

[33] 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

正会員 ○枝広英俊（芝浦工業大学工学部）

正会員 依田彰彦（足利工業大学工学部）

1. まえがき

十分除塩されない海砂を用いると、コンクリート中の鉄筋の腐食は著しく進行し、コンクリートのひび割れの発生やかぶりコンクリートの剥落を引き起こし、さらに構造物としての安全性も損なわれる。そのため、昨今では塩分許容値の厳守や総量規制化の導入、及び設計・施工上の対策などが見直され、耐久性向上を図る提案が数多くなされている。しかし、コンクリート中の鉄筋の腐食機構は複雑であるため十分解明されているとは言えず、さらに防食対策についても未だ不十分なのが現状であろう。

そこで本研究では、昨年の報告¹⁾に引き続き、改めて角柱の供試体を製作し、十分除塩されていない実際の海砂を用いたコンクリート中のみがき鉄筋や黒皮鉄筋、及び各種表面処理などを施した縦筋と横筋に対し、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及びセメントの種類、ならびにかぶり厚さの違い、縦筋と横筋の差異で比較し、併せて防食を目的とした各種表面処理鉄筋に対しその効果を検討した。

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まの0.30%と、水洗いにより0.08%とし、調合は水セメント比を55%と65%、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。発錆面積を測定する供試体は縦筋が $15 \times 15 \times 30$ cm、横筋が $15 \times 12 \times 15$ cmとし、かぶり厚さは2 cm、4 cm、7 cmの3種類とした。鉄筋の種類はオートクレーブによる促進試験が、みがき鉄筋、黒皮鉄筋、セメントペーストのドブ漬け鉄筋、降伏鉄筋、ジンクリッチペイント塗装鉄筋、みがき棒鋼で、屋外自然暴露試験は前記の各種鉄筋とホーロー処理鉄筋、亜鉛メッキ鉄筋及びエポキシ樹脂鉄筋とした。促進試験は材令7日より3サイクル迄行い、屋外自然暴露試験は材令91日、1年、5年、10年を設定して、所定の試験が終了後、直ちに鉄筋の発錆面積を測定した。但し、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。

3. 使用材料

(a) セメント 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。

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	igloss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
普通ポルトランドセメント	N	0.6	0.2	21.8	5.5	3.0	64.5	1.4	2.2
高炉セメントB種	SB	0.9	0.2	26.4	10.3	2.2	53.5	3.6	2.1

(b) 骨材 粗骨材は鬼怒川産を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0.30% (略号A) と水洗いした0.08% (略号B) とし、粒度分布と主な品質を表3. に示す。

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	圧縮強さ (Kg/cm ²)		
			水量 (%)	始凝 (分)	終凝 (分)		3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	3.15	3,300	28.3	2-51	4-01	良	151	253	406
高炉セメントB種	3.03	3,710	29.0	3-10	4-25	良	107	189	408

(c) 化学混和剤 天然樹脂酸塩系のA E剤を使用した。なお、一部のコンクリートには防錆剤（主成分がオキシカルボン酸塩）を用いた。

表3. 使用した骨材の粒度分布と主な品質

骨 材 の 種 類	ふるいを通るものの重量百分率 (%)										F. M.	最大寸法 (mm)	表乾比重	吸水率 (%)
	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15				
粗 骨 材	98	78	56	18	2	—	—	—	—	—	7.0	25	2.56	2.00
海 砂	—	—	—	—	99	97	80	61	17	2	2.4	(2.5)	2.63	1.04

(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。

表4. 鉄筋の化学成分 (% $\times 10^{-2}$) と主な物理的性質

(各社報告による)

鉄筋の種類	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Sn	C+Mn/6
SR-24 (T社)	11.5	12.8	54.0	0.3	3.5	9.1	12.5	26.8	3.2	20.5
SGD-3 (J社)	18.0	6.0	75.0	2.2	4.2	—	—	—	—	—
SD-30 (T社)	21.1	15.5	70.9	2.8	3.7	9.6	15.6	27.7	3.0	32.9

(e) 鉄筋 発錆面積率を求めた鉄筋は直径9 mmのSR24及びSGD3を用い、また、引張試験とコンクリートとの付着強度試験にはSD30・D19を使用し、それらの主な品質と処理方法を表4. 及び表5. に示す。

