塩害環境におけるコンクリート中亜鉛めっき鉄筋の防食性能評価に関する検討

徳島大学大学院　学生会員　○福本信吾　徳島大学大学院　正会員　上田隆雄
福岡大学　正会員　塚越雅幸　東京工業大学大学院　正会員　中山一秀

１．はじめに

塩害環境下にあるコンクリート構造物の鉄筋防食対策の一つとして亜鉛めっき鉄筋の利用に関する検討が進められてきた。しかし，コンクリートのような高アルカリ性環境下では，水素発生を伴う亜鉛めっき部分の溶解反応の進行が指摘されている。そこで本研究では，このような亜鉛めっき鉄筋のコンクリート中における反応が，鉄筋の防食性に与える影響を明らかにすることを目的として実験的検討を行った。

２．実験概要

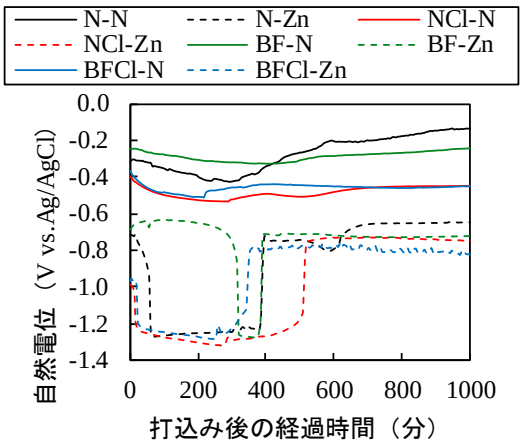
本研究で用いたコンクリートの配合を**表－1** に示す。水結合材比(W/B)を 55%とし，普通コンクリートを基準配合 N とする。これに対して高炉セメント B 種を使用し，セメント代替 20%でフライアッシュを混和した配合を BF とした。また，N，BF に対して初期混入 Cl^-量が 8.0 kg/m^3 となるように NaCl を混入したものをそれぞれ NCl，BFCl とした。

表－1　コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)							
			C	W	S	G	FA	NaCl	WRA*	AEA*
N	55	48	324	178	826	895	－	－	1.62	0.032
NCl			324	178	813	895	－	13.2	0.97	0.032
BF			259	178	813	881	65	－	1.04	0.039
BFCl			259	178	800	881	65	13.2	0.52	0.039

*WRA：AE 減水剤，AEA：AE 剤

本研究で作製した RC 供試体の形状は，100×100×250 mm の角柱コンクリートである。供試体には異形鉄筋 D13 を正方形断面中央に配置した。なお，供試体に用いた異形鉄筋には，D13 の普通鉄筋および，D13 の普通鉄筋を溶融亜鉛浴中に浸漬してめっき厚 120～150 μm の金属亜鉛被膜を施した亜鉛めっき鉄筋を用いた。RC 供試体はコンクリート打込みの翌日に脱型後，20℃の恒温室中で封緘養生を行った。28 日間の封緘養生終了後，鉄筋腐食促進環境（40℃，95%R.H.）に保管し，定期的に電気化学的鉄筋腐食モニタリングを行った。また，併せて作製した φ100×200mm のコンクリート円柱供試体は 62 日間封緘養生終了後に圧縮強度試験，φ50×100mm のモルタル円柱供試体は 56 日間封緘養生終了後に細孔溶液の高圧抽出を行った。



図－1　コンクリート打込み直後からの供試体中鉄筋の自然電位経時変化

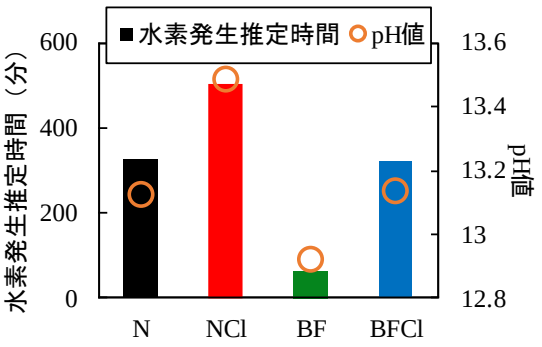
３．打込み直後の鉄筋自然電位モニタリング

RC 供試体に関して，打込み直後からの鉄筋自然電位の経時変化を**図－1** に示す。これによると，普通鉄筋を用いた供試体の場合，NaCl 無混入の N および BF 配合では自然電位は ASTM C876-91 の非腐食から不確定領域の比較的貴な値をとっているが，NaCl 混入の NCl および BFCl 配合の場合は ASTM C876-91 の腐食領域に相当する卑な値をとっている。これより，初期混入 Cl^-濃度が 8.0 kg/m^3 と高濃度であったため，供試体中の普通鉄筋はコンクリート打込み直後から腐食状態にあるものと考えられる。一方，亜鉛めっき鉄筋を用いた場合には，コンクリート打込み直後に自然電位が急速に低下し，すべての配合で自然電位が－1.2 V より卑な値をとっている。その後，一定時間－1.2 V 程度の電位を保ち，数時間後には－0.7 V 程度まで急速に上昇した

