

論文 コンクリート中における亜鉛めっき鉄筋の腐食と付着特性に関する検討

福本 信吾*1・上田 隆雄*2・塚越 雅幸*3

要旨: 亜鉛めっき鉄筋は、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反応進行が指摘されている。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、鉄筋の防食性と付着特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。この結果、コンクリートの pH の値が高いほど、また Cl⁻濃度が高い場合にコンクリート打込み直後における亜鉛めっき鉄筋が水素発生電位を示す時間が長くなる傾向が認められた。ただし、その後比較的短時間で亜鉛めっき鉄筋の自然電位は貴変し、コンクリート硬化後の鉄筋防食性やコンクリートと鉄筋との付着特性の低下は見られなかった。

キーワード: 亜鉛めっき鉄筋, 鉄筋腐食, 付着強度, 防食性能

1. はじめに

亜鉛めっき鉄筋は、塩害環境などの過酷な鉄筋腐食環境にある鉄筋コンクリート（以下 RC とする）構造物における鉄筋防食対策の一つとして利用されてきた。亜鉛めっき鉄筋を用いることの利点として、鉄筋表面にある亜鉛めっき部分に形成される酸化被膜によって空気や水などの劣化因子を通し難くすることで鉄筋を保護する「保護被膜作用」に加えて、被膜部分が腐食反応等によって消失し、鉄筋が露出した場合でも、鉄に比べてイオン化傾向の大きい亜鉛が優先的に溶解することで、鉄筋の腐食開始時期を遅らせる「犠牲防食作用」が期待できると考えられている¹⁾。

一方、両性金属である亜鉛は、コンクリート中のような高アルカリ性環境下において、水素発生を伴う溶解反応が進行した後に不動態化するものと考えられる^{2), 3)}。ただし、亜鉛めっき鉄筋の打込み直後から数時間の腐食速度は、普通鉄筋よりもはるかに大きな値を示すとの指摘⁴⁾や、亜鉛めっき鉄筋の腐食速度は、pH が高くなるにつれて大きくなるとの報告⁵⁾もある。これより、コンクリート打込み直後におけるコンクリート中に埋設された亜鉛めっき鉄筋の腐食挙動を詳細に検討することが必要である。また、このコンクリート打込み直後における亜鉛めっき層の腐食反応で発生した水素や腐食生成物により、コンクリートと鉄筋との界面部分に変質し、コンクリート硬化後の鉄筋防食性能や鉄筋とコンクリートとの付着力に影響を与える可能性がある。今後、国内において亜鉛めっき鉄筋の普及を促進するためには、このような点を明確にすることが必要となる。

そこで本研究では、亜鉛めっき鉄筋と普通鉄筋を用いた RC 供試体を作製し、コンクリート打込み直後からの

亜鉛めっき鉄筋の防食性を電気化学的モニタリングで検討するとともに、腐食促進後の亜鉛めっき鉄筋とコンクリートとの付着特性を引抜き試験により確認することとした。また、高炉セメントとフライアッシュを併用した pH 低減コンクリートを用いて、コンクリートの pH が亜鉛めっき鉄筋の水素発生や、防食性、および付着特性に与える影響についても併せて検討を行った。

2. 実験概要

2.1 コンクリート配合および使用材料

本実験で用いたコンクリートの配合およびコンクリートのフレッシュ性状と材齢 63 日における圧縮強度測定値を表-1 に示す。水結合材比 (W/B) が 55% の普通コンクリートを基準配合 N とし、これに対して高炉セメント B 種を使用し、高炉セメント代替 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/m³ となるように細骨材代替で NaCl をあらかじめ練混ぜ水に溶解する形で混入したものをそれぞれ NCl, BFCl とした。モルタルの配合はコンクリートの配合から粗骨材と混和剤を除いた。

