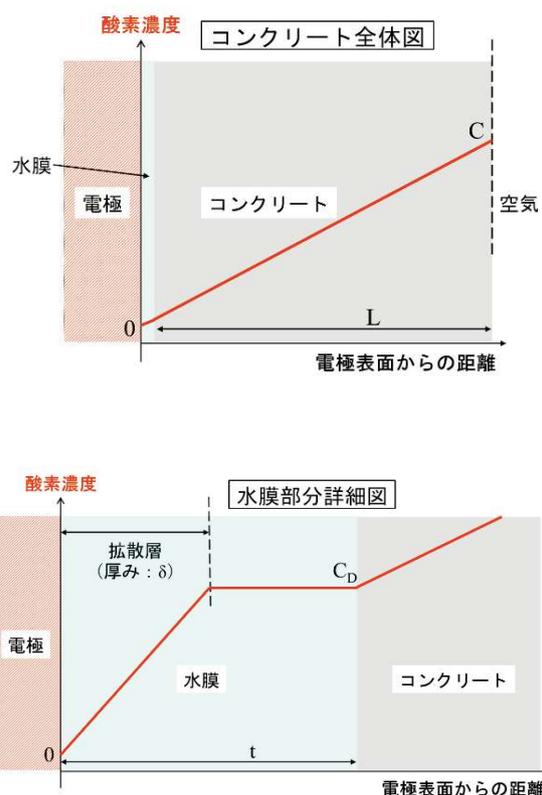


図-3.1.5 コンクリート中の酸素拡散モデル[2]

3. 2 第二鉄イオンの還元反応の特徴

高アルカリ環境であるコンクリート中における鉄筋腐食の律速過程は主に酸素還元反応であることを前節で述べた。しかし、鉄筋が腐食しさびが形成されたとき、1. 2節で整理したとおり、さびの還元が鋼の腐食における還元反応を担うことができる。日根らの報告によると、 Fe^{3+} の溶解度は極めて小さく、 $\text{pH}>4$ では Fe^{3+} 水和酸化物が沈殿して物質移動を妨げるため、中性～アルカリ性の領域ではさびの還元電流密度は酸素拡散限界電流密度よりも極めて小さく鋼の腐食を促進するものではない[1]とされている。しかし、この報告書で議論されている酸素拡散限界電流密度は大気開放状態の水溶液中での場合(約 $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)であり、前節で示したとおり、酸素拡散限界電流密度が極めて小さいコンクリート中では、さびの還元電流を無視できない可能性がある。本節では、さびの還元反応を定量的に議論すべく、各 pH における第二鉄イオン (Fe^{3+}) の還元電流密度を実験的に求め、前節にて示した濡れ状態におけるコンクリート中の酸素拡散限界電流密度(約 $0.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)と比較した。

厚さ 1 mm の純鉄の板を 7 mm×7 mm に切断したのち暴露面の反対側面に導線を取り付け樹脂包埋したものを試料とした(試料面積: 0.49cm^2)。試料の暴露面が上向きとなるよう電気化学セルに設置し、セル内に参照電極 (Ag/AgCl (3 M NaCl)) と対極 (Pt 線) とを設置することで三電極法によるカソード分極測定を行った。試験溶液には、飽和 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液を基準溶液とし、基準溶液に NaOH を加えて pH 調整したものを用いた。また、さびの表面積の影響を検討するため、試料表面に $\gamma\text{-FeOOH}$ の標準物質の粉末を 0.5 g 堆積させた条件での試験も行った。電位の掃引範囲は自然電位 +10 mV から概ね -1.2V (vs. Ag/AgCl) とし、掃引速度は $20 \text{mV}/\text{min}$ とした。分極測定は大気開放状態もしくは窒素脱気を 12 時間以上行った系で行った。

まず、pH13 に調整した試験溶液を用いて大気開放状態で測定した純鉄のカソード分極曲線(図中赤線)を図-3.2.1 に示す。比較のため、同じく pH13 に調整した 0.1 M NaOH 水溶液を用いて大気開放状態(図中青線)および窒素脱気状態(図中水色線)で測定したカソード分極も同様に示した。pH13 においてはいずれの条件においても酸素の拡散限界によるプラトー領域(酸素拡散限界電流)は明確に認められたが、さびの還元電流に起因する電流ピークは認められなかつ

