

論文 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

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防食性を有する Cr 鋼防食鉄筋に関する基礎研究として、数種の Cr 鋼防食鉄筋を塩化物イオン含有量 0.3, 0.6, 1.2, 2.4, 24kg/m³ のコンクリート供試体に埋設し、腐食促進養生を行い、Cr 鋼防食鉄筋の Cr 含有率と発錆限界塩化物イオン量との関係について検討した。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 鋼防食鉄筋の防食性が高まること、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防食性が確認された。

キーワード：Cr 鋼防食鉄筋, 防食性, 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）は、一般に耐久性及び経済性が優れていることから広い範囲の構造物に使用されており、その耐用年数は半永久的と認識されてきた。しかし、昭和 60 年頃より、高度経済成長期に建設された RC 構造物の経年劣化及び早期劣化が大きな社会的問題となっている。さらにその劣化現象は 2005～2010 年にかけてよりいっそう顕在化することが指摘されている^{1),2)}。

一方、RC 構造物の劣化は多様な劣化因子が相互に絡まって複合的な劣化形態を示すが、最終的には、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³⁾。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、かぶり厚さや水セメント比の制限あるいは防錆剤の添加など、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、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⁴⁾。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。高コストの原因は、高価な合金元素（Cr, Ni など）の添加や一般の製鉄工程以外の追加工程が必要であることにある。しかし、現在、上昇一方である RC 構造物の補修費用に鑑み、ライフサイクルコストがかからない防食鉄筋に関する研究開発が望まれている。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、過剰なかぶり厚さや水セメント比の制限も緩和できる。その結果、腐食環境に応じたコストパフォーマンスの高い防食鉄筋を選定することができるようになり、コンクリート構造物の長寿命化を図ることができると考えられる。

本研究では、腐食環境に応じた Cr 鋼防食鉄筋の開発に向け、Cr 鋼防食鉄筋の Cr 含有率と発錆限界塩化物イオン量と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（100 日）までの自然電位の経時変化、腐食面積率、

*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 川崎製鉄技術研究所研究員 ステンレス鋼研究部門 工博

腐食減量率などを測定し、Cr鋼防食鉄筋の防食性に関して検討した。

2. 実験概要

2.1 実験因子及び水準

表-1 に実験因子及び水準を示す。コンクリートの水セメント比は 60%、1 種類とした。また、Cr 鋼防食鉄筋の Cr 含有率と発錆限界塩化物イオン量との関係を明らかにするため、塩化物含有量を 5 水準、鉄筋の種類を 8 水準とした。また、かぶり厚さは 20mm とした。

2.2 使用材料の物性

2.2.1 鉄筋

鉄筋は、JIS G 3112 (鉄筋コンクリート用棒鋼) の SD345 規格品に Cr の含有率を変化させた Cr 鋼防食鉄筋 6 種類と SUS304 のステンレス鉄筋を合わせた合計 8 水準である。なお、鉄筋は径 13mm の丸鋼で、酸化被膜を除去して用いた。表-2 に鋼材の基本組成を示す。

2.2.2 コンクリートの材料および調合

コンクリートの使用材料を表-3 に示す。腐食促進養生によって腐食が促進されるように水セメント比は比較的大きな 60% とした。また、塩化物イオン含有量はコンクリート 1 m³ 当たり 0.3, 0.6, 1.2, 2.4, 24kg/m³ の 5 水準であり、NaCl(一級試薬)を用いて調整した。なお、NaCl は練混ぜ水に溶解して用いた。表-4 にコンクリートの調合表および 28 日圧縮強度を示す。

2.3 供試体の形状・寸法

本研究では、図-1 のように各々の鉄筋をかぶり厚さ 2cm で設置後、所定の塩化物イオン

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, 24kg/m ³
鉄筋	8 水準
かぶり厚さ	20mm

*コンクリート 1 m³ 当たり Cl⁻ 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	0.04	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 (絶乾比重 2.52, 吸水率 1.42, 粗粒率 2.73)
粗骨材	碎石 (絶乾比重 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 (Clkg/m ³)	W/C (%)	W (kg/m ³)	質量 (kg/m ³)			s/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	AE 剤* (g/m ³)	圧縮強度 (MPa)
			C	S	G					
0.3	60	185	308	810	970	46	18	4.5	20	27.4
0.6										26.8
1.2										29.0
2.4										28.5
24										23.4

