

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第2578号

土木研究所資料

塩化物総量規制値に関する研究
—鉄筋コンクリートの暴露試験調査—

昭和63年3月

建設省土木研究所
化学研究室

Copyright © (1988) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted,
nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複
写は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

塩化物総量規制値に関する研究 —鉄筋コンクリートの暴露試験調査—

化学研究室 室 長 片 脇 清
主任研究員 坂 本 浩 行
寺 田 剛

要 旨

近年、コンクリート橋等の土木構造物が塩化物によって損傷を受けるいわゆる塩害が大きな社会問題になっている。このため、建設省においては、総合技術開発プロジェクト、「コンクリートの耐久性向上技術の開発」を昭和60年から開始するとともに、建設省通達によって昭和62年4月からコンクリート中の塩化物に対して、総量規制を行っている。本研究は、上記総プロの一環であり、塩化物総量規制値を検証するため、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート供試体を作成し暴露試験を行い、コンクリート中の塩化物と鋼材の腐食との関係について検討を行ったものである。

暴露試験調査として、RC供試体は、暴露直後、暴露3ヵ月および1年後の電位測定をPC供試体は、暴露3ヵ月後の解体調査を行ったが、その結果は、RC供試体に錆はまだ発生していないと思われ、また、PC供試体はごく軽微な錆の発生であり、RCおよびPC供試体とも問題ない結果であり、塩化物総量規制値の範囲において鋼材の腐食は認められなかった。

キーワード：暴露試験、塩化物総量規制、塩化物、鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート、鋼材の腐食

目 次

1. まえがき	1
2. 調査目的	1
3. 調査方法	1
3.1 R C供試体	1
3.1.1 作製条件	1
3.1.2 コンクリートの配合	8
3.1.3 暴露条件	10
3.1.4 調査項目および調査方法	10
3.2 P C供試体	14
3.2.1 作製条件	14
3.2.2 コンクリートの配合	20
3.2.3 暴露条件	20
3.2.4 調査項目および調査方法	21
4. 試験結果	22
4.1 R C供試体における試験結果	22
4.1.1 電位測定結果	22
(1) 5カ月後の電位測定結果	22
(2) 1年後の電位測定結果	24
4.1.2 外観観察および解体調査結果	37
(1) 外観観察	37
(2) 解体調査	37
4.2 P C供試体における試験結果	38
4.2.1 P C供試体の解体調査結果	38
4.2.2 セメントグラウトの塩分測定	50
4.3 P C供試体の電位測定結果	51
5. まとめ	53
6. 今後の課題	53

1. まえがき

近年、塩害によるコンクリート構造物の早期劣化による損傷が発生し、その防止対策が各方面で検討されてきた。コンクリート中の鋼材の腐食はコンクリート中に含まれる塩化物によって多大の影響をうけるということから、これを防止するためにはコンクリート中の塩化物量を一定量以下に規制することが重要になる。これについて、建設省通達および J I S レディーミクスコンクリートではコンクリート中の塩化物に対して、総量規制を設け、昭和62年4月から実施している。

一方、コンクリート中の塩化物と鋼材の腐食との関係は必ずしも明確になっていない部分もあり、塩化物総量規制値についても更に研究を進めていくことも必要な課題となっている。

そこで、本研究では、これらの塩化物総量規制値の妥当性を検証するため、コンクリート中に各種濃度の塩化物を混入した大型の鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート供試体を作製するとともに、これを屋外に暴露し塩化物濃度と鋼材腐食の関係を調査したものである。

2. 調査目的

塩化物総量規制値を検証するために、鉄筋コンクリート（以下、RCと略す）およびプレストレストコンクリート（以下、PCと略す）供試体の作製し暴露試験調査を行った。

3. 調査方法

RCおよびPCコンクリートの中に所定量塩化物を入れて供試体を作製し、土木研究所構内において暴露試験調査を行った。以下に、これらの供試体を作製条件および調査方法について述べる。

3.1 RC供試体

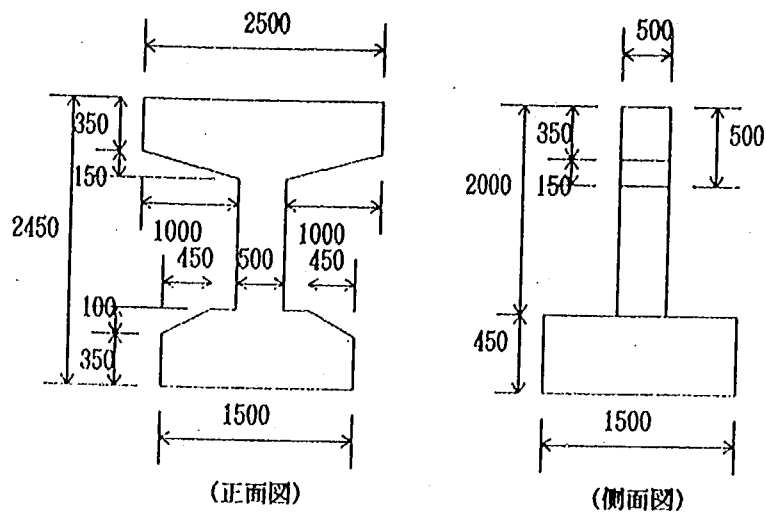
3.1.1 作製条件

RC供試体は、大型の橋脚型とし、塩化物濃度、セメントの種類、かぶりおよび鉄筋の種類を変えて作製した。塩化物濃度は、0, 300, 600 および (g/m^3 , Cl 換算) セメントの種類は、早強セメントおよび高炉セメントB種、かぶりは、2, 5, 5, 8 および 15cm, 鉄筋の種類は、SR24, SD30, 亜鉛メッキ鉄筋, エポキシ塗装鉄筋, 耐塩性鉄筋A種およびB種とした。

表-1に各供試体における塩化物濃度とセメントの種類を、図-1に作製供試体の形状を示す。

表-1 塩化物濃度とセメントの種類

供試体 番 号	塩 化 物 濃 度		セメント の種類
	Cl換算	NaCl換算	
1	0g/m ³	0g/m ³	早 強
2	300	495	早 強
3	600	990	早 強
4	900	1485	早 強
5	900	1485	高炉B種



図－１ 供試体の形状（単位：mm）

(i) 使用材料

1) 鉄筋

使用した鉄筋は、主鉄筋用として、SR24、SD30、亜鉛メッキ鉄筋、エポキシ塗装鉄筋、耐塩性鉄塩A種およびB種の直径16mmを使用した。表－2～5にスターラップ用、SR24、SD30、亜鉛メッキ、エポキシ塗装鉄筋のそれぞれの試験成績表を示す。また表－6と表－7に亜鉛メッキとエポキシ樹脂塗装鉄筋の試験結果を示す。

2) セメント

表－1に示すように供試体番号1～4は、早強ポルトランドセメントを、供試体番号5は、高炉B種セメントを用いた。表－8に使用した2種類のセメントの試験成績表を示す。

3) 骨材

細骨材は、八王子産砕砂、粗骨材は、八王子産碎石の5号と6号を用いた。

これらの骨材の各種試験結果を表－9にふるい分け試験結果を表－10、粒度曲線を図－2に示す。

4) 混和剤

混和剤は、高性能減水剤とAE剤を併用した。

表-2 スターラップ用鉄筋(エポキシD13)の試験成績表

試験項目	SIZE	機 械 的 性 質				化 学 成 分				
		降伏点	引張強さ	伸び	曲げ試験×180°	C×100	Si ×100	Mn ×100	P×1000	S×1000
単位	mm	kg/mm ²	kg/mm ²	%	—	%	%	%	%	%
規格	—	30以上	49-63	14 以上	4 D	—	—	—	50 以下	50 以下
試験値	D13	39	56	22	GOOD	26	17	62	44	46

表-3 SD30の試験成績表

試験項目	SIZE	引 張 試 験						化 学 成 分					
		径	標点距離	降 伏 点	引張強さ	伸び	曲げ試験×180°	C×100	Si ×100	Mn ×100	P×1000	S×1000	Cu ×100
単位	mm	mm	mm	kgf/mm ²	kgf/mm ²	%	—	%	%	%	%	%	%
規格	—	—	L=80	24 以上	39~53	20 以上	3 D	—	—	—	50 以下	50 以下	—
試験値	D16	15.81	128	33	48	29	GOOD	11	21	52	36	38	26

表-4 SR24の試験成績表

試験項目	SIZE	機 械 的 性 質				化 学 成 分					
		降伏点又は耐力	引張強さ	伸び	曲げ試験×180°	C×100	Si ×100	Mn ×100	P×1000	S×1000	C+M/6×100
単位	mm	kgf/mm ²	kgf/mm ²	%	—	%	%	%	%	%	%
規格	—	30	49-63	14 以上	4 D	—	—	—	50	50	—
試験値	D16	38	55	22	GOOD	25	17	65	35	36	36

表-5 亜鉛メッキおよびエポキシ塗装鉄筋(熱間圧延棒鋼)の試験成績表

試験項目	SIZE	機 械 的 性 質				化 学 成 分				
		降伏点又は耐力	引張強さ	伸び	曲げ試験×180°	C×100	Si ×100	Mn ×100	P×1000	S×1000
単位	mm	kgf/mm ²	kgf/mm ²	%	—	%	%	%	%	%
規格	—	—	—	—	4 D	—	—	—	—	—
試験値	D16	41	61	26	GOOD	23	16	78	38	33

表-6 溶融亜鉛めっき (S D 30異形棒鋼) 試験結果

番号	SIZE	め っ き 付 着 量 試 験					
		寸 法	め っ き 面 積	重 量 g			め っ き 付 着 量
		mm	cm ²	試験前(A)	試験後(B)	(A)-(B)	g/m ²
1	D 16	201.3	120.8	319.30	310.87	8.43	698
2	"	200.6	120.4	317.88	309.15	8.73	725

表-7 エポキシ樹脂塗装鉄筋検査

番 号	SIZE	外 観	膜 厚			ピンホール 5個/㎡以下	曲げ加工性 5℃ 2φ	耐衝撃性 20℃以上 25kg・cm	硬化度 MEK	硬度 F 以下	事前試験 1.耐アルカリ性試験 2.耐食性試験 3.付着性試験 合格 合格 合格
			平坦部 180±50μm								
			平 均	最 大	最 小						
1	D16	GOOD	192	230	150	1.8	GOOD	GOOD	GOOD	F	
2	"	GOOD	189	220	150	2.6	GOOD	GOOD	GOOD	F	

表-8 使用セメントの試験結果

結果

種 類	項 目	比 重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			安定性	酸 化 マグネシウム (%)	三酸化 硫 黄 (%)	強熱減量 (%)	圧縮強さ (kgf/cm ²)			
				水 量 (%)	始 発 (時-分)	終 結 (時-分)					1 日	3 日	7 日	28 日
早強ポルトランドセメント		3.12	4230	29.0	2-11	3-14	良	1.4	2.6	1.0	133	254	359	468
高炉セメント (B種)		3.04	3750	29.5	3-40	5-02	良	3.3	2.0	0.9	—	116	197	415

表-9 骨材の試験結果

記 号	試 験 項 目	単 位	細 骨 材		粗骨材 (5~13mm)		粗骨材 (13~20mm)	
			規格値	試験値	規格値	試験値	規格値	試験値
1	比 重	—	2.5以上	2.63	2.5以上	2.67	2.5以上	2.66
2	吸 水 率	%	3 以下	1.83	3 以下	0.533	3 以下	0.389
3	粗 粒 率	—	—	2.95	—	6.78		
4	単位容積重量	kg/m ³	1500~1860	1710	1420~1880	1 560		
5	実 績 率	%	60~70	66.7	55以上	58.9		
6	洗い試験	%	5 以下	4.4	1.5以下	0.23		
7	粘土塊量	%	1 以下	0.39	0.25以下	0.03		
8	有機不純物	—	うすい	うすい	—	—		
9	安定性試験	%	10以下	7.7	12以下	1.6		
10	比重1.95に浮く粒子	%	1 以下	0	1 以下	0		
11	すり減り減量	%	—	—	40以下	10.3		
12	軟石量試験	%	—	—	5 以下	1.6		

表-10 ふるい分け試験結果

(各ふるいの累加残留率%)

ふるいの呼び寸法 (mm)	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	受皿
細 骨 材					0	8	42	67	84	94	100
粗 骨 材	0	6	26	78	98	100	100	100	100	100	100

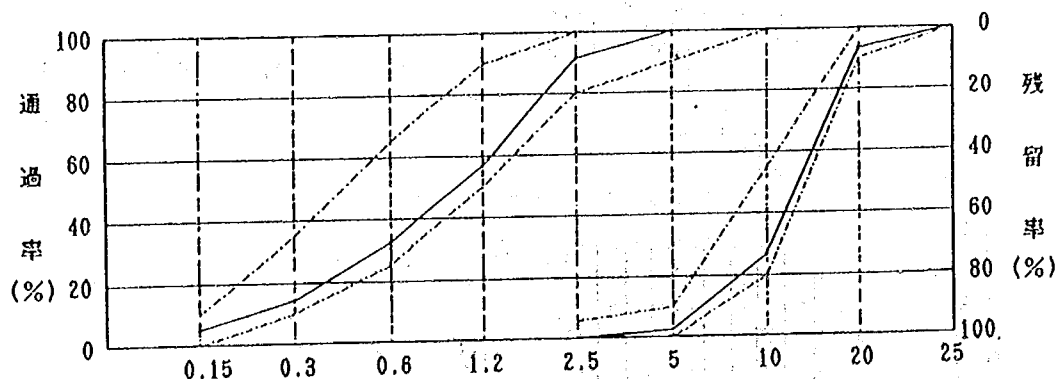


図-2 粒 度 曲 線

(2) 配筋

鉄筋の種類によって、かぶりを変えた時の影響を調べるため、柱部と張り出し部に6種類の鉄筋のかぶりを変えて、図-3に示すように配筋した。また、図-4-(1)~(5)に配筋の詳細図を示す。

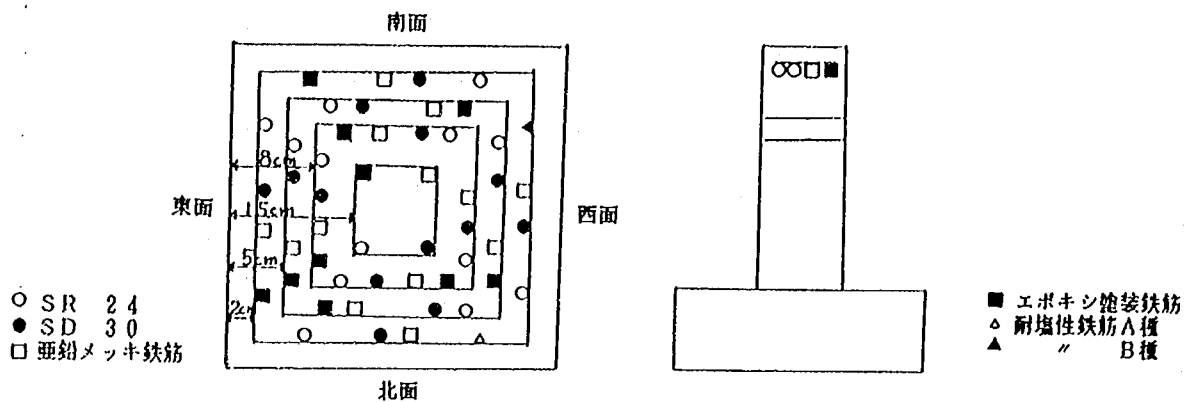


図-3 主鉄筋の配筋図

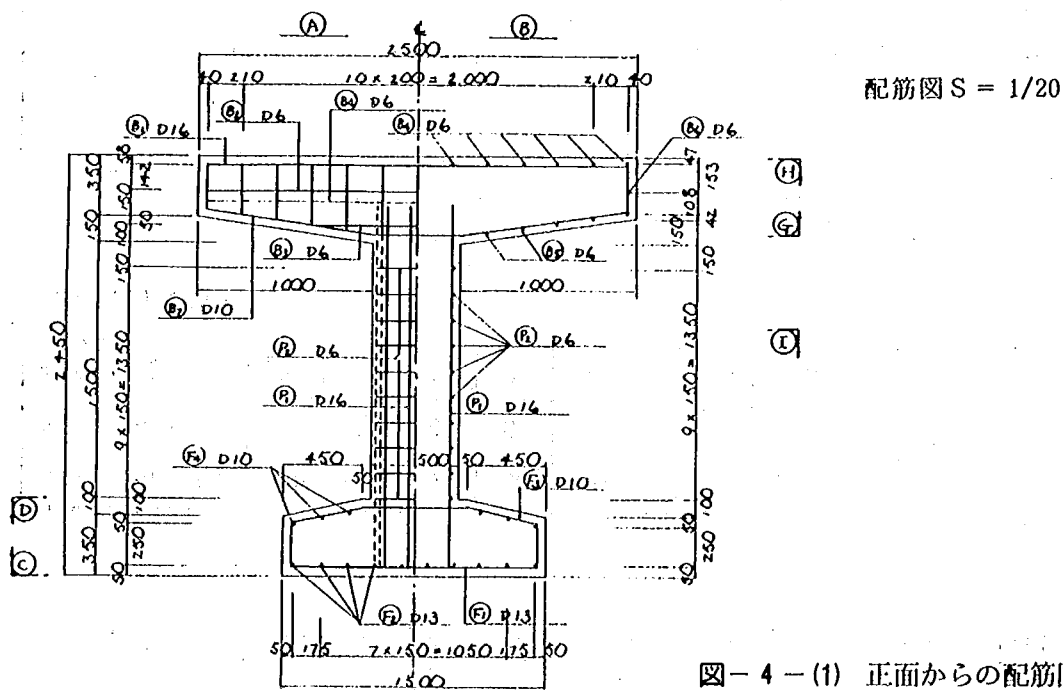


図-4-(1) 正面からの配筋図

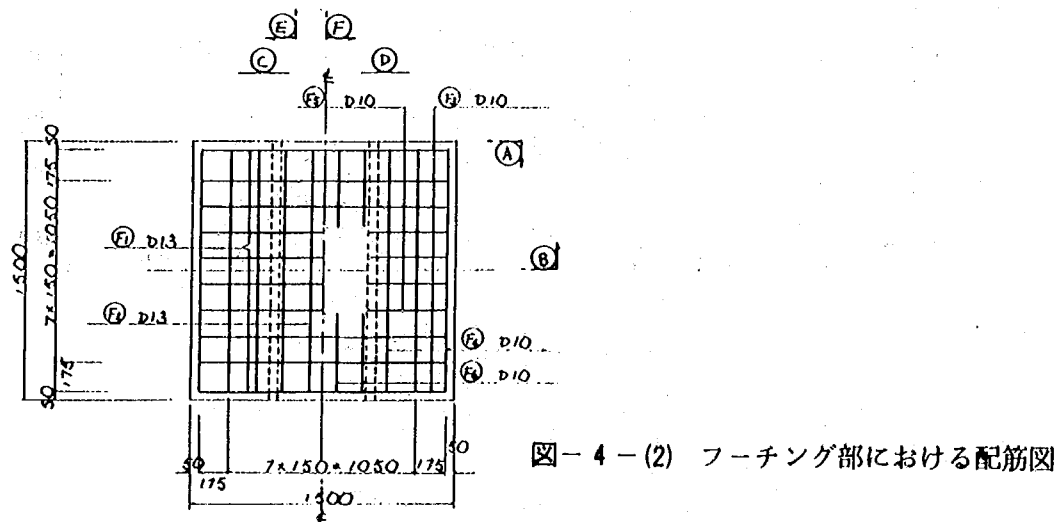


図-4-(2) フーチング部における配筋図

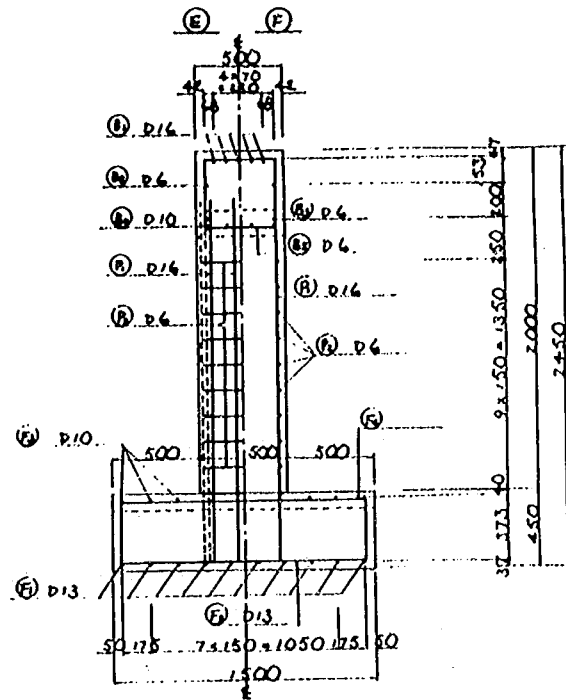


図-4-(3) 側面からの配筋図

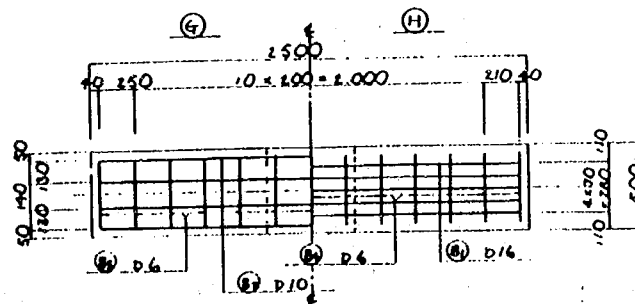


図-4-(4) 張出し部における配筋図

柱断面配筋 $S = 1/10$

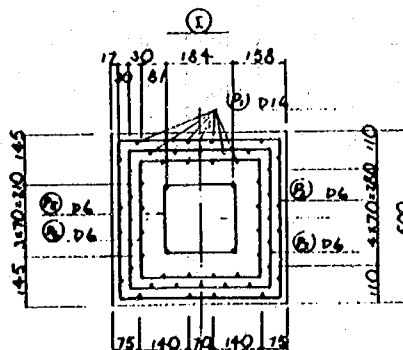


図-4-(5) 柱部における配筋図

3.1.2 コンクリートの配合

(I) 試し練り

配合強度を 270 kgf/cm^2 となるよう水・セメント比 (W/C) を 65, 70, 75% と変えて試し練りを行った。

早強セメントを用いた供試体 1 ~ 4 の配合表を表-11に、高炉セメントを用いた供試体 5 の配合表を表-12に示す。また、試し練りの試験結果を表-13に示す。その結果、本練りの水・セメント比 (W/C) を 70% に決定した。

表-11 試し練り時の配合表 (早強セメント)

配合名	スランブ の配合 (cm)	空気量 の配合 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)							
					水 W	セメント C	粗骨材 S	粗骨材		混 和 剤		塩 NaCl
								G5	G6	NL4000	No202	
A-	8±2.5	4±1	65	50	165	254	938	381	569	5.08	1.02	x
B-	"	"	70	51	165	236	965	376	563	4.72	0.98	x
C-	"	"	75	52	165	220	991	371	555	4.40	0.88	x

