

論文 コンクリート中のステンレス鉄筋の耐食性能に関する実験的研究

篠田 佳男^{*1}・山路 徹^{*2}・河野 広隆^{*3}・長瀧 重義^{*4}

要旨：ステンレス鉄筋を特に厳しい塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物へ適用することを目的に、オーステナイト系ステンレス SUS304, SUS316 の腐食発生限界塩化物イオン濃度、隙間腐食および異種金属接触腐食について実験的に検討を行った。その結果、オーステナイト系ステンレスは腐食発生限界塩化物イオン濃度が普通鉄筋に比べて極めて大きく、 17kg/m^3 以上であることが明らかとなった。また、ステンレス鉄筋と普通鉄筋との異種金属接触腐食およびステンレス鉄筋同士の隙間腐食は、特に問題とならないことを確認した。

キーワード：ステンレス鉄筋、塩化物イオン濃度、隙間腐食、異種金属接触腐食

1. はじめに

ステンレス鋼は、クロムを 10.5～32% 含んだ合金で、クロム酸化物による不動態皮膜を鋼材表面に形成することで、高い防食性を発揮する。そのため、ステンレス鉄筋をコンクリートの補強用鋼材として使用することで、特に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大幅な耐久性向上が期待できる。

実際、海外では多くの研究がなされ、規格の整備や実用化が進められている¹⁾。一方、わが国においても最近研究が行われ、その成果として SUS304, SUS316, SUS430 の腐食発生限界塩化物イオン(Cl)濃度が 15kg/m^3 以上²⁾、また屋内促進試験で SUS304 が 13kg/m^3 以上、SUS316 が 20kg/m^3 以上³⁾ 等の報告がなされている。これらの研究は、実際の使用環境に対応するように、Cl をコンクリート中へ外部から侵入させたもので、設計上重要となる曲げひび割れの影響についても検討が行われている。

本研究は、ステンレス鉄筋の実用化を推進し、特に厳しい腐食性環境下で供用される鉄筋コンクリート構造物のライフサイクルコストの最小化を目的に行っているものである。このうち、本論文では、腐食限界 Cl 濃度に加えて、異種金

属接触腐食および隙間腐食について実験的検討を行った。異種金属接触は、ステンレス鉄筋と普通鉄筋との接触を意味する。大断面構造物の場合、経済性を考慮し Cl が侵入しやすい最外縁の主鉄筋や帯筋にステンレス鉄筋を、そして Cl 濃度の少ない内部の鉄筋に普通鉄筋が使用されることがある。このような構造物では、最外縁の鉄筋と内部の鉄筋を連結する中間帯鉄筋が配置され、異種金属の接触が生じることになる。また、隙間腐食は、重ね継手に代表されるように、継手区間のような鉄筋同士の接触を対象としている。

2. 実験概要

2.1 腐食発生限界塩化物イオン濃度試験

(1) 概要

コンクリート中でのステンレス鉄筋の腐食発生限界 Cl 濃度を検討するために、試験体を 10% NaCl 溶液に浸漬させた。実験は、図-1 に示すように、恒温恒湿器内に水槽を設置し、試験体底面から 5～10mm 程度を NaCl 溶液に浸漬させて行った。なお、コンクリート中での Cl の浸透濃度および鉄筋の腐食を促進させるため、恒温恒湿器内の温度を 40°C と高温度に設定した。

*1 日本コンクリート技術(株)代表取締役 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 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻教授 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)

(2) 試験体

試験体の概要を図-2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 水準(SD295A, SUS304, SUS316)
- ② 鉄筋径: D13 (主鉄筋), D8 (圧縮鉄筋)
- 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:
 - ・ ひび割れなし (幅 100mm×高さ 100mm×長さ 150mm)
 - ・ ひび割れあり (幅 100mm×高さ 100mm×長さ 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))

ひび割れ幅は、土木学会コンクリート標準示方書の許容ひび割れ幅⁴⁾のうち、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。

(3) 測定概要

測定項目は、自然電位、コンクリート中の Cl 濃度および鉄筋腐食面積率とした。Cl 濃度の測定箇所を図-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。

(4) 使用材料

鉄筋の化学成分を表-2に、機械的性質を表-3に示す。なお、ステンレス鉄筋は明確な降伏点を有していないため、降伏強度は残留ひずみが 0.2%となる応力度とした。また、コンクリートは表-4に示すもので、W/C=49.5%で単位セメント量を 327kg/m³のものを使用した。