(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表を示す。

4. 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 圧縮強度と静弾性係数及び中性化深さを測定した。

(c) その他の項目と方法

(1) オートクレープによる腐食の促進試験は、脱型後材令7日迄水中養生し、図1. に示す条件を1サイクルとし、3サイクル迄行った。

(2) 供試体の形状・寸法・仕様は図2. に示す。

(3) 屋外自然暴露試験は材令7日迄水中養生し、鉄筋の露出面をタールエポキシ系塗料でシールして、以後本学の中庭にて所定の材令迄暴露した。

(4) 鉄筋の錆は所定のオートクレープ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、透明な方眼シートに黒色を呈する錆 (Fe_3O_4 を主な成分とし、以下黒錆と称する) と、赤色を呈する錆 (βFeOOH , γFeOOH , $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ を主な成分とし、以下赤錆と称する) に分けてそれぞれ油性ペン (太さ0.1 mm) で写し取り発錆面積率を求めた。但し、測定部分は両端部を除いた中心部とし縦筋が巾10cm, 横筋が巾5cmとした。なお、鉄筋の種類と実施した発錆の試験項目を、表7. に示す。

5. 実験結果

主な結果を表8. 及び図3. ～図9. に示す。

6. 結果の検討

(a) コンクリートの主な性質

フレッシュコンクリートは、所要のスランプ及び空気量が得られ、かつワーカビリティは良好であった。

また、圧縮強度及び静弾性係数は塩分濃度が濃い程初期材令では大きい、長期材令では同程度か、若干下回る傾向にあった (表8. 参照)。なお、中性化深さは材令1年の為顕著な差異はないが、僅かに塩分濃度が濃い程速い傾向 (差は0.6 ～0.9 mm) が認められた。

(b) 鉄筋の発錆に関する検討

(1) 塩分濃度の違いが及ぼす影響

コンクリート中の塩化物の塩素イオン量は、計算上N-55-Aが約2.01kg/m³, N-55-Bが約0.50kg/m³で、新JASS 5 (案) で示されている許容値の0.6kg/m³と0.3kg/m³をAとBは超えており、当然のことながら発錆は顕著に現われた。その結果の一例を図3.及び図4. に示したが、遊離したCl⁻イオンの不動態皮膜の破壊やpHの低下などにより、塩分濃度が濃い程発錆し、オートクレープによる促進試験で最も発錆の認められたみがき鉄筋 (横筋) では、塩分濃度AはBに比べて多いもので約25倍近くに達する。また、自然暴露試験の材令1年では、塩分濃度Aのみがき鉄筋にわずかではあるが赤錆の点食が認められた。

表5. 使用した鉄筋の種類と処理方法

鉄筋の種類	材質	略号	表面処理方法
みがき鉄筋	SR24	T M	グラインダー (#120, サンドペーパー付) で磨き処理後、#800サンドペーパーにより仕上げメッキで拭いて用いた。
黒皮鉄筋	SR24	T K	納入された電炉鉄筋を使用した。
ベストドブ漬け鉄筋	SR24	T P	黒皮鉄筋の表面にW/C=30% のセメントペーストを打込み前にまぶした。
亜鉛メッキ鉄筋	SR24	T A	黒皮鉄筋を酸洗後、溶融 (トブツケ) メッキ。平均厚さは77μm以上。
ホーロー処理鉄筋	SR24	T H	黒皮鉄筋を酸洗後、約900℃でホーロー引きして用いた。
エポキシ樹脂鉄筋	SR24	T E	黒皮鉄筋を酸洗後、エポキシ樹脂を塗布した。
降伏鉄筋	SR24	T Y	黒皮鉄筋に降伏点を超える引張り試験を行い、破断後の残留ひずみ (伸率) は約5±1%とした。
ジソグリップ塗装鉄筋	SR24	T J	みがき鉄筋をアルカリ系厚膜形無機質ジソグリップペイントを2回塗りした。
みがき棒鋼	SGD3	M J	高炉製品のみがき棒鋼を使用した。

表6. コンクリートの種類と略号及び調合計画

コンクリートの種類と略号	細骨材率 (%)	単位水量 (Kg/m ³)	絶対容積 (l/m ³)	細骨材	粗骨材
N-55-A, B	37.0	168	97	257	438
N-65-A, B	39.2	168	82	279	431
SB-55-A, B	37.2	164	98	260	438
N-55-AP (防錆剤使用)	36.6	161	97	257	445