NaCl量 配合 -1 x = 0 kg/m³
 -2 x = 0.495
 -3 x = 0.990
 -4 x = 1.485

表-12 試し練り時の配合表 (高炉B種セメント)

配合名	スランブ の配合 (cm)	空気量 の配合 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)							
					水 W	セメント C	粗骨材 S	粗骨材		混 和 剤		塩 NaCl
								G5	G6	NL4000	No202	
A-	8±2.5	4±1	65	50	165	254	936	380	568	5.08	1.02	x
B-	"	"	70	51	165	236	962	375	561	4.72	0.94	x
C-	"	"	75	52	165	220	988	370	554	4.40	0.88	x

NaCl量 配合 -5 x = 1.485 kg/m³

表-13 試し練り試験結果

配合		スランブ	空気量	コン温度	圧 縮 強 度				
No.		(cm)	(%)	(℃)	1	2	3	4	X
No.1	A	7.0	3.8	14.0	342	333	321	316	328
	B	6.2	3.9	14.0	263	278	285	275	275
	C	6.8	4.2	14.5	231	218	230	214	223
No.2	A	6.2	3.9	14.0	338	351	336	342	342
	B	7.0	4.0	14.5	272	272	265	244	263
	C	5.8	4.4	14.5	228	241	232	239	235
No.3	A	7.2	3.3	15.5	298	296	313	293	300
	B	6.5	3.4	15.5	278	273	274	288	278
	C	7.4	3.8	15.5	231	206	220	204	215
No.4	A	6.6	3.9	12.0	352	331	343	367	348
	B	7.3	3.9	12.0	276	283	285	285	282
	C	5.8	4.0	12.5	233	223	229	228	228
No.5	A	7.4	4.2	12.5	298	301	295	297	298
	B	5.8	4.1	12.5	247	247	258	256	252
	C	6.2	4.7	12.5	193	189	203	207	198

(2) 本練り

本練り時のコンクリートの配合結果を表-14に、その時のコンクリートの品質試験結果を表-15に示す。また、供試体作製の状況を写真-1に示す。

表-14 RC供試体用コンクリートの配合結果

セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの幅 mm (cm)	空気量の幅 mm (%)	水・セメント比 W/C (%)	粗骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水 W	セメント C	粗骨材 S	粗骨材G		混和材	
									5号 13~20mm	6号 5~13mm	減水剤	AE剤
早強	20	8 ± 2.5	4 ± 1	70	51	167	239	961	374	562	4.78	0.96
高炉	20	8 ± 2.5	4 ± 1	70	51	167	239	958	372	561	4.78	0.96

表-16 コンクリート品質試験結果

供試体 No.	打ち込み 場所	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)	圧縮強度 σ_{28} (kg/cm ²)						
					1	2	3	4	5	6	$\bar{x}$
No. 1	フーチング	7.0	4.8	18.1	324	264	267	281	302	294	289
	柱、はり	7.2	3.3	20.0	276	269	262	268	287	257	270
No. 2	フーチング	7.2	3.1	15.5	279	250	260	292	264	251	266
	柱、はり	7.0	4.6	14.0	250	262	250	258	269	249	256
No. 3	フーチング	6.0	4.6	14.0	224	230	228	224	231	222	227
	柱、はり	7.0	4.9	17.5	265	262	274	278	266	256	267
No. 4	フーチング	6.0	3.3	17.5	231	251	251	259	245	248	248
	柱、はり	9.5	4.5	17.0	271	291	277	289	306	299	289
No. 5	フーチング	6.5	4.4	16.0	210	217	231	213	234	223	221
	柱、はり	6.5	3.8	16.0	246	256	261	274	254	276	262

3.1.3 暴露条件

作製した5体の供試体は、土木研究所構内の南ループの西側で暴露試験を行っている。暴露期間は長期にわたって行う予定である。暴露状況を写真-2に示す。

また暴露は昭和61年7月21日から開始した。

3.1.4 調査項目および調査方法

1) 調査項目

調査は所定材令においてコンクリート中の鉄筋の自然電位（以下、電位と略す）測定、外観観察および解体試験を行う。

2) 調査方法

a) 電位測定

電位測定の方法は、各供試体の各側面（柱部の東、西、南、北面、横ばり部の上面）について、それぞれの鉄筋の配筋位置に添って5cm間隔で鉛照合電極を用いて電位測定を行った。その状況写真を写真-3に示す。各側面の測定位置を図-5-(1)~図-5-(6)に示す。なお、電位と鉄筋腐食状況の関係は、鉛照合電極の値を飽和硫酸銅電極（CSE）に換算して、表-16に示すようにASTM C 876の評価基準に従った。

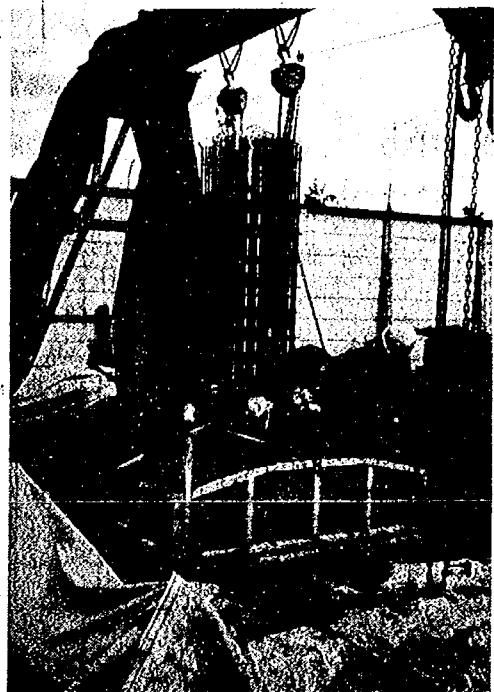


写真-1 供試体作製状況

表-16 電位と腐食状態の関係 (ASTM)

電位 (CSE換算) mV	腐食状態
$-200 < E$	90%以上の確率で腐食が起きていない
$-200 < E < -300$	不確定
$E < -350$	90%以上の確率で腐食が起きている

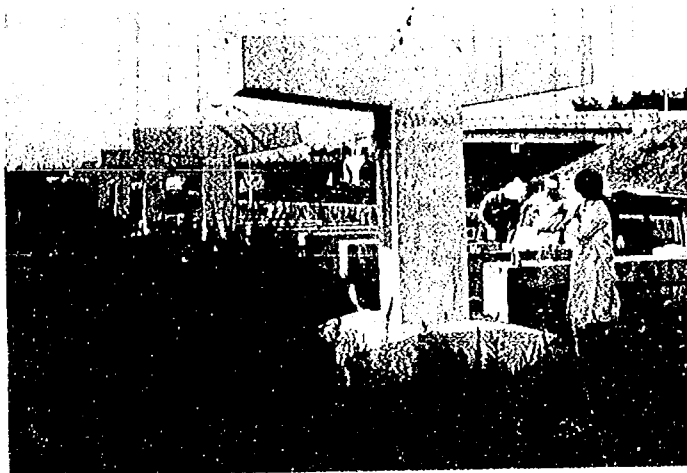


写真-2 供試体暴露状況

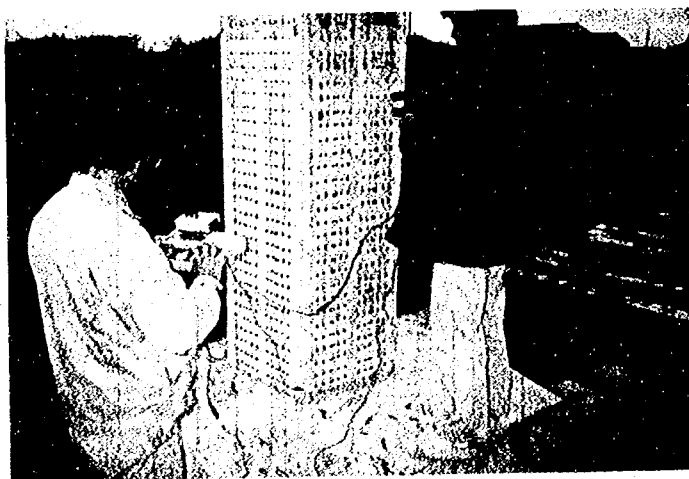


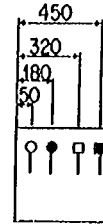
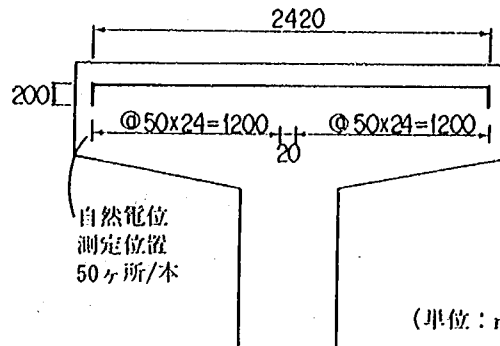
写真-3 電位測定状況

b) 外観観察および解体調査

外観観察は、解体調査を行う前に、コンクリートの表面について錆汁やひび割れを目視により調査する。

解体調査は、電位測定で明らかに腐食が確認された場合あるいは、コンクリート表面に異常が認められた場合にコンクリート部分的にはつり、鉄筋の表面を目視で観察を行う。

はり出し部 (上面)

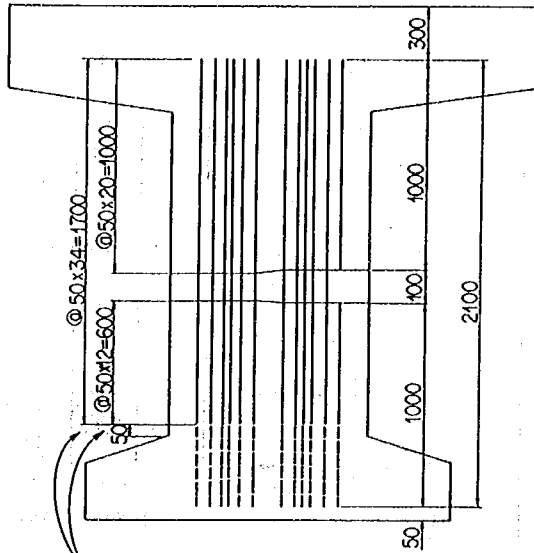


(単位: mm)

図-5-(2) 横ばり部における測定位置

柱部

(北面)

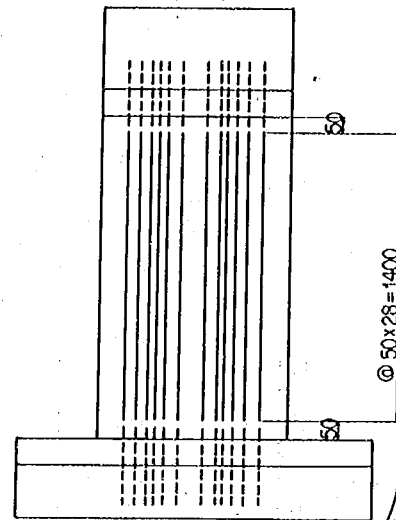


- ・自然電位測定位置
- ・耐塩性鉄筋 13ヶ所/本 or 21ヶ所/本
- ・その他の鉄筋 35ヶ所/本

(単位: mm)

図-5-(3) 北面における測定位置

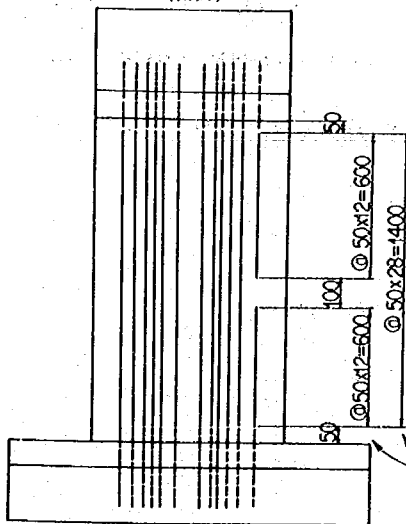
(東面)



- ・自然電位測定位置
- ・鉄筋 29ヶ所/本

図-5-(4) 西面における測定位置

(西面)

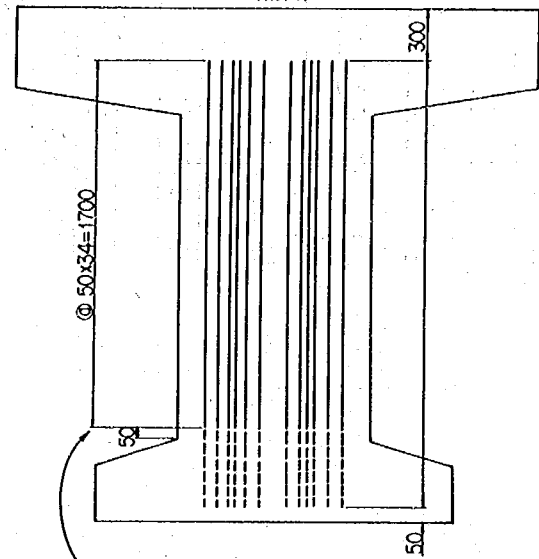


(単位: mm)

- ・自然電位測定位置
- ・耐塩性鉄筋 13ヶ所/本
- ・その他の鉄筋 29ヶ所/本

図-5-(5) 東面における測定位置

(南面)



- ・自然電位測定位置
- ・鉄筋 35ヶ所/本

図-5-(6) 南面における測定位置

3.2 PC供試体

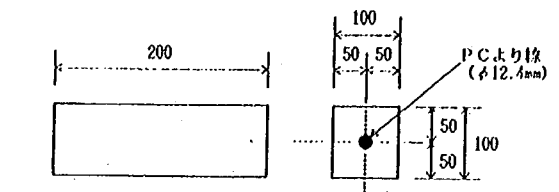
3.2.1 作製条件

PC供試体の作製条件を表-17に示す。供試体の寸法は10×10×200cm,あるいは15×15×200cmの寸法でプレストレストの方式,塩化物濃度,セメントの種類およびPC用鋼材の種類を変えて作製した。プレストレストの方式は,プレテンション,ポストテンションおよびプレストレストなし,塩化物濃度は,0,300,600および900 (g/m³, Cl換算)セメントの種類は早強セメントおよび高炉セメントB種,鋼材の種類は,PC鋼線,PCより線,PC鋼棒,異形PC鋼棒である。ポストテンションにおける塩化物混入は,供試体番号8~14では,コンクリートのみに混入し,供試体番号22~26では,ミース内(セメントグラウト中)のみに混入した。

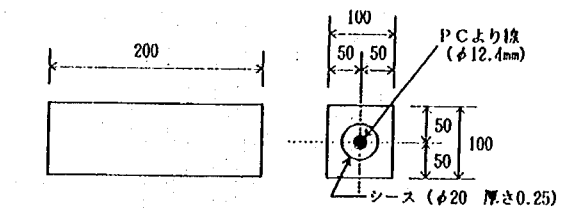
図-6に各プレストレストの方式ごとの形状と鋼材の配筋位置を示す。

表-17 PC供試体の作製条件

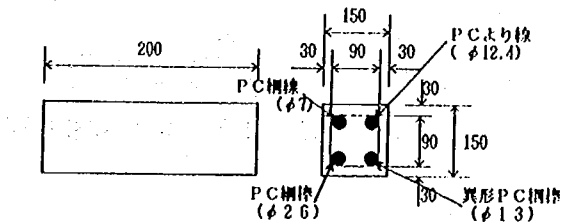
供試体番号	区分	塩化物濃度 (Cl換算)		セメントの種類		PC用鋼材				
		コンクリート	セメントグラウト (ミース内)	早強	高炉	PC鋼線	PCより線	PC鋼棒	異形PC鋼棒	ミース
1	プレテンション	0	-	○			○			
2		0	-		○		○			
3		150	-	○			○			
4		300	-	○			○			
5		600	-	○			○			
6		600	-		○		○			
7		900	-	○			○			
8	ポストテンション	0	0	○			○			○
9		0	0		○		○			○
10		150	0	○			○			○
11		300	0	○			○			○
12		600	0	○			○			○
13		600	0		○		○			○
14		900	0	○			○			○
15	プレストレストなし	0	-	○		○	○	○	○	
16		0	-		○	○	○	○	○	
17		150	-	○		○	○	○	○	
18		300	-	○		○	○	○	○	
19		600	-	○		○	○	○	○	
20		600	-		○	○	○	○	○	
21		900	-	○		○	○	○	○	
22	ポストテンション	0	0	○			○			○
23		0	150	○			○			○
24		0	300	○			○			○
25		0	600	○			○			○
26		0	900	○			○			○



プレテンションの形状 (単位mm)



ポストテンションの形状 (単位mm)



プレストレストなしの形状 (単位mm)

図-6 各供試体の形状およびPC鋼材の配筋図

(1) 使用材料

1) P C鋼材

a) P C鋼線 7mm

P C鋼線7mmはJ I S G 3536 に適合する丸鋼 (SWPS 1) を使用した。試験成績表を表-18と荷重-伸び線図を図-7に示す。

b) P C鋼より線 12.4mm

P C鋼より線12.4mmはJ I S C 3536 に適合する7本より線A種 (SWPR7A) を使用した。試験成績表を表-19と荷重-伸び線図を図-8に示す。

c) P C鋼棒 26mm

P C鋼棒26mmはJ I S G 3109 に適合する丸棒B種1号 (SBPR95/110) を使用した。試験成績表を表-20と荷重-伸び線図を図-9に示す。

d) P C鋼棒 13mm

P C鋼棒13mmはJ I S G 3109 に適合する異形棒D種1号 (SBPD130/145) を使用した。試験成績表を表-21に示す。

2) セメント

セメントはJ I S R 5210 に適合する早強ポルトランドセメントおよびJ I S R 5211 に適合する高炉セメントB種を使用した。使用したセメントの試験成績表を表-22に示す。

3) 骨 材

骨材は八王子産碎石, 砕砂を使用した。

骨材のふるい分け試験の結果を表-23と図-10に, 骨材の試験結果を表-24に示す。

4) 混和剤

a) コンクリート用混和剤

コンクリート用混和剤として, 減水剤とA E 剤を併用した。減水剤の試験成績表を表-25に, A E 剤の試験成績表を表-26に示す。

b) グラウト用混和剤

グラウト用混和剤として減水剤と発泡剤を併用した。混和剤の試験成績表を表-27に示す。

表-18 PC鋼線 7mm 試験成績表

試験項目	径	引張荷重	降伏点荷重	伸び (破断後)	リラセーション 10時間	ヤング率
単位	mm	kgf	kgf	100mm %	%	kgf/mm ²
規格	+0.05 -0.05	5,950 以上	5,200 以上	4.5 以上	3.0以下	—
試験値	7.01	6,780	6,180	8.0	0.49	20,700

表-19 PC鋼より線 12.4mm 試験成績表

試験項目	径	引張荷重	降伏点荷重	伸び (破断後)	リラセーション 10時間	ビッチ	ヤング率
単位	mm	kgf	kgf	600mm %	%	倍	kgf/mm ²
規格	+0.40 -0.20	16,300以上	13,900以上	3.5 以上	3.0以下	12~16	—
試験値	12.50	17,700	16,300	7.2	0.66	14.5	19,800

表-20 PC鋼棒 26mm 試験成績表

試験項目	径	ねじの長さ	機 械 的 性 質							化 学 成 分		
			引張荷重	降伏点	降伏点荷重	引張強さ	伸び	リラセーション	ヤング率	P	S	Cu
単位	mm	mm	kgf	kgf/mm ²	kgf	kgf/mm ²	%	%	kgf/mm ²	%	%	%
規格	—	200未満+10 200以上+15	58,400以上	95 以上	50,440以上	110以上	5以上	1.5 以下	—	0.03%以下	0.035%以下	0.03%以下
試験値	26.0	50 50	61,800	107	56,900	116	12	0.94	20,500	0.019	0.004	0.01

表-21 PC鋼棒 13mm 試験成績表

試験項目	径	ねじの長さ	機 械 的 性 質							化 学 成 分		
			引張荷重	降伏点	降伏点荷重	引張強さ	伸び	リラセーション	ヤング率	P	S	Cu
単位	mm	mm	kgf	kgf/mm ²	kgf	kgf/mm ²	%	%	kgf/mm ²	%	%	%
規格	—	200未満+10 200以上+15	18,125以上	130以上	16,250以上	145 以上	5以上	1.5 以下	—	0.03%以下	0.035%以下	0.03%以下
試験値	13.0	50 50	18,800	148	18,530	150	11	0.60	20,500	0.012	0.008	0.02

