

[1063] オートクレーブによる海砂コンクリート中の各種棒鋼の腐食に関する研究

正会員 ○枝広英俊 (芝浦工業大学)
正会員 依田彰彦 (足利工業大学)

1. まえがき

コンクリート中の補強用棒鋼は、塩化物イオンの含有量が所定量を越えると腐食が促進し、場合によっては鉄筋コンクリート構造物の耐久性を著しく失わせる。そのため、総量規制の導入や計測技術の向上及び管理体制の確立などが実施または検討されている。しかし、十分除塩されていない海砂を用いたコンクリート中の鉄筋の腐食性状は、必ずしも十分明らかになっていないのが現状で、塩化物イオン総量のみならず、鉄筋の種類やそれが置かれる条件によって少なからず差異を生じ、促進試験方法も含めて多角度からの検討が望まれている。

そこで本研究では、昨年〔2〕及び一昨年〔1〕に報告した腐食と防食などの研究に引き続き、オートクレーブによる腐食の促進試験と屋外自然暴露試験を行い、水セメント比やスランプの違いによる影響や、鉄筋の種類・銘柄及び配筋状態の違いによる差異を明確にする目的で、塩化物イオン総量の異なる各種コンクリート中の鉄筋の発錆面積率を求め、比較・検討した。

なお、本実験では、水セメント比を既報〔1〕,〔2〕で2種類であったものを5種類とし、スランプを同じく1種類であったものを3種類として、より定量的に究明した。さらに、鉄筋は無作為に銘柄の異なるSR24の黒皮鉄筋を3種類、SGD3のみがき棒鋼を2種類選定し比較に供した。

2. 実験の概要

2.1 実験計画

本実験は、実際の海砂を用いたコンクリート中の5種類の鉄筋に対して、材令7日からオートクレーブによる腐食の促進試験と材令91日,1年,5年,10年の屋外自然暴露試験を行い、その発錆面積率を求め、それぞれの腐食性状を捉えるとともに両者の相関関係の有無を究明しようとするもので、それらの主な要因と水準を表-1に示す。但し、本報の屋外自然暴露試験については、材令1年迄の結果を取りまとめたものである。なお、表-1の他に金属顕微鏡による腐食部分の写真撮影(×200)を行い、その状態の観察や部分的な腐食深さの測定も行った。

また、炭酸ガス(CO₂濃度10%,20℃,60%,4箇月間)による中性化促進試験後の腐食の促進試験の差異や、角柱と円柱との比較も行ったので併せて検討した。

2.2 使用材料

(a) セメント 使用したセメントは普通ポルトランドセメント(略号はN)と高炉セメントB種(略号はSB)で、その化学成分と主な物理的性質は既報の文献〔2〕に示した。

(b) 骨材 粗骨材は鬼怒川産を用いた。細骨材は茨城県の久慈川付近で採取した海砂を、そのままの0.27% (略号はX)と、水洗い後0.11% (略号はY)及び0.00% (略号はZ)に

表-1 実験の主な要因と水準

要 因	種 類 , 又 は 水 準
セメント	普通ポルトランドセメント, 高炉セメントB種
水セメント比	45%, 50%, 55%, 60%, 65%
スランプ	10cm, 18cm, 22cm
海砂の塩分濃度	0.272%, 0.110%, 0.0019%
鉄筋	5種類 (SR24---3種類, SGD3---2種類)
かぶり厚さ	2cm, 4cm, 7cm
鉄筋の埋設方法	縦筋, 横筋 (上段筋, 中段筋, 下段筋)
促進試験のサイクル数	1サイクル (1C), 3サイクル (3C), 5サイクル (5C)
屋外自然暴露期間	91日, 1年, 5年, 10年

した3種類を用い、それらの主な品質を表-2に示す。

(c) 化学混和剤 天然樹脂酸塩系のAE剤を使用した。

(d) 水 東京都港区の水道水を用いた。但し、塩素イオン濃度の平均値は24.1mg/l, pHは7.0である。

(e) 鉄筋 JIS G 3108 (みがき棒鋼用一般鋼材) 及び JIS G 3123 (みがき棒鋼) に規定するSGD-3の直径13mmの2銘柄と、JIS G 3112 (鉄筋コンクリート用棒鋼) に規定するSR24の直径13mmの3銘柄を用いた。それらの略号、化学成分と主な機械的性質を表-3に示す。

