

論文 高強度コンクリートの塩害抑制効果に関する実験的研究

吉瀬健二*1・榊田佳寛*2・中村成春*3

要旨: 高強度コンクリートの塩害抑制効果を評価するとともに、塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度を把握するために促進劣化試験を行い、この結果と既に報告した暴露試験の結果を併せて検討した。その結果は次のようである。1) 水結合材比を小さくした高強度コンクリートは、鉄筋腐食の抑制策として十分な効果がある。2) 鉄筋の腐食は、①塩化物量が多いほど、②促進環境ほど、③かぶり厚さの小さいほど、深さ方向に進む傾向がある。3) コンクリート中に内在塩化物を多量に含んでいる場合の、鉄筋の腐食に関するかぶり厚さの影響は、40 mm程度の範囲ではほとんどない。

キーワード: 塩化物, 高強度コンクリート, 鉄筋腐食速度, 発錆面積率, 腐食質量減少率

1. はじめに

コンクリート中に存在する塩化物イオンは、鉄筋コンクリートの耐久性を低下させる主な要因のひとつである。その対策として、水結合材比を小さくして密実性を高めた、高強度コンクリートの利用が考えられ、高炉スラグ微粉末には塩害抑制効果があるといわれている。

本研究では、塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度抑制に及ぼす、低水結合材比および高炉スラグ微粉末の添加の影響について、実験的に検討したものである。実験は高温多湿の条件での促進劣化試験と屋外暴露試験とした。屋外暴露試験の結果の一部については、昨年度報告している¹⁾が、本年度はその結果と促進試験の結果を併せて報告する。

本研究は建設省総合開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発(略称: New RC総プロ)」(1988~1992年度)の一環として、高強度鉄筋コンクリートの耐久性評価のために製作した試験体を用いて行った。

2. 実験概要

2.1 実験計画

実験の要因と水準を表-1に、供試体概要を図-1に示す。図中の鉄筋番号はかぶり厚さの小さいものから順にa, b, c, dとした。

供試体は、打込み後、翌日脱型し、20℃、80% RH以上で14日間湿室養生した後、20℃、60%

表-1 実験の要因と水準

要因	水準	
水結合材比 W/B (%)	30	60
高炉スラグ微粉末置換率 (%)	0, 30, 50	0
塩化物量 Cl ⁻ (kg/m ³)	2.47, 4.94	
鉄筋の種類	SD685, SD295	
かぶり厚さ(mm)	10, 20, 30, 40	

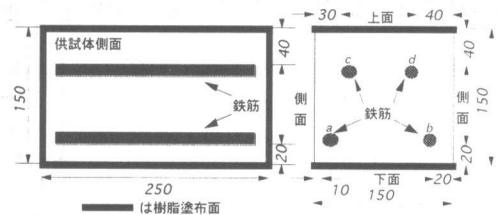


図-1 供試体概要 単位 (mm)

* 1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

* 2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

* 3 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博 (正会員)

RH で 14 日間の気乾養生中にエポキシ樹脂を試験面以外の面に塗布し、材齢 28 日から促進劣化試験を開始した。

試験条件は、劣化を促進させるため温度を 60℃としたが、これは通常と著しく異なる腐食環境にならない範囲と考えられる。湿度は蒸気養生と同様の条件である 95%RH 以上とした。

促進劣化試験期間は、6ヶ月、12ヶ月、および24ヶ月とし、その後、それ以上劣化が進行しないよう 20℃、60%RH の恒温恒湿室に保管し、材齢 5 年で屋外暴露試験場に暴露していた供試体と一括して、鉄筋の発錆面積および腐食質量減少率の測定を行った。

2. 2 調合・使用材料

実験の組合せ及びコンクリートの調合と性質を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)、高炉スラグ微粉末は密度=2.90g/cm³、粉末度=8000cm²/gのものを使用した。細骨材は大井川産砂(絶乾密度

2.59g/cm³、吸水率 1.63%、粗粒率 2.73)、粗骨材は青梅産硬質砂岩砕石(絶乾密度 2.62g/cm³、吸水率 0.62%、粗粒率 6.64)を使用した。鉄筋は表-3に示す成分の異形鉄筋(φ13mm)を使用した。鉄筋 SD685 は、NewRCで開発された高強度鉄筋である。降伏点及び引張強度が高い。鉄筋は酸化被膜(黒皮)付きで、コンクリート打込み前にアセトンで脱脂して用いた。