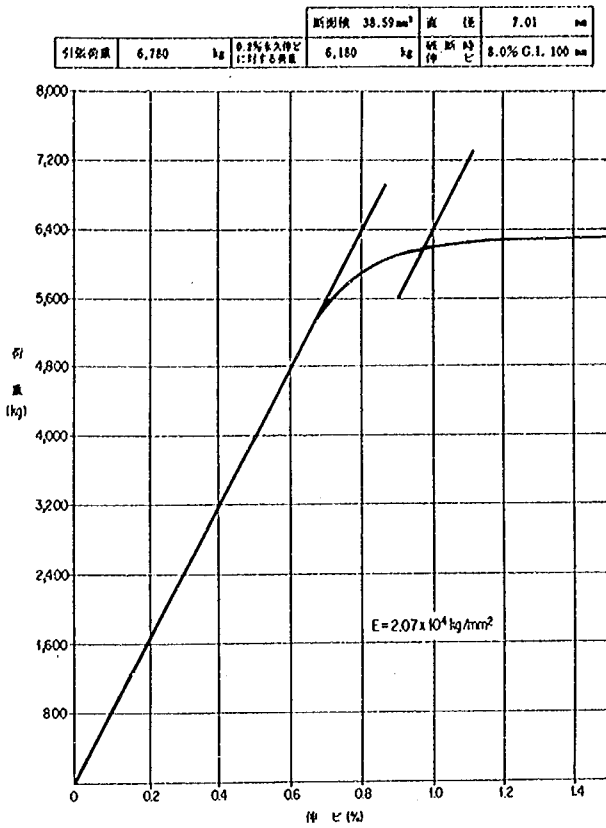


図-7 PC鋼線7mmの荷重-伸び線図

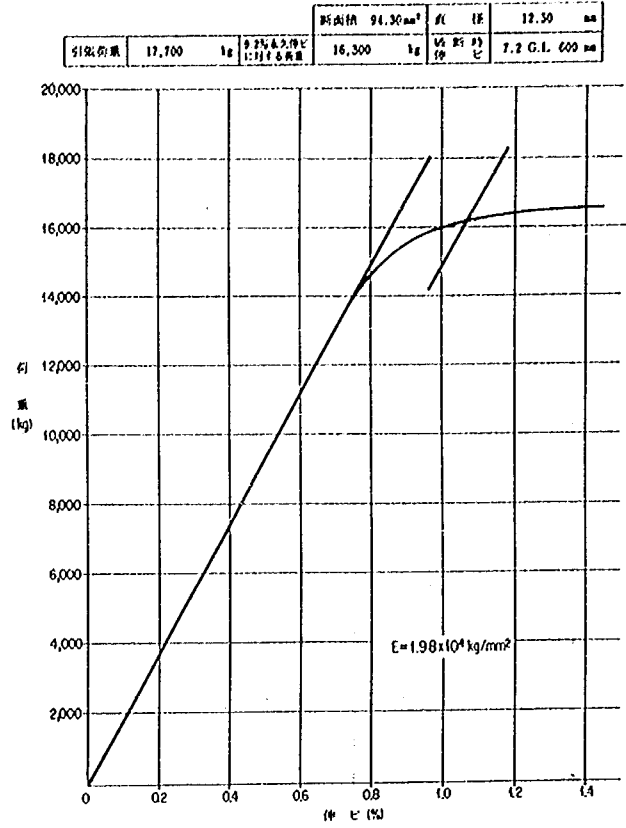


図-8 PC鋼より線12.5mmの荷重-伸び線図

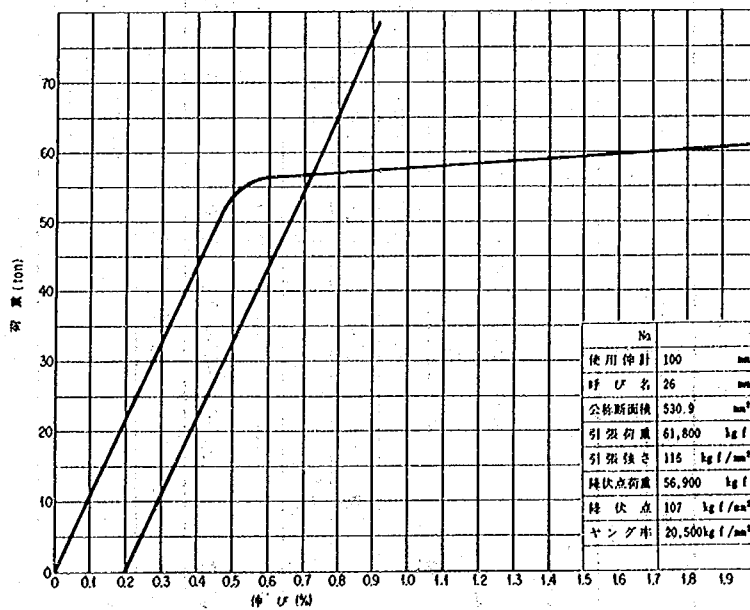


図-9 PC鋼棒26mmの荷重伸び線図

表-22 使用セメント 試験成績表

種 類	項 目	比重	比表面積 (cm^2/g)	凝 結			安定性	酸化マグ ネシウム (%)	三酸化 硫 黄 (%)	強 熱 減 量 (%)	塩 素 (%)	圧縮強さ (kgf/cm^2)				酸化ナ トリウム Na_2O (%)	酸化カ リウム K_2O (%)	全アル カリ R_2O (%)
				水 量 (%)	始 発 (時-分)	終 結 (時-分)						1 日	3 日	7 日	28 日			
早強ポルトランドセメント		3.13	4240	29.7	2-15	3-18	良	1.5	2.8	1.0	0.004	145	260	359	468	0.23	0.55	0.59
高炉セメント (B種)		3.04	3750	29.7	3-30	4-49	良	3.5	1.9	1.0	0.007	—	123	204	424	—	—	—

表-23 骨材のふるい分け試験結果

ふるいの呼び寸法 (mm)	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	受皿
細 骨 材					0	9	44	70	85	94	100
粗 骨 材	0	4	27	67	98	100	100	100	100	100	100

表-24 骨材の試験結果

記 号	試 験 項 目	単 位	細 骨 材		粗 骨 材	
			規格値	試験値	規格値	試験値
1	比 重	—	2.5以上	2.62	2.5以上	2.67
2	吸 水 率	%	3 以下	1.90	3 以下	0.486
3	粗 粒 率	—	—	3.02	—	6.69
4	単位容積重量	kg/m^3	1500~1860	1730	1420~1880	1580
5	実 績 率	%	60~70	66.0	55以上	59.0
6	洗い試験	%	5 以下	4.1	1.5以下	0.21
7	粘土塊量	%	1 以下	0.48	0.25以下	0.10
8	有機不純物	—	うすい	うすい	—	—
9	安定性試験	%	10以下	2.3	12以下	1.4
10	比重1.95に浮く粒子	%	1 以下	0	1 以下	0
11	すり減り減量	%	—	—	40以下	12.0
12	軟石量試験	%	—	—	5 以下	2.0

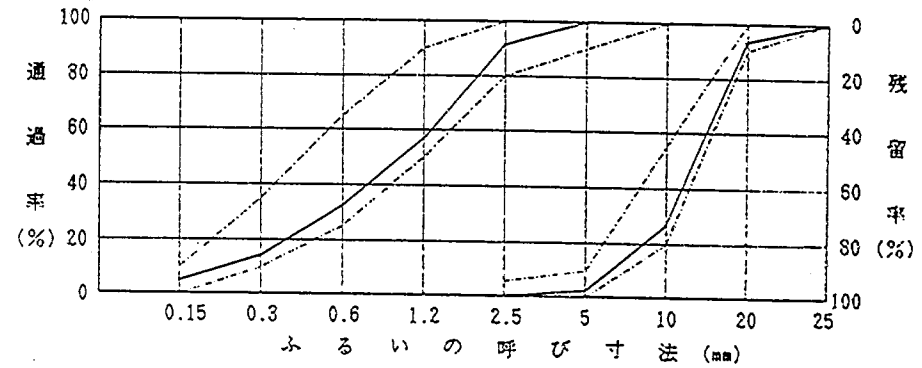


図-10 粒度曲線

表-25 コンクリート用減水剤 試験成績表

1) 製品検査結果

項 目	規格値	測定値
比重 (20℃)	1.12~1.14	1.132

2) コンクリート試験結果

項 目	JIS A 6204による規定値	試 験 値	
		スラング8cm	スラング18cm
減 水 率 (%)	4以上	13	12
フーリング量の比 (%)	100以下	77	67
凝結時間の差 (min)	始発	-60~+90	-5
	終結	-60~+90	0
圧縮強度比 (%)	材令3日	115以上	159
	材令7日	110以上	137
	材令28日	110以上	113
長さ変化比 (%)	120以下	99	99

表-26 コンクリート用A E剤 試験成績表

1) 製品検査結果

項 目	規格値	測定値
比重 (20℃)	1.01~1.04	1.029

2) コンクリート試験結果

項 目	JIS A 6204による規定値	試 験 値	
		スラング8cm	スラング18cm
減 水 率 (%)	6以上	7	7
フーリング量の比 (%)	75以下	65	57
凝結時間の差 (min)	始発	-60~+60	0
	終結	-60~+60	+5
圧縮強度比 (%)	材令3日	95以上	108
	材令7日	95以上	102
	材令28日	90以上	101
長さ変化比 (%)	120以下	101	103
	80以下	98	—

表-27 グラウト用混和剤 試験結果表

1) 品質

試験項目	品 目	バ リ ッ ク G
	規 格 値	試験値
性 状	黒褐色の液体	適
比 重	1.16~1.20	1.18
p H	6.0 ~8.0	7.6

2) 配合基準

温 度 (℃)	5	20	30
水セメント比 (%)	35~37	33~35	32~34
バリックG (対セメント%)	2	2	2
F-1550 (対セメント%)	0.016	0.012	0.012

3) グラウト性能試験

試験項目	フジステナー (%)	フーリング率 (%)	膨張率 (%)	28日圧縮強度 (kgf/cm ²)
規 格 値	6~12	1%以下	5~10	200以上
試 験 値	適	適	適	適

3.2.2 コンクリートの配合

表-28 PC供試体用コンクリート配合結果

セメントの 種類	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランの 範囲 (cm)	空気量の 範囲 (%)	水・セメ ント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材G		混和材	
									5号 13~20mm	6号 5~13mm	減水剤	AE剤
早強高炉	20	8 ± 2.5	4 ± 1	50	50	165	330	890	370	552	6.60	1.00

PC供試体用コンクリートの配合結果を表-28に、ポストテンションのシース用セメントグラウトの配合結果を表-29に、グラウトの品質試験結果を表-30に、コンクリートの品質試験結果を表-31に示す。

表-29 セメントグラウトの配合結果

水セメント比 W/C (%)	セメント C (kg)	水 W (kg)	バリック G減水剤 (kg)	F-1550 発泡剤 (g)
37	80	29.6	1.6	12.8

表-30 セメントグラウトの品質試験結果

試験 項目 測定値	フロー値 (秒)	ブリージング率 (%)		膨張率 (%)		圧縮強度 (kgf/cm ²)	
		3h後	24h後	3h後	24h後	7d	28d
1	6.6	0	0	6.8	8.1	168	343
2	6.8	0	0	7.1	8.3	163	318
3	6.9	0	0	6.8	8.0	178	329
平均	6.8	0	0	6.9	8.1	170	330

3.2.3 暴露条件

作製した155本の供試体は、RC供試体同様、土木研究所構内の南ループの西側で暴露試験を行っている。暴露期間は長期にわたって行う予定である。暴露は昭和62年1月20日から開始した。

表-31 コンクリートの品質試験結果

セメント の種類	塩化物濃度	スランプ	空気量	コンクリ ート温度	圧縮強度 材令28日 (kg/cm ²)	平均値
早 強 ポ ル ト ラ ン ド	0 g cℓ / ml	8.5	3.3	19	401	405
					408	
					406	
	150 g cℓ / ml	7.8	3.5	17	427	425
					411	
					438	
	300 g cℓ / ml	7.7	4.3	18	452	457
					465	
					454	
	600 g cℓ / ml	8.7	4.6	17	459	451
					446	
					447	
高炉B種 1	0 g cℓ / ml	7.6	3.2	12	433	427
					426	
					422	
高炉B種 2	0 g cℓ / ml	8.0	3.8	11	489	475
					467	
					469	
高炉B種	600 g cℓ / ml	9.3	3.3	12	475	468
					465	
					463	
高炉B種	600 g cℓ / ml	9.3	3.3	12	461	467
					468	
					472	

3.2.4 調査項目および試験方法

1) 調査項目

調査は、所定の材令においてコンクリート中の鋼材の電位測定、外観観察および解体調査を行った。

2) 試験方法

a) 電位測定

電位測定の方法は、各供試体の上面（プレストレストなしの供試体は、上面および下面）について、それぞれの鉄筋の配筋位置に添って50cm間隔で鉛照合電極を用いて電位測定を行った。なお、電位と鉄筋腐食状況の関係は、RC供試体と同様、鉛照合電極の値を飽和硫酸銅電極（CSE）に換算して表-16に示すように評価を行った。

b) 外観観察および解体調査

外観観察は、解体調査を行う前に、コンクリートの表面について、錆汁やひび割れを目視により調査する。

解体調査は、所定材令ごとにPC供試体を解体し、PC鋼材の腐食を目視観察し、その腐食度の評価は、表-32に示す5段階の基準で行った。

表-32 鉄筋の腐食評価基準

評 価 基 準	
A	腐食がなく黒皮の状態
B	鉄筋表面に点錆が発生
C	鉄筋表面浮き錆が発生
D	少し厚みのある膨張性の錆が発生
E	鉄筋全体にわたって著しい膨張性の錆が発生しており断面欠損している箇所がある。

4. 試験結果

4.1 RC供試体における試験結果

4.1.1 電位測定結果

電位測定は、各供試体の各側面（柱部の東、西、南、北面、横ばり部の上面）について、それぞれの鉄筋の配筋位置に添って5 cm間隔で電位測定を行った。測定は、0カ月（暴露直後）、5カ月、1年および2年後の計4回行った。ここでは、これらのうち5カ月と1年のそれぞれの測定ごとに0カ月と比較を行い、(1)塩化物量（Cl換算0～900 g/m³）の各供試体の北面について塩化物濃度の違いによる差、(2)塩化物量（Cl換算600 g/m³）の北面について鉄筋の種類の違いによる差、(3)塩化物量（Cl換算600 g/m³）の北面についてかぶりの違いによる差の3項目についてそれぞれ、各供試体の5面（柱部の東、西、南、北面および横ばりの上面）について検討を行った。

(1) 5ヶ月後の電位測定結果

1) 塩化物濃度の違いによる差

各供試体における塩分濃度の違いによる差をみるため、北面のSR24について、図-11にかぶり2 cmの図を、図-12にかぶり8 cmの図を示す。これによると、0カ月（暴露直後）の電位は、No.1～5の供試体とも-100～-150の範囲に入っており、ASTM基準でいうところの $-0.20 < \text{電位 } E(V)$ の範囲であり、腐食が生じていないと思われる。また、5カ月後の値は、No.1（Cl換算0 g/m³）、No.2（Cl換算300 g/m³）およびNo.4（Cl換算900 g/m³）とも卑（+）の方向に移動しており、5カ月目では錆はまだ発生していないと思われる。しかし、No.3（Cl換算600 g/m³）およびNo.5（Cl換算900 g/m³、高炉セメントB種）は、一部に-200以下の値を示している場所もありASTM法基準でいうところの $-0.35 < \text{電位 } E \leq -0.20 (V)$ 不確定もしくは、 $\text{電位 } E < -0.35 (V)$ の範囲であり、腐食している可能性があると思われる。図-12のかぶり8 cmについても図-11のSR24、かぶり2 cmと同様のことが言えNo.3は錆の発生している可能性があると思われる。しかし、錆の発生の確実性については、明確なことは言えず、今後、電位測定の推移あるいは解体調査によって明らかにしていく予定である。

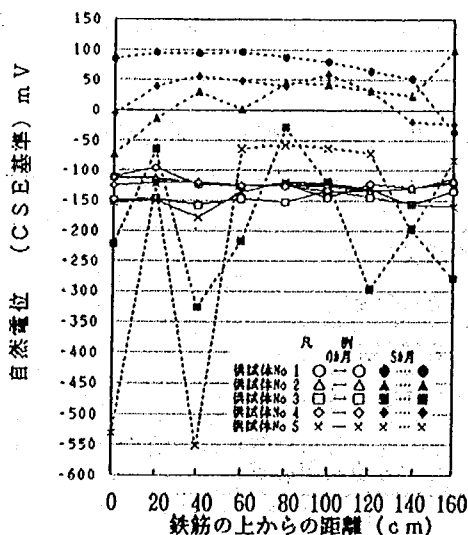


図-11 塩分濃度の違いによる差
(北面 SR24 かぶり 2 cm)

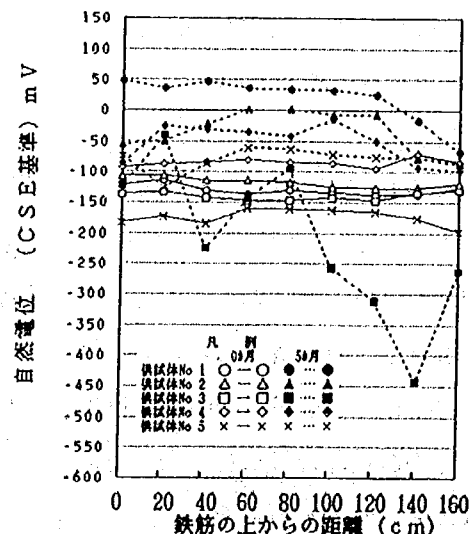


図-12 塩分濃度の違いによる差
(北面 SR24 かぶり 8 cm)

2) 鉄筋の種類の違いによる差

鉄筋の種類の違いによる差をみるため、供試体No.3の北面について、図-13にかぶり2 cm、図-14にかぶり8 cmの図を示す。これによると、図-13では0 カ月（暴露直後）の電位は、SR24、SD30、耐塩性鉄筋A種の3種類は、-100~-150の範囲に入っており、腐食が生じていないと思われる。一方、亜鉛メッキ鉄筋は-350以下になっているが、腐食していない亜鉛鉄筋の電位はこのくらいの値を示すものであり、これから判断すると腐食はしていないと思われる。なお、亜鉛メッキ鉄筋については、ASTM法の基準とは別に独自の基準で評価する必要がある。5 カ月後の電位はバラツキはあるもののSD30、亜鉛メッキ鉄筋および耐塩性鉄筋A種の3種類の鉄筋の下部に-350以下になっている場所があり、錆が発生している可能性があると思われる。図-14についても図-13と同様のことが言え、SR24、亜鉛メッキ鉄筋およびエポキシ塗装鉄筋の下部に-350以下になっている場所があり、錆が発生している可能性があると思われる。鉄筋種類別間の差は電位のバラツキが大きく、明確なことは言えない。

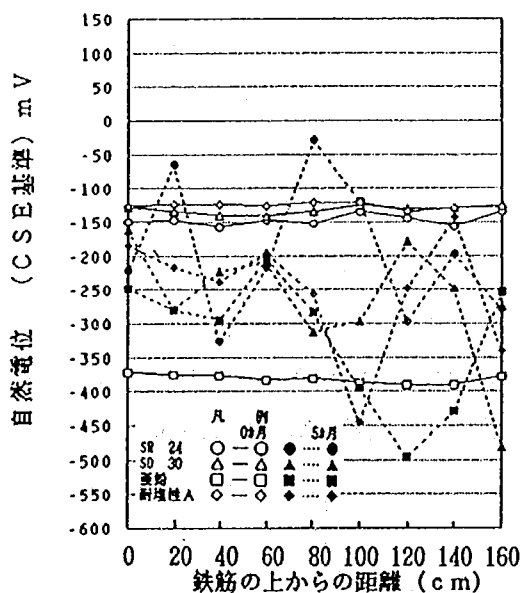


図-13 鉄筋の種類による差
(No.3 北面 かぶり 2 cm)

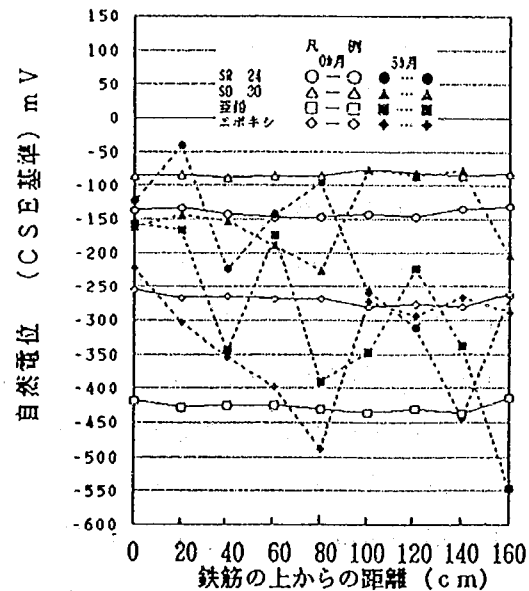


図-14 鉄筋の種類による差
(No.3 北面 かぶり 8 cm)

3) かぶりの違いによる差

かぶりの違いによる差をみるため、供試体No.3の北面について、図-15にSD30、図-16にSR24の図を示す。これによると、図-15および図-16とも0 カ月（暴露直後）の電位は、各かぶりとも-50~-150の範囲に入って安定しており、腐食が生じていないと思われる。5 カ月後の電位は各かぶりともバラツキはあるものの鉄筋の下部に-350以下になっている場所があり、錆が発生している可能性があると思われる。しかし、かぶりの違いによる差はバラツキが大きく、明確なことは言えない。

い。

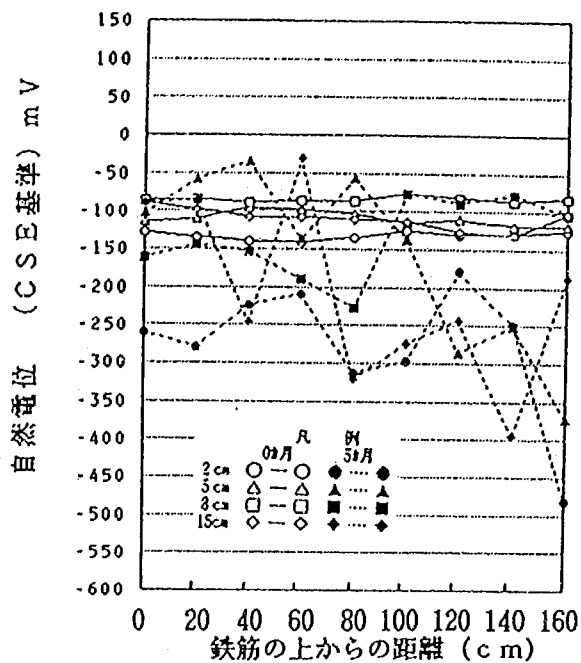


図-15 かぶりの違いによる差
(No.3 北面 SD30)

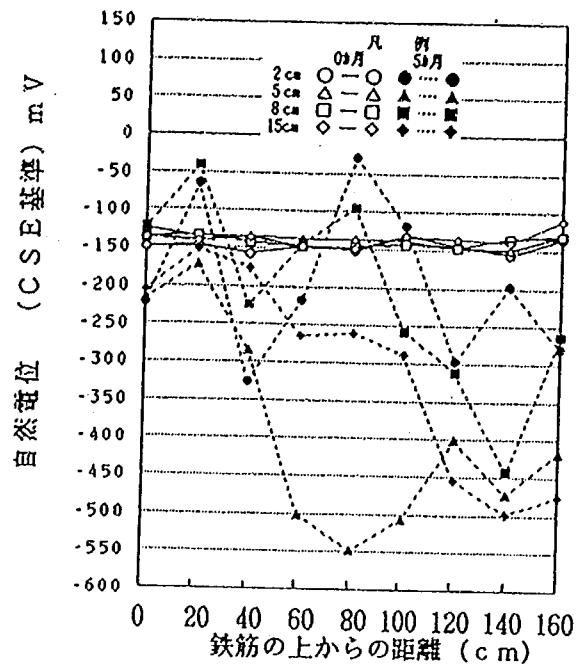


図-16 かぶりの違いによる差
(No.3 北面 SR24)

(2) 1年後の電位測定結果

1) 塩化物濃度の違いによる差

各供試体における塩分濃度の違いによる差をみるため、図-17に北面のSR24、かぶり2 cmの図を、図-18に北面SR24、かぶり8 cmの図を、図-19に北面SD30、かぶり2 cmの図を、図-20に北面SD30、かぶり8 cmの図を示す。また、図-21~24と東面の図を、図-25~28に西面の図を、図-29~32に南面の図を、図-33~36に張出し面の図を示す。しかし、ここでは、このうち図-17の北面のSR24、かぶり2 cmについて考察を述べることにした。

これによると、0カ月（暴露直後）の電位は、No.1~5の供試体とも $-100 \sim -150$ mVの範囲内に入っており、ASTM法基準でいうところの $-200 < \text{電位 } E \text{ (mV)}$ の範囲であり、腐食が生じていないと思われる。また、1年後の値は、No.4（Cl換算 900 g/m^3 ）の供試体は、他の供試体に比べると少し高い自然電位を示しているが、いずれの供試体とも貴（+）の方向に移動しており、1年目では錆はまだ発生していないと思われる。

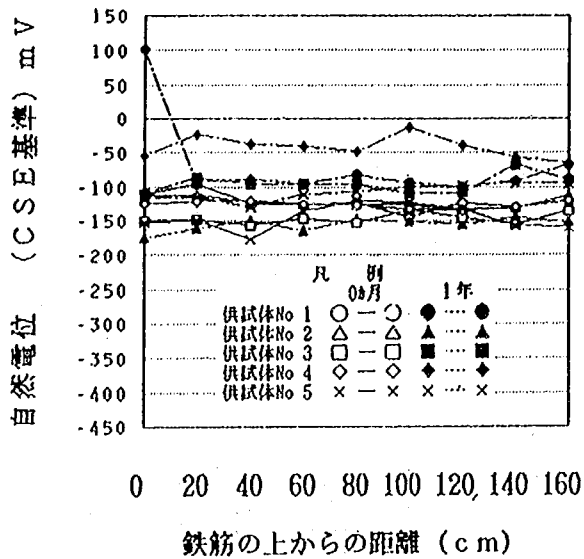


図-17 塩分濃度の違いによる差
(北面 SR24 かぶり 2 cm)