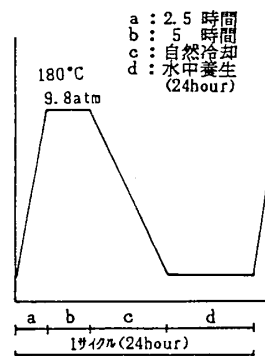


図1. オートクレープ促進試験の条件

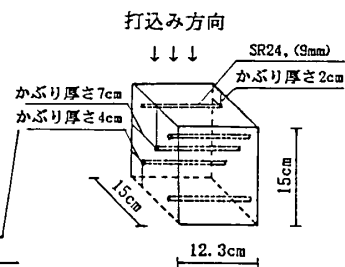


図2. 供試体 (横筋) の形状寸法と仕様

表7. 鉄筋の種類と試験項目

鉄筋の種類と略号	オートクレープ		自然暴露	
	縦筋	横筋	縦筋	横筋
みがき鉄筋, (TM)	○	○	○	○
黒皮鉄筋, (TK)	○	—	○	○
トブツケ鉄筋, (TP)	○	—	○	○
亜鉛メッキ鉄筋, (TA)	—	—	○	○
ホーロー処理鉄筋, (TH)	—	—	○	○
エポキシ樹脂鉄筋 (TE)	—	—	—	○
降伏鉄筋, (TY)	○	—	○	—
ジソグリップ鉄筋, (TJ)	○	—	○	—
みがき棒鋼, (MJ)	○	—	○	—

注) ○印が発錆面積率を測定した項目を示す。

(2) かぶり厚さの違いが及ぼす影響

かぶり厚さが大きくなると一般環境下では、鉄筋の発錆はかなり抑制されるが、オートクレーブによる促進試験によってもその傾向は認められた。しかし、横筋の一部には必ずしも同じ傾向を示さないものがあり、これはブリージングの影響や、コンクリート中の遊離したCl⁻イオンの凝集などが起因したものと思われる(図5、及び図6、参照)。

(3) 水セメント比の違いが及ぼす影響

水セメント比が55%と65%とその差が極端に大きくなかったためか、全体としては、水セメント比が大きい方がわずかに多くなる傾向にあった。しかし、ばらつきも大きくオートクレーブによる高温高压の飽和蒸気雰囲気条件下では、この程度の水セメント比の差では、必ずしも自然環境下と一致した結果が得られるとは限らない(図7参照)。

(4) セメントの種類の違いが及ぼす影響

普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を比較したが、屋外自然暴露1年の結果では特に差異はなく同程度とみなせよう。また、オートクレーブによる促進試験でも一定の傾向は示されなかったが、わずかな差異を指摘すれば、サイクルが多い、塩分濃度が濃い、かぶり厚さが少ないなど過酷な条件下ではSB $\geq$ Nの関係にあり、逆に塩分濃度が薄い場合や1サイクルでは、SB $\leq$ Nの関係にあった。これは、オートクレーブ促進試験の開始が材令7日のためもあって、高炉セメントの潜在水硬性が十分発揮されていないことも一因として上げられよう。

(5) 縦筋と横筋の違いが及ぼす影響

縦筋と横筋を比較するとばらつきは多いが、ブリージングや締め固めなどの影響もあってか、横筋が約2～5倍の発錆面積率を示した。また、横筋の発錆性状を観察すると、自然暴露した供試体では主に鉄筋の下端に発錆が見られるのに対し、促進試験ではコンクリートの表面側に多い。

表8. 圧縮強度試験結果及び弾性係数

コンクリートの種類	圧縮強度 (kg/cm ²)				E _c (×10 ⁵ kg/cm ²)		
	7日	28日	91日	1年	28日	91日	1年
N-55-A	211	281	329	386	2.70	2.72	2.93
N-55-B	207	288	351	399	2.74	2.94	2.94
N-65-A	157	217	257	292	2.40	2.47	2.49
N-65-B	136	222	258	301	2.45	2.48	2.59
SB-55-A	189	248	319	385	2.54	2.97	3.09
SB-55-B	170	275	351	392	2.46	3.01	3.25
N-55-AP	256	330	380	394	2.71	3.09	3.31