2. 3 評価項目

鉄筋腐食度の評価は発錆面積率、腐食質量減少率で行った。発錆面積率は、供試体より取出した鉄筋の発錆部分を透明シートに写し取り、平面に展開してビデオパターンアナライザーにより面積を測定し算出した。腐食質量減少率は、鉄筋を酸洗い液(2-メルカベンゾチアゾール 150ppm、クエン酸2アンモニウム 10%水溶液)に浸漬して錆を擦り落とした後、質量を測定し、当初の鉄筋質量から差を取り、錆落としの際に失われた酸化皮膜の質量を補正して、当

表-2 実験の組合せとコンクリートの調合・性質

供試体名	W/B (%)	高炉スラグ微粉末置換率(%)	塩化物量 (Cl) (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	細骨材率 (%)	混和剤使用量		スランブ (cm)	空気量 (%)	材齢28日 圧縮強度 N/mm ²
						SP-8N (kg/m ³)	NO.70 (kg/m ³)			
A,B-3-S0-Y-1,2,3	30	0	2.47	165	41.1	5.500	-	18.0	4.5	85.36
A,B-3-S3-Y-1,2,3		30			40.6	3.575	-	18.0	4.4	93.20
A,B-3-S5-Y-1,2,3		50			40.3	3.300	-	17.5	3.7	85.46
A,B-6-S0-Y-1,2,3	60	0	4.94	178	46.3	-	0.742	18.5	4.6	38.51
A,B-3-S0-Z-1,2,3	30	0		165	41.1	6.050	-	17.5	4.4	79.38
A,B-3-S3-Z-1,2,3		30			40.6	4.125	-	18.0	4.3	91.04
A,B-3-S5-Z-1,2,3		50			40.3	3.850	-	18.0	3.6	85.06
A,B-6-S0-Z-1,2,3	60	60	178	41.1	-	0.472	18.0	4.4	39.40	

供試体名の記号は左例の通りである。(例) A-3-3-Y-2

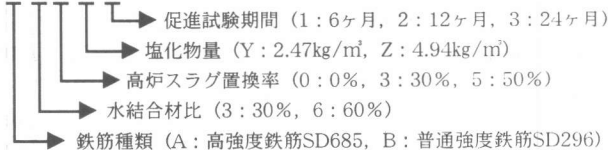


表-3 鉄筋の成分と性質

鉄筋の種類	化学成分 (%)						機械的性質		
	C	Si	Mn	P	S	C+Mn/6	降伏点または耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)
SD685	0.30	0.30	1.53	0.019	0.009	0.56	677.66	864	20.0
SD295	0.27以下	-	1.50以下	0.040以下	0.040以下	-	295~390	440	16以上(2号) 18以上(3号)

初の質量に対する百分率で表した ((1) 式)。

$$\Delta W = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100 - W_s \times \frac{100 - S}{100} \dots (1)$$

ここで、

ΔW : 腐食質量減少率 (%)

W_0 : 埋込前の鉄筋質量 (g)

W : 錆落としをした後の鉄筋質量 (g)

W_s : 酸化被膜の質量百分率 (%)

S : 発錆面積率 (%)

式 (1) において ΔW が負の値になる場合は質量減少率は 0% とした。なお式 (1) において酸化被膜の質量百分率を求めるための鉄筋を用意していなかったため、実験で使ったものうち、発錆面積率が 0.5% 以下のものについ

