

コンクリート構造物の塩害対策における防食補強材について

鹿児島大学大学院理工学研究科 武若耕司

1. はじめに

我が国のコンクリート構造物において塩分による鉄筋腐食が問題となり始めたのは、1960年代の後半頃から除塩不良の海砂が骨材として多量に出回り始め、1970年代に入って鉄筋腐食の観点から海砂中の許容塩化物量の規制値が検討されるようになってからである。1980年代に入ると、海岸付近にある建設後30年にも満たないコンクリート橋梁において、著しい鉄筋腐食が生じて建て替えを余儀なくされ状況も顕在化した。そして、これらの問題は、コンクリート構造物の「塩害」と呼ばれるようになり、「コンクリートクライシス」という言葉とともに、社会な関心事となった。以来、塩害はコンクリート構造物の早期劣化の象徴的な現象として、現在に至るまで、数多くの研究者や技術者がその原因究明に携わり、また、問題解決のための優れた研究や技術の成果が多数発表されてきた。

塩害の影響を受ける環境にコンクリート構造物を建設する場合に最も確実な方法は、錆びない、あるいは錆びにくい補強材を使用する方法である。そして、この観点からこれまでに開発された材料には、①被覆鉄筋、②合金鋼鉄筋、あるいは③FRP補強材、等がある。本文では、これらの防食補強材を取り上げ、塩害問題の顕在後から現在にまで至る技術の動向を概説する。

2. 被覆鉄筋

被覆鉄筋は、金属被覆鉄筋と樹脂被覆鉄筋に大別されるが、これまで主として検討がなされてきたものとしては、金属被覆のものとしては亜鉛めっき鉄筋が、また、樹脂被覆鉄筋としてはエポキシ樹脂被覆鉄筋が、それぞれ実績が多い。以下では、これらのこれまでの実用化への取り組みを概説する。

(1) 亜鉛めっき鉄筋

亜鉛めっき鉄筋としては、熱を加え熔融させた亜鉛に鉄筋を浸し、その表面に亜鉛の皮膜を形成させる熔融亜鉛めっき鉄筋（以下、「亜鉛めっき鉄筋」と称す）が一般的である。亜鉛被膜の防食効果の特徴は、「皮膜形成による保護作用」と併せて、「亜鉛金属の犠牲陽極作用」による電気防食効果が付加されて、鉄筋保護に寄与するところにある。

亜鉛めっき鉄筋の実用化に対する検討は、我が国では1970年代後半から活発に進められ、1979年12月に建築学会で、翌年4月には土木学会でそれぞれ、「亜鉛めっき鉄筋を用いる鉄筋コンクリート構造物の設計施工指針(案)」が制定された^{1),2)}。また、日本コンクリート工学協会(現、日本コンクリート工学会)が1983年に制定した「海洋コンクリート構造物の防食指針(案)」の中でも³⁾、海洋環境下で生じる塩害対策工法のうちの第2種防食工法(コンクリートの改善以外の方法で鉄筋を防食する工法の総称)の1つとして、建築学会あるいは土木学会制定指針と同様に、JIS H 8641(熔融亜鉛めっき)に規定する「3種55C」相当(めっき付

