

論 文

[1074] コンクリート中の鋼材腐食に関する研究

正会員○高橋正行（東北工業大学工学部）

正会員 外門正直（東北工業大学工学部）

正会員 志賀野吉雄（東北工業大学工学部）

1. まえがき

近年、コンクリート構造物の海洋環境下への進出、骨材資源の減少に伴う海砂の使用、融雪剤の多量散布等の原因により鉄筋コンクリート構造物およびプレストレストコンクリート構造物中の鋼材腐食が社会的問題となっている。この鋼材腐食が各地で報告されるようになってから現在にいたるまで、鋼材腐食に関する多くの研究がなされ、コンクリートのかぶり増し、エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用、コンクリート表面の塗装などの腐食対策を考え出され、今後施工されるコンクリート構造物において鋼材腐食による劣化は少なくなるであろうと考えられる。しかしながら未だ解明されていないメカニズムがあることや、実用的な腐食診断方法が確立していない今日、コンクリート中の鋼材腐食がかなり進んでから調査や補修が行われるのが現状である。

この研究は、曝露試験開始時からのコンクリート中の鉄筋の自然電位をモニターすることによって、かぶり、単位セメント量および塩素イオン量が腐食進行におよぼす影響や、製造仕上げ工程の異なる鉄筋、腐食程度の異なる鉄筋における腐食状況を調べるとともに、自然電位測定方法の実用化についての検討を行うことを目的とした。

2. 実験方法

2. 1 使用材料

実験に使用した鉄筋は、ミルスケール無し鉄筋（タイプA）、ミルスケール付き鉄筋（タイプB）、ミルスケール付き鉄筋を2ヶ月間空気中曝露したサビ付き鉄筋（タイプC）の3種類で、いずれも公称直径19mmの異形鉄筋（SD-30、横フジ型）である。セメントは、普通ポルトランドセメント（比重：3.16）、細骨材は宮城県白石川産川砂（比重：2.52、粗粒率：3.17）、粗骨材は宮城県伊具郡丸森産碎石（最大寸法25mm、比重2.87、粗粒率7.01）を使用した。

2. 2 各試験因子

(1) 実験Ⅰ：かぶりおよび単位セメント量について

かぶりおよび単位セメント量を変えた実験ともタイプA、B、Cの鉄筋を用いた。かぶりを変えた実験については配合bにおいて、かぶり19, 38, 57mmの供試体、また、単位セメント量を変えた実験についてはかぶり19mmにおいて単位セメント量200, 400 kg/m³の供試体について曝露試験を行った。

(2) 実験Ⅱ：練り混ぜ水に含まれる塩素イオン量について

タイプA、B、Cの鉄筋を用いて、かぶり19mm、配合aの練り混ぜ水にそれぞれ0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 kg/m³の塩素イオン量を混入させた供試体について曝露試験を行った。

(3) 実験Ⅲ：腐食程度の異なる鉄筋におけるコンクリート中の腐食状況について

かぶり19mm、配合aにおいて、タイプAの鉄筋を約1分間海水に浸漬した後、20±2 °C, 60±2%RHの空気中に1日間乾燥する工程を1サイクルとする浸漬・乾燥繰返しを0, 10, 20, 30および40サイクル行った腐食程度の異なる鉄筋をコンクリート中に埋設した供試体について曝露試験を行った。

行った。

以上の4種類の試験因子の供試体について実験を行った。

2.3 実験方法

各実験とも、図-1に示す150×150×460 mmの角柱供試体で表-1に示す2種類の配合を用い、打設後2日で脱型し材令7日まで20±2 °C, 95±2%RHの恒温恒湿室で養生した後、50±2 °C, 95±2%RHの雰囲気中にて曝露試験を行った。鉄筋の腐食診断としては、定期的な自然電位の測定と、コンクリートを破壊し中から鉄筋を取り出しての目視観察によって行った。自然電位の測定は図-1に示すように、参照電極として硫酸銅電極(CSE)を用い、コンクリート供試体の打設底面の測定点にねれたスポンジを置き、数分間安定した値が得られるまで行った。

