

論文 引張履歴を有するステンレス鉄筋のモルタル中における腐食特性の評価

中島 朋子*1・宮里 心一*2

要旨：近年、耐食性に優れるステンレス鉄筋が注目され始めている。ここで、引張により鋼材に応力が負荷された場合、負荷されていない状態とは腐食特性が異なる可能性も考えられるが、それを検討した事例は少ない。そこで本研究では、3水準の引張履歴が付与された3種類のステンレス鉄筋を対象に、溶液中およびモルタル中における腐食特性を、アノード分極曲線、マクロセル腐食電流密度、およびマイクロセル腐食電流密度により評価した。その結果、引張履歴を有するステンレス鉄筋と有さないステンレス鉄筋では同様に、腐食電流が流れにくく、耐食性は高いことを明らかにした。

キーワード：ステンレス鉄筋, 引張, アノード分極曲線, 腐食電流

1. はじめに

現在、供用されているコンクリート構造物の多くでは、炭素鋼が使用されている。そのため、厳しい塩害環境下に立地する構造物では、コンクリート内部に埋設された鉄筋の腐食が問題となっている。この様な構造物の劣化や老朽化を背景として、更新構造物の長寿命化が求められている。その際、炭素鋼と比較して耐食性に優れる鋼材を用いることが有効になる場合もある。例えば、亜鉛めっき鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋、ステンレス鉄筋などである。中でも、ステンレス鋼はクロムを質量比で10.5%以上含有した合金鋼¹⁾であり、鋼材自体が高い耐食性を有している。そのため、材料価格は高いため建設費は増大するが、維持管理費の減少を図ることができ、ライフサイクルコストの低減が期待されている。日本国内では、2008年にステンレス異形棒鋼がJISに規定され、土木学会から施工指針(案)²⁾も発刊された。しかしながら、ステンレス鉄筋に関する研究や、実構造物への適用事例は未だ少ないのが現状である^{例えば2)3)4)5)}。

ここで、ステンレス鉄筋を実構造物へ適用する場合、鉄筋が受けた応力状態が鉄筋腐食に及ぼす影響を検討する必要があると考える。例えば、せん断耐力を高めるために使用されているスターラップの隅角部では、曲げにより常に応力が負荷されている。また、地震等により大きな荷重作用を受けた後も供用される部材においては、鋼材に引張が付加された履歴を有することになる。この様に、鋼材に応力が負荷された場合、応力が負荷されていない状態とは腐食特性が異なることが考えられる。しかしながら、この様な状態での腐食特性を検討した事例は少ない^{例えば6)7)}。

以上の背景を踏まえて本研究では、引張履歴を有する3種類のステンレス鉄筋の腐食特性を評価した。そのため、第2章では、ステンレス鉄筋のみを用いた要素試験として、コンクリートの細孔溶液を模擬した水溶液中におけるステンレス鉄筋の引張履歴が、腐食特性に及ぼす影響を評価した。次に第3章では、ステンレス鉄筋の接する環境をセメント硬化体であるモルタルにして、引張履歴がステンレス鉄筋の腐食に及ぼす影響を評価した。

2. 溶液試験

2.1 実験に用いた材料

(1) 鉄筋要素

ステンレス鉄筋および炭素鋼の代表的な化学成分を表-1に、機械的性質を表-2に示す。なお、本実験で使用した鋼材は、D10の3種類のステンレス鉄筋(SUS304, SUS316, SUS410)とした。また、引張履歴は、降伏前として1水準(680 μ)を、降伏後として2水準(14000 μ , 78000 μ)を設け、計9種類の鉄筋要素を試験対象とした。

ここで、鉄筋に与える引張履歴は、図-1に示すように、伸び計により目標のひずみが生じる様に制御しながら、1000kN 万能試験機を用いて負荷した。また、伸び計

表-1 ステンレス鉄筋および炭素鋼の体系と代表的な化学成分

鋼種	体系	成分 (wt%)		
		Cr	Ni	Mo
SUS304	オーステナイト系	18.45	8.15	0.00
SUS316		16.94	10.16	2.03
SUS410	マルテンサイト系	12.98	0.48	0.00
SD295A	-	0.00	0.00	0.00