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³，比表面積：3460 cm²/g）および高炉セメント B 種（密度：3.04 g/cm³，比表面積：3710 cm²/g）を用い、細骨材は徳島県阿波市市場産砕砂（密度：2.57 g/cm³，吸水率：1.77%），粗骨材は徳島県板野町大坂産砕石（密度：2.57 g/cm³，吸水率：1.62%）を用いた。また、フライアッシュは JIS A 6201 で規定された II 種（密度：2.30 g/cm³，比表面積 4090 cm²/g，強熱減量：1.7%）を用いた。

2.2 供試体の作製および養生

本研究で作製した RC 供試体は、鉄筋腐食モニタリン

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 建設創造システム工学コース (学生会員)

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系助教 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

| 配合名 | W/B (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) (材齢 63 日) |
|------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|----|------|------|-------|-----------|---------|-------------------------------------|
| | | | C | W | S | G | FA | NaCl | WRA* | AEA* | | | |
| N | 55 | 48 | 324 | 178 | 826 | 895 | — | — | 1.62 | 0.032 | 12.5 | 5.5 | 39.4 |
| NCl | | | 324 | 178 | 813 | 895 | — | 13.2 | 0.97 | 0.032 | 11.5 | 6.0 | 36.2 |
| BF | | | 259 | 178 | 813 | 881 | 65 | — | 1.04 | 0.039 | 13.0 | 4.8 | 29.5 |
| BFCI | | | 259 | 178 | 800 | 881 | 65 | 13.2 | 0.52 | 0.039 | 14.0 | 4.4 | 33.4 |

*WRA : AE 減水剤, AEA : AE 剤

グに用いるものとして、100×100×250 mm の角柱コンクリートの長軸方向に対して、異形鉄筋 D13 SD295A を正方形断面中央に配置した。鉄筋の一端はエポキシ樹脂で絶縁した上でコンクリートから露出させ、コンクリート内の鉄筋埋込み長さは 175 mm とした。引抜き試験に用いるものは 100×100×100 mm の角柱コンクリートの正方形断面中央に異形鉄筋 D13 SD295A を配置した。コンクリート内に埋込んだ鉄筋には、自由端側に、4D=52 mm の付着区間を設け、荷端側は、非付着区間とした。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 の普通鉄筋を熔融亜鉛浴中に浸漬して金属亜鉛被膜を施した亜鉛めっき鉄筋を用いた。めっき厚は 100~150 μm とした。また、細孔溶液抽出用に φ50×100 mm のモルタル円柱供試体、圧縮強度試験用に φ100×200 mm のコンクリート円柱供試体を併せて作製した。RC 供試体の概要を図-1 に示す。

すべての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。すべての RC 供試体は 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、鉄筋腐食モニタリングに用いる供試体については定期的に電気化学的鉄筋腐食モニタリングを行った。引抜き試験に用いる供試体については、鉄筋腐食促進 17 週間終了後に引抜き試験を実施し、鉄筋とコンクリートの付着強度を算出した。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、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。なお、BF 配合の供試体は、鉄筋腐食モニタリング用供試体のみを、他の供試体に比べ 2 か月程度遅れて作製した。

2.3 各種試験

RC 供試体のうち鉄筋腐食モニタリングに用いるものは、コンクリート打込み直後から鉄筋自然電位のモニタリングを行った。また、供試体脱型後、20℃, 95%R.H. の環境で 28 日間の封緘養生を行った。封緘養生終了後、40℃, 95%R.H. の鉄筋腐食環境に保管し、1 週間間隔で自然電位、分極抵抗、およびコンクリート抵抗を測定した。照合電極としては飽和銀塩化銀電極 (Ag/AgCl)、対

