

報告

[1076] 塩分を含むコンクリートPC板内の鉄筋腐食に及ぼす蒸気養生の影響

正会員○成田一徳（清水建設技術研究所）

正会員 森永 繁（清水建設技術研究所）

1. はじめに

塩分を含むコンクリート中の鉄筋が温度をうける場合の腐食に関しては、乾湿促進法やオートクレーブ繰り返し法等があり、腐食が進むと言われている。^{1) 2)} 一方若材令に温度を受ける塩分を含むPC板を蒸気養生した場合の鉄筋腐食への影響に関しては検討が少ないと考えられる。

このため蒸気養生の鉄筋腐食への影響を明らかにすること、また防食対策を見出すことを目的として実験的に検討した。ここでは材令2カ月から8年（最終材令とした）までの4材令の調査のうち8年の結果を中心に報告する。

2. 実験方法

実験は、養生方法、塩分量、W/C、防錆剤を要因とし基本的なことを検討目的としたシリーズI、および防錆剤種類・添加量、軽量骨材、蒸気養生温度、鉄筋種類、流動化剤の要因を加え詳細な検討を目的としたシリーズIIの2つにわけて行った。（表-5参照）

4材令分約400体の試験体を製作し、蒸気養生と普通養生を半分ずつ行い、その後屋外に暴露（東京都内）し、試験体内の鉄筋腐食等を調査した。

2.1 使用材料

- a. セメント；N社製普通ポルトランドセメント、比重 3.16、4週圧縮強度 414 kg/cm²。
- b. 骨材；表-1の鬼怒川産川砂、川砂利およびS社軽量骨材。
- c. 練り混ぜ水；水道水
- d. 混和剤；P社製 AE減水剤、セメント量×0.75%。
- e. 塩分；NaCl（一級試薬）
- f. 防錆剤；RA：O社製 亜硝酸塩系 混入量3（標準）または6Kg/m³。
- NR：P社製 亜硝酸塩系（ニトロソリン酸エステル添加） 混入量3（標準）または6Kg/m³
- g. 鉄筋；みがき鋼棒JIS G 3108を用いた。ただし、鉄筋種類の検討の部分では表-2の3種類を加えた。
- h. 流動化剤；K社製 βナフタリンスルホン酸塩系、セメント量×0.4%

表-1 使用骨材の性質

骨材種類	粒大 (mm以下)	粗粒率	表乾 比重	吸水率 (%)	単位容積 重量(Kg/m ³)
川砂	2.5	2.11	2.60	2.09	1,584
川砂利	25	7.18	2.61	1.30	1,760
軽量骨材	15	6.74	1.22	8.48	812

表-2 埋込み鉄筋の種類と状態

鉄筋種類	材質	表面状態	記号
みがき丸鋼	SGD3	機械加工でみがかれたもの	み
黒皮丸鋼	SR24	黒皮状態	丸
黒皮異形	SD30	黒皮状態	異
亜鉛メッキ	SR24	電気メッキ膜厚約15μ	Zn

表-3 計画調査

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	S/A (%)	(Kg/m ³)				AE減水剤	防錆剤	(Kg/m ³)				
				W	C	S	G			塩分量		*1		
4.0	6	4	3.5	154	385	621	1161	2.89	0 3 6	0	0.25	0.62	1.86	3.73
4.7	6	4	3.7	151	321	681	1161	2.41	0 3 6	0	0.27	0.68	2.04	4.09
5.5	6	4	3.9	149	271	735	1154	2.03	0 3 6	0	0.29	0.73	2.20	4.41
*2 4.7	12	4	3.5	166	353	621	1156	2.65	0	0	(0.68)			
5.5	21	4	4.2	186	338	728	1010	2.53	0	0				
7.0	6	4	4.1	167	239	764	1104	1.79		6			4.58	
*3 4.7	6	5	4.4	159	338	783	467	1.69		0		0.78	2.35	

