

論文 塩化物イオンを含んだコンクリート中の各種 Cr 鋼防食鉄筋の腐食抵抗性に関する研究

太 星 鎬^{*1}・野口 貴文^{*2}・兼松 学^{*3}・宇城 工^{*4}

要旨：鉄筋コンクリート構造物の置かれる腐食環境に応じた所要の腐食抵抗性を有する Cr 鋼防食鉄筋に関する基礎研究として、Cr 含有量が異なる 8 種類の鉄筋を各々 5 水準の塩化物イオン含有量コンクリートに設置し、腐食促進養生を行った。その後、腐食促進養生 155 サイクルまでの自然電位やひび割れ幅の経時変化、腐食面積率、腐食減量率を測定し、Cr 鋼防食鉄筋の腐食抵抗性に関して検討した。その結果、塩化物イオン含有量の相違に関わらず Cr 含有率の増加とともに Cr 鋼防食鉄筋の腐食抵抗性が高まること、また、塩化物イオン含有量が 1.2, 2.4kg/m³ の場合には、Cr 含有率がそれぞれ 5%, 9% 以上の Cr 鋼防食鉄筋において腐食抵抗性が確認された。

キーワード：Cr 鋼防食鉄筋，腐食抵抗性，発錆限界塩化物イオン量，腐食促進養生

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC と略記）構造物は、最終的にすべて鉄筋腐食による RC 構造物の耐力低下につながると考えられる¹⁾。このような現状を踏まえ、現在に至るまで鉄筋の防食を目的した多数の研究がなされてきたが、それらの研究は、コンクリートの品質改善による防食性の向上に重点が置かれる傾向にあった。しかし、今後、RC 構造物には 100 年を超える長寿命化が期待される中、コンクリートの改善だけでは決して十分とは言えずかつ現実的とも言えない。

一方、欧米においては、既に鉄筋自体の改質による防食性の向上方法として、耐食性に優れたステンレス鉄筋が規格化され、塩害地域を中心に使用されているが、日本では防食鉄筋に関する研究は多くないのが現状である²⁾。ただ、ステンレス鉄筋もその優れた耐食性にもかかわらず高コストが理由で一般的に採用されるには至っていない。したがって、合金元素（Cr, Ni など）の含有量を減少させ、普通鋼と同一工程

で製造でき、なおかつ耐食性を有するステンレス鉄筋（以下 Cr 鋼防食鉄筋と略記）を開発できれば、RC 構造物の長寿命化を図ることができると考えられる。筆者らは、既報³⁾で、Cr 鋼防食鉄筋の Cr 含有率と発錆限界塩化物イオン量の関係を究明することを目的として、腐食促進養生 50 サイクルまでの Cr 鋼防食鉄筋の腐食抵抗性に関して検討した。しかし、短期間の腐食促進養生に基づいた結論なので、継続的な実験の遂行が必要であった。従って、本研究では既報に継続し、腐食促進養生 155 サイクルまでの自然電位やひび割れ幅の経時変化、腐食面積率、腐食減量率を測定し、Cr 鋼防食鉄筋の腐食抵抗性に関して検討した。

2. 実験概要

Cr 含有量が異なる 8 種類の鉄筋を各々塩化物イオン含有量 0.3, 0.6, 1.2, 2.4, 24kg/m³ のコンクリートに設置し、ミクロセル腐食が形成されると想定される供試体を製作した。また、図 - 1 のように 1 体の供試体には 2 種類の鉄筋

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 工修（正会員）

*2 東京大学助教授 工学系研究科建築学専攻 工博（正会員）

*3 東京大学助手 工学系研究科建築学専攻 工修（正会員）

*4 JFE スチール研究所研究員 ステンレス鋼研究部 工博

を左右に分けて、同種の鉄筋を上下1本ずつ2本配置した。供試体は材齢7日まで封かん養生を行った後脱型し、恒温恒湿室（ 20 ± 3 ， $50 \pm 5\%$ ）で1週間の気中養生を行った。その後、腐食促進養生155サイクルまでの自然電位やひび割れ幅の経時変化、腐食面積率、腐食減量率を測定した。表-1に実験因子及び水準を示す。また、表-2と表-3にはそれぞれ鋼材の基本組成および使用材料の物性を示す。