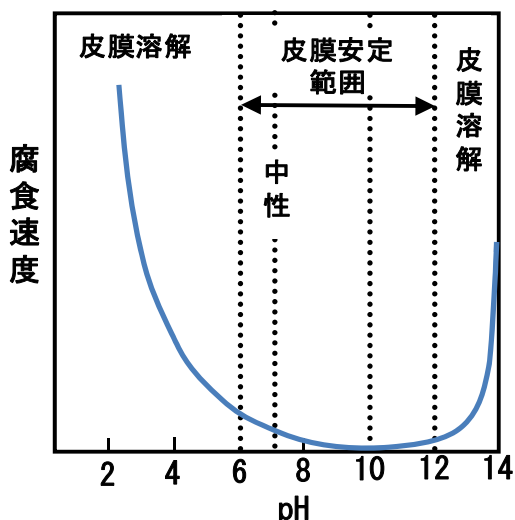


図1 pHによる亜鉛溶解速度⁴⁾

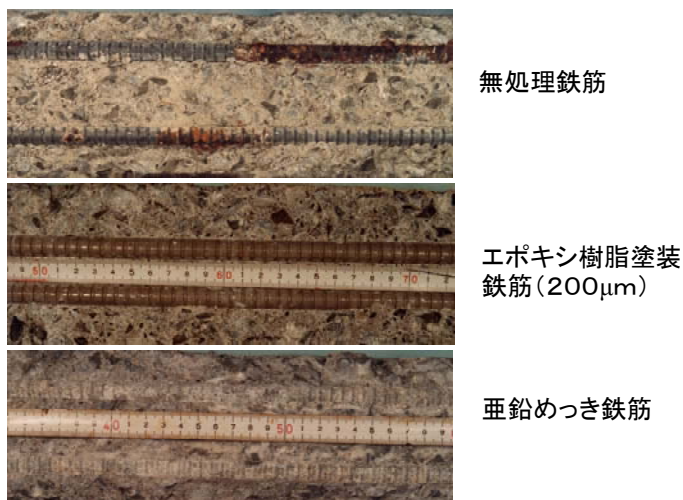


図2 海洋暴露3年を経過した各種鉄筋コンクリート中の鋼材の状況⁵⁾

着量 $550\text{g}/\text{m}^2$ 以上)の鉄筋が、塩害対策方法の1つとして取り上げられた。なお、実用化された亜鉛めっき鉄筋のめっき付着量は $600\sim 1500\text{g}/\text{m}^2$ 程度であり、厚さに換算しておよそ $80\sim 200\mu\text{m}$ である。

一方で、図1に示すように、亜鉛は中性環境では安定でほとんど腐食しないが、酸性環境の他、コンクリート中のようなpH12以上の高アルカリ性環境でも溶解することが知られている。実際、海洋環境下に3年間暴露された鉄筋コンクリートを解体し、内部鉄筋の状況を調べた図2の結果から、亜鉛めっき鉄筋の表面には白色の生成物が付着しており、

亜鉛の反応が示唆された⁵⁾。このような亜鉛の反応による生成物は、鉄筋とコンクリートの付着性を多少なりとも改善するとの報告がある一方で、セメントの種類によっては亜鉛の反応による水素ガスの発生が多くなり、コンクリートと鉄筋の界面に気泡跡が残って付着性を低下させる要因となるとの見解もある。図3は、各種鉄筋とコンクリートとの付着強度試験結果を示したものであるが、この結果から、亜鉛めっき鉄筋の付着強度は、平均値では普通鉄筋と同程度であるものの、試験結果のばらつきが普通鉄筋に比べて幾分大きく、上記の相反する見解を裏付けるような結果となっている⁵⁾。

また、コンクリート中に塩化物イオンが存在する場合、その濃度がNaCl換算質量比で0.3% (Cl⁻換算では0.18%)以下では亜鉛めっきの腐食は発生しないとの見解が得られている⁴⁾。図3は、海洋飛沫帯に暴露したRC供試体中のかぶり2cm位置に埋め込まれた亜鉛めっき鉄筋の亜鉛付着量を暴露3年後に測定した結果である。なお、この測定時の鉄筋周辺コンクリート中のCl⁻量は0.4%前後で、既に上記した許容値を超えていた。このため、亜鉛めっきは消耗し、特に、コンクリートに導入した曲げひび割れ部(供試体中央部分)では、僅か3年間でめっき量が1/3以下まで消耗している状況も確認された⁵⁾。

このような状況から、日本コンクリート工学会編「防食指針(案)」では、1991年の改定

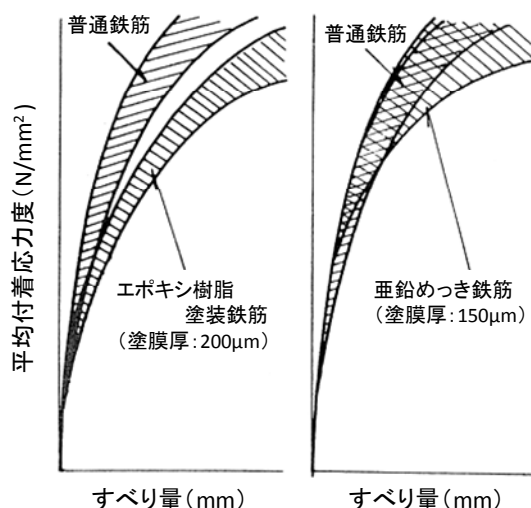


図3 鉄筋付着試験結果とそのばらつき⁵⁾

時に、亜鉛めっき鉄筋をコンクリート構造物の塩害対策の対象工法から除外するに至った⁶⁾。それでも、塩害の影響を強く受ける沖縄県等では、他の防食鉄筋に比べて安価なことや、鉄筋腐食抑制の観点からは一定の効果を期待できることから、その後も、5,000 トンを超える量の溶融亜鉛めっき鉄筋が、橋梁等で利用されている(図5)⁴⁾。

