

[41] オートクレーブによるコンクリート中の鋼材の腐食促進試験

正会員 ○武 若 耕 司 (東京大学 大 学 院)
 正会員 小 林 一 輔 (東京大学 生 産 技 術 研 究 所)

1. まえがき

コンクリート中の鋼材の腐食促進試験は、海砂中の塩分の許容値の決定や、防錆剤の効果判定などを目的とする実験研究を行なう場合に必要不可欠の試験であるが、これまでの試験方法は、再現性や試験期間の面で問題が多く、より適切な試験方法が望まれていた。

最近、著者らは高温高圧の飽和蒸気雰囲気下において、非常に短期間で腐食の促進が行なわれるオートクレーブ方法を提案した¹⁾。この方法は腐食促進のほか、有害な塩分量の検出精度もすぐれており、一般的にコンクリート中の鋼材の腐食に及ぼす各種要因の影響の検討または、各種の防食方法の選定にも適用できる可能性がある。

本文は、以上の点を明らかにすることを目的とした一連の実験的検討を行なった結果をとりまとめたものである。

2. 実験の概要

次の4つのテーマについて検討を行なった。

- I : コンクリート中の塩分量と鋼材腐食との関係
- II : 鋼材腐食に対する防錆剤の作用効果
- III : コンクリートの品質と鋼材腐食との関係
- IV : 特殊なコンクリート中における鋼材腐食

表-1にI,IIおよびIIIのテーマに関する実験の要因と水準を示す。またIVに関しては、スラグ混入の影響と鋼繊維の腐食状況を取り上げた。

表-2には、代表的なコンクリートの配合を示す。使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、粗骨材は碎石、細骨材は川砂を用い、塩分としては、人工海水(NaCl換算 6.54%溶液)を使用した。供試体はφ10×20cmの円柱体を用い、その内部に図-1に示す様に#400のサンドペーパーで表面仕上げを行ない、アセトンで脱脂したみがき丸鋼(φ13mm)を配筋した。また、コンクリートの養生は、塩分あるいは防錆剤の溶出を防ぐため温度20℃における密封養生とし、材令7日からオートクレーブ養生を開始した。オートクレーブによる試験条件は図-2に示す様に、その繰返し数によって3種類に定めた。

3. 実験結果および考察

1)コンクリート中の塩分量と鋼材腐食との関係

表-1 実験の要因と水準

シリーズIおよびIIの場合		一定とする条件
要因	水準	
塩分量 (%) <small>注1)</small>	0, 0.02, 0.04, 0.1, 0.3, 0.5	W/C (70%)
防せい剤の種類および混入量 <small>注2)</small>	市販防せい剤 (標準量, 1/2標準量) NaNO ₂ 0.5%, Ca(NO ₂) ₂ 0.5%	W (196)
かぶり (mm)	10, 20, 30	kg/m ³

シリーズIIIの場合		一定とする条件
要因	水準	
水セメント比 (%)	40, 50, 60, 70	W (196 kg/m ³) 混入塩分量 (2cm)
単位セメント量 (kg/m ³)	350, 392, 420	W/C (50%)
スランブ (cm)	3, 7, 12	— (0.3%)

注1) 塩分量はNaCl換算で細骨材の単位重量に対する割合で混入した。
 注2) NaNO₂およびCa(NO₂)₂の混入量は混練水に対する割合で混入した。

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
10	70	50	196	280	937	969

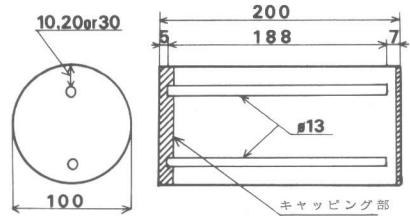


図-1 供試体の形状寸法と配筋状況

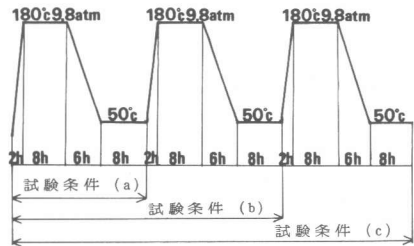


図-2 オートクレーブによる試験条件

表-3 塩分および防錆剤が鋼材の腐食に及ぼす影響(1)