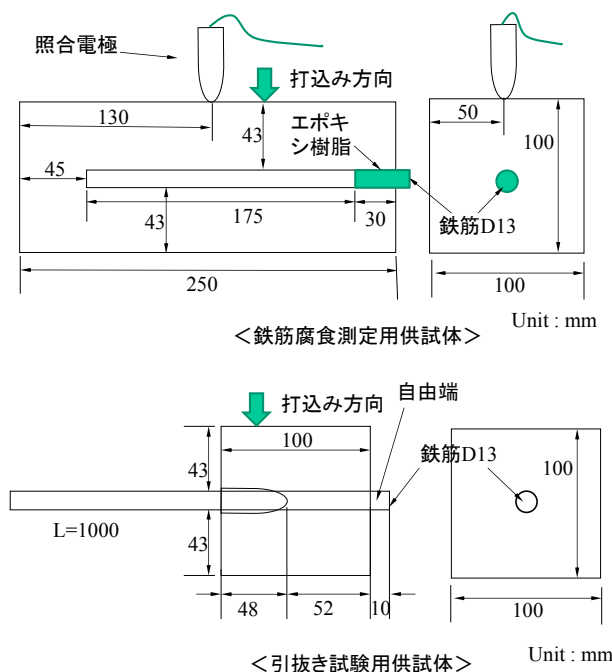


図-1 RC 供試体の概要

極にはチタンメッシュを用いて、各指標の値は供試体中の鉄筋全長の平均値として測定を行った。照合電極の設置位置を図-1 に示す。なお、打込み直後の電位測定の際は、照合電極の先端部分をコンクリート打込み面に直接接触させた。分極抵抗は矩形波電流分極法で印加電流 10 μA, 周波数 800 Hz と 0.1 Hz のインピーダンス値の差から求め、コンクリート抵抗は高周波数側 (800 Hz) のインピーダンス値として求めた。

RC 供試体のうち引抜き試験に用いるものは、28 日間の封緘養生終了後、40℃, 95%R.H. の鉄筋腐食環境に 17 週間保管し、鉄筋腐食促進終了後に、JSCE-G 503-2010 「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法」に準拠し引抜き試験を行った。荷重は容量 10 tf のロードセルで、それに伴う自由端変位を容量 20 mm (精度: 0.005 mm) のダイヤルゲージで測定した。荷重は単調漸増荷重とし、自由端変位が 10 mm 程度になるまで測定した。また、引抜き試験に用いた供試体は解体し内部の鉄筋を取り出した。取り出した鉄筋を用いて

表-2 フレッシュコンクリートの pH 値

| コンクリート配合名 | N | NCl | BF | BFCI |
|-----------|------|------|------|------|
| pH 値 | 12.5 | 12.5 | 12.0 | 12.0 |

鉄筋腐食状況の観察を行った。

56 日間の封緘養生が終了したモルタル円柱供試体を用いて、1200 kN を上限とする載荷と除荷を繰り返す高圧抽出法により 5 ml 以上の細孔溶液抽出を行った。さらに、抽出された細孔溶液に対して、 Cl^- 濃度を硝酸銀による電位差滴定法により、 OH^- 濃度を 0.01 mol/l 塩酸による直接滴定法により求めた。

3. フレッシュコンクリートの pH 値およびモルタル細孔溶液中の各種イオン濃度

pH 試験紙で測定したフレッシュコンクリートの pH 値一覧を表-2 に、材齢 56 日で抽出したモルタル細孔溶液中の Cl^- 濃度、 OH^- 濃度、および Cl^-/OH^- モル比を図-2 に示す。表-2 より、N 配合に比べてセメント量の少ない BF 配合では、pH が若干低下している。飯島らは pH の異なるアルカリ溶液中で亜鉛めっき鉄筋の腐食速度を測定しており、pH の値が 12.81 から 13.01 に増加しただけでも腐食速度が顕著に増加することを報告している⁵⁾。これより、本研究で対象としたコンクリート配合間における pH 値の違いが亜鉛めっき鉄筋の腐食反応速度に影響を与える可能性は高いと言える。

図-2 によると、NaCl 無混入の N および BF 配合は細孔溶液中に Cl^- は検出されておらず、NaCl を初期混入した NCl および BFCI 配合の場合には、同程度の Cl^- 濃度となっている。BFCI 配合は、NCl 配合に比べて単位セメント量は小さいものの、高炉スラグとフライアッシュの反応生成物が Cl^- を固定し、減少したセメント量を補うだけの Cl^- 固定化能力を示したものと考えられる。