た。なお、窒素脱気を行った条件においても、溶液中の溶存酸素を完全に除去することはできていないため、大気開放条件に比べると明瞭ではないが酸素の拡散限界に起因するプラトー領域が現れている。

次に pH5, 7, 11, 13 に調整した試験溶液を用いて窒素脱気状態で測定した純鉄のカソード分極曲線を図-3.2.2 に示す。pH11, 13 では酸素拡散限界電流および $-0.9 \sim -1.1 \text{V}$ 付近からの水素発生による還元電流が認められ、pH5, 7 では酸素拡散限界電流はほとんど認められず -0.8V 付近からの水素還元電流のみが認め

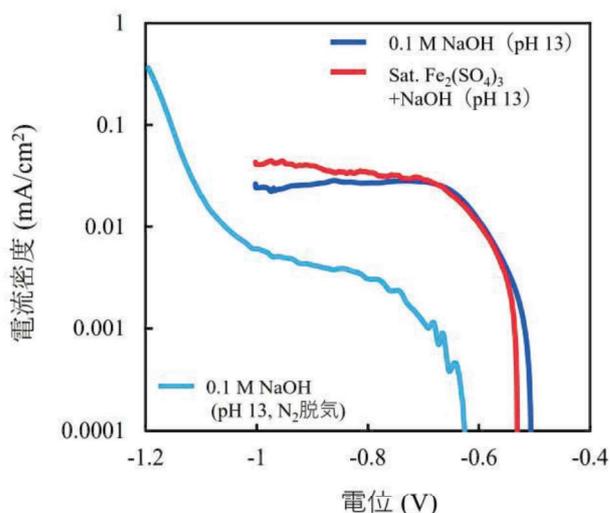


図-3.2.1 大気開放状態、pH13 の溶液中で測定した純鉄のカソード分極曲線

られた。pH の低下に伴い溶液中の水素イオン濃度が上昇し水素発生電位は貴化するため、pH5, 7 では酸素拡散限界電流が見られなかったと考えられる。また、この条件でもさびの電流ピークは認められなかった。次に鉄試料上に γ -FeOOH の粉末を載せ、pH5, 7, 9, 13 に調整した試験溶液中において窒素脱気状態で測定した純鉄のカソード分極曲線を図-3.2.3 に示す。pH13 では酸素拡散限界電流のみが認められたが、pH5, 7, 9 では-0.9 V 付近および-1 V 付近にさびの還元電流と見られる電流ピークが観察された。

まず、さびの還元反応に及ぼす γ -FeOOH 粉末の役割について考察する。還元電流は還元反応の大きさとも言い換えることができ、還元反応の大きさは還元反応の起こりやすさ（還元電流密度） \times 反応場の大きさ（試料の表面積）で決まる。 γ -FeOOH 粉末が鉄試料表面に堆積することで試料の表面積が 0.49 cm^2 から大幅に増加したと考えられる。参考までに、実験に供した γ -FeOOH 粉末の表面積を比表面積計で測定したところ、約 $141 \text{ m}^2/\text{g}$ であった。すなわち、 γ -FeOOH 粉末を加えることで Fe^{3+} 還元反応の反応表面積が最大で約140万倍に増加したと考えられる。これにより、非常に微小な反応である Fe^{3+} の還元反応が図-3.2.3 のpH9以下で観察されたと考えられる。次に溶液の pH の影響について考察する。溶液中の Fe^{3+} の溶解度は pH の低下に伴い上昇するため、低 pH ほど溶液中の Fe^{3+} 濃度は高い、すなわちさびの還元の反応物が多いことを意味する。図-3.2.3 より γ -FeOOH 粉末の添加により十分な反応表面積が与えられたにも関わらず pH13 ではさびの還元電流が認められなかった理由は高 pH により溶液中の Fe^{3+} が十分に存在しておらず、さびの還元電流が酸素脱気した溶液中における酸素の限界拡散電流よりも小さかったためと考えられる。すなわち、コンクリート中においてさびの還元反応が鉄筋腐食の還元反応の一端を担うには、さびの形成により十分な反応表面積が得られることが必要であり、コンクリート中がより低 pH であればさびの還元反応はより起こりやすくなるということがいえる。コン