塩分量 (%)		0		0.1		0.3		0.5		
試験条件	防せい剤の種類と混入量 (mm)	平均発錆面積 (mm ²)	平均発錆面積率 (%)	平均発錆面積 (mm ²)	平均発錆面積率 (%)	平均発錆面積 (mm ²)	平均発錆面積率 (%)	平均発錆面積 (mm ²)	平均発錆面積率 (%)	
試験条件 (a)	0	10	0	145.0	1.89	177.4	2.31	378.5	4.93	
		20	0	68.1	0.88	144.5	1.91	213.3	2.78	
		30	0	10.8	0.14	96.9	1.26	105.5	1.35	
	市販防せい剤標準量	20	—	—	11.8	0.15	2.0	0.03	—	—
		NaNO ₂ 0.5%	10	—	—	0	43.3	0.56	193.3	2.52
		20	—	—	0	0	14.5	0.20	147.8	1.92
Ca(NO ₂) ₂ 0.5%	10	—	—	0	0	15.1	0.20	40.3	0.52	
	20	—	—	0	0	0	0	14.3	0.20	
試験条件 (b)	0	20	0	0	138.6	1.81	240.8	3.14	558.5	7.27
試験条件 (c)	0	10	1.93	0.025	533.6	6.95	1161.4	15.13	2151.8	28.03
		20	2.12	0.025	467.0	6.11	1050.5	13.69	1270.7	16.55
	市販防せい剤標準量	20	—	—	58.0	0.76	244.0	3.18	248.9	3.25
	NaNO ₂ 0.5%	20	—	—	48.5	0.63	153.8	2.00	482.1	6.28
	Ca(NO ₂) ₂ 0.5%	20	—	—	50.1	0.65	49.4	0.64	27.3	0.35
高温多湿低温乾燥繰返し3ヶ月	0	10	0	0	0.05	0	0.1	0	16.1	0.21
		20	0	0	0	0	0	0	0.9	0.01

塩分量が変化した場合の鋼材の腐食量について表-3に示す。この表より、オートクレーブ方法による促進試験が、従来から比較的多く用いられている高温多湿低温乾燥繰返しによる腐食促進試験に比較して、非常に短時間で大きな腐食を起こし、しかも塩分量の増加に伴う腐食量の変化も顕著であることがわかる。このような結果は、本方法がコンクリート中の塩分が鋼材の腐食に及ぼす影響を十分に評価できることを示すものである。また図-3は、この表に基いて平均発錆面積率に及ぼすかぶりの影響を示したものである。なおこの図には参考として海洋環境下における鉄筋コンクリート梁の暴露実験結果の一部を合せて示している。海洋環境下においては外部から塩分が侵入することから、塩分量と鋼材腐食との関係についての定量的な評価はできないが、少なくとも本方法による腐食促進が自然環境下における鋼材の塩分腐食傾向とほぼ一致する傾向にあることがわかる。

表-4は、オートクレーブ方法を用いて海砂中の許容塩分量について検討を行なった結果を示したものである。この表より、許容塩分量をコンクリート中の鋼材に発錆を与えない塩分量の最大値と考えるならば、その値は少なくとも砂の絶乾重量に対して0.02%以下の値になる。

2) 鋼材腐食に対する防錆剤の作用効果

表-3にはさらに、防錆剤を添加した場合の鋼材の発錆量を示している。また、図-4はこの表に基いて平均発錆面積率と塩分量との関係に及ぼす防錆剤の効果を示したものである。これらの結果より、塩分量の如何を問わず、鋼材の腐食量は防錆剤の使用によって著しく減少しており、オートクレーブ方法によって防錆剤の効果を明確に把握できることを示して