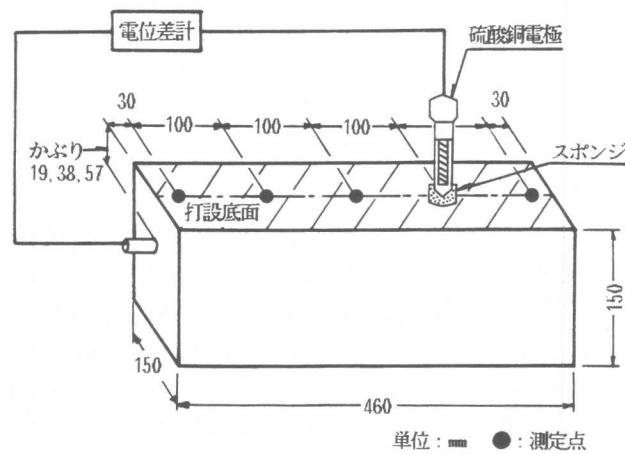


図-1 供試体の形状寸法及び
自然電位測定方法

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランプの範囲 (cm)	単位量 (kg/m³)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
a	45	39	180	400	666	1187
b	90	45	190	200	830	1155

3. 実験結果

3.1 (実験Ⅰ) かぶりおよび単位セメント量について

かぶりがそれぞれ19, 38, 57mmの供試体における自然電位と材令の関係を図-2, 3及び4に、単位セメント量がそれぞれ200, 400 Kg/m³の供試体における自然電位と材令の関係を図-5に示した。

かぶり19, 38, 57mm、単位セメント量200, 400 Kg/m³の各供試体の自然電位とも、初期値(約-0.3V)から、曝露日数の経過にしたがって次第に貴の方向に移り材令4年で、-0.1V前後を示し、鉄筋のタイプによる違いは認められなかった。