(f) コンクリートの種類及び調査 コンクリートの種類は表-4に示す17種類とし、それらの調査と計算上の塩化物イオン総量を併せて示す。

2.3 主な実験の項目と方法

(a) フレッシュコンクリート

JISに準じて、スランプ・空気量・単位容積重量を測定した。

(b) 硬化したコンクリート

材令7日, 28日, 91日, 1年の圧縮強度と静弾性係数及び材令1年の中性化深さを測定した。なお、一部のコンクリートはオートクレーブ試験後の圧縮強度と静弾性係数を求めた。

(c) 供試体の形状・寸法・仕様

図-1に示す供試体を耐水性合板I類を用いて製作した。但し、コンクリートの供試体はそれぞれ1体とし、鉄筋は縦筋のかぶり厚さ2cmと4cmが各2本で7cmが1本とし、また横筋のかぶり厚さ2cmと4cmを各3本とした。

(d) 腐食の促進試験方法

脱型後材令7日迄水中養生し、オートクレーブによる促進試験は

図-2に示す条件を1サイクルとし、1サイクルと3サイクル及び5サイクルで試験した。

(e) 屋外自然暴露試験

脱型後材令7日迄水中養生し、鉄筋の露出部をタールエポキシ

表-2 使用した骨材の主な品質

種類	表乾比重	吸水率(%)	粗粒率	実積率(%)	最大寸法(mm)
粗骨材	2.57	2.17	7.0	64.8	25
細骨材	2.66	0.79	2.6	65.1	2.5

表-3 鉄筋の種類と略号及び化学成分

種類	業者	略号	化学成分 (×10 ⁻² %) ¹⁾						降伏点 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び率 (%)
			C	Si	Mn	P	S	Cu			
みがき棒鋼 (SGD-3)	Jo社	g	17	3	72	1.6	4.2	--	---	65.7	11.0
	Su社	h	18	1	37	1.6	0.8	3	---	51.1	13.5
黒皮鉄筋 (SR24)	To社	r	12	13	54	0.3	3.5	27	32.2	46.3	34.5
	Se社	s	8	20	53	3.6	3.4	34	34.9	48.2	34.9
	As社	t	14	14	46	2.8	4.5	--	32.5	48.5	34.6

1) 化学成分は各社報告による

表-4 コンクリートの種類と略号及び調査

セメントの種類	w/c (%)	スランプ (cm)	コンクリートの種類と略号	絶対容積 (l/m ³)			塩化物イオン総量 (kg/m ³)	
				セメント	細骨材	粗骨材		
普通ポルトランドセメント (N)	45	18	N-45-X-18	116	239	440	1.043	
			N-45-Y-18	115	233	448	0.413	
	50	18	N-50-X-18	103	257	437	1.122	
			N-50-Y-18	104	249	443	0.441	
	10	18	N-55-X-10	81	272	467	1.187	
			N-55-Y-10	83	259	475	0.458	
	55	18	N-55-X-18	93	271	435	1.183	
			N-55-Y-18	93	263	443	0.466	
			N-55-Z-18	93	263	443	0.010	
	22	18	N-55-X-22	103	288	390	1.257	
			N-55-Y-22	106	277	393	0.490	
	60	18	N-60-X-18	85	286	428	1.248	
			N-60-Y-18	85	279	435	0.494	
	65	18	N-65-X-18	78	301	421	1.313	
			N-65-Y-18	79	292	428	0.517	
	高炉セメント3種 (SB)	55	18	SB-55-X-18	94	272	438	1.187
				SB-55-Y-18	93	266	446	0.471

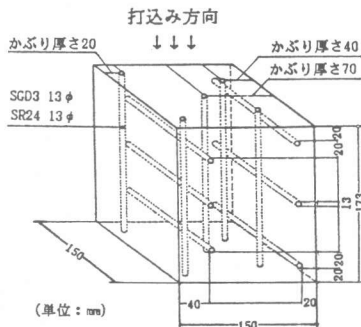


図-1 供試体の形状・寸法及び仕様

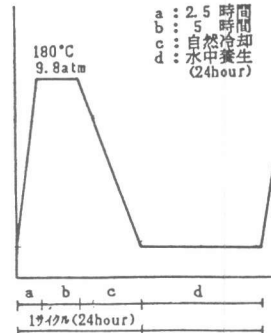


図-2 オートクレーブ促進試験の条件

系塗料でシールして、以後所定の材令迄本学中庭にて暴露した。

(f) 錆の測定方法 所定のオートクレーブ促進試験及び屋外自然暴露試験終了後、供試体を圧碎し鉄筋を速やかに取り出し、中央から上下・左右にそれぞれ5cm、計10cmの部分を通明な方眼シートに昨年の報告〔2〕と同様に黒錆と赤錆に分けて油性ペンで写し取り、発錆面積率を求めた。なお、各種コンクリート中の鉄筋の組合せと錆を測定した相関マトリックスを表-5に示す。

