

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：32660

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2022

課題番号：20K22447

研究課題名（和文）亜鉛皮膜の限界腐食量に基づいたコンクリート中の溶融亜鉛めっき鉄筋の耐久性評価

研究課題名（英文）Evaluation on Durability of Hot-dip Galvanized Steel Reinforcement in Concrete based on Service Life of Zinc Film

研究代表者

チェ ホンボク（CHOE, HONGBOK）

東京理科大学・理工学部建築学科・助教

研究者番号：60876077

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では溶融亜鉛めっき鉄筋の耐久性評価のために、コンクリートの調合要因や鉄筋の腐食条件を水準とした付着性能、防食性能を評価した。その結果、付着性能はコンクリート品質の影響を受けることが確認され、水セメント比および単位水量が小さいほど付着強度が増加する挙動を示した。防食性能は、水セメント比を小さくしてコンクリート品質を上げた条件では亜鉛皮膜の腐食による母材の保護期間が長くなり、亜鉛腐食量が50%に到達するまでは局部腐食が生じない挙動を示した。また、普通鉄筋との接触によって異種間腐食が懸念される条件においても、コンクリートのひび割れが存在しなければ同種間腐食と同程度であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実施した溶融亜鉛めっき鉄筋の耐久性に関する実験的評価は、亜鉛皮膜における付着性能や防食性能がコンクリートの影響を受けていることを明確に確認できたと考えられる。また、コンクリート条件における亜鉛皮膜の耐久性を明確に把握することは、鉄筋コンクリート造建築物の耐用年数算定において重要である。このため、本研究の成果はこの点に関する技術的資料を提供しており、本研究によって溶融亜鉛めっき鉄筋の有効活用の際に必要な実質的知見を得られたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the bond performance and corrosion resistance of hot-dip galvanized steel reinforcement were evaluated for the durability assessment. Concrete mixture and corrosion conditions of steel reinforcement were set as experimental levels. As a result, it was confirmed that bond performance is influenced by the quality of concrete, and it exhibited a behavior where the bond strength increases as the water-cement ratio and unit water content decrease. The corrosion resistance showed a behavior where, under a condition of improved concrete quality by reducing the water-cement ratio, the protective period for the substrate by zinc coating corrosion is prolonged, and local corrosion does not occur until the zinc corrosion reaches 50% of its mass loss. Moreover, it was confirmed that under conditions where galvanic corrosion is a concern due to contact with ordinary steel reinforcement, if there are no concrete cracks, the corrosion behavior is similar to that of general corrosion.

研究分野：鉄筋コンクリートの防食性能、付着性能、構造性能評価

キーワード：溶融亜鉛めっき鉄筋 防食効果 許容腐食量 異種間腐食 マクロセル電流 付着強度 コンクリート品質 異形鉄筋の節形状

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

溶融亜鉛めっき鉄筋（以下、めっき鉄筋）は、母材となる鉄筋（以下、母材）の表面に形成された亜鉛皮膜が、犠牲防食効果によって母材の腐食を保護する特徴を有している。犠牲防食とは、腐食時において亜鉛がアノードになって先行して腐食（＝亜鉛の消耗）し、母材はカソードになって亜鉛の消耗が終わるまで腐食反応が抑制される効果をいう。さらに、亜鉛皮膜は純亜鉛層と合金層によって緻密な化学組成を成しているため、保護被覆作用も有している。こうした特性によって、めっき鉄筋は普通鉄筋に比べて高い耐久寿命が期待されている。

近年のわが国では、長寿命建築物を実現する耐久性向上技術としてめっき鉄筋の適用を積極的に検討しており、めっき鉄筋の研究は社会的にもその必要性が認識されている。しかし、既往の研究では、純亜鉛層と合金層（以下、めっき層）それぞれの防食特性を考慮せず、亜鉛皮膜が有する膜厚により防食寿命を評価してきた。また、めっき鉄筋はコンクリートというアルカリ環境かつ拘束状態で用いられるものの、亜鉛皮膜の耐久寿命は酸性～中性の大気中環境と同様に取り扱われているのが現状である。このため、コンクリート中におけるめっき鉄筋の防食性能および、腐食環境における耐久性に関してはさらなる検討が必要である。