細孔溶液中の OH^- 濃度については、NCl 配合が最も高く、N と BFCI 配合は同等で、BF 配合が最も低い値を示している。BF および BFCI 配合は、N および NCl 配合より単位セメント量が小さいため、水和反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量が減少するとともに、高炉スラグとフライアッシュの反応によって $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費されるため、細孔溶液中の OH^- 濃度は低下する。また、NaCl を混入した場合には、細孔溶液中の Na^+ 濃度が上昇するために、電気的中立条件を保持するために OH^- 濃度が大きくなるものと考えられる。

Cl^-/OH^- モル比は、コンクリート中の鉄筋腐食環境を表す指標であり、一般にこの値が大きいくほど厳しい鉄筋腐食環境であることを表している。図-2 によると、NCl と BFCI 配合は同程度の Cl^- 濃度であるにもかかわらず、BFCI 配合の方が OH^- 濃度が小さいために Cl^-/OH^- モル

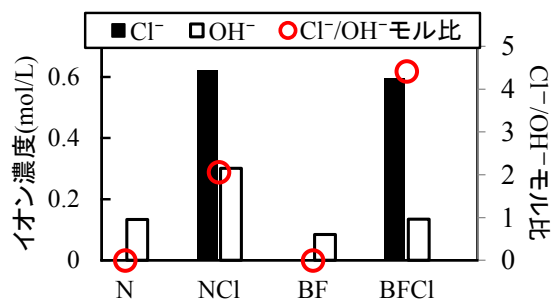


図-2 モルタル細孔溶液中の各種イオン濃度および Cl^-/OH^- モル比

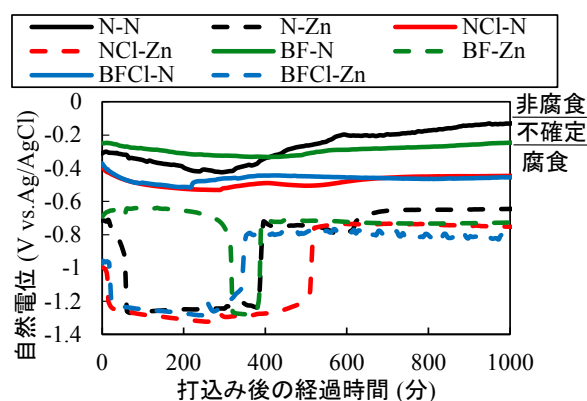


図-3 コンクリート打込み直後からの供試体中铁筋の自然電位経時変化

比が大きくなっている。混和材を用いた場合のこのような傾向は、既往の研究⁶⁾でも指摘されているが、コンクリートの緻密化に伴う Cl^- 拡散係数の低下や、鉄筋腐食速度の抑制を勘案すると、 Cl^-/OH^- モル比が上昇したとしても高い塩害抵抗性を確保することは可能である。また、本研究では、亜鉛めっき鉄筋を用いた場合に、 OH^- 濃度が小さいことで亜鉛めっき部分の腐食速度を抑制できる可能性がある。

4. RC 供試体の電気化学的測定

4.1 打込み直後の鉄筋自然電位のモニタリング

鉄筋腐食モニタリング用の 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-3 に示す。図に示した供試体名は、コンクリート配合名の後に N か Zn を付けたものとし、普通鉄筋の場合を N、亜鉛めっき鉄筋の場合を Zn とした。すなわち、N-N は N 配合で普通鉄筋を用いた供試体を示す。これによると、普通鉄筋を用いた供試体の場合、NaCl を混入していない 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 を混入した NCl および BFCI 配合供試体は ASTM C876-91 の腐食領域に相当する卑な値をとっている。これらの場合に初期混入した Cl^- 濃度は 8.0 kg/m^3 と高濃度であり、普通