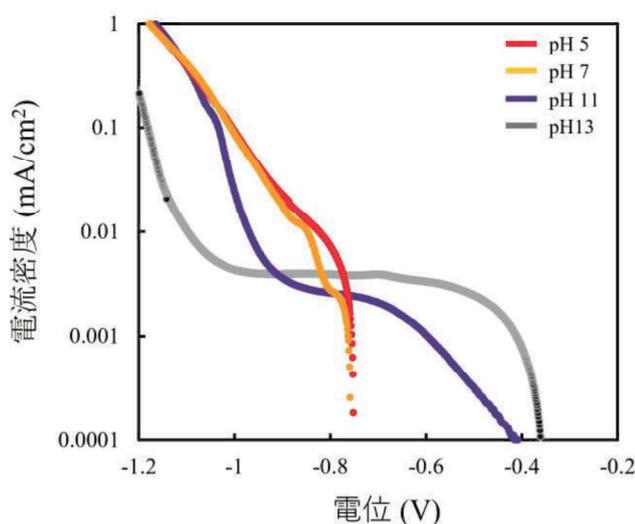


図-3.2.2 窒素脱気状態、各 pH の溶液中で測定した純鉄のカソード分極曲線

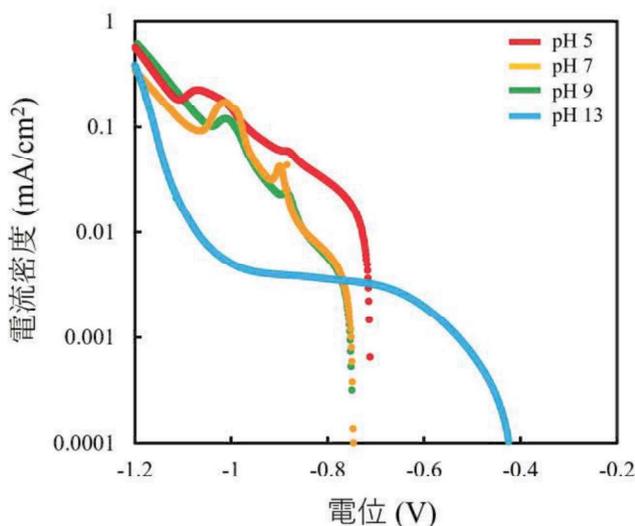


図-3.2.3 窒素脱気状態、 γ -FeOOH 粉末を加えた各 pH の溶液中で測定した純鉄のカソード分極曲線

クリート中の低 pH 化の要因として第一に挙げられるのは中性化であるが、中性化だけが pH を下げる要因ではない。3. 4 節で詳細に述べるが、黒皮付き鉄筋の場合、黒皮と鉄素地との間には幅数十 μm のすきまが存在する。2. 3 節でも述べたとおり、このようなすきま内では物質移動が妨げられるため腐食が生じた際にすきま内の pH は低下する。このような環境においてはさびの還元電流が大きくなり、鉄筋腐食の還元反応を担うことも十分に考えられる。

最後にさびの還元反応を定量的に議論するために、酸素拡散限界電流密度およびさびの還元電流密度を考える。通常、大気開放状態における水溶液中での酸素拡散限界電流密度は約 $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、すなわち $10^{-2} \text{mA}/\text{cm}^2$ オーダである[2]。これに対し、前節で求めた濡れ状態におけるコンクリート中での酸素拡散限界電流密度は約 $0.65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ であり $10^{-4} \text{mA}/\text{cm}^2$ オーダである。本節で測定したカソード分極曲線と $\gamma\text{-FeOOH}$ 粉末の表面積からさびの還元電流密度を求めると $10^{-7} \text{mA}/\text{cm}^2$ オーダである。すなわち、低 pH 環境であったとしてもさびの還元電流は酸素拡散限界電流密度よりもはるかに小さい。しかし、さびが形成された際にはさびの凹凸や空隙を多く含んだ層状組織の形成により反応表面積が著しく増大すると考えられる。また、このような腐食が激しい箇所では 2. 3. 4 項で触れた局部腐食部における pH 低下が考えられる。これらの条件が重なった場合においては、さびの還元電流の著しい増大に伴い、酸素還元に加えてさびの還元が鉄筋腐食を促進することで腐食速度が増加する可能性がある。

<参考文献>

- [1] 日根文男・保田昌樹・松井富士夫：材料，Vol. 22, No. 241, pp. 956–961, 1973
- [2] 腐食防食協会：材料環境学入門，丸善出版，1993

[担当 土井康太郎]

