論文 中性化と塩害の複合劣化作用を受ける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・宇城 工*3

要旨:中性化と塩害の複合劣化作用下での Cr 鋼防食鉄筋の防食性の検討を目的として, Cr 含有率が異なる 10 種類の鋼材を各々4 水準の塩化物イオン含有量 0.3, 0.6, 1.2, 2.4kg/m³の コンクリートに埋設し,鉄筋の位置まで中性化促進養生を行った。その後,腐食促進養生 45 サイクルまでの自然電位の経時変化,腐食面積率,腐食減量率を測定し,Cr 鋼防食鉄筋 の防食性に関して検討した。その結果,中性化と塩害の複合劣化作用下の場合は,Cr 含有 率が低い鋼材ほど既報の塩害の実験結果と比べ,腐食面積率および腐食減量率が大きいこと, また,塩化物イオン含有量 2.4kg/m³においても,Cr含有率が 5%以上の鋼材において防食性 が確認された。更に,Cr含有率 9%以上のCr鋼防食鉄筋では優れた防食性が見られた。 キーワード:Cr鋼防食鉄筋,複合劣化,防食性,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,供用期間中,十分な耐久性を有して,要求 される性能を発揮しなければならない。しかし, 使用条件に対して適切な設計・施工がされてな い場合には、要求される期間まで健全に機能を 維持できず、予想以上に早期劣化する場合があ る。その RC 構造物の劣化機構は、中性化、塩 害, 凍害, 化学的腐食, アルカリ骨材反応など が考えられるが ¹⁾従来から, 各学会と協会では 中性化や塩害に起因する鉄筋腐食が中心として 取り上げられている²⁾。このような RC 構造物 の劣化は、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³⁾。 このような現状を踏まえ、現在に至るまで RC 構造物の劣化現象解明を目的とした多数の研究 がなされてきたが、それらの研究は、単独の劣 化機構によるものを中心として検討が行われて きた。しかし、現実の構造物は必ずしも単独の 劣化機構のみで劣化するわけではなく、複合的 な影響を受けることが多い。しかも、複合劣化

の場合は、各劣化現象の相互作用によって単独 劣化には見られない様々の現象を示すことがあ る⁴⁾。

一方,日本では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,防食鉄 筋に関する研究は多くないのが現状である。し かし,現在,RC構造物の補修費が増加する傾 向に鑑み,ライフサイクルコストが掛らない防 食鉄筋に関する研究開発が望まれている。従っ て,複合劣化作用下においても防食性を有する 防食鉄筋が開発できれば,過剰なかぶり厚さや 水セメント比の制限が緩和できるとともに RC 構造物の長寿命化を図ることも可能になると考 えられる。その一歩として,筆者らは既報⁵⁾で, 各々の塩化物イオン含有量に対して防食性を有 する Cr鋼防食鉄筋に関する研究を行った。

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、数多い研究の一部分として、 中性化と塩害の複合劣化作用を受けるコンクリ ート中の各種 Cr 鋼防食鉄筋の防食性に対して 検討を行った。

		_
工学研究科建築学専攻	工修(正会員)	
工学部建築学科助教授	工博(正会員)	
スチール研究所ステンレス鋼研究部主任研究員	工博	
	工学研究科建築学専攻 工学部建築学科助教授 スチール研究所ステンレス鋼研究部主任研究員	工学研究科建築学専攻 工修(正会員) 工学部建築学科助教授 工博(正会員) スチール研究所ステンレス鋼研究部主任研究員 工博

2. 実験概要

Cr 含有量が異なる 10 種類の鉄筋を各々塩化 物イオン含有量 0.3, 0.6, 1.2, 2.4kg/m³のコン クリートに設置し、図-1のような供試体を製 作した。また、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本づつ2 本配置した。供試体は材齢 14 日まで封かん養 生を行った後脱型し、恒温恒湿室(20±3℃, 50±5%) で1ヶ月間の気中養生を行った。そ の後、鉄筋の内側面の位置まで中性化促進養生 を行った。その後、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サイクルとした腐食促進養 生 45 サイクルまでの自然電位の経時変化, 腐 食面積率,腐食減量率を測定し,Cr 鋼防食鉄 筋の防食性に関して検討した。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 8 種類と SUS304 のステンレス鉄筋を合わせた 合計 10 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-1に