3. 実験方法

腐食促進養生5サイクル終了毎に、鉄筋の自然電位やひび割れ幅を測定した。また、腐食促進養生50、65、155サイクルになった時点で各々供試体を割裂して鉄筋を取り出し、鉄筋の腐食面積率及び腐食減量率の測定を行った。腐食促進養生50、65サイクルは、各々SD345鉄筋を設置した塩化物イオン含有量 2.4 kg/m^3 、 1.2 kg/m^3 の供試体の表面に0.3mmのひび割れが発生した時点である。なお、155サイクルはSD345鉄筋を設置した塩化物イオン含有量 0.6 kg/m^3 の供試体の表面に0.1mmのひび割れが発生した時点とした。

3.1 腐食促進養生

各供試体は高低温乾湿繰返し養生に供し、鉄筋の腐食促進を図った。高低温乾湿繰返しは、高温高湿状態（温度 60 ，湿度 95% ）1日、低温低湿状態（温度 30 ，湿度 50% ）1日を1サイクルとした。

3.2 ひび割れ幅

ひび割れ幅の測定は、腐食促進養生5サイクル終了毎に、クラックスケールを用いて鉄筋のかぶり側のコンクリート表面から鉄筋に沿って50mm間隔で行った。

3.3 自然電位

自然電位の測定は、腐食促進養生5サイクル終了毎に、対極に飽和銅硫酸銅電極（CSE）を用いて、ひび割れ幅の測定を行った同所のコンクリート表面で行った。なお、供試体は測定前日に水中に3時間浸漬させた後、供試体が乾燥

表 - 1 実験因子及び水準

要 因	水 準
W/C	60%
塩化物量 ^{*)}	0.3，0.6，1.2，2.4， 24 kg/m^3
鉄筋	8水準
かぶり厚さ	20mm

*コンクリート 1 m^3 当たりC0の質量

表 - 2 鋼材の基本組成

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
SD345	0.2280	0.31	1.34	0.029	0.020	0.084	0.04	0.016
0Cr	0.0120	0.32	0.50	0.031	0.006	0.005	0.01	0.001
5Cr	0.0150	0.28	0.53	0.027	0.006	5.020	0.01	0.001
9Cr	0.0107	0.28	0.53	0.028	0.006	9.140	0.01	0.001
11Cr	0.0117	0.28	0.53	0.028	0.004	11.00	0.01	0.001
13Cr	0.0117	0.28	0.53	0.028	0.004	13.050	0.01	0.002
16Cr	0.0113	0.29	0.53	0.027	0.004	15.980	0.01	0.002
SUS304	0.0630	0.31	1.01	0.026	0.006	18.360	8.28	0.053

表 - 3 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細 骨 材	川砂（絶乾密度2.52,吸水率1.42,粗粒率2.73）
粗 骨 材	砕石（絶乾密度2.64,吸水率0.59,粗粒率6.75）
練混ぜ水	水道水
混 和 剤	AE剤
塩化物量調整試薬	NaCl(一級試薬)

表 - 4 コンクリートの調合表

塩化物含有量 (Cl kg/m^3)	W/C (%)	W (kg/m^3)	質量 (kg/m^3)			s/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	AE剤 (g/m^3)
			C	S	G				
0.3	60	185	308	810	970	46	18	4.5	20
0.6									
1.2									
2.4									
24									

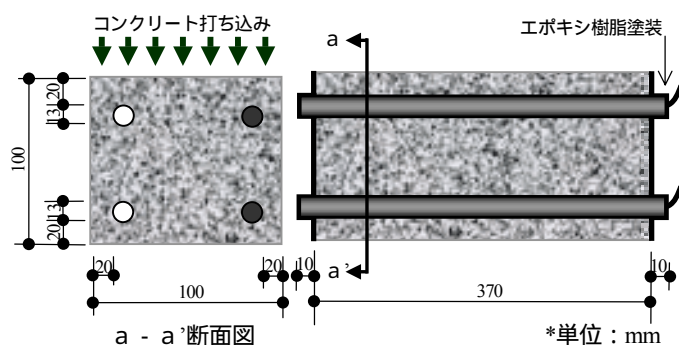


図 - 1 供試体の寸法

しないように湿布でくるみ、ビニール袋の中に入れて1日保管し、供試体の含水状態を調整した。

3.4 腐食面積率

腐食促進養生 50, 65, 155 サイクルの時点で、供試体を解体し、鉄筋を取り出した。その後、鉄筋に生じた錆の状況を透明シートを用いて複写し、錆の部分を黒く塗りつぶした後自動面積測定用ソフトウェアを利用して腐食面積率を計算した。