2. 研究の目的

そこで本研究では、亜鉛皮膜が腐食を開始し、母材が腐食し始め亜鉛皮膜による防食が終了とみなせる時点までを研究範囲とした上で、めっき鉄筋の耐久性の解明を目的とした一連の実験的研究を行う。

3. 研究の方法

本研究では以下に示す(1)～(3)について評価を行う。各項目における研究方法について以下のように説明する。

(1) コンクリート品質におけるめっき鉄筋の付着性能評価

亜鉛皮膜は約 100 μ m の膜厚を有するが、節付近には倍以上の膜厚が形成される挙動を有するため、節の角度が普通鉄筋に比べ緩やかになる。鉄筋コンクリートの耐久性において、このような特性がコンクリートとの付着性能に影響を及ぼすことが懸念されているが、めっき鉄筋に対しては詳細検討されていないのが現状である。そこで本研究では、コンクリートの調合要因が付着性能を低下するかどうかを検討する。実験水準として、水セメント比や単位水量の違いにおける付着強度や最大荷重時変位を評価する。

(2) コンクリート品質におけるめっき鉄筋の防食性能評価

鉄筋コンクリートの耐久性において、コンクリート品質が高いほど劣化因子の浸透を遅くすると知られている。このため、めっき鉄筋の腐食においても、亜鉛皮膜の防食性能が限界に到達するまでの時間はコンクリートによって影響を受けることが予想される。そこで本研究では、腐食促進環境においてコンクリート品質がめっき鉄筋の腐食性状に及ぼす影響を検討する。実験水準として、コンクリートの水セメント比の違いにおける亜鉛皮膜の防食効果と母材腐食までの亜鉛腐食量を評価する。

(3) 普通鉄筋との併用時（異種金属腐食環境）におけるめっき鉄筋の腐食性状評価

めっき鉄筋が有する防食効果を有効活用するにあたって、耐久性において劣化の恐れが小さい部材の位置（例えば、コンクリート表面からの深さが十分確保されている主筋や補強筋等）では普通鉄筋を配筋してめっき鉄筋と併用することが想定される。一方、めっき鉄筋と普通鉄筋は異種金属であるため両鉄筋間の接触による腐食促進が懸念されているが、既往の研究では両鉄筋を通电した条件で腐食性状を評価している。しかし、実環境における両鉄筋間の接触は物理的に接する状態であるため、上記の条件におけるめっき鉄筋の腐食促進が同種間腐食に比べどの程度か確認する必要がある。そこで本研究では、物理的に普通鉄筋と接した条件におけるめっき鉄筋の腐食性状を評価する。本実験では、コンクリートひび割れの有無、普通鉄筋とめっき鉄筋の長さの割合、絶縁処理の有無を実験水準とする。

4. 研究成果

(1) コンクリート品質におけるめっき鉄筋の付着性能評価

図1と図2に水セメント比および単位水量の違いにおけるめっき鉄筋の付着強度の推移を示す。その結果、試験結果のほとんどは普通鉄筋における基準付着強度を上回ることが確認され、現行の付着性能基準を満足していることが確認された。また、めっき鉄筋の付着性能はコンクリート品質の影響を受けることが確認され、水セメント比および単位水量が小さいほど付着強度が増加する挙動を示した。本実験では JASS5 において指定されている水セメント比および単位水量の上限値を満足しない低品質のコンクリートを意図的に制作したが、それにもかかわらずめっき鉄筋の付着性能は問題ないことを確認できた。これらを踏まえると、現行の JASS5 で規定している適切な品質のコンクリートにおけるめっき鉄筋は普通鉄筋同等の付着性能を確保できると考えられる。

