

[26] 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

正会員 依田彰彦（足利工業大学工学部）

正会員 ○枝広英俊（芝浦工業大学工学部）

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の耐久性を論じる場合、コンクリート中の鉄筋の発錆は著しく影響を与え、特に除塩されない海砂が使用された構造物や、外部からの塩分の浸透は何らかの被害を起こしつゝあり社会問題化されている。そのため数多くの調査報告や、実験研究による腐食メカニズムの解明や防食方法の提案がなされている。

しかし、実際の海砂を用いたコンクリート中の鉄筋の発錆に及ぼす各種要因については、確固たるデータに基づいて理論付けられているとは言い難いのが現状であろう。

そこで本研究では、塩分濃度の異なる海砂を用いたコンクリート中のみがき鉄筋や黒皮鉄筋及び種々表面処理を施した鉄筋等に対し、オートクレーブによる促進腐食試験と屋外自然暴露試験を行うことによって、塩分濃度の違いが発錆に及ぼす影響を水セメント比別・セメントの種類別・かぶり厚さの違いなどについて比較検討した。

2. 実験の概要

実際の海砂を採取し、細骨材重量に対する塩分濃度を採取したそのまゝの 0.21% と、0.10% 及び 0.00% として、コンクリートの調合を水セメント比 5.5% と 6.5%，練り上がりスランプを 18 ± 1.5 cm，同空気量を 4 ± 1% と計画した。鉄筋の発錆面積を測定する供試体はモルタルが 5 φ × 10 cm，コンクリートが 10 φ × 20 cm とし、かぶり厚さはモルタルが約 2 cm，コンクリートが約 2 cm 及び 3 cm となるよう各種鉄筋を埋込んだ。埋込み鉄筋はみがき鉄筋・黒皮鉄筋・ドブヅケ鉄筋・亜鉛メッキ鉄筋・ホーロー処理鉄筋の 5 種類で、オートクレーブ促進腐食試験は材令 7 日より 3 サイクル毎行い、屋外自然暴露試験は材令 91 日・1 年・3 年・5 年・10 年の供試体を製作した。なお本報告では、材令 1 年迄の平均発錆面積率を求めた結果について取りまとめた。また海砂コンクリートの品質を確認する意味もあって、材令 1 年迄の圧縮強度、静弾性係数、中性化深さ等についても測定した。

3. 使用材料

(a) セメント 各社報告による使用したセメントの化学成分と主な物理的性質を表 1 及び表 2 に示す。

(b) 骨材 粗骨材は富士川産を使用し、細骨材は茨城県の久慈川付近で採取した海砂を水道水で適宜水洗いしたもの用いた。粒度分布と主な品質を表 3 に示す。

(c) 化学混和剤 天然樹脂系の A-E 剤を使用した。

(d) 水 東京都港区の水道水を用い、打込み期間における同地区の平均的な水質試験の結果を表 4 に示す。

表 1. 使用したセメントの化学成分 (%) (各社報告による)

セメントの種類	略号	ig.loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
普通ポルトランドセメント	N	0.6	0.2	22.4	5.3	3.0	64.5	1.3	1.9	0.37	0.47
耐硫酸塩セメント	S S	0.8	0.0	22.0	3.7	4.4	64.7	1.6	1.9	0.22	0.44
中庸熟セメント	M	0.6	0.1	23.5	4.0	4.0	64.3	1.3	1.8	0.20	0.41

表 2. 使用したセメントの主な物理的性質 (各社報告による)

セメントの種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性	フロー値 (mm)	圧縮強さ (kgf/cm ²)		
			水量 (%)	始凝 (h-m)	終結 (h-m)			3 日	7 日	28 日
普通ポルトランドセメント	3.15	3340	28.2	2-39	3-45	良	266	145	228	402
耐硫酸塩セメント	3.19	3380	26.5	3-15	4-24	良	259	134	199	326
中庸熟セメント	3.20	3240	26.6	4-01	4-01	良	256	116	162	332

表 3. 使用した骨材の粒度分布と主な品質

骨材の種類	塩分濃度 (%)	略号	ふるいを通るものの中量百分率 (%)									F.M. (%)	最大寸法 (mm)	比重	吸水率 (%)	実験率 (%)	単位容積重量 (kg/L)	
			2.5	2.0	1.5	1.0	5	2.5	1.2	0.6	0.3							
砂利(富士川産)	-	-	99	83	68	42	11	3	-	-	-	6.97	2.5	2.61	0.98	62.8	1.64	
	0.21	A	-	-	-	-	100	87	46	30	15	4	31.8	(5)	2.60	0.98	68.8	1.79
	0.10	B	-	-	-	-	100	82	46	26	12	2	33.2	(5)	2.58	1.01	70.2	1.81
	0.00	C	-	-	-	-	100	83	44	25	11	1	33.6	(5)	2.59	0.98	69.7	1.81