なお、今後、亜鉛めっき鉄筋を塩害対策として有効に活用するためには、図4の結果を踏まえ、コンクリート中への塩分浸透抑制対策との併用を前提とした工法設計を行っていくことが重要であると考えられる。

(2) 樹脂被覆補強材

① 樹脂被覆鉄筋

樹脂被覆鉄筋に関する研究は、1970年代に米国連邦道路局を中心として盛んに行われ、静電粉体塗装を行ったエポキシ樹脂塗装鉄筋(以下、EP鉄筋と称す)が、塗膜の耐久性、コンクリートとの付着性ならびに曲げ加工性等の点で優れているとの結論が得られた。そして、1981年にEP鉄筋の仕様ならびに鉄筋加工・組み立て方法についてASTMの規定が示され、米国国内でその利用が拡大した。ただし、その利用拡大があまりにも急激だったため、粗悪品質の塗装鉄筋の使用や粗雑な鉄筋の取り扱い、あるいは鉄筋が防食されている安心感からコンクリート品質が粗悪になる等の弊害も出てきた。米国連邦道路局ではこの状況を受け、1992年にEP鉄筋の品質管理の徹底を明記した覚書を示し、また、これを受けてASTM規格の見直しもなされたが、フロリダ州などでは、その後にEP鉄筋の使用禁止処置がとられる等の事態も招いた⁷⁾。

一方、我が国では、1986年に土木学会においてEP鉄筋を使用した鉄筋コンクリートの設計施工指針(案)(以下、「EP鉄筋指針(案)」と称す)が制定され⁸⁾、EP鉄筋の品質規格のみではなく、これを使用した構造物の設計・施工の仕様が規定された。これにより、我が国では米国のような問題は顕在化せず、結果として、EP鉄筋の信頼性は高まった。また、1999年に土木学会コンクリート標準示方書(以下、「示方書」と称す)に耐久性照査法が導入されると⁸⁾、2003年には、EP鉄筋指針(案)も、示方書に準じて構造物の耐久性を定量的に照査できる体系に改訂された⁹⁾。

最近では、EP鉄筋の使用上の問題点を改善するために、表1に示すような新たな塗装鉄筋の開発も行われている。その1つが、エポキシ樹脂塗装鉄筋の弱点である鉄筋とコンクリートの付着性の改善を試みたもので、鉄筋表面のエポキシ樹脂静電粉体塗装を2層に分けて行い、2層目には微細な熱硬化性樹脂製骨材を混ぜた塗装を施工することで、塗装表面