表-1 試験体一覧

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

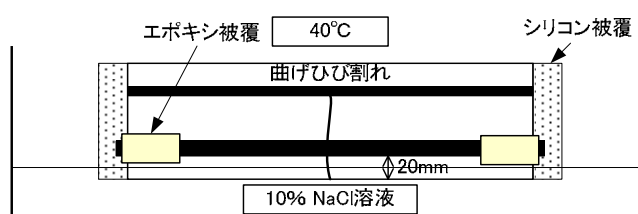


図-1 試験概略

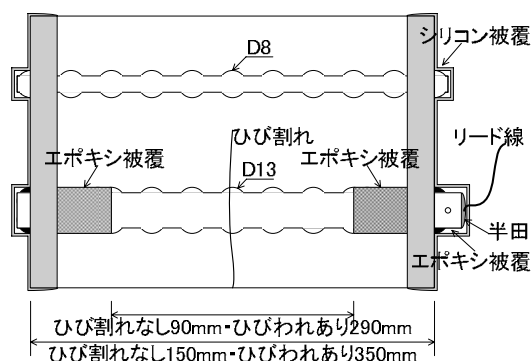
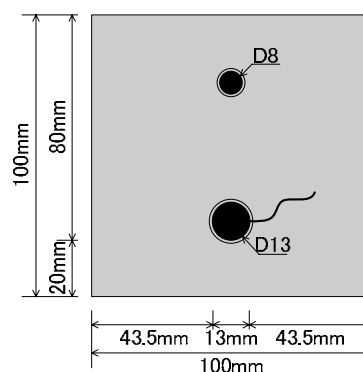


図-2 試験体概要

表－２ 鉄筋の化学成分

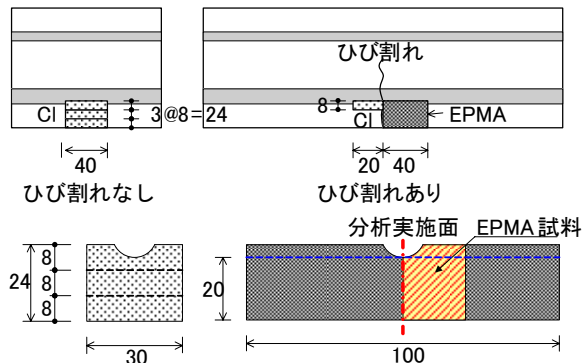
鋼種								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SD295A	0.17	0.18	0.70	0.028	－	－	－	－
SUS304	0.05	0.39	1.64	0.034	0.025	8.06	18.75	－
SUS316	0.07	0.54	1.71	0.032	0.020	10.09	16.18	2.04

表－３ 鉄筋の機械的性質

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

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



図－３ Cl 濃度測定箇所

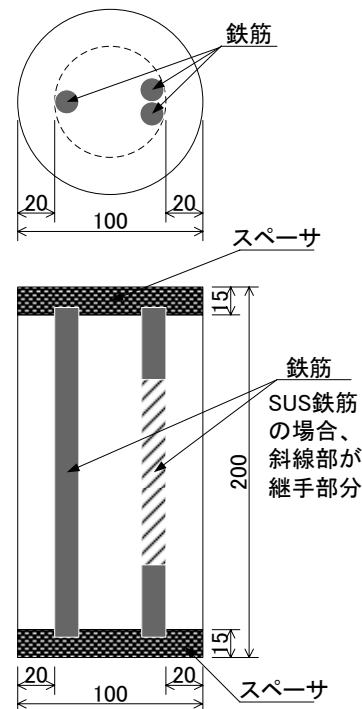
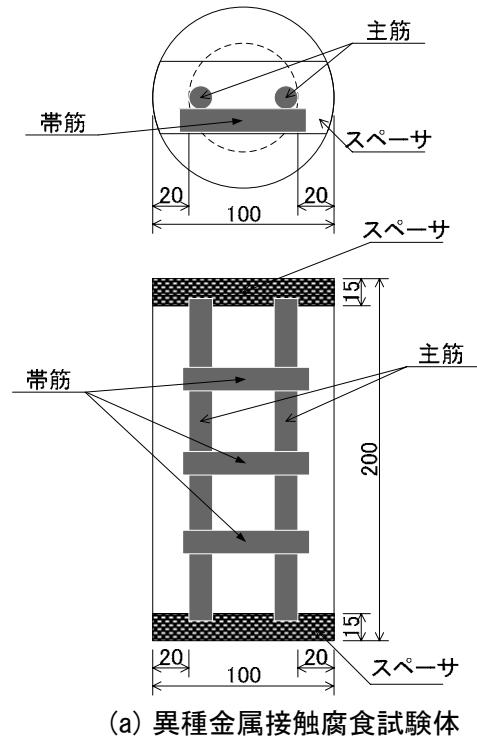
2.2 異種金属接触試験および隙間腐食