ぶした。また亜鉛メッキ鉄筋とホーロー処理鉄筋は、専門業者に依頼した。

(f) コンクリートの調合 表6にコンクリートの種類と略号及び調合計画を示す。

4. 実験の項目と方法

(a) 主な実験の項目と方法 表7に示す。

(b) その他の実験方法

(1) オートクレーブによる促進腐食試験は、脱型後材令7日迄水中養生し、図1に示す3種類のサイクル条件で行った。なお1サイクルは24時間とした。

(2) オートクレーブ促進試験及び屋外自然暴露試験の供試体の製作方法で、モルタルについては練り混ぜ終了後5mmふるいでスクリーニングしたものを $5\phi \times 10\text{cm}$ の型枠に詰め、幾分凝結し始めた時点で鉄筋を埋設した(図2参照)。コンクリートについては打込み前日にモルタルで所要のかぶり厚さを保持するよう $10\phi \times 20\text{cm}$ の型枠内に鉄筋を固定し、JIS A 1108に準じて打込んだ。なお、供試体の両端部は、脱型時にタールエポキシ系塗料でシールした(図3参照)。

(3) 屋外自然暴露試験は、脱型後材令28日迄 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中養生とし、以後本学田町校舎の中庭で所定の材令迄行つた。

(4) 鉄筋の錆は、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、供試体を割裂し鉄筋を速やかに取り出し、透明シートに黒錆と赤錆を油性ペン(0.1mm)で写し取り、発錆面積率をそれぞれ求めた。

5. 実験結果

主な結果を図4～図10に示す。

6. 結果の検討

(a) ワーカビリティー 本実験で使用した海砂は粒形が良く、一般の川砂に比べて単位水量を11～12%減ずることが可能であり、ワーカビリティーは良好であった。

(b) 空気量 塩分濃度の違いによる差はほとんどなく、同程度とみなせる。

(c) 圧縮強度及び静弾性係数 塩分濃度の濃いコンクリートは多くの既往の報告と一致し、薄いものに比べて初期材令での強

表4. 水道水の水質

色 度	濁 度	水素イオン濃度 (pH)	塩素イオン	過マンガニ酸カリウム 消 費 量
2 度	0 度	7.0	21.4 mg/L	0.9 mg/L

表5. 使用した鉄筋の主な品質と作り方

鉄筋の種類	材質	直径	作り方ほか
みがき鉄筋	SGD3	9.0φ	アセトンで表面の油を除去して使用(A社製)
黒皮鉄筋	SR24	7.6φ	T社製の納入鉄筋をそのまま使用
ドブヅケ鉄筋	SR24	7.6φ	黒皮鉄筋にW/C=30%のペーストをまぶして使用
亜鉛メッキ鉄筋	SGD3	9.2φ	みがき鉄筋を電気メッキして使用
ホーロー処理鉄筋	SR24	7.9φ	約900°Cにてホーロー処理して使用

表6. コンクリートの種類と略号及び調合計画

セメントの 水セメント ント 種類	水 セメント ント 比 (kg)	細骨材の 塩分濃度 (%)	コンクリートの 略 号	細骨 材率 (%)	単位 水量 (kg/m ³)	熱対容積 (L/m ³)		
						セメント	細骨材	粗骨材
N	5.5	0.21	N-55-A	44.8	155	8.9	3.35	3.81
		0.10	N-55-B	44.6	155	8.9	3.19	3.97
		0.00	N-55-C	44.6	155	8.9	3.19	3.97
	6.5	0.21	N-65-A	44.5	150	7.3	3.35	4.02
S S	5.5	0.21	SS-55-A	46.8	155	8.9	3.35	3.81
M	5.5	0.21	M-55-A	46.8	155	8.9	3.35	3.81

表7. 主な実験の項目と方法

実験項目	実験方法
スランプ	JIS A 1101によつた。
空気量	JIS A 1128の空気室圧力方法によつた。
圧縮強度 静弾性係数	JIS A 1108によつた。圧縮強度試験時にコンプレッソメーターを用い、最大荷重の1/3における歪を測定し、E _{1/3} を求めた。
中性化深さ	自然暴露した $10\phi \times 20\text{cm}$ の供試体を割裂し、フェノールフタレンイン1%溶液を噴霧後、ノギスで測定し、平均中性化深さを求めた。