Steel	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Мо
SD345	0.2190	0.300	1.34	0.035	0.0190	0.081	0.04	0.01
0Cr	0.0117	0.300	0.50	0.031	0.0050	0.011	0	0
3Cr	0.0106	0.305	0.52	0.033	0.0060	3.070	0	0
5Cr	0.0112	0.266	0.52	0.030	0.0050	4.880	0	0
7Cr	0.0105	0.270	0.53	0.031	0.0050	7.150	0	0
9Cr	0.0114	0.270	0.52	0.029	0.0051	9.070	0	0
11Cr	0.0098	0.276	0.52	0.030	0.0050	11.110	0	0
13Cr	0.0108	0.270	0.51	0.029	0.0060	12.900	0	0
16Cr	0.0094	0.270	0.53	0.030	0.0050	16.090	0	0
SUS304	0.0620	0.297	1.02	0.030	0.0060	18.280	8.15	0.051

表-1 鋼材の基本組成



鋼材の基本組成を示す。コンクリートの使用材 料及び調合は既報⁵⁾と同様である.

3. 実験方法

3.1 中性化促進養生

温度 40℃,相対湿度 60%, CO2濃度 5%の条件で 7ヶ月間中性化促進養生を行った。また,中性化深さは,1ヶ月毎に切断した試料の内面にフェノールフタレイン 1%アルコール溶液を噴霧し,変色しない深さを計測することで求めた。

3.2 自然電位

自然電位の測定は,腐食促進養生15サイクル 終了毎に,対極に飽和銅硫酸銅電極(CSE)を 用いて,鉄筋のかぶり側のコンクリート表面か ら鉄筋に沿って行った。なお,供試体は測定前 日から水中に1日間浸漬させ,供試体の含水状 態を調整した。

3.3 腐食面積率,腐食減量率

腐食促進養生 15, 45 サイクルの時点で,供 試体を解体し,鉄筋を取り出した後,腐食面積 率及び腐食減量率を測定した。しかし, 塩化物 イオン含有量 0.3kg/m³の場合は、短期間の腐食 促進養生である 15 サイクルの時点において, あまり腐食が進行してないと判断し、腐食面積 率及び腐食減量率の測定を行ってない。また, 腐食面積率は、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。また、腐食減量率の場 合は、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 ⁰。なお, 取り出した 鉄筋のうち, SD345, 0Cr, 5Cr および 7Cr 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 7%を超える鉄筋に対しては硝酸 15%溶液に浸漬して除錆した後、電子天秤を用 いて鉄筋の質量を0.01gまで測った。また、式 (1)を用いて腐食減量率を求めた。

$\Delta W =$	$\frac{(Wo-W)}{Wo} \times 100 - Ws \times (\frac{100-S}{100}) \cdot \cdot (1)$
ΔW :	腐食減量率(%)
Wo:	最初の鉄筋の質量 (g)
W :	除錆後の鉄筋質量 (g)
Ws :	非腐食部の溶解率(%)
S :	腐食面積率(%)

4. 実験結果および考察

4.1 中性化深さ

図-2 に塩化物イオン含有量の違うコンクリ ート供試体の中性化深さの経時変化を示す。図 -2 によれば、中性化速度は塩化物イオン含有 量の相違にも関わらずほぼ同様である。また、 図-3 に供試体の内面にフェノールフタレイン 1%アルコール溶液を噴霧し、中性化の進行状況 を測定した一例を示す。図-3 に示したように 全ての供試体においてコンクリートのかぶり表 面から鉄筋の内側面の位置まで中性化が進んで いるのが確認された。







