琉球大学学術リポジトリ

コンクリート中の鉄筋の発錆実験 その3―1年半および2ヶ年時点 その1―

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学理工学部 公開日: 2013-09-19 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 具志, 幸昌, 和仁屋, 晴讙, 伊良波, 繁雄, Gushi, Yukimasa, Waniya, Haruyoshi / 和仁屋, 晴讙, Iraha, Shigeo メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/27594

コンクリート中の鉄筋の発錆実験　その3
—1年半および2ヶ年時点　その1—

具志幸昌* 和仁屋晴謹* 伊良波繁雄*

Experimental Studies on Corrosion of Steel Bars in Concrete, III
—*At One and Half Year and Two Years after Embedding* —

Yukimasa GUSHI, Haruyoshi WANIYA, Shigeo IRAHA

Synopsis

A series of experiments on corrosion of steel bars embedded in concrete has been done at the laboratory of concrete engineering of University of the Ryukyus. This is the third report of the above experiments and describes the corrosson behavior of steel in concrete at the times of 1.5 year and 2 years after embedding. This series of experiments consists of two parts. One is a study on steel corrosion in the concrete containning none to highly concentrated salt and containning it before and after hardened. The other is a case of study of the influences of the kinds and dosages of corrosion inhibitors and the effect of heating. This third report describes only the former, that is called "Experiment I".

Experiment I is divided into two which consist of 16 experiments respectively. The first part of Experiment I is the case of salt dosed before hardening and contained none to high concentration. The second part is the case of slowly penetrating of salt into concrete after hardening.

The experiments were planned after so called *"Eperimental Design"*

The following articles are clarified at the times of 1.5 year and two years after embedded.

(1) The first part of experiment I

a) The influence of salt contained on the corrosion of steel is still overwhelmingly strong, but it seems the effect is slightly weaken.

b) A new tendency emerged that the influence of cover depth of concrete becomes distinctively stronger, because of cracking along steel bars in the test prisms which had thin concrete covers.

受付：1978年10月30日

*琉球大学理工学部土木工学科

c) There has been no corrosion detected over the steel surfaces in the concrete which has the water cement ratio of 40% and contained both 0.1% salt and twice the standard dosage of inhibitor.

d) At the time of one year, maximum corroded area of steel surfaces was happened in the test prism of concrete contained 0.5% salt concentration, but the steel bars in the concrete contained 1% salt concentration have become mostly corroded at the times of 1.5 year and 2 years.

e) The sudden increases of corroded areas of steel bars are found in the test prisms of thiner concrete covers and lareger water cement ratios.

f) The highly inhibiting ability of the concrete of the water cement ratio of 40% has been demonstrated, but the considerable quantities of corrosion of steel bars can not be avoided in that concrete when the salt concentration becomes high.

(2) The second part of Experiment I

a) The effect of salt on corrosion of steel bars has become stronger in the second part.

b) The "sprayed" and "half−immersed" test prisms have increased the corroded areas of steel bars as the progress of time, but the "completely immersed" and "natural" test prisms appeared no sign of increasing of corrosion areas.

c) The concrete of water cement ratio of 40% has strong corrosion inhibiting ability. At the time of two years passed, the steel bars in that concrete have not corroded yet in the second part of experiment I.

d) The corrosion inhibiting agent used in this study has good inhibiting ability, but can not be stopped to corrode when the salt concnete becomes higher as the time has passed.

1．まえがき

沖縄県下の鉄筋コンクリート構造物は土木構造物・建築物を問わず，コンクリート中の鉄筋の腐食により，ひどい損傷を蒙っている。その損傷割合は梁・柱等の主要構造部分に限ってみても，橋梁については1975年現在で61%以上に達しており[1)，2)]，学校々舎については，27%に昇っている[2)]。後者については，スラブの軽微な損傷をも含めると，実に77.5%に達する[2)]。これは沖縄県下の主要地域または主要路線についての構造物の全数調査の結果であり，沖縄県下の鉄筋コンクリート構造物の鉄筋の腐食による損傷の実態を確実に反映しているものである。

筆者等はこう云う事態を深刻にうけとめており，その対策の樹立は緊急の必要事と考えている。1973年から1975年にかけて，実態調査に主眼をおき，沖縄県下の鉄筋コンクリート構造物の損傷の実態の把握につとめた。その結果，損傷の傾向，割合，ひろがり，原因の究明，地域的特性等をほぼ明らかにすることができた*。鉄筋の腐食の原因は特殊な古い建築物を除き，コンク