3.5 腐食減量率

腐食減量率の測定は、腐食促進養生 50, 65, 155 サイクルの時点で、日本コンクリート工学協会「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準（案）コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠して行った⁴⁾。なお、取り出した鉄筋のうち、SD345, 0Cr および 5Cr についてはクエン酸二アンモニウム 10% 水溶液、Cr 含有率が 5% を超える鉄筋については硝酸 30% 溶液に浸漬して除錆した後、電子天秤を用いて鉄筋の重量を 0.01g まで測った。また、式(1)を用いて腐食減量率を求めた。

$$\Delta W = \frac{(W_o - W) - W_s}{W_o} \times 100 \quad (1)$$

ΔW : 腐食減量率 (%)

W_o : 最初の鉄筋の質量 (g/cm)

W : 除錆後の鉄筋質量 (g/cm)

W_s : 非腐食部の溶解量 (g/cm)

4. 実験結果および考察

4.1 ひび割れ幅

図 - 2 に塩化物イオン含有量ごとに各種鉄筋のかぶり側のコンクリート表面に生じたひび割れ幅の経時変化を示す。図 - 2 によればひび割れ幅は、鉄筋の相違に関わらず塩化物イオン量が多い程度増加する傾向を示した。一方、塩化物イオン含有量 0.3 および 0.6kg/m³ に対しては、Cr が含有されてない SD345 および 0Cr の場合、155 サイクルで約 0.1mm 以下のひび割れが測定された。また、土木学会において炭素鋼の発錆

限界塩化物イオン量の下限值として設定⁵⁾されている塩化物イオン含有量 1.2kg/m³ では、Cr 含有率が 5% 以上の鋼材であれば腐食促進養生 155 サイクルまではひび割れは見られなかった。なお、2.4kg/m³ の場合は SD345 および 0Cr のみならず 5Cr でも 80 サイクルで 0.05mm のひび割れが生じたが、腐食促進養生の増加に伴いひび割れ幅の急激な増加は見られなかった。なお、Cr 含有率が 9 以上の鋼材ではひび割れが発生しなかった。塩化物イオン含有量 24kg/m³ では全種の鉄筋においてひび割れが観測された。図 - 3 には、155 サイクルに対して、塩化物イオン含有量 2.4kg/m³ の供試体に設置された SD345, 5Cr 及び 9Cr のひび割れ幅や錆び状況を示す。

