

表-2 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

w/c (%)	Gmax (mm)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	塩化物量 (kg/m ³)
		W	C	S	G					
83.5	20	193	232	947	857	1.0	19.5	4.1	0.22	0.05

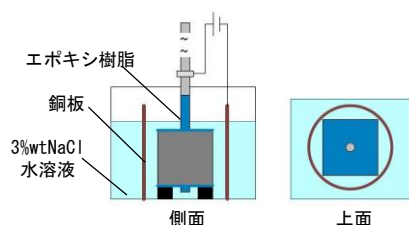


図-2 電食試験の概要

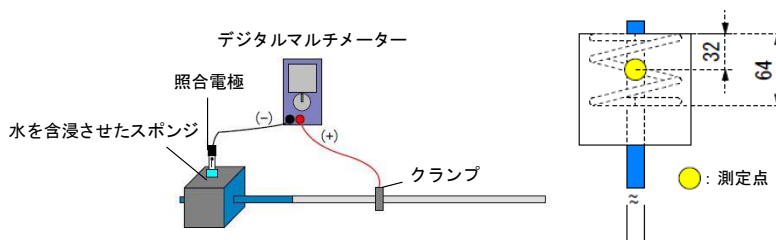


図-3 電位の測定方法と測定点

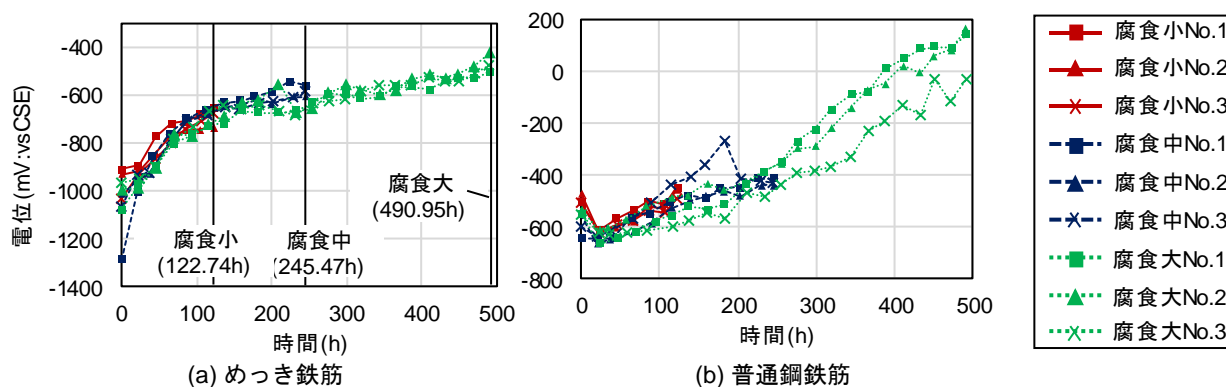


図-4 電食試験に伴うめっき鉄筋および普通鋼鉄筋の電位変化

2.3 鉄筋の腐食促進手法

2.3.1 電食試験

鉄筋の腐食促進は電食試験を用いて行った。電食試験の概要を図-2に示す。試験体のかぶり面以外をエポキシ樹脂で保護した後、質量比3%濃度のNaCl水溶液に浸漬した。次に、鉄筋をアノード、銅板をカソードとして直流電流を印加することで電気腐食させた。印加電流は電流密度を0.625 mA/cm²として設定した。

2.3.2 電位測定による鉄筋腐食のモニタリング

亜鉛めっきを施した鋼材表面に形成されるめっき層は、鉄と亜鉛の合金反応により、皮膜表面から順に純亜鉛層(η層)、合金層(ζ層、δ1層)といった複数の層が密着した構造を成しており⁹⁾、腐食すると表面純亜鉛層の溶解に伴い鋼-亜鉛合金層が出現する。この影響により、亜鉛めっき層の電位が腐食の進行により貴化するとされている⁹⁾。そこで、本研究では電食試験と並行した電位の測定により、めっき層の腐食をモニタリングし、促進期間を決定した。

電位の測定方法と測定点を図-3に示す。図中の電位は飽和塩化銀電極で測定したものを硫酸銅電極の値に換算したものである。測定は定期的に電食試験を中断し、定電流装置の停止後1時間の間隔を空けた後、デジタルマル

チメーターと照合電極を用いて測定を行った。測定位置は非付着区間を除く、試験区間の中央部とし、電極とコンクリート表面の接触を良くするために、両者の間に水を含ませたスポンジを介在させて測定を行った。