*琉球大学理工学部紀要工学編第7号（1974年3月），第8号，第12号，第13号，第14号（1977年9月）までにくわしい。

リートに含まれる塩分であると結論を下している[2]。1976年からは，それまでの調査をもとにして，種々の条件を考慮した，鉄筋を埋込んだコンクリート供試体を多数作り，コンクリート中の鉄筋の腐食試験を開始した。

コンクリート中の鉄筋の腐食試験は耐久性試験なので，最終結論を出すには，かなりの長年月を要する。今回の報告は，第3回目の中間報告である。主として，1.5年目と2年目の発錆量の測定報告とそれにもとづく考察を述べてある。

本実験は実験計画法にもとづいて計画されており，実験Ⅰと実験Ⅱとからなる。実験ⅠはL$_{32}$ 直交表を使った32実験からなり，塩分をあらかじめ混入しておいた前半部と，後から塩分がコンクリート中に滲透する様に工夫した後半部より成る。実験ⅡはL$_9$ 表にもとづく9実験から成り，加熱効果や，市販防錆剤の効果の差等の測定を目的としている。

今迄に供試体製作後4ヶ月と6ヶ月目の結果をまとめた第1回目の報告[3]と9ヶ月と1ヶ年目の結果をまとめた第2回目の中間報告[4]とを行っている。いずれの場合も，実験ⅠとⅡとをあわせて考察を行っているが，今回は時間の都合上，実験Ⅰの部分についてのみ報告する。実験Ⅱの1年半，2年目の実験結果とその考察については次回にまわすことにする。

2．使用材料・供試体製作・実験計画

これらについては既報[3]，[4]にくわしいので，簡単に述べる。

セメントはM社製の普通ポルトランドセメントで，セメント専用船で沖縄本島まで運ばれ，現地包装したものを，大学周辺の建材店から購入したものである。供試体の製作は2ヶ月以上の期間を要したので，使用の都度，購入した。購入の都度，比重と強度試験を行ったが，比重は大体において3.16，4週圧縮強さは平均 346kg／cm^2（311～378kg／cm^2）である。この強度は従来琉球大学コンクリート教室で得ていた値にくらべるとかなり低い値である。このことを反映して，今回の実験のコンクリートの4週強度も，筆者等の以前の報告値[5]にくらべて，低目の値となっている（表－1参照）。

粗骨材は沖縄本島北部の本部半島産の硬質石灰岩砕石で，比重2.71，吸水率0.24%の良質なもので，最大寸法は20㎜である。

表－1　実験Ⅰコンクリートの28日圧縮強度(kg/cm^2)

実験番号	圧縮強度	実験番号	圧縮強度
1	376	17	234
2	299	18	369
3	277	19	401
4	390	20	331
5	391	21	328
6	311	22	372
7	303	23	407
8	339	24	267
9	206	25	142
10	143	26	225
11	173	27	221
12	200	28	146
13	215	29	190
14	156	30	173
15	139	31	207
16	197	32	153

いずれも3個の供試体の平均値

細骨材は那覇西方洋上沖合のチービシ島産出の海砂で，比重2.49，吸水率6.90%，粗粒率2.38のものであり，かなり劣悪なものである。屋外にしばらく放置し，降雨にさらしておいたので，含塩量はかなり減少しており，最小 0.008%，最高 0.022%（実験Ⅰ），平均で 0.015%となっており，ほぼ許容値[6]内にある。使用に当っては，その当日使用の分をスコップ及びミキサーを使って空練りし，塩分の平均化につとめた。

混練水は水道水であり，塩分は0.04%位である。防錆剤は市販されている3社の製品を使ったが，本報告で標準量とあるのはメーカーの指定してある量であり，3ℓ／m^{3}および 2.4ℓ／m^{3}であった。いずれも混練水とまぜておき，その後にミキサーに投じた。ＡＥ剤・減水剤等は使っていない。

鉄筋は黒皮付きの丸鋼を使い，20cmに切断し，黒皮をワイヤーブラシ及び紙ヤスリを使って完全に落し，みがいたものを使った。使用に当っては，重量を確認し記入した。直径は19㎜と16㎜のもので，殆ど前者である。引張強さは夫々，41.7kg／㎟，44.6kg／㎟である。この様に表面を荒してある鉄筋は錆び易いと考え