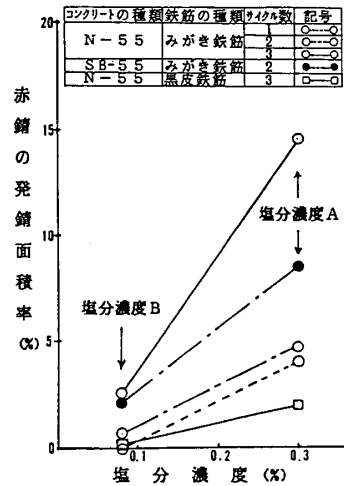


図3. 促進試験による鉄筋の(かぶり2cm, 縦筋)の発錆面積率

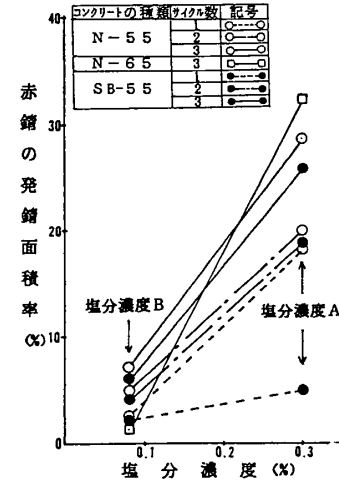


図4. 促進試験によるみぎ鉄筋の(かぶり2cm, 横筋, 上段筋)発錆面積率

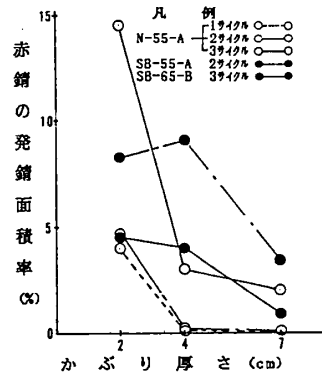


図5. かぶり厚さの違いによるみぎ鉄筋(縦筋)の発錆面積率

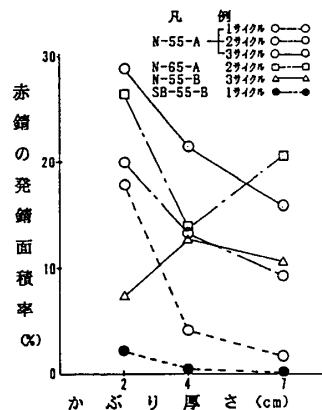


図6. かぶり厚さの違いによるみぎ鉄筋(横筋)の発錆面積率

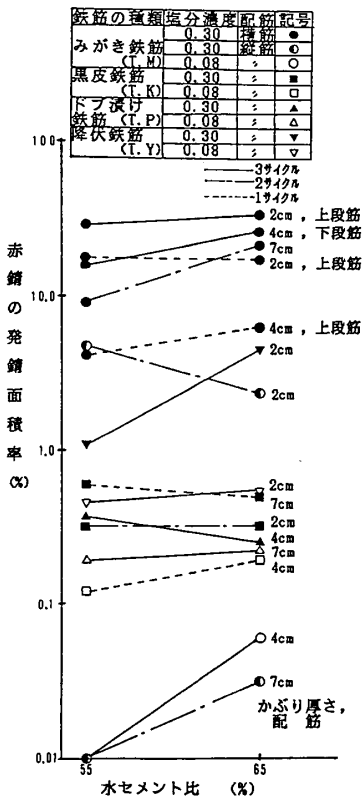


図7. 水セメント比の違いによる鉄筋の発錆面積率

(6) 鉄筋の種類の違いまたは表面処理の違いによる検討 オートクレーブによる促進試験の結果、発錆面積率はみがき鉄筋>降伏鉄筋>ドブ漬鉄筋>みがき棒鋼>ジンクリッチ塗装鉄筋の関係にあった(図9. 参照)。これは、みがき鉄筋製作の際に生じた表面の凸凹、黒皮被膜の腐食抑制効果、応力を受けたためによる黒皮の剥離と鉄筋のひずみ、セメントペーストによる表面保護と不動態被膜の事前形成、鉄筋の化学成分の相異、亜鉛粉末のイオン化傾向による鉄筋の腐食抑制効果などが起因したといえよう。また、自然暴露試験は材令1年ということもあり、防錆剤を用いたコンクリートや、防食を目的として各種表面処理を施した鉄筋等には発錆が認められず、その他の鉄筋はオートクレーブ促進試験と同じ傾向にあった。なお参考として、鉄筋の機械的性質でSD30・D19の降伏点強さは、黒皮鉄筋の37kg/mm²に対し亜鉛メッキ鉄筋が38kg/mm²、ホーロー処理鉄筋が35kg/mm²を示し、高温処理によるわずかな低下がある。さらに、すべり量0.025mmにおける付着強度比で黒皮鉄筋を100とした場合、みがき鉄筋が100、ジンクリッチ塗装鉄筋が90、ホーロー処理鉄筋が106となり、塗装鉄筋に関しては付着強度の低下が懸念されるが、施工法も含めて今後検討を要する。

(7) オートクレーブによる腐食の促進試験の検討

サイクル数の増加及び塩分濃度の増大に伴って発錆は顕著になり、塩分腐食の促進試験として自然環境下との相関が得られそうであり(図8. 参照)、今後の長期材令での結果を踏まえて、漸次明確にしたい。