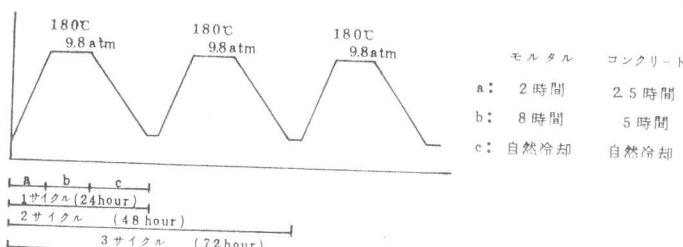


図1. オートクレーブによる促進腐食試験の条件

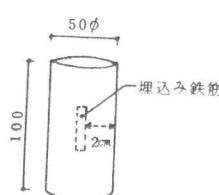


図2. モルタル供試体の形
状寸法と埋込み鉄筋

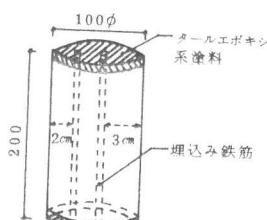


図3. コンクリート供試体の
形状寸法と埋込み鉄筋

度は若干大きいが、長期材令では強度の発現が小さくなる傾向があり、材令91日や1年ではわずかに下回った。また、本実験で使用した耐硫酸塩と中庸熟セメントは、塩分濃度が0.21%と濃いにもかかわらず普通セメントに比べて十分な水硬性が認められ、強度的な側面からは塩分を含有するコンクリートに対して有利であるといえよう（図4参照）。静弾性係数については、圧縮強度の性状ほど明確ではないが前記とほぼ同じ傾向にあった。

(d) 中性化深さ 材令91日では約1~2mm、材令1年では3~4mm程度であったが、塩分濃度が濃い方がわずかに中性化速度が速い傾向にあった。

(e) 塩分濃度と鉄筋の発錆面積率との関係

(1) 塩分濃度の違いが及ぼす影響 オートクレーブ促進試験したモルタル及びコンクリート中のみがき鉄筋について、塩分濃度の違いが発錆に及ぼす影響を図5に示したが、みがき鉄筋には Fe_3O_4 あるいは $2\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ と思われる黒錆と、 Fe_2O_3 あるいは $\text{Fe}(\text{OH})_3$ と思われる赤錆が観察された。ただしコンクリート中とモルタル中とでは発錆の仕方が多少異なる状況が認められた。すなわち、コンクリートでは若干の黒錆と多くの赤錆が生じるのに対し、モルタルではこれと逆の現象が生じた。この要因としては空隙量の違いや単位セメント量の違いなどが考えられるが、何れにしても両者の発錆面積率は、塩分濃度が濃い程増加する。

(2) かぶり厚さの違いが及ぼす影響

コンクリート中に塩化物が含まれている場合、鉄筋の保護被膜は簡単に破壊され、水や酸素の供給によって腐食はさらに促進されると言われているが、オートクレーブ促進試験ではかぶり厚さの違いによって顕著な差はないものの、若干20mmが多い（図6参照）。

(3) 水セメント比の違いが及ぼす影響

締固めなどの影響もあって一部の供試体にはらつきはあるが、水セメント比の大きいコンクリート中の発錆面積率は増大し（図7参照）、中でも赤錆が多い。ただしモルタル中の鉄筋に関しては、赤錆が同程度であったの

に対し、黒錆の割合が若干多くなる傾向が認められた（図5及び図7参照）。

(4) セメントの種類の違いが及ぼす影響

セメントを使用したコンクリート中のみがき鉄筋の発錆面積率を図8に示したが、高温高圧条件下では明らかに中庸熟セメントが多く、以下耐硫酸塩セメント、普通セメントの順であった。そこでボロシチーがその原因の一つとも考えられ、筆者等の行った各種セメントモルタルのボロシチーの測定結果を図9に示したが、トータルボロシチー（T.P.V.）に関しても前記と一致した順で多くなるという結果を得た。