3. 3 アノード反応の特徴

3. 1節において、鉄筋の腐食速度を決定づけるのは酸素還元反応であり、かぶり大きいコンクリート中ではかぶり全体が酸素の拡散層となるため、鉄筋表面への酸素の供給速度が著しく遅くなることを述べた。その結果、鉄筋の腐食速度を見積もる指標である酸素拡散限界電流密度を動電位カソード分極法により測定しようとする、酸素の拡散よりも十分に分極速度を遅くする必要がある、すなわちカソード分極曲線は分極速度依存性を有することが明らかになった。一方で、コンクリート中铁筋のアノード分極挙動、すなわち鉄筋の溶解挙動に対する分極速度依存性についてはほとんど明らかになっていない。本節では、動電位アノード分極測定における分極速度を変化させることで、コンクリート供試体に埋設した鉄筋の分極速度依存性について実験的に考察した。

供試体は3. 1節で用いたものと同じかぶり 20 mm の鉄筋埋設コンクリートである。供試体の詳細な作製条件および分極測定におけるセットアップについては3. 1節を参照されたい。分極範囲は自然電位から概ね+300 mV とし、20 mV/min, 0.2 mV/min の2水準の分極速度で動電位アノード分極測定を行った。

図-3.3.1 にそれぞれの分極速度におけるコンクリート中铁筋のアノード分極曲線を示す。いずれの分極曲線も自然電位からの急激な立ち上がりとその後の不動態皮膜形成による不動態域が認められた。いずれの分極速度においても不動態域における電流密度(不動態保持電流密度)に大きな差はなく、アノード分極曲線は分極速度の影響を受けないことが明らかとなった。カソード分極では外部からの酸素の拡散挙動が鉄筋表面での還元反応量を決定するため、得られるカソード電流は測定時間(=分極速度)に依存するが、アノード分極では鉄筋の溶解を電流として測定しているため、測定時間(=分極速度)の影響を受けなかったと考えられる。

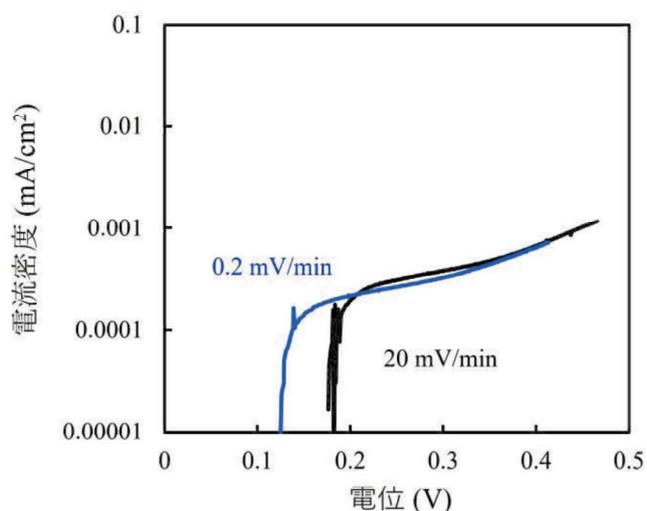


図-3.3.1 コンクリート中铁筋のアノード分極曲線

[担当 土井康太郎]

3. 4 磨き鋼と黒皮付き鋼のアノード反応の特徴

実構造物に使用される鉄筋は、ミル・スケール（通称、黒皮）と呼ばれる熱間圧延時に形成される厚い酸化皮膜に覆われている。黒皮は図-3.4.1に示すとおり、おおよそ三層構造をなしている[1]。鉄筋下地に近い方から、 FeO 、 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 を主成分とした鉄酸化物で構成されており鉄筋下地から離れるほど鉄の価数が増加する（鉄が酸化状態となる）。それぞれの鉄酸化物層の厚さは、鉄筋の圧延条件やその後の冷却条件によって変化する。著者らが購入した市販の鉄筋では FeO が約 $50\ \mu\text{m}$ 、 Fe_3O_4 が約 $10\ \mu\text{m}$ 、 Fe_2O_3 が数 μm 以下であったが、すべての黒皮鉄筋の黒皮がこの比率となっているわけではない。とりわけ、圧延温度により FeO と Fe_3O_4 の厚さは変化しやすいようである[2]。