*1 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻 (学生会員)

*2 金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

の標点間にある鉄筋の内、長さが 15mm の要素を切断し、試験体とした。

(2) 溶液

溶液は、中性化の影響を受けていないコンクリート中の細孔溶液を模擬するため、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ により $\text{pH}=12.4$ に調整した。さらに、 NaCl の添加により 3 水準の塩化物イオン (Cl^-) 濃度 (3wt%, 10wt%, 16wt%) の塩水を準備した。この中に試験体を浸漬し、1 週間後にアノード分極曲線を測定した。

2.2 測定方法

アノード分極曲線の測定方法を図-2 に示す。参照電極 (内部溶液は飽和 KCl 溶液)、対極板、およびリード線を接続した試験体を溶液に浸漬した状態で、試験体の電位を $1\text{mV}/\text{sec}$ で強制的に貴へ変化させ、アノード分極曲線を測定した。

表-2 ステンレス鉄筋および炭素鋼の機械的性質

鋼種	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
SUS304	369	689	50
SUS316	347	653	58
SUS410	405	555	35
SD295A	390	550	23

2.3 実験結果

アノード分極曲線の測定結果を図-3 および図-4 に示す。これらによると、同一の Cl^- 濃度および同種のステンレス鉄筋のケースに着目すると、引張履歴 (680 μ , 14000 μ , 78000 μ) の影響は確認されなかった。また、同種のステンレス鉄筋に着目すると、 Cl^- 濃度が高いほど、自然電位が卑化し、分極曲線も低電位かつ高電流密度にシフトして、耐食性が低下していることが確認された。

