

論文 外気中における鉄筋の発錆量について

成底弘敏^{*1}・矢吹哲哉^{*2}・有住康則^{*3}・和仁屋晴謹^{*4}

要旨:十分な施工管理を行っても、コンクリート打設時の鉄筋には何等かの発錆が見られる。こうした予め錆びた鉄筋がコンクリート打設後、いかなる挙動を呈するかについては、これまでに十分な資料は整えられていない¹⁾。本研究では、市販鉄筋の暴露試験により、台風来襲後に錆が急速に進行することを確認するところが出来た。さらに、暴露により赤褐色に発錆した鉄筋をコンクリート供試体に埋め込み、錆の状態がコンクリート打設後暗褐色に変化することを確認した。

キーワード:鉄筋コンクリート、発錆鉄筋、劣化、発錆量、腐食量

1. はじめに

入念な施工管理を行っても、コンクリート打設時の鉄筋には多少なりとも発錆が生ずるものと思われる。特に、沖縄県のように厳しい腐食環境下²⁾では、鉄筋がどのように変化し、更に、鉄筋コンクリートとしていかなる挙動を呈していくか等を把握しておく必要があろう。しかし、コンクリート打設時の鉄筋発錆状態と打設後の挙動についての研究例は、意外に少ないよう

思われる。

本研究では、先ずその基礎的な資料を得ることを目的として、沖縄における内陸部での鉄筋の暴露試験を行い、鉄筋が外気中でどのように変化するか調べ、更に、発錆した鉄筋をコンクリート供試体に埋め込み、供試体暴露後1ヶ月、6ヶ月、12ヶ月後に解体を行って鉄筋錆状態の変化を調べた。

表-1 鉄筋暴露期間とその間の気象データ

呼び名	暴露期間 (月)	試験別	鉄筋の暴露時期							期間中の気象データ		
			H8 9月	10月	11月	12月	H9 3月	9月	総降水量 (mm)	総日照時間 (h r)	平均気温20°C以上かつ 平均湿度70%以上 (日数)	
鉄筋②	0.5	鉄筋			---				26.5	41.7	2	
		打設			---							
鉄筋③	1	鉄筋			---				49.5	82.3	12	
		打設			---							
鉄筋④	2	鉄筋	---	---	---				367.5	295.5	49	
		打設	---	---	---							
鉄筋⑤	3	鉄筋	---	---	---				181.0	203.3	39	
		打設	---	---	---							
鉄筋⑥	6	鉄筋	---	---	---				417.0	377.8	61	
		打設	---	---	---							
鉄筋⑦	12	鉄筋	---	---	---				672.0	800.7	67	
									2027.0	1829.3	225	

注 : ↓印は、台風来襲日を表している。

* 1 琉球大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

* 2 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 工博

* 3 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科 工博（正会員）

* 4 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科（正会員）

2. 実験概要

2.1 暴露場所と暴露期間

鉄筋および供試体の暴露場所は琉球大学の構内、東海岸から約 2.5km 離れた標高約 130m の小高い丘の上にある。

表-1に鉄筋の呼び名、暴露時期と気象データを示す。表中の試験別欄に記してある「鉄筋」は鉄筋の暴露試験用である事を示し、鉄筋呼び名②、③、④、⑤に対してそれぞれ 5 本、鉄筋⑥、⑦に対してそれぞれ 3 本である。又「打設」は発錆した鉄筋のコンクリート打設後の変化調査試験用である事を示し、鉄筋②、③、④、⑤に対して、それぞれ 10 本である。気象データは琉球大学の南西方向約 9km 離れた場所にある沖縄気象台地点番号 47936 の観測資料を用いた。

2.2 鉄筋の暴露試験

使用した鉄筋は SD295A D13mm で、市販のものを約 60cm の長さに切断し、長さと質量の測定を行った後、表-1に示した期間暴露した。なお、市販の鉄筋には、黒皮がかなり損傷し鉄

筋素地の現われているものや、一部発錆した鉄筋もあったが、実験ではこの種の鉄筋は除外した。

試験項目は暴露鉄筋に関する外観調査、発錆量測定及び引張強度試験である。なお、除錆は“コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに基準（案）”（日本コンクリート工学協会）に準じて行った³⁾。