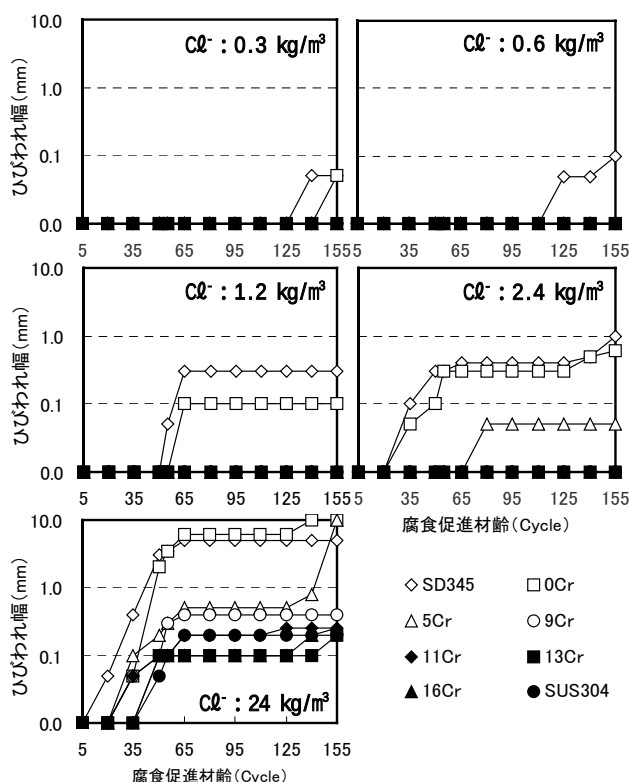


図 - 2 ひび割れ幅の経時変化に対する塩化物イオン含有量の影響

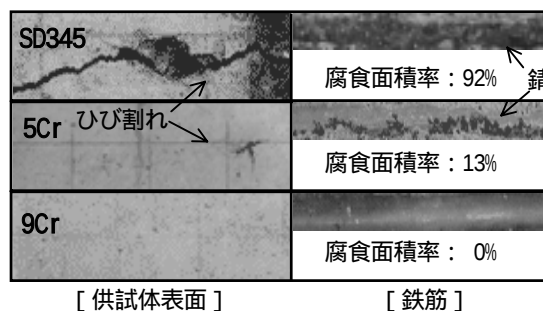


図 - 3 ひび割れ幅及び錆びの状況 [155 サイクル, 2.4kg/m³]

4.2 自然電位

図 - 4 に鉄筋の種類ごとに塩化物イオン含有量の相違が鉄筋の自然電位の経時変化に及ぼす影響を示す。グラフの太い実線は ASTM C 876-77 の腐食判断基準⁶⁾によれば 90%確率で腐食していると評価される電位値 -0.35V (vs CSE) である。図 - 4 によれば自然電位は鉄筋の相違に関わらず塩化物イオン含有量が多いほど卑になっている。また、同量の塩化物イオン含有量に対しては Cr 含有率が多い鉄筋ほど貴な値を示した。それは、含有された Cr と酸素の反応によって鉄筋の表面に強固な不動態被膜が形成されたためである⁷⁾。一方、SD345 および 0Cr の場合は塩化物イオン含有量 0.3 および 0.6kg/m^3 に対して 5 サイクルで既に ASTM の腐食判断基準である -0.35V に近い値が測定されたが、Cr 含有率 5% および 9% 以上の鋼材は、各々塩化物イオン含有量 1.2kg/m^3 および 2.4kg/m^3 に対して、腐食促進養生 155 サイクルまで -0.35V より貴な値を示した。しかし、腐食促進養生が 155 サイクルに増加していくに伴い -0.35V に近づく傾向が見られた。なお、SUS304 のステンレス鋼材は全塩分に対して -0.35V 以上の自然電位を示した。したがって、以上の自然電位測定結果によれば、塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 および

2.4kg/m^3 のコンクリートにおいては、各々 5% 以上および 9% 以上の Cr 含有率を有する Cr 鋼防食鉄筋が腐食抵抗性を持っていると考えられる。

4.3 腐食面積率

図 - 5 に塩化物イオン含有量ごとに各種鉄筋の腐食面積率の経時変化を示す。腐食面積率は供試体に上下 1 本ずつ配置された 2 本の鉄筋の平均値とした。腐食した鉄筋では、上部・下部鉄筋に関わらずおおむね鉄筋の下面に腐食が観察された。それは、コンクリートのブリージングによって鉄筋の下部にすき間が形成され、そのすき間部分をアノードとする濃淡電池が形成されたためであると考えられる⁸⁾。図 - 5 によれば鉄筋の腐食面積率は、塩化物含有量の相違に関わらず Cr 含有率の多い鉄筋ほど腐食面積率が減少する傾向を示した。また、同種の鉄筋では、塩化物イオン含有量が増加すると伴い高まった。一方、塩化物イオン含有量 0.3 および 0.6kg/m^3 に対しては、SD345 および 0Cr のみで腐食面積率が測定された。その腐食面積率は腐食促進養生材齢の増加に伴い徐々に増加し、腐食促進養生 155 サイクルでは約 50% の腐食面積率を示した。また、塩化物イオン含有量 1.2kg/m^3 では 5Cr の場合、65 サイクルで約 6% の腐食面積率が測定されたが、155 サイクルま