て質量減少率を求め、酸化被膜の質量百分率とした。その結果は図-2 に示すとおりであり、促進劣化試験のときの鉄筋 A が 0.94%、鉄筋

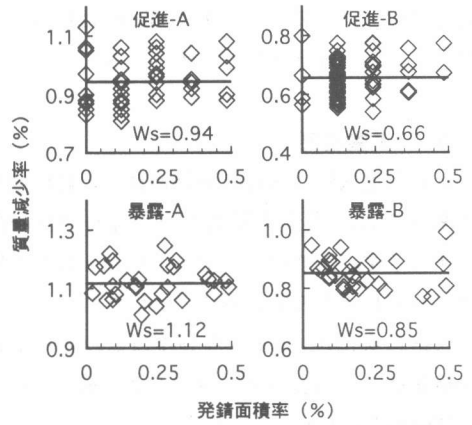


図-2 酸化被膜量算定

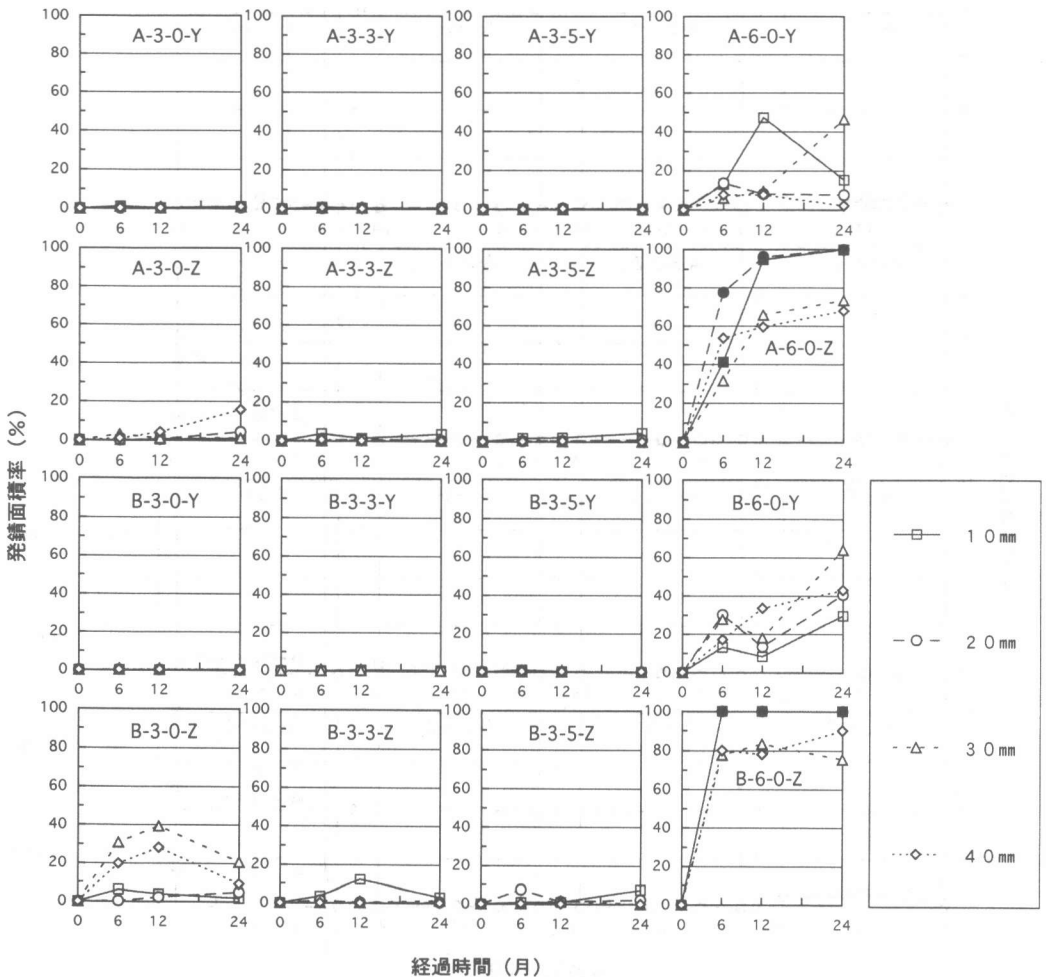


図-3 発錆面積率の経時変化

B が 0.65%であった。また暴露試験結果についても同様の算定を行い、その結果は鉄筋 A が 1.12%、鉄筋 B が 0.85%であった。促進劣化試験との違いは、錆落としのために酸に浸漬した時間に差があったためと考えられる。

3. 実験結果

促進劣化試験における発錆面積率の経時変化を図-3に、腐食質量減少率の経時変化を図-4に示す。鉄筋に沿って 0.1 mm以上のひび割れがみられたものを黒塗りで示した。