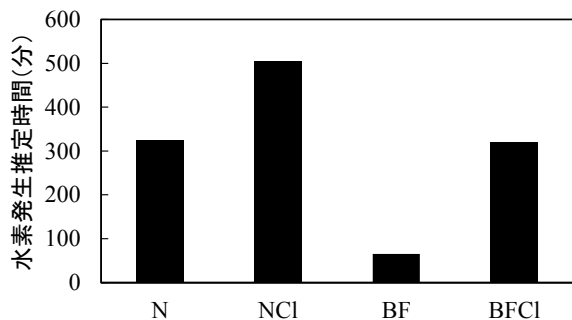


図-4 水素発生推定時間

鉄筋を使用した NCI および BFCI 配合を用いた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。

一方で、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 程度の自然電位を保ち、数時間後には自然電位が -0.7 V 程度まで急速に上昇した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、図-4に示す。これによると、水素発生推定時間の長さは図-2に示したモルタル細孔溶液中の OH^- 濃度と高い相関を示しており、 OH^- 濃度が高いほど、水素発生推定時間が長くなっている。図-4からわかるように、BF配合は電位が卑変する時間が最も遅く、卑変した後に直ぐに貴変しているため、最も水素発生推定時間が短い。また、NaClを添加した配合は、打込み直後に電位が卑変していることが水素発生推定時間の長くなる一因となっている。

亜鉛めっき鉄筋の電位変化に関する同様の傾向は既往の検討⁴⁾でも確認されており、図-5にその一例を示す。これによると、純亜鉛部分の電位が大きく卑変した際に、亜鉛の腐食速度の指標となる電荷移動抵抗の逆数が大きな値を示しており、この際に水素発生を伴う亜鉛の溶解腐食が進んでいるものと推定される。その後、電位が -0.8 V 程度まで貴変すると、電荷移動抵抗の逆数は大きく低下していることから、亜鉛は不動態化したものと考えられている。

亜鉛はコンクリート中のようなアルカリ領域では HZnO_2^- の形態で安定することから、以下の式(1)のような反応が急速に進行するものと考えられる。

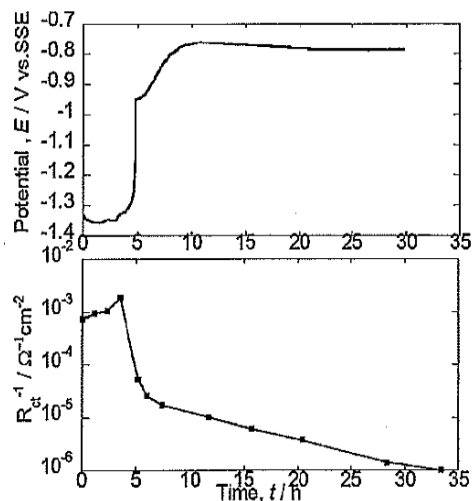
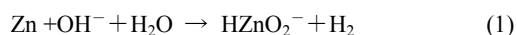


図-5 セメント溶液中での純亜鉛の自然電位および電荷移動抵抗の逆数の経時変化⁴⁾

これに対して、コンクリート中のように物質移動が制限される環境では溶解した HZnO_2^- が付着界面に蓄積され、 HZnO_2^- の濃度が上昇すると $\text{Zn}(\text{OH})_2$ が生成することで亜鉛めっき鉄筋の不動態化に寄与するとの指摘がある⁴⁾。ただし、亜鉛めっき鉄筋のコンクリート中における不動態化機構については未だ不明な点が多く、今後のさらに詳細な検討が必要である。

