

論文

[1129] 促進試験と屋外自然暴露によるコンクリート中の各種鉄筋の腐食性状

正会員○枝広英俊（芝浦工業大学建築学科）

正会員 依田彰彦（足利工業大学建築学科）

1. はじめに

コンクリート構造物に用いられる鉄筋は、その90%以上が電気炉製鋼によって生産されている。電炉鉄筋の主な装入原料には、ヘビーやプレスなどの鋼屑が用いられるため、高炉材と比較して化学成分が異なり、電炉鉄筋の方が除去し難いとされる銅、錫、クロム、ニッケルなどが多く残留する。また、溶鋼を圧延・冷却する際にはミルスケール（黒皮）が生成するが、その冷却方法も製造工場によって異なり自然冷却や水冷または風冷処理などが行われているのが現状である。これらの理由から、鉄筋の銘柄・種類等によって腐食性状が幾分異なることが予測される。しかし、コンクリート中の鉄筋の腐食性状については、通常マクロセル腐食で説明されるが、その究明に長年月を要することから十分な検討がなされているとは言い難い。

そこで、本実験研究では既に報告した塩化物イオンの挙動に関する研究(1)や鉄筋の腐食・防食に関する研究(2)に引続き、みがき棒鋼と銘柄の異なる異形鉄筋を任意に選び、一応の目安を得るために塩分濃度の異なる各種溶液に浸漬後、発錆による重量変化率を比較検討した(3)。さらに、コンクリート中での腐食試験を行うために、みがき棒鋼と任意に選んだ4銘柄の異形鉄筋に対してJIS A 6205「鉄筋コンクリート用防せい剤」の付属書に示されているオートクレーブによる方法をはじめ、乾湿繰返し試験や中性化促進試験および屋外自然暴露試験を単独もしくは組合せて行い、促進試験の特徴と有用性を探ると共に、各種鉄筋の発錆性状の傾向と差異を捉えることを目的とした。

2. 使用材料

表-1 使用した骨材の主な品質

(1) 骨材 鬼怒川産の細・粗骨材を用い、主な品質を表-1に示す。

種 類	表乾比重	吸水率	粗粒率	実積率	最大寸法
粗骨材	2.56	2.23%	6.9	65.2%	20mm
細骨材	2.59	2.73%	2.2	62.5%	—

(2) セメント 普通ポルトランドセメント（N社製）を用い、製造メーカーの報告によると塩素の割合は 0.006%であった。

(3) 練り混ぜ水 JCI規準案に示されている人工海水（10ℓあたりのCl⁻量が198.440g）を用い、計画上のCl⁻総量として 1.2kg/m³がほぼ得られるよう適宜希釈して用いた。

(4) 化学混和剤 主成分がオキシカルボン酸塩のAE減水剤（F社製品）および芳香族アミノスルホン酸系化合物の高性能AE減水剤（F社製品）を用いた。

(5) 鉄筋 みがき棒鋼はSGD3M-D（J○社製）で、溶液浸漬試験に用いた異形鉄筋は任意に選んだ9銘柄14種類とし、主な鉄筋の化学成分および機械的性質を表-2に示す。ただし、コンクリート供試体ではその中からみがき棒鋼と、4銘柄4種類の異形鉄筋を任意に選んで用いた。なお、異形鉄筋は市販状態のままの“黒皮鉄筋（略号A～I）”と、サンドペーパー（AA200とAA400）により黒皮を除去・研磨してアセトンで脱脂した“みがき鉄筋（略号a～d）”を用いた。