(g) 中性化深さの測定

材令1年の10φ×20cmの供試体を割裂後フェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧し、ノギスを用いて6点測定し平均値を求めた。

3. 実験結果

主な結果を表-6及び図-3～図-11及び写真-1に示す。

4. 結果の検討

4.1 コンクリートの主な性質

フレッシュコンクリートは、予め計画した所要スランプの許容差±1.5cm、及び空気量の許容差±1.0%が得られ、かつワーカビリティは良好であった。圧縮強度は塩化物イオン濃度が異なっても材令7日と28日ではほぼ同程度とみなせるが、材令91日から1年にかけては濃度が高い方が若干強度の発現が小さくなる傾向にあった。静弾性係数は、若干のばらつきを生じているが圧縮強度とほぼ同じ傾向にあった。またオートクレーブしたw/c=55%のコンクリートの圧縮強度は、材令7日と比較して1サイクルで12~14%増加したが、3サイクルでは逆に22~23%低下し、5サイクルでは32~37%低下した。但し、静弾性係数は各サイクルとも低下し、1サイクルで15~17%、3サイクルで31~36%、5サイクルで約37%低下し、強度の低下率に比べて幾分大きくなった。これらは組織の弛緩により後述する鉄筋の発錆の増大の一因になっているとも考えられる。中性化深さは、材令1年であるためわずかな差であるが、塩分濃度が高い程速い傾向にあった。なお、高炉セメントを用いたコンクリートは、同じ水セメント比で比較すると普通セメントよりわずかに速い(表-6参照)。

表-5 コンクリートの種類と実験の項目²⁾

コンクリートの種類	屋外自然暴露試験 (圧縮及び腐食の試験)			オートクレーブによる腐食の促進試験			
	鉄筋の種類	91日	1,5,10年	鉄筋の種類	1c	3c	5c
N-45-X-18 N-45-Y-18	g, h, r, s, t g, r	○ ○	◎ ◎	g, h, r, s, t g, h, r, s, t	◎ -	◎ ◎	◎ -
N-50-X-18 N-50-Y-18	g, r g, r	○ ○	◎ ◎	g, r g, r	◎ -	◎ ◎	◎ -
N-55-X-10 N-55-Y-10	g, h, r, s, t g, h, r, s, t	◎ ○	◎ ◎	g, r g, r	◎ ◎	◎ ◎	- -
N-55-X-18 N-55-Y-18 N-55-Z-18	g, h, r, s, t g, h, r, s, t g, r	◎ ○ ○	◎ ◎ ◎	g, h, r, s, t g, h, r, s, t g, r	◎ ◎ -	◎ ◎ ◎	◎ ◎ ◎
N-55-X-22 N-55-Y-22	g, h, r, s, t g, h, r, s, t	◎ ○	◎ ◎	g, r g, r	◎ ◎	◎ ◎	- -
N-60-X-18 N-60-Y-18	g, r g, r	○ ○	◎ ◎	g, r g, r	◎ -	◎ ◎	◎ -
N-65-X-18 N-65-Y-18	g, h, r, s, t g, r	○ ○	◎ ◎	g, h, r, s, t g, h, r, s, t	◎ -	◎ ◎	◎ -
SB-55-X-18 SB-55-Y-18	g, h, r, s, t g, r	○ ○	◎ ◎	g, h, r, s, t g, h, r, s, t	◎ -	◎ ◎	- -