*AE 剤使用量：セメント重量の 0.0065%

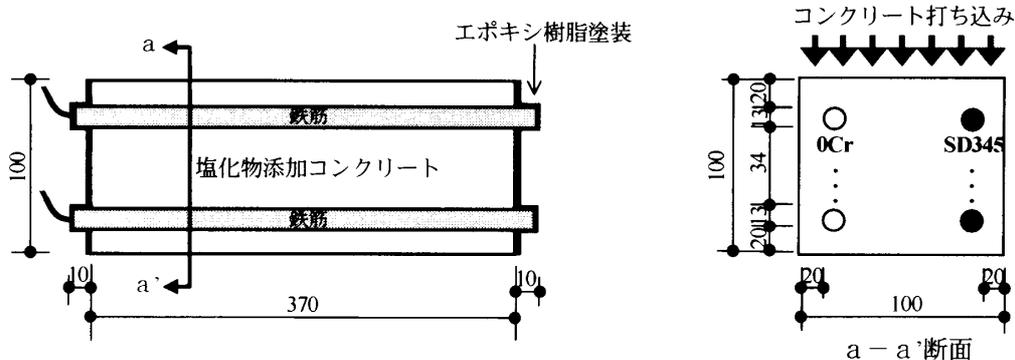


図-1 供試体の形状・寸法

*単位；mm

含有量のコンクリートを打ち込んでマイ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。1体の供試体には2種類の鉄筋を左右に分けて、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（ $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 、 $50 \pm 5\%$ ）で1週間の気中養生を行った。なお、気中養生の期間中、自然電位測定のために鉄筋端部に測定用コードをハンダ付けし、供試体の両端面と鉄筋の両端部はエポキシ樹脂で被い、その部分からの腐食の開始を防いだ。

2.4 腐食促進養生

各供試体は上記の前養生の後、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°C 、湿度 95% ）1日、低温低湿状態（温度 30°C 、湿度 50% ）1日を1サイクルとした。

2.5 測定項目及び測定方法

腐食促進養生5サイクル終了毎に、鉄筋の自然電位を測定した。また、腐食促進養生50サイクルになった時点で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サイクルは、腐食促進養生を行った供試体のうち、SD345鉄筋を設置した塩化物イオン含有量 2.4 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。

2.5.1 自然電位

自然電位の測定は、対極に飽和硫酸銅電極（CSE）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。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。

2.5.2 鉄筋の腐食面積率

腐食促進養生50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、錆の部分黒く塗りつぶした後自動面積測定機

を利用して腐食面積率を計算した。

2.5.3 鉄筋の腐食減量率

腐食減量率の測定は、日本コンクリート工学会「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⁵⁾。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。すなわち、本研究の除錆処理では非腐食部も一部溶解するため、別に同種の健全な鉄筋を同じ除錆処理を行って非腐食部の溶解量（ W_s ）を求め、補正を行った。

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

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)

3. 実験結果および考察

3.1 自然電位

図-2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電位値 -0.35V (vs CSE) であり、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。図-2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⁾。一般に、Crの含有量が10%以上のCr合金鋼は炭素鋼より優れた防食性を持っていると言われる⁸⁾。

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、Cr が含有されてない SD345 および 0Cr の場合、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% 以上の Cr 鋼防食鉄筋においては、50 サイクルになっても -0.35V より貴な値を示した。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値として設定⁹⁾ されている塩化物イオン含有量 1.2kg/m^3 に対しては Cr 含有率が 5% 以上であれば、50 サイクルにおいても -0.35V 以上の自然電位を示したことにより、Cr 含有率 5% 以上の鋼材は塩化物イオン含有量 1.2kg/m^3 に対して防食性を持っていると考えられる。塩化物イオン含有量 2.4kg/m^3 では、SD345 および 0Cr のみならず 5Cr 鋼材においても腐食促進養生 5 サイクルから -0.35V 以下の自然電位を示したが、Cr 含有率 9% 以上の Cr 鋼防食鉄筋の場合は -0.35V より貴な値であった。また、塩化物イオン量 24kg/m^3 の場合には、SUS304 以外の全鉄筋で -0.35V 以下の自然電位が測定された。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 含有率を有する鉄筋が防食性を持っていると考えられる。