(1) 概要

ステンレス鉄筋と普通鉄筋との異種金属接触腐食および鉄筋の重ね継手における鉄筋接触時の隙間腐食を把握するために行った。試験は JIS A 6205(鉄筋コンクリート用防せい剤)附属書 2(コンクリート中の鉄筋の促進腐食試験)を参照した。この試験は、温度 180℃で圧力 1.0MPa を 5時間保持するオートクレーブを2回繰り返すことで、鉄筋腐食を促進させる方法である。

(2) 試験体

試験体は、図－４に示すように、φ100×200mm の円柱供試体の中に主鉄筋と帯筋が接触する異種金属接触用と、重ね継手を配置した隙間腐食試験用を使用した。なお、異種金属接触試験は、



図－４ 試験体概要

表－5 異種金属接触腐食試験体

供試体番号	主鉄筋鋼種	CI 量	個数
295-06	SD295A	0.6kg/m ³	3 体
295-12	SD295A	1.2kg/m ³	3 体
304-06	SUS304	0.6kg/m ³	3 体
304-12	SUS304	1.2kg/m ³	3 体
316-06	SUS316	0.6kg/m ³	3 体
316-12	SUS316	1.2kg/m ³	3 体

表－6 隙間腐食試験体

使用鉄筋	CI 量 (kg/m ³)	鉄筋の配置
SGD3	5	規準鋼材を両側に 1 本ずつ 配置
	10	
	15	
	20	
SUS304 SUS316	5	SUS 鉄筋を片側継手なし、 片側重ね継手として配置
	10	
	15	
	20	

SD295A の帯筋に対して接触する主鉄筋の鋼種を変えた。また、隙間腐食試験は、同一供試体の中に鉄筋の重ね継手と鉄筋単体を配置した。表－5 は、異種金属接触腐食試験体の一覧を示したものである。試験体の諸元を下記に示す。

コンクリート中の CI 量：2 水準(0.6, 1.2kg/m³)

鋼材種類：3 水準(SD295A, SUS304, SUS316)

また、隙間腐食試験体の一覧を表－6 に示す。試験体の諸元は下記の通りとした。

コンクリート中の CI 量：4 水準(5, 10, 15, 20kg/m³)

鋼材種類：3 水準(基準鋼材, SUS304, SUS316)

(3) 測定項目および使用材料

測定項目は、隙間腐食試験および異種金属接触試験ともに鉄筋腐食面積率とした。

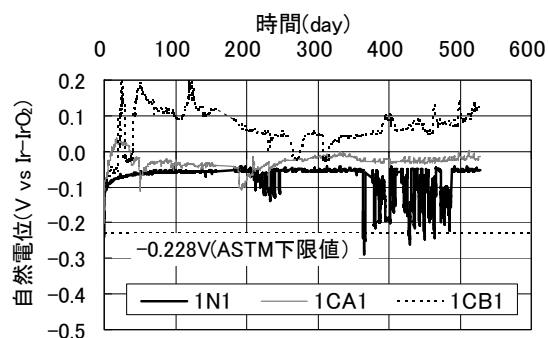
また、使用材料としてステンレス鉄筋は腐食特性試験と同一のものを使用した。コンクリートは、W/C=60%で単位セメント量が 300kg/m³ のものを使用した。

3. 実験結果および考察

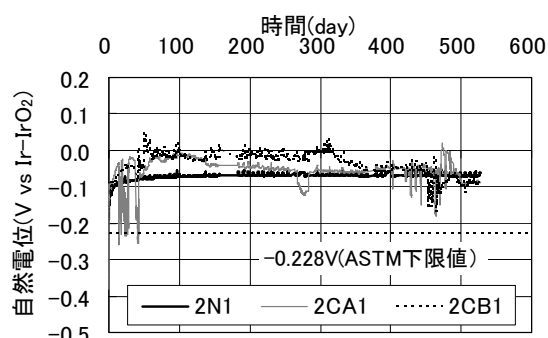
3.1 腐食発生限界塩化物イオン濃度試験

(1) 自然電位および腐食状況

図－5 は、浸漬 18.5 ヶ月までのステンレス鉄



(a)SUS304 試験体



(b)SUS316 試験体

図－5 自然電位測定結果

筋の自然電位測定結果を示したものである。図中に示した点線は、ASTM C 876 の腐食判断基準⁵⁾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。測定値の一部で大きなばらつきがみられるが、これは鉄筋とリード線の接触部における被覆材等の損傷によるもので、補修により改善した。測定結果をみると、ステンレス鉄筋の鋼種および試験体の種類にかかわらず、自然電位は浸漬 18.5 月まで、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る。ステンレス鉄筋は、このように自然電位の測定結果からみると、腐食を生じていないようである。