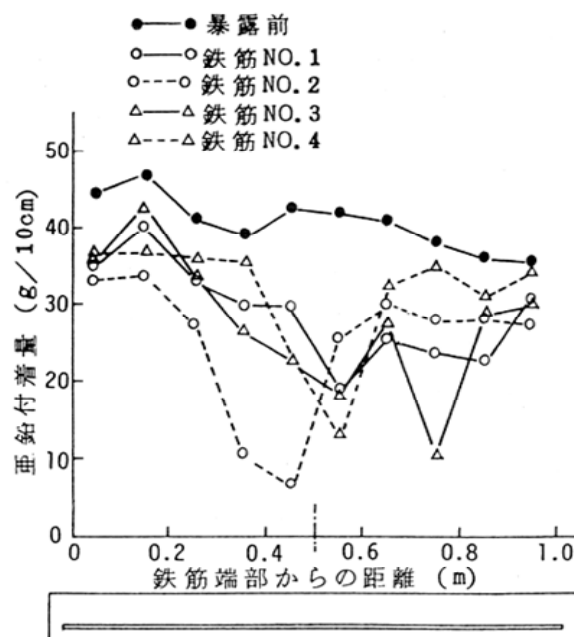


図4 海洋環境下に暴露したコンクリート中の亜鉛めっき鉄筋における亜鉛付着量(暴露期間: 3年, かぶり2cm)⁵⁾

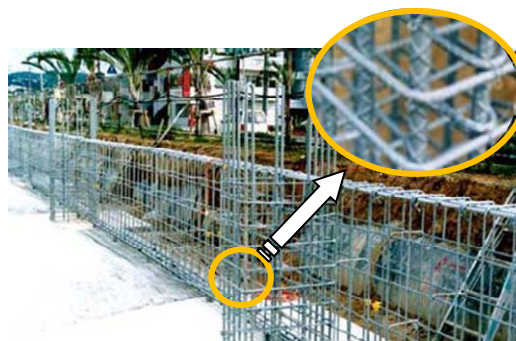


図5 亜鉛めっき鉄筋の沖縄での施工事例⁴⁾

粗目を付け、付着性の改善が図られた。

この鉄筋のコンクリートとの付着性に関する検討結果の一例を図6に示す¹⁰⁾。樹脂骨材により塗膜表面に粗目を付けることで、特に、鉄筋がコンクリートからすべり始める段階でのすべり抵抗性に対して有効であり、エポキシ樹脂塗装鉄筋の初期付着応力度を普通鉄筋と遜色ない状況(90%以上)まで改善できる。なお、この鉄筋は表面に樹脂骨材を付着させることから、エポキシ樹脂塗装鉄筋の塗膜厚は土木学会規準で定められている $220 \pm 40 \mu\text{m}$ よりも $20 \mu\text{m}$ 程大きくなるが、表面の粗目の効果により最大付着応力度を無塗装鉄筋の85%以上に確保でき、土木学会で定める付着強度の品質基準は満たされる。

また、鉄筋表面にナイロン樹脂を圧着させた被覆鉄筋の実用化についても検討がなされている。

この被覆の特徴は、曲げ加工や衝撃等による塗膜の損傷が生じにくく、耐候性、耐食性にも優れるところにある。ただし、コンクリートとの付着性改善が今後の課題である。




②樹脂被覆 PC 鋼材

土木学会は、2010年に、「エポキシ樹脂を用いた高性能 PC 鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針(案)」ならびに関連する各種試験方法規準を制定した¹¹⁾。この中では、「プレグラウト PC 鋼材」と「内部充填型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線(以下、ECF ストランド)」の2つの PC 鋼材が規定されている。

この内、プレグラウト PC 鋼材は、PC 鋼より線または PC 鋼棒、エポキシ樹脂グラウト、およびシースから構成され、グラウト用に用いる湿気硬化型エポキシ樹脂または熱硬化型エポキシ樹脂をあらかじめシース内に注入し、鋼材にプレストレスを導入後、樹脂を硬化させて一体化させるもので、本文のテーマである被覆鋼材とは趣が異なる。

一方、SCF ストランドは、PC 鋼より線材の表面を加熱し、その上にエポキシ粉体塗料を溶融塗布し、さらに各素線間の隙間部にも樹脂を充填することで PC 鋼より線を被覆するものである。ただし、この方法で PC 鋼より線に塗装を行うと、塗膜厚が $1000 \mu\text{m}$ 程度となる場合もあり、これを内ケーブルとしてコンクリート中に設置する場合には付着性が問題となるため、塗装表面にけい砂を吹付ける等して、付着を確保する処理を施すことになる(表2中「付着型」)。一方、外ケーブルとして用いる場合は、コンクリートの付着を考慮する必要はないが、紫外線の影響を受ける可能性があるため、表面をさらにポリエチレンで被覆