2) 表中で、○印は圧縮強度試験のみを示し、◎印は発錆面積率も求めたが本報告では材令5年と10年は材令未到達である

表-6 硬化したコンクリートの主な試験結果

コンクリートの種類	圧縮強度(kgf/cm ²)及び静弾性係数(x10 ⁵ kgf/cm ²)								
	材令7日		材令28日		材令91日		材令1年		中性化深さ(mm)
N-45-X-18 N-45-Y-18	278	2.88	374	3.12	417	3.25	417	3.26	0.8
N-45-X-18 N-45-Y-18	297	2.86	364	3.00	411	3.06	415	3.28	0.4
N-50-X-18 N-50-Y-18	259	2.85	341	2.90	389	3.20	395	3.16	1.1
N-50-X-18 N-50-Y-18	259	2.96	334	2.98	397	3.11	402	3.20	0.6
N-55-X-10 N-55-Y-10	241	2.81	319	3.05	357	3.18	354	3.10	1.6
N-55-X-10 N-55-Y-10	241	2.86	301	2.98	349	3.19	366	3.21	1.5
N-55-X-18 N-55-Y-18 N-55-Z-18	220	2.58	281	2.81	325	3.12	330	3.09	2.3
N-55-X-18 N-55-Y-18 N-55-Z-18	213	2.35	303	2.96	341	3.04	345	3.15	1.9
N-55-X-18 N-55-Y-18 N-55-Z-18	206	2.46	292	3.10	354	3.12	357	3.24	1.3
N-55-X-22 N-55-Y-22	246	2.62	308	2.98	364	3.22	391	3.27	1.7
N-55-X-22 N-55-Y-22	230	2.57	288	2.62	351	3.04	391	3.18	1.2
N-60-X-18 N-60-Y-18	190	2.43	268	2.55	287	2.77	293	2.72	3.7
N-60-X-18 N-60-Y-18	201	2.38	255	2.60	308	2.88	316	2.78	3.2
N-65-X-18 N-65-Y-18	167	2.43	234	2.61	241	2.73	256	2.79	4.7
N-65-X-18 N-65-Y-18	166	2.33	246	2.54	274	2.82	282	2.89	4.2
SB-55-X-18 SB-55-Y-18	191	2.47	274	2.67	311	3.17	338	3.11	3.4
SB-55-X-18 SB-55-Y-18	191	2.53	296	2.61	370	3.31	393	3.34	3.1

4. 2 鉄筋の発錆に関する検討

(a) 塩化物イオン含有量の違いによる影響 コンクリート中のCl⁻は、セメント水和物と反応してフリーデル氏塩(3CaO·Al₂O₃·CaCl₂·10H₂O)を生成するため、ごく少量であれば一般に問題はない。しかし、ある一定量を越えると鉄筋の不動態皮膜の破壊などにより急速な発錆を促す。本実験でもみがき棒鋼は、条件によって多少異なるが含有量が0.4~0.5kg/m³で発錆が目立ち始め、1.0~1.3kg/m³の3サイクルまたは5サイクルでは90~100%の面積を示すものも認められた(図-3参照)。

(b) 水セメント比の違いによる影響 図-4に横筋、図-5に縦筋の結果の一例を示したが、水セメント比が大きくなると発錆面積率は増加した。ただし、横筋と縦筋は性状が若干異なり、横筋では水セメント比が45%から50%にかけて急増し、50%以上になると緩やかな増加傾向を示し、かつ、締固めやブリージングの影響もあってばつぎが大きい。一方、縦筋では水セメント比にほぼ比例した増加傾向を示した。なお、黒皮鉄筋の発錆面積率は少量であるが、みがき棒鋼と似た傾向にあった。その他、発錆部分を観察すると、水セメント比が大きく発錆が顕著な試料は、

凡例 セメントの種類; N, w/c=55%, スランプ18cm

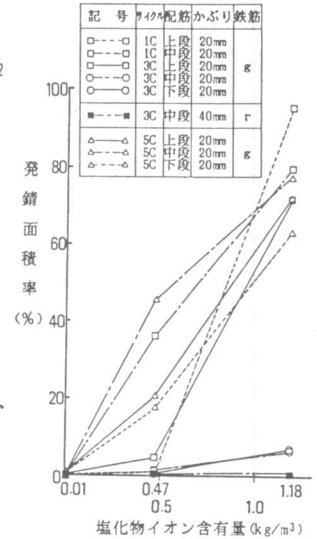


図-3 塩化物イオン含有量の違いによる横筋の発錆面積率

凡例 セメントの種類; N, 塩分濃度 X, スランプ18cm

記号	サイクル	配筋	記号	サイクル	配筋
○	1C	20mm上段	●	1C	40mm上段
○	3C	20mm上段	■	3C	40mm上段
○	3C	20mm中段	▲	5C	20mm中段
○	3C	20mm下段	▲	5C	40mm中段