これまでのコンクリート中の鉄筋腐食に関する研究では、研磨された平板や磨き丸棒を使用するケースが多かった。これは、試料表面の不動態皮膜生成および破壊プロセスの考察や腐食試験後の試料表面観察が容易であるためと考えられる。一方で、黒皮が腐食に与える影響に関していくつかの報告がある。これらの報告において、黒皮は保護皮膜の役割を果たすために鉄筋の耐食性を高めるという研究結果[3]と、黒皮付きの鉄筋では黒皮なしの鉄筋と比較してより大きな腐食電流が測定されたために耐食性に劣るという研究結果[4][5]の矛盾した報告がなされている。これは後述のとおり、黒皮の不均一性（傷の存在）により実験結果が変化するためであると考えられる。本節では、黒皮付き鉄筋の腐食発生から腐食進展過程における挙動について概説する。

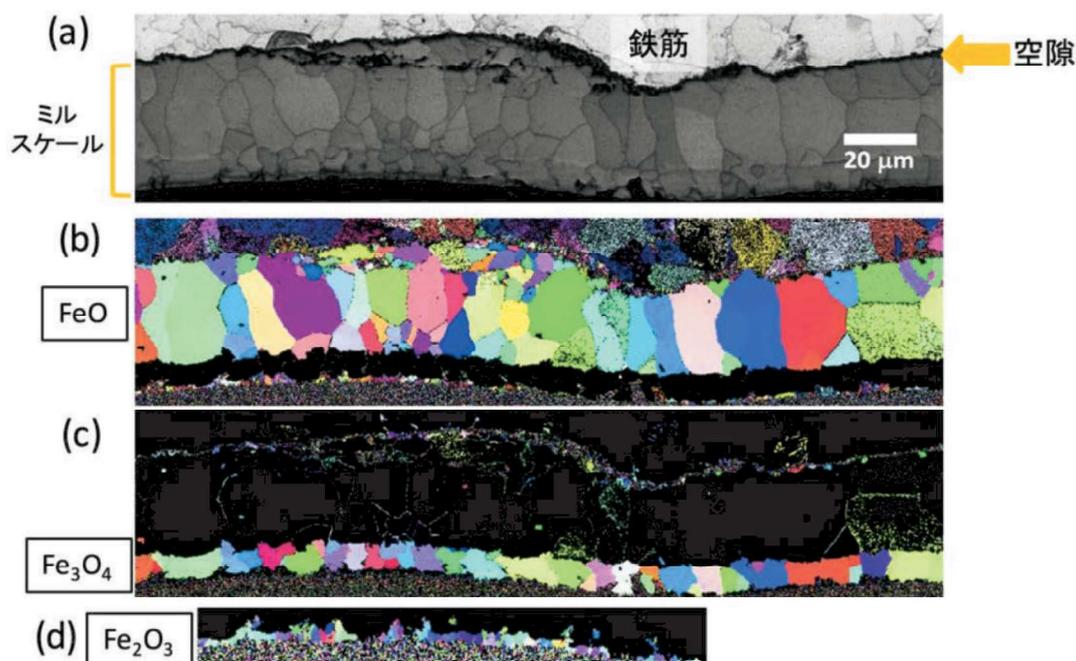


図-3.4.1 黒皮のEBSD観察：(a) IQマップ，(b)-(d) FeO 、 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 の逆極点マップ[1]

黒皮付き鉄筋の腐食挙動を検討するために、19 mmΦ の市販の SD345 鋼異形鉄筋（黒皮付き鉄筋と表記）およびこの鉄筋を電解研磨し表面の黒皮を除去した鉄筋（黒皮なし鉄筋と表記）を練り混ぜ水に 2.06 mol/L の NaCl 水溶液を用いたかぶり（厚さ）5.5 mm のモルタルに埋設して腐食促進試験に供した。腐食促進試験には高酸素腐食促進試験法を用いた[6]。高酸素腐食促進試験法は、金属腐食を律速する酸素還元反応を加圧酸素ガスにより促進することで金属腐食を加速させる試験法である。供給酸素圧は 0.5 MPa、試験期間は 14 日間とした。高酸素腐食促進試験後、黒皮付き鉄筋を埋設したモルタル

には無数の腐食ひび割れが生じていたが、黒皮なし鉄筋ではひび割れは生じていなかった。また、モルタルより取り出した黒皮付き鉄筋では、腐食が発生し全面的に鉄さびが生成していた。一方で、黒皮なし鉄筋では腐食の発生は認められなかった。このことから、黒皮は鉄筋の耐食性を低下させることが明らかとなった。