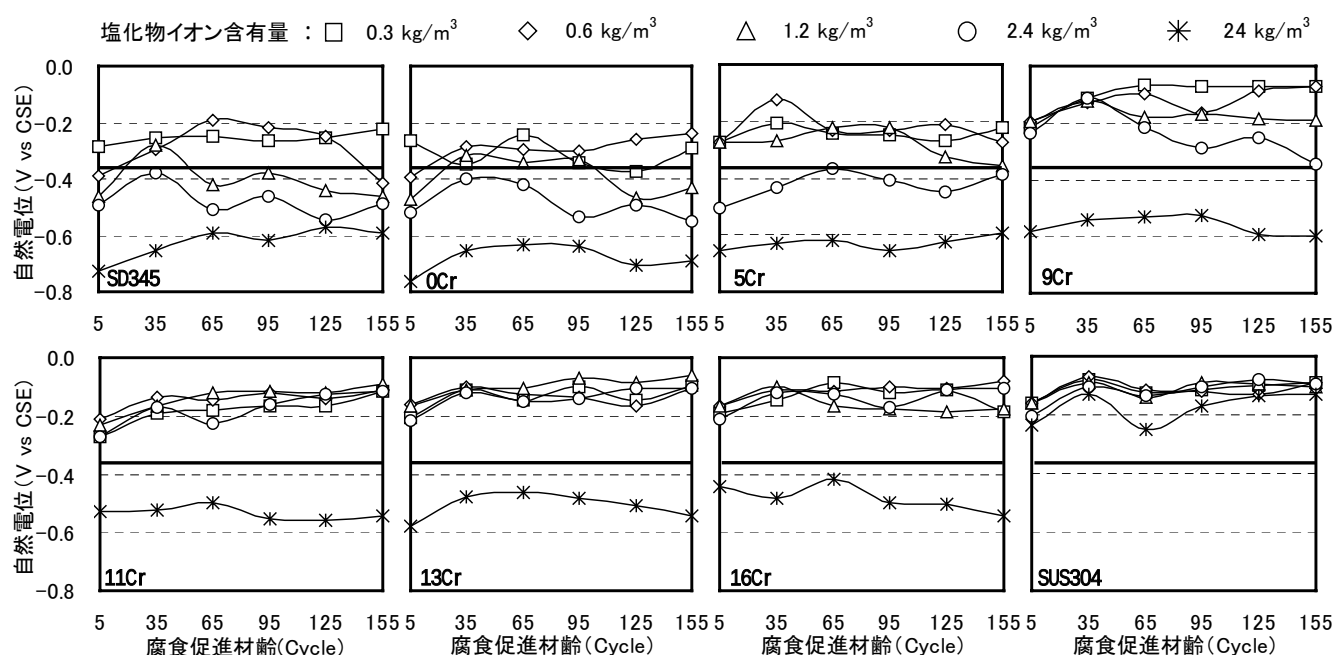


図 - 4 自然電位の経時変化に対する塩化物イオン含有量の影響

で腐食面積率の増加は見られなかった。なお、塩化物イオン含有量 2.4kg/m^3 に対して、SD345 および 0Cr の場合は、65 サイクルまで腐食面積率が急激に増加し、155 サイクルに至るとほぼ 100% に近づいている。しかし、5Cr では、塩化物イオン含有量 1.2kg/m^3 と同様で腐食促進養生が増加しても腐食面積率の急激な増加は見られなかった。また、Cr 含有量 9% 以上であれば 155 サイクルまで腐食が発生しなかったことにより、Cr 含有量 9% 以上の Cr 鋼防食鉄筋は塩化物イオン含有量 2.4kg/m^3 に対して腐食抵抗性を持っていると考えられる。塩化物イオン含有量 24kg/m^3 は、5Cr の場合、SD345 および 0Cr で見られた腐食促進養生の増加に従う腐食面積率の急激な増加が見られた。しかし、Cr 含有量 9% 以上の Cr 鋼防食鉄筋の場合は腐食面積率の急激な増加は測定されなかった。また、Cr 含有量 13% 以上の鉄筋であれば腐食面積率が 10% 以下に抑制される結果となった。なお、SUS304 は 24kg/m^3 においても腐食は生じていない。以上より、155 サイクルまでの腐食面積率の実験結果によれば、塩化物イオン含有量 1.2kg/m^3 以下においては 5Cr 以上の鋼材、塩化物イオン含有量 2.4kg/m^3 に対しては Cr 含有率 9% 以上の鋼材で腐食抵抗性が期待されると考えられる。