キーワード　亜鉛めっき鉄筋，鉄筋腐食，防食性能，自然電位，推定腐食減量
連絡先　〒770-8506　徳島県徳島市南常三島町 2-1　徳島大学大学院社会産業理工学部　ＴＥＬ088-656-2153

© Japan Society of Civil Engineers

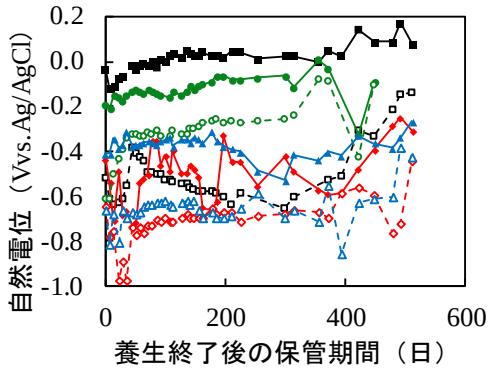
後に定常状態となる傾向を示している。亜鉛の水素発生電位は−1.046 V（V vs. Ag/AgCl）であり，この値より卑な電位をとる時間帯では，亜鉛めっき層とコンクリート中のアルカリの反応で水素が発生していることが考えられる。そこで，各配合供試体中の鉄筋自然電位が−1.2 V 程度の卑な値を示している時間を水素発生推定時間と定義し，モルタル細孔溶液中の OH^-濃度から算出した pH 値とともに**図−2** に示す。これによると，BF 配合より pH 値が高い N 配合の場合に水素発生推定時間が長くなっている。また，NaCl を混入した場合には，Na^+の影響で細孔溶液中の pH 値は上昇するとともに水素発生推定時間も長くなっており，亜鉛めっき層の溶解反応が活性化したものと考えられる。



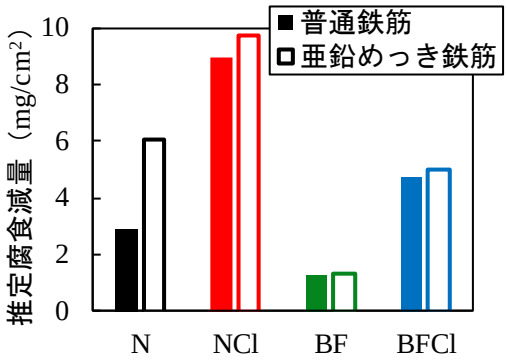
図−2　水素発生推定時間とモルタル細孔溶液中 OH^- 濃度から算出した pH

4．鉄筋腐食促進環境での電気化学的鉄筋腐食評価

養生終了後に 40℃鉄筋腐食促進環境に保管した RC 供試体に関して，定期的に測定した自然電位の経時変化を**図−3** に示す。これによると，普通鉄筋供試体については，ASTM C876-91 の腐食判定基準に照らして，NaCl 混入配合では鉄筋腐食が進行し，NaCl 無混入配合では鉄筋腐食はほとんど進行していない。一方で，亜鉛めっき鉄筋供試体については，普通鉄筋と比較して全体的に卑な電位を示しているが，普通鉄筋と亜鉛めっき鉄筋では鉄筋の腐食状態に対応する電位が異なるため，ASTM C876-91 の腐食判定基準で判断することはできない。ただし，NaCl を混入した場合に卑な値をとっていることから，亜鉛めっき鉄筋の場合でも塩害の影響を受けて亜鉛めっき層が腐食していくものと考えられる。また，この期間中に定期的に測定した分極抵抗値から算出した推定腐食減量を**図−4** に示す。これによると，鉄筋の種類によらず，NaCl 混入配合で推定腐食減量が大きく，N 配合より BF 配合の方が腐食が抑制されているものと予想された。



図−3　鉄筋腐食促進環境における自然電位の経時変化



図−4　分極抵抗値から算出した推定腐食減量

5．コンクリート中の鉄筋腐食状況

解体した RC 供試体から取り出した鉄筋の腐食状況を**表−2** に示す。普通鉄筋について，**図−4** より，NCl 配合で最も激しい腐食が生じていると予想されたが，実際は，BFCl 配合で最も激しい腐食が確認できた。これは，BFCl 配合の Cl^-/OH^-モル比が大きく，より厳しい腐食環境であったためであると考えられる。一方，亜鉛めっき鉄筋については，**図−4** からは，普通鉄筋と同程度の腐食が予想されたが，NaCl 混入配合も含めて亜鉛めっき内部の素地鉄筋腐食生成物は見られず，亜鉛めっき層の腐食生成物と考えられる白色や琥珀色の付着物が確認できた。今回確認された白色物質の一部は，カルシウムを含有し，防食性能を有する反応生成物である可能性がある。今後元素分析等により，亜鉛めっき鉄筋の腐食進行過程についてより詳細な検討を進める予定である。

表−2　コンクリート中の鉄筋腐食状況

N-N	
N-Zn	
NCl-N	
NCl-Zn	
BFCl-N	
BFCl-Zn	

© Japan Society of Civil Engineers