水結合材比が 30%の高強度コンクリートは発錆面積率、腐食質量減少率ともに低く、高い防錆効果が認められる。

水結合材比が 60%のものは、促進劣化試験期間が長くなるほど、塩化物イオン量が多いほど、またかぶり厚さが小さいほど、腐食が進む傾向にある。塩化物量 4.94 kg/m³のかぶり厚さ 10 mm及び 20 mmでは、試験期間に関わらず、すべてでひび割れがみられた。高強度鉄筋 A では、促進劣化試験期間の増加とともにひび割れ幅は増加していたが、普通鉄筋 B では、いずれも 1 mm以上で剥離したのもあった。ひび割れ発生後は急激に腐食が進行することがわかる。

高炉スラグ微粉末の効果に関しては、水結合材比が 30%のもの自体がほとんど発錆していないので、明確な効果は確認できないものの、置換していないものに比べ、置換したものの発

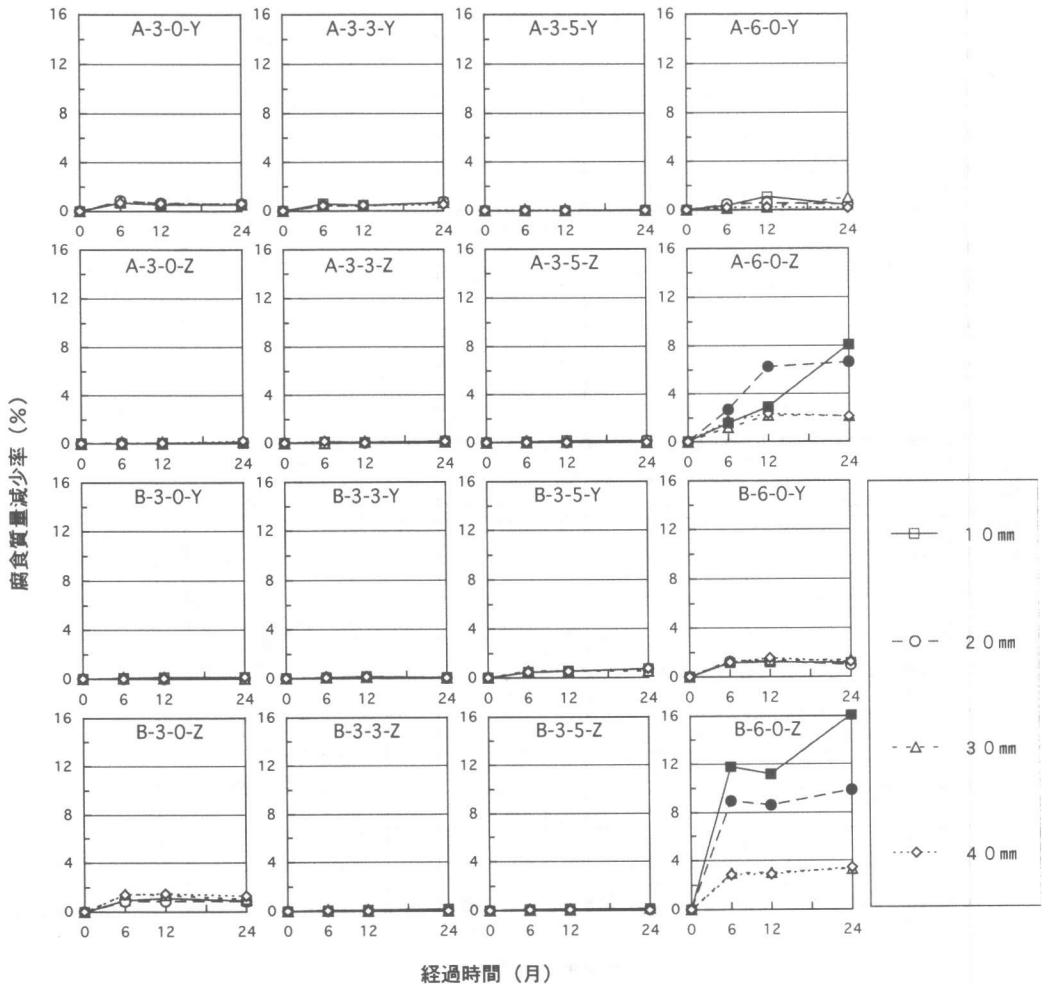


図-4 腐食質量減少率の経時変化

錆はやや抑制されている。

4. 考察

4.1 鉄筋腐食速度に関する考察

試験期間と腐食質量減少率の関係を原点を通る直線式で近似し、その傾きを腐食速度 q とし、促進劣化試験、暴露試験における鉄筋腐食速度を表した (式 (2))。また水セメント比が小さい高強度コンクリートでは、腐食質量減少率が小さく比較が困難なため、腐食質量減少率の代わりに発錆面積率を使い、その傾きを発錆速度 r とした (式 (3))。

$$\Delta W = q \cdot t \dots \dots \dots (2)$$

$$S = r \cdot t \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 ΔW : 腐食質量減少率 (%)