4.4 腐食減量率

図 - 6 に塩化物イオン含有量ごとに各種鉄筋の腐食減量率の経時変化を示す。腐食減量率は上部・下部鉄筋の平均値とした。図 - 6 によれば、腐食減量率は鉄筋の種類の相違にもかかわらず腐食促進養生材齢が増加すると伴い高まった。また、同量の塩化物イオン含有量に対して、Cr 含有率の多い鉄筋ほど減少する傾向を示した。なお、鉄筋の種類に関わらず塩化物イオン含有量が増加するとともに高まった。その傾向は SD345 および 0Cr の場合に著しく、塩化物イオン含有量が 0.3 および 0.6kg/m^3 の場合、3% 以下であった腐食減量率が塩化物イオン含有量の増加とともに急激に高まった。そのような現象は腐食促進養生が増加する程度著しかった。また、塩化物イオン含有量 1.2kg/m^3 に対して SD345 の場合、腐食促進養生 155 サイクルで 3% を超える腐食減量率が測定されたが、5Cr では、155 サイクルまで 0.3% の微少な腐食減量率が見られた。なお、塩化物イオン含有量 2.4kg/m^3 の場合、酸素含有量が多い SD345 の腐食減量率の増加が著しく、155 サイクルでは 0Cr の 3 倍程度になった。また、5Cr では腐食促進材齢に伴い徐々に増加する傾向を示したが、Cr 含有量 9% 以上の鋼材では極微の腐食減量率を測定された。なお、塩化物イオン含有量