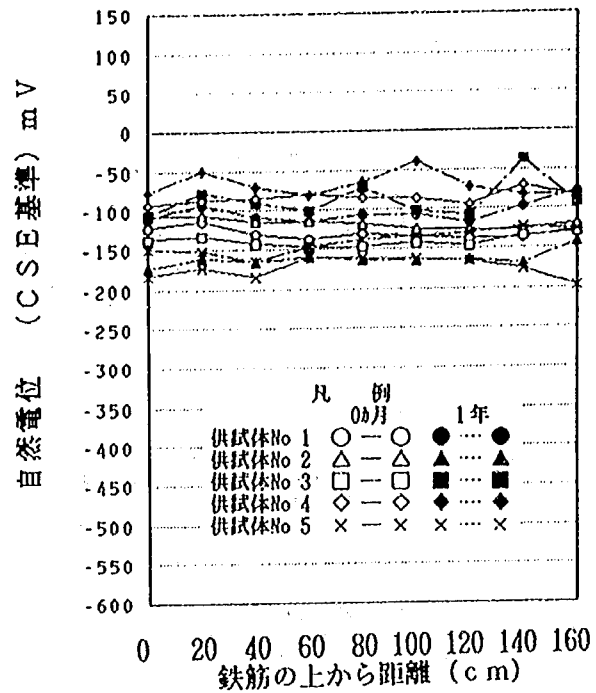


図-18 塩分濃度の違いによる差
(北面 SR24 かぶり 8 cm)

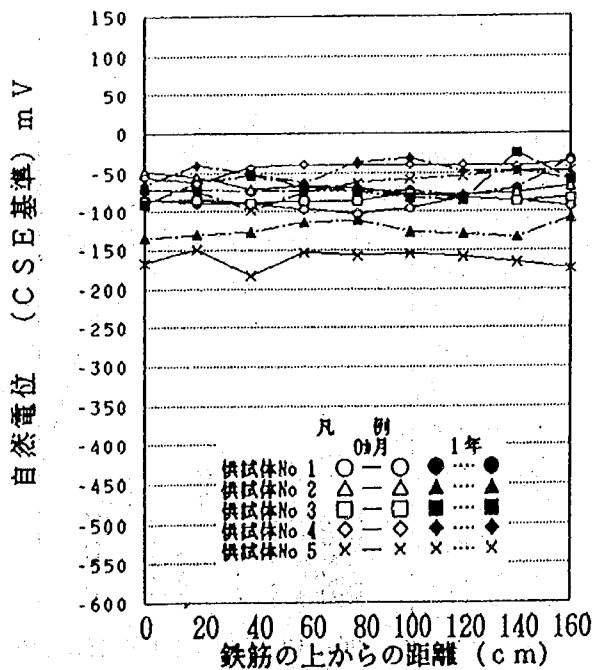


図-19 塩分濃度の違いによる差
(北面 SD30 かぶり 2 cm)

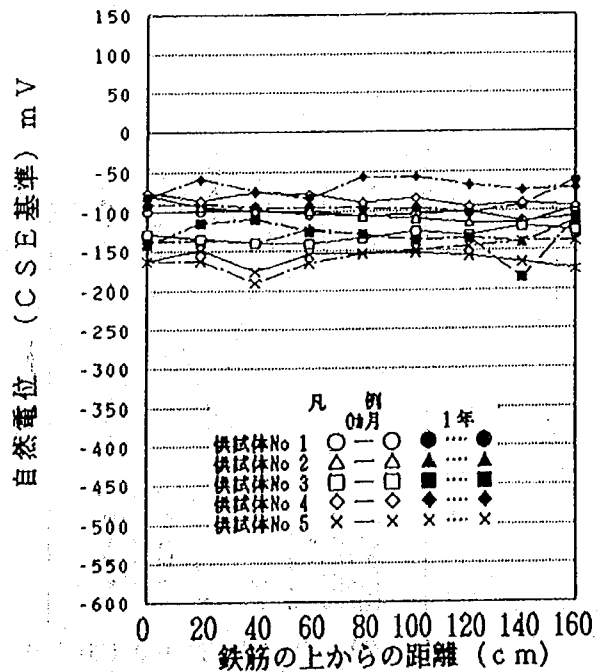


図-20 塩分濃度の違いによる差
(北面 SD30 かぶり 8 cm)

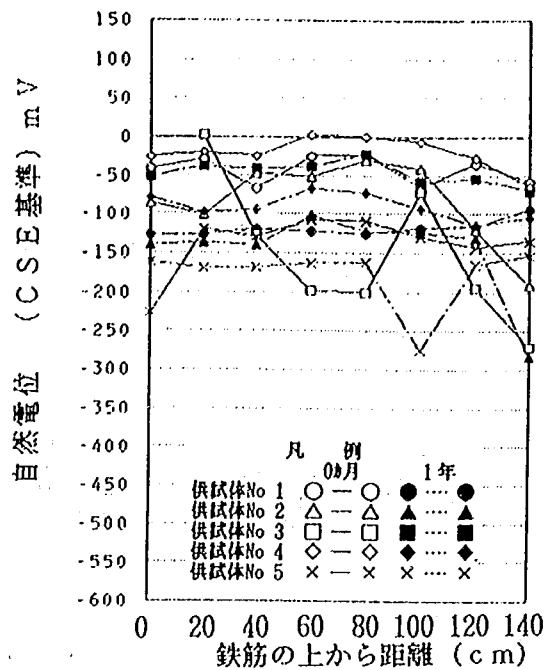


図-21 塩分濃度の違いによる差
(東面 SR24 かぶり 2 cm)

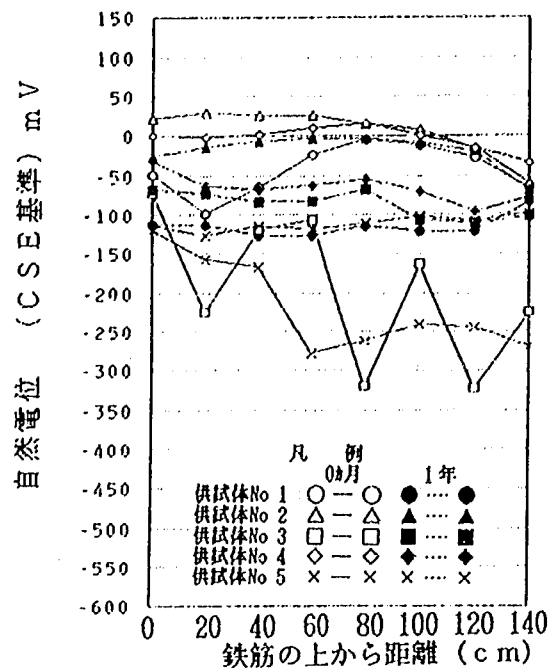


図-22 塩分濃度の違いによる差
(東面 SR24 かぶり 8 cm)

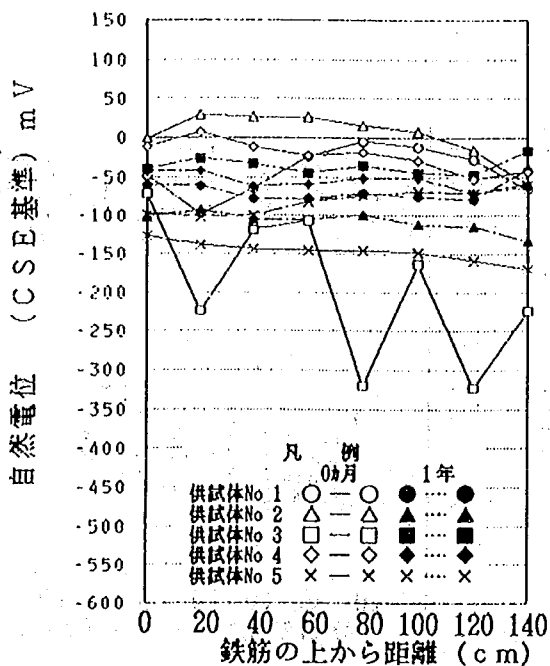


図-23 塩分濃度の違いによる差
(東面 SD30 かぶり 2 cm)

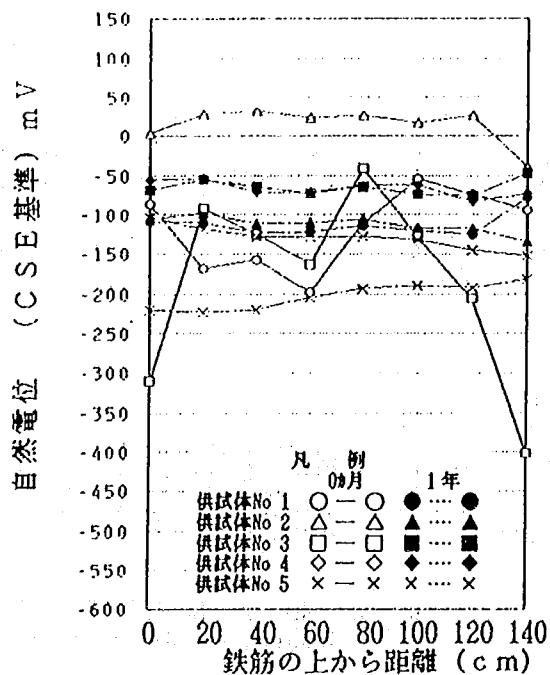


図-24 塩分濃度の違いによる差
(東面 SD30 かぶり 8 cm)

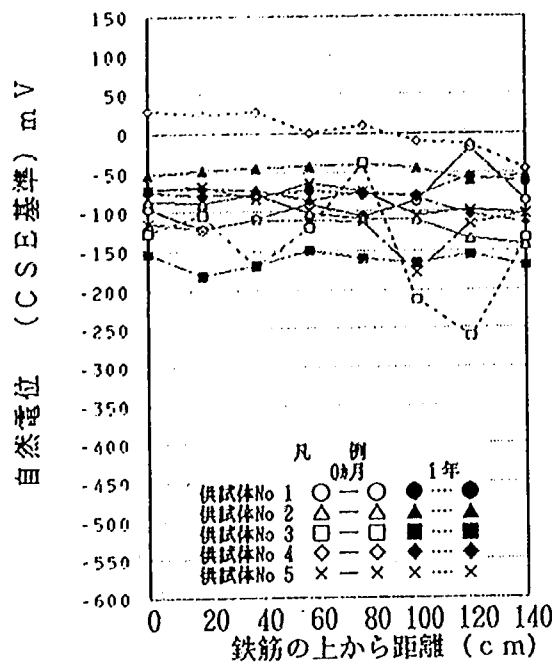


図-25 塩分濃度の違いによる差
(西面 SR24 かぶり 2 cm)

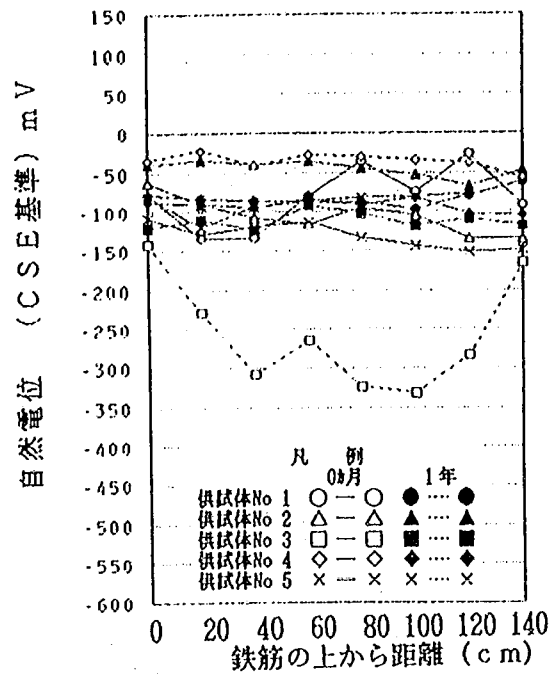


図-26 塩分濃度の違いによる差
(西面 SR24 かぶり 8 cm)

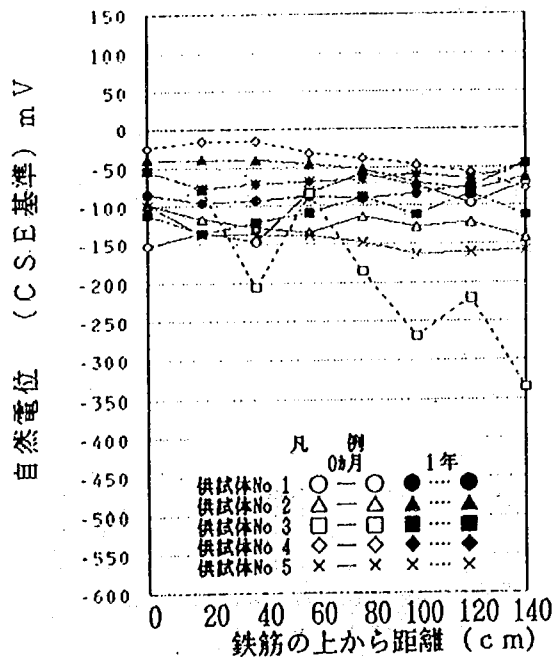


図-27 塩分濃度の違いによる差
(西面 SD30 かぶり 2 cm)

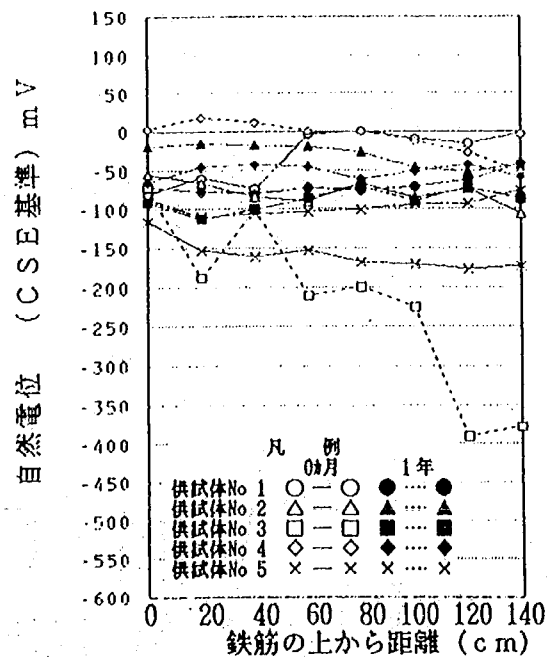


図-28 塩分濃度の違いによる差
(西面 SD30 かぶり 8 cm)

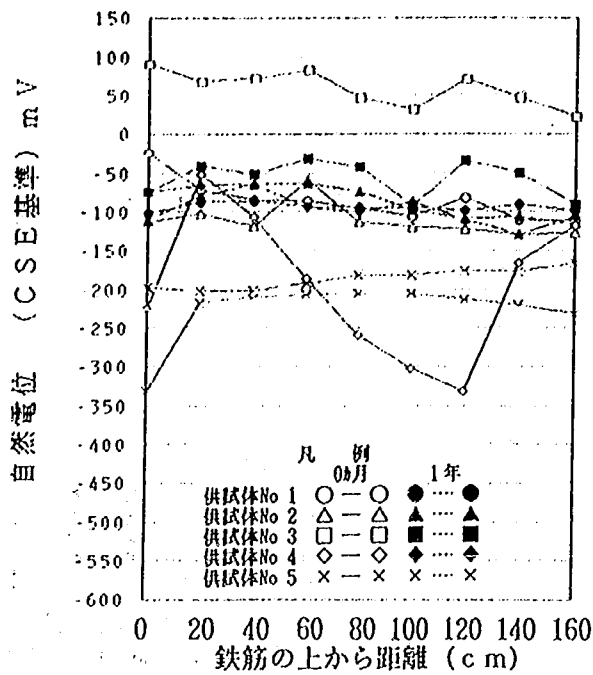


図-29 塩分濃度の違いによる差
(南面 SR24 かぶり 2 cm)

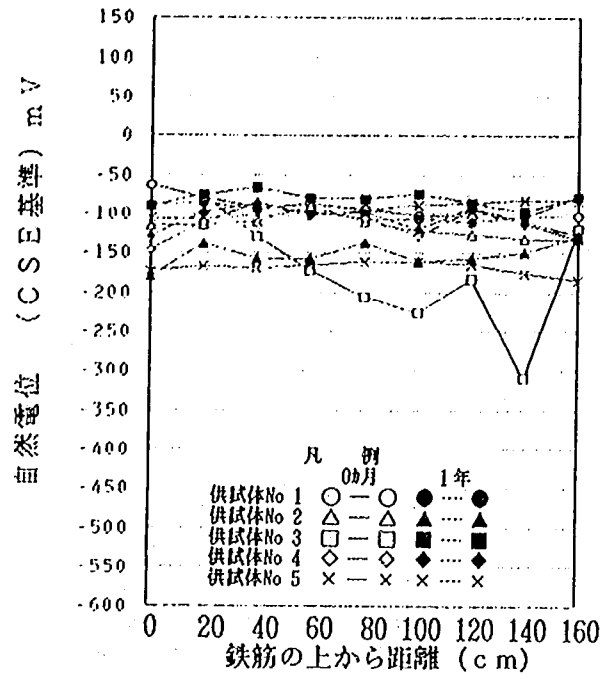


図-30 塩分濃度の違いによる差
(南面 SR24 かぶり 8 cm)

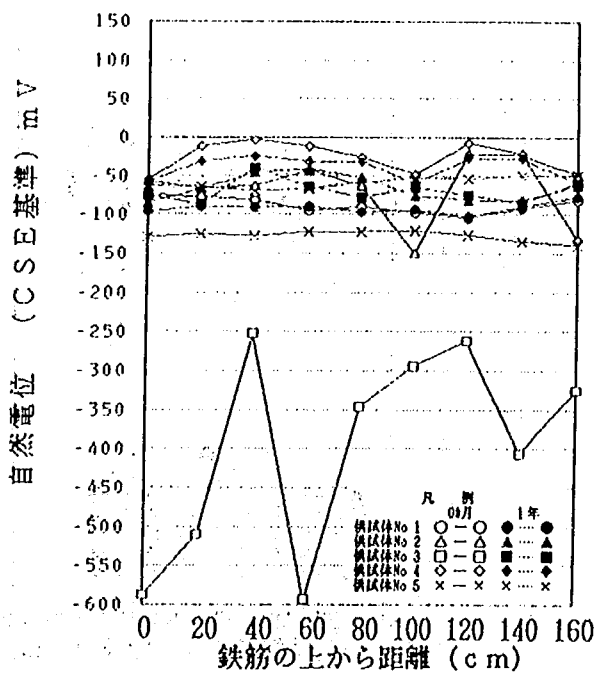


図-31 塩分濃度の違いによる差
(南面 SD30 かぶり 8 cm)

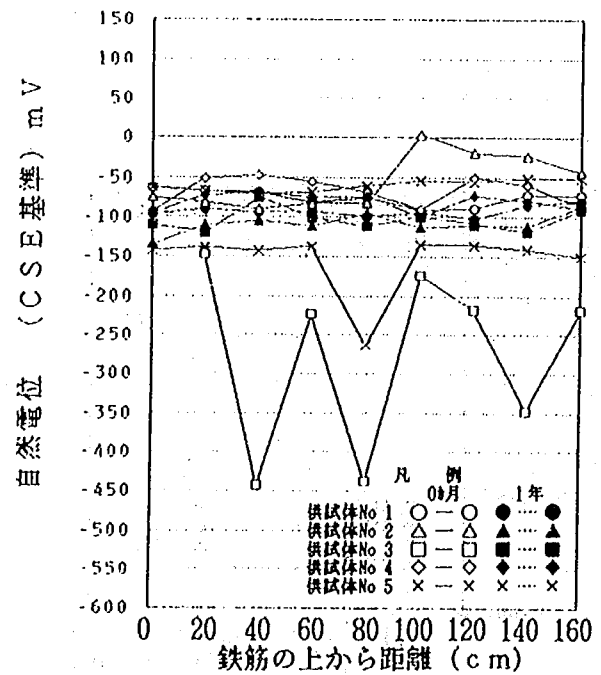


図-32 塩分濃度の違いによる差
(南面 SD30 かぶり 2 cm)

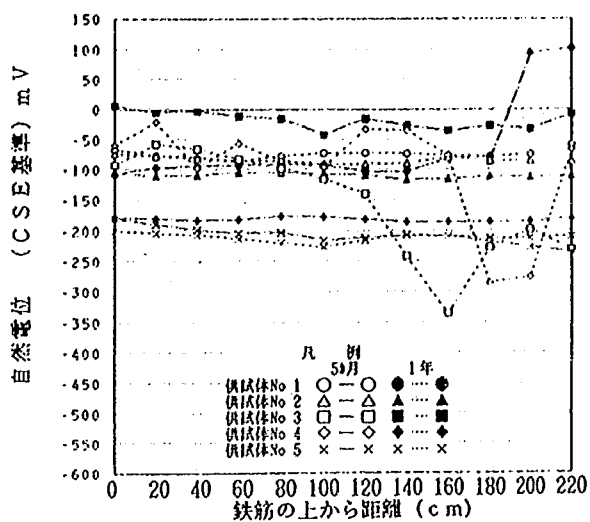


図-33 塩分濃度の違いによる差
(張り出し上部 SR24 かぶり 2cm)

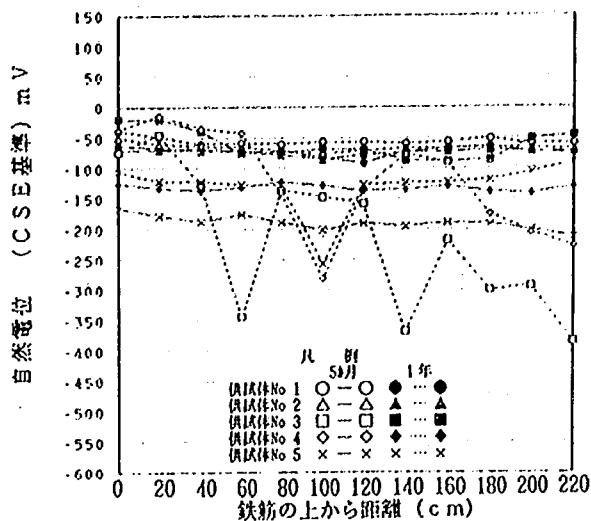


図-34 塩分濃度の違いによる差
(張り出し上部 SD30 かぶり 2cm)