(5) 鉄筋の表面処理の違いが及ぼす影響

ドブヅケ鉄筋、亜鉛メッキ鉄筋及びホーロー処理鉄筋は、

明らかに発錆を抑制あるいは防止できた（図10参照）。しかし、亜鉛メッキ鉄筋はオートクレーブ促進養生によ

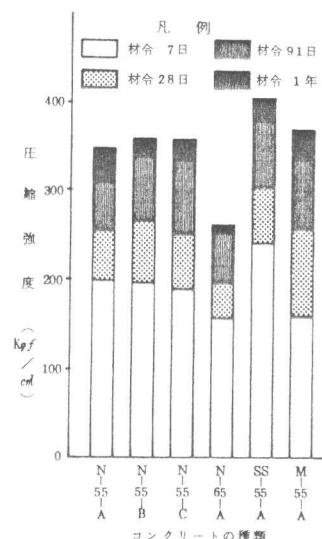


図4. 各種コンクリートの材令1年迄の圧縮強度

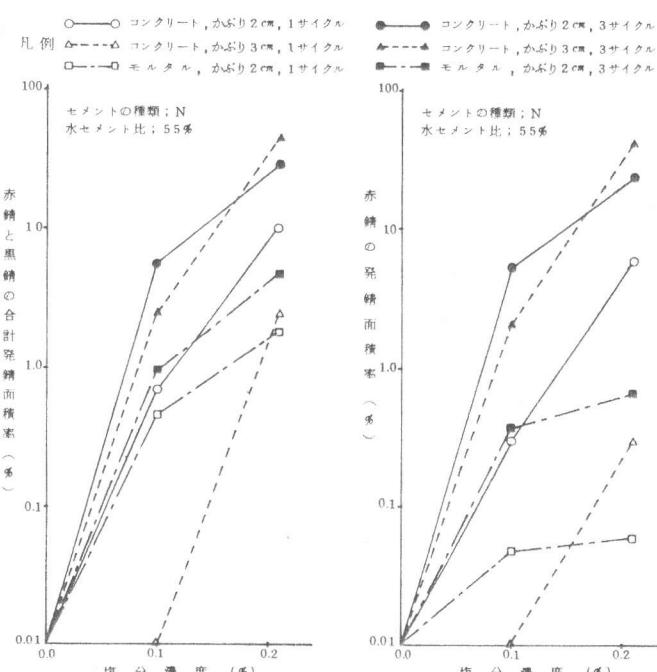


図5. 塩分濃度の違いによるみがき鉄筋の発錆面積率

オートクレーブ促進試験の各サイクル別に、それぞれのセメントを使用したコンクリート中のみがき鉄筋の発錆面積率を図8に示したが、高温高圧条件下では明らかに中庸熟セメントが多く、以下耐硫酸塩セメント、普通セメントの順であった。そこでボロシチーがその原因の一つとも考えられ、筆者等の行った各種セメントモルタルのボロシチーの測定結果を図9に示したが、トータルボロシチー（T.P.V.）に関しても前記と一致した順で多くなるという結果を得た。

ドブヅケ鉄筋、亜鉛メッキ鉄筋及びホーロー処理鉄筋は、

明らかに発錆を抑制あるいは防止できた（図10参照）。しかし、亜鉛メッキ鉄筋はオートクレーブ促進養生によ

り亜鉛が腐食し、大部分の供試体にひび割れが生じたことより、この促進方法は亜鉛メッキ鉄筋に対して必ずしも最適ではない。

(6) オートクレーブ促進腐食試験の検討

自然暴露試験の結果との対応が不可欠であり、材令1年の結果と比較した一例を図10に示した。さらに長期材令での成果を待つべきではあるが、一応の相関は見られ、今後、漸次明確にしたい。

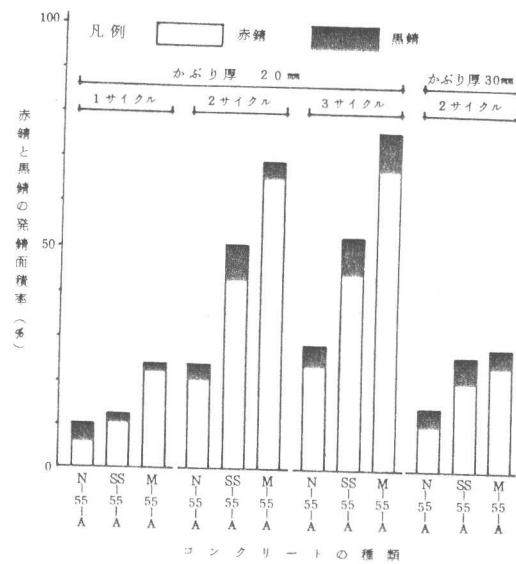
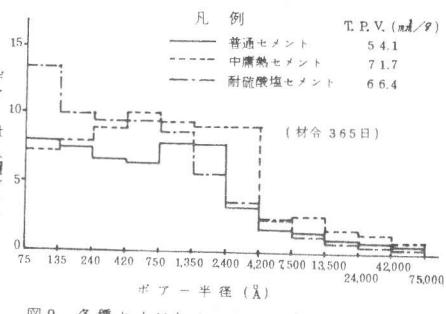