られるが，無塩状態のコンクリート中では，2年後に至るも，光沢を失わず，全然錆びてない。

コンクリートは水セメント比に拘わらず，スランプは10cm程度とした。防錆剤混入によるスランプの変動はなかったと報告できる。混練は全材料を投入後3分間行なった。ブリージング量は測定しなかったが，非常に多かった。この影響をうけて，鉄筋の発錆は下面に圧倒的に多かった。発錆供試体製作と同時に圧縮試験用供試体も3個づつ作り，4週試験を行った（表－1）。なお，使用コンクリートの配合は表－2の通りである。

供試体は20×12（高さ）×30cmの直方体で，鉄筋を3本水平に並べて，所定のかぶりを保つ様にしてコンクリートを打込んだ，型枠は木製で，組立ててボルト締めできる様にしてある。コンクリートは2層にわけて打ち込み，充分に突き固めた。脱型のさい，しるしをつけて，上下がわかる様工夫してある。自然暴露および，ふりかけ供試体は打ち込み時の上側を上にして放置した。

実験は実験ⅠとⅡとに大別され，両方共，実験計画法によって計画されている。実験ⅠはL32（2^31）表にもとづく32実験からなる。1実験番号につき10～15個の供試体を製作してある。

実験Ⅰは当初3因子4水準と1因子8水準とを割付けたが，解析に当っては，前半・後半にわけて，夫々16実験から成るL16（2^15）表にもとづく実験として解析した。勿論，32実験から成る実験として，解析も可能である。いずれにしろ，因子・水準数が多いので，一部実施法とならざるを得ない。前半・後半共，4因子・4水準からなることになるが，その因子および水準については表－3を参照してほしい。因子の中で水セメント比C・防錆剤（添加）量D・かぶり厚さEについては，前半・後半に共通である。前半部の因子のうち，塩分量Aは，配合時のコンクリート総重量に対する割合であり，筆者等が先に行った沖縄県下の鉄筋コンクリート構造物の塩害調査の実態にもとづいて，各水準の塩分量を定めてある。水準1の場合，名目上は零であるが，使用した海砂に含まれる塩分量[3]は，当然含まれている。他の水準でも同じである。後半部の実験で，「ふりかけB5」は琉球大学土木工学科骨材置場に隣接して暴露場をもうけ，当初は1.5ℓ／個の割合で3.0%の塩水を毎日欠かさずにほぼ一定時刻に

表－2　実験Ⅰコンクリートの配合表

実験番号	粗骨材の最大寸法(mm)	空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量 (kg/m³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
1，4，5，8，18，19，22，23	20	1.5	40	34.0	195	488	538	1135
2，3，6，7，17，20，21，24	20	1.7	50	36.9	195	390	610	1135
9，12，13，16，26，27，30，31	20	2.0	60	38.6	195	325	655	1135
10，11，14，15，25，28，29，32	20	2.2	70	39.7	195	279	687	1135

表－3　各因子の水準表（実験Ⅰ）

因子＼水準	1	2	3	4	註
塩分量	0%	0.1%	0.5%	1.0%	前半部のみ
水セメント比	40%	50%	60%	70%	前・後半部に共通
防錆剤（添加量）	零	1/2（標準量）	標準量	2倍標準量	
かぶり厚	1cm	2cm	3cm	5cm	
環境因＼水準	5	6	7	8	後半部のみ
	ふりかけ	半浸	完浸	塩分 0.5%	

如雨露を使って，ふりかけたものである。半年後からは日曜・休日は除き，1.2ℓ／個の割合に減少して毎日ふりかけてある。「半浸B_6」供試体は屋外に放置したポリエチレン製のたらいに供試体を立て，半分の高さ迄，3％の塩水につけたものである。水を時々補給し，3ヶ月に1遍位の割合で塩水をとりかえてある。「完浸B_7」供試体は大きなポリバケツ容器に3％の塩水を満たし，供試体を立てて2層に重ね，完全に水没するようにしてある。平常時はふたをしておいた。前半部の供試体はすべて琉球大学土木工学科ビルの屋上に自然放置した。