また、鉄筋の引張試験は JISZ2241 に基づいて行った。

2.3 発錆した鉄筋のコンクリート打設後の変化

鉄筋②、③、④、⑤と非発錆鉄筋①の 5 本をコンクリートに埋め込んだ供試体を 10 体製作した。供試体の形状寸法及び鉄筋埋め込み位置を図-1に示す。鉄筋の埋め込み位置は、橋梁用桁最小かぶり厚 3cm となるように、決定した。使用したコンクリートは表-2に示した材料及び配合による普通コンクリートである。

コンクリート打設後 1 ヶ月目、6 ヶ月目、12 ヶ月目に図-1に示す破線の位置で供試体を 5

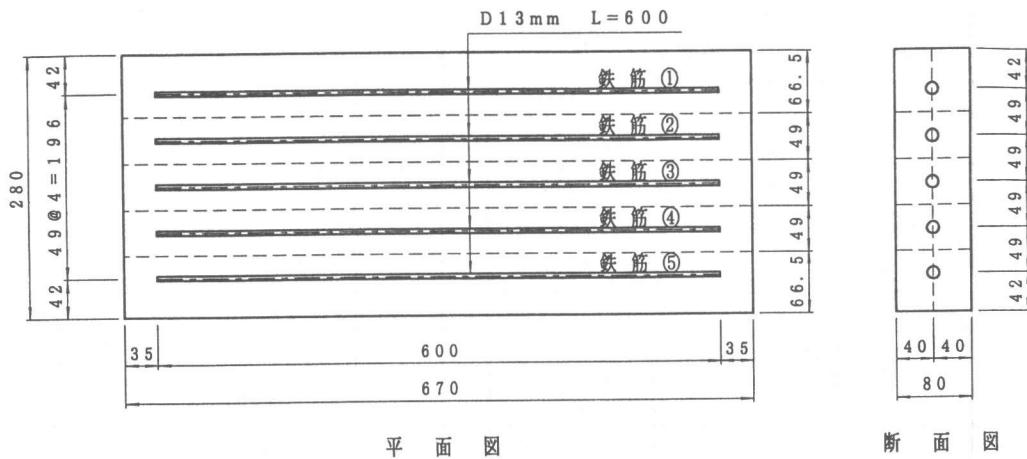


図-1 供試体詳細及び切断図 (単位: mm)

表-2 使用材料、配合及びコンクリート性状

セメント	粗骨材	細骨材	混和剤	粗骨材の最大寸法	スランプ	呼び強度	水セメント比 (%)	粗骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)				
									水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
普通ポルトランドセメント	本郷産砕石	本郷産砕砂 東村新川沖産 (混合比 4:6)	AE 減水剤 (速硬化形)	20 mm	12 cm	24 N/mm²	57.0	48.0	173	304	860	964	0.760

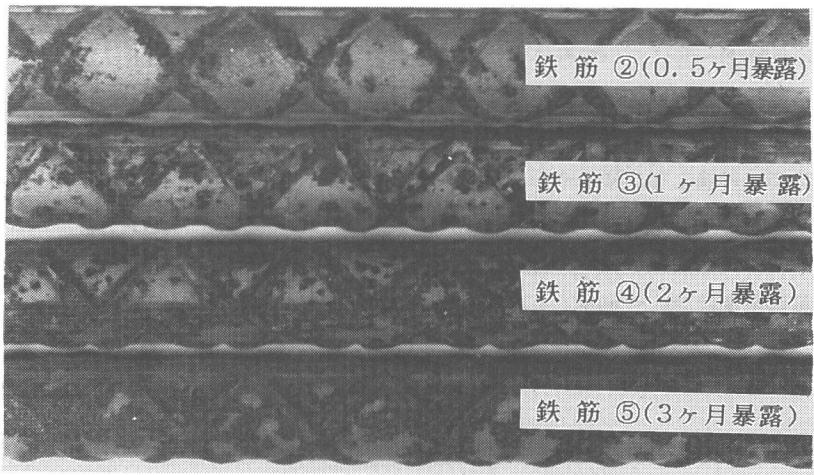


写真-1 暴露後の鉄筋

個のブロックに切断した後、各ブロックの鉄筋位置に鉄筋を傷つけない様に切り込みを入れ、ブロックを解体して鉄筋を露出させた。

埋め込んだ鉄筋を露出させた後の試験項目は、外観調査、腐食量測定及び引張強度試験である。解体した供試体の数は、打設後1ヶ月目に4体、又、6ヶ月目及び12ヶ月目では3体である。