*1 塩分量は左から、細骨材に対して、0, 0.04, 0.1, 0.3, 0.6%。

*3 軽量骨材コンクリート

*2 No. ④の調査は、このコンクリートに流動化剤を加えスランプ21cmとした。

2.2 コンクリートの調合 (調合は表-3に示す)

スランプ、空気量は一般に採用されている6cm、4%を目標にした。ただし、塩分量0%で防錆剤有りの組み合わせは現実的でないため、この部分はスランプを12と21cmとして、また、シリーズIIの一部では流動化剤で21cmとして、スランプの影響を検討した。

2.3 要因と水準 (表-4に示す。また、組み合わせた実験条件を表-5に示す)

(1)養生方法; 蒸気養生方法は一般のPC板製造会社で採用されている方法とし、前置時間を2.5時間、昇温速度20°C/hrとし、60°Cを約2.5時間保持させ翌日まで、室内放置とした。なお、一部蒸気温度の影響の検討では、昇温速度までを前述の60°Cの場合と同一とし、80°Cを約1.5時間保持したものを行った。普通養生は打設翌日まで、室内常温放置とした。

試験体は翌日に脱型し、屋外に暴露した。

(2)塩分量; 細骨材に対して0%、1986年以前のJASS5の規定値である0.04と0.1%および海岸構造物等でみられる0.3%、や0.6%を採用した。Kg/m³への換算は表-3に示した。

(3)W/C; 47%を中心に、通常のPC板用コンクリートのW/Cの範囲とされている40%と55%を採用した。また一部70%を検討した。

(4)防錆剤; 防錆剤の種類、有無、添加量の影響を検討した。シリーズIでは防錆剤RAの有無を検討し混入量は3Kg/m³とした。シリーズIIではRAとNRで混入量を3および6Kg/m³とした。

(5)粗骨材; 実験の大部分には川砂利を使用し、一部で軽量骨材との比較を行った。

表-4 要因と水準

要因	水準(シリーズI)	水準(シリーズII)
養生方法	蒸気60°C、普通	蒸気60°C、蒸気80°C、普通
W/C(%)	40、47、55	40、47、55、70
防錆剤	なし(0)、あり(RA、3Kg/m ³)	なし(0)、あり(RA3、6Kg/m ³ NR3、6Kg/m ³)
塩分量(細骨材×%)	0、0.04、0.1、0.3	0、0.04、0.1、0.3、0.6
粗骨材	川砂利	川砂利、軽量骨材
鉄筋	みがき	みがき、黒皮丸鋼、黒皮異形、亜鉛メッキ
流動化剤	なし	なし、あり

表-5 (実験条件) シリーズI

養生	防錆剤	W/C(%)	水準											
			40			47			55					
		塩分量	0	0.04	0.1	0.3	0	0.04	0.1	0.3	0	0.04	0.1	0.3
蒸気(S)	あり			⑦	⑬	⑰		⑨	⑮	⑲		⑪	⑰	⑲
	なし		①②	⑧	⑭	⑳	③④	⑩	⑱	㉒	⑤⑥	⑫	⑱	㉔
普通(N)	あり			⑦	⑬	⑰		⑨	⑮	⑲		⑪	⑰	⑲
	なし		①②	⑧	⑭	⑳	③④	⑩	⑱	㉒	⑤⑥	⑫	⑱	㉔

[注]

- ①~④⑨等は養生No.
- スランプの記入なしは6cm
- 防錆剤ありで記入なしはR3
 なおR3はRAを3Kg/m³使用
 R6はRAを6Kg/m³使用
 N3はNRを3Kg/m³使用
 N6はNRを6Kg/m³使用
- 「軽」以外は川砂利使用
- 「80」以外は60°C
- 鉄筋で記入なしはみがき

シリーズII
(防錆剤・添加量) (軽量骨材) (塩分量0.6) (蒸気温度) (流動化剤) (鉄筋)