(試験条件 (a) の場合)

(試験条件 (c) の場合)

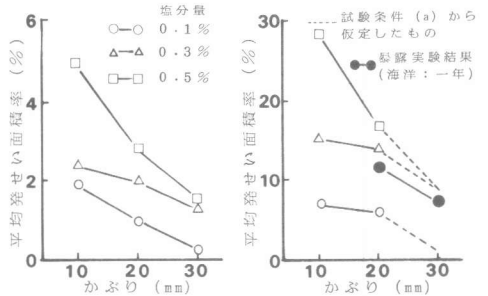


図-3 平均発錆面積率とかぶりの関係

表-4 塩分および防錆剤が鋼材の腐食に及ぼす影響(2)

試験条件	防せい剤量 (mm)	かぶり (mm)	平均発錆面積率 (%)			
			塩分量 (%)			
(a)	0	10	0	0	1.41	2.31
		20	0	0	0.10	1.91
	市販防せい剤 1/2	10	—	—	—	2.63
		20	—	—	—	0.44

(かぶり 10 mm)

(かぶり 20 mm)

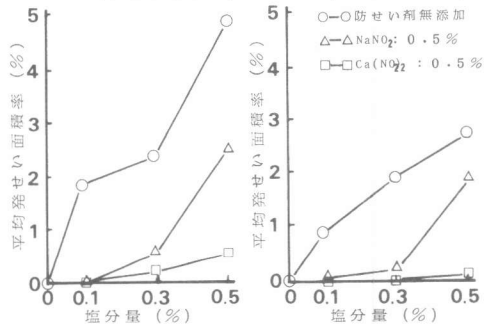


図-4 平均発錆面積率と塩分量との関係に及ぼす防錆剤の影響(試験条件:(a))

いる。なお、オートクレーブ方法は高温で養生を行なうため、あらかじめ防錆剤の高温特性について検討しておく必要があるが、現在最も多くコンクリート用防錆剤として用いられている亜硝酸塩の中で比較的分解温度が低い亜硝酸ナトリウムの分解温度は約300℃であり、オートクレーブ方法における上限温度である180℃程度では安定であると考えてよい。

そこで、この実験結果より、防錆剤の適用範囲について若干の考察を行なった。すなわち、亜硝酸塩を混練水に対し0.5%混合した場合には、塩分量0.1%までの範囲では、水セメント比が70%程度の低品質のコンクリートにおいても、少なくとも初期における鋼材の腐食は防止できると考えられるが、それ以上の塩分量に対しては、腐食量は減少するが防錆を完全に防止することはできない。このことは、防錆剤の効果はコンクリート中の塩分量と密接な関係があることを示すものである。このことは、表-4に示す様に、市販防錆剤を標準添加量の塩だけ混入した場合に著しく腐食量が増加することからもわかる。

3)コンクリートの品質と鋼材腐食との関係

図-5は、単位水量を一定とした場合に水セメント比が鋼材の発錆量に及ぼす影響について示したものである。この図より、水セメント比が増加するに従い、鋼材の腐食量もほぼ直線的に増加する傾向にあることが明確に表われている。このことは、自然環境下におけるコンクリート中の鋼材の腐食および防食に関して明らかにされた既往の実験結果とはほぼ一致する。水セメント比が鋼材の腐食量に影響を及ぼす最大の理由は、水セメント比が変わることにより、コンクリートの permeability が変化することによるものと考えられる。そこで、オートクレーブ養生を行なった場合のコンクリートのポロシチーを測定した結果を図-6に示す。オートクレーブ養生を行なうことにより、水中養生の場合に比べコンクリート中の空隙量は増加する傾向にあるものの、水セメント比による差は本方法を用いた場合にも明確に表われている。以上の結果より、オートクレーブ方法による鋼材の腐食促進もまた、コンクリート外部からの酸素および水分などの腐食因子の侵入量に影響を受ける自然環境下における腐食挙動と類似の機構によって生ずることを示すものであり、またこの影響を本方法によって十分に評価できることを表わしている。