図-4に電食試験に伴うめっき鉄筋及び普通鋼鉄筋の電位変化を示す。電食の進行に伴い、(a)めっき鉄筋は電位が上昇し約-600~-500 mV 辺りから上昇がなだらかになった。その後見られた電位の上昇は、(b)普通鋼鉄筋の傾向と合致し、鋼材の腐食によるものと考えられる。そこで電位の上昇が落ち着き始めた時点をめっき層の溶解が始まっている状態と考え、腐食小の通電時間を決定し、腐食小に対し、通電時間を2、4倍としたものをそれぞれ腐食中・大とした。各試験体の通電量は表-3の通りである。

表-3 各試験体の通電量

水準	通電時間(h)	積算電流密度(mA・h/cm ²)
健全	0	0
腐食小	122.74	76.71
腐食中	245.47	153.42
腐食大	490.95	306.84

2.4 引抜き試験方法

引抜き試験の概要を図-5に示す。試験はJSTMC 2101Tに準拠して行った。载荷には油圧式の万能試験機を用い、载荷速度は鉄筋の引張応力度が毎分 49.0 N/mm²以下となるように制御した。得られた測定結果を用いて、式(1)より付着応力度を求めた。

$$\tau = \frac{P}{4\pi D^2} \quad (1)$$

ここで、 τ ：付着応力(N/mm²)、 P ：引張荷重(N)、 D ：鉄筋の公称直径(15.9 mm)

2.5 腐食量の算出

2.5.1 初期膜厚の決定

図-6に本研究で使用しているめっき鉄筋の初期膜厚の累積度分布を示す。引抜き試験終了後、試験体の試験区間外から 10 cm に切断しためっき鉄筋を採取した。膜厚の算出については、JIS H 0401：2013「熔融亜鉛めっき試験方法」に準拠し、3.5 g のヘキサメチレンテトラミンを添加した塩酸溶液を用いて行った。初期膜厚の累積度分布において、平均値は 153.2 μm となったため、本研究ではめっき鉄筋の初期膜厚を 153.2 μm として亜鉛めっき減少率を算出した。

2.5.2 亜鉛めっきの膜厚減少率の算出方法

めっき鉄筋の腐食量を亜鉛めっきの膜厚の減少率として算出した。引抜き試験終了後、鉄筋をはつり出し、試験区間部位を切り出した。採取した試験片に対し、ナイロンブラシとピックを用いて付着したコンクリートを除去し、70℃に加熱した 10%塩化アンモニウム水溶液に 7 分間浸漬することで、亜鉛の腐食生成物を除去した。この後、再度ブラシとピックにより残った不純物を取り去り質量を測定した。測定後は、初期膜厚の算出時と同様の手順で亜鉛めっき被膜を除去した後、質量を測定した。亜鉛めっき被膜除去前後の重量差から式(2)により残存した亜鉛めっきの膜厚を算出した。更に、この値と初期膜厚の値から式(3)を用いて、腐食による亜鉛めっきの膜厚の減少率(亜鉛めっき膜厚減少率とする)を算出した。

$$t = \frac{W_1 - W_2}{7.2S} \times 10^6 \quad (2)$$

$$B = \frac{T - t}{T} \times 100 \quad (3)$$

ここで、 t ：残存した亜鉛めっきの膜厚(μm)、 W_1 ：めっき皮膜を除去する前の質量(g)、 W_2 ：めっき皮膜を除去した後の質量(g)、7.2：めっき皮膜の密度(g/cm³)、 S ：試験片のめっき部分の表面積(mm²)、 B ：亜鉛めっきの膜厚減少率(%)、 T ：初期膜厚(μm)