図-3 中性化の進行状況

4.2 自然電位

図-4 に塩化物イオン含有量ごとに各種鉄筋 の自然電位の経時変化を示す。グラフの太い実 線は電位値 - 0.35V (vs CSE) として, ASTM C 876 の腐食判断基準⁷⁾である。また,腐食促進 養生0サイクルとは,中性化促進養生終了後, 腐食促進養生開始の時点である。なお,既報⁵⁾ の実験結果の中で 50サイクル目の自然電位の結 果を同グラフに示し,本論の自然電位との比較 を行った。また,塩化物イオン含有量 0.3, 0.6kg/m³の場合,各々Cr含有率 13%,16%以上 の Cr 鋼材を実験の対象外とした。それは,Cr 含有率の高い鋼材の場合は,塩化物イオン含有 量 0.3, 0.6kg/m³ほどに対して防食性を有すると





判断したからである。図-4 によれば,自然電 位は塩化物イオン含有量の相違に関わらず Cr含 有率が高いほど貴な電位値を示した。しかし, 塩化物イオン含有量 0.3,0.6kg/m³の場合,それ ぞれ Cr含有率 11%,13%の Cr鋼材においても - 0.35V より卑な電位値となっている。また, 塩化物イオン含有量 1.2,2.4kg/m³においても, SUS304 のステンレス鋼材以外の全鋼材において - 0.35V より卑な値となった。しかし,既報⁵⁾ の塩害の場合,50 サイクル目の自然電位の結果 によれば,塩化物イオン含有量 2.4kg/m³に対し て,Cr含有量 5%以下の鋼材のみで - 0.35V より 卑な値となった。しかし,本論の腐食面積率と 腐食減量率の結果によれば,Cr含有率 9%以上

の Cr 鋼材の場合, -0.35V より卑な自然電位が 測定されたことにも関わらず腐食が見られてお らずほぼ完全な状態を保った。図-5 に塩化物 イオン含有量 2.4kg/m³においての各種 Cr 鋼防食 鉄筋の腐食状況を示す。一方, ASTM C 876 の 評価基準は、塩害を受ける橋床版のような構造 物を主対象としたもので, すべての環境下のコ ンクリート構造物へ適用できるとは限らない⁸⁾。 また、Cr が含有された Cr 鋼材の場合、炭素鋼 とは相違なアノード分極曲線を示す 9。従って, 本研究の場合、中性化および塩害の複合劣化作 用下での Cr 鋼材の腐食評価に適用できる新だな 評価基準が必要である。しかし、その評価基準 を定めるのは、数多い研究データを基づいて慎 重に判断すべきであり、より広範囲的なデータ の蓄積が行った後に譲る。

4.3 腐食面積率

図-6 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本づつ配置された2本の鉄筋の 平均値とした。なお、既報⁵⁰の実験結果の中で



図-6 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

50 サイクル目の腐食面積率を示し、本論の腐食 面積率の結果との比較を行った。図-6 によれ ば,鉄筋の腐食面積率は,塩化物イオン含有量 の相違に関わらず Cr含有率の多い鋼材ほど腐食 面積率が減少する傾向を示した。また、塩化物 イオン含有量 1.2kg/m³以下に対して Cr が含有さ れてない SD345 と 0Cr の場合は、既報⁵⁾の結果 とくらべ、腐食促進養生15サイクルの初期材齢 から大きい腐食面積率が測定された。しかし、 Cr 含有率 5%以上の鋼材においては、そのよう な増加は見られなかった。さらに、Cr 含有率 9%以上の Cr 鋼防食鉄筋では、既報⁵⁾の結果と同 様で腐食は殆ど見られなかった。また、塩化物 イオン含有量 2.4kg/m³の場合は, 既報 ⁵⁾の結果 と比べ、ほぼ同量の腐食面積率を示した。これ は、既報⁵⁾の塩化物イオン含有量 1.2kg/m³以下 の場合は、コンクリートの中に添加された塩化 物イオン含有量がフリーデル氏塩としてコンク リート内部に固定化されるセメント質量の 0.4%, 即ちコンクリート質量に対する塩化物イオン含 有量 1.2kg/m³より少なかったわけで, 塩化物に