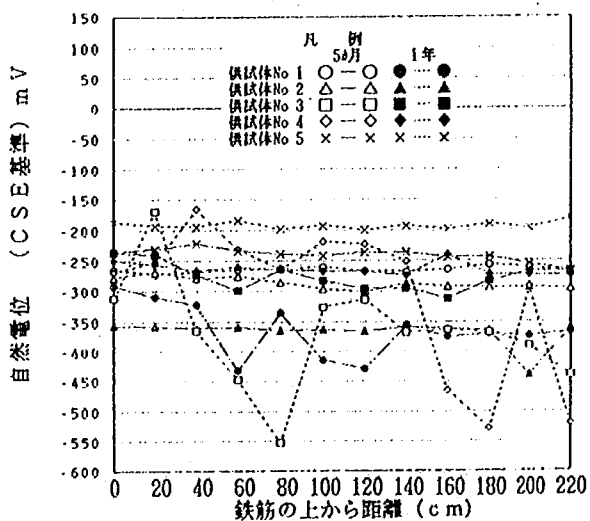


図-35 塩分濃度の違いによる差
(張り出し上部 亜鉛鉄筋 かぶり 2cm)

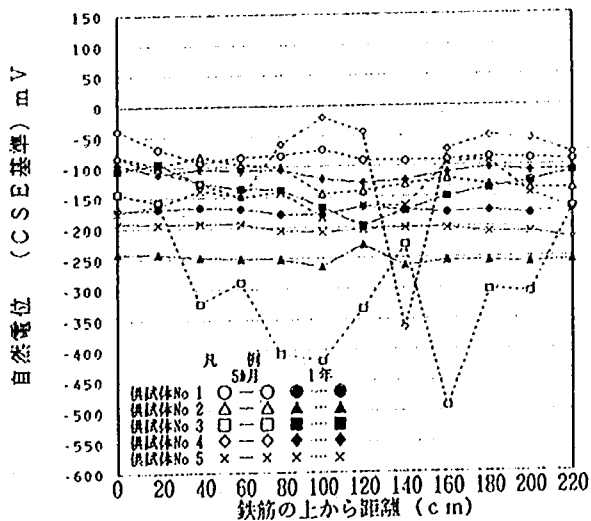


図-36 塩分濃度の違いによる差
(張り出し上部 エポキシ鉄筋 かぶり 2cm)

2) 鉄筋の種類の違いによる差

鉄筋の種類の違いによる差をみるため、図-37に供試体No.3の塩化物濃度(Cl換算600 g/m²)の北面についてかぶり2 cmの図を、図-38にNo.3の北面のかぶり8 cmの図を示す。同様に図-39と40に東面の図を、図-41と42に西面の図を、図-43と44に南面の図を、図-45~49に張り出し部の図を示す。しかし、ここでは、5面とも同様の結果であるため、このうち図-37のNo.3の北面のかぶり2 cmの図について考察を述べることにした。

これによると、0カ月(暴露直後)の電位は、SR24, SD30 および耐塩性鉄筋A種の3種類は、-100 ~ -150 mV の範囲に入っており、腐食が生じていないと思われる。1年後の電位は亜鉛メッキ鉄筋を除き他の3種類の鉄筋とも鉄筋の種類により若干の差はあるものの、-200 mV以上となっており、錆はまだ発生していないと思われる。

また、亜鉛メッキ鉄筋の電位は-350 mV 前後になっているが、亜鉛が溶出していない鉄筋の電位はこのくらいの値を示すものであり、これから判断すると溶出はまだしていないと思われる。なお、亜鉛メッキ鉄筋については、独自の挙動を示すため ASTM法の基準とは別に評価する必要がある。

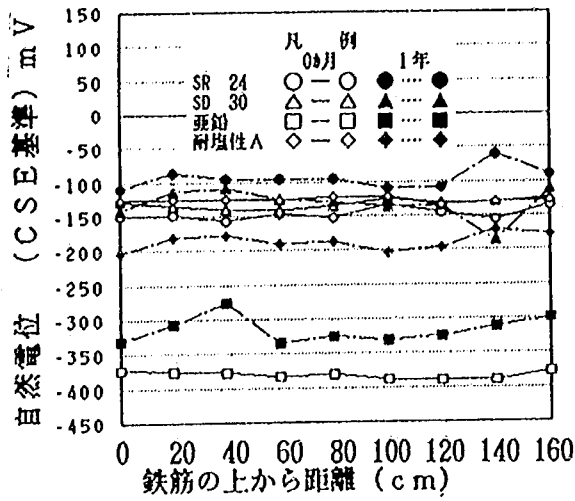


図-37 鉄筋の種類の違いによる差
(No.3 北面 かぶり 2 cm)

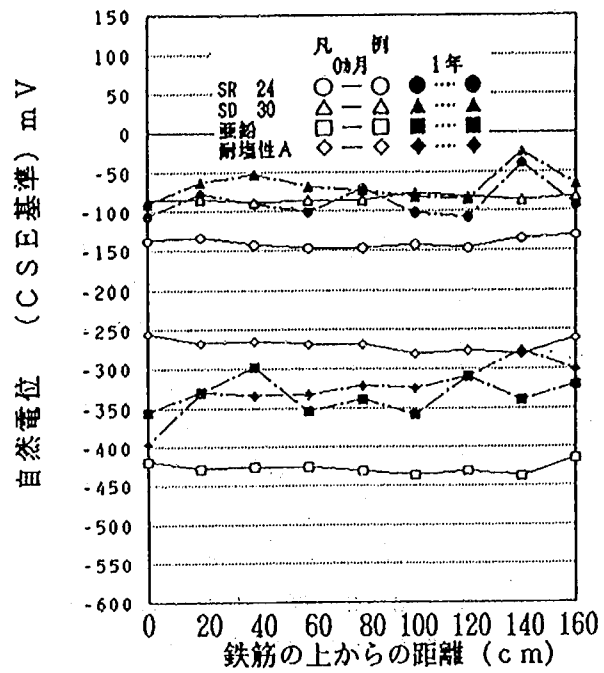


図-38 鉄筋の種類の違いによる差
(No.3 北面 かぶり 2 cm)

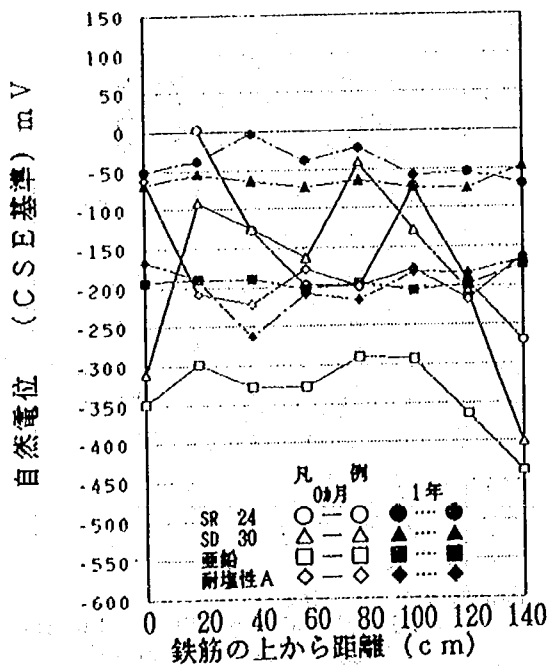


図-39 鉄筋の種類の違いによる差
(No.3 東面 かぶり 2 cm)

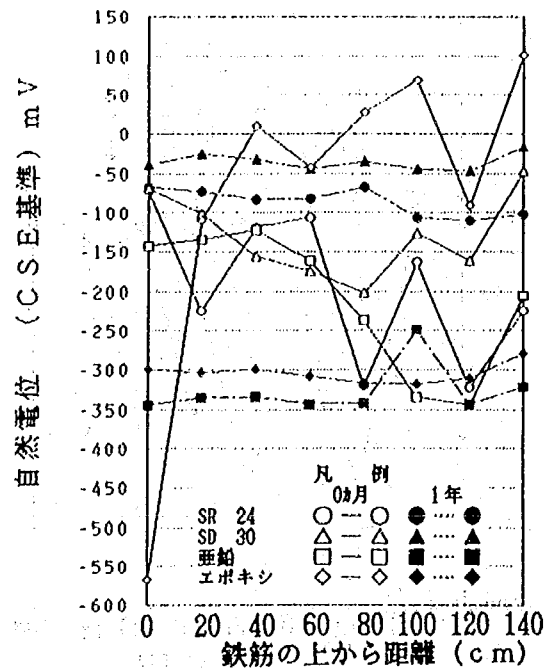


図-40 鉄筋の種類の違いによる差
(No.3 東面 かぶり 8 cm)

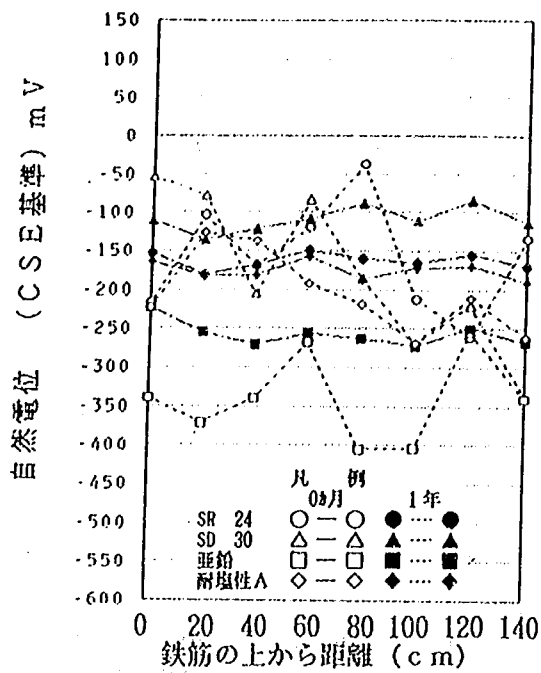


図-41 鉄筋の種類の違いによる差
(No.3 西面 かぶり 2 cm)

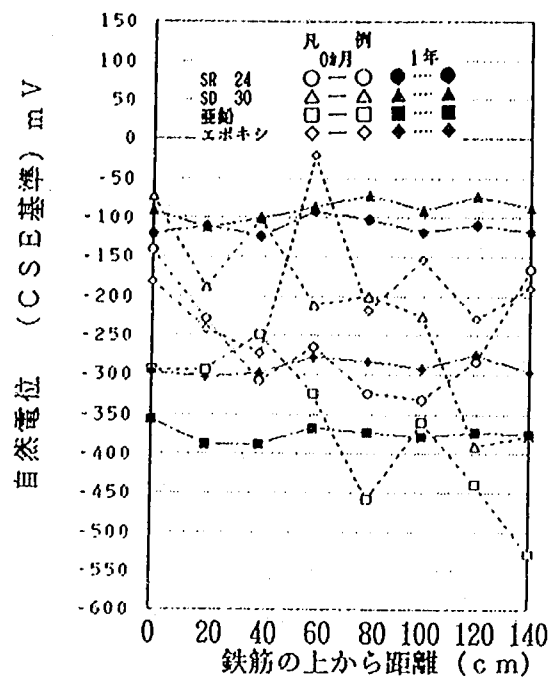


図-42 鉄筋の種類による差
(No.3 西面 かぶり 8 cm)

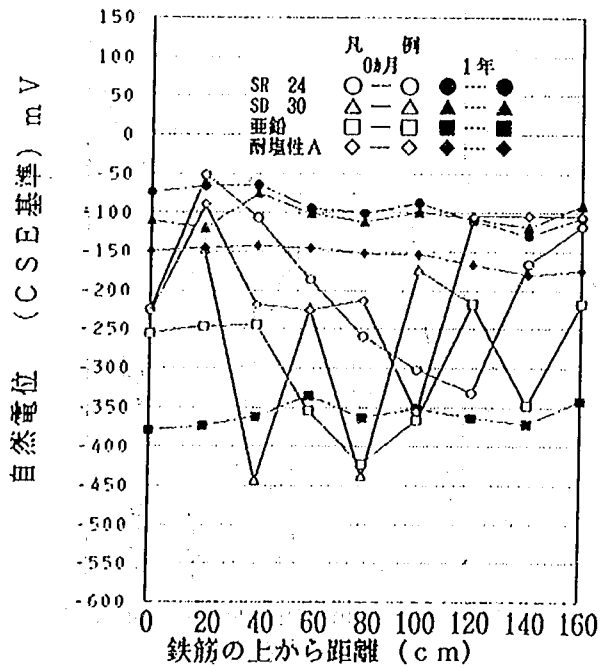


図-43 鉄筋の種類の違いによる差
(No.3 南面 かぶり 2 cm)

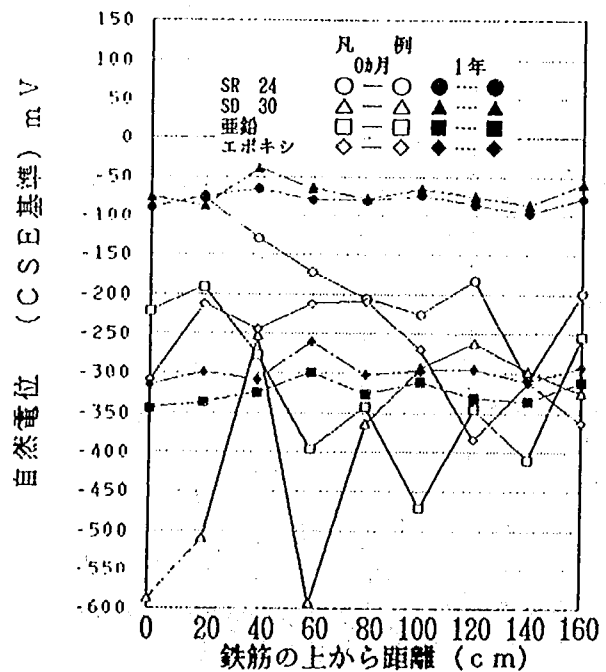


図-44 鉄筋の種類による差
(No.3 南面 かぶり 8 cm)

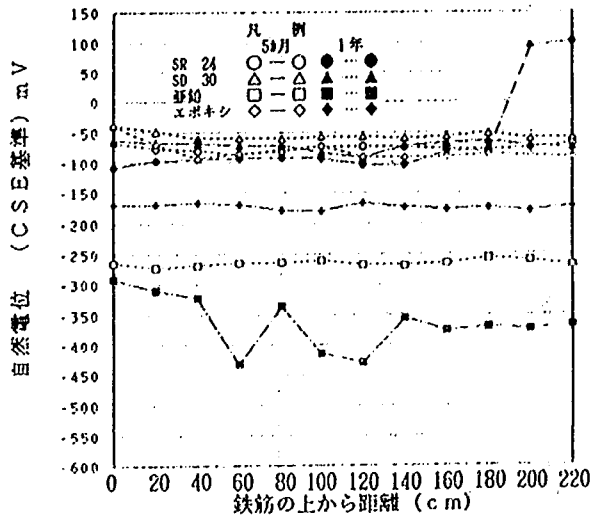


図-45 鉄筋の種類の違いによる
(張り出し上部 No.1 かぶり 2 cm)

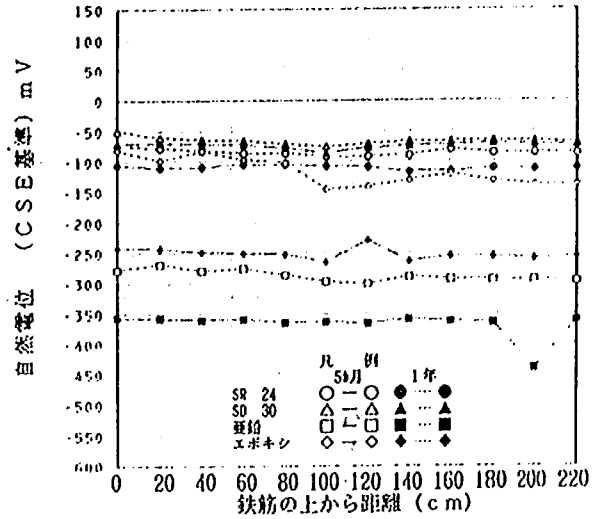


図-46 鉄筋の種類の違いによる
(張り出し上部 No.2 かぶり 2 cm)

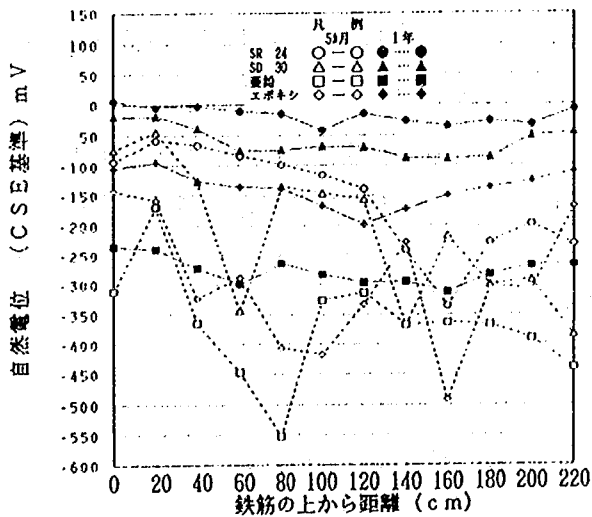


図-47 鉄筋の種類の違いによる
(張り出し上部 No.3 かぶり 2 cm)

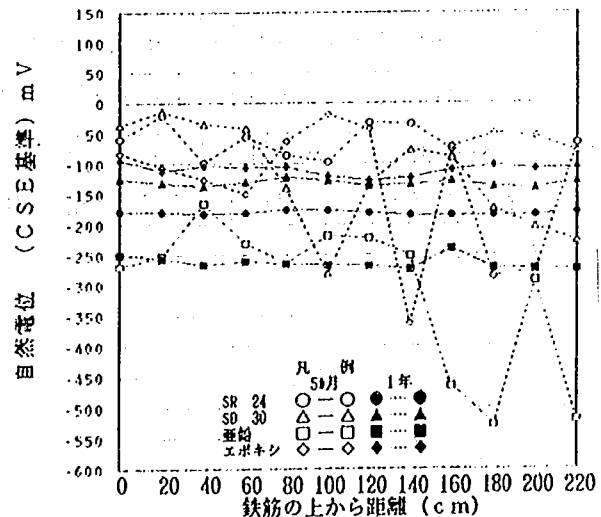


図-48 鉄筋の種類の違いによる
(張り出し上部 No.4 かぶり 2 cm)

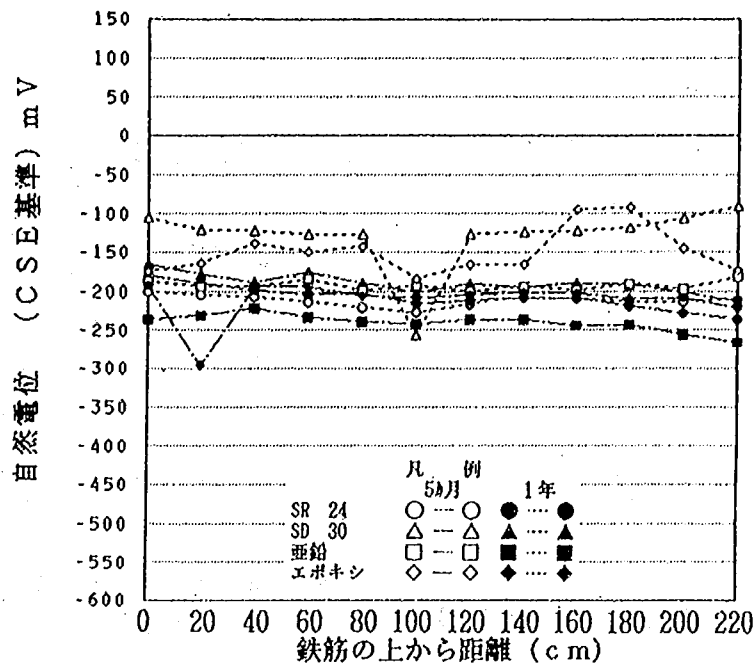


図-49 鉄筋の種類の違いによる差
(張り出し上部 Na 5 かぶり 2 cm)

3) かぶりの違いによる差

かぶりの違いによる差をみるため、図-50に供試体Na 3の塩化物濃度 (Cl 換算 600 g/m³) の北面についてSR24の図を、図-51にNa 3の北面のかぶり 8 cmの図を示す。同様に図-52と53に東面の図を、図-54と55に西面の図を、図-56と57に南面の図を示す。しかし、4面とも同様の結果であるためここでは、このうち図-50のNa 3の北面のSR24について考察を述べることにした。

これによると、0カ月 (暴露直後) の電位は、各かぶりとも -150 mV 前後であり、1年後の電位も各かぶりとも0カ月の電位より 50 mV 程度貴 (+) の方に移動しているだけで錆は発生していないと思われる。

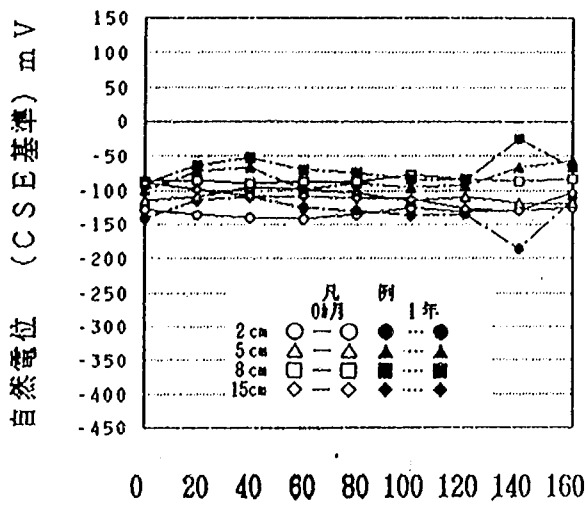


図-50 かぶりの違いによる差
(No.3 北面 SR24)

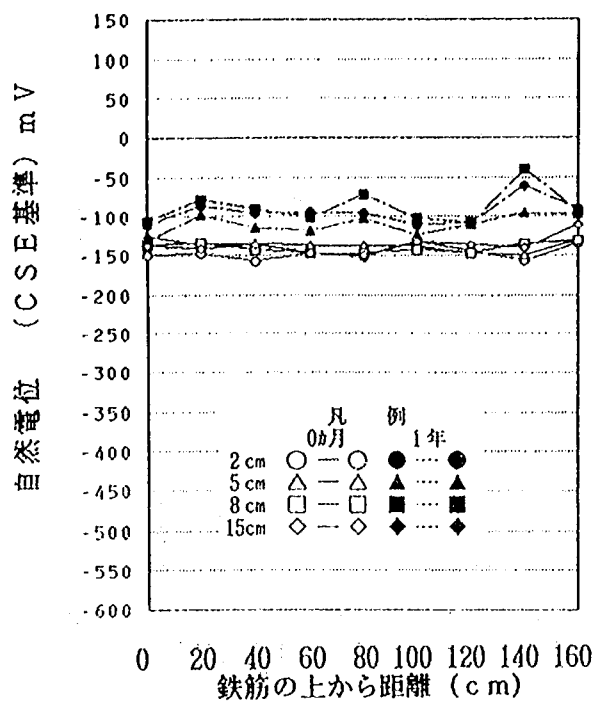


図-51 かぶりの違いによる差
(No.3 北面 SD30)