(6) コンクリートの調査

コンクリートの種類と調査、およびフレッシュコンクリートの試験結果などを表-4に示す。

表-2 使用した主な鉄筋の化学成分および機械的性質

製品の 種類	種類の 記号	銘柄 及び 記号	化 学 成 分 の 平 均 値 *1 (×10 ⁻² %)									降伏点 の耐力 (N/mm ²)	引張 強さ (N/mm ²)	ヤング係数 ×10 ⁶ (N/mm ²)
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Sn			
電 炉	SD 295A	A, a	26.0	20.0	67.0	3.4	3.1	34.0	14.0	8.0	3.0	362.8	528.6	18.93
		B, b	22.1	15.2	73.4	2.5	3.3	28.4	16.6	9.8	3.7	369.7	552.1	18.24
		C, c	24.0	12.0	46.0	3.0	3.1	36.0	21.0	8.0	2.1	340.3	510.9	18.93
		D, d	21.5	17.2	85.4	3.4	3.3	34.7	16.2	9.3	4.1	360.9	552.1	18.44
		E	22.0	21.0	77.0	3.3	3.2	—	—	—	—	354.0	513.9	18.93
		F	28.0	14.0	60.0	3.6	4.1	33.0	15.0	8.0	2.2	348.1	530.5	18.44
		G	22.6	17.4	91.8	3.4	3.7	29.0	10.4	7.6	2.4	358.9	548.2	18.34
高炉	SD	H	22.0	21.0	75.0	3.1	3.5	27.0	16.0	8.0	2.3	361.9	564.9	18.53
	295B	I	21.5	29.4	124.9	2.4	1.0	2.1	3.9	2.2	—	372.7	570.7	18.63
	SGD3	Jo	16.0	24.0	81.0	1.9	4.1	—	—	—	—	—	—	—

*1) 化学成分はアンケートによる各社の回答の平均値を示した。また、磨き棒鋼(Jo社)はミルシートによる化学成分値を示した。

表-3 コンクリートの種類と調合計画およびフレッシュコンクリートなどの主な試験結果

コンクリート*2 の種類 と略号	W/C (%)	スラ ンプ (cm)	S/A (%)	単 位 水 量 (kg/m ³)	重 量 *3 (kg/m ³)			塩化物 イオン総量 (kg/m ³)	ブリージ*4 量 (cm ³ /cm ²)	圧縮強度(kgf/cm ²)	
					セメント	細骨材	粗骨材			材令 7日	材令 28日
N-65-5	65	5	38.5	155	239	728	1147	1.09	0.14	170	214
N-65-12	65	12	37.7	160	248	704	1149	1.18	0.28	166	218
N-65-18	65	18	39.4	176	272	712	1083	1.11	0.29	160	211
NH-65-18	65	18	41.2	167	259	759	1070	1.14	—	190	231

*2) 略号でNとは普通ポルトランドセメントを、Hは高性能AE減水剤を用いたことを示す。

*3) 細・粗骨材の重量は表乾重量を示す。

*4) 練上がり時のコンクリート温度は24.9～25.0℃であった。

3. 実験計画と主な方法

(1) 鉄筋の浸漬方法

プラスチック製容器に表-4に示す各種溶液を鉄筋1本あたり 300mlとして計量し、それぞれ3本の試験片を浸漬して所定の期間(7, 28, 56, 91日)まで静置した。溶液は水道水とCa(OH)₂飽和溶液(20℃の溶解度が約 1.2g/ℓで、pHが12.67～12.72)、およびW/Cが400%のペースト上澄水(pHが12.63～12.67)を予め準備し、計画上のNaCl濃度が得られるようNaCl試薬を溶解した。

(2) 腐食による重量変化率の測定

浸漬終了後、直ちに水洗いして20%NaOH沸騰溶液中に5分間浸漬し腐食生成物を除去した。再び水洗いをして速やかに重量を測定し、予め求めておいたブランク値を差し引き、浸漬前の重量に対する変化率を求めた。なお、両端面はエポキシ樹脂でシールして浸漬した。

(3) フレッシュコンクリート

スランプ、空気量、ブリージングおよび圧縮強度等の各試験はJISに準じて測定した。また、フレッシュコンクリートのCl⁻総量は試料2リットルを採取し、蒸留水2ℓを加えて約10分間攪拌した後静置し、上澄み水から電位差滴定法により測定した。