ここで、黒皮が鉄筋の耐食性を低下させる理由として3つの仮説を立てた。(1) 黒皮により下地鉄上の酸素還元反応が促進され腐食が促進される、(2) 黒皮により下地鉄の溶解が促進される（全面腐食が促進される）、(3) 黒皮に傷があることで下地鉄の耐局部腐食性を低下させる、の3つである。これらの仮説を検証するために動電位分極試験を行った。試料として、所定の長さに切断し導線を接続した黒皮付き鉄筋、黒皮なし鉄筋の節を含まない部分 10 mm×10 mm を除いてエポキシ樹脂被覆したものをを用いた。節のない 10 mm×10 mm の部分が分極測定における反応部である。まず、酸素還元反応の大きさを比較するため、飽和 Ca(OH)₂ 溶液中、分極速度 20 mV/min でカソード分極測定を行ったところ、黒皮の有無に関わらずカソード分極曲線の形状に違いはなかった。この結果より黒皮は酸素還元反応に影響を与えない（仮説 1 は真ではない）ことが分かった。次に耐全面腐食性および耐局部腐食性を検討するために塩化物イオンを含んだ飽和 Ca(OH)₂ 溶液中、分極速度 20 mV/min でアノード分極測定を行った。この際、追加で黒皮付き鉄筋の反応部にカッターナイフで1箇所傷を入れた試料も用いた。その際に得られたアノード分極曲線を図-3.4.2 に示す[7]。まず、どの試料においても明確な不動態域が認められ、不動態保持電流密度に明確な差がないことから、全面腐食性に対する黒皮の影響は小さい（仮説 2 は真ではない）ことが明らかとなった。一方で、局部腐食の発生を見ると、局部腐食発生電位は黒皮付き > 黒皮なし > 黒皮付き+傷となった。このことは黒皮に傷がない場合は黒皮なしよりも高い耐局部腐食性を有

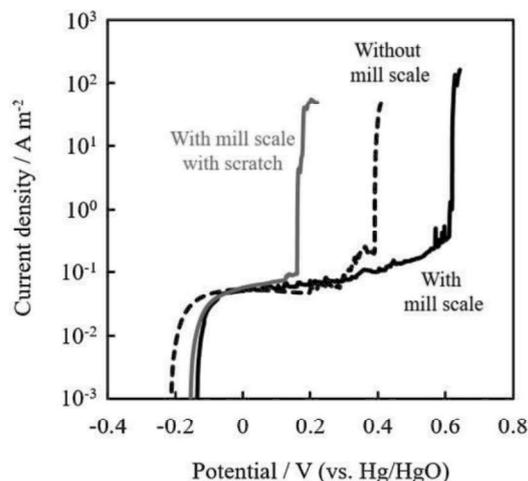


図-3.4.2 黒皮付き鉄筋と黒皮なし鉄筋のアノード分極曲線[7]

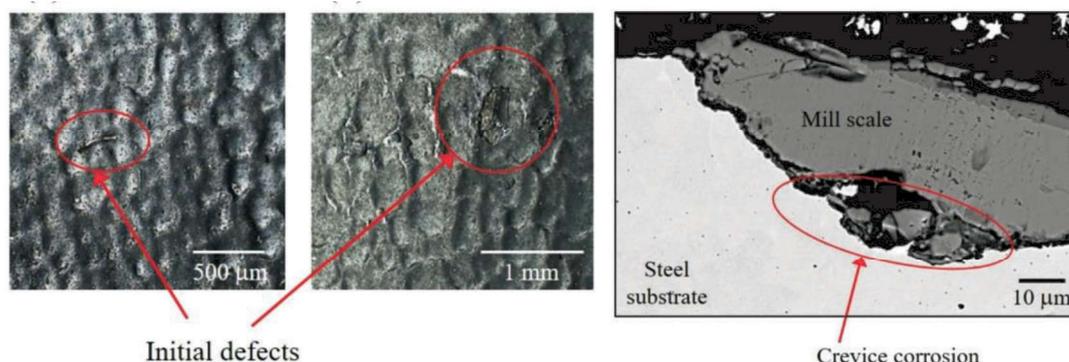


図-3.4.3 黒皮付き鉄筋の表面観察写真および断面 SEM 像 [7]