対する激しい腐食が発生しなかったと考えられ る。しかし、本論の場合では、既にコンクリー ト内部に水和物として固定化された塩化物が中 性化の進行により,細孔溶液中へ遊離して未中 性化部分に濃縮されたことより,腐食促進養生 の以前に既に腐食が開始されたと考えられる。 このような影響は Cr が含有されてない SD345 と 0Cr において著しかった。また, Cr 含有率 3%の 3Cr の場合は、塩化物イオン含有量 0.3kg/m³に対してもあまり腐食抵抗性が見られ なかった。しかし、5Cr の場合は、塩化物イオ ン含有量 2.4kg/m³に対しても防食性を有すると 考えられる。更に、Cr含有率 9%以上の Cr 鋼防 食鉄筋の場合は、全塩化物イオン含有量に対し て腐食がほぼ見られなかったことから優れた防 食性が期待されると考えられる。

4.4 腐食減量率

図-7 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。また,既報⁵⁾ の実験結果の中で 50 サイクル目の腐食減量率 の結果も同クラブに示す。図-7 によると,腐



図-7 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

食減量率は,同量の塩化物イオン含有量に対し て、Cr 含有率の高い鋼材ほど減少する傾向で あった。従って、Cr が含有されてない SD345 および 0Crの場合は、高 Cr含有率の Cr鋼材と 比べ、全塩化物イオン含有量において大きい腐 食減量率を示した。また,腐食面積率の結果と 同様として、塩化物イオン含有量 1.2kg/m³以下 に対して SD345 と 0Cr の場合は、既報 ⁵⁾の結果 とくらべ、腐食促進養生 15 サイクルから大き い腐食減量率が見られた。しかし, Cr 含有率 5%以上の鋼材の場合、腐食減量率はほぼ測定 されなかった。なお、Cr含有率 3%の 3Crの場 合は, SD345 と 0Cr より若干低い腐食減量率を 示したが優れた防食性は期待出来ないと考えら れる。しかし、Cr含有率 5%の 5Cr と 9%の 9Cr の Cr 鋼防食鉄筋の場合は、全ての塩化物イオ ン含有量において防食性が確認された。

以上の結果によれば、中性化と塩害の複合 劣化作用下に対しても Cr 含有率の増加ととも に鋼材の防食性が高まること、また、その防食 性は Cr 含有率 5%以上の Cr 鋼材で見られてい る。さらに、Cr 含有量 9%以上の Cr 鋼防食鉄 筋において優れた防食性が期待できると考えら れる。

5. まとめ

本研究では、中性化と塩害の複合劣化作用を 受けるコンクリート中の各種 Cr 鋼防食鉄筋の 防食性に対して検討するのを目的として、腐食 促進養生 45 サイクル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。また、筆者らの既報⁵⁾である塩害の実験結 果との比較を行った。その結果、以下の知見が 得られた。

(1) 塩害と中性化の複合劣化の場合は、既報 の塩害の結果と比べ、Cr 含有率が低い鋼 材ほど腐食面積率および腐食減量率が大 きい。これは中性化の進行により、固定 化された塩化物が細孔溶液中へ遊離し、 未中性化部に濃縮された結果だと考えら れる。

- (2) 塩化物イオン含有量の相違に関わらず Cr 含有率が多い Cr 鋼防食鉄筋ほど防食性が 高い。
- (3) 塩化物イオン含有量が 2.4kg/m³ において
 も、Cr 含有率 5%以上の鋼材において防
 食性が確認された。更に、Cr 含有率 9%
 以上の Cr 鋼防食鉄筋の場合は、優れた防
 食性が見られた。

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。

参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書「維 持管理編」, pp81-156, 2001
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案), pp1-14, 1997
- 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.1.2, 1997
- 4) 日本コンクリート工学協会: 複合劣化コン
 クリート構造物の評価と維持管理計画に関 するシンポジウム「論文集」, p.1, 2001
- 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, Vol25, No.1, pp.803-808, 2003.5
- 6) 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, 1987
- 7) ASTM C 876 : Half cell potentials of reinforcing steel in concrete, pp.432-437, 1977
- 小林一輔:コンクリート構造物の耐久性診 断シリーズ3「鉄筋腐食の診断」,森北出 版, p.87, 1993
- 9)伊藤伍郎:改訂腐食科学と防食技術、コロ ナ社, p.141, p.153, 1979