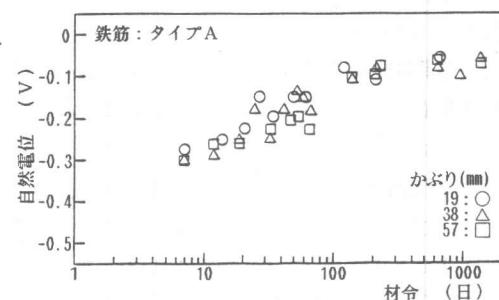


図-2 自然電位と材令の関係

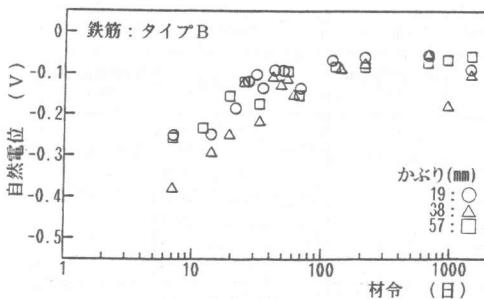


図-3 自然電位と材令の関係

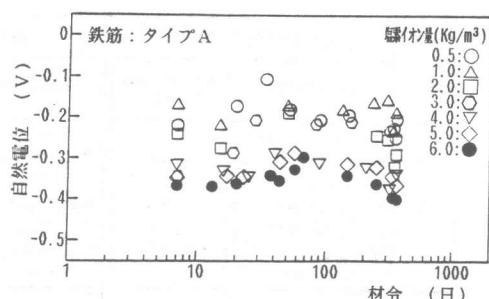


図-6 自然電位と材令の関係

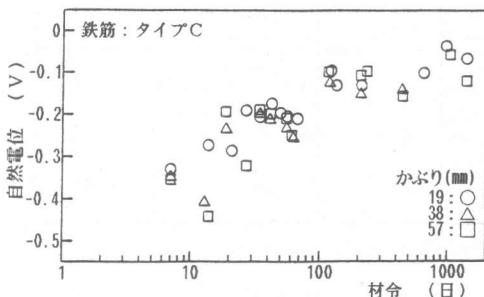


図-4 自然電位と材令の関係

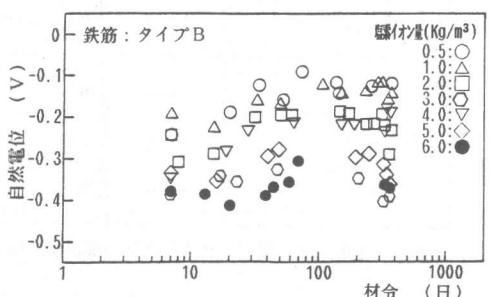


図-7 自然電位と材令の関係

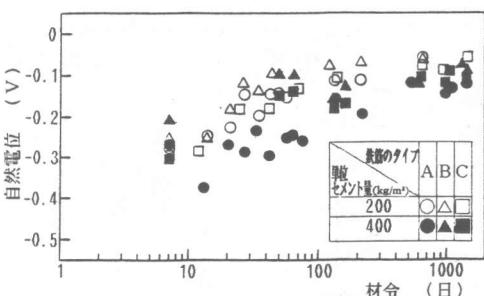


図-5 自然電位と材令の関係

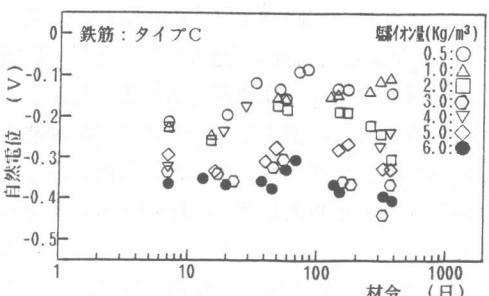


図-8 自然電位と材令の関係

3.2 (実験Ⅱ) 練り混ぜ水に含まれる塩素イオン量について

練り混ぜ水に $0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ の塩素イオン量を混入させた供試体における自然電位と材令の関係を図-6, 7および8に示した。また、曝露試験中に発生したひびわれの曝露試験終了時(材令1年)におけるひびわれ状況を図-9に、曝露試験終了後、コンクリート中から取り出した鉄筋の腐食面積率と塩素イオン量の関係を図-10に、腐食面積率と自然電位の関係を図-11にそれぞれ示した。

図-6, 7および8より、各供試体とも練り混ぜ水に含まれる塩素イオン量が多いほど供試体の自然電位は、初期値から曝露試験終了時まで低い値を示し、鉄筋のタイプによる違いは認められなかった。

図-9より、塩素イオン量 $3.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以下の供試体には曝露試験中にひびわれが発生しないが

鉄筋のタイプ	塩素イオン量 4.0kg/m ³		塩素イオン量 5.0kg/m ³		塩素イオン量 6.0kg/m ³	
	ひびわれ状況	最大ひびわれ幅 (mm)	ひびわれ状況	最大ひびわれ幅 (mm)	ひびわれ状況	最大ひびわれ幅 (mm)
A	NO.1	0.20	NO.1	0.50	NO.1	0.81
	NO.2	0.10	NO.2	0.16	NO.2	0.54
	NO.3	0.05	NO.3	0.17	NO.3	1.05
B	NO.1	0.10	NO.1	0.42	NO.1	1.00
	NO.2	0.10	NO.2	0.54	NO.2	0.55
	NO.3	0.05	NO.3	0.71	NO.3	0.65
C	NO.1	—	NO.1	0.40	NO.1	0.25
	NO.2	—	NO.2	0.40	NO.2	0.20
	NO.3	—	NO.3	0.15	NO.3	0.20