3. 実験結果

3. 1 暴露鉄筋

(1) 外観調査

暴露鉄筋の外観調査結果を写真-1に示す。

写真-1は鉄筋②、③、④、⑤の発錆状況である。写真で、黒色部が錆を示している。目視による外観調査で、鉄筋は切口付近から錆びはじめて、節部分、その他部分へと進んでいくことが判った。

このことは塗装鉄筋の輸送時の塗膜の損傷度調査結果⁴⁾と類似しており、鉄筋切断時に端部への加圧と輸送時に鉄筋相互の接触によって黒皮に損傷が生じ、発錆しやすい状態にあったためと考えられる。錆は、最初うすい赤褐色の幕状から次第に厚みを帯びて層状となり、褐色と変化していくことが観測された。また、台風来襲後に錆は急速に進行することが観察された

が、定量的には、今後継続して調査する必要があるものと思われる。

(2) 暴露鉄筋の発錆量

腐食に及ぼす台風の影響が観察されたことを考慮して、ここでは、暴露期間中の単位面積あたりの鉄筋腐食部分の質量、すなわち腐食度×試験日数を発錆量(mg/cm^2)と定義し、次式により算定した値を用いた。

$$\Delta W_1 = (W_0 - W_1) / (U \times L) \quad (1)$$

ΔW_1 ; 発錆量(mg/cm^2) , W_0 ; 暴露前質量(mg) ,
 W_1 ; 除錆後質量(mg) , L ; 鉄筋の長さ(cm) ,
 U ; 鉄筋の公称周長(cm)

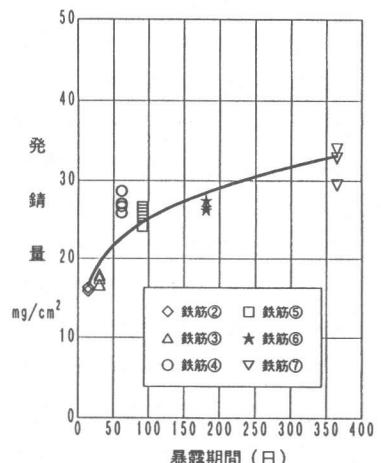


図-2 発錆量と暴露期間

暴露期間と発錆量の関係を図-2に示す。発錆量の測定は鉄筋②～⑤について各5本、鉄筋⑥、⑦について各3本用いて行った。図より発錆量は、時間の経過と共に増加するが、その増加の割合は時間の経過に従いゆるやかになる傾向を示している。なお、0.5ヶ月暴露鉄筋（鉄筋②）に対しては発錆面積の測定も行った。その結果、発錆面積率は38～49%で平均43%であった。

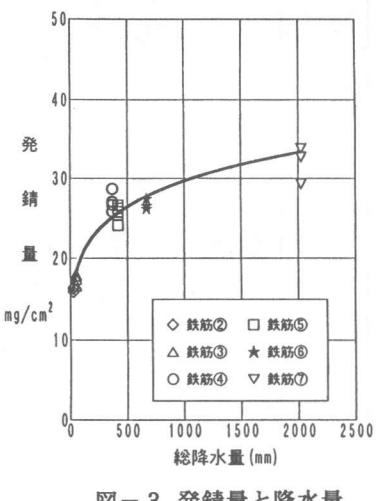


図-3 発錆量と降水量

図-3は暴露期間中の総降水量と発錆量の関係を示したもので、図-4は総日照時間と発錆量の関係を示したものである。図-2及び図-3より、鉄筋④～⑦間における発錆量は、暴露期間又は総降水量の増加に併し、ゆるやかに増加する傾向を示している。他方、鉄筋②～④間では、鉄筋④～⑦に比較して、急激な発錆量の増加を示している。表-1に示したように、鉄筋②、③は台風来襲を受けていないが、鉄筋④、⑤、⑥、⑦は暴露期間中に台風の来襲を受けている。従って、鉄筋②～④間の急激な発錆量増加は、台風の影響であると確認されよう。なお、図-2、3、4に、測定結果から得られた資料に基づいて、最小二乗法を用いて算定した近似曲線を併せて記入した。

