

論文 コンクリート中のステンレス鉄筋の耐腐食性能

河村 彰男^{*1}・山路 徹^{*2}・河野 広隆^{*3}・長瀧 重義^{*4}

要旨：ステンレス鉄筋の耐腐食性能に関する評価の一つとして、コンクリート中に埋め込まれた鉄筋が外来塩分の浸透によって腐食する場合の腐食発生限界塩化物イオン濃度について検討を行った。高濃度の塩水（10%NaCl 溶液）に鉄筋を埋め込んだコンクリート試験体を浸漬させ、自然電位の経時変化、コンクリート中の塩化物イオン濃度および鉄筋の腐食面積率を測定した。その結果、本実験方法が促進試験として妥当であることが確認でき、ひび割れ近傍位置において、ステンレス鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は、SUS304 で 13kg/m^3 以上、SUS316 で 20kg/m^3 以上であることが明らかとなった。

キーワード：ステンレス鉄筋，腐食発生限界塩化物イオン濃度，自然電位，促進試験

1. はじめに

ステンレス鋼は合金成分としてCrを約11%以上含有しており、大気中で酸化して表面に不動態皮膜を形成することから、優れた耐食性を有している。耐食性に優れたステンレス鋼をコンクリートの補強用鋼材として使用することで、厳しい腐食性環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上が期待される。海外においてはステンレス鉄筋の規格が整備され¹⁾、実構造物への適用例もあることから比較的研究事例も多い²⁾。一方、我が国においては、まだ比較的研究事例も少なく³⁾、ステンレス鉄筋の規格整備はなされておらず、実構造物への適用もほとんどないのが現状である。

塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食は、鋼材表面の不動態皮膜が塩素イオンにより破壊されることで開始する。したがって、コンクリート中におけるステンレス鋼表面の不動態皮膜が破壊される塩化物イオン濃度を把握できれば、鉄筋コンクリート構造物の設計へ反映することが可能となる。

本研究では、ステンレス鉄筋の耐腐食性能に関する評価の一つとして、高濃度の塩水（10%

NaCl 溶液）に鉄筋を埋め込んだコンクリート試験体を浸漬させ、自然電位の経時変化、コンクリート中の塩化物イオン（Cl）濃度および鉄筋の腐食面積率を測定し、コンクリート中に埋め込まれた鉄筋が外来塩分の浸透によって腐食する場合の腐食発生限界塩化物イオン濃度について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の概略を図-1に、試験体の種類を表-1に示す。試験体は、端部のみシリコン被覆を施している。

設定した条件をまとめると次のようになる。

- (1) 使用鋼材：3種類（普通鉄筋 SD295A および ステンレス鉄筋 SUS304・SUS316）
- (2) 鉄筋径：D13
- (3) 鉄筋のかぶり（c）：20mm
- (4) コンクリート：W/C=50%
- (5) 試験体形状：
 - ① ひび割れなし（幅 100mm×高さ 100mm×長さ 150mm）
 - ② ひび割れあり（幅 100mm×高さ 100mm×長さ 150mm）

*1 日本コンクリート技術（株）技術部長 博（工）（正会員）

*2 （独）港湾空港技術研究所 LCM 研究センター特任研究官 工修（正会員）

*3 （独）土木研究所材料地盤研究グループ長 博（工）（正会員）

*4 愛知工業大学工学部都市環境学科教授 工博（正会員）

さ 350mm)

- (6) ひび割れ幅：2 種類 (0.0035c (0.07mm 程度)
および 0.005c 以上 (0.16～0.2mm 程度))

ひび割れ幅の設定は、土木学会で設定している鋼材の腐食に対する許容ひび割れ幅⁴⁾のうち、異形鉄筋に対する一般の環境 (0.005c) および特に厳しい腐食性環境 (0.0035c) の値に準拠した。試験体へのひび割れ導入は実験開始前に曲げ载荷によって行った。なお、自然電位の測定誤差をより少なくするために、同一種類の試験体のうち 1 体には網目状の照合電極 (酸化イリジウム電極 (Ir-IrO₂ と表記)) をコンクリート内部に設置した。