3.2 鉄筋の腐食面積率

図-3 に塩化物イオン含有量ごとに各種鉄筋の腐食面積率を鉄筋の設置位置（上部鉄筋と下部鉄筋）で区別して示す。上部鉄筋はコンクリートの打込み面から近い鉄筋である。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、鉄筋の上面をカソ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¹⁰⁾。このような現象はコンクリートを打ち込んだ面に近い上部鉄筋で生じやすい。図-3 によると、そのような現象は塩化物イオン含有量が 1.2kg/m^3 以上のコンクリートで見られた。腐食面積率については、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。なお、同種の鉄筋では、塩化物イオン含有量が増加するとともに腐食面積率が高まった。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 の場合に

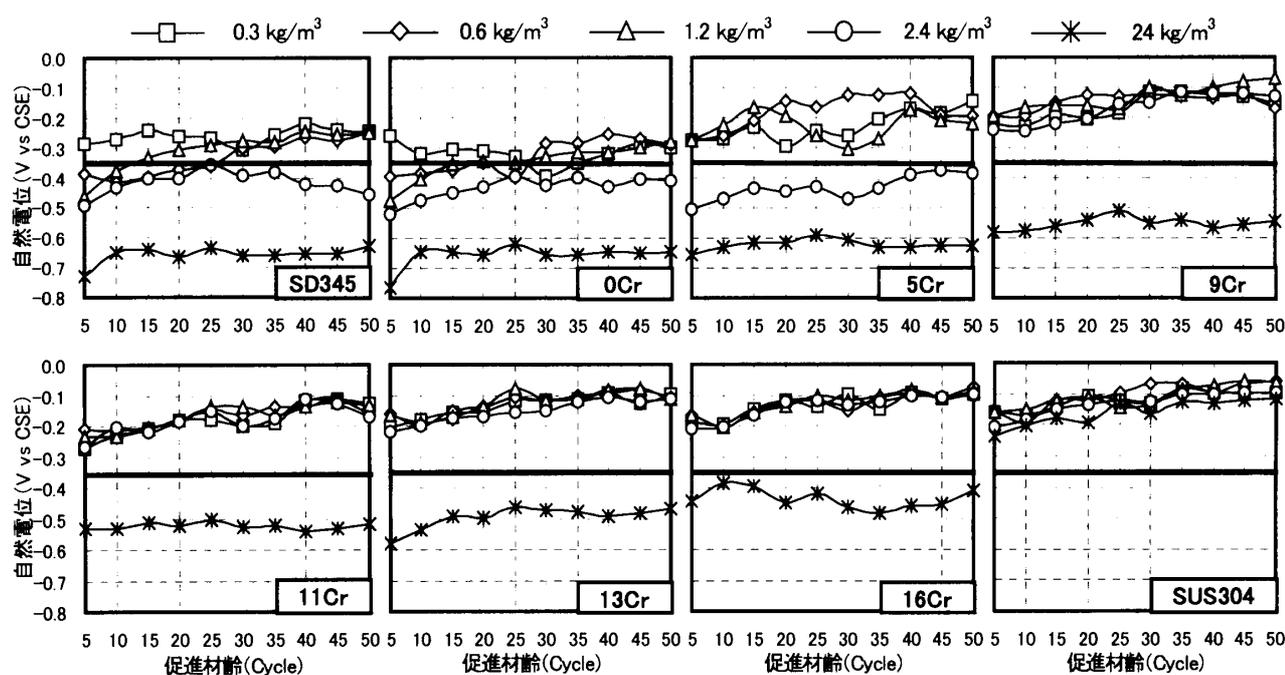


図-2 塩化物含有量に従う自然電位の経時変化

約 40%程度であった腐食面積率が、 2.4kg/m^3 の場合にはほぼ 100%に近づいている。

しかし、Cr 含有率が 5%の 5Cr の場合には、塩化物イオン含有量が 2.4kg/m^3 から 24kg/m^3 に増加しても腐食面積率の急激な増加は見られなかった。それは、塩化物イオン含有量が増加しても、Cr と酸素の反応によって形成された不動態被膜により鉄筋が保護されていたためだと考えられる。なお、9Cr の場合には、 24kg/m^3 の塩化物イオン含有量で約 20%の腐食面積率が測定された。