尚、 S の算出は異形鉄筋の公称周長(50.0 mm)を用いた。

2.5.3 質量減少率の算出

めっき鉄筋は膜厚減少率の算出後、普通鋼鉄筋は、はつ

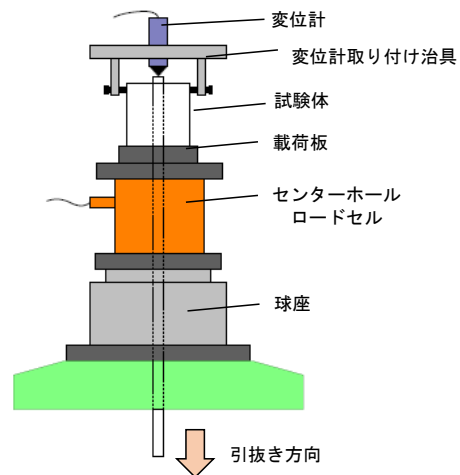


図-5 引抜き試験の概要

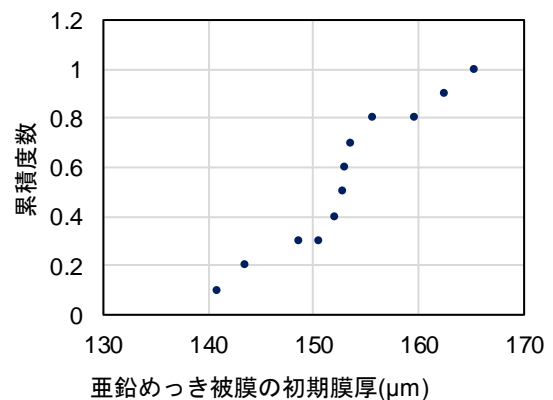


図-6 初期膜厚の累積度分布



図-7 鉄筋の腐食性状 (腐食小)

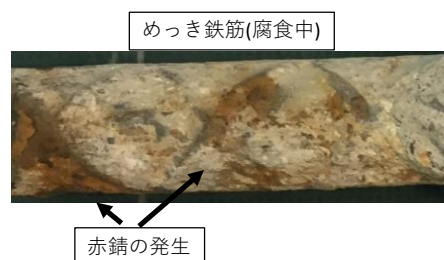


図-8 めっき鉄筋における赤錆の発生

り出した後に、20℃の10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に72時間浸漬し、腐食生成物を完全に除去した。

この後、質量と長さを測定し、式(4)により母材の質量減少率を算出した。以降、断りが無ければ「母材の質量減少率」を単に「質量減少率」と呼ぶ。尚、節による重量の誤差を避けるために、節の数を揃えて切り出すようにした。

$$C = \frac{m \cdot l_c - m_c}{m \cdot l_c} \times 100 \quad (4)$$

ここで、 C ：質量減少率(%), m ：健全な鉄筋のめっき・黒皮除去後の単位長さ辺りの質量(g/mm), l_c ：腐食鉄筋の長さ(mm), m_c ：腐食鉄筋の完全除錆後の質量(g)

尚、 m の値は初期膜厚算出と同様、試験体の試験区間外から10cmに切り出した鉄筋を用いた。値はめっき鉄筋、普通鋼鉄筋ともに、1.5 g/mmであった。

3. 結果と考察

3.1 電食試験による腐食性状

電食試験による腐食促進の結果、いずれの試験体においても腐食ひび割れは生じなかった。図-7に、試験後に採取した鉄筋(腐食小)の腐食性状を示す。普通鋼鉄筋は全体に赤錆が生じていることに対して、めっき鉄筋では灰色の生成物と、部分的に白色の生成物が確認された。既往の研究⁷⁾⁸⁾では亜鉛めっき由来の生成物として、灰色のものは酸化亜鉛 ZnO 、白色のものは水酸化亜鉛 $Zn(OH)_2$ と述べており、腐食小で見られた腐食生成物はこれらであると考えられる。このうち、 ZnO は不動態皮膜としての効

果を発揮すると報告されており、腐食小ではめっき層の腐食生成物により鋼材の保護効果を維持した状態であったと考えられる。しかしながら、腐食中・腐食大においては、めっき鉄筋においても部分的に赤錆の発生箇所が見られた(図-8)。これは、めっき層の腐食により生成された不動態皮膜が塩化物イオンにより破壊され、電食試験においては、部分的に鋼材の腐食が先行したためと考えられる。