養生	防錆剤	W/C(%)	水準																
			40			47			40 47 55 70			47		47		55			
		塩分量	0.04	0.3	0.3	0	0.1	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
蒸気(S)	あり		②⑤⑥	⑦⑲	⑳⑳				③④	③⑥	③⑧	④⑩							
	なし		R3N3	R3N3	R6N6	③①	③②	③③	③⑤	③⑥	③⑧	④①	④②	④③	④④	④⑤	④⑨	④⑥	④⑦
普通(N)	あり		②⑤⑥	⑦⑲	⑳⑳				③④	③⑥	③⑧	④⑩							
	なし		R3N3	R3N3	R3N3	③①	③②	③③	③⑤	③⑥	③⑧	④①	④②	④③	④④	④⑤	④⑨	④⑥	④⑦

(6)鉄筋種類；実験の大部分にはみがき鉄筋を使用し、一部で一般に使用されている黒皮丸鋼、黒皮異形との比較、および亜鉛メッキ鉄筋の防錆効果を検討した。

2.4 試験体

試験体の形状を図-1に示す。1試験体に14本の鉄筋をいれて、鉄筋位置、かぶり厚さの影響を検討できるようにした。

2.5 測定項目、方法

材令2カ月、6カ月、3年および8年で表面ひびわれ、炭酸化深さ、鉄筋腐食面積、腐食減量（10%塩酸に1時間浸漬して腐食物を除去した時の浸漬前後の重さから求めた）および鉄筋引張強度を測定した。

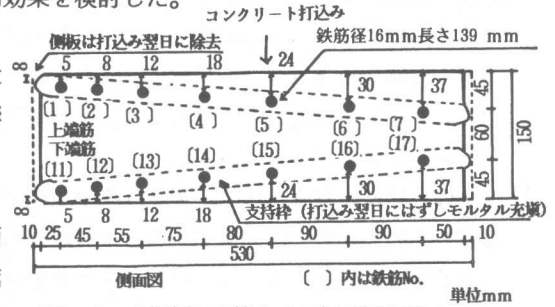


図-1 試験体形状および配筋状態

2.6 腐食面積率（ C_o とする。なお平均の場合は C_r とする。）

腐食面積は鉄筋表面に透明ビニルシートをはり、腐食部分を油性ペンでなぞり、その後方眼紙をあてて、マス目から1mm²単位で測定した。腐食面積は鉄筋表面に対する比率（上面、下面で各50%が最大）で表した。なお異形筋の場合は丸鋼の表面積で除した。

3. 実験結果と検討

本報では鉄筋腐食面積に焦点をあててのべるが、材令8年のひびわれ、炭酸化深さ、鉄筋引張強度、腐食減量の概要は次のとおりである。

試験体表面ひびわれは、蒸気養生、普通養生ともほとんど認められなかった。炭酸化深さは8年で全平均1.5mmであり養生による差は認められなかった。鉄筋引張強度は材質による強度差はあるが、養生、腐食による影響は認められなかった。腐食減量は約0.1~1.0%の範囲にあり、平均約0.2%であり、腐食面積率と相関性がある。¹⁾

要因の鉄筋腐食への影響；各要因の鉄筋腐食への影響については、腐食面積率を用い多元配置法の分散分析により次のように検討した。

- ①まず2カ月~8年の全実験の試験体の C_r の和（表-7）を用いて分散分析を行い、全体的に養生の影響を把握する。
- ②以下他の要因の影響は、材令8年の結果から検討する。材令8年の各試験体毎の上端、下端筋各7本の上面および下面の平均腐食面積率 C_r を表-6に示す。 C_r は0~49%の範囲である。
- ③シリーズIでは、基本的な要因の影響を検討するため、実験条件どおりの組合わで分散分析を行った。しかし、蒸気養生温度や軽量骨材等の影響は、シリーズIおよびIIの関連部分を組合わせて分散分析を行った。
- ④塩分量、W/C等の要因の影響の分散分析は計算を容易にするため C_r を用いて行った。勿論、かぶり厚さの要因の分散分析では平均の C_r でなく、鉄筋1本ごとすなわちかぶり厚さ毎の C_o を用いた。
- ⑤各要因の影響についての分散分析をするための組合せ表を表-10~18に示した。この組合わせの中に鉄筋位置（上下端、上下面）の要因を必ず含むようにした。これは表-6にも示すように腐食面積を半面毎に求めたためである。