なお，各供試体は製作後，実験室内に4週間放置し，その後，夫々の環境条件に応じて配置を行ってある。最初の発錆量測定はその後3ヶ月経ってから行ってあるので，名目上3ヶ月目としてあるが，実際は製作後4ヶ月を経過している。その他の錆量測定時期はすべて，供試体製作時点から測った日数である。

3ヶ月（実際は4ヶ月），6ヶ月目に3個の同一供試体から1本づつ計3個の鉄筋を取出して，錆面積を測定し，9ヶ月目はそれ迄の供試体とは別の3個の供試体から鉄筋を1本づつ取り出した。1ヶ年目は，今迄の6個の供試体から夫々1本づつ取り出し，その他新しい3個の供試体から1本づつ鉄筋を取り出し，合計9本の鉄筋について錆面積を測定した。1年半目は，9ヶ月，1年目に鉄筋を取り出した供試体から最後の鉄筋を1本づつ合計3本，2年目は，1年目の供試体2個から1本づつ，全く新しい供試体1個から1本を取り出して合計3本の鉄筋について，錆面積を測定した。

供試体から鉄筋の取り出し方はコンクリートの引張試験の要領に準じた。つまり割裂予定位置（鉄筋位置）の上，下面に鉄筋を当て，圧縮力を加えた。くわしくは既報[3]を参照してほしい。切り取った部分のコンクリートは適切に定めた部分を切断し，pH測定用および塩分測定用の試料を作った。またフェノールフタレイン1％アルコール液を使って中性化深さの測定も行ってある。鉄筋が残っている供試体の部分は，その供試体と同じ水セメント比のモルタルで，割裂部分を補修し，元の設置場所に戻してある。

2年現在中性化は殆ど進行しておらず，塩分の測定は一部分しか行っていない。これらについては別の機会に発表する予定である。

3．実験結果と考察

3.1　実験Ⅰ前半部の解析

〔総説〕

実験ⅠはL_{32}直交表にもとづく32実験より成るが，前半部16実験のみを取り出して，考察を行う。前半部だけを取り出した現由は既報[3],[4]にくわしい。実験Ⅰ前半部は，コンクリート中の塩分量A，水セメント比C，防錆剤（添加）量D，かぶり厚Eの4因子実験となる。夫々4水準から成る。各因子の水準については表－3を参照されたい。16実験に4因子4水準をわりつけてあるので主効果のみの測定を目標とする一部実施法である。データーは表－4の前半分をそのまま使えばよく，直交表の列番号だけが表－4と違ってくる。その様子は前報[4]を参照されたい。

実験Ⅰ前半部は塩分はあらかじめ混練時に入れておき，その後の増減はない（ブリージングや，乾燥による水分の移動に伴う変化はある）。また塩分量は沖縄県内の実在構造物の調査結果にもとづいて定めてあるので，非常に多い場合を含んでいる。従って塩分量の影響が非常に強くでており（表－5の寄与率参照），これと防錆剤量との組合せの有利・不利が発錆面積の大小に大いに関与し，分散分析等の結果を乱すこととともなっている。

実験Ⅰ前半の分散分析の有意性の検定結果は表－6に与えてあるが，1年半・2ヶ年目も従来の結果と特に変った点はない。一方，寄与率の結果（表－5）からは，1年半・2ヶ年目では塩分量の寄与が減少し，他の要因の寄与が増大していることが判る。特にかぶり厚Eの寄与が倍増しているのが目につく。これはかぶりがうすい供試体にひびわれが入り，そこの鉄筋の発錆が急増したことによる。しかし依然として，塩分量の発錆に対する影響は圧倒的で，塩分量の多少に応じて発錆面積はほぼきまり，他の要因は多少それを修正するにすぎないと言える。

材令の経過に伴う発錆面積の推移は表－4にみられる通り，個々の実験番号にとっては凹凸もあるが，全体としては順調に増加していると言えよう。

実験Ⅰ前半部の1年半・2ヶ年目の特徴としては，塩分量水準A_1（海砂換算 0.007～ 0.013％）の場合，依然として発錆が殆ど生じていないことであり，建築学会のＪＡＳＳ５の規定[6]の正当性をうらづけている。