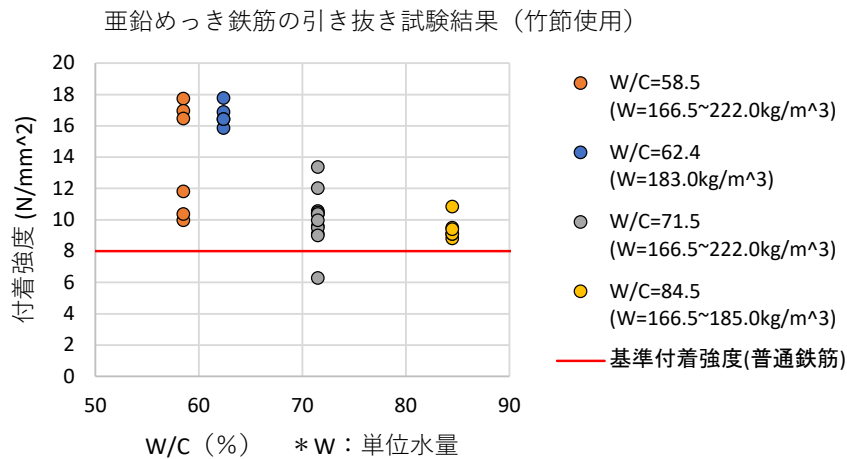


図1 コンクリート調合要因として水セメント比 (W/C) における付着強度 (τ_{max}) の推移

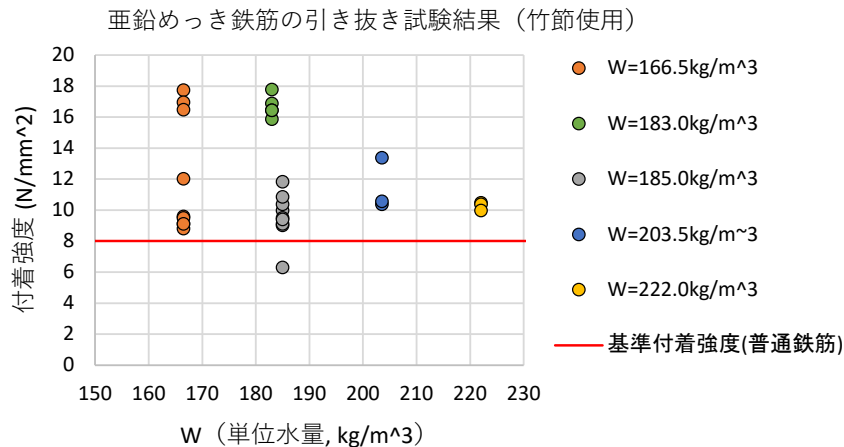


図2 コンクリート調合要因として単位水量 (W) における付着強度 (τ_{max}) の推移

(2) コンクリート品質におけるめっき鉄筋の防食性能評価

図3と図4に水セメント比の違いにおけるめっき鉄筋の腐食性状を示す。図中の積算電流量は腐食促進環境を模擬するために実施した電食試験における促進時間を意味する。その結果、めっき鉄筋の防食性能は、水セメント比を小さくしてコンクリート品質を上げた条件（水セメント比 50%）では亜鉛皮膜の腐食による母材の保護期間が長くなり、局部腐食が生じない挙動を示した。対して、水セメント比が大きい条件（83.5%）では、亜鉛の局部腐食が顕著な表面において母材の腐食が主に確認されており、めっき鉄筋の表面全体において腐食が大きい部分と小さい部分の差が明確に見えることを確認した。この挙動は、亜鉛腐食量が平均 50%に到達した時点以降より確認され、この時点では亜鉛皮膜の残存にもかかわらず防食効果が通常より小さくなる可能性があることを示唆した。