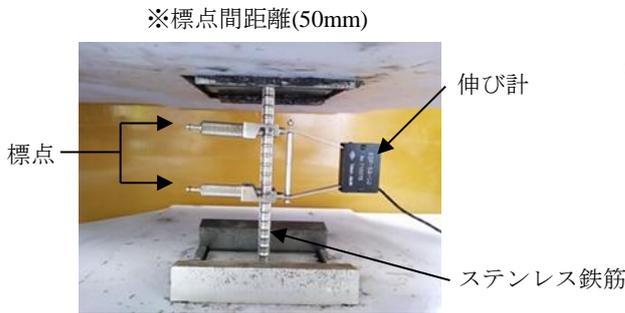


図-1 試験体への引張履歴の与え方

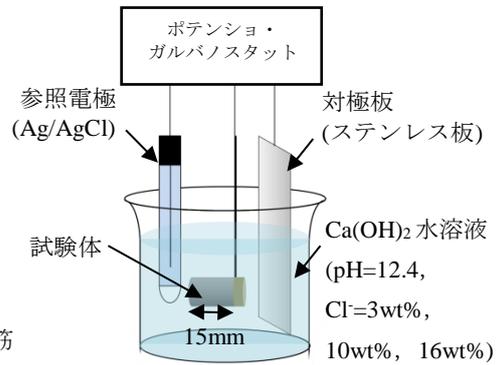


図-2 分極曲線の測定方法

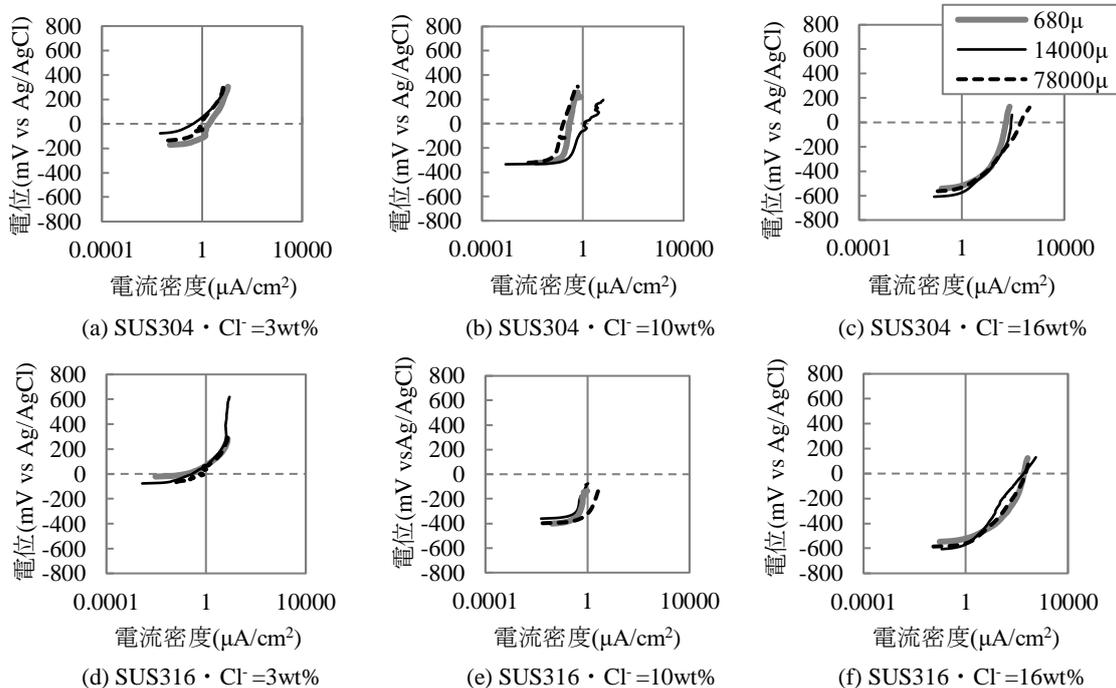


図-3 引張履歴がアノード分極曲線に及ぼす影響 (その1)

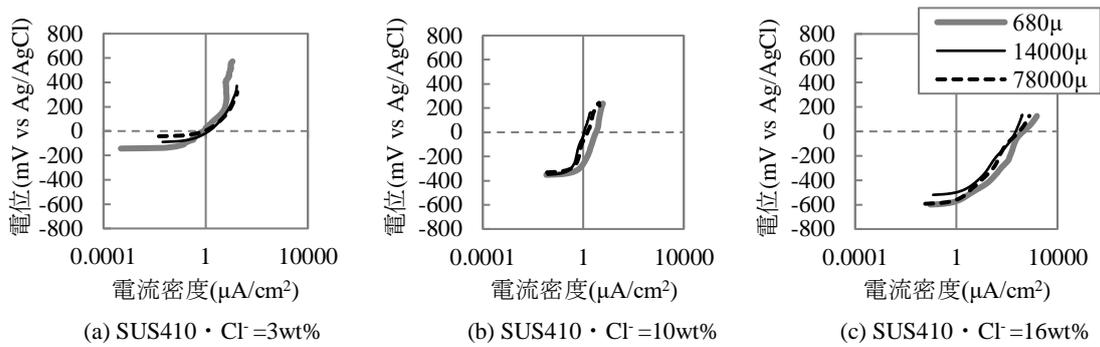


図-4 引張履歴がアノード分極曲線に及ぼす影響 (その2)