2.2 使用材料

(1) 鉄筋

各鉄筋の化学成分を表-2 に、力学的性質を

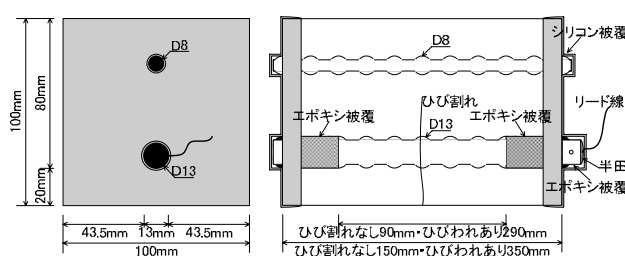


図-1 試験体概略図

表-1 試験体一覧

試験体	鋼種	ひび割れ	ひび割れ幅	試験体	鋼種	ひび割れ	ひび割れ幅
ON1	SD	無	—	1CA1	SUS 304	有	0.08mm
ON2	295A			1CA2			0.08mm
1N1	SUS 304			1CA3			0.08mm
1N2		1CB1	0.16mm				
1N3		1CB2	0.18mm				
2N1	SUS 316	無	—	1CB3			SUS 316
2N2				2CA1	0.06mm		
2N3				2CA2	0.08mm		
OCA1	SD 295A	有	0.06mm	2CA3	0.06mm		
OCA2			0.06mm	2CB1	0.18mm		
OCB1			0.18mm	2CB2	0.17mm		
OCB2			0.18mm	2CB3	0.17mm		

表-2 鉄筋の化学成分

鋼種	化学成分 (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SD295A	0.17	0.18	0.70	0.028	—	—	—	—
SUS304	0.05	0.39	1.64	0.034	0.025	8.06	18.75	—
SUS316	0.07	0.54	1.71	0.032	0.020	10.09	16.18	2.04

表-3 に示す。

(2) コンクリート

使用したコンクリートの配合を表-4 に、フレッシュ時の品質と材齢 28 日における圧縮強度を表-5 に示す。

2.3 実験条件

高温環境下 (40℃) に水槽を設置し、その中に試験体を設置した。水槽内に高濃度の塩水 (10%NaCl 溶液) を入れ、試験体底面を 5～10mm 程度浸漬させて、上面は大気中に開放した (図-2 参照)。この方法により、コンクリート中の水の移流が促進され、結果として Cl の移動が促進されることになる⁵⁾。また、試験体底面は塩水に浸かっているが、側面におけるかぶりは 43.5mm であり、通常の構造物における条件とほぼ同じであることから、酸素は十分に供給されることが考えることができる。なお、試験体外部に照合電極を設置した場合は、照合電極として海水銀-塩化銀電極を使用した。

2.4 実験内容

試験体浸漬後、自然電位、コンクリート中の

表-3 鉄筋の力学的性質

鋼種	引張強さ (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	伸び (%)	ヤング係数 (kN/mm ²)
SD295A	511	352	20.1	175
SUS304	594	367*	52.0	159
SUS316	650	307*	47.1	186

*0.2%耐力

表-4 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (kg/m ³)
		W	C	S	G	
49.5	43.5	162	327	780	1053	3.564

セメント：普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)

細骨材：砕砂：陸砂=70：30 (質量比)

砕砂：栃木県田沼産 (表乾密度 2.57g/cm³)

陸砂：千葉県佐原産 (表乾密度 2.62g/cm³)

粗骨材：埼玉県横瀬産砕石 (表乾密度 2.70g/cm³)

混和剤：AE 減水剤標準形 I 種

表-5 フレッシュ時の品質と圧縮強度

フレッシュ時の品質		圧縮強度 (材齢 28 日)
スランプ	空気量	
11.5cm	3.1%	39.1N/mm ²

Cl 濃度および鉄筋腐食面積率を測定した。測定項目一覧を表－6に示す。Cl 濃度の測定は、電位差滴定法 (JIS A 1154 に準拠) および EPMA により行った。測定箇所を図－3に示す。ひび割れなし試験体では、試験体中央から試料を切り出して、コンクリート表面から 0-8、8-16、16-24mm の3箇所における全塩化物イオン濃度の測定を行った。ひび割れあり試験体では、ひび割れの両側から試料を切り出して、ひび割れ近傍の鉄筋位置における全塩化物イオン濃度の測定と、EPMA による Cl 濃度分布の測定を行った。EPMA 分析は加速電圧 15kV、照射電流 1×10^{-7} A、ビーム径 $50 \mu\text{m}$ として行った。自然電位は、データロガーを用いて連続的に計測を行った。鉄筋腐食面積率の測定は腐食部分を透明フィルムに写し取ることにより行った。