表－4　実験計画のわりつけとデーター（錆面積），実験Ⅰ

実験番号	供試体番号	実験順序	列番号 (1) (15)(16)	(2) (25)	(4) (19)	(8) (21)	データー（発錆面積）（×10⁻¹cm²） 3ヶ月の計	6ヶ月の計	9ヶ月の計	一ヶ年の計	1年半			計	2ヶ年			計
			要因名 AB	C	D	E												
			水準															
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	6	2	2	2	2	2	60	101	76	98	21	45	31	97	64	50	7	121
3	7	3	2	1	3	3	693	793	1176	1128	173	315	335	823	354	380	345	1079
4	12	4	1	2	4	4	426	525	477	588	413	259	123	795	533	323	92	948
5	23	3	1	3	2	2	112	194	541	296	15	171	83	269	90	56	210	356
6	16	4	2	4	1	1	504	688	1188	1457	1155	1069	805	3029	1027	1126	1104	3257
7	14	1	2	3	4	4	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
8	27	2	1	4	3	3	0	7	25	5	5	0	0	5	0	0	0	0
9	24	3	3	2	1	1	866	834	1113	1298	539	663	655	1857	887	740	507	2134
10	4	4	4	1	2	2	240	231	248	375	72	99	157	328	131	290	328	749
11	18	1	4	2	3	3	0	9	2	6	3	1	0	4	1	0	0	1
12	22	2	3	1	4	4	278	148	300	238	77	67	180	324	37	48	127	212
13	19	1	3	4	2	2	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
14	31	2	4	3	1	1	148	144	213	254	92	54	24	170	42	58	188	288
15	11	3	4	4	4	4	433	496	392	593	246	221	194	661	238	158	314	710
16	32	4	3	3	3	3	274	470	729	616	333	254	242	829	240	424	226	890
17	25	7	2	2	2	2	1	5	0	8	6	6	0	12	0	0	0	0
18	8	8	1	1	1	1	757	688	1103	737	380	477	378	1235	208	106	480	794
19	29	5	1	2	4	4	0	0	0	—	27	3	0	30	0	0	0	0
20	2	6	2	1	3	3	0	7	80	41	56	110	35	201	20	109	123	252
21	30	5	2	4	1	1	0	0	7	93	37	81	25	143	84	12	12	108
22	21	6	1	3	2	2	0	0	0	0	0	?	2	2	0	0	0	0
23	13	7	1	4	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8
24	10	8	2	3	4	4	680	921	884	1025	234	246	243	723	254	262	414	930
25	9	5	4	1	2	2	36	51	90	183	104	67	64	235	142	75	144	361
26	15	6	3	2	1	1	172	114	74	121	47	116	76	239	39	203	119	361
27	3	7	3	1	4	4	0	0	3	0	6	4	5	15	0	0	0	0
28	20	8	4	2	3	3	578	512	423	633	288	176	189	653	296	426	282	1004
29	5	7	4	3	1	1	3	25	8	33	20	19	43	82	10	4	3	17
30	28	8	3	4	2	2	520	440	653	878	652	239	265	1156	593	531	449	1573
31	17	5	3	3	3	3	0	0	0	9	146	57	0	203	102	59	2	163
32	26	6	4	4	4	4	13	12	63	50	36	46	16	98	46	10	63	119

表－5　実験Ⅰ前半部の寄与率の推移(%)

	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
A	52.9	55.4	43.7	47.3	39.4	45.4
C	8.5	6.1	9.3	11.2	13.3	11.1
D	7.9	1.5	小	2.2	8.3	6.1
E	11.5	8.3	8.0	14.5	24.7	22.8
ACDE	81.2	71.2	58.9	76.4	90.7	89.1
e	20.5	28.8	41.5	24.9	14.4	14.6

表－6　分散分析による有意性検定結果
（実験Ⅰ前半部）

	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
A	＊＊	＊＊	＊＊	＊＊	＊＊	＊＊
C	＊＊	＊	＊＊	＊＊	＊＊	＊＊
D	＊＊	小	小	＊＊	＊＊	＊＊
E	＊＊	＊＊	＊	＊＊	＊＊	＊＊

またかぶりのうすいE_1供試体の相当数に鉄筋に沿ってひびわれが入り，その結果E_1を含む供試体の発錆面積が急増していることである。

〔塩分量Aの影響〕

分散分析の結果は3ヶ月以来2ヶ年に至るまで，ずっと1%台の有意性を保っており，寄与率もほぼ50%を前後している程，発錆に対する影響は強い。各水準での発錆面積の平均値の差も各因子中で最大である。その状況は表－7より明らかな通り，0.1%以下の危険率で有意差が検出されている。以下箇条書きで要因Aの発錆に対する影響を述べる。