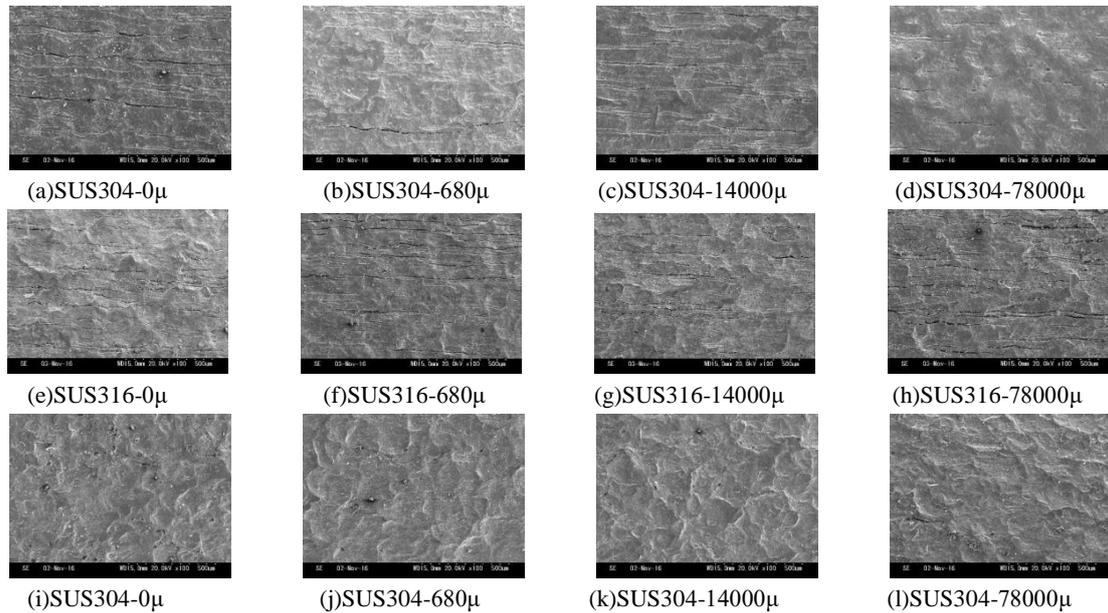


図-5 SEM 観察画像

次に、引張履歴を有する各種鋼材の走査型電子顕微鏡 (SEM) の観察倍率 100 倍における結果を図-5 に示す。なお、観察には試験に供する前の鉄筋要素を用いた。またここでは、比較のために、引張履歴を有さないステンレス鉄筋も示す。これによると、全ての引張履歴のケースで、引張履歴を有さないケースと同様に、鋼材表面の微細ひび割れ等は確認されなかった。ここで、炭素鋼および PC 鋼材に対する既往の研究⁸⁹⁾によれば、引張履歴により鋼材表面に変状が生じている場合、腐食は進行しやすいことが確認されている。したがって、本実験では引張履歴の有無に拘わらず全てのケースで、鋼材表面に変状は生じていなかったことから、図-3 および図-4 のアノード分極曲線においても、全ての引張履歴で同様の傾向を示したと考えられる。

3. モルタル試験

3.1 試験体作製方法

(1) 分割鉄筋

使用した鋼材は、第 2 章で使用したステンレス鉄筋

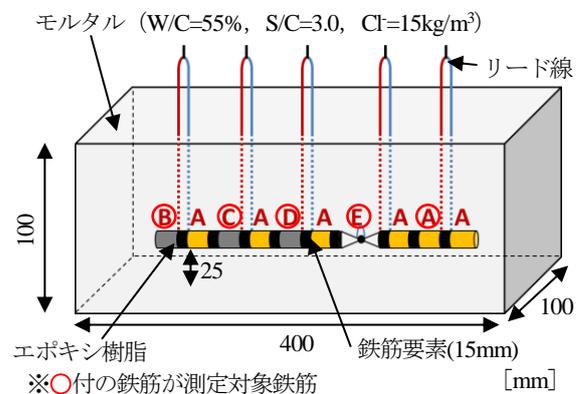


図-6 供試体の概要

(SUS304, SUS316, SUS410) とした。

はじめに、鉄筋への引張履歴の付与方法を説明する。要素 B~D においては、第 2 章と同様に 3 水準の引張履歴 (B=680μ, C=14000μ, D=78000μ) を与えた。また、要素 E においては、一旦破断させた後、リード線で両切片を接続して