以上より、50 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 以上の鉄筋、塩化物イオン含有量 2.4kg/m^3 においては Cr 含有率 9%以上の鉄筋で防食性が期待されると考えられる。また、塩化物イオン含有量 24kg/m^3 に対しては Cr 含有率 11%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、SUS345 は 24kg/m^3 においても腐食は生じていない。

3.3 鉄筋の腐食減量率

図-4 に鉄筋の種類ごとに塩化物イオン含有量と腐食減量率の関係を示す。腐食減量率は上部・下部鉄筋の平均値とした。腐食減量率は鉄筋の種類に関わらず塩化物イオン含有量の増加

とともに増加した。SD345 および 0Cr の場合には、塩化物イオン含有量が 0.3kg/m^3 であっても腐食は生じ、 1.2kg/m^3 程度までは塩化物イオン量が増加しても腐食減量率はそれほど増大しない傾向にあった。ただし、塩化物イオン量が 1.2kg/m^3 を超えると腐食減量率は塩化物イオン量の増加に伴い増大し、塩化物イオンが 24kg/m^3 と相当多量に含有されている場合には、炭素含有量の多い SD345 の腐食減量率は 0Cr の 3 倍近くになった。

一方、5Cr では塩化物イオン含有量が 2.4kg/m^3 で腐食が発生したが、 24kg/m^3 に増加しても腐食減量率の急激な増加は見られなかった。これは腐食面積率の増加傾向と類似していた。

また、9Cr の場合は塩化物イオン含有量が 24kg/m^3 において約 0.2%の腐食減量率を示したが Cr 含有率 11%以上の鉄筋では 0.2%以下の微小な腐食減量率であった。図-5 には鉄筋の腐食減量率を塩化物イオン含有量および Cr 含有率の関係で示す。腐食減量率は同一塩化物イオン含有量において Cr 含有率が多いほど減少した。なお、Cr 含有率 0%の場合は、塩化物イオン含有量 0.3kg/m^3 で約 0.5%の腐食減量率が測定されたが、Cr 含有率 5%の場合は、 2.4kg/m^3 において約 0.5%の腐食減量率を示した。