さらにここでは、コンクリートのスランプが鋼材の腐食量に及ぼす影響について、同一配合のコンクリートに減水剤を混入し検討を行なった。図-7は、この場合の結果を示したもので、この図より

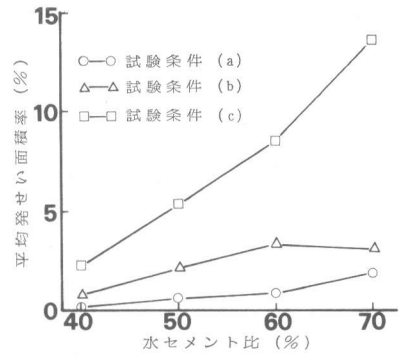


図-5 水セメント比が平均発錆面積率に及ぼす影響

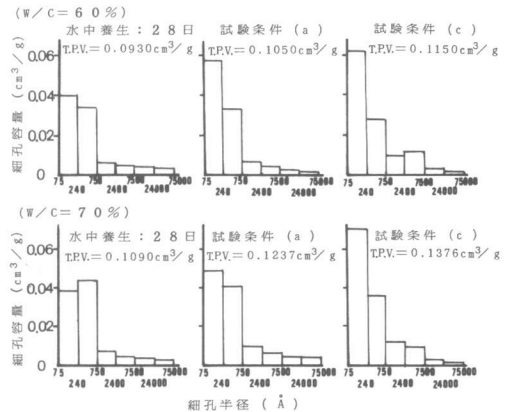


図-6 オートクレーブ養生によるポロシチーの変化

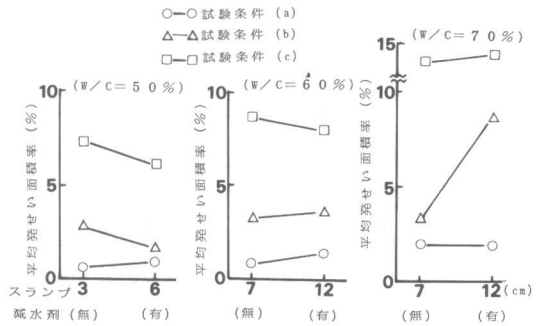


図-7 スランプが平均発錆面積率に及ぼす影響

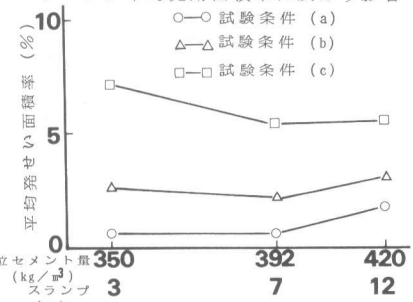


図-8 単位セメント量が平均発錆面積率に及ぼす影響 (水セメント比: 5.0%)

スランブの小さいコンクリートや、あまり大きすぎるコンクリートにおいては、発錆面積率が多少増加する傾向にあることがわかる。また図-8は、単位セメント量の影響について検討するため、水セメント比を一定として単位セメント量を変化させた場合の腐食量について示したものである。この場合には、単位セメント量 392 kg/m^3 付近でわずかではあるが発錆面積率の低下が認められた。しかし同一の水セメント比においてセメント量を変化させた場合にはスランブも変化し、スランブの影響についての実験結果を考慮すると、この腐食量の差はスランブの影響によるものと考えられる。そのため、今回の実験の範囲においてはセメント量が鋼材の腐食に及ぼす影響についてはあまり明確にはとらえられず、さらに詳細な検討が必要であると思われる。

4) 特殊なコンクリート中における鋼材腐食

図-9は、セメント量の30%を高炉スラグで置き換えたコンクリート中の鋼材の腐食量について示したものである。スラグが鋼材の腐食に及ぼす影響については未だ明確ではないが、この様なコンクリート中に塩分を混入することにより鋼材の腐食量が急激に増加する傾向は従来の研究結果と一致している。