S : 発錆面積率 (%)

q : 鉄筋腐食速度 (%/月)

r : 鉄筋発錆速度 (%/月)

t : 試験期間 (月)

図-5にかぶり厚さと腐食速度のグラフを示す。鉄筋に沿って 0.1 mm以上のひび割れがみられたものを黒塗りで示した。コンクリートにひび割れが発生したものは腐食速度が非常に大きいのにに対し、ひび割れの無いものはかぶり厚さによらず、ほぼ一定の値をとっていることがみられる。このことから、コンクリート中に内在塩化物を多量に含んでいる場合の、かぶり厚さの鉄筋腐食に及ぼす影響は、この実験の範囲である 40 mm程度まではほとんどないといえる。

高強度鉄筋と普通強度鉄筋では、普通強度鉄筋の方が腐食速度が大きい。これは図-2に示した酸化被膜算定結果にもみられるように、高強度鉄筋の方が酸化被膜が厚く安定しているためであると考えられる。

図-6に高炉スラグ添加率と発錆速度の関係を示す。スラグ添加率が大きくなると発錆速度が小さくなる傾向がみられ、高炉スラグ微粉末には発錆抑制効果があるといえる。このことについては、さらに腐食を進行させた段階で比較したいと考えている。

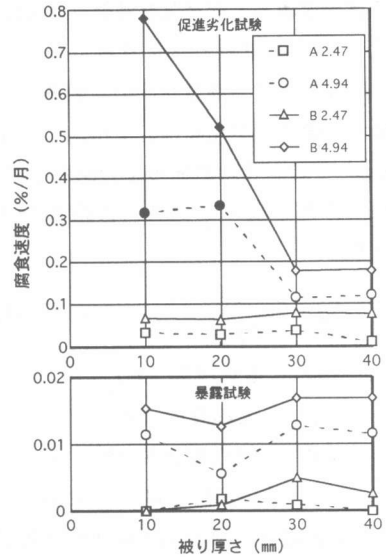


図-5 被り厚さと腐食速度の関係

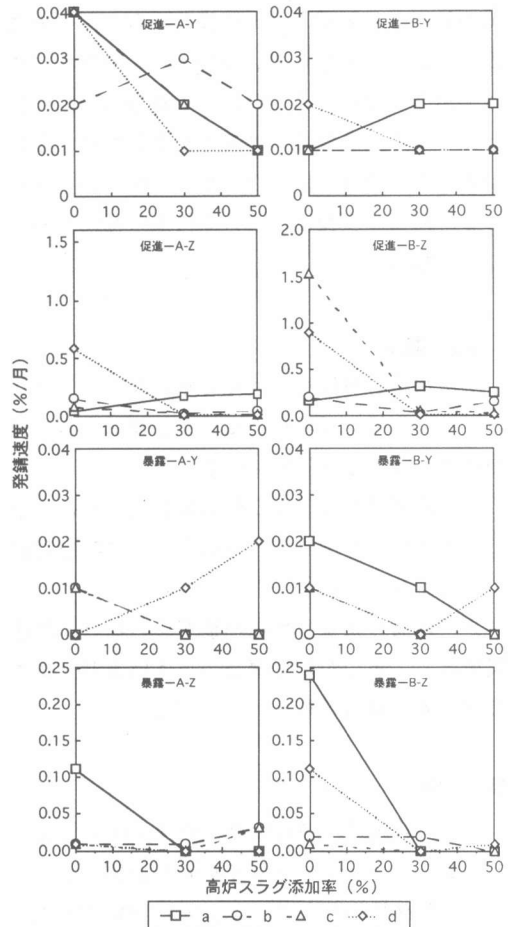


図-6 高炉スラグ置換率と発錆速度の関係

4.2 発錆面積率と腐食質量減少率の関係

図-7に発錆面積率と腐食質量減少率の関係を示す。また鉄筋の腐食傾向の比較を行うために、腐食質量減少が発錆部分で平均して起こると仮定し、そのときの鉄筋の腐食深さを式(4)により求めた。図-8に鉄筋の腐食深さの傾向を示す。

$$\Delta d = \frac{d \cdot \Delta W}{4S} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 Δd : 腐食深さ (mm)
 d : 公称直径 (mm)
 ΔW : 腐食質量減少率 (%)
 S : 発錆面積率 (%)