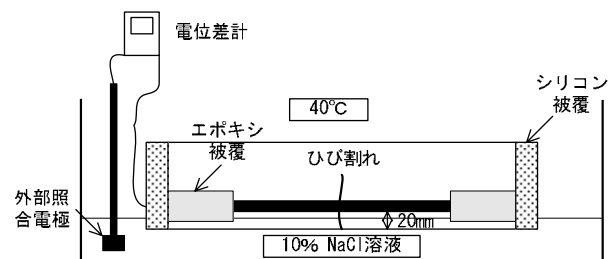
3. 実験結果および考察

3.1 自然電位測定結果

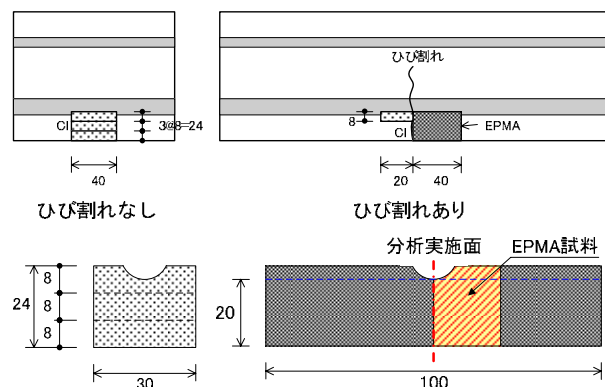
浸漬 8 ヶ月時点までの自然電位測定結果の一例を図－4に示す。一部で測定値に大きなばらつきが見られるが、これは鉄筋とリード線の接続部に行っていた被覆材が損傷したためであり、補修することで改善された。図中に示した点線は、ASTM C 876 の腐食判断基準⁶⁾で「90%以上の確率で腐食あり」と評価される電位値 -0.35V (vs CSE) を、Ir-IrO₂ 電極における値 (-0.225V) に換算したものである。

普通鉄筋でひび割れありの場合には、自然電位はひび割れ幅の大小にかかわらず浸漬開始直

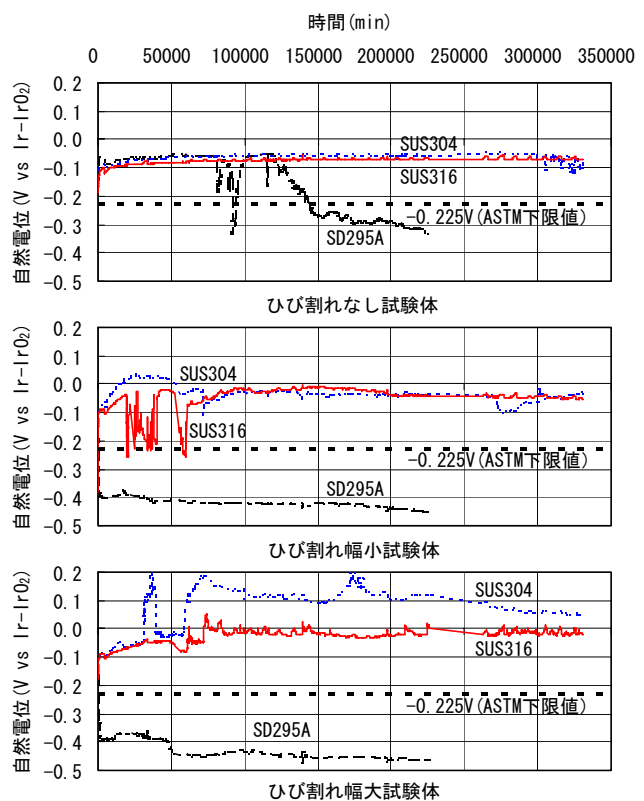
後から -0.225V 以下の値を示しており、浸漬を開始してからわずかな期間で腐食が発生したものと推測される。このことから、本実験では、ひび割れ幅の大小は普通鉄筋の腐食発生時期に関してほとんど影響を与えていないものと考えら