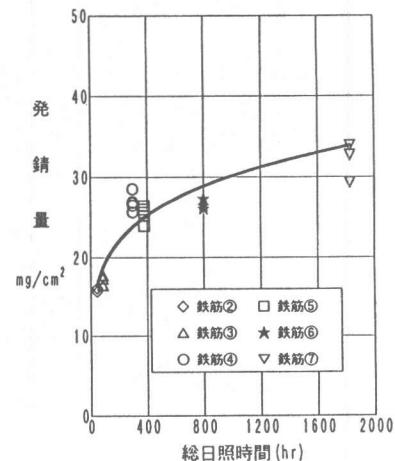


図-4 発錆量と日照時間

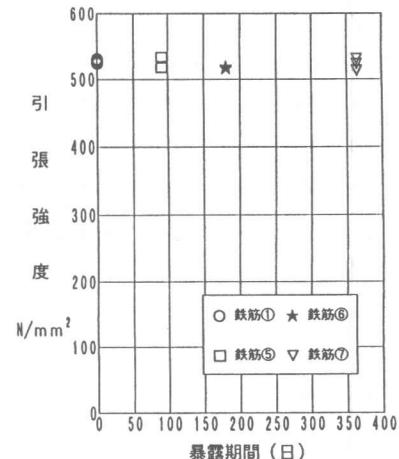


図-5 引張強度と暴露期間

(3) 引張試験

引張試験結果と暴露期間との関係を図-5に示す。なお、鉄筋の引張強度は公称断面積を用いて算定した。引張試験は鉄筋①について5本、鉄筋⑤、⑥、⑦については各3本づつ行った。図より、引張強度はほとんどバラツキはなく、暴露による強度の変化もほとんど見られない。

3.2 暴露鉄筋のコンクリート打設後の変化

(1) 外観調査

写真-2はコンクリート打設後6ヶ月目に供試体からはり出した鉄筋①～⑤の錆状態を示

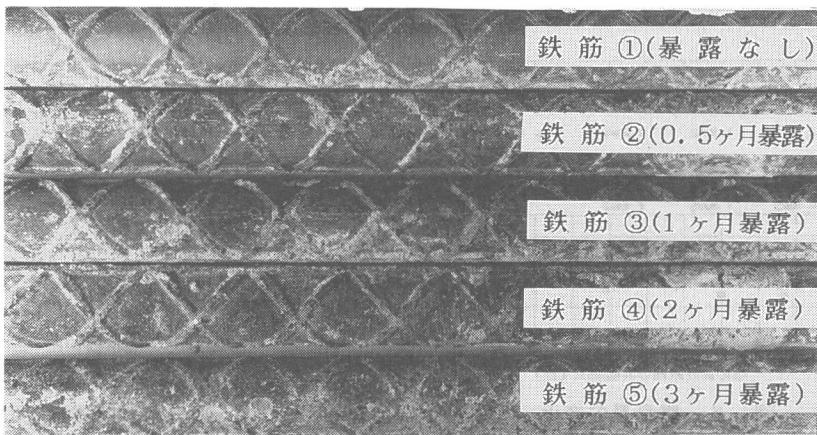


写真-2 打設後6ヶ月目の埋め込み鉄筋

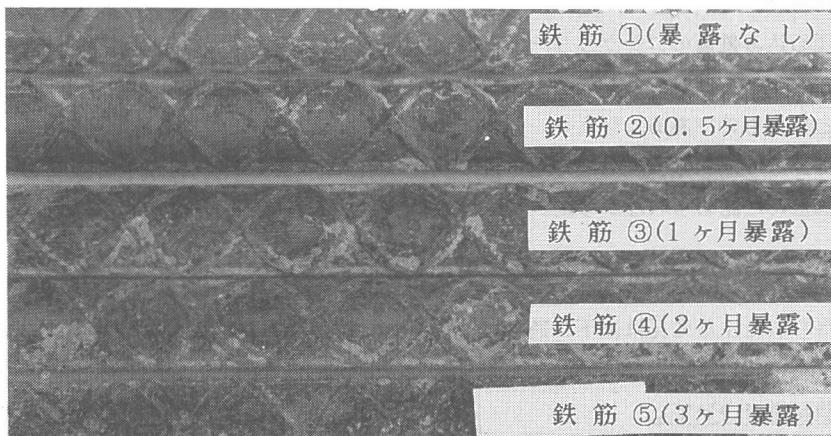


写真-3 打設後12ヶ月目の埋め込み鉄筋

す。また、写真-3は12ヶ月目のものを示す。写真で、黒色部が錆を示している。写真-2、3共に、埋め込み前の暴露鉄筋の錆が示した赤褐色および褐色は、コンクリート打設後、暗褐色に変化していることが観察された。6ヶ月暴露供試体の埋め込み鉄筋と12ヶ月のものを比較すると、12ヶ月間埋め込み鉄筋の方がより暗褐色化していた。又、6ヶ月及び12ヶ月暴露供試体共に、鉄筋③、④、⑤に対しては鉄筋表面の大部分が腐食しており、更に部分的に浮き錆が観察された。従って、鉄筋③、④、⑤の変化を腐食状況の段階標示⁵⁾で評価すれば段階Ⅱに相当するものと思われる。