電氣的導通を図った。さらに、要素 A においては、引張履歴を与えなかった。なお、各鉄筋要素の長さは 15mm とした。

次に、引張履歴を有さない鉄筋要素 (A) と、異なる 5 水準の引張履歴を与えた鉄筋要素 (A~E) を一組とした分割鉄筋を作製した。まず、要素 A~E の一端面、および要素 A の一端面に、リード線をはんだ付けした。その後、それぞれのリード線を接続した面を向かい合わせに置き、エポキシ樹脂による絶縁状態での物理的接続を行い、かつ隣接するリード線の接続による電氣的接続を行った。

(2) モルタル供試体

作製した分割鉄筋は、図-6 に示すとおり、W/C が 55%、S/C が 3.0 のモルタルに埋設した。ここでセメントには、普通ポルトランドセメントを用いた。またモルタルには、Cl 濃度が 15kg/m^3 となるように NaCl を予め練混ぜ水へ添加した。さらに、初期養生後におけるモルタルに対して、腐食要因物質が供試体の底面からのみ浸透させるため、それ以外の 5 面をエポキシ樹脂により被覆した。なお、エポキシ樹脂の被覆面を図-7 に示す。

(3) 暴露方法

1 日間の 3%NaCl 水溶液への完全浸漬と、2.5 日間の空中乾燥 (60%RH) が繰り返される 20°C の環境で、91 日間に亘り塩害暴露を行った。

3.2 測定方法

(1) アノード分極曲線

アノード分極曲線の測定方法を図-8 に示す。すなわち、鉄筋要素間のリード線を切断した状態で、エポキシ樹脂で被覆されていない底面 (暴露面) に、参照電極 (内部溶液は飽和 KCl 溶液) および対極板を設置して、電位を 1mV/sec で強制的に貴へ変化させた。

(2) 総腐食電流密度

文献¹⁰を参考に、マクロセル腐食電流密度およびマイクロセル腐食電流密度を測定し、これらの和から総腐食電流密度を算出した。すなわち、マクロセル腐食電流密度は、鉄筋要素 B を例にとると、図-9 に示すように、隣接する鉄筋要素 BA 間に無抵抗電流計を接続し、鉄筋要素 A から B へ流れる電流 (μA) を測定した。この電流を、鉄筋要素 B の表面積 (cm^2) で除することにより、 I_{macro} ($\mu\text{A/cm}^2$) を算出した。また、マイクロセル腐食電流密度は、図-10 に示すように、各鉄筋要素表面の分極抵抗を、小型腐食モニターを用いた交流インピーダンス法により算出した。なお、測定は $10\text{kHz}\sim 1\text{mHz}$ の範囲で、 $\pm 50\text{mV}$ の印加電圧で行った。

3.3 測定結果

(1) アノード分極曲線

アノード分極曲線の測定結果を図-11 に示す。各図内左側にはステンレス鉄筋を用いた本実験の結果を、右側には炭素鋼を用いた既往の 3.0%NaCl 水溶液浸漬試験結果¹¹⁾を示す。なお、破断させたケース E は引張前の表面積を用いて算出したため、実際の電流密度より高い見掛けの値である。また、



図-7 エポキシ樹脂の被覆面

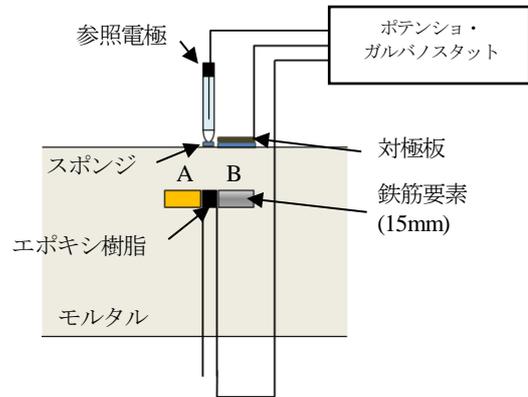


図-8 アノード分極曲線の測定方法 (鉄筋要素 B の例)

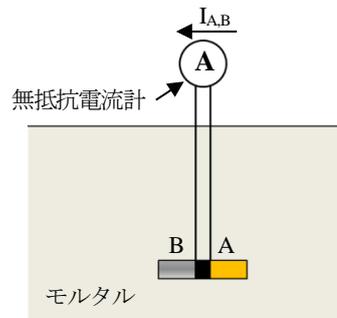


図-9 マクロセル腐食電流密度の測定方法 (鉄筋要素 B の例)