表-4 溶液浸漬試験で用いた鉄筋の銘柄・種類と数量*5

鉄筋呼称の別名	銘柄・種類	NaCl 溶液						Ca(OH) ₂ + NaCl 溶液						ベ-スト上澄水 + NaCl 溶液			
		NaCl濃度						NaCl濃度						NaCl濃度			
		0	0.3	0.6	1.2	2.0	3.0	0	0.3	0.6	1.2	2.0	3.0	0	1.2	3.0	
D19	A, B	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
		3	-	-	3	-	3	3	-	-	3	-	3	3	3	3	
	C, D, E, F, G, H, I	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	3	-	-	-	
		-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	3	-	-	3	
	*7 AB A(345)	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	3	-	-	-	
D16 D22 D25	A16 *7 A22 A25	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	3	-	-	-	

*5) 表中で上段は“黒皮鉄筋”を、下段は“みがき鉄筋”を示す。
 *6) D19とD16の長さは約100mm, D22は約80mm, D25は約70mmとした。
 *7) 鉄筋の銘柄・種類及び記号で、ABとは銘柄AのSD295Bを、A(345)とはSD345を示し、A16, A22, A25は銘柄AのSD295Aを示す。なお、A16, A22, A25はすべて黒皮鉄筋である。

(4) コンクリート供試体の形状・寸法・仕様

みがき棒鋼では図-1, 異形鉄筋では図-2の供試体を厚さ15mmの耐水性合板を用いて製作した。

(5) CO₂ガスによる中性化の促進試験

腐食の促進試験を行う前に中性化を促進させるため、材令21日まで室内空中養生した供試体をCO₂濃度10%, 温度40℃, 湿度40%の槽内で35日間保存した。なお、この間の中性化深さを約20mmと計画した。

(6) オートクレーブによる腐食の促進試験

2種類の槽を使用し、約1,730ℓの槽を“大”と称し、約20ℓを“小”と称し、2.5時間で9.8気圧・180℃まで上昇させ5時間保持した後、翌日まで強制または自然冷却し、その後24時間水中養生した。これを1サイクルとし、3および5サイクル、または一部10サイクルまで促進試験を行った。ただし、一部の供試体はCO₂ガスによる中性化促進後に同様な腐食試験を行った。

(7) 乾湿繰返しによる腐食の促進試験

材令7日から図-3に示す条件を1サイクルとし、材令1年までに行い発錆面積率を求めた。ただし、一部の供試体についてはCO₂ガスによる中性化の促進試験後に乾湿繰返しを行った。

(8) 屋外自然暴露試験

芝浦工大田町校舎の中庭において、材令7日から期間を1, 5年(一部は10年)と計画して暴露したが、材令未到達のため本報では1年のみを報告する。

(9) 発錆面積率の求め方

図-1および図-2の供試体を鉄筋に添って割裂し、鉄筋を速やかに取り出し、打込み上部と下部を除いた中央部の長さ10cmに対して、黒色を呈する錆(以下、黒錆と称する)と赤色を呈する錆(以下、赤錆と称する)に分けて透明な方眼シートに写し取り、測定対象面積に対する発錆面積率を求めた。

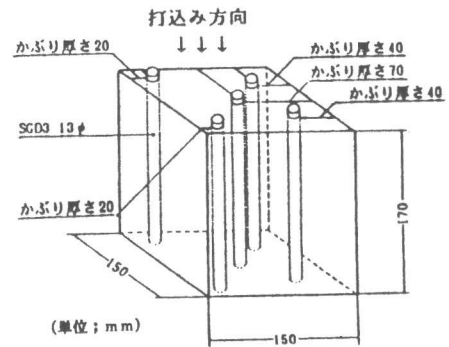


図-1 供試体の形状・寸法
(みがき棒鋼)

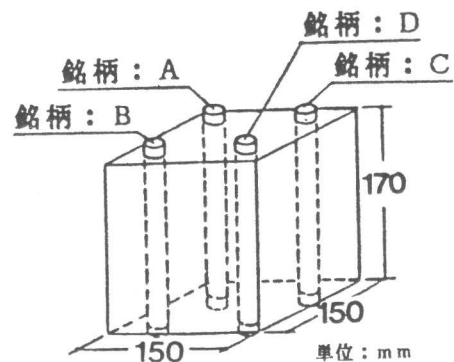


図-2 供試体の形状・寸法
(异形鉄筋)