4.2 鉄筋腐食促進環境での電気化学的モニタリング

鉄筋腐食モニタリング用のRC供試体に関して、養生終了後に 40°C 鉄筋腐食促進環境保管し、定期的に測定した電気化学的鉄筋腐食指標の経時変化を図-6に示す。なお、BF配合の供試体は他の配合から2カ月程度遅れて作製したため、他の配合よりデータの数が少なくなっている。自然電位の経時変化については、図-3に示したコンクリート打込み直後における自然電位の測定結果の傾向が持続している。すなわち、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と考えられる。一方で、亜鉛めっき鉄筋供試体については、全体的に卑な電位を示しているが、特にNaClを混入した場合に -0.8 V 程度の卑な値をとっている。ただし、打込み直後に水素発生電位から貴変した際の電位を維持していることを考えると、亜鉛めっき鉄筋としての不動態は形成されている可能性がある。なお、NaCl無混入の場合には、比較的貴な電位となっており、特にBF配合は、 -0.4 V 程度の貴な電位を示していることから、他の配合よりも低pHであることで亜鉛部分が防食されている可能性がある。

分極抵抗は、一般にその逆数が鉄筋腐食速度に比例する。図-6(中図)によると、分極抵抗の値は鉄筋の種類に関わらず、BF配合の場合が最も大きく、続いてN、

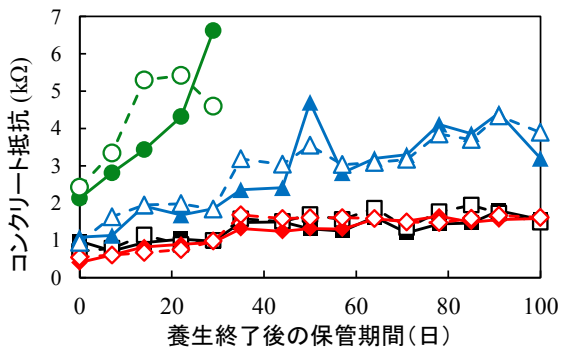
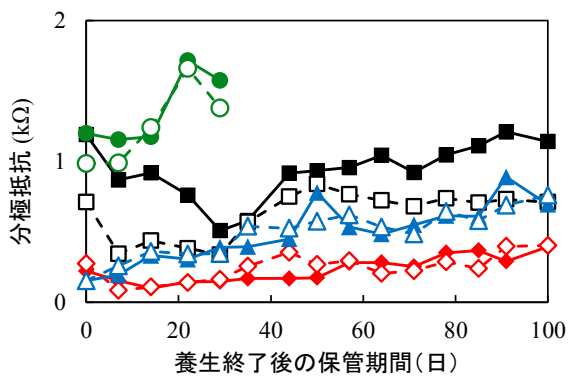
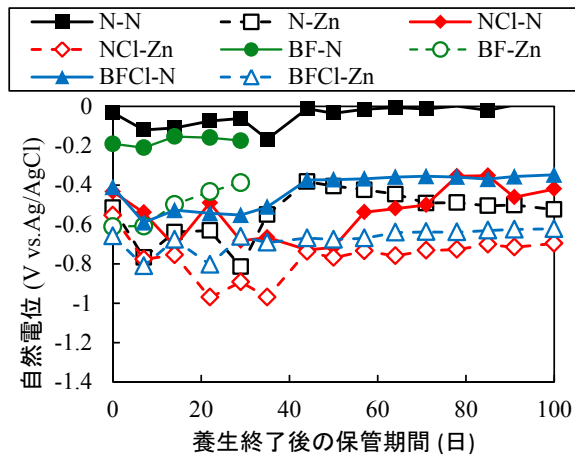


図-6 鉄筋腐食促進環境における電気化学的鉄筋腐食指標の経時変化

BFCl, NCl 配合の順に小さくなっている。普通鉄筋に関しては、NaCl を混入した配合で腐食速度が大きくなるが、高炉セメントとフライアッシュを併用した BFCl 配合については、混和材の反応によって細孔組織が緻密化し、酸素の供給量が抑制されたために鉄筋腐食速度が NCl 配合の場合より小さくなったものと考えられる。分極抵抗の測定値だけで判断すると、垂鉛めっき鉄筋も普通鉄筋と同程度の速度で腐食が進行していることになるが、進行している腐食反応や腐食速度に換算する際の係数が鉄筋種類によって異なることが考えられるので、今後、実際の腐食状況と併せて検討する必要がある。