暴露試験と促進試験とは腐食の傾向が異なり、促進試験ではより深さ方向に腐食が進行している。また鉄筋種別では、普通鉄筋の方が高強度鉄筋よりも深さ方向に進む場合と、その逆の場合があり一定していない。かぶり厚さ別では、かぶり厚さの小さいほどより深さ方向に進行している。これらの結果から塩化物量が多いほど、促進環境ほど、かつかぶり厚さの小さいほど、鉄筋の腐食は深さ方向に進む傾向があることがわかる。

5. 結論

- 1) 水結合材比を小さくした高強度コンクリートは、初期内在塩化物に対する鉄筋腐食の抑制策として十分な効果がある。
- 2) 鉄筋の腐食はひび割れの発生と共に急激に促進され、かぶり厚さの影響は主にひび割れの発生に起因する。
- 3) 鉄筋の腐食は塩化物量が多いほど、促進環境ほど、かつかぶり厚さの小さいほど、深さ方向に進む傾向がある。

参考文献

- 1) 山崎純子・梶田佳寛・中村成春：高強度コンクリートの塩害抑制効果の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.209-214，1998.7

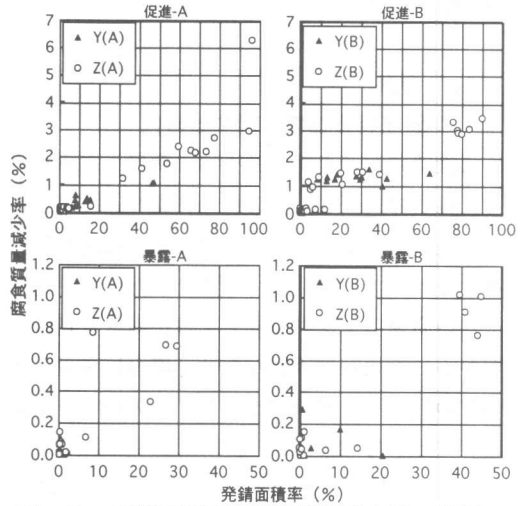


図-7 発錆面積率と腐食質量減少率の関係

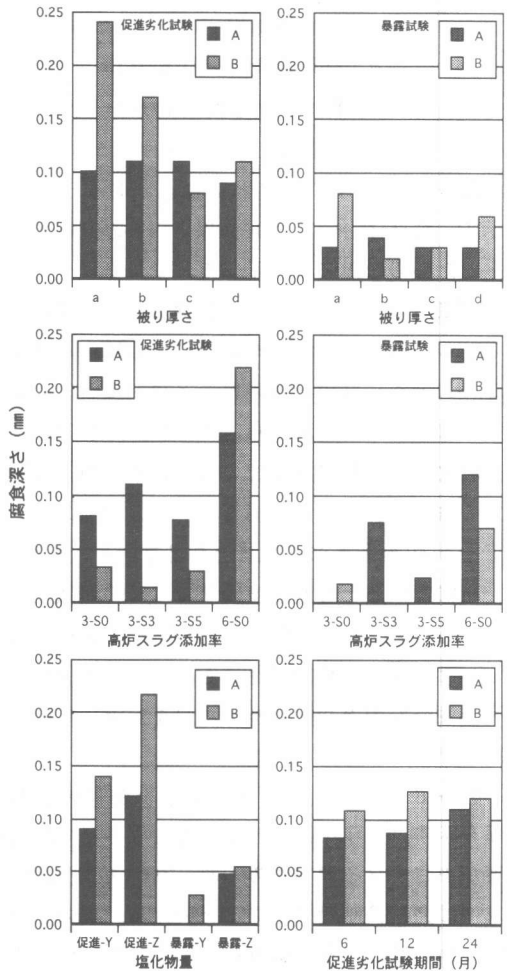


図-8 腐食深さの傾向