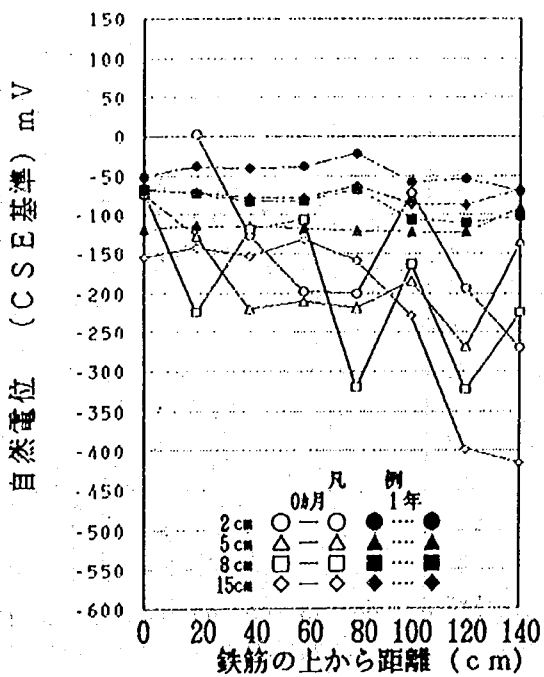


図-52 かぶりの違いによる差
(No.3 東面 SR24)

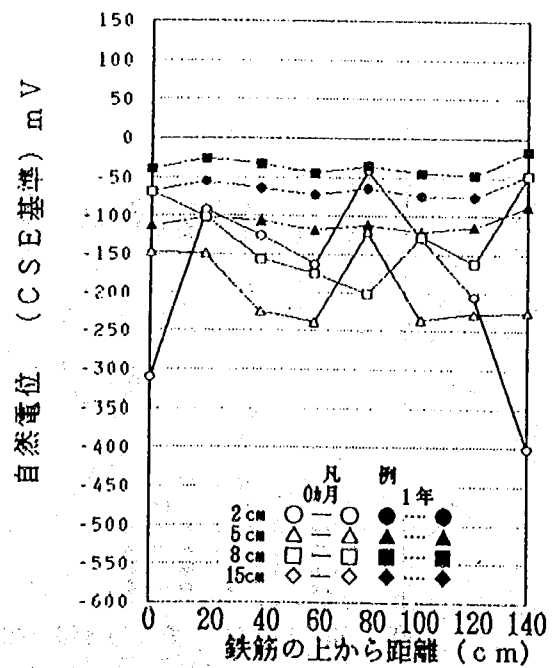


図-53 かぶりの違いによる差
(No.3 東面 SD30)

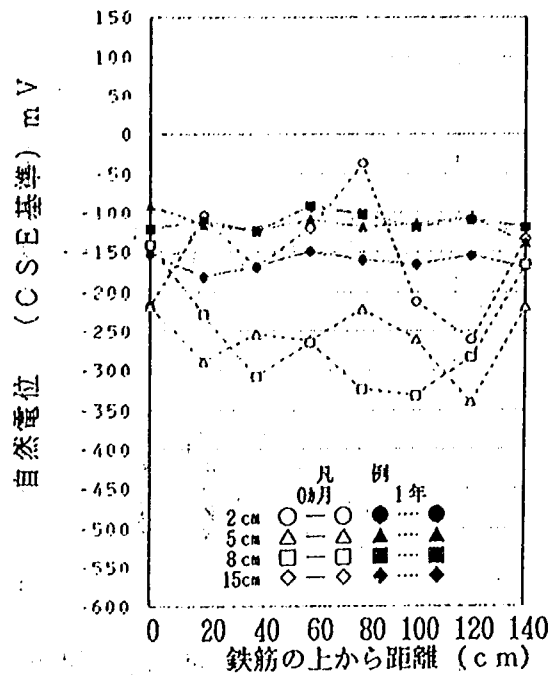


図-54 かぶりの違いによる差
(No.3 西面 SR24)

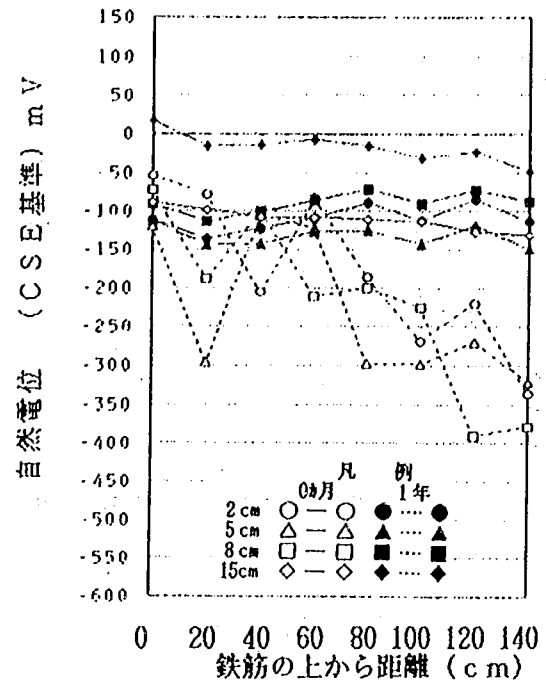


図-55 かぶりの違いによる差
(No.3 西面 SD30)

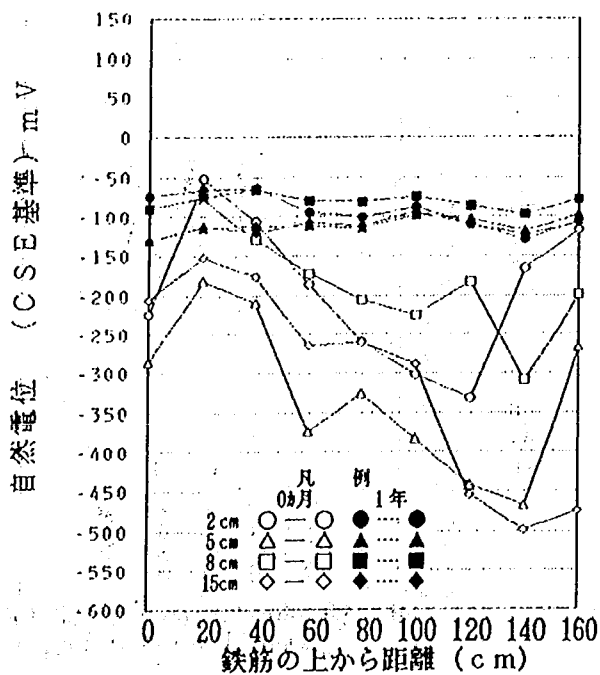


図-56 かぶりの違いによる差
(No.3 南面 SR24)

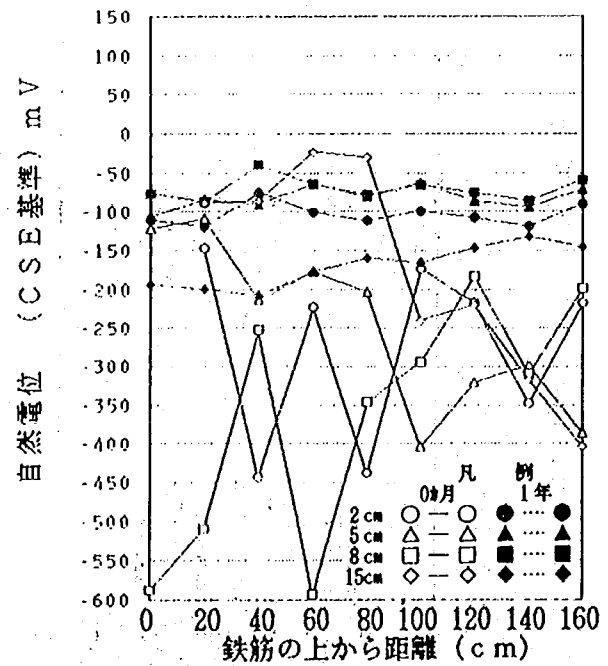


図-57 かぶりの違いによる差
(No.3 南面 SD30)

4.1.2 外観観察および解体調査結果

(1) 外観観察結果

5体のRC供試体について、2年後に解体調査を行う前に、コンクリート表面について目視により外観観察を行った。その結果、すべての供試体の各側面とも別に問題はなく、良好な状態であった。

(2) 解体調査結果

暴露2年後に電位測定を行った後、各供試体の各側面についてコンクリート表面を部分的にはつり、埋設の鉄筋を露出させ、目視により腐食状況調査を行い、腐食度を評価した。その結果を表-32に示す。

これより、電位測定の結果では、ほとんどのものが錆はまだ発生していない結果であったが、目視による腐食状況調査では、一番悪いものでも腐食度Cの鉄筋表面にうすい錆が発生している状況であり、腐食面積も一番大きいものでも2cm程度と腐食度としては軽微な状況であった。

表-33 各鉄筋の腐食度

供試体	側 面	かぶり	鉄筋の種類	腐食度
No 1	西	2 cm	SR24	A
No 2	東	2 cm	SR24	C
	西	5 cm	エポキシ	A
	南	5 cm	亜鉛	A
	北	2 cm	SD30	B
No 3	東	2 cm	SR24	A
	西	5 cm	エポキシ	A
	南	2 cm	SR24	A
	北	2 cm	SR24	A
No 4	東	2 cm	SR24	C
	西	8 cm	SD30	C
	南	2 cm	SD30	C
	北	2 cm	SR24	A
No 5	東	2 cm	SR24	C
	西	8 cm	SR24	A
	南	2 cm	亜鉛	A
	北	2 cm	亜鉛	A

4.2 PC供試体における試験結果

4.2.1 PC供試体の解体調査結果

暴露3カ月後、6カ月および1年後に電位測定を行った後、供試体を解体し、PC鋼材を取り出して目視による腐食状況観察を行い腐食度を評価した。図-58-(1)~60-(6)に各PC鋼材の暴露3カ月の腐食状況をスケッチしたものを、表-34に腐食度を評価した結果を示す。条件毎に腐食状況をみると、暴露期間の違いでは、3カ月後と1年後の腐食度が同じものが全体の5割、1年後の腐食度が悪くなったものが3割、逆に良くなったものが3割と暴露期間による傾向は一定ではない。また、塩化物濃度の違いによる差は余り明確になっていないのに対し、セメントの種類ごとでは、早強セメントに比べ高炉セメントの方が腐食度の良いAが多くなっている。プレストレスの種類別では、プレテンションおよびポストテンションに比べ、鋼材を緊張していないプレストレストなしが良い結果となり、ポストテンションの塩化物混入場所の違いによる差は、シース内のみ塩化物混入の方がコンクリートのみ塩化物混入より良い結果となっているがその他は明確な差は表れていない。PC鋼材の種別ではシースが他と比べ腐食度Cが多い結果となっている。しかし、全体をまとめて見てみると、一番悪いものでも腐食度C、の鉄筋表面にうすい錆が部分的に発生している状況であり、腐食度としては軽微な状況といえる。また、塩化物濃度とセメントの種類の関係やプレストレスの種類とPC鋼材の関係は余り明確な差が認められなかった。

表-34 暴露3カ月および1年後のPC鋼材の腐食観察結果

プレストレスの種類	PC用鋼材	セメントの種類																	
		早強ポルトランドセメント														高炉セメントB種			
		塩化物濃度 (Cℓ換算) kg/m ³																	
		0		150		300		600		900		0		600					
		暴露期間 (カ月)																	
		3	6	12	6	3	6	12	3	6	12	3	6	12	3	12	3	12	
プレテンション	PCより線	B	—	C	—	B	—	C	A	—	B	A	—	C	A	B	B	B	
プレストレスなし	PC鋼線	A	—	C	—	C	—	B	A	—	A	A	—	A	A	A	A	B	
	PCより線	C	—	C	—	C	—	A	B	—	A	C	—	C	B	A	B	A	
	PC鋼棒	A	—	C	—	C	—	B	B	—	A	A	—	A	B	A	B	B	
	異形PC鋼棒	A	—	B	—	B	—	B	B	—	C	B	—	B	B	A	B	A	
ポストテンション (コンクリートのみ塩化物混入)	シースの外側	A	—	C	—	C	—	C	A	—	C	B	—	C	A	A	A	C	
	シースの内側	C	—	C	—	C	—	C	A	—	C	C	—	C	A	C	A	A	
	PCより線	A	—	B	—	B	—	B	C	—	B	A	—	B	C	C	C	B	
ポストテンション (シース内のみ塩化物混入)	シースの外側	—	B	—	B	—	C	—	—	B	—	—	A	—	—	—	—	—	
	シースの内側	—	A	—	A	—	A	—	—	A	—	—	A	—	—	—	—	—	
	PCより線	—	C	—	C	—	A	—	—	C	—	—	A	—	—	—	—	—	

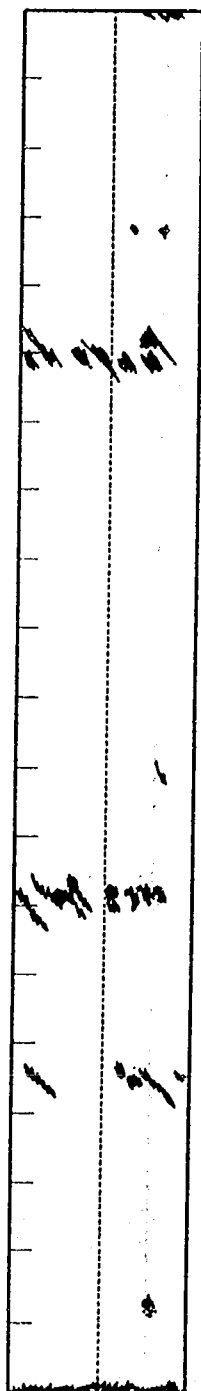
鋼材番号	1-1
鋼材種類	PCより線
セメント種類	早強
塩分量	0 g/m ³

鋼材番号	2-1
鋼材種類	PCより線
セメント種類	高炉
塩分量	0 g/m ³

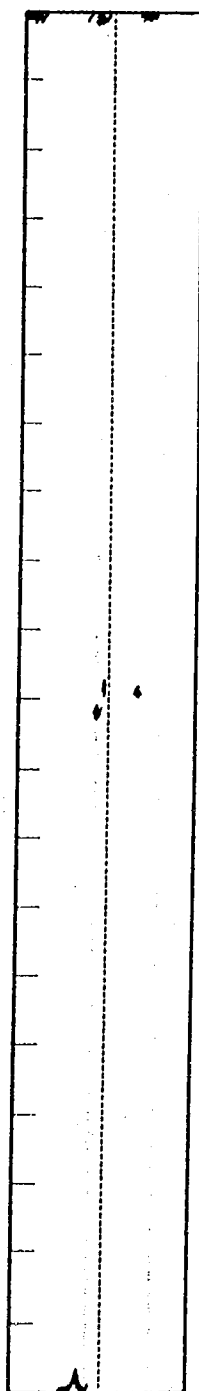
鋼材番号	4-1
鋼材種類	PCより線
セメント種類	早強
塩分量	0 g/m ³