各要因の腐食への影響については、本報告では養生方法との関連に焦点をあて「養生方法との交互作用」（図-2~12）をピックアップしてのべる。

e. 防錆剤の影響 (表-13、図-9、10) 防錆剤の有無、添加量および種類で有意差が認められなかった。塩分量が多くなる場合は防錆剤の添加量を多くすることが必要のようである。

f. かぶり厚さの影響 (表-15、図-12) 養生×かぶり厚さについては有意差が認められないがかぶり厚さが小さくなるとCrが大きくなり、特に8mm以下ではCrが大きくなる傾向がある。

g. 鉄筋種類の影響 (表-14、図-6) 養生×鉄筋種類に有意差が認められないが、みがき、黒皮丸鋼、異形、亜鉛メッキの順に後者程Crが小さく文献²⁾と同様である。実験では亜鉛メッキ鉄筋の防錆効果が認められる。

h. 骨材種類の影響 (表-16、図-11) 川砂利に比べ軽量骨材の方がCrが大きいが、有意差は認められない。また、骨材×養生の交互作用には認められない。

i. スランプ、流動化剤の影響 (表-17,18、図-7) スランプ・流動化剤により腐食に差があるものの、12cmの部分でバラツキが認められる。スランプ、流動化剤の影響を明確にとらえることはできなかった。塩分量、W/C等の影響があったものと考えられる。²⁾

j. 鉄筋位置の影響 (図-2,3) 鉄筋位置の寄与率は表-9でも非常に大きい。下端筋に比べて上端筋のCrが大きく、上面に比べ下面のCrが大きく、いずれの分散分析でも有意差が認められる。これは、ブリージングの上昇に伴う上端側のW/Cの増大、下面へのブリージングの滞留、塩分の濃縮等の影響と考えられる。

表-9 分散分析結果 シリーズI 材令8年

要因	平方和	自由度	不偏分散	分散比	寄与率
養生	19.1	1	19.1	1.3	0%
W/C	19.9	2	10.0	0.7	0
塩分量	3295.0	3	1098.3	72.7**	22.5
防錆剤	23.3	1	23.3	1.5	0
上下端	3223.4	1	3223.4	213.5**	22.2
上下面	2507.8	1	2507.8	166.1**	17.3
養生 × 上下端	135.5	1	135.5	9.0**	0.8
" × 上下面	103.1	1	103.1	6.8**	0.6
W/C × 上下面	102.9	2	51.5	3.4*	0.5
塩分量 × 上下端	1144.5	3	381.5	25.3**	7.6
" × 上下面	1142.2	3	380.7	25.2**	7.6
上下端 × 上下面	148.6	1	148.6	9.8**	0.9
誤差	2574.7	171	15.1		20.0
全体	14449.0	191			100.0

他の交互作用は誤差に含めた。* 危険率5% **同1%

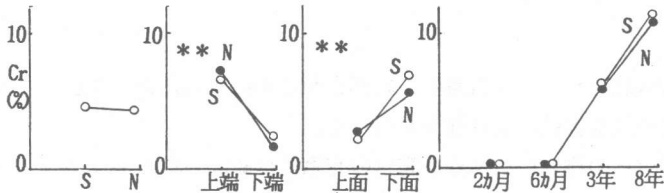


図-2 養生、上下端、上下面、材令とCr (全実験)

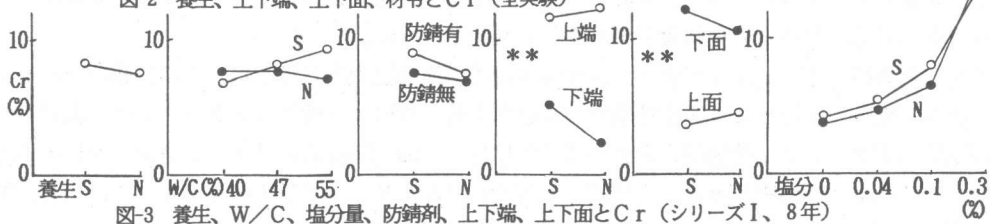


図-3 養生、W/C、塩分量、防錆剤、上下端、上下面とCr (シリーズI、8年)