表1 各種の樹脂被覆鉄筋

鉄筋種類	通常のEP鉄筋	付着性を改善したEP鉄筋	ナイロン被覆鉄筋
外観状況			
被覆厚(μm)	220 ± 40	240 ± 40	400 ± 50

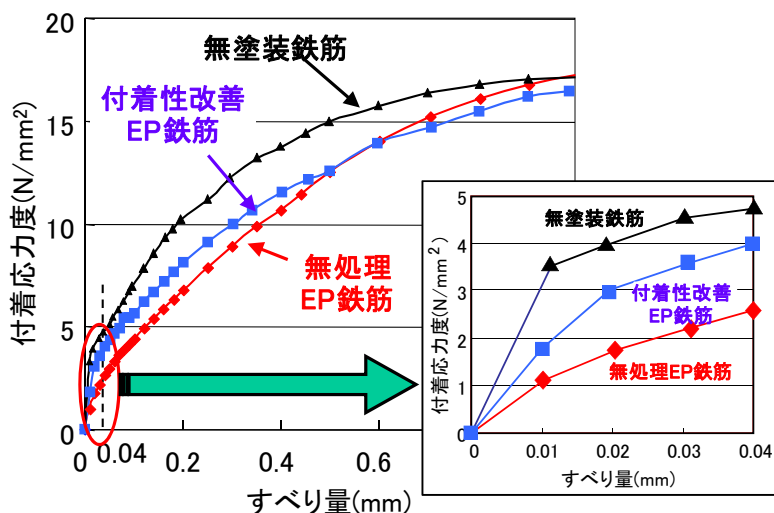


図6 コンクリートとの付着性を改善させた EP 鉄筋の付着応力度-すべり量関係

して耐候性を高めている（表 2 中の「PE 被覆型」）。

3. 合金鋼鉄筋

(1) 耐塩性鉄筋

銅－タングステン系，ニッケル系あるいはクロム系などの低合金系耐候性鋼は，緻密なさび層をその表面に形成させることで，さらなる鋼材腐食を抑制するもので，鋼製橋梁等の構造物では，現在，長寿命化を図る方法の1つとして使用されている。

1980年代には，これらを用いた鉄筋が開発され，実用化の検討がなされた経緯がある。例えば，銅－タングステン系鉄筋を用いることにより，塩害環境でコンクリートに腐食ひび割れが発生するまで時間は3～5倍に伸びるとの結果も得られた¹²⁾。ただし，この鉄筋の場合，腐食を完全に抑えるものではないため，塩化物の影響を大きく受ける環境での防食効果については，状況に応じて，事前にその効果を確認する必要がある。

(2) ステンレス鉄筋

ステンレスを素材とした鉄筋は，1980年代に開発され，英国では1986年にBS規格（BS6744）が，米国では1996年にASTM規格（ASTM A955M）が，それぞれ制定されている。

我が国では，2008年3月に「JIS G 4322：鉄筋コンクリート用ステンレス異形棒鋼」が制定され，オーステナイ系ステンレスであるSUS304（18%Cr-8%Ni），SUS316（16%Cr-10%Ni-2%Mo）ならびに，フェライト系ステンレスであるSUS410（12%Crあるいは12%Cr-Low C）の鉄筋が規定された。また，同年8月には，土木学会で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）が制定された¹³⁾。そして，この指針では，ステンレス鉄筋を使用した場合の鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度を表3のように設定し，普通鉄筋に比べ格段に高い耐久性を確保できる構造物が設計できることを明確にした。

ただし，図7に示すように，ステンレス鉄筋はEP鉄筋と比較して極めて高い耐久性を示す一方で，その素材コストは未だ高い。そこで，欧米では炭素鋼を芯材としその外周にス

表 2 内部充填型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線の種類

標準型	付着型	PE被覆型
  エポキシ樹脂 PC鋼より線 防食被覆がエポキシ樹脂被覆のみで形成されている ECF スtrand	  グリット エポキシ樹脂 PC鋼より線 コンクリートとの付着性を向上する目的で，エポキシ樹脂被覆表面にグリットを埋め込んだ ECF スtrand	  ポリエチレン エポキシ樹脂 PC鋼より線 標準型 ECF スtrand 毎に表面をポリエチレンで保護した ECF スtrand

表 3 コンクリート中の鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度の推奨値¹³⁾

鉄筋の種類	腐食発生限界塩化物イオン濃度の推奨値 (kg/m ³)	
普通鋼*	1.2	
ステンレス鋼	SUS304-SD	15
	SUS316-SD	24
	SUS410-SD	9