図－2 試験状況



図－3 Cl 濃度測定箇所



図－4 自然電位測定結果

表－6 測定実施試験体

試験体	測定時期	Cl 濃度		鉄筋腐食面積率
		電位差滴定	EPMA	
ON2	浸漬 3 ヶ月	○	—	○
OCA2		○	○	○
OCB2		○	○	○
ON1	浸漬 6 ヶ月	○	—	○
OCA1		○	—	○
OCB1		○	—	○
1CA2		○	○	○
1CB3		○	○	○
2CA3		○	○	○
2CB3		○	○	○

れる。ひび割れなしの場合には、自然電位は浸漬3ヶ月前から卑な方向に移行し始め、3ヶ月を過ぎた時点で-0.225V以下の値になっている。したがって、ひび割れなしの試験体では、浸漬3ヶ月程度で鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達したものと思われる。一方、ステンレス鉄筋では鋼種および試験体の種類にかかわらず、自然電位は浸漬8ヶ月の時点まで大きな変動はなく、ASTMの普通鉄筋における基準値-0.225Vより貴な値を示していた。この基準が今回のステンレス鉄筋(SUS304および316)にそのまま適用できるかは不明であるが、コンクリート模擬溶液中にステンレス鉄筋を浸漬させ、腐食が生じた場合では、普通鉄筋と同様の自然電位変化を示しており³⁾、普通鉄筋と同様の判定が行える可能性がある。

3.2 鉄筋腐食面積率

表-6に示した試験体を割裂して鉄筋を取り出し、腐食面積率の測定を実施した。測定結果を図-5に示す。普通鉄筋ではすべての試験体で腐食が観察されたが、ステンレス鉄筋では腐食は観察されなかった。また、普通鉄筋においては、浸漬期間にかかわらず、ひび割れ幅大>ひび割れ幅小>ひび割れなしの順に腐食が進行しており、腐食の進行に関してはひび割れ幅の影響が認められる。

腐食面積率と試験体割裂直前の自然電位との関係を図-6に示す。なお、自然電位の値はCSE電極での値に換算後のものである。ひび割れの有無にかかわらず、自然電位が卑なほど腐食面積率が大きくなる傾向が見られる。

3.3 コンクリート中での塩化物イオン浸透状況

(1) ひび割れなしの場合

普通鉄筋のひび割れなし試験体におけるコンクリート中の全塩化物イオン濃度分布を図-7に示す。図中の曲線は、測定値をもとに式(1)で回帰したものである。

$$C = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot x}{2 \sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right) \quad (1)$$

ここで、 C ：塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 C_0 ：表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 D_{ap} ：見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 t ：経過時間 (年)、 x ：表面からの位置 (mm)、 $\operatorname{erf}(s)$ ：誤差関数、である。なお、今回の試験では、コンクリート中の水の移流が促進されることから、得られる D_{ap} の値に