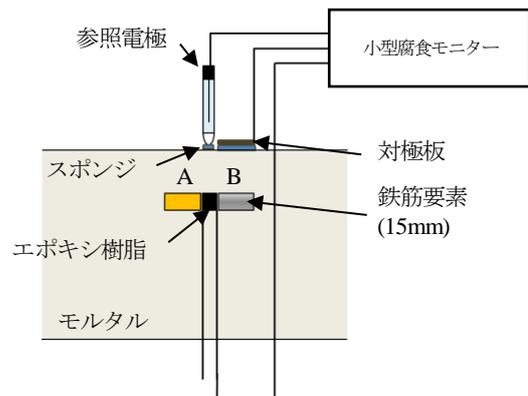


図-10 分極鉄鋼の測定方法 (鉄筋要素 B の例)

SUS316 のケース E に関しては、他のケースと比較して自然電位が貴になっているが、その理由は不明である。これによると、まずは、炭素鋼と比較してステンレス鉄筋では、全ての鋼種において、アノード電流が顕著に流れにくいことを確認できる。次に、引張履歴を有さないケース A と引張履歴を有するケース B~D と破断させたケース E のアノード分極曲線を比較する。その結果、炭素鋼では破断させたケース E が引張履歴を有さないケース A および引張履歴を有するケース B~D より明らかにアノード電流が流れやすい。一方、後述の図-12 も踏まえてステンレス鉄筋では、引張履歴を有さないケース A および引張履歴を有するケース D とケース E の差は小さいことが確認できる。ここで、初期電位から貴に 100mV 移行させた電位におけるアノード電流密度を図-12 に示す。これによれば、全ての鋼種で、その値は極めて小さく、特定の傾向は認められなかった。

(2) 総腐食電流密度

はじめに、各鉄筋要素における、マクロセル腐食電流密度およびマイクロセル腐食電流密度の分布を図-13 に示す。これによると、マクロセル腐食電流密度は全てのケースで確認されなかった。一方、マイクロセル腐食電流密度は、(b)の E および(f)の A~E においてわずかに確認されたものの、その値は小さい。

次に、炭素鋼とステンレス鉄筋の総腐食電流密度を図-14

に、ステンレス鉄筋のみの総腐食電流密度を図-15 に示す。はじめに、図-14 によると、炭素鋼の場合¹⁴⁾では、ひずみの履歴が大きくなるほど、腐食電流密度が大きい傾向を示した。一方でステンレス鉄筋の場合では、全体的に炭素鋼と比較して腐食電流密度は低い。次に、図-15 によると、ステンレス鉄筋の腐食電流密度は、全ての鋼種で $0.02\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下と小さいことを確認できた。したがって、これらの電気的測定に基づけば、引張履歴はステンレス鉄筋の腐食を促進しないと考えられる。