表-7 全実験 (2カ月~8年)のCr%の和 (データ数1568)

端	面	2カ月	6カ月	3年	8年	計
S	上	1.9	4.4	268.9	457.1	2557.7
	下	14.7	41.6	617.7	1151.4	
蒸気	上	0.6	0.5	49.0	112.9	994.1
	下	5.6	12.0	261.3	552.2	
N	上	7.8	27.0	352.9	644.5	2767.6
	下	8.6	33.8	598.8	1094.2	
普通	上	0.3	0.5	29.6	51.7	537.2
	下	2.4	5.0	141.7	306.0	
計		41.9	124.8	2319.9	4370.0	6856.6

表-8 分散分析結果 全実験(2カ月~8年) * 危険率5% **同1%

要因	平方和	自由度	不偏分散	分散比	寄与率
養生	38.9	1	38.9	1.3	0%
上下端	9180.1	1	9180.1	302.0**	8.3
上下面	5134.4	1	5134.4	168.9**	4.6
材令	32507.4	3	10835.8	356.4**	29.5
養生 × 上下端	283.6	1	283.6	9.3**	0.2
" × 上下面	299.3	1	299.3	9.8**	0.2
" × 材令	55.3	3	18.4	0.6	0
上下端 × 上下面	363.8	1	363.8	12.0*	0.3
" × 材令	9319.8	3	3106.6	102.2**	8.4
上下面 × 材令	5645.1	3	1881.7	61.9**	5.1
誤差	47082.2	1549	30.4		43.4
全体	109909.9	1567			100.0

表-10 蒸気温度とCr% (データ数48)

S 60	(4)	(16)	(22)
N(a)	(4)	(16)	(22)
S 80	(42)	(43)	(44)
N(b)	(42)	(43)	(44)

表-11 塩分量とCr% (データ数192)

	(W/C 40%)				(W/C 47%)				(W/C 55%)			
	0.04	0.1	0.3	0.6	0.04	0.1	0.3	0.6	0.04	0.1	0.3	0.6
S	(7)	(13)	(19)	(34)	(9)	(15)	(21)	(36)	(11)	(17)	(23)	(38)
N	(8)	(14)	(20)	(35)	(10)	(16)	(22)	(37)	(12)	(18)	(24)	(39)
S	(7)	(13)	(19)	(34)	(9)	(15)	(21)	(36)	(11)	(17)	(23)	(38)
N	(8)	(14)	(20)	(35)	(10)	(16)	(22)	(37)	(12)	(18)	(24)	(39)

表-12 W/CとCr% (データ数64) 表-13 防錆剤種類・添加量とCr%(データ数48)

	40	47	55	70	Kg/m ³			
	(34)	(36)	(38)	(40)	3	3	6	
S	(35)	(37)	(39)	(41)	S RA	(25)	(27)	(29)
N	(34)	(36)	(38)	(40)	NR	(26)	(28)	(30)
S	(34)	(36)	(38)	(40)	N RA	(25)	(27)	(29)
N	(35)	(37)	(39)	(41)	NR	(26)	(28)	(30)

表-14 鉄筋とCr% (データ数32)

	み	丸	異	Zn
S	(24)	(46)	(47)	(48)
N	(24)	(46)	(47)	(48)

表-15 かぶり厚さとCr% (8年の全データ数2744)

	5mm	8	12	18	24	30	37
S	()	()	()	()	()	()	()
N	()	()	()	()	()	()	()

表-16 骨材とCr% (データ数48)

	川砂利			軽量骨材		
	(4)	(16)	(22)	(31)	(32)	(33)
S	(4)	(16)	(22)	(31)	(32)	(33)
N	(4)	(16)	(22)	(31)	(32)	(33)