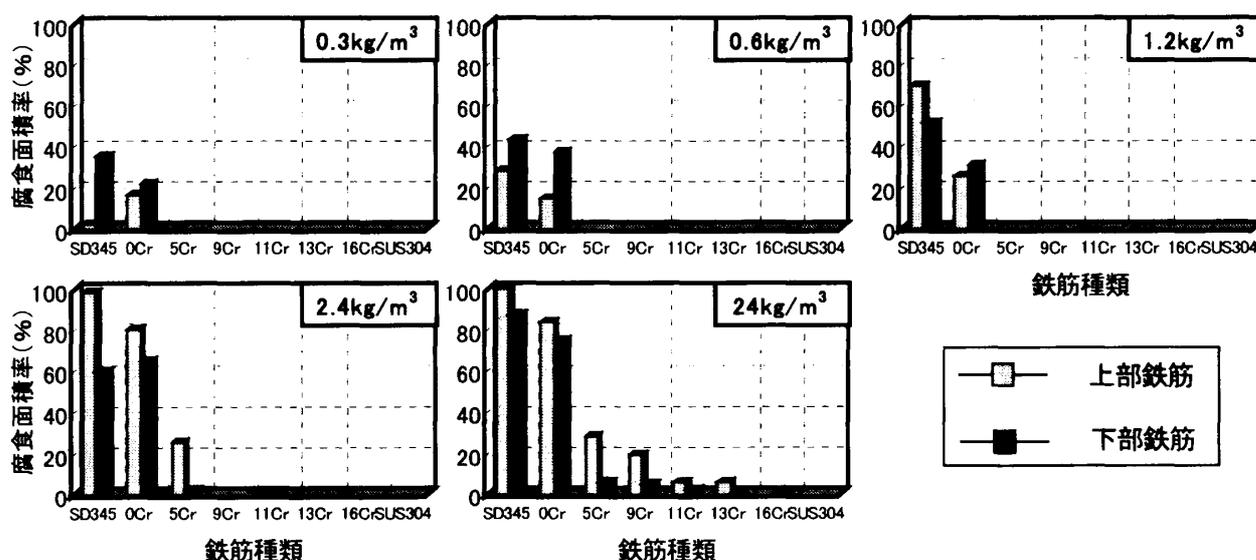


図-3 塩化物イオン含有量と腐食面積率

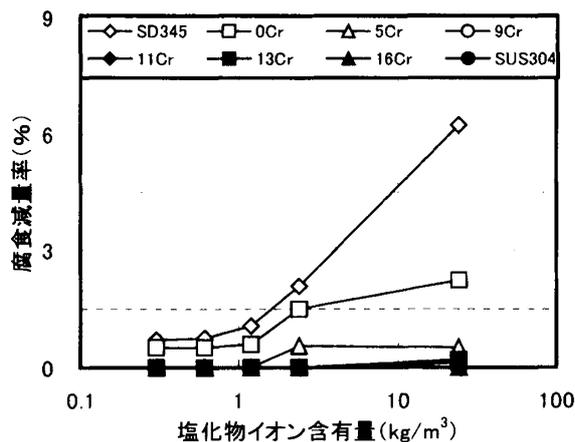


図-4 塩化物イオン含有量と腐食減量率

4. まとめ

本研究では、Cr 鋼防食鉄筋の Cr 含有率と腐食の生じない発錆限界塩化物イオン量の関係究明を目的として、腐食促進養生 50 サイクル (100 日) までの自然電位の経時変化、腐食面積率および腐食減量率の測定を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (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小さい。これは、Cr による不動態被膜の形成による塩化物に対する防食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が 1.2, 2.4kg/m³ に対しては、防食に必要な Cr 含有率はそれぞれ 5% 以上および 9% 以上である。
- (3) 塩化物イオン含有量が 24kg/m³ のコンクリートに対しては、まだ明確には言えないが、Cr 含有率 11% 以上の Cr 鋼防食鉄筋では防食性が期待できる。しかし、本結果は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る。

【謝辞】 本研究に際し、川崎製鉄(株)技術研究所の平沢淳一郎さんより様々の御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松下博通：コンクリート構造物の腐食対策

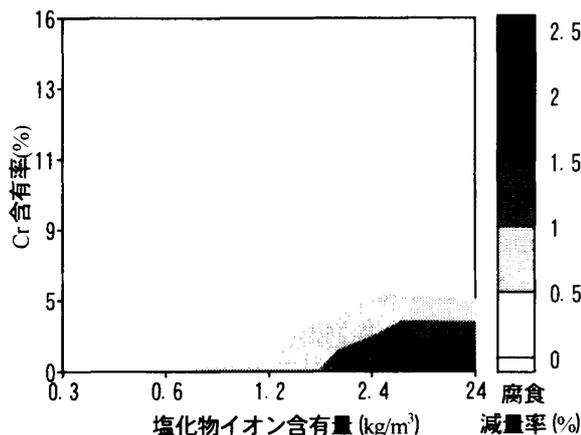


図-5 鉄筋の腐食減量率に及ぼす塩化物イオン含有量および Cr 含有率の影響

と今後の展望、セメント・コンクリート、No.62.4, pp.1-15, 1999

- 2) 廖年祈他：亜硝酸塩系防錆剤による塩化物含有コンクリート中の鉄筋防食手法に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.213-214, 1991
- 3) 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
- 4) 山路徹他：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
- 5) 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-SCI「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」pp.1-2
- 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) H.H. Uhlig : Corrosion Handbook, p.150, John Wiley & Sons, Inc, 1953
- 9) 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
- 10) 櫻野紀元：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