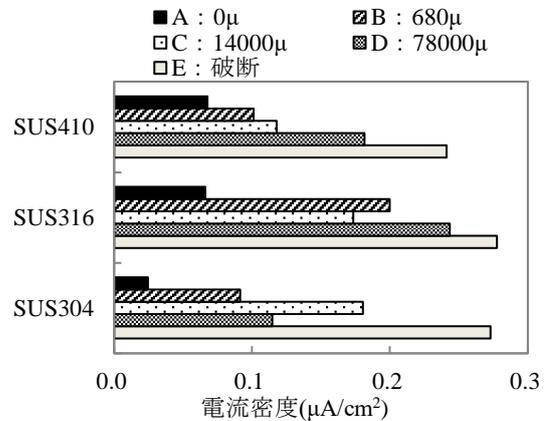


図-12 アノード分極曲線における 100mV 貴へ移行した時の電流密度

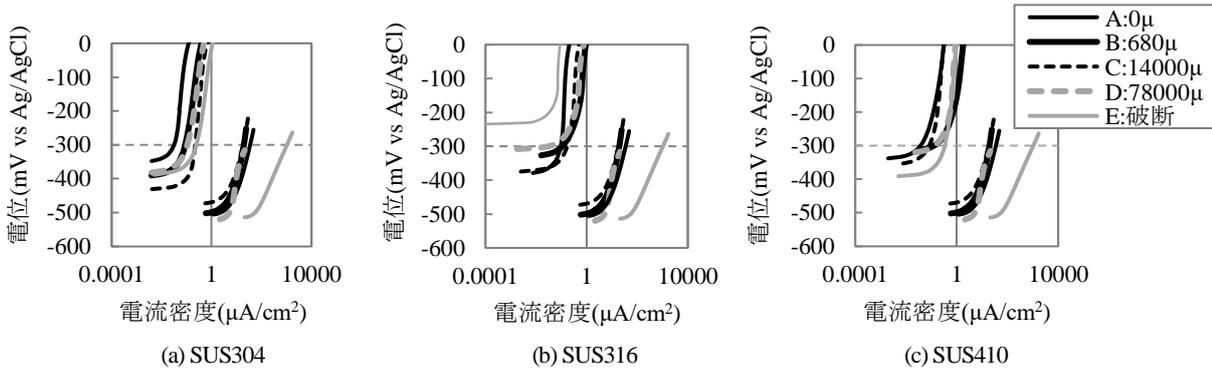


図-11 アノード分極曲線

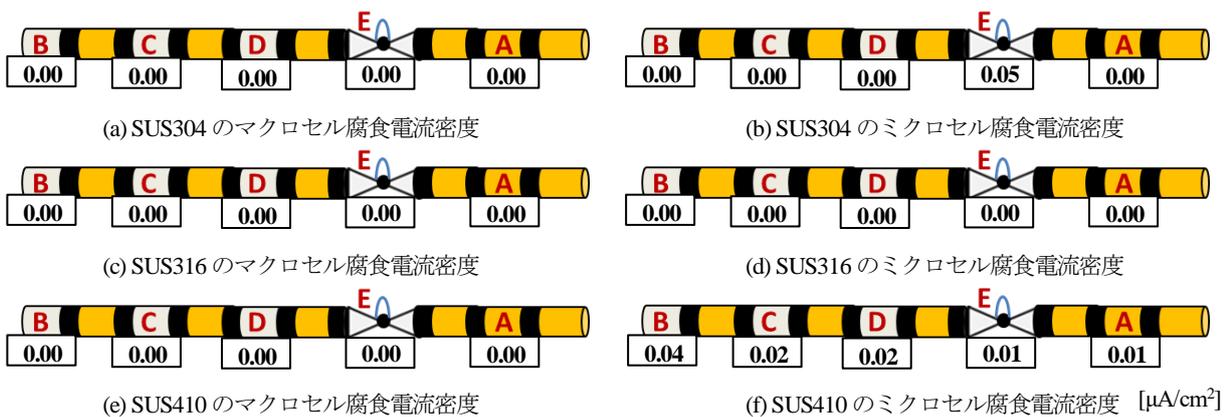


図-13 マクロセル・マイクロセル腐食電流密度の分布

4. まとめ

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 引張履歴 (680 μ , 14000 μ , 78000 μ) に拘わらず, Cl 濃度が 3wt%, 10wt% または 16wt% の Ca(OH)₂ 水溶液中では, ステンレス鉄筋 (SUS304, SUS316, SUS410) のアノード分極曲線は同様の傾向を示した。また, ステンレス鉄筋の種類および引張履歴に拘わらず, Cl 濃度が高いほど, アノード分極による電流は流れやすい傾向を示した。
- (2) 15kg/m³ の Cl が含有されたモルタル中において, ステンレス鉄筋のアノード分極による電流は, 炭素鋼と比較して明らかに流れにくかった。
- (3) 15kg/m³ の Cl が含有されたモルタル中における全ての鋼種のステンレス鉄筋の総腐食電流密度は, 引張履歴に拘わらず 0.02 μ A/cm² 以下であり, 引張履歴を有さない炭素鋼と比べ 1/100 以下であった。