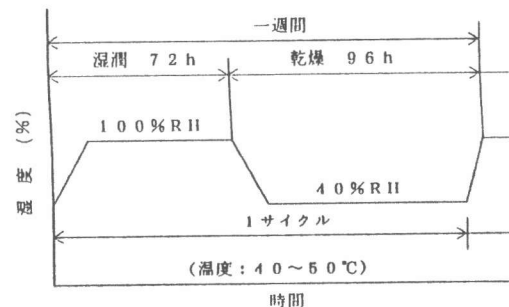


図-3 乾湿繰返しの促進試験条件

4. 実験結果と検討

(1) 溶液浸漬による

重量変化率(3)

①NaCl濃度の違い

銘柄AとBで比較したが、濃度の増大に伴い重量変化率は僅かに大きくなる。ただし、溶液浸漬試験では溶存酸素にかなり依存するため顕著な差異を生じない[3]。

②溶液の種類の違い

NaCl3%水溶液とCa(OH)₂+NaCl 3%溶液を比較すると殆ど差はないが、わずかに後者の重量減少率が小さい。ただし、ペースト上澄水+NaCl 3%溶液では、単にpHに依存するだけでなく水酸化アルカリ(ROH)による不動態化が顕著なためもあってか明らかに減少する。

なお、異形鉄筋の銘柄を考慮せずにみがき鉄筋

のNaCl濃度3%，浸漬期間56日の平均値の比は、NaCl溶液の100に対してCa(OH)₂+NaCl溶液が約90、ペースト上澄水+NaCl溶液が約20であった(図-4、図-5参照)。

③銘柄・種類の違い(表-2、図-4、図-5参照)

本アンケート調査によると、鉄筋の冷却方法は自然冷却や水冷・風冷処理などが単独若しくは組合せて行われていたり、2次ミルスケールの防止を図るために加熱炉抽出時の温度管理を行っている工場もあった。そのため、黒皮の膜厚・組織が不均一であったり、剥離性または使用環境の違いなどによって防食したり、逆に孔食を促すこともあって若干の多寡を生じたが、浸漬期間56日では重量変化率の最大値が0.11%と小さく、結論付けられる程の有意差と一定の傾向を示さなかった。

また、化学成分については主にみがき鉄筋で比較したが、腐食を促すCまたはSが多い銘柄“A、B、F、G、H”や、腐食を抑制するCuまたはCrが少ない銘柄“A、B、G、H、I”は、他の銘柄と比較して若干重量減少率が大きい傾向が認められた。しかし、Cu、Crなどを多く含む銘柄“CとD”では概して少ない傾向にあった。ただし、これらの成分やP、Ni、Mnなどの成分との単独または共存による相殺作用も考えられ、今後、加工性や溶接性なども考慮した上で有効な合金元素量を検討する必要があるだろう。なお、材質の違いはNaCl濃度3%における銘柄Aで比較したが、SD345の重量変化率が最も小さく、SD295AとSD295Bでは前者が幾分大きい、ほぼ同程度であった。