コンクリート抵抗はコンクリートの電気抵抗であり、腐食電流の流れやすさを表す。図-6 (下図) によると、

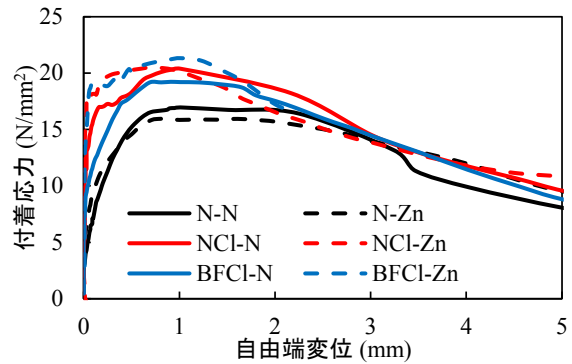


図-7 付着応力-自由端変位曲線

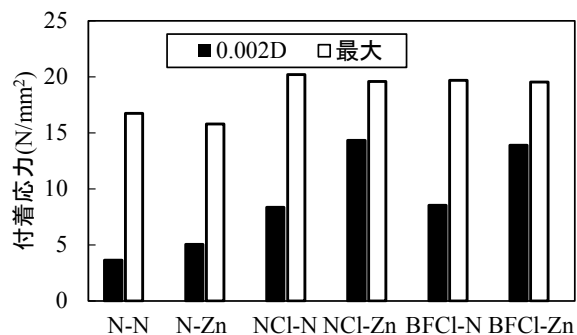


図-8 最大付着応力および自由端変位 0.002D 時の付着応力

N や NCl 配合供試体の場合に比べて、BF および BFCl 配合のコンクリート抵抗値は大きく、特に NaCl 無混入の BF 配合では急速にコンクリート抵抗値が増大していることから、40℃保管環境下でセメントの水和反応だけでなく、各種混和材の反応も経時的に進行しているものと考えられる。

5. 鉄筋とコンクリートとの付着

5.1 引抜き試験

40℃鉄筋腐食促進環境に 17 週間保管した RC 供試体 (BF 配合供試体を除く) について、引抜き試験を実施して得られた付着応力-自由端変位曲線の例を図-7 に、自由端変位 0.002D 時の付着応力および最大付着応力の測定平均値を図-8 に示す。図-7 によると、N 配合供試体の曲線に比べて、NCl および BFCl 配合供試体の場合には、最大応力までの曲線勾配が大きく、最大応力も大きくなっている。図-8 から、鉄筋のすべり始めの応力に相当する自由端変位 0.002D 時の付着応力、最大付着応力ともに、NaCl 混入配合である NCl および BFCl 配合の場合に N 配合の場合より大きな値を示している。鉄筋の腐食が付着に与える影響に関しては、腐食程度に依存し、腐食ひび割れが顕在化する程度の腐食であれば付着強度は低下するが、軽微な腐食であれば付着強度は上昇する場合がある⁷⁾。本研究の場合では、初期混入 Cl⁻

濃度は大きいものの、かぶりが比較的大きいこともあり、腐食ひび割れは見られず、付着が低下するほどの腐食には至らなかったものと考えられる。

また、同じコンクリート配合で普通鉄筋と亜鉛めっき鉄筋を比較すると、最大付着応力は同程度であるが、自由端変位が 0.002D 時の付着応力は亜鉛めっき鉄筋の場合の方が大きくなっている。これより、亜鉛めっき鉄筋表面に生成した腐食生成物の方が、普通鉄筋表面に生じた腐食生成物よりも力学的特性が高く、付着力向上への寄与が大きかったものと推定される。