一方、普通鉄筋は、ひび割れなし試験体が浸漬 3 ヶ月で卑な方向に移行したため、その時点で腐食状況を調査した。その結果、腐食面積率が 1.77%となっていた。また、ひび割れあり試験体では腐食面積率が 8%程度とひび割れ部を中心に広がっていた。

表－７ ひび割れ部鉄筋位置での全 Cl 濃度

鋼種	ひび割れ幅	浸漬 5.5 ヶ月	浸漬 12 ヶ月	浸漬 18.5 ヶ月
SUS304	0.0035c	13.4	13.4	17.7
	0.005c	12.3	15.4	17.2
SUS316	0.0035c	15.7	16.5	21.0
	0.005c	20.2	16.4	22.9

ステンレス鉄筋は自然電位で貴となっていたが、浸漬 5.5, 12, 18.5 ヶ月で目視調査を行った。鉄筋を取り出し詳細に調査を行ったが、腐食は認められなかった。

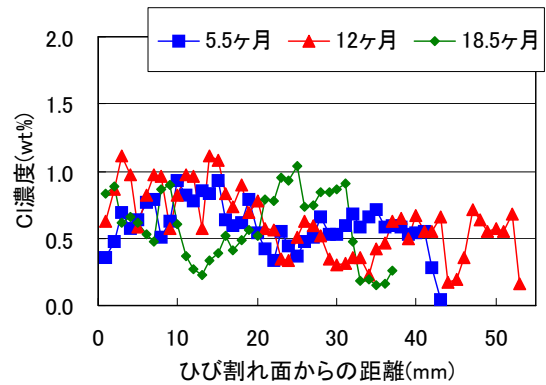
なお、ひび割れあり試験体では、ひび割れからある範囲にわたって鉄筋下側のコンクリート表面が湿っていた。これは、曲げひび割れ導入時に鉄筋リブ周囲に内部ひび割れの発生および面外変形による鉄筋とコンクリートの肌分かれが生じ⁶⁾、NaCl 溶液が鉄筋軸方向に侵入したものであると思われる。この NaCl 溶液の侵入は、実構造物と同一な曲げひび割れを試験体に導入し、実際の状況を室内で再現したことを示唆している。

(2) コンクリート中の Cl 濃度

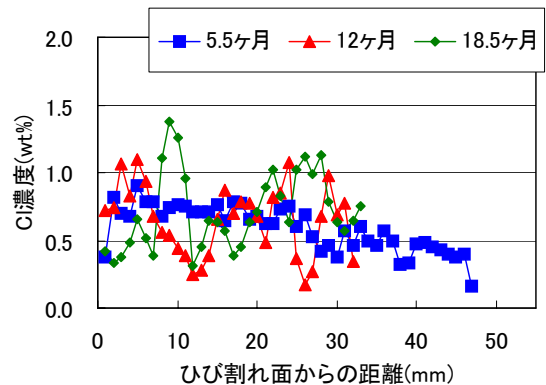
表－７ は、ひび割れ部の鉄筋位置での全 Cl 濃度を浸漬 5.5, 12, 18.5 ヶ月に分けて示したものである。ひび割れを有する試験体は、実験開始の初期段階から鉄筋位置で高濃度の NaCl 溶液が侵入していたと推定される。Cl 濃度の測定結果は、 $12.3\text{kg/m}^3 \sim 22.9\text{kg/m}^3$ と浸漬 5.5 ヶ月でも 12.3kg/m^3 以上となっている。なお、Cl 濃度にはひび割れ幅の影響は認められない。

図－６ は、EPMA の測定結果を SUS304 でのひび割れ小試験体とひび割れ大試験体における鉄筋下面の Cl 濃度をひび割れ面からの距離として示したものである。ひび割れ面から 40mm 位までは浸漬 5.5 ヶ月で Cl 濃度 0.5% 程度以上となっている。Cl 濃度 0.5% は計算上 Cl 濃度 10kg/m^3 程度となる。浸漬期間が 5.5 ヶ月を超えた結果であるが、ひび割れ面から 40mm 程度まではひび割れ幅にかかわらずほぼ一定の値となっている。