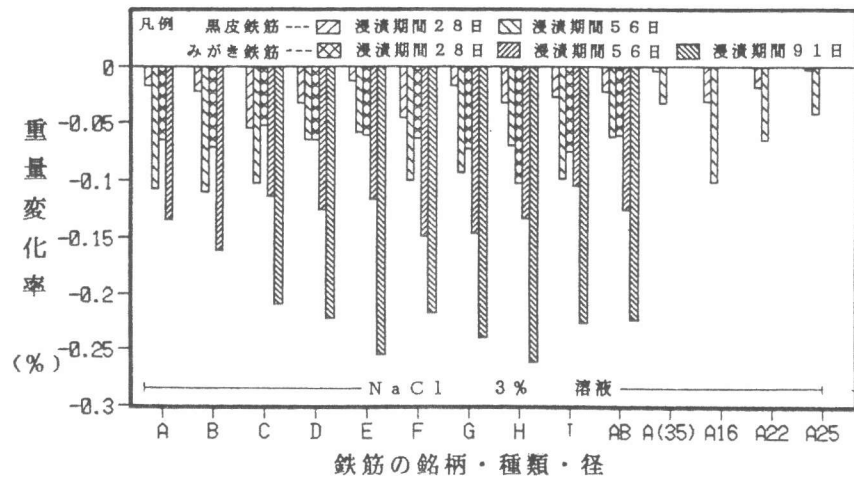


図-4 NaCl3%溶液の銘柄別・種類別・径別重量変化率

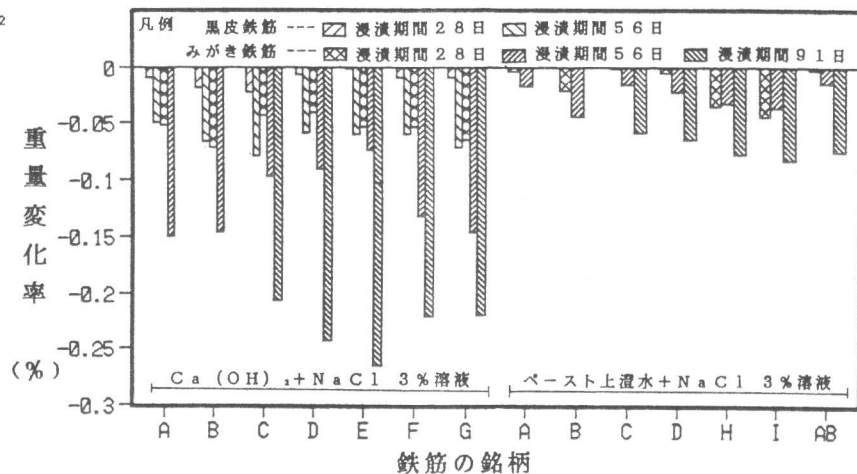


図-5 Ca(OH)₂+NaCl溶液とペースト上澄水+NaCl溶液の銘柄別・種類別重量変化率

(2) コンクリート中の発錆面積率(2)

①オートクレーブのサイクル数・容量の大小・開始材令の違いによる影響 (図-6～図-10参照)

サイクル数の増大に伴い発錆面積率は増大する。また、同じ促進条件であっても槽の容量によって発錆面積率に差異を生じ、大きい槽の発錆が多い。さらに、開始材令が遅いと明らかに腐食が減少する(図-8参照)。

②銘柄・種類等の違いによる影響

必ずしも一定の傾向を示さないが、黒皮鉄筋では黒皮の組織の粗密や膜厚、または剥離性等によって差を生じていると思われる、試験条件を考慮せずに銘柄別の総平均値を求めると $B > A > C > D$ の関係にあった。

また、みがき鉄筋では表面の粗さや締固めの程度などに起因して、ばらつきが認められたが、化学成分の影響を受けたと思われる、銘柄により幾分差異を生じた。強いて、それぞれの条件を考慮せずに総合計値で比較すると、 $c > d > b > a$ の関係にあった。

なお、オートクレーブによる促進試験結果のためもあってか、溶液浸漬試験の結果とは必ずしも一致していない。今後計画している自然暴露の試験結果が得られ次第検討を加えたい。

③促進試験による腐食の特徴

材令1年までの結果ではあるが、乾湿繰返し試験では屋外自然暴露の腐食とほぼ類似した赤錆による腐食性状を呈しており、若干促進されることが確認された(図-6、図-10参照)。