表－7　Aの各水準の平均値の差の検定結果（実験Ⅰ前半部）

材令 / 要因	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
A_1~A_2	*	小	小	*	小	小
A_1~A_3	***	***	***	***	***	***
A_1~A_4	***	***	***	***	***	***
A_2~A_3	***	***	***	***	***	***
A_2~A_4	***	***	***	***	***	***
A_3~A_4	**	小	小	小	*	**

*　5%以下の危険率で有意
**　1%以下の危険率で有意
***　0.1%以下の危険率で有意

（1）　各水準での発錆量はA_1水準を除いて材令と共に順調にふえている（表－8参照）。材令1年迄は，A_3水準の発錆量が一番多く，その他は塩分量がますと，発錆面積もふえると云う状況であった。材令1年半，2ヶ年ではA_4水準の発錆量が急激にふえて，A_3水準の発錆面積を追い越した。従って，塩分量が多い程発錆量も多いと云う至極当然の結果となっている。材令1年迄でA_3水準の発錆量が一番多い理由として

表－8　Aの水準別発錆面積の和の推移(実験Ⅰ（実験Ⅰ前半部）

	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
A_1	0	9	3	15	4	1
A_2	486	400	614	595	596	621
A_3	2104	2317	3222	3315	3610	4279
A_4	1444	1914	2642	3035	4981	5844
Σ	4034	4680	6481	6960	9191	10745
A_8	2535	2541	3063	3273	3767	4301

Σの行を除いて鉄筋12本の発錆面積の和　$\times 10^{-1}$cm

は，前報[4]で水溶液中の発錆速度が塩分濃度3.6%で最大となる[7]からであろうと述べておいた。1年半・2ヶ年でA_4水準での発錆量が最大になった理由は単純で，かぶりが浅い№6 $A_4C_2D_4E_1$供試体に鉄筋に沿って幅広いひびわれが入ったので発錆が急増したためである（表－9参照）。

（2）　A_1水準は2年に至るまで殆ど発錆が生じてないし，A_2水準供試体の発錆量の増加は僅かである。これに反し，A_3・A_4水準の供試体中の鉄筋の発錆面積の伸びは著しい。これはひびわれの発生が発錆を促進しているからであり，特にかぶりのうすいものや，水セメント比の大きいものにその傾向が強くでている。

（3）　A_1水準

表－10をみれば判る通り，2年に至るまで，発錆はほぼ完全に抑制されている。A_1は海砂換算で0.007～0.013%の含塩量で日本建築学会の許容値[6]以内の塩分量である。全然発錆がないのは防錆剤無添加の場合であるが，これはその配合がC_1（W/C＝40%）であるためと考えた方がよい。防錆剤はこの水準ではいれなくてもよいのであろう。1/2標準量の防錆剤を加えた№11が，こく僅かだが各材令で発錆しているのは注目に値する。ただし，これは水セメント比が最大の70%の時であることの方が理由になるかも知れない。

表－9　A_4水準の発錆面積の推移（実験Ⅰ前半部）

実験番号	記　号	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
4	$A_4C_1D_2E_4$	426	525	477	588	795	948
6	$A_4C_2D_4E_1$	504	688	1188	1457	3029	3257
10	$A_4C_2D_1E_2$	240	231	248	375	328	749
16	$A_4C_3D_3E_3$	274	470	729	616	829	890

いずれも3本の鉄筋の発錆面積の和　$\times 10^{-1}$cm²

（4）　A_2水準

A_1水準と異なり，3ケ月時点からかなりの発錆がみられる。2年を経た現在，発錆量はA_3・A_4水準にくらべて格段に少ない。時間的経過の有様は表－11に示しておく。発錆面積の個々の大きさや，時間的推移から判断して，鉄筋に沿う有害なひびわれは発生していないと思われる。

№8は2年に至るも実質的に発錆していない。これは防錆剤量が標準量の2倍のD_4であることと，水セメント比が40%であることが理由と考えられる。混練時のコンクリート重量に対し，0.1%と云う多量の塩分量に対しても，適切な防錆対策を施せば発錆を防止できるわけである。