表-17 スランプとCr%(データ数48) 表-18 流動化剤とCr%(データ数48)

	6	12	21	cm			
	(1)	(3)	(5)	6	12	12+21	21
S	(1)	(3)	(5)	S	(22)	(45)	(49)
N	(1)	(3)	(5)	N	(22)	(45)	(49)

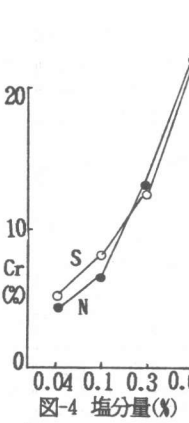
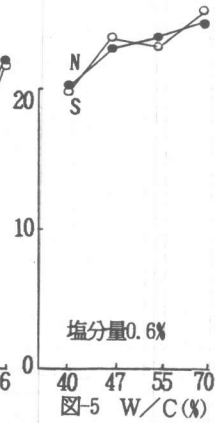


図-4 塩分量(%)



塩分量0.6%

図-5 W/C(%)

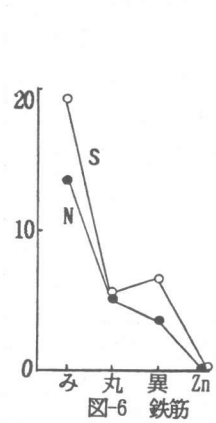


図-6 鉄筋

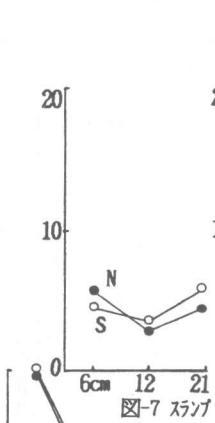


図-7 スランプ

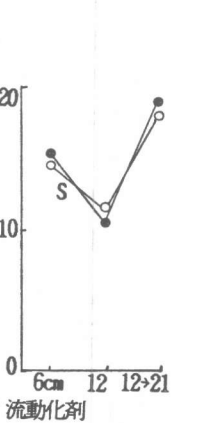


図-8 流動化剤

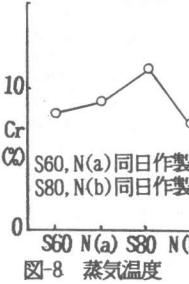


図-9 蒸気温度

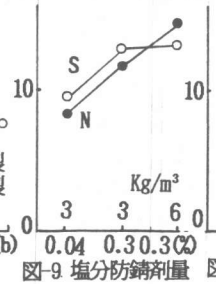


図-10 塩分防錆剤量

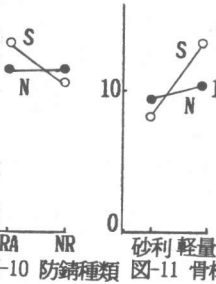


図-11 防錆種類

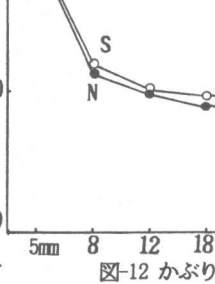


図-12 かぶり厚さ(mm)

4. まとめ

塩分を含むコンクリート中の鉄筋腐食への蒸気養生の影響を明らかにするため、鉄筋を埋めた試験体を製作し、材令8年までの暴露実験により検討を行った。

この結果、蒸気養生と普通養生との違いによる鉄筋腐食の有意差は認められなかった。鉄筋腐食に最も影響するのは、鉄筋位置で、上端筋の下面が腐食しやすい。また塩分量が大きい程、かぶり厚さが小さい程腐食しやすくなる傾向であった。

<謝辞> 実験に際し、ツカダテクノス㈱の米山清治氏の協力を得ました。ここに謝意を表します。

<参考文献> (1)松林ら「表面被覆材および吸水防止材による鉄筋コンクリート造の塩害劣化抑制効果に関する研究」建築学会大会 1989年10月、P653 (2)枝広ら「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」コンクリート工学年次論文集、9-1、1989、P357。