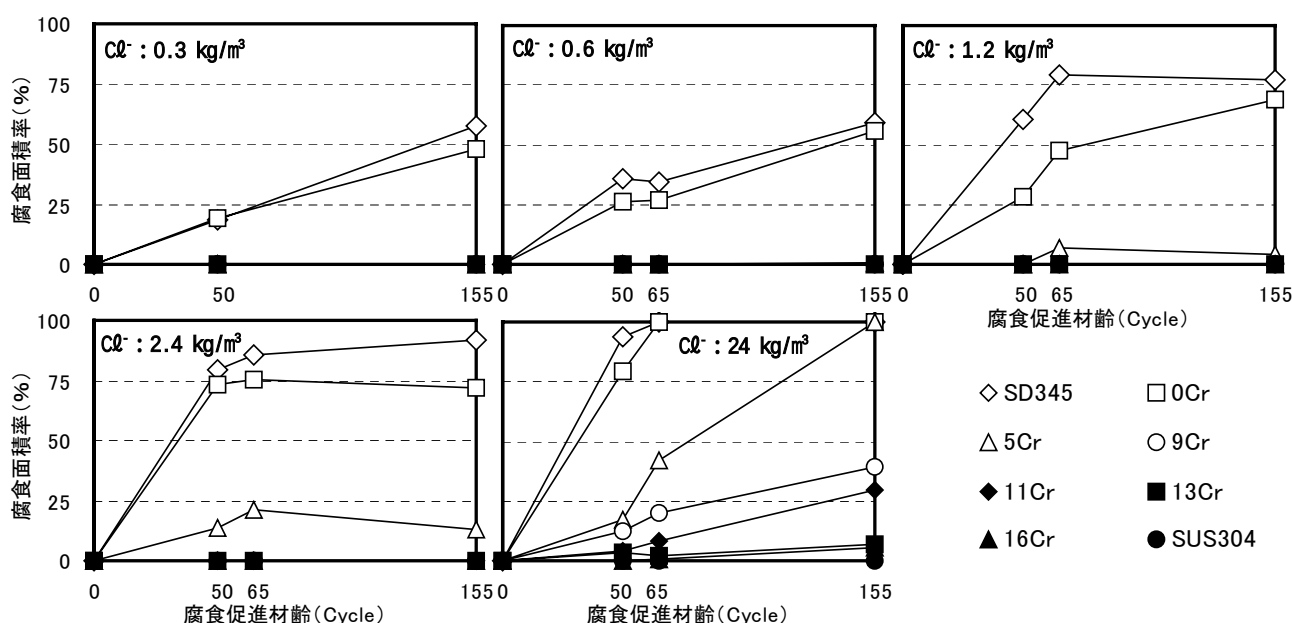


図 - 5 腐食面積率の経時変化に対する塩化物イオン含有量の影響

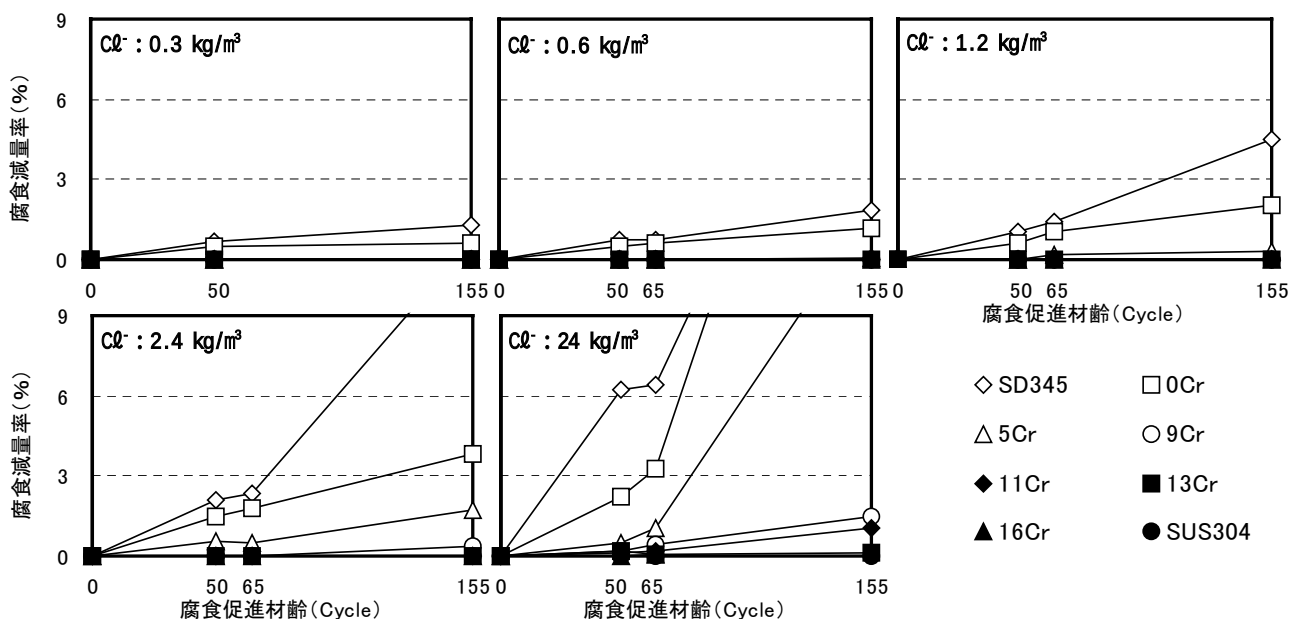


図 - 6 腐食減量率の経時変化に対する塩化物イオン含有量の影響

24kg/m³ に対して，155 サイクルにおいて 9Cr は 1.5%，Cr 含有量 11%以上の Cr 鋼防食鉄筋では 1%以下の腐食減量率が測定された。以上より，155 サイクルまでの腐食減量率の実験結果によれば，塩化物イオン含有量 1.2kg/m³ 及び 2.4kg/m³ においては各々 Cr 含有率 5%以上および 9%以上の鋼材で腐食抵抗性が期待されると考えられる。

4. まとめ

- (1)塩化物含有量に関わらず Cr 含有率が多い鉄筋ほど腐食面積率及び腐食減量率は減少した。これは，Cr と酸素の反応によって鉄筋の表面に形成された不動態被膜より，塩化物に対する腐食抵抗性が向上した結果だと考えられる。
- (2)塩化物イオン含有量に対して，防食に必要な Cr 含有率は以下のものであった。

Cl^- (kg/m ³)	所要 Cr 含有率 (%)以上)
1.2	5
2.4	9
24	11

今後，Cr 鋼防食鉄筋に関する研究を継続する予定である。

参考文献

- 1) 李翰承：腐食劣化した鉄筋コンクリート構造部材の耐力性能評価及び補強に関する研究，東京大学博士論文，pp.1.1-1.2，1997
- 2) 山路徹他ほか：コンクリート中におけるステンレス鉄筋の腐食性状，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告書，pp.69-74，第 1 巻，2001
- 3) 太星鎬ほか：コンクリート中の各種 Cr 鋼防食鉄筋の防食性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol24，No.1，pp.813-818，2002.6
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準（案），JCI - SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」pp.1-2
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編），- 耐久性照査型 -，2000
- 6) ASTM C 876：Half cell potentials of reinforcing steel in concrete, 1977
- 7) ステンレス協会：ステンレス鋼の基礎知識，p.2，1984
- 8) 檉野紀元：鉄筋コンクリート構造物の耐久性「鉄筋の腐食とその対策」，pp.28-29，1993