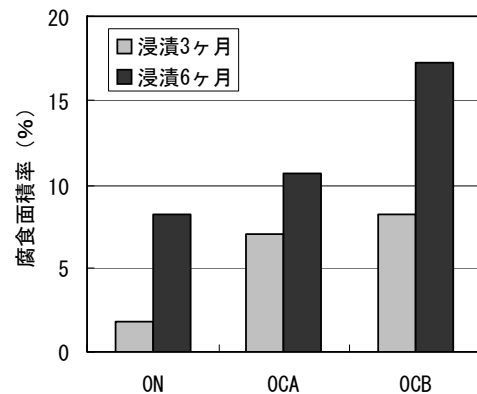


図-5 腐食面積率の測定結果

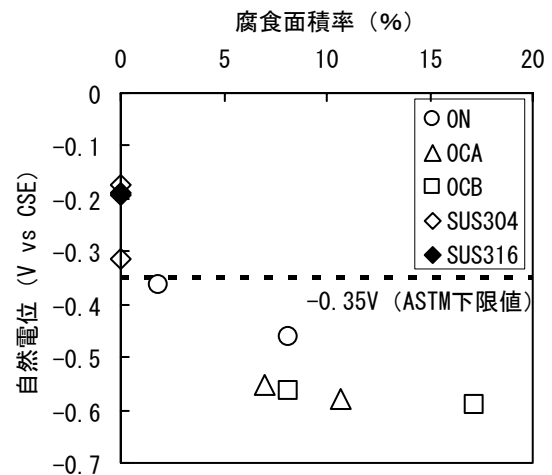


図-6 腐食面積率と試験体割裂直前の自然電位との関係

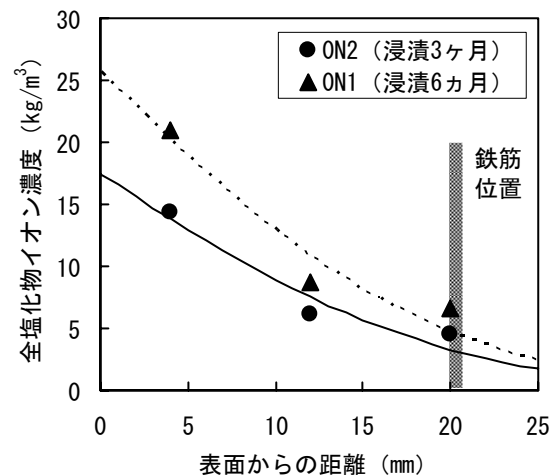


図-7 全塩化物イオン濃度分布

は移流の影響も含まれる。

鉄筋表面位置における全塩化物イオン濃度は、 4.50kg/m^3 (ON2) および 6.64kg/m^3 (ON1) であり、短期間でコンクリート内部に多量の塩化物イオンが浸透している。回帰によって得られた諸数値を表-7に示すが、浸漬期間とともに表面塩化物イオン濃度 C_0 は大きくなり、拡散係数 D_{ap} は小さくなる傾向がみられる。

土木学会コンクリート標準示方書では、普通ポルトランドセメントを使用する場合のコンクリートの拡散係数の予測式として、式(2)が示されている⁷⁾。

$$\log D_p = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (2)$$

ここで、 D_p ：コンクリートの拡散係数の予測値 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 W/C ：水セメント比、である。

式(2)から $W/C=0.495$ として拡散係数の予測値を算出すると $D_p=1.11\text{cm}^2/\text{年}$ となる。表-7に示した拡散係数の値は予測式と比較して促進されており、塩化物イオンの浸透促進に対して移流の効果が大きいことがわかる。

図-4における普通鉄筋のひび割れなし試験体 (ON1) について、自然電位が卑な方向に移行し始めた時点を腐食発生時期と考え、式(1)および表-7の値を用いて、その際の鉄筋位置における塩化物イオン濃度を算出すると 1.35kg/m^3 となる。鋼材位置における塩化物イオンの鋼材腐食発生限界濃度は、実環境での暴露実験では $1.2 \sim 2.4\text{kg/m}^3$ 程度とされており⁸⁾、本実験の値はその値と同等であった。

以上のことから、本実験はコンクリート内部への塩分浸透を促進させつつ、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度を評価する試験として、適用可能であると判断される。

表-7 回帰によって得られた諸数値

試験体	経過年数 (年)	表面塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m^3)	拡散係数 D_{ap} ($\text{cm}^2/\text{年}$)
ON2	0.271	17.5	4.18
ON1	0.493	25.6	2.29

(2) ひび割れありの場合

ひび割れ近傍位置における全塩化物イオン濃度を図-8に示す。普通鉄筋の試験体では、浸漬期間が同じであればひび割れ幅が大きいほど、ひび割れ幅が同じであれば浸漬期間が長いほど、全塩化物イオン濃度は大きな値を示している。浸漬6ヶ月の時点でみると、概ねひび割れ幅の大きな試験体の方が大きな値を示しているが、値そのものにはかなりばらつきがあり、水槽内における試験体の設置位置によって、塩化物イオンの浸透の状況が同一とはなっていない可能性がある。

ステンレス鉄筋試験体のひび割れ近傍鉄筋位置におけるCl濃度分布をEPMAにより測定した結果を図-9に示す。なお、図中の値は鉄筋下面近傍10mm範囲での平均値を用いている。一般的に、ひび割れ近傍では値が分布する結果となることが多いが、いずれの試験体においても、ひび割れ面から20mmまでの範囲内では多少ばらつきはあるもののほぼ均一な値を示している。今回、試験体割裂時において、ひび割れ面近傍では鉄筋下側のコンクリート表面が湿っており、ひび割れを介してNaCl溶液が侵入していることが確認された。ひび割れ近傍でCl濃度がほぼ均一な値を示したのは、このことが影響しているものと推測される。以上のことから、図-8に示した全塩化物イオン濃度は、ひび割れ近傍における局所的な値ではなく、ひび割れ近傍の鉄筋表面付近の値を正確に表していると判断され