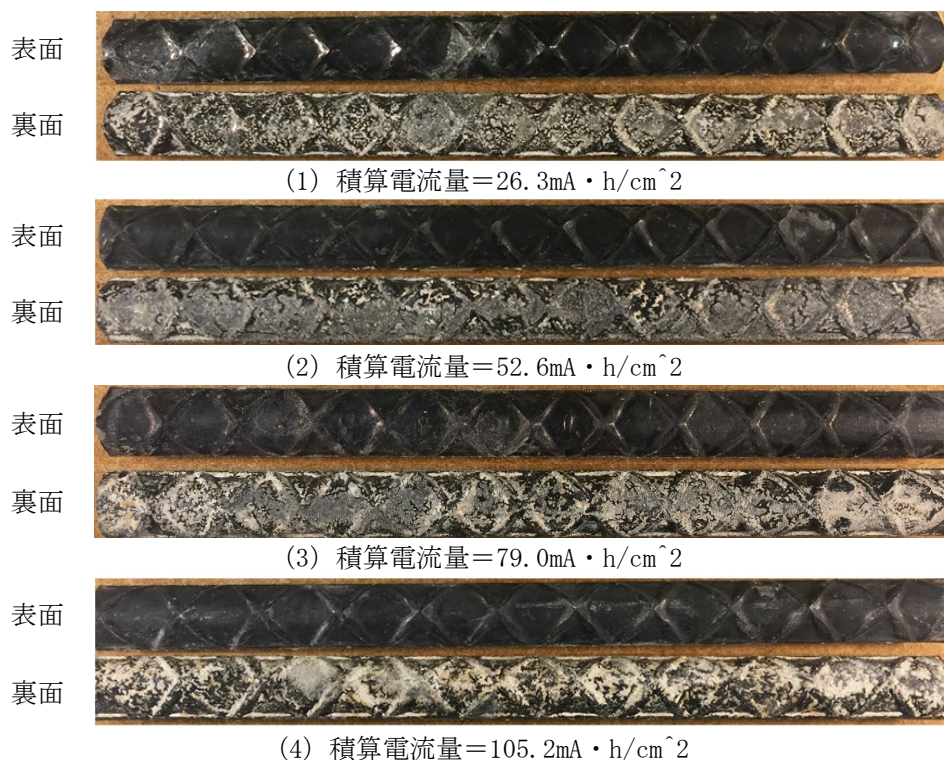


図3 積算電流量に基づいた腐食促進期間における溶融亜鉛めっき鉄筋の腐食性状
(水セメント比 50%のコンクリート)

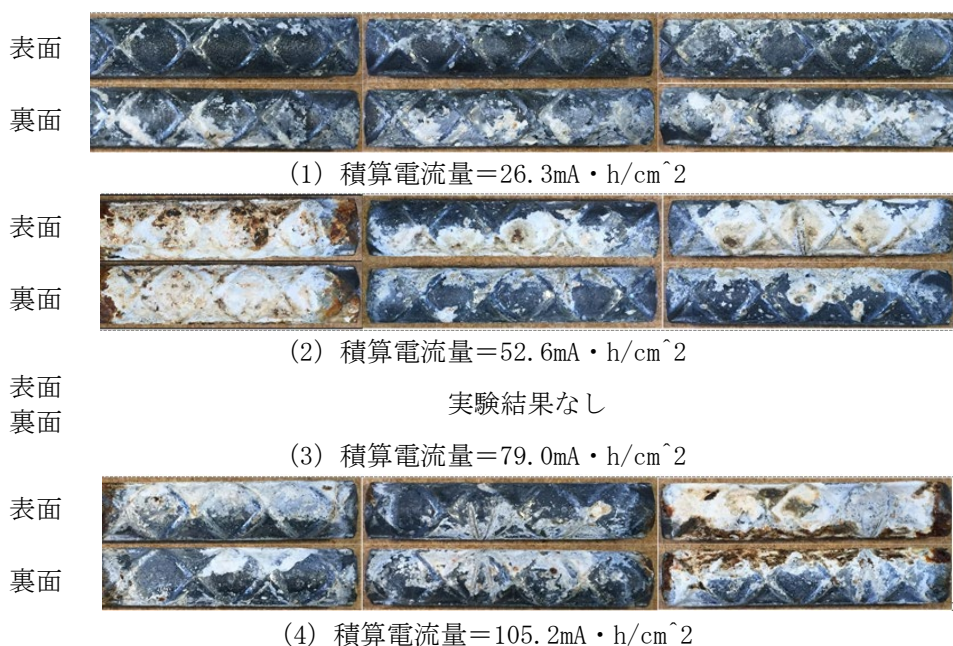
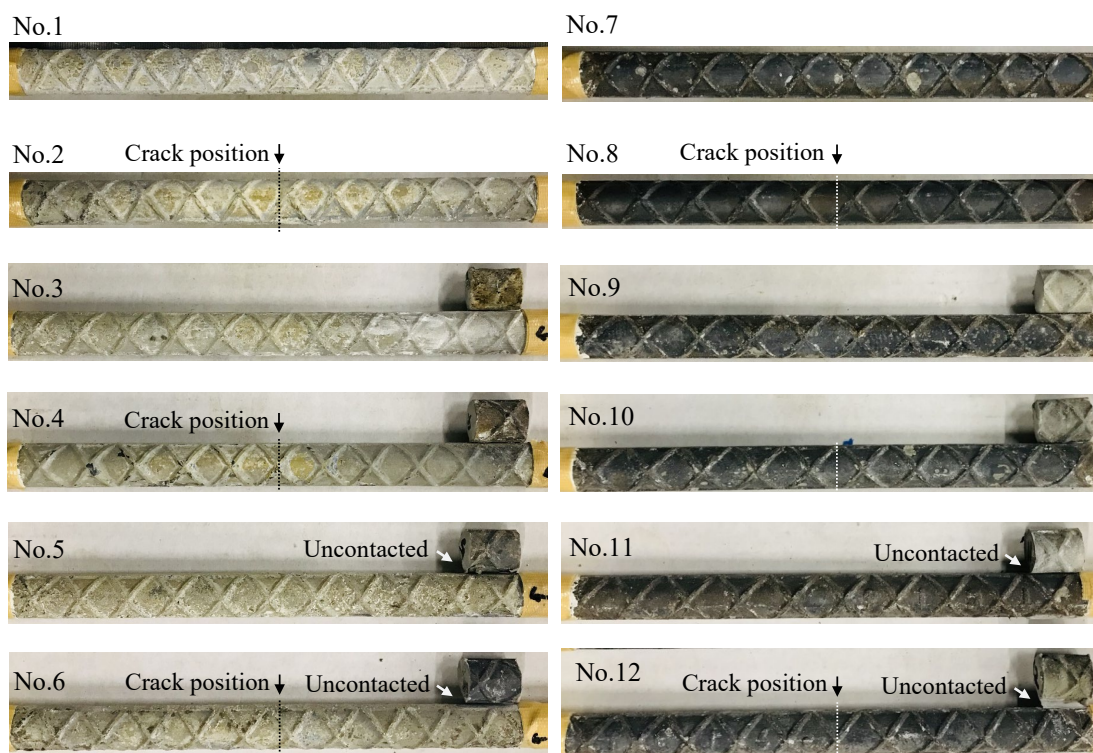