ステンレス鉄筋は、このように、18.5 ヶ月の間 Cl 濃度 10kg/m^3 程度以上と高濃度 Cl 環境条件におかれていた。また、今回の実験から、

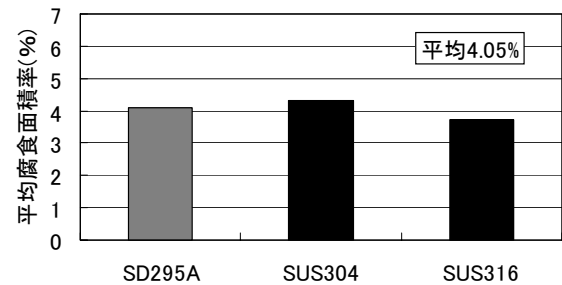


(a) ひび割れ幅大試験体

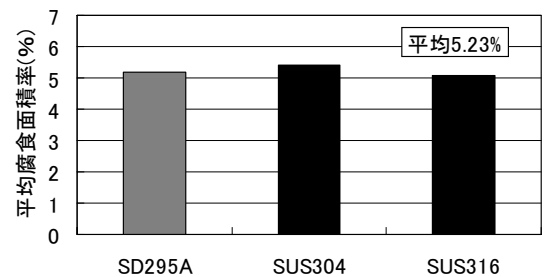


(b) ひび割れ幅小試験体

図－６ EPMA 測定結果



(a) 塩化物イオン量 0.6kg/m^3



(b) 塩化物イオン量 1.2kg/m^3

図－７ 異種金属接触腐食試験結果

SUS304 で 17kg/m^3 以上、SUS316 で 22kg/m^3 以上であることが確認されており、ステンレス鉄筋の腐食発生限界 Cl 濃度はこれらの値を上回るものと思われる。

表－8 隙間腐食試験結果

Cl 量	基準鋼材	SUS304		SUS316	
		一般部	接触部分	一般部	接触部分
5kg/m ³	14.33%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
10kg/m ³	14.70%	0.00%	0.02%	0.05%	0.04%
15kg/m ³	61.52%	0.10%	0.02%	0.18%	0.07%
20kg/m ³	55.71%	0.00%	0.08%	0.06%	0.09%

3.2 異種金属接触試験および隙間腐食試験

(1) 異種金属接触試験

図－7 は、異種金属接触試験結果を塩化物イオン量 0.6kg/m³ と 1.2kg/m³ に分けて示したものである。平均腐食面積率は Cl 量 0.6kg/m³ で 4.05%，1.2kg/m³ で 5.23% と、Cl 量が大きくなると腐食面積率も増加している。しかし、主鉄筋の鋼種、すなわち普通鉄筋とステンレス鉄筋、ステンレス鉄筋での SUS304 と SUS316 とによる差は認められない。このような条件において、ステンレス鉄筋と普通鉄筋の接触による腐食は特に問題とならないことが確認された。

(2) 隙間腐食試験

表－8 は、隙間腐食試験の結果を示したものである。普通鉄筋を使用した基準鋼材は、Cl 量 5kg/m³ で 10% 以上、15kg/m³ で 60% を超える大きな腐食面積率となっている。これに対して、ステンレス鉄筋は腐食が生じて表面のみと軽微で、腐食面積率が最大でも 0.2% 以下であった。また、鉄筋単体の部分と重ね継手部での差はなく、重ね継手部において隙間腐食は特に問題とならないことが明らかとなった。

4. まとめ

コンクリート中でのステンレス鉄筋の耐食性能について、実験的検討から得られた知見を下記に示す。

- (1) ステンレス鉄筋は、18.5 ヶ月間鉄筋位置において Cl 濃度 10kg/m³ を超える高濃度 Cl 環境条件下でも、腐食の発生が認められなかった。本実験では SUS304 が Cl 濃度 17.7kg/m³ を、そして SUS316 が 22.9kg/m³ を確認しており、腐食発生限界 Cl 濃度はこれを上回る値と推

定される。

- (2) 重ね継手の鉄筋接触による隙間腐食およびステンレス鉄筋と普通鉄筋との異種金属接触腐食は、ステンレス鉄筋において特に問題とならないことが実験結果から明らかとなった。

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) 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
- 3) 河村彰男・山路 徹・河野広隆・長瀧重義：コンクリート中のステンレス鉄筋の耐腐食性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1019-1024，2006
- 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) ASTM C 876 : Half cell potentials of reinforcing steel in concrete, 1977
- 6) 後藤幸正・大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第 294 号，pp.85-100，1980 年 2 月