注) 塩素イオン量 3.0kg/m³ 以下の供試体には、ひびわれ発生せず。

図-9 供試体に発生したひびわれ状況

塩素イオン量 4.0kg/m³ 以上の供試体のかぶりには鉄筋軸方向のひびわれが発生した。また、供試体の最大ひびわれ幅は、練り混ぜ水に含む塩素イオン量が多いほど大きい値を示し、タイプCの鉄筋を埋設した供試体に比べて、タイプA, Bの鉄筋を埋設した供試体の方が最大ひびわれ幅が大きい値を示している。

図-10より、練り混ぜ水に混入する塩素イオン量 1.0kg/m³ 以下においては、材令 1 年における腐食面積率が約 0.5% 以下と小さいが、塩素イオン量 2.0 Kg/m³ 以上の供試体においてはその影響が腐食面積率に顕著に認められた。

図-11より、材令 1 年における自然電位が -0.3V より低い供試体の腐食面積率は、約 30% 以上、自然電位が -0.3V ~ -0.2V の腐食面積率は 2 ~ 55% 、自然電位が -0.2V より高い供試体の腐食面積率は 1 つの供試体を除いて 5% 以下であった。

3. 3 (実験Ⅲ) 腐食程度の異なる鉄筋におけるコンクリート中の腐食状況について
腐食程度の異なる鉄筋をコンクリート中に埋設した供試体における自然電位と材令の関係を図-12に示す。

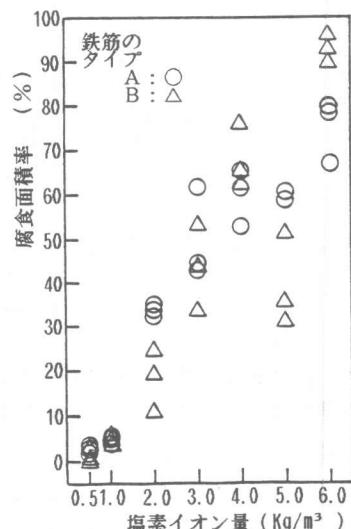


図-10 腐食面積率と塩素イオン量の関係

材令400日において、各供試体の自然電位は約-0.15V～-0.05Vを示している。

4. 実験結果の考察

4. 1 かぶりおよび単位セメント量の影響について

各供試体の自然電位は材令4年でいずれも-0.1V前後と高い値を示し、アノード部とカソード部の間の電位差が小さいことが認められることから、それのかぶりおよび単位セメント量の供試体中の鉄筋とも腐食の発生、および進行はしていないものと考えられる。

4. 2 練り混ぜ水に含まれる塩素イオン量の影響について

塩素イオン量が多い供試体ほど、コンクリート中の塩化物イオンにより鉄筋の不動体態被膜が破壊され、アノード部とカソード部の間に大きな電位差を生じるため、自然電位は低い値を示し、腐食面積率は大きい値を示していると考えられている。また、材令1年と短期間であっても、塩素イオン量がコンクリート中に相当量存在する場合、腐食の発生、および進行におよぼす影響が大きいことが認められた。

4. 3 実験Ⅱで発生したひびわれについて

図-9に示される各供試体に発生したひびわれは、コンクリート中の鉄筋腐食により生じる膨脹圧によって発生したものと考えられる。この実験においては、ミルスケール無し鉄筋、ミルスケール付き鉄筋に比べてサビ付き鉄筋の場合、埋設後の腐食進行速度が大きいとは認められなかった。

4. 4 鉄筋の種類、腐食程度のことなる鉄筋におけるコンクリート中の腐食状況について

ミルスケール無し鉄筋、ミルスケール付き鉄筋のそれぞれの供試体の鉄筋とも現在にいたるまで自然電位は同じような値を示し、コンクリート中から取り出した鉄筋の腐食面積においても違いは観察されず、鉄筋の種類がコンクリート中の腐食状況におよぼす影響は少ないと考えられる。