鋼材番号	5-1
鋼材種類	PCより線
セメント種類	早強
塩分量	0 g/m ³

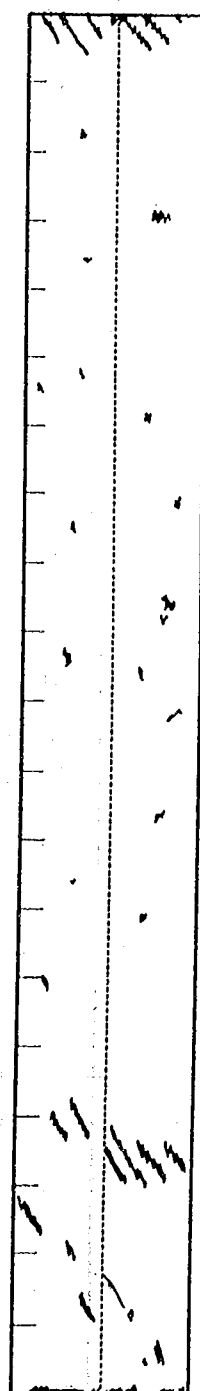
(cm) 上面 下面



上面 下面



上面 下面



上面 下面

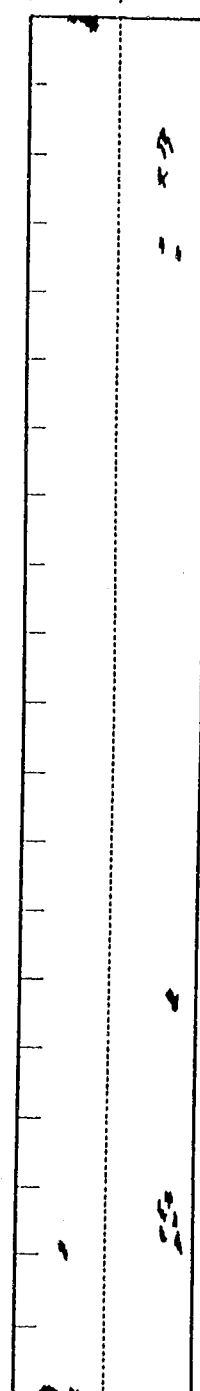


図-58-(1) プレテンションにおける各PC鋼材の腐食状況

鋼材番号	6-1
鋼材種類	PCより線
セメント種類	早強
塩分量	0 g/m ³

鋼材番号	7-1
鋼材種類	PCより線
セメント種類	高炉
塩分量	0 g/m ³

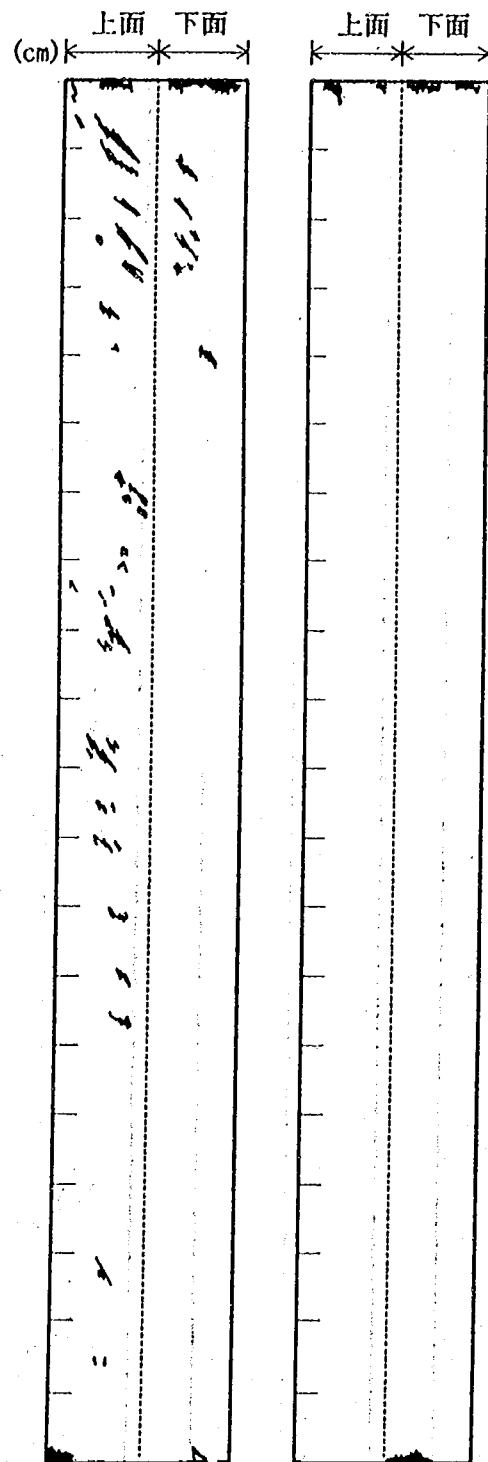


図-58-(2) プレテンションにおける各PC鋼材の腐食状況

鋼材番号	8-1
鋼材種類	シーブ
セメント種類	早強
塩分量	0 g/m ²

鋼材番号	8-1
鋼材種類	PCより線
セメント種類	早強
塩分量	0 g/m ²

鋼材番号	9-1
鋼材種類	シーブ
セメント種類	高知
塩分量	0 g/m ²

鋼材番号	9-1
鋼材種類	PCより線
セメント種類	高知
塩分量	0 g/m ²

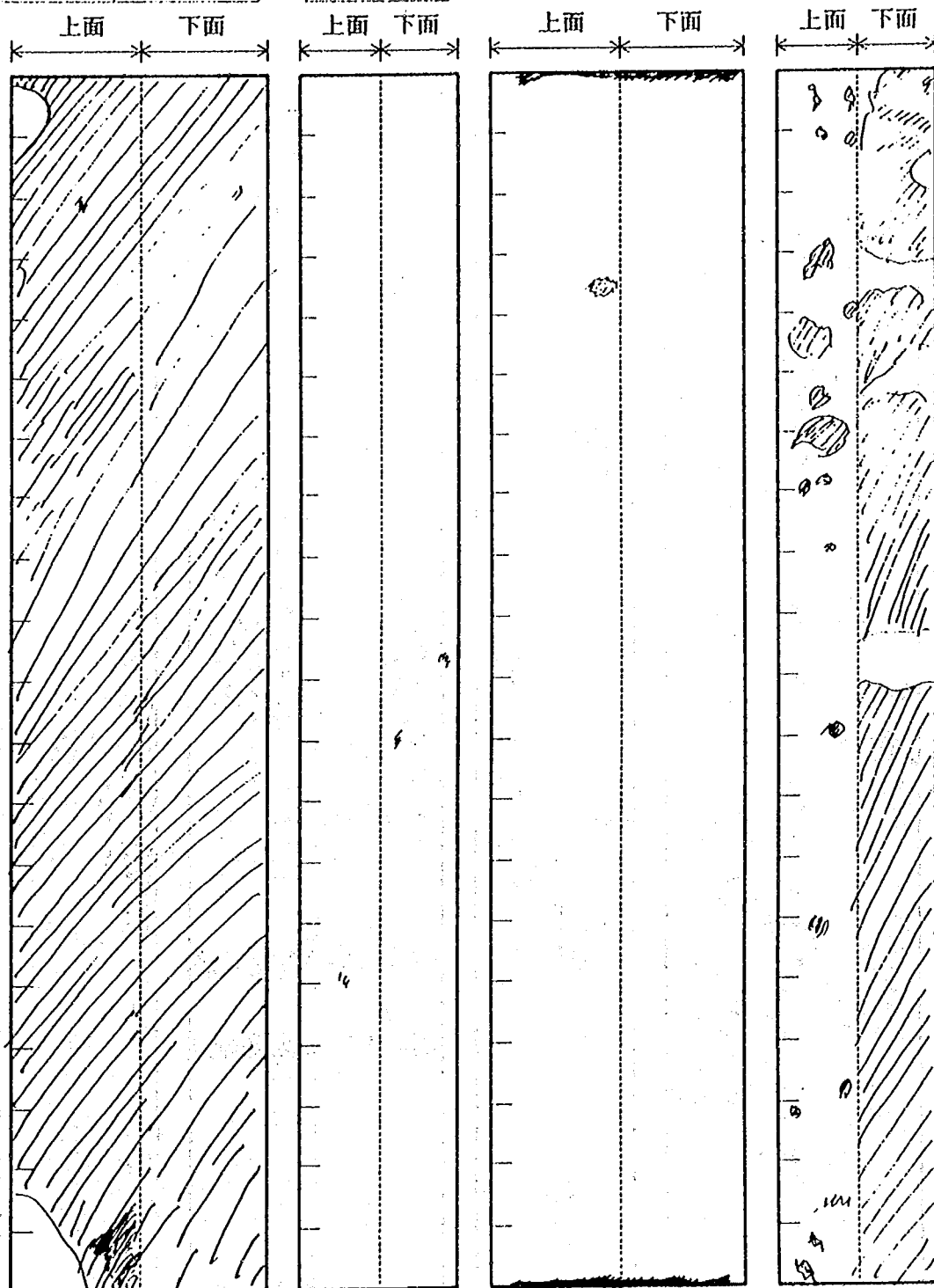


図-59-(1) ポストテンションにおける各PC鋼材の腐食状況

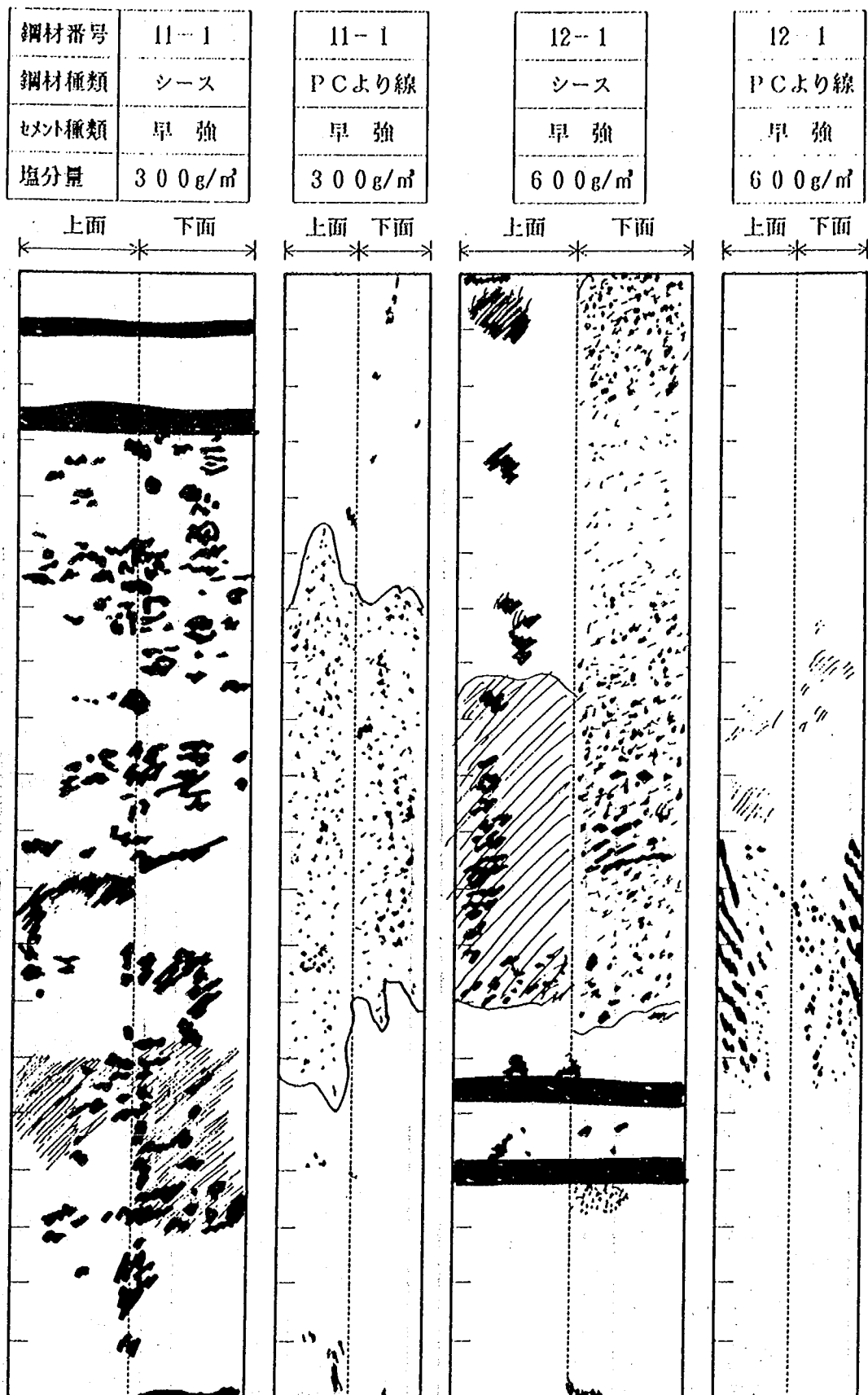
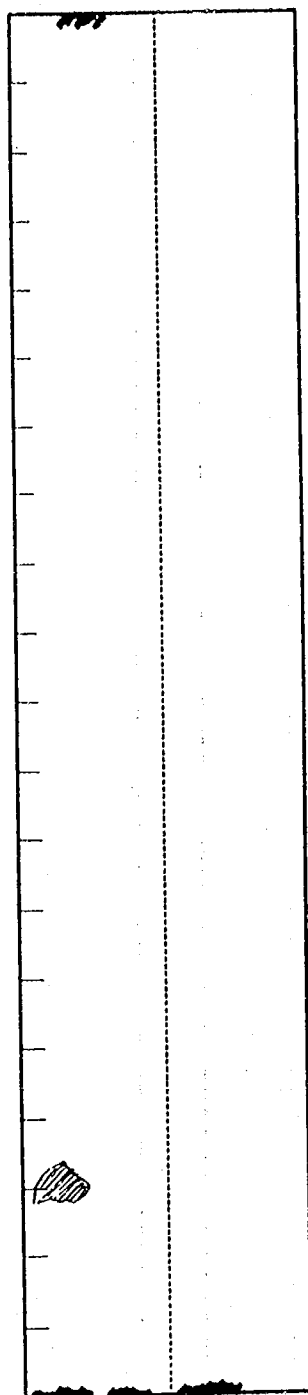