№12と№14とは2年現在発錆量は大差なしと言えよう。№12は防錆剤無添加の場合で，№14は標準量添加である。№14はC_4E_1で，コンクリートの品質，かぶり厚の点で最悪条件の場合であり，№12のC_3E_4とは酸素の供給条件で相当差がある。それにしても，A_2水準の塩分量に対し，メーカー規定の標準量の防錆剤添加では防錆上有効な措置とは言えない。

№2は防錆剤無添加の場合の半分程度の発錆量で推移している。今後も当分の間このままで推移していくと思われるが，この場合D_2が効いたと考えるよりも，C_2E_2のせいと考える方がよい。

総体的にみれば№8を除いて，材令と共に発錆面積はゆるやかに増大する傾向にあるが，個々の実験番号毎にみると変動が激しく，材令が経過するとかえって減少することもある。これは試料数が1回につき3本と少ないためと，各材令時における供試体が異なるためとであろう。ひびわれその他の欠陥により，時にとびぬけて発錆量の多い鉄筋が存在し，その影響が大きいのである。変動が大きいのは，塩分量に比べ，防錆剤量が少ない時の特徴でもあろうか。

（5）　A_3水準

後半部のA_8もA_3と同じ含塩量0.5%なのであわせて考察することにする。表－12に時間的推移の有様を

表－10　A_1水準の発錆面積の推移（実験Ⅰ前半部）

実験番号	記　号	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
1	$A_1C_1D_1E_1$	0	0	0	0	0	0
7	$A_1C_2D_3E_4$	0	0	0	8	0	0
11	$A_1C_4D_2E_3$	0	9	2	6	4	1
13	$A_1C_3D_4E_2$	0	0	1	2	0	0

表－11　A_2水準の発錆面積の推移（実験Ⅰ前半部）

実験番号	記　号	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
2	$A_2C_2D_2E_2$	60	101	76	98	97	121
8	$A_2C_1D_4E_3$	0	7	25	5	5	0
12	$A_2C_3D_1E_4$	278	148	300	238	324	212
14	$A_2C_4D_3E_1$	148	144	213	254	170	288

表－12　A_3水準の発錆面積の推移（実験Ⅰ前半部）

実験番号	記　号	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
3	$A_3C_2D_1E_3$	693	793	1176	1128	823	1079
18	$A_3C_1D_1E_1$	757	668	1103	737	1235	794
9	$A_3C_3D_2E_1$	866	834	1113	1298	1857	2134
28	$A_3C_4D_2E_3$	578	512	423	633	653	1004
5	$A_3C_1D_3E_2$	112	194	541	296	269	356
24	$A_3C_2D_3E_4$	680	921	884	1025	723	930
15	$A_3C_4D_4E_4$	433	496	392	593	651	710
30	$A_3C_3D_4E_2$	520	440	653	878	1156	1593

示しておく。3ケ月時点から，多量の発錆がみられるのが，この水準の特徴で，その時点で鉄筋に沿うひびわれが発生していた供試体もかなりある。表－12で，急激に発錆がふえている所があるが，それは幅広いひびわれの発生のためと考えてよい。

表－12を一見して気がつくことは，№5の発錆が他の供試体にくらべて著しく少ないことである。この場合，水セメント比はC_1（40%）で，防錆剤は標準量添加である。これらの防錆措置が有効であることを示すものであるが，A_2水準までは，防錆剤を多く加え，水セメント比を40%にとれば実質上発錆がみられなかったのにくらべ，A_3水準ではその様な措置を講じても，かなりの有害な発錆がみられたことに注目すべきである。水セメント比が同じ40%の№18供試体に最初から，かなり多い発錆がみられるが，これは防錆剤無添加のせいである。そのためと，かぶりのうすいせいもあって，初期から一部に鉄筋に沿うひびわれが発生している。№18供試体の時間的推移での大きな変動はそのためである。№18と5とを較べた場合，D_3の効果は十分みとめられる。

№15供試体はA_3水準で2番目に発錆量が少ない。これは防錆剤量がD_4と多いためである。水セメント比は70%なので，発錆は№5の倍以上もあるが，かぶりが厚いこともあって，鉄筋に沿うひびわれはごくうすいものが1/3程の供試体に生じているだけである。発錆の増加速度も今の所ごくおだやかである。防錆剤量が同じD_4の№30も9ケ月位までは№15と同じくA_3水準としては発錆量は少ない。しかし，かぶりがうすいため，途中から鉄筋に沿うひびわれが発生し，2年目現在3番目に多い発錆量となっている。以上より，A_3水準に対し，D_4は或程度効果があることは，認められる。