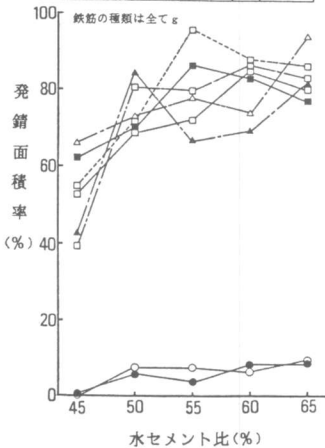


図-4 水セメント比の違いによる横筋の発錆面積率

凡例 セメントの種類; N, 塩分濃度 X, スランプ18cm

記号	サイクル	鉄筋かぶり	記号	サイクル	鉄筋かぶり
○	1C	g 20mm	■	3C	g 40mm
○	1C	h 20mm	■	3C	g 70mm
○	3C	g 20mm	▲	5C	g 20mm
○	3C	h 20mm	▲	5C	h 20mm

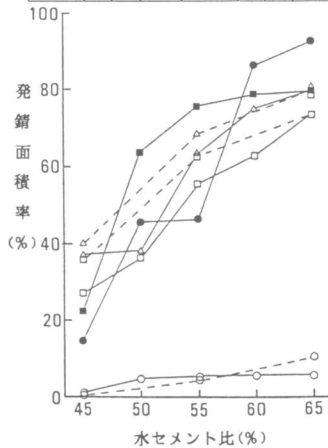


図-5 水セメント比の違いによる縦筋の発錆面積率

凡例 セメントの種類; N, 鉄筋の種類; g

鉄筋	かぶり	記号	鉄筋	かぶり	
○	1C	上段	●	1C	20mm
○	1C	中段	●	1C	40mm
○	3C	上段	■	3C	20mm
○	3C	中段	■	3C	40mm
○	3C	下段	■	3C	70mm

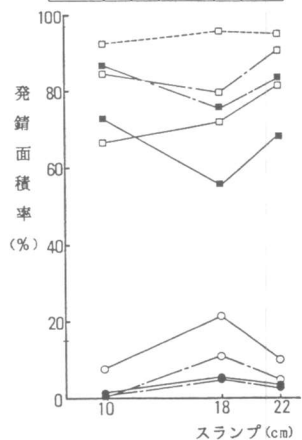


図-6 スランプの違いによる縦筋と横筋の発錆面積率

同じ面積で比較しても深さや盛り上がりが明らかに異なった。

(c) スランプの違いによる影響 スランプの違いによる発錆面積率の一例を図-6に示したが、塩化物イオン含有量や水セメント比などの要因に比べて顕著な差は認められないが、概してスランプが大きい程、若干増加傾向にある。ただし、本実験では概して1サイクルのスランプ18cmが最も多く、逆に3サイクルでは最も少ない結果を得た。その理由については、さらに多くのデータから検討すべきであるが、1サイクルではスランプ18cmの材令7日の圧縮強度が他に比べて低いことが原因の一つと考えられ、3サイクルでは強度よりも単位細骨材量による塩化物イオン含有量やコンクリートの密実さなどが影響したといえよう。

(d) かぶり厚さの影響 昨年の結果と同様、オートクレーブによる促進試験ではかぶり厚さが大きい程総じて減少傾向にあるが、酸素・水の拡散の影響がほぼ同程度になることや、 Cl^- の移動も考えられ、逆の現象を生じる結果やばらつきも多く生じた。

(e) セメントの違いによる影響 潜在水硬性を有する高炉セメントの特質から考えて、材令7日からのオートクレーブによる促進試験は苛酷過ぎる面があり、サイクル数が増すと同程度かわずかに増加するものも認められた。

(f) 縦筋と横筋の違いによる比較 横筋は、締め固めやブリージングなどの影響があって縦筋に比べ、概して約2倍強の発錆面積率を示した。但しオートクレーブによる促進試験では、必ずしも横筋の下端に限らず、コンクリートの表面に近い面にも若干生じる。