するが黒皮に傷が存在すると黒皮なしよりも耐局部腐食性が低下する(仮説 3 が真である)ことを意味している。

図-3.4.3 に示すとおり、黒皮付き鉄筋の表面および断面を観察すると、黒皮には所々傷(初期欠陥と呼ぶ)が存在し鉄筋外部と鉄筋とをつなぐ経路になっている部分があること、黒皮と下地鉄との間には幅数 μm の空隙(すきま構造)が存在することが分かる[7]。このことから、黒皮に剥離やひび割れなどの初期欠陥が存在すると、この初期欠陥を通じて供給された塩化物イオンや溶存酸素が黒皮と下地鉄とのすきま構造に到達し局部腐食を誘発するため鉄筋の耐食性が低下すると考えられる。すきま構造内では物質の移動が妨げられるため、溶液の酸性化および腐食の促進が生じる(2.3.3項, すきま腐食)。よって、黒皮なしと比較してより腐食は激しくなる。このように黒皮には耐食性の向上と低下という両面の作用があるが、実環境においては圧延後の冷却過程や現場への運搬などにより黒皮にはほぼ確実に傷がつく。よって鉄筋全体に黒皮の初期欠陥はかなりの頻度で存在し、耐食性を低下させるはたらきの方が強く現れると考えられる。

上述の高酸素腐食促進試験で得られた黒皮付き鉄筋の腐食形態は全面腐食的であったにも関わらず、分極測定で得られた腐食形態は局部腐食的であった。これは両試験の時間によるものである。分極測定では多くの場合数分から長くても数時間で試験が終了する。アルカリ環境で行う鉄のアノード分極ではまず不動態皮膜が破壊され電流が急増するため、分極の挙動は局部腐食的になる。しかし、アルカリ環境で下地鉄上に生成する不動態皮膜はステンレス鋼やチタン系材料上に生成する不動態皮膜と比べて比較的容易に破壊され、その後の再生速度(再不動態化速度)も大きくないと考えられる。よって、短時間の腐食では孔食の形態となるが、時間の経過とともに孔食から全面腐食へと様相は変化する。すなわち、数週間以上の時間で行われる腐食促進試験では不動態皮膜が破壊される腐食発生とその後の酸素の供給による腐食進展を一緒に見ることになるので、腐食促進試験後に得られる腐食形態は全面腐食的になる。どちらも腐食の発生と進行というプロセスで見れば同様の反応が起きるが、腐食中のどの時間軸で結果を切り取るかで腐食形態にあたかも違いが生じているように見えてしまうことには注意が必要である。

<参考文献>

- [1] 土谷浩一・姜 保真・土井康太郎・廣本祥子・強 健：コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集 第19巻，1076，2019
- [2] 林 功輔・日高康善・長 秀雄・兵藤海太：日本金属学会誌，Vol. 83, No. 11, pp. 407-415, 2019
- [3] Shi J. and Ming J.: Int. J. Miner. Metall. Mater., Vol. 24, No. 1, pp. 64-74, 2017
- [4] Poursaee A. and Hansson C.M.: Cem. Concr. Res., Vol. 37, pp. 1127-1133, 2007
- [5] Maallati E. and Saremi M.: Cem. Concr. Res., Vol. 36, pp. 1324-1329, 2006
- [6] 土井康太郎・廣本祥子・秋山英二：日本金属学会誌，Vol. 82, No. 1, pp. 1-7, 2018
- [7] Doi K., Hiromoto S., Shinohara T., Tsuchiya K., Katayama H. and Akiyama E.: Corrosion Science, Vol. 177, 108995, 2020

[担当：土井康太郎，左藤真市]

コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会報告書 (2024.9)

2024年9月2日 第1版第1刷発行

編集著作人 公益社団法人 日本コンクリート工学会
コンクリート中の鉄筋腐食の統一的な取扱いに関する研究委員会

印刷人 株式会社 報光社

©2024

本書の著作権は日本コンクリート工学会にあります。
本書の内容を複写したり、他の出版物に転載する場合は、必ず日本コンクリート工学会の許可を得てください。

発行所 公益社団法人 日本コンクリート工学会
〒102-0083 東京都千代田区麹町1丁目7番地
相互半蔵門ビル 12階

TEL 03-3263-1571(代表)
FAX 03-3263-2115

ISBN978-4-86384-134-5-C3050