図-9に積算電流密度毎の腐食量を示す。縦軸は亜鉛めっきの膜厚減少率または鉄筋の質量減少率の値を示している。膜厚および質量減少率の値は各水準3体の平均値

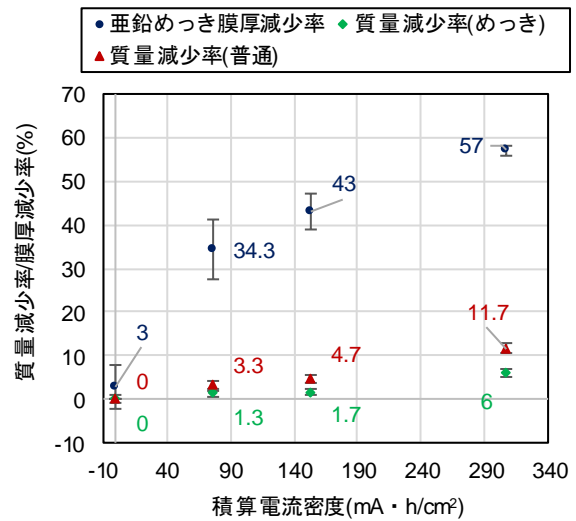
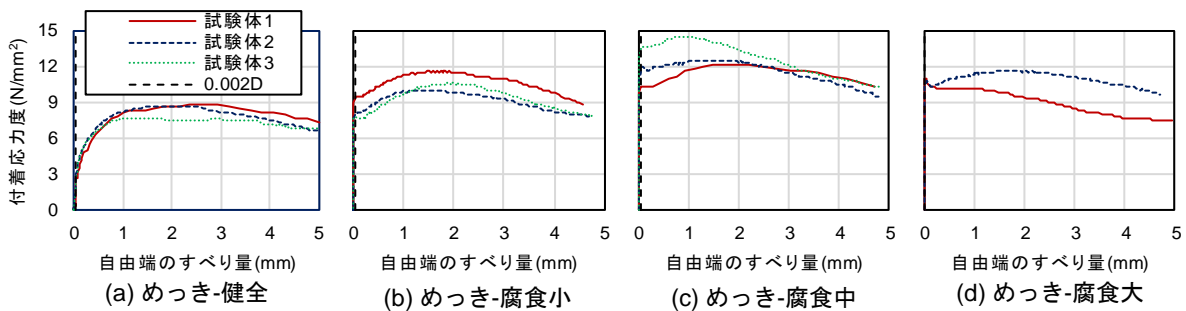


図-9 積算電流密度と質量・膜厚減少率の関係



※(d)めっき-腐食大の試験体3については変位計の計測不良により測定データ無し

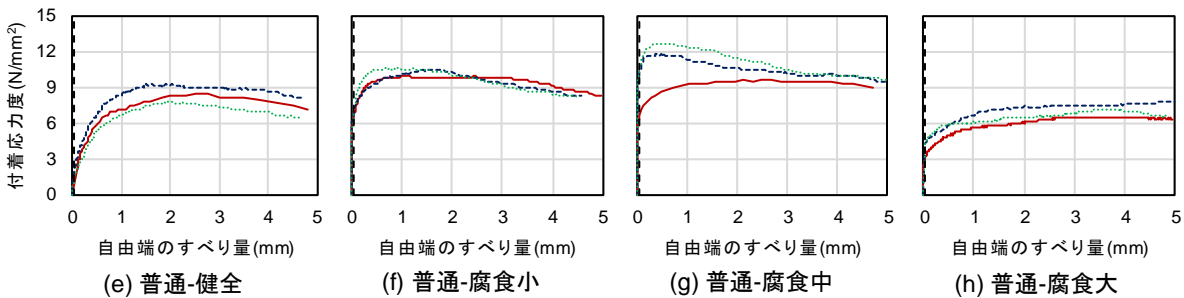


図-10 付着応力度-自由端のすべり量関係

である。ただし、めっき鉄筋の腐食大については引抜き時の計測不良により、2体の平均値とした。図中のエラーバーは標準偏差を示している。

亜鉛めっきの膜厚は、健全状態においても3%とわずかに減少したが、これは、腐食量算出時における除錆処理において、めっき層が溶解した影響と考えられる。以降、通電量の増加に伴い亜鉛めっき膜厚は減少していき、各水準間において約10~15%ずつの減少が確認された。

めっき鉄筋において、亜鉛めっき膜厚減少率と質量減少率の推移を比較すると、腐食中まではほとんど質量減少は見られないが、腐食大になると、亜鉛めっきが全て消失していないにもかかわらず、質量減少率の上昇がみられた。これは、先述したように、電食試験において部位ごとの腐食速度にばらつきが生じた影響と考える。この結果より、亜鉛めっきが50%減少した時点以降で部分的に鋼材素地の腐食が生じる傾向を示したが、腐食大ではめっき鉄筋の質量減少率は普通鋼鉄筋の質量減少率の約1/2の値となり、電食においても亜鉛めっき層の防食効果が確認された。

3.2 付着性能の検討

図-10に各試験体の付着応力度-自由端のすべり量の関係を、図-11、12に積算電流密度毎の最大付着応力度と、最大付着応力度時のすべり量の比較を示す。図中のエラーバーは標準偏差を示している。破壊モードは、いずれも付着破壊であった。