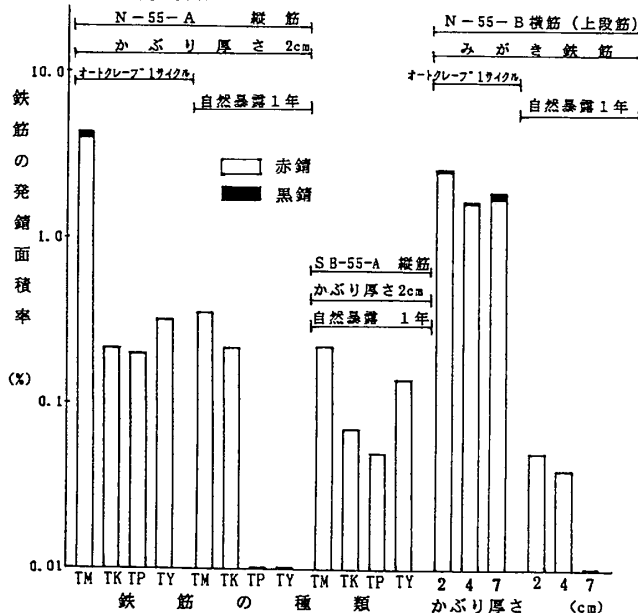


図8. オートクレーブ促進試験と屋外自然暴露試験との相関

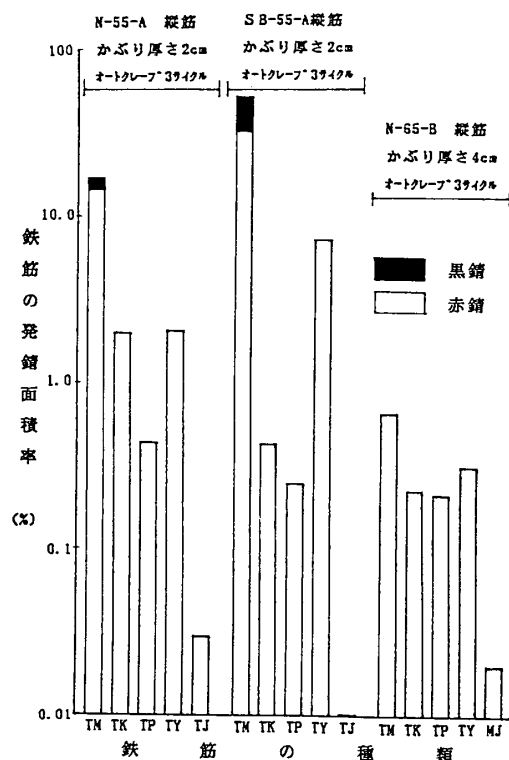


図9. 鉄筋の種類及び表面処理の違いによる発錆面積率の比較

7. まとめ

実際の海砂を用いたコンクリート中のみがき鉄筋や黒皮鉄筋、及び防食を目的とした各種表面処理を施した鉄筋などに対し、オートクレーブによる腐食の促進試験を行った結果、以下の事柄を確認した。(1) 塩分濃度差とサイクル数による影響は顕著に現われ、苛酷な条件程発錆面積率は大きい。(2) オートクレーブによる促進試験では赤錆と黒錆が生じたが、材令1年の自然暴露試験では赤錆のみ生じ、腐食生成物に幾分違いがある。(3) 水セメント比が大きく、かぶり厚さが少ない程発錆面積率は若干多いが、本促進試験方法の結果では部分的にばらつきを生じている。(4) 横筋と縦筋で比較するとサイクル数や条件によって異なるが、横筋が約2~5倍多い。(5) みがき鉄筋は、表面処理の有無や表面の凹凸などによって、他の鉄筋に比べて発錆が多い。(6) 引張応力を受けひずみを生じた降伏鉄筋は、載荷していない黒皮鉄筋に比べて発錆面積率は若干増大する。(7) 表面処理を施した鉄筋は、本促進試験において防食効果が認められたが、一部の鉄筋に引張強さやコンクリートの付着強度の低下の疑いがあり、施工法を考慮した対応が必要である。(8) 自然暴露試験との相関は一応認められたが、今後の長期材令の結果を待って検討したい。なお本実験には、小野田セメント中央研究所と本学卒業生の鈴木澄江、江森 靖、高谷健司君らの協力を得たことを付記し、深謝する。

【参考文献】1) 依田, 枝広「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, 1985, ほか