5.2 コンクリート中の鉄筋腐食状況



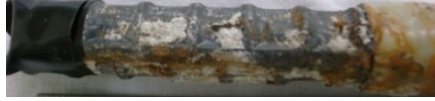



解体した引抜き試験用供試体から取り出した鉄筋の腐食状況を表-3 に示す。これによると、通常の褐色をした鉄筋腐食生成物が見られたのは、NaCl を混入した NCI および BFCI 配合中の普通鉄筋のみであり、特に BFCI-N で最も激しい腐食が確認された。これは、図-2 に示したように、コンクリート中の Cl^-/OH^- モル比が最も大きいためと考えられる。一方で、亜鉛めっき鉄筋については、NaCl 混入配合も含めて亜鉛めっき内部の鉄筋腐食生成物は見られず、リブや節の間のくぼみ部分に多くの白色物質が付着・充填されている。飯島らはモルタル中で腐食させた亜鉛めっき鉄筋の腐食生成物を分析した結果、モルタルとの界面部分にカルシウムと亜鉛の複合水酸化物 ($Ca(OH)_2 \cdot 2Zn(OH)_2 \cdot 2H_2O$) が生成していたことを報告している⁵⁾。今回確認された白色物質の一部がこのようなカルシウムを含有する腐食生成物である可能性があり、今後確認を進める予定である。

6. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) コンクリート中に埋設した亜鉛めっき鉄筋の自然電位はコンクリート打込み直後に水素発生電位付近まで大きく卑変し、その後 -0.7 V vs. Ag/AgCl 程度まで大きく貴変した。鉄筋の自然電位が卑変した状態の持続時間はモルタル細孔溶液中の OH^- 濃度が高いほど長くなった。
- (2) NaCl 混入配合中の亜鉛めっき鉄筋の自然電位は普通鉄筋の電位より卑な値を示し、分極抵抗は同程度の値を示した。
- (3) 鉄筋腐食促進後の引抜き試験の結果、亜鉛めっき鉄筋の最大付着応力は普通鉄筋の値と同程度であり、自由端変位 0.002D 時の付着応力は、普通鉄筋の値より大きくなった。
- (4) 引抜き試験後のコンクリート中の鉄筋腐食状況を確認したところ、亜鉛めっき内部の鉄筋腐食は確認されず多量の白色物質が亜鉛めっき鉄筋表面に付着していた。

表-3 引抜き試験用供試体中の鉄筋腐食状況

| 供試体名 | 鉄筋腐食状況 |
|---------|---|
| N-N |  |
| N-Zn |  |
| NCI-N |  |
| NCI-Zn |  |
| BFCI-N |  |
| BFCI-Zn |  |

謝辞：本研究を遂行するに当たり、日本溶融亜鉛鍍金協会から亜鉛めっき鉄筋、四国電力（株）からフライアッシュのご提供をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) fib : Corrosion protection of reinforcing steels Galvanized Steel reinforcement, Technical report prepared by Task Group 9.7, 2009.2
- 2) C. Andrade, C. Alonzo: Electrochemical aspects of galvanized steel, in S.R. Yeomans(ED) Galvanized Steel Reinforcement in Concrete, pp. 111-143, 2004.
- 3) 竹下麗華, 武若耕司, 山口明伸, 審良善和 : 高アルカリ性環境下における亜鉛めっき鉄筋の防食性能, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 1, pp. 967-972, 2017.7
- 4) 李修陽, 多田英司, 西方篤 : コンクリート中における亜鉛めっき鉄筋の初期腐食挙動, 第 62 回材料と環境討論会, pp.251-252, 2015.9
- 5) 飯島亨, 坂本誠也, 盛永康文 : コンクリート中の溶融亜鉛めっき鉄筋の初期腐食挙動, 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, Vol.16, 2016.10
- 6) 上田隆雄, 田中慎吾, 進藤義勝, 七澤章 : フライアッシュの混和が塩害によるセメント硬化体中の鉄筋腐食環境に与える影響, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.3, pp.255-267, 2010.7
- 7) 日本コンクリート工学会 : コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, 1998.10