健全状態においてめっき鉄筋と普通鋼鉄筋の結果を比較すると、付着応力度-自由端のすべり量の概形はほぼ一致する結果となった。また、最大付着応力度、最大付着応力度時のすべり量の値は同一であった。これより、腐食していない状態において、めっき鉄筋と普通鋼鉄筋はコンクリートとの付着性能に差異は無いことが確認された。

図-10において、各水準の初期剛性を比較すると普通鋼鉄筋の腐食大以外は、腐食の進行に伴い上昇傾向が見られた。これは錆により凹凸が増すことでコンクリートとの噛み合いが増したことによるものである。図-11より、健全状態に比べ最大付着応力度が低下したものは普通鋼鉄筋の腐食大のみであり、他の腐食促進を行った水準では付着性能の向上が確認された。普通鋼鉄筋に関する既往の研究⁹⁾では、腐食初期の付着強度の上昇は鉄筋腐食による腐食膨張に起因すると報告されており、本研究における付着上昇も同様の理由と考えられる。更に、腐食生成物が膨張性を持つと内部ひび割れを引き起こすため、付着低下を引き起こす。これにより、初期の最大付着強度との比較で、普通鋼鉄筋は腐食大に達すると強度が低下したと考えられる。しかしながら、めっき鉄筋では腐食中と腐食大を比較すると腐食の進行により最大付着応力度は低下しているが、初期の強度を下回ることはなかった。

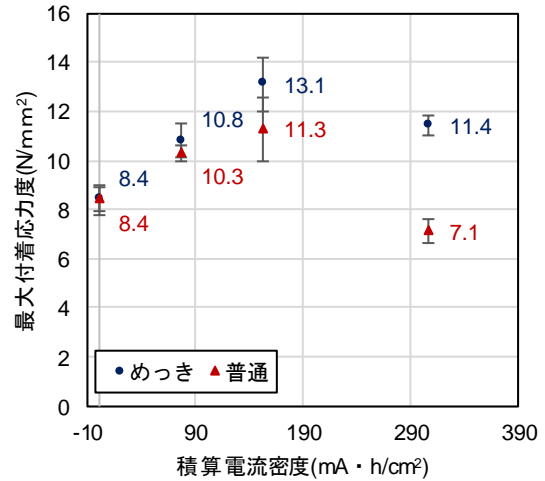


図-11 通電量-最大付着応力度関係

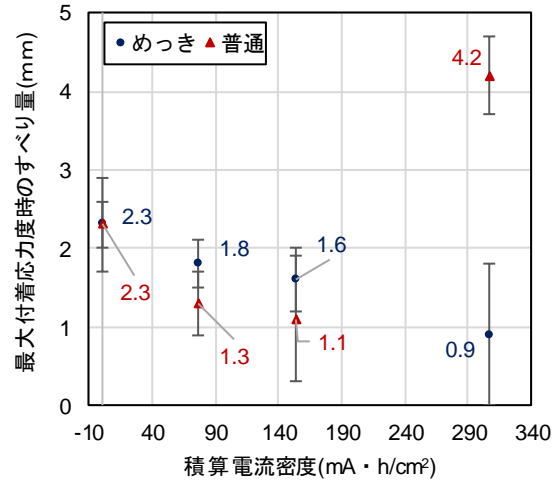


図-12 通電量-最大付着応力度時のすべり量関係

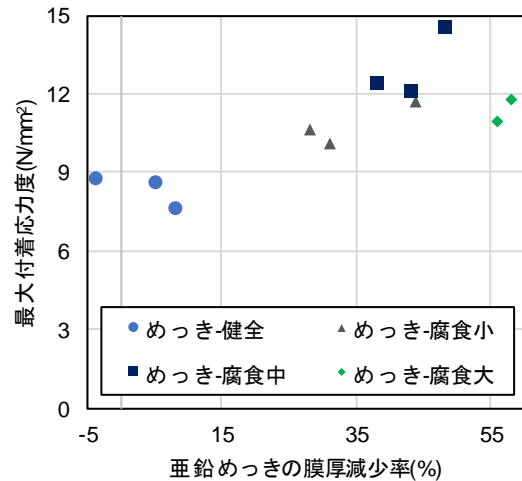


図-13 亜鉛めっき膜厚減少率-最大付着応力度関係

図-12を見ると、普通鋼鉄筋の腐食大では最大付着応力時のすべり量が増加している。これは鉄筋の断面減少によるものである¹⁰⁾。一方、めっき鉄筋では腐食中から腐食大にかけて、最大付着応力度は低下しているものの、最大付着応力時のすべり量は増加しなかった。この傾向は、腐食させためっき鉄筋で見られた剛性の増加傾向(図-10)とも合致しており、めっき鉄筋の腐食大で付着が低下した理由は鉄筋の断面減少によるものではないといえる。