以上から, モルタル中のステンレス鉄筋においては, 引張履歴を有する場合でさえも, 耐食性は高いことが明らかになった。

謝辞

本研究を進めるにあたり, ご指導いただきました日本鋼構造協会「ステンレス鉄筋の利用検討小委員会 (下村匠委員長)」の皆様へ感謝の意を表します。また, ステンレス鋼をご提供していただいた愛知製鋼株式会社にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針 (案), p.2, 2008
- 2) 山路徹, 濱田秀則, 水間誠治, 山本俊彦：海洋環境下におけるステンレス鉄筋の耐食性に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.2, pp.207-220, 2010
- 3) 佃有射, 加藤碩, 丸屋剛, 山路徹：ステンレス鋼の腐食発生塩化物イオン濃度に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1119-1124, 2008
- 4) BS6744 : Stainless steel bars for the reinforcement of and use in concrete-Requirements and test methods, 2001
- 5) FHWA : Corrosion Evaluation of Epoxy-coated, Metallic-Clad and Solid Metallic Reinforcing Bars in concrete, PUBLICATION NO. FHWA-RD-98-153, 199
- 6) 田所裕, 小島正郎, 大即信明：コンクリート中にお

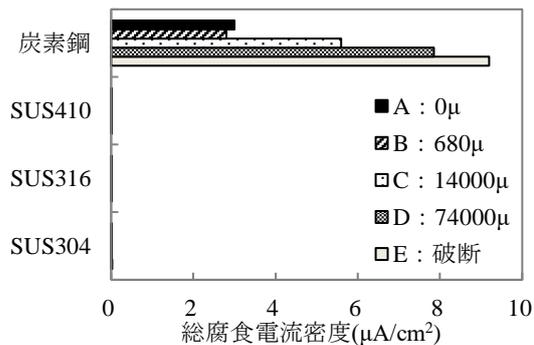


図-14 炭素鋼を含む総腐食電流密度

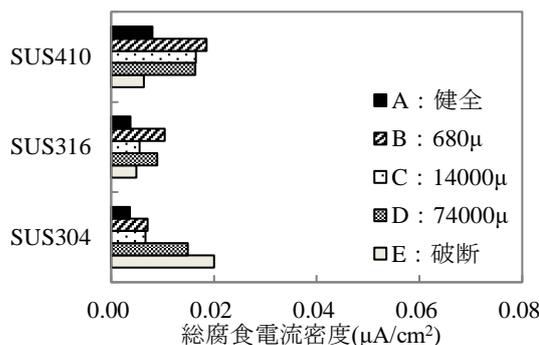


図-15 ステンレス鉄筋の総腐食電流密度

けるステンレス鉄筋の腐食進展挙動, 材料と環境, Vol.59, No.5, pp.179-186, 2010

- 7) 岩永弘之, 沖猛雄：ステンレス鋼のアノード分極極性における作用応力の影響と孔食, 材料, Vol.30, No.331, pp.72-78, 1981
- 8) 宮里心一：コンクリート中におけるスターラップと PC 鋼材の腐食特性, コンクリート中鉄筋の割れに関するシンポジウム, pp.53-59, 2008
- 9) 東洋輔, 宮里心一, 二井谷教治, 山田一夫, 宮川豊章：グラウト塩分濃度と PC 鋼材の緊張力が鋼材腐食に及ぼす影響, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.1, pp.103-117, 2009
- 10) 宮里心一, 大即信明, 小長井彰祐：分割鉄筋を用いたマクロセル腐食電流測定方法の実験的・理論的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.547-552, 2001
- 11) 東洋輔, 宮里心一：応力負荷を受けた鉄筋のモルタル中における腐食特性の解明, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, Vol.61, No.5, pp.503-504, 2006