(2) 腐食量

暴露前鉄筋質量をW₀ (mg)、はつり出した

鉄筋の除錆後質量をW₂ (mg) とし、次式により算定した腐食量△W₂ (mg/cm²) を腐食量と定義した。

$$\triangle W_2 = (W_0 - W_2) / (U \times L) \quad (2)$$

L ; 鉄筋の長さ (cm), U ; 鉄筋の公称周長 (cm)

コンクリート打設後、1ヶ月、6ヶ月、12ヶ月目の各鉄筋の腐食量の変化をまとめたのが図-6である。図中には3. 1で述べた暴露鉄筋発錆量平均値も併せて示してある。図より、12ヶ月目のものが若干減少傾向を示している。このことは、錆変化の度合と試薬除錆能力の相関関係に何らかの原因があるのか⁶⁾、明確ではない。今後の継続的研究による解明が必要と思われる。

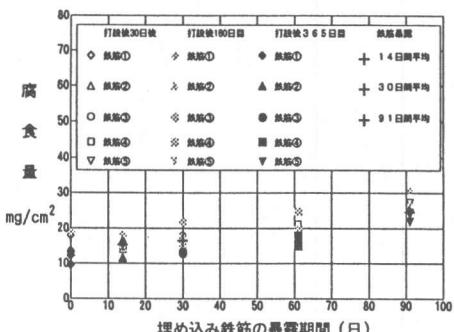


図-6 腐食量の変化

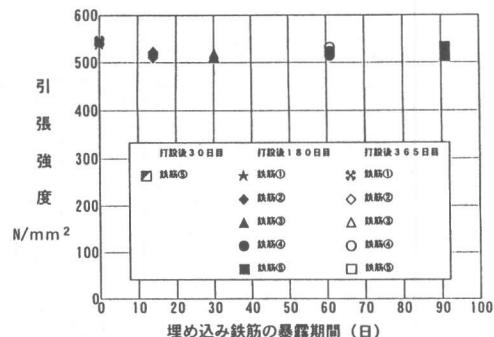


図-7 引張強度の変化

(3) 引張強度

図-7は埋め込み鉄筋のコンクリート打設後1ヶ月、6ヶ月、12ヶ月の各鉄筋の引張強度の変化をまとめたものである。図より、全体的にバラツキは少なく、引張強度の埋め込み後の強度変化はほとんど認められなかった。

4.まとめ

本調査で得られた主な知見は以下の通りである。

鉄筋暴露試験結果について；

(1) 鋼は最初うすい赤褐色の幕状から次第に厚みを帯びて層状となり、褐色と変化していくことが観測された。また、台風来襲後に鋼は急速に進行することを確認した。

(2) 発錆量は、時間の経過と共にほぼ直線的に増加する。ただし、台風の来襲を受けた場合は、急激な発錆量の増加となると考えられる。

(3) 鉄筋引張強度はほとんどバラツキはなく、暴露による強度の変化もほとんど見られない。

コンクリート中の鉄筋腐食変化について；

(1) 埋め込み前の暴露鉄筋の鋼が示した赤褐色および褐色は、コンクリート打設後、暗褐色に変化していることを確認した。変化を腐食状況の段階標示で評価すれば段階Ⅱに相当するものと思われる。

(2) 暴露鉄筋のコンクリート打設後12ヶ月目の腐食量は、若干減少傾向を示すことを確

認した。

これまでに得られたコンクリート打設後1年の試験結果を報告したが、今後、更なる長期打設期間の影響に関する継続調査及び鉄筋埋め込み位置の影響等の調査が必要であると思われる。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会腐食防食小委員会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向, pp.1～35, 1997.12
- 2) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説, pp.1～5, 1984.2
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準（案）, pp.1～4, 1991.4
- 4) 土木学会エポキシ樹脂塗装鉄筋に関する小委員会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針（案）, pp.106～126, 1986.2
- 5) 日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針（案）, pp.103～106, 1983.2
- 6) 児玉和己ほか：鉄筋の腐食防食試験に用いられる電気化学的手法に関する検討その2 腐食生成量の定量（分析）に関する検討、鉄筋コンクリートにおける塩化物の影響に関するシンポジウム発表報文集, pp.37～40, 1975.3