3.3 亜鉛めっきの膜厚減少率と最大付着応力度の関係

図-13に亜鉛めっきの膜厚減少率と最大付着応力度の関係を示す。膜厚がおおよそ50%減少するまでは付着性能が向上し、以降は低下する結果となった。めっき層の消失は鉄筋の部位により速度が異なる。このため、亜鉛めっきの減少と付着低下の開始が同時進行したと考えられる。

めっき鉄筋・腐食大の質量減少率、最大付着応力度、最大付着応力度時のすべり量は、普通鋼鉄筋・腐食中と概ね一致しており、めっき鉄筋の腐食大は、普通鋼鉄筋の腐食中の状態に近いと考えられる。

これらの結果から推察すると、めっき鉄筋はめっき層の腐食由来の腐食生成物の影響により、引抜き試験による付着強度は低下しておらず、今回の試験結果では亜鉛めっきの膜厚の減少率が、50%までは耐食性と付着性能の両者を維持していると考えられる。本研究の結果では、めっき層の腐食に伴い付着が改善しており、腐食生成物による膨張圧形成を示唆する結果となっている。従来は、めっき層の腐食生成物は膨張圧を作用させていないと考えられているが、鋼材に対する電食試験においても腐食生成物の生成プロセスが実構造物と異なると報告¹¹⁾されており、めっき鉄筋においても電食試験特有の腐食形態を持つ可能性がある。先述の膨張圧形成については、電食特有の現象である可能性も考えられ、引き続き検討が必要である。

4. 結論

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 腐食促進を行っていない状態においては、普通鋼鉄筋と比較してめっき鉄筋とコンクリートとの付着性能に差異は確認されなかった。
- (2) 電食によりめっき鉄筋を腐食させた場合、亜鉛めっきの膜厚減少率が約50%までは耐食性を保持した。また、この間、付着強度は低下せず、電食試験による腐食の場合、付着強度は上昇した。更に、初期剛性の上昇傾向が普通鋼鉄筋に比べて大きく、これは付着強度が低下し始めた状態においても確認された。

しかし、今回は腐食生成物によるひび割れの導入が無い場合における結果であるため、めっき層の腐

食由来の腐食生成物をもつ膨張圧形成については今後更に検討する必要がある。

謝辞

本研究は、日本建築学会 溶融亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造建築物指針 委員会(委員長 野口貴文(東京大学))の検討課題の一環として行った。関係者の皆様から数々の助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 村上和美, 前川明弘, 湯浅幸久: 溶融亜鉛めっきとコンクリートの付着特性について, 鉛と亜鉛, Vol.40, No.1, pp.38-43, 2003
- 2) Kayali, O and Yeomans, S. R: Bond of galvanized steel in concrete, Cement Concrete Composites, 22, 6, pp.459-467, 2000
- 3) Pokorny, P and Dobias, D and Vokac, M: Bond Strength of hot-dip galvanized reinforcement with concrete, METABK, 55(3), pp.337-340, 2016
- 4) 西方篤: コンクリート中における溶融亜鉛めっき鉄筋の初期腐食挙動, 鉛と亜鉛, 第285号, pp.24-31, 2017
- 5) 一般社団法人日本溶融亜鉛鍍金協会 HP めっき FAQ: <http://www.aen-mekki.or.jp/faq/tabid/62/Default.aspx> (閲覧日: 2018年1月12日)
- 6) 小玉俊明, 藤井哲雄, 馬場春雄: 浄水場における給水管材料の水道水腐食試験, 防食技術, 30, pp.462-468, 1981
- 7) Powers, R. W and Breiter, M. W.: The Anodic Dissolution and Potassium Hydroxide Solutions, J. Electrochem. Soc., Vol.119, No.6, pp.719-729, 1969
- 8) 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
- 9) 佐々木淳, 丸山久一, 清水敬二, 米田直也: 鉄筋の発錆が付着性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 13-2, pp.139-144, 1991
- 10) 保坂剛, 八十島章, 大屋戸理明, 金久保利之: 腐食による鉄筋の断面減少が付着性状へ及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1369-1374, 2009
- 11) 高谷哲, 西澤彩, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章: コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.71, No.3, pp.235-247, 2015