また表-5には、鋼繊維の腐食が鋼繊維補強コンクリートに与える影響について、本方法を用いて検討を行なった結果を示したものである。オートクレーブ養生を行なうことにより、コンクリートの強度は変化するため、これを絶対値としてとらえることはできないが、少なくとも塩分の存在が鋼繊維の腐食に及ぼす影響は明確に表われている。

4. オートクレーブの腐食促進作用について

オートクレーブの槽内は完全に密閉されているため、内部の水が沸点に達した後、水中より逃げ出した酸素により槽内の酸素分圧が高くなる。このため、図-10中の実線に示す様に酸素拡散律速による腐食速度は温度上昇に従って増加する。ただし、この場合の増加の割合は温度10℃の上昇毎に約30%程度である。しかし、コンクリート中に塩分が含まれている場合には、温度上昇に伴ってコンクリート内部の自由水が急激に移動し蒸気化するため、塩分の移動と濃縮が起り、また塩分による不働態被膜の破壊も促進され、腐食速度は急激に増加するものと思われる。さらに、オートクレーブ養生によるコンクリートの空隙量の変化等も腐食速度増加の一因となるものと考えられる。

5. まとめ

コンクリート中の鋼材の腐食促進試験方法としてオートクレーブを用いた高温高圧養生方法の適用範囲について検討を行なった結果本方法が、コンクリート中の塩分が鋼材に及ぼす影響を相対的に評価するための手段として十分に使用できることが確められた。

なお、本方法は現在コンクリート中の鋼材の腐食促進試験方法のJIS案の1つにあげられている。

<参考文献>

- 1) 小林武若「オートクレーブによるコンクリート中の鉄筋の腐食促進試験について」生産研究第30巻第6号 昭和53年6月
- 2) 樫野、「鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関する研究」建築研究報告No.90, 1980.3

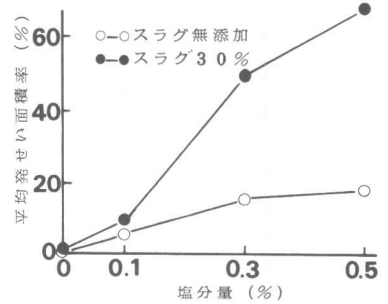


図-9 コンクリート中に含まれるスラグが鋼材の平均発錆面積率に及ぼす影響 (試験条件: (C), W/C=70%)

表-5 オートクレーブ方法におけるコンクリート中の鋼繊維の腐食率

W/C (%)	塩分量 (%)	平均腐食率 (%)			割裂強度 (kg/cm ²)
		表面からの深さ (mm)			
		10	20	30	
50	0.1	0	0	0	49.2
	0.5	21.6	5.2	3.1	53.1
70	0.5	27.9	11.2	7.8	34.0

- 注) 1. 表面からの深さとは、抽出したファイバーのコンクリート表面からの位置を示す。
 2. 腐食率 = $\frac{\text{腐食部の長さ} \times 100}{\text{抽出したファイバーの長さ}}$
 3. オートクレーブ試験条件は (b) であるが、W/C=50%の場合には自然放置中に水中浸セキを行なった。

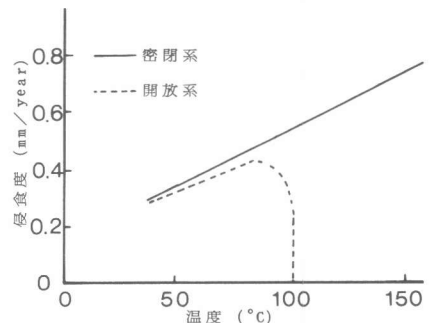


図-10 溶存酸素によるFeの腐食速度に及ぼす温度の影響(Spellerによる)