図4 積算電流量に基づいた腐食促進期間における溶融亜鉛めっき鉄筋の腐食性状
(水セメント比 83.5%のコンクリート)

(3) 普通鉄筋との併用時（異種金属腐食環境）におけるめっき鉄筋の腐食性状評価

図5に電食試験実施後における各試験体の腐食性状を示す。No. 1～6はめっき鉄筋を主鉄筋として、No. 7～12は普通鉄筋を主鉄筋として模擬したものである。めっき鉄筋において、コンクリートひび割れのない条件における同種間腐食（No. 1）と異種間腐食（No. 3）、コンクリートひび割れのある条件における同種間腐食（No. 2）と異種間腐食（No. 4）間の腐食性状を比較する。その結果、No. 1とNo. 3の違いより確認された異種間腐食の影響より、No. 2とNo. 4におけるコンクリートひび割れの存在がめっき鉄筋の腐食に大きな影響を及ぼすことが確認された。次に、普通鉄筋が主鉄筋の条件（No. 7～12）では、No. 9～12における両鉄筋とも母材の腐食は確認されなかった。めっき鉄筋の長さが普通鉄筋の1/10であること、No. 3と4における普通鉄筋は母材腐食が発生したことを踏まえると、めっき鉄筋の防食効果は異種間腐食環境においても正常に機能していると考えられる。

以上のことから、普通鉄筋との接触によって異種間腐食が懸念される条件においても、コンクリートひび割れが存在しなければ、めっき鉄筋における異種間腐食は同種間腐食と同程度であるとされる。



No. 1～No. 6 : 亜鉛めっき鉄筋が主鉄筋

No. 7～No. 12 : 普通鉄筋が主鉄筋

図5 異種金属腐食環境における溶融亜鉛めっき鉄筋の腐食性状

(Crack position : コンクリートひび割れがある位置)

(Uncontacted : 絶縁処理による非接触状態)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hongbok Choe, Hideyuki Kinugasa, Manabu Kanematsu
2. 発表標題 Bond Behavior of Hot-dip Galvanized Steel Rebar
3. 学会等名 International Conference on Regeneration and Conservation of Structures (ICRCS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hongbok Choe, Manabu Kanematsu, Hideyuki Kinugasa
2. 発表標題 An Evaluation on Anti-corrosion Effect of Hot-dip Galvanized Steel Bar in Concrete
3. 学会等名 12th Asia Pacific General Galvanizing Conference (APGGC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hongbok Choe, Manabu Kanematsu, Hideyuki Kinugasa
2. 発表標題 Evaluation on Corrosion Behavior of Hot-dip Galvanized Rebar in Concrete
3. 学会等名 The 13rd International Symposium on Architectural Interchanges in Asia (ISAIA) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------