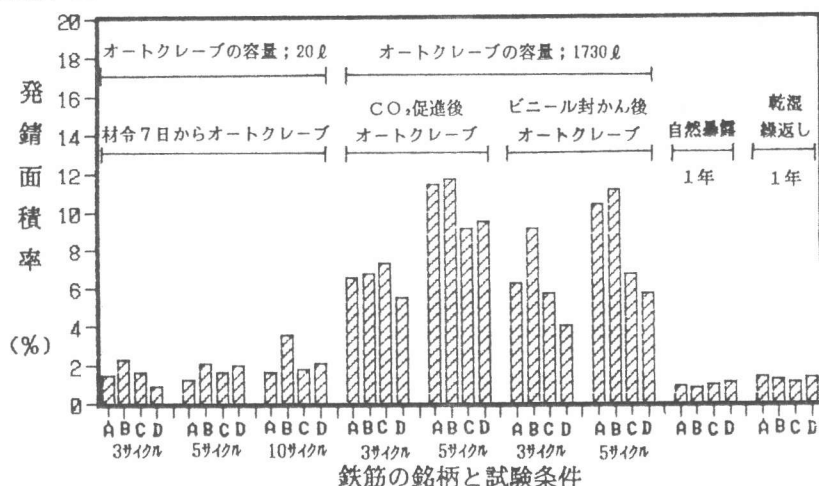


図-6 黒皮(市販)鉄筋の発錆面積率

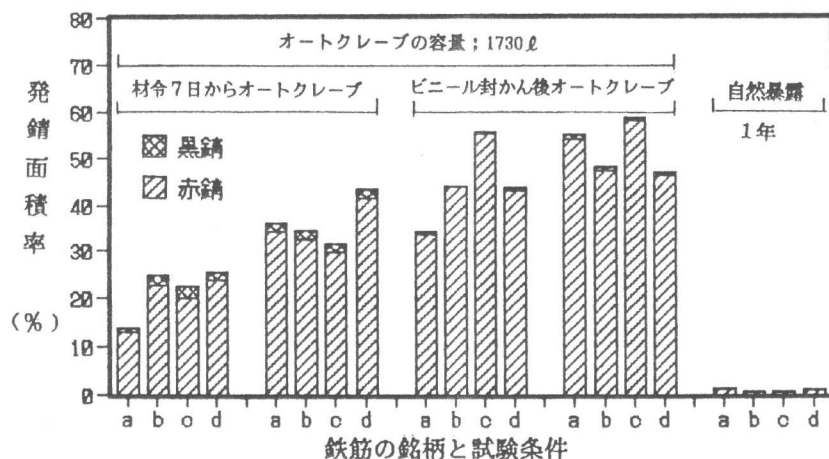


図-7 みがき鉄筋の発錆面積率

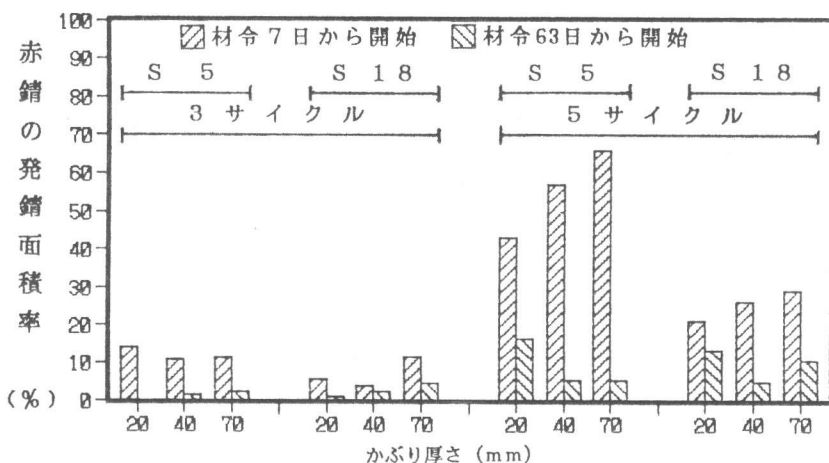


図-8 オートクレーブ“小”によるみがき棒鋼の発錆面積率

一方、オートクレーブによる腐食の促進試験では、別に行ったX線回折による発錆部分の分析で、 Fe_3O_4 が明確なピークを示すのをはじめ、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 、 $\delta\text{-FeOOH}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ など存在したことから赤錆以外に黒錆を生じ、屋外自然暴露とは異なる面もみられた。なお、中性化部分では黒錆が多く確認された(図-8～図-10参照)。