(g) 鉄筋の銘柄の違いによる比較 Cu, Cr, P, Siは単独若しくは共存で耐食性に効果的といわれているが、元素(成分)の多寡や共存作用などの影響もあって若干の差異が認められ、みがき棒鋼では $g < h$ の関係にあった。また、黒皮鉄筋では、みがき棒鋼に比べて非常に発錆面積は少ないが、元素の他、黒皮の組織や製造・出荷時等の傷による影響もあってか、前記と同様にわずかな差異を生じ、強いていえば $r < s \leq t$ の関係にあった(図-7及び図-8参照)。

(h) 角柱と円柱供試体の違いの検討 本実験ではN-55-Y-18のコンクリートに限り円柱(10φ×20cm)の供試体を製作し、かぶり厚20mmと40mm(縦筋)の1, 3, 5サイクルで比較した。各条件とも全て円柱の発錆面積率が多く、約1.2~2.8倍の値を示した。これは、酸素や水の拡散の違いや角柱を振動により締め固めたことも起因しよう(図-9参照)。

(i) 中性化促進試験後の腐食性状の検討 塩化物イオン総量 $1.33kg/m^3$ の供試体を材令1箇月後に炭酸ガス濃度10%槽(20°C, 60%)で中性化の促進試験を行った後、オートクレーブによる試験をして、その結果を同じくビニール封かん養生したものや材令7日で行った結果と比較検討した(図-10参照)。材令7日に比べると発錆は少ないが、封かん養生ものに比べてかなり増加しており

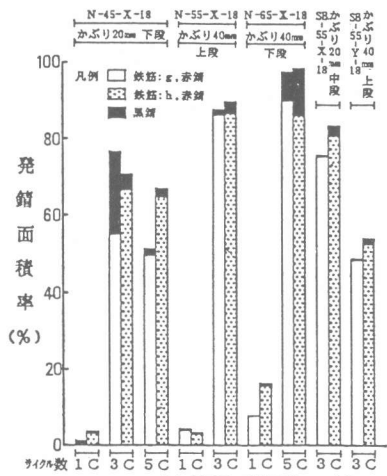


図-7 みがき棒鋼(横筋)の違いによる発錆面積率

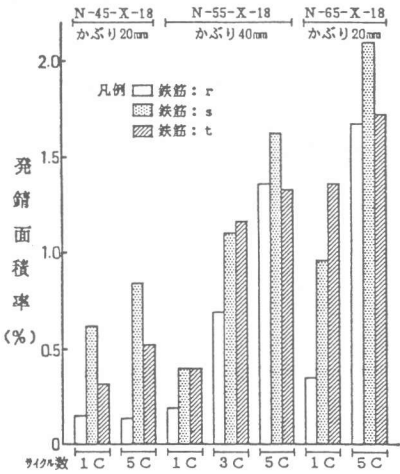


図-8 黒皮鉄筋(縦筋)の違いによる発錆面積率

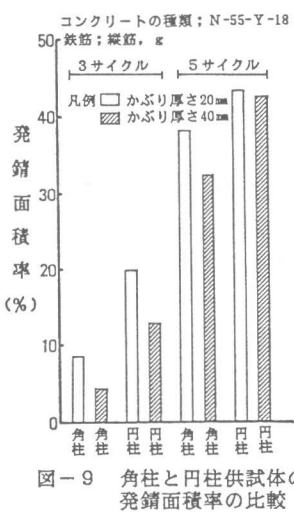


図-9 角柱と円柱供試体の発錆面積率の比較

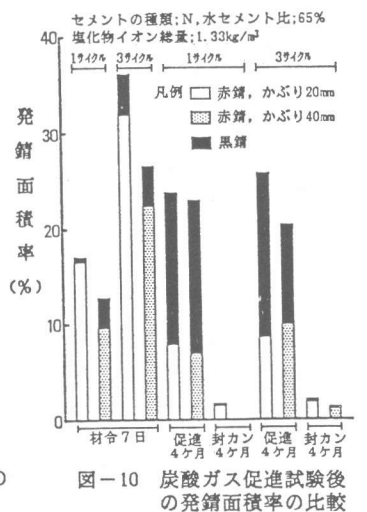


図-10 炭酸ガス促進試験後の発錆面積率の比較

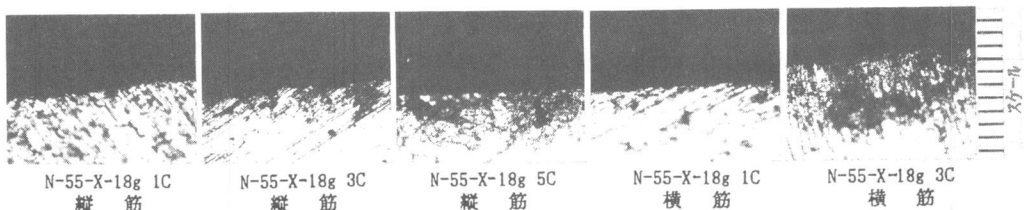


写真-1 金属顕微鏡による平均的腐食部分の写真観察結果 (スケールの1目盛り10 μ m)