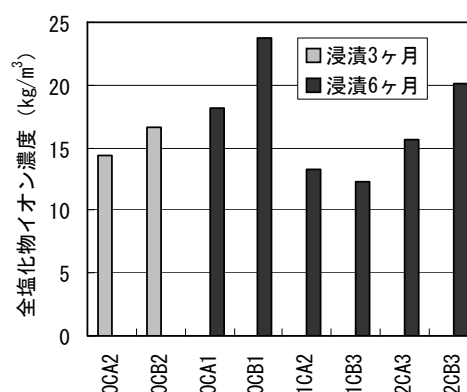
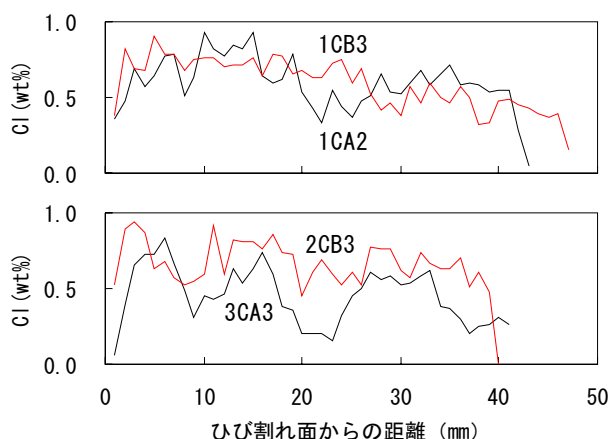


図-8 ひび割れ近傍位置における全塩化物イオン濃度



図－9 鉄筋位置における Cl 濃度分布

る。

(3) ステンレス鉄筋における腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する考察

図－8において、SUS304では全塩化物イオン濃度が 13kg/m^3 程度、SUS316では 20kg/m^3 程度でも腐食が認められなかった。すなわち、両者の腐食発生限界塩化物イオン濃度はこれらの値以上であるものと推測される。なお、これらの値はひび割れ近傍での値であり、一般的に検討が行われている、ひび割れがない場合とは異なる。しかしながら、ひび割れ近傍の方が、pHの低下が生じたり、酸素の供給量も多くなりやすいことから、より腐食にとって厳しい環境であり、安全側の評価がなされていることになる。

4. まとめ

コンクリート中に埋め込まれた鉄筋が外来塩分の浸透によって腐食する場合の腐食発生限界塩化物イオン濃度を把握することを目的として検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 普通鉄筋のひび割れなし試験体において、コンクリート中の鉄筋の自然電位が卑な方向に移行し始めた時点における、鉄筋位置での塩化物イオン濃度を算出すると 1.35kg/m^3 となり、既往の知見と同程度となった。このことから、本実験は塩化物イオンの浸透を促進させつつ、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度を評価する試験として、適用可能であると

判断された。

- (2) ひび割れ近傍における調査結果より、ステンレス鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度は、SUS304で 13kg/m^3 以上、SUS316で 20kg/m^3 以上であるものと推測された。

今後も自然電位の測定を引続き実施し、ステンレス鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度に対する評価を継続する予定である。

本研究の一部は、経済産業省工業標準化推進調査等委託（社会基盤創成標準化調査）の再委託業務として実施したものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) たとえば、BS 6744 : Stainless steel bars for the reinforcement of and use in concrete – Requirements and test methods, 2001
- 2) たとえば、FHWA : Corrosion Evaluation of Epoxy-coated, Metallic-Clad and Solid Metallic Reinforcing Bars in concrete, PUBLICATION NO. FHWA-RD-98-153, 1998
- 3) 山路 徹・水間誠治・平崎敏史・濱田秀則 : 海洋環境下におけるステンレス鉄筋の耐食性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.937-942, 2005
- 4) 土木学会 : 2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], pp.97-98, 2002
- 5) 丸屋 剛・武田 均 : 高温乾燥環境下における塩化物イオンの移動, 土木学会年次学術講演会講演概要集第5部, 第52巻, pp.240-241, 1997
- 6) ASTM C 876 : Half cell potentials of reinforcing steel in concrete, 1977
- 7) 土木学会 : 2002 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], pp.80, 2002
- 8) 土木学会 : 2002 年制定コンクリート標準示方書 [施工編], pp.26, 2002