図-59-(2) ポストテンションにおける各PC鋼材の腐食状況

鋼材番号	13-1
鋼材種類	シース
セメント種類	高 炉
塩分量	600g/m ²

上面 下面



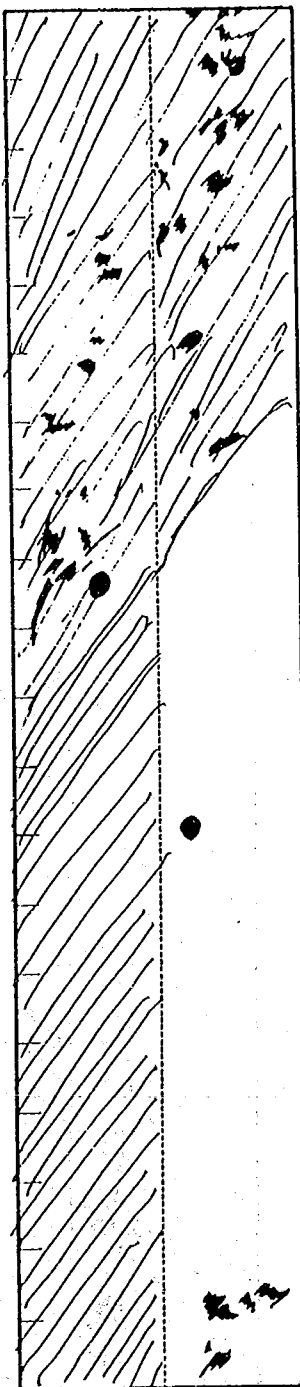
13-1
PCより線
高 炉
600g/m ²

上面 下面



14-1
シース
早 強
900g/m ²

上面 下面



14-1
PCより線
早 強
900g/m ²

上面 下面

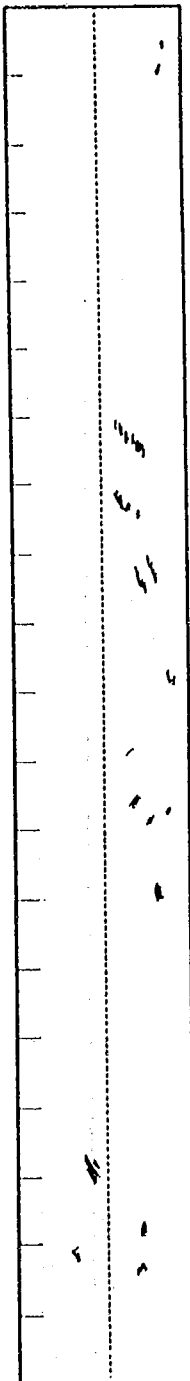


図-59-(3) ポストテンションにおける各PC鋼材の腐食状況

鋼材番号	15-1-1
鋼材種類	PC鋼線
セメント種類	早強
塩分量	0 g/m ³

15-1-2
PC鋼棒
早強
0 g/m ³

15-1-3
PCより線
早強
0 g/m ³

15-1-4
異形PC鋼棒
早強
0 g/m ³

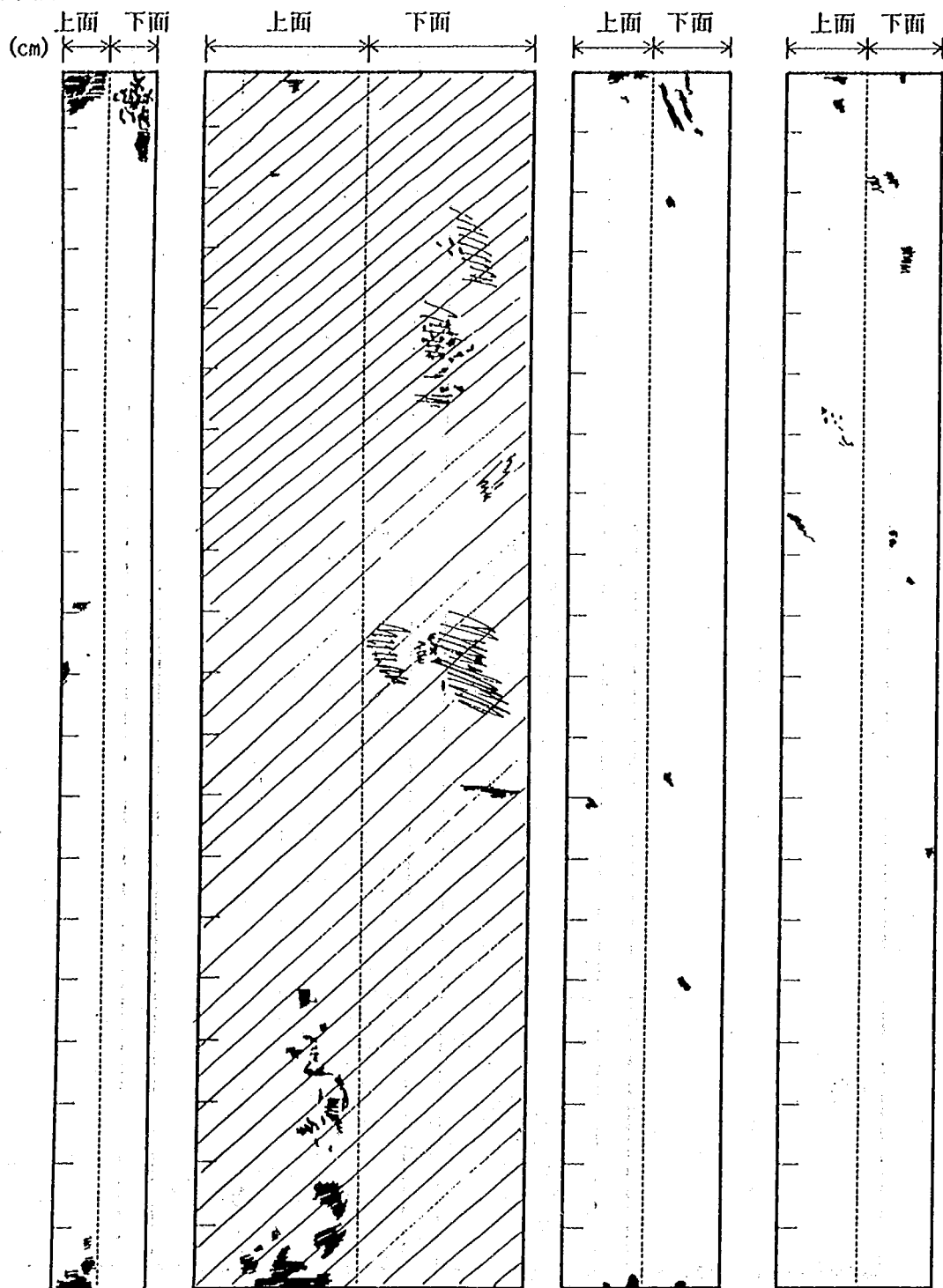


図-60-(1) プレストレスなしにおけるPC鋼材の腐食状況

鋼材番号	16-1-1
鋼材種類	PC鋼線
セメント種類	高知
塩分量	0 g/m ³

16-1-2
PC鋼棒
高知
0 g/m ³

16-1-3
PCより線
高知
0 g/m ³

16-1-4
異形PC鋼棒
高知
0 g/m ³

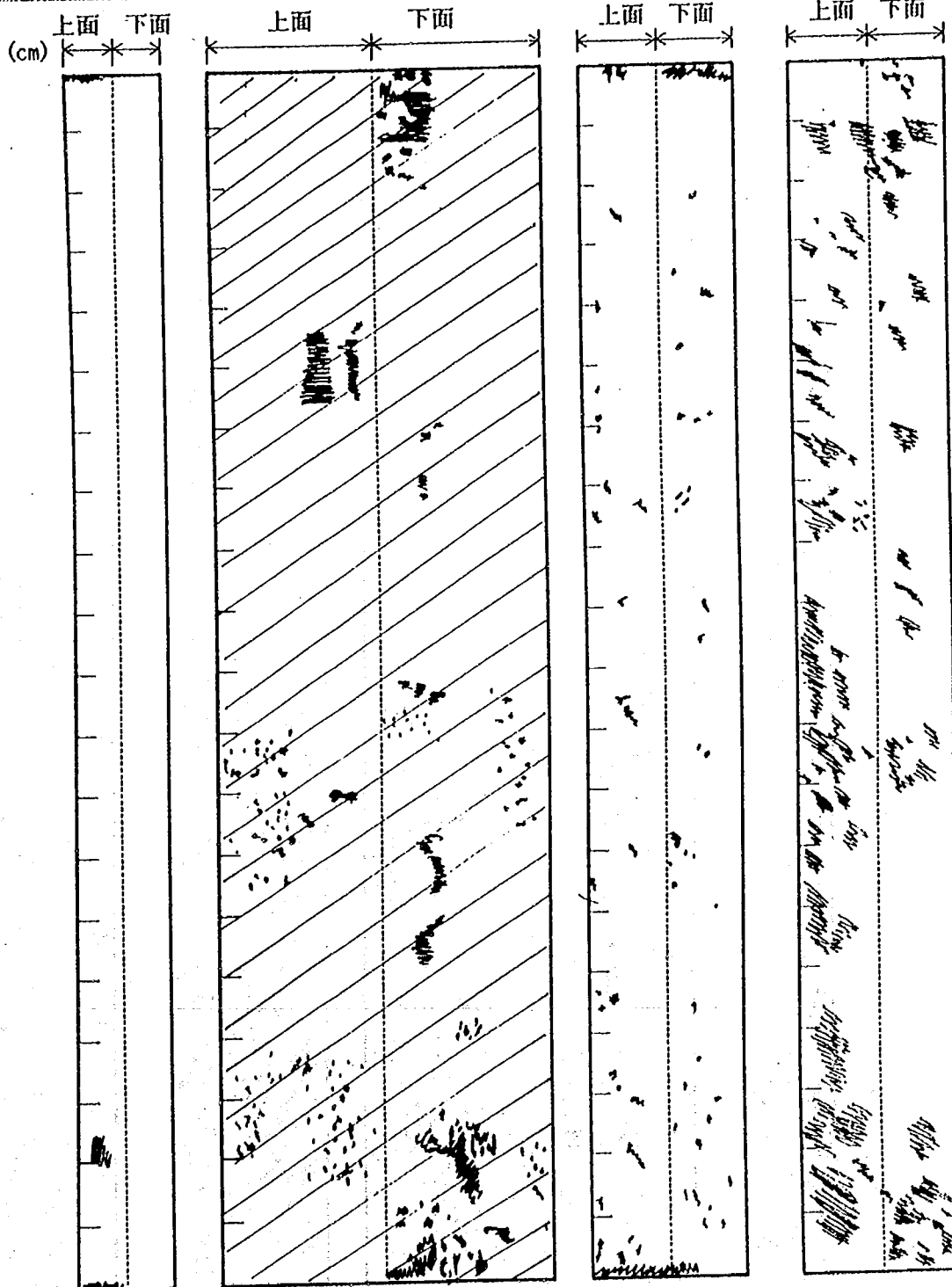


図-60-(2) プレストレスなしにおけるPC鋼材の腐食状況

鋼材番号	18-1-1
鋼材種類	P C鋼線
セメント種類	卓 強
塩分量	300 g/m ²

18-1-2
P C鋼棒
卓 強
300 g/m ²

18-1-3
P Cより線
卓 強
300 g/m ²

18-1-4
異形P C鋼棒
卓 強
300 g/m ²

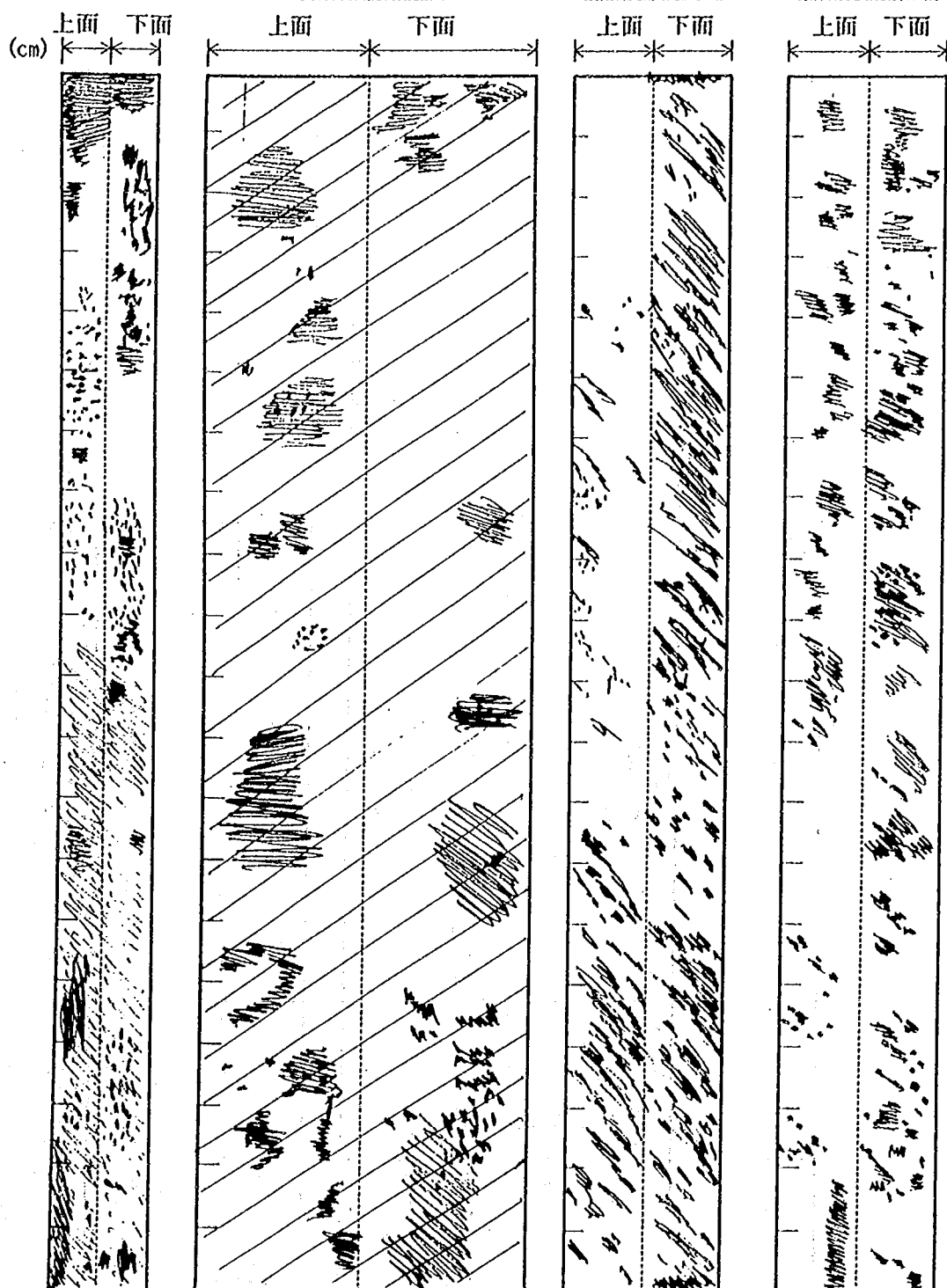


図-60-(3) プレストレスなしにおけるP C鋼材の腐食状況

鋼材番号	19-1-1
鋼材種類	PC鋼線
セメント種類	早強
塩分量	600g/m ²

19-1-2
PC鋼棒
早強
600g/m ²

19-1-3
PCより線
早強
600g/m ²

19-1-4
異形PC鋼棒
早強
600g/m ²

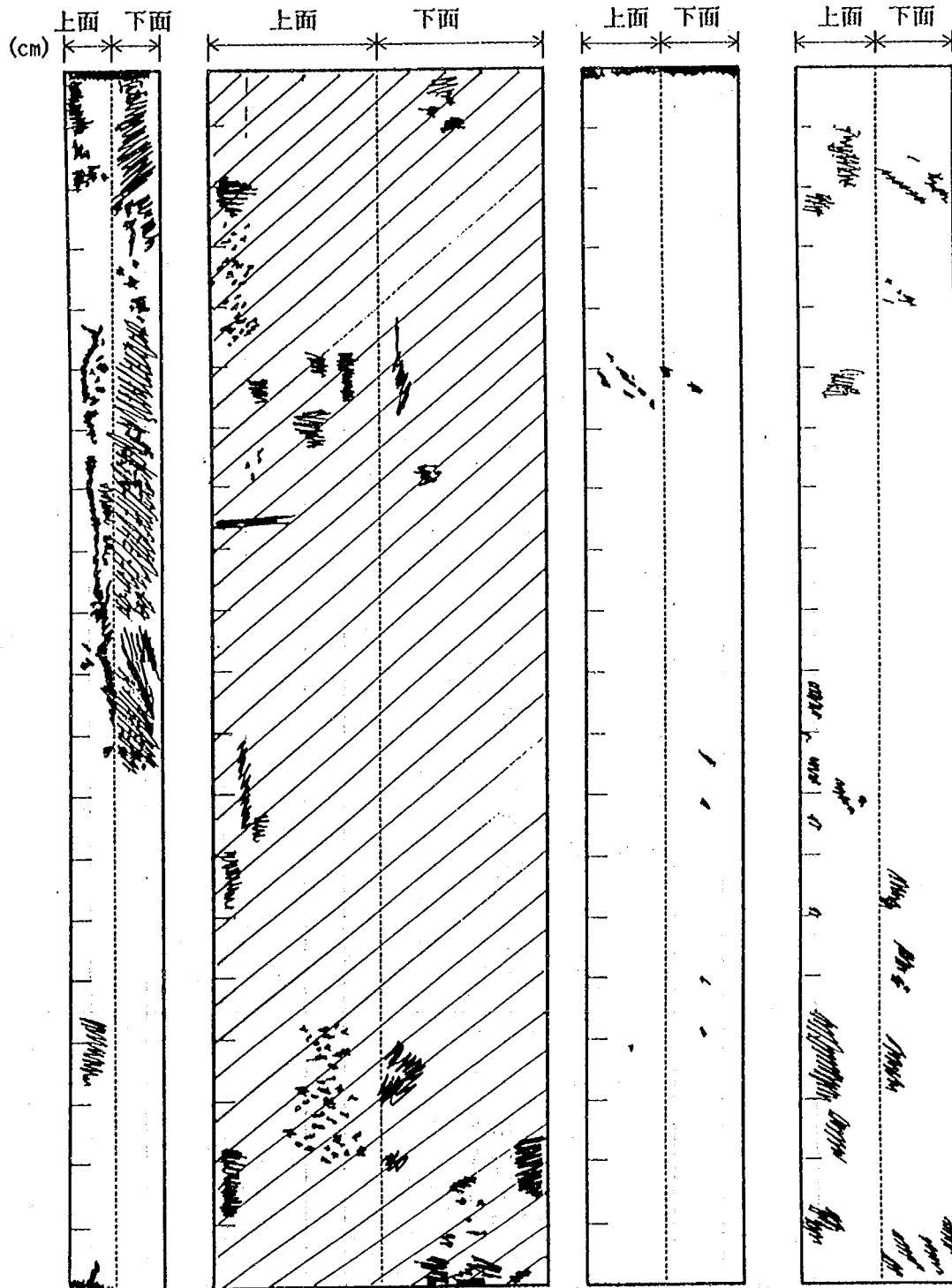


図-60-(4) プレストレスなしにおけるPC鋼材の腐食状況

鋼材番号	20-1-1
鋼材種類	PC鋼線
セメント種類	高 炉
塩分量	600g/m ²

20-1-2
PC鋼棒
高 炉
600g/m ²

20-1-3
PCより線
高 炉
600g/m ²

20-1-4
異形PC鋼棒
高 炉
600g/m ²

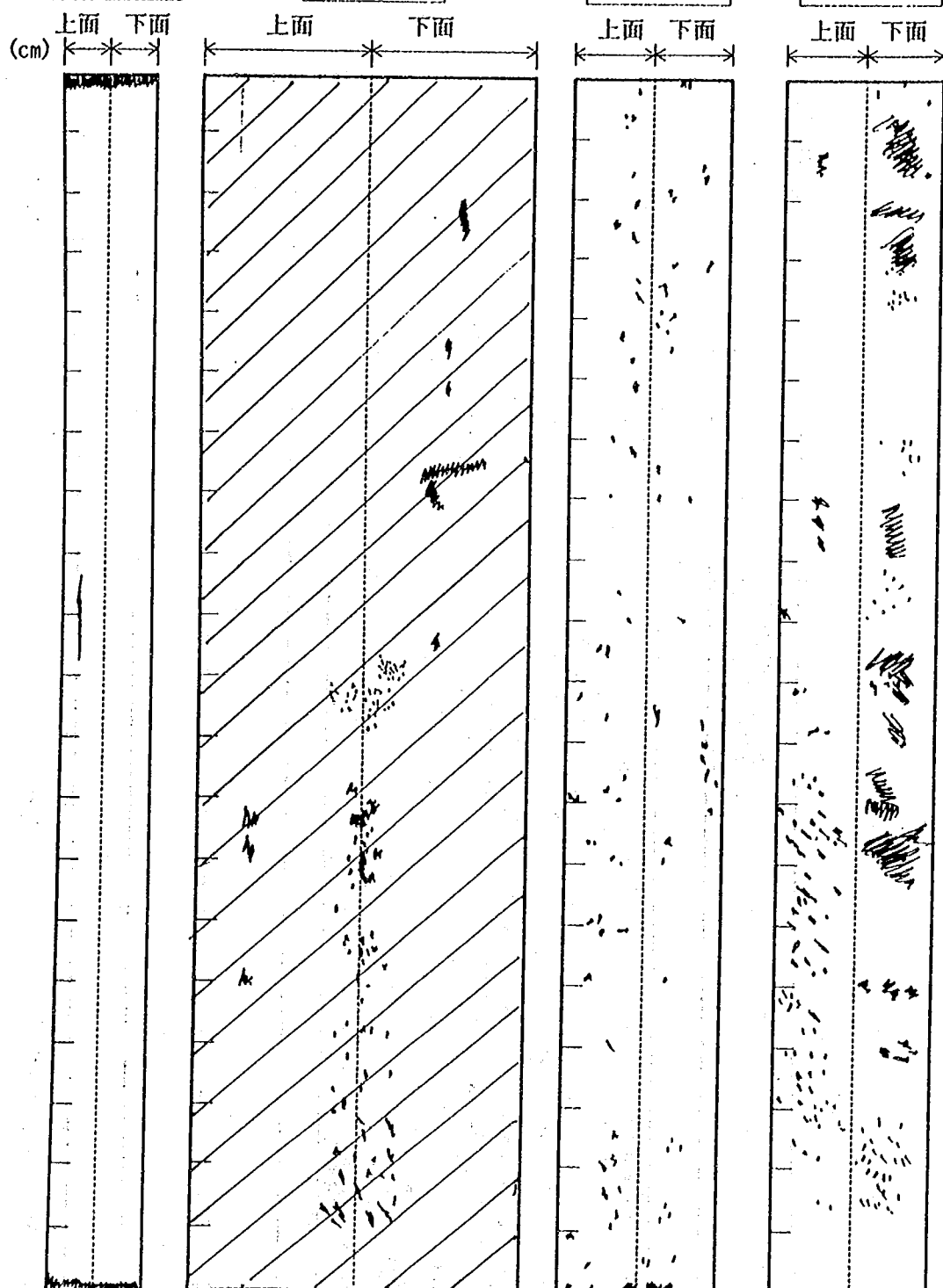
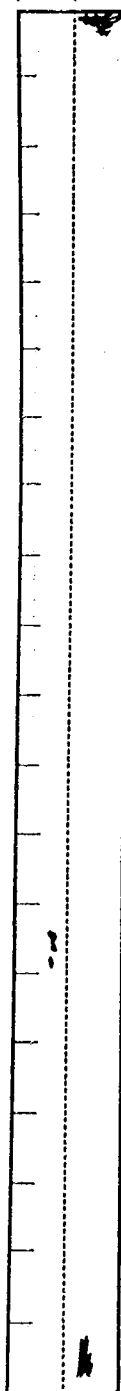


図-60-(5) プレストレスなしにおけるPC鋼材の腐食状況

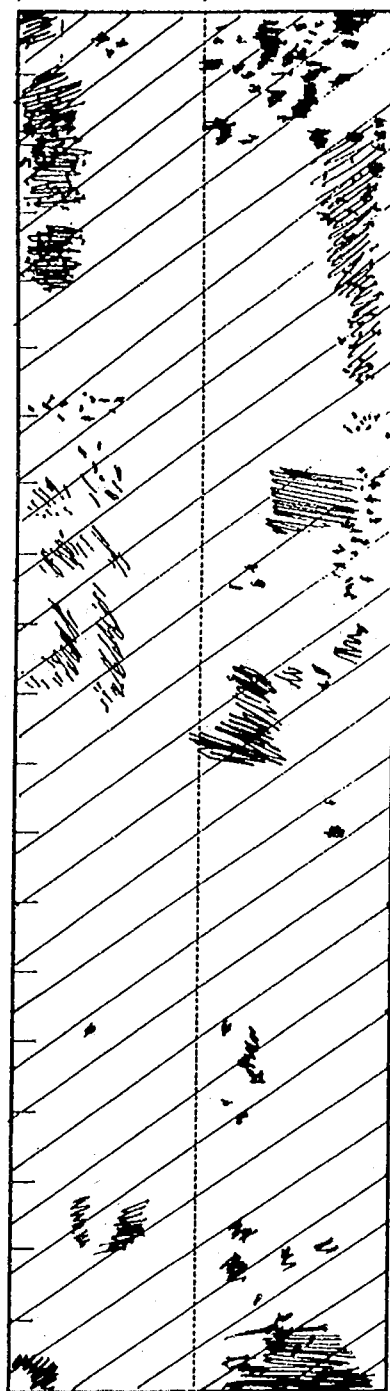
鋼材番号	21-1-1
鋼材種類	PC鋼線
セメント種類	早強
塩分量	900g/m ²

(cm) 上面 下面



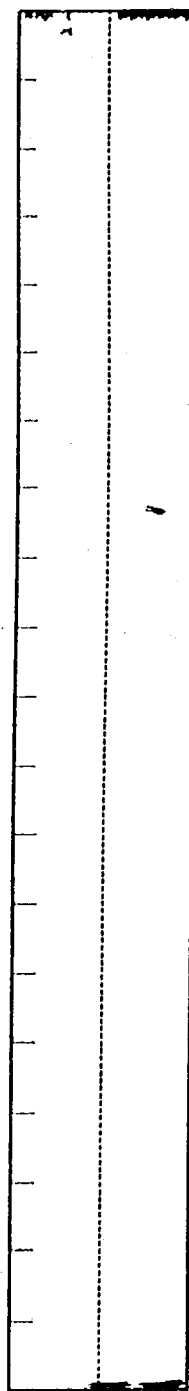
鋼材番号	21-1-2
鋼材種類	PC鋼棒
セメント種類	早強
塩分量	900g/m ²

上面 下面



鋼材番号	21-1-3
鋼材種類	PCより線
セメント種類	早強
塩分量	900g/m ²

上面 下面



鋼材番号	21-1-4
鋼材種類	異形PC鋼棒
セメント種類	早強
塩分量	900g/m ²

上面 下面

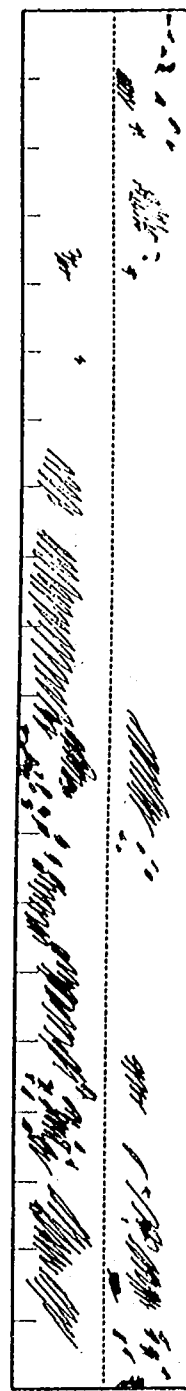


図-60-(6) プレストレスなしにおけるPC鋼材の腐食状況

4.2.2 セメントグラウトの塩分測定

P C 供試体番号 8 ～ 14 はシース内のセメントグラウトに、塩化物を混入していないが、P C 鋼材の腐食状況観察結果では、シースの内側や P C より線が腐食度 C と軽微な状況ではあるが、鉄筋表面に薄い錆が認められたので、セメントグラウトの塩分量を電位差適法により測定し、その値を確認した。この結果、表-35に示すように平均で 15.6 g/m^3 とほとんど入っていない結果となった。

表-34 セメントグラウトの塩分量

番号	供試体番号	塩化物量 (g/m^3)	セメントの種類	塩分量 (g/m^3)
1	8-1①	0	普通セメント	13.0
2	8-1②	0	"	13.8
3	9-1	0	高炉セメント	12.5
4	11-1	300	普通セメント	27.0
5	12-1①	600	"	7.4
6	12-1②	600	"	11.0
7	12-1③	600	"	28.5
8	13-1	900	高炉セメント	14.9
9	14-1①	900	普通セメント	9.9
10	14-1②	900	"	13.6
平均		—————		15.6

4.3 PC供試体の電位測定結果

暴露3カ月と1年後に電位測定を行った。プレストレスの種類毎に、暴露3カ月と1年後の電位測定の結果を、プレテンション方式のものは図-61と図-62に、ポストテンション方式のものは図-63と図-64に、プレストレスなしのものは図-65と図-66に示す。

これより、プレテンション方式のものは、3カ月および1年後とも電位は暴露期間、セメントの種類および塩分濃度の違いによる差はほとんどなく、 $-50 \sim -140$ mV の値となっており錆はまだ発生していないと思われる。

ポストテンション方式では、図-63の3カ月後の電位は、高炉セメントの塩化物量0 gが+125と+の値となっているが、すべてのものが -160 mV 以上の値となっている。また、図-64の1年後の電位は、すべての電位が $-40 \sim -120$ mV の値となっており、錆はまだ発生していない結果となっている。なお、ポストテンションの電位は、シースの電位を測定したものであり、シースおよびグラウト材の中で緊張されているPCより線の電位を測定したのではない。

図-65および図-66のプレストレスなしの結果から、4種類のPC鋼材を緊張力なしで配筋しているが、3カ月および1年後の電位ともPC鋼材の種類、セメントの種類および塩分濃度の違いによる差は、明確になっておらずなかに電位が -200 mV 以下の不確定の値を示しているものもあるが、ほとんどのものが -200 mV ~ 30 mV の範囲に入っており、錆が発生していない値となっている。

セメントの種類	早 強 セ メ ン ト				高炉セメント	
塩分濃度 g/m ³	0	300	600	900	0	600

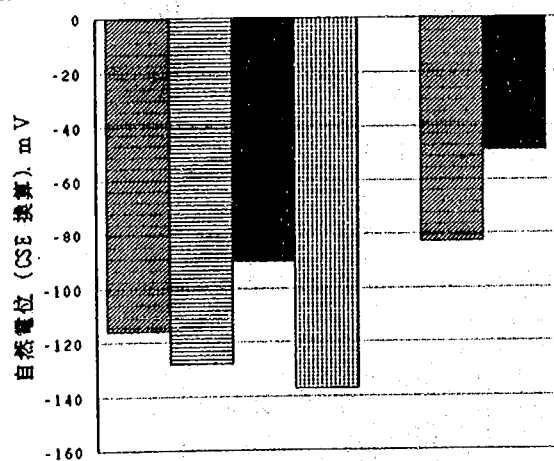


図-61 プレテンション方式における
3カ月後の電位測定結果

セメントの種類	早 強 セ メ ン ト				高炉セメント	
塩分濃度 g/m ³	0	300	600	900	0	600

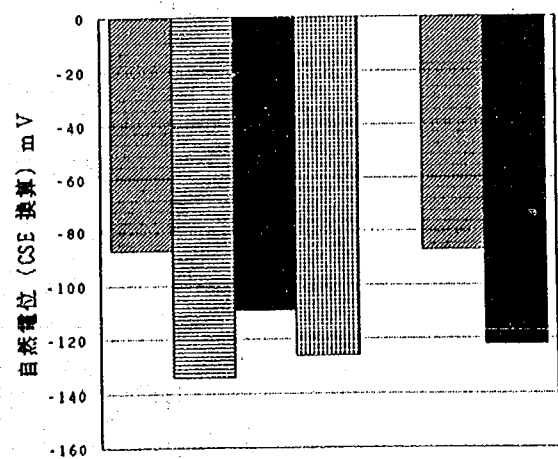


図-62 プレテンション方式における
1年後の電位測定結果

セメントの種類	早 強 セ メ ン ト				高炉セメント	
塩分濃度 g/m ²	0	300	600	900	0	600

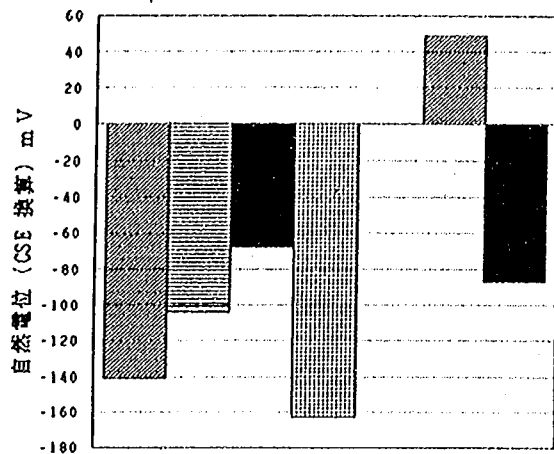


図-63 ポステンション方式における
3 カ月後の電位測定結果

セメントの種類	早 強 セ メ ン ト				高炉セメント	
塩分濃度 g/m ²	0	300	600	900	0	600

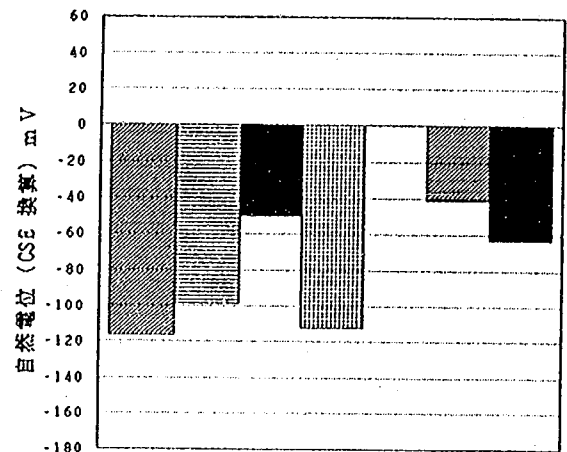


図-64 ポステンション方式における
1 年後の電位測定結果

PC鋼材の種類	PC鋼線		PCより線		PC鋼棒		異形PC鋼棒	
セメントの種類	普通	高炉	普通	高炉	普通	高炉	普通	高炉

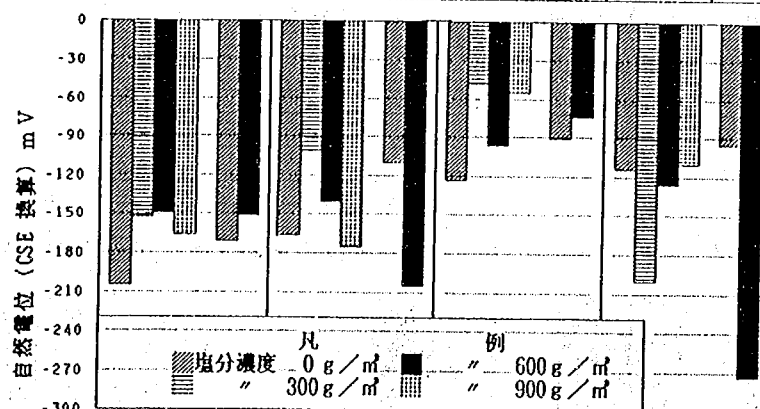


図-65 プレストレストなしにおける3年後の電位測定結果

PC鋼材の種類	PC鋼線		PCより線		PC鋼棒		異形PC鋼棒	
セメントの種類	普通	高炉	普通	高炉	普通	高炉	普通	高炉

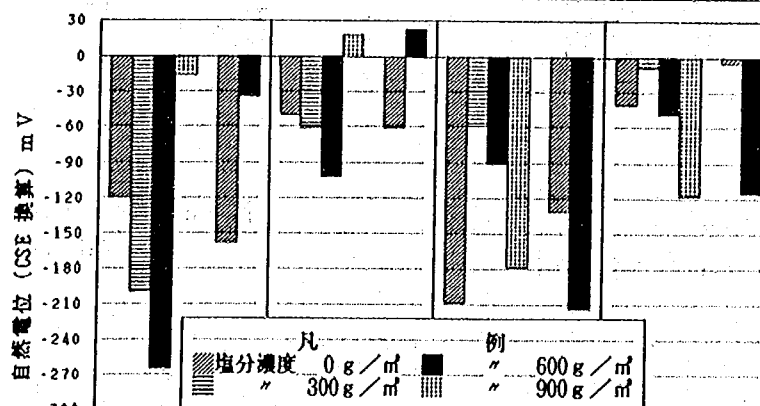


図-66 プレストレストなしにおける1年後の電位測定結果

5. まとめ

R CおよびP Cコンクリートの暴露試験調査結果をまとめてみると次の通りである。

(1) R C供試体における電位測定結果

暴露2年後の電位測定結果から、全般的に電位は -200 mV 以上を示しており、錆はまだ発生していないと思われる。また、塩化物濃度、鉄筋の種類およびかぶりの違いによる電位の差は、ほとんど認められなかった。

(2) R C供試体の解体調査

暴露2年後に各供試体の各側面についてコンクリート表面を一部分はつり、中の鉄筋を露出させ、目視により腐食状況調査を行った結果では、一番悪いものでも腐食度Cの鉄筋表面にうすい錆が発生している状況であり、腐食面積も一番大きいものでも2 cm程度と腐食度としては軽微な状況であった。

(3) P C供試体における電位測定結果

暴露1年後の電位測定結果から、全般的に電位は -200 mV 以上を示しており、錆はまだ発生していないと思われる。また、塩化物濃度、プレストレスの種類およびP C鋼材の違いによる電位の差は、ほとんど認められなかった。

(4) P C供試体の解体調査

暴露1年後に供試体を解体し、P C鋼材を取り出して目視による腐食状況観察を行った結果、一番悪いものでも腐食度Cと鉄筋表面にうすい錆が部分的に発生している状況であり、腐食度としては軽微な状況といえる。また、塩化物濃度およびセメントの種類の関係やプレストレスの種類とP C鋼材の関係は余り明確な差が認められなかった。

(5) 塩化物総量規制値と腐食の関係

コンクリート中の塩化物総量規制値は、R C部材およびボステンション方式のP C部材は 0.6 Kg/m^3 (C ϕ 換算)、プレテンション方式のP C部材とシース内のグラウト材は 0.3 Kg/m^3 (C ϕ 換算)としているが、今回の暴露試験から、コンクリート中の鋼材の腐食は、塩化物総量規制値の範囲内ではR C供試体およびP C供試体とも、特に問題はなかった。

6. 今後の課題

今回、短期間の暴露試験結果からではあるが、塩化物総量規制値の範囲内では、R CおよびP Cともコンクリート中の鋼材の腐食は問題にならないことを明らかにした。今後は、これらの供試体について暴露試験を継続して行い、長期に暴露された場合の塩化物濃度と鋼材の腐食の関係を明らかにして行く必要がある。

塩化物総量規制値に関する研究

—鉄筋コンクリートの暴露試験調査—

ISSN 0386-5878

土研資料第2578号

昭和63年3月(1988)

片脇清, 坂本浩行

寺田剛

要 旨

近年、コンクリート橋等の土木構造物が塩化物によって損傷を受けるいわゆる塩害が大きな社会問題になっている。このため、建設省においては、総合技術開発プロジェクト、「コンクリートの耐久性向上技術の開発」を昭和60年から開始するとともに、建設省通達によって昭和62年4月からコンクリート中の塩化物に対して、総量規制を行っている。本研究は、上記総プロの一環であり、塩化物総量規制値を検証するため、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート供試体を作成し暴露試験を行い、コンクリート中の塩化物と鋼材の腐食との関係について検討を行ったものである。

キーワード：暴露試験, 塩化物総量規制, 塩化物, 鉄筋コンクリート, プレストレストコンクリート, 鋼材の腐食

郵便はがき

四十円切手
をはいて
下さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

化学研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

○

土木研究所資料第 2578 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印