Fe₃O₄ を主成分とする黒錆の生成量が多いことを除けば、一応併用した促進試験方法も将来考えられよう。

(j) 金属顕微鏡による腐食部分の観察 発錆部分の面積を測定した後、鉄筋の数箇所に対して金属顕微鏡($\times 200$)による写真撮影を行い中でも平均的腐食を示した部分の一例を写真-1に示す。一般に発錆面積率が大きい鉄筋が腐食部分の深さが多いことが観察され、多いもので約50 μ mであった。なお、発錆面積率に大きな差が認められない鉄筋(例えば3サイクルと5サイクル、水セメント比の違いなど)においても、深さの違いを明らかに生じている結果が数例認められた。

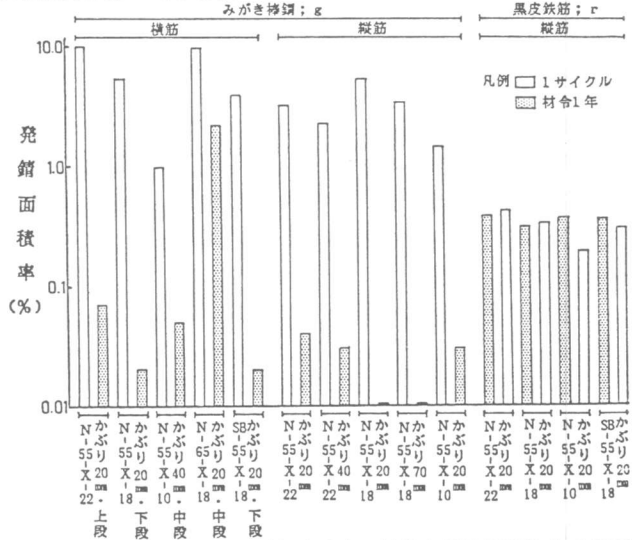


図-11 オートクレーブ促進試験と屋外自然暴露試験との相関

(k) 促進試験と自然暴露試験結果との相関 1サイクルと材令1年の結果を図-11により比較した。みがき棒鋼では後者の発錆面積率に未到達であったが、各条件の違いによる傾向は類似しており、また、黒皮鉄筋ではほぼ一致した結果も得られ、今後の長期材令の結果を得た後改めて相関性を検討したい。

5. まとめ

本実験研究では、実際の海砂を用いたコンクリートの塩化物イオン総量を変え、オートクレーブによる促進試験を行い、水セメント比やスランプ及び鉄筋の種類・銘柄などが腐食に及ぼす影響を検討し、以下の事柄を新たに確認した。(1) 塩化物イオン含有量やサイクル数の影響は大きく面積・深さとも増大し、5サイクルでは腐食深さの進行が著しい。(2) 水セメント比による影響は、縦筋と横筋で性状が若干異なるが、50%以下ではかなり抑制できる。(3) スランプによる差異は少ないが、塩化物イオン総量と締固めの影響を若干受ける。(4) 鉄筋の種類・銘柄の違いによって各元素量や黒皮皮膜の組織などが異なり、若干の差異を生じる。(5) 炭酸ガスによる促進試験を併用して行うことも、幾分長期間を要するが有効な促進試験方法と考えられる。なお、長期屋外自然暴露試験との相関は、今後も検討するが本研究には、小野田セメント中央研究所と本学卒業生の高橋一昌、田中健一君らの協力を得たことを付記して、ここに深謝する。

参考文献 [1] 依田彰彦, 枝広英俊: オートクレーブによる海砂コンクリート中の鉄筋の発錆に関する研究, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, p p. 101~104, 1985.
 [2] 枝広英俊, 依田彰彦: オートクレーブによる海砂コンクリート中の鉄筋の発錆と防食に関する研究」第8回コンクリート工学年次講演会論文集, p p. 129~132, 1986. ほか