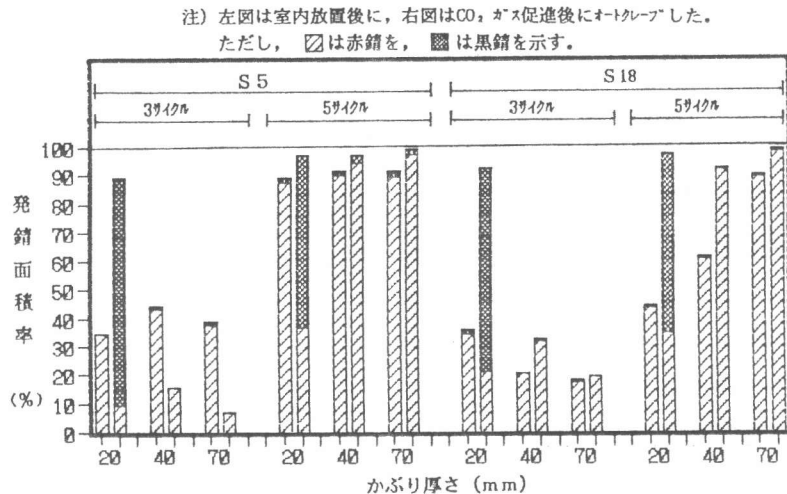


図-9 オートクレーブ“小”によるみがき棒鋼の発錆面積率

5. まとめ

本研究では、みがき棒鋼と任意に選んだ銘柄・種類の異なる黒皮鉄筋及びみがき鉄筋を用いて NaCl 濃度の異なる溶液に浸漬して重量変化率を比較すると共に、コンクリート中の各種鉄筋について自然暴露や腐食の促進試験を行った結果、本実験の範囲ではあるが主に以下の事柄が明かとなった。

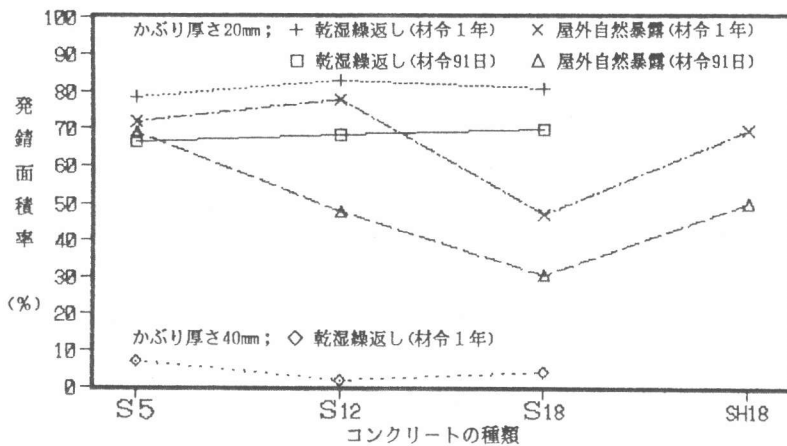


図-10 みがき棒鋼の中性化促進後の発錆面積率

- ① NaCl 溶液中ではその濃度による影響は少ないが、ペースト上澄水を用いると発錆が急減する。
- ②溶液中またはコンクリート中であっても、冷却時に生成される黒皮の組織や膜厚、または化学成分の差異などによって発錆が異なる。
- ③オートクレーブによる腐食の促進試験では、高温・高圧条件であることから自然条件下とは腐食生成物が異なったり、サイクル数が増すと Cl^- の移動に伴う腐食の影響が大きくなる。
- ④乾湿繰返し試験は、自然環境下と類似した腐食生成物・性状を示し、発錆面積率は若干大くなる傾向にある。ただし、単独の試験では顕著な腐食が認められるまでには長年月を要する。
- ⑤今後の検討課題ではあるが、鉄筋の黒皮を生成するための温・湿度管理、またはSやCuなどの化学成分の調整などによっては腐食の抑制が多少なりとも可能と思われる。なお、本実験研究にあたり電炉鉄筋各社および三菱マテリアル(株)セメント研究所の協力を得た。ここに付記して深謝する。

参考文献

- (1) 枝広, 依田: コンクリート中の Cl^- の挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, 1990
- (2) 枝広, 依田: 銘柄の異なる異形鉄筋を用いたコンクリート中の発錆性状の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP. 381~382, 1991. 9
- (3) 枝広, 依田, 鈴木: コンクリート中の Cl^- の挙動及び異形鉄筋の腐食性状に関する研究, (その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP. 643~646, 1989. 10