腐食程度の異なる鉄筋を埋設した各供試体とも材令400日で、自然電位が-0.1V前後の値を示し、腐食していた鉄筋がコンクリート中のアリカリ雰囲気中で安定な状態となり腐食は進行していないものと考えられる。

4. 5 自然電位測定方法についての評価

材令初期から供試体の自然電位を測定することによってコンクリート中の鉄筋における腐食の発生および進行の有・無を判定することはある程度可能であるが、腐食程度を数量的に求めるこことは現段階では困難であると考えられる。

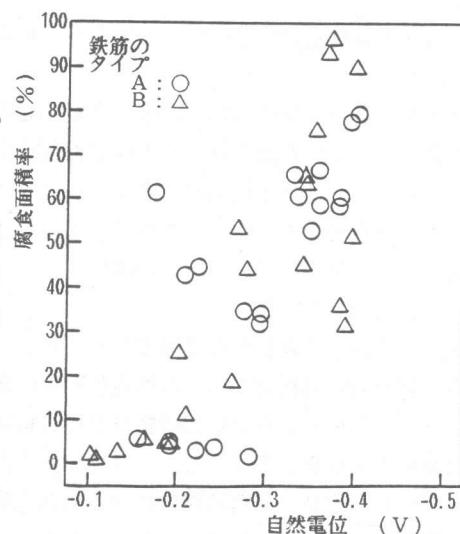


図-11 腐食面積率と自然電位の関係

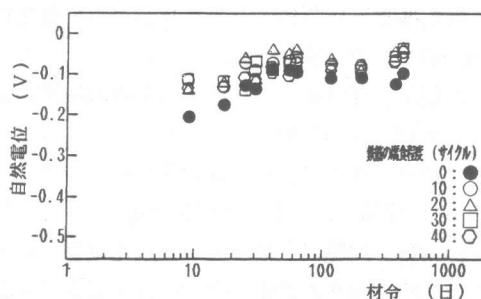


図-12 自然電位と材令の関係

5. まとめ

自然電位測定方法を用い、コンクリート中の鋼材腐食に関する検討を行い次のような結果が得られた。

- (1) 材令4年において塩素イオンを混入させない場合、かぶり、単位セメント量の違いがコンクリート中の腐食進行におよぼす影響は認められない。
- (2) 材令1年と短期間であっても、コンクリート中に塩分量が相当量存在する場合、塩分の大小が腐食の発生、および進行におよぼす影響が大きい。
- (3) 材令4年において、製造仕上げ工程の異なる鉄筋のコンクリート中における腐食状況の違いは認められない。
- (4) かなり腐食した鉄筋であっても、コンクリート中（アルカリ雰囲気中）に埋設された場合、材令400日程度では、自然電位が卑に向かうような腐食進行は認められない。
- (5) RCおよびPC構造物における自然電位を施工当初からモニタリングすることによって、腐食の有・無を判定することは可能であるが、腐食程度を数量的に求めることや、過去に施工されたRCおよびPC構造物における自然電位のモニタリングだけで、コンクリート中の鋼材腐食を判定することは困難であると考えられる。

参考文献

1. 宮川豊章、片脇清：コンクリート中の塩化物腐食調査及び試験方法、コンクリート工学、Vol. 1.19, No.3, 1981, PP48~54
2. 片脇清、守屋進：コンクリート中の鉄筋の腐食に関する電気化学的計測、土木技術資料, 18-10, 1976, PP13~18.
3. 青戸章：海水浸漬したコンクリート中の鉄筋の腐食に関する電気化学的実験、土木学会論文報告集、第256号、1976, PP95~98.
4. 山本悟、片脇清士他3名：自然電位測定によるコンクリート中の鉄筋の腐食診断、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集、1988, PP67~72
5. 蒔田實：コンクリートの早期劣化と問題点、土木施工26巻10号、1985, PP21~27
6. 小林豊治：鉄筋腐食蝕にかかる耐久性の診断手法、コンクリート工学、Vol. 26, No.7, 1988, PP37~39