*普通鉄筋については，示方書による

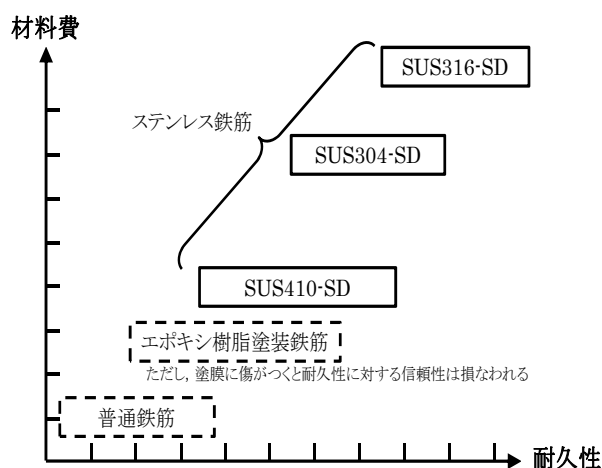


図 7 ステンレス鉄筋の素材コストと耐久性の関係¹⁴⁾

ステンレス鋼を被覆したステンレス鋼クラッド鉄筋の実用も進められており、2004年には、米国でこの鉄筋に関する仕様書（AASHTO MP13M）が制定されている¹⁵⁾。

4. まとめ

本文では、塩害環境のコンクリート構造物の新設段階における長寿命設計の一助となる補強鋼材防食工法についての現状をまとめた。ただし、今後これらの方法を有効かつ適材適所に使用していくためには、コスト評価も含めた構造物の総合的なライフサイクルマネジメントを行っていく必要がある。現状では、防食効果の高い技術は、総じてイニシャルコストが高くなる状況にある。ただし、これらを利用した場合でも、ライフサイクルコストで考えると十分に安価な構造物と見なされるケースも多い。

構造物の長寿命化は、構造物の状態を客観的な指標で評価してその中長期的な状態を予測し、限られた予算の中で、新設段階も含め、何時どこにどのような対策を施すのが最適であるかを考え、構造物を計画的にかつ効率的に管理することが求められる。そのためには、各種防食技術の寿命予測評価ならびにコスト評価を横並びで検討できるシステムを早急に構築することも求められる。

〔参考文献〕

- 1) 土木学会：亜鉛めっき鉄筋を用いる鉄筋コンクリート設計施工指針(案), 昭和55年4月
- 2) 日本建築学会：亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造の設計施工指針(案), 昭和54年12月
- 3) 日本コンクリート工学協会編：海洋コンクリート構造物の防食指針(案), 1983.2
- 4) (社)日本溶融亜鉛鍍金協会ホームページ, <http://aen-mekki.or.jp/>
- 5) 武若耕司：塩分環境下における鉄筋の防食方法に関する基礎的研究, 鹿児島大学工学部紀要第20号, 1984.2
- 6) 日本コンクリート工学協会：JCI-R1 海洋コンクリート構造物の防食指針(案)－改訂版－, 1990.3
- 7) 田中良樹, 河野広隆, 渡辺博志：北米における実構造物コンクリート中のエポキシ樹脂塗装鉄筋の性能, 土木学会論文集E, Vol.62, No.4, pp.739-756, 2001.11
- 8) 土木学会編：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針(案), コンクリートライブラリー58, 1986.2
- 8) 土木学会編：平成11年版コンクリート標準示方書【施工編】－耐久性能照査型－, 2000.2
- 9) 土木学会編：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針〔改定版〕, コンクリートライブラリー112, 2003.11
- 10) 吉田誠, 武若耕司：新たな方法で樹脂被覆した防食鉄筋の諸性能に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1375-1380, 2009.7
- 11) 土木学会編：エポキシ樹脂を用いた高機能PC鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針(案) コンクリートライブラリー, 2010.9
- 12) 島田春夫, 友澤史紀他：鉄筋コンクリート用耐塩性鉄筋の塩害劣化試験と性能評価方法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集A, 1989, 671-672, 1989.9
- 13) 土木学会編：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), コンクリートライブラリー130, 2008.8
- 14) 新日鐵住金ステンレス(株)：ストック型社会実現に向けた建築・土木構造物へのステンレス鋼の適用技術開発, 新日鉄技報第389号, 2009.9
- 15) AASHTO MP13M/MP13-2004: Standard Specification for Stainless Clad Deformed and Plain Round Steel Bars for Concrete Reinforcement, 2004 (revised in 2006)