図8: 使用したセメントの種類の違いによる
みがき鉄筋のサイクル別発錆面積率



7 まとめ 実際の海砂を用いたコンクリートをオートクレーブ促進腐食試験し、下記の事項を改めて確認した。(1)塩分濃度が濃く、試験条件の苛酷な程鉄筋の発錆は顕著となる。(2)かぶり厚さが少ない程、水セメント比が大きい程発錆面積率は若干大きく、コンクリートでは赤錆の割合が多いのに対し、モルタルは黒錆が多い。セメントが最も多く、以下耐硫酸塩、普通セメントの順であった。(3)高溫高圧条件下では中庸熱セメントが最も多く、以下耐硫酸塩、普通セメントの順であった。(4)鉄筋の表面をホーロー、亜鉛メッキ、ドブヅケ処理すると、発錆を防止あるいは抑制できるが、亜鉛メッキ鉄筋には本促進試験は不適であろう。(5)自然暴露試験との対応は一応の相関はあるが、今後の長期材令での成果を待って検討したい。なお本実験では、小野田セメント中央研究所と本学卒業生の縣宏典君、杉山隆浩君らの協力を得たので、ここに深謝する。

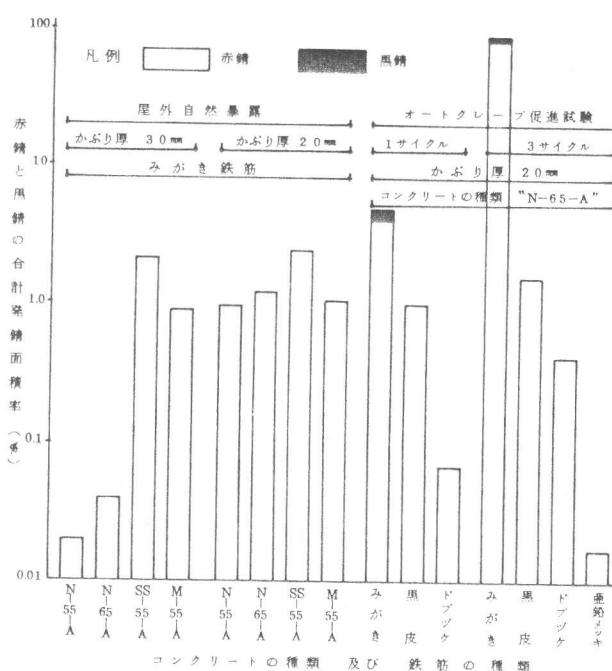
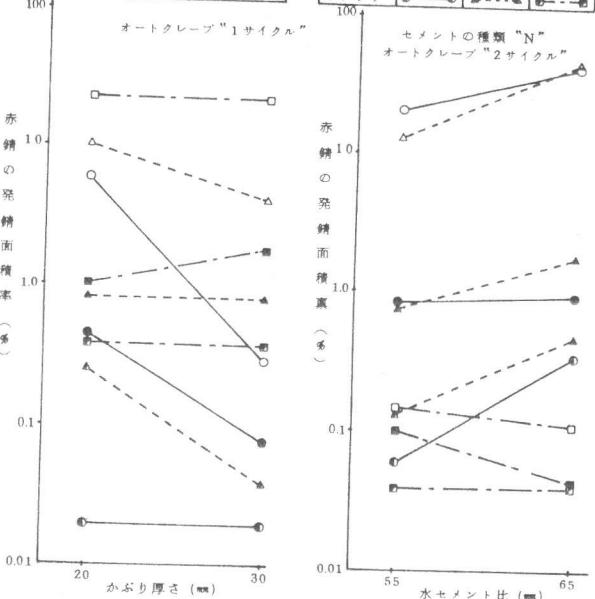
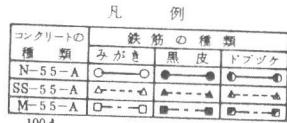


図10: 屋外自然暴露した各種コンクリートのみがき鉄筋と
オートクレーブ促進試験した各種鉄筋の発錆面積率