№24と№15とは発錆量はA_3水準としては少ない方に属する。これはE_4ならびに防錆剤量D_3とD_4とが効いているからであろう。更に両者を比較するとA_3に対し，D_4の方がD_3より効くということになる。

№3と№28とを比較すればA_3水準に対してはD_2がD_1より若干効果が大きいことを示していることがわかる。

結論として，A_3水準に対して，2倍量までの防錆剤では不十分で発錆はさけられない。しかし防錆剤はA_3水準に対して効果がないわけでなく，水セメント比を小さくし，かぶり厚を充分にとった上で，防錆剤を充分に用いれば，発錆量を無添加の場合の1／2以下に抑えることができる。但し発錆量自体は少なくはない。A_3水準に対して，防錆剤は多く使った方がよいと言えよう。

（6）　A_4水準

A_4水準の発錆量の時間的推移は表－9に示してある。まず目につくことは№10供試体の$A_4C_4D_1E_2$つまり，防錆剤を使わない場合が3ケ月以来ずっと一貫して発錆量が最も少ないことである。他の条件もC_4E_2であり，4種の供試体中最悪である。また2年目を除いて，防錆剤は使用量が少ない程発錆量は少ないのである。防錆剤量が最も多い№6は9ケ月から，他の供試体よりも発錆量が特に大きくなり始め，2年現在，2番目に多い№4の3倍以上になっている。これは，A_4水準に対しD_4が逆効果で発錆が多くなる上に，かぶりが1 cmとうすいために，鉄筋に沿って幅広いひびわれが入ったので，発錆が著しく加速されたためである。従来A_4水準の供試体の発錆面積の合計はA_3水準のそれより小さかったのであるが，この№6の1年半目での発錆量の飛躍的上昇で，A_3水準の発錆量をぬいて一位になってしまった。2年現在№6は実験Ⅰの32実験中，最大の発錆面積となっている。

2年目現在の№6供試体の発錆は限界にきており，その発錆面積率は鉄筋全表面の95%をこえているものがでている。

塩分量1%の時，標準量の2倍量までなら使用しない方がよく，使用量が多い程，むしろ発錆を刺載すると言えよう。また，水セメント比を小さくしたり，かぶりを厚くとっても，A_4水準の場合，発錆量は非常に多いと言える。

〔水セメント比Cの影響〕

分散分析の結果は1.5年，2年共に1%以下の危険率で水セメント比は有意となっている。これは3ケ月以来ほぼ同じ傾向である（表－6参照）。寄与率の方からみると，水セメント比のそれは材令と共に増加傾向にある。これは塩分量の寄与率の低下と相反関係にある。

表－13にみられるように，水セメント比の各水準における発錆量は材令の経過と共に順調に増加しており，発錆がとまるような傾向はない。各水準の発錆面積の合計は依然として，40%，70%，60%，50%の順に大きくなっており，おかしな結果となっている。これは

表－13　Cの各水準の発錆面積の推移
（実験Ⅰ前半部）

材令／水準	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
C_1	538	726	1043	889	1069	1304
C_2	1257	1587	2440	2690	3949	4457
C_3	1418	1452	2143	2153	3010	3236
C_4	821	880	855	1228	1163	1748

いずれも12本の鉄筋の発錆面積の和　$\times 10^{-1}$cm²

前報[4]で述べた通り，AとDとの組合わせの有利・不利の影響が強くでているからである。

各水準における発錆面積の平均値の差の有意性については表－14にかかげてある通り，材令と共にやや増加する傾向にある。

水セメント比40%のとき，当然ながら発錆量は一番少ないが，2年現在かなりの発錆がみられる。これは塩分量が多いときは水セメント比を40%にしても相当量の発錆はさけられないと言うことである。また，水セメント比70%のときの発錆面積の合計は40%のときに次いで少ない。その上，有意差がない程平均値は接近している。この傾向は3ヶ月以来2年に至るまでずっと続いている。以上のことから，水セメント比は防錆上どうでもよいことだと速断してはいけない。単に水セメント比は発錆をコントロールする支配的因子でないと云うことである。塩分量の影響の所で述べたように，水セメント比40%は塩分量が少ない時に特に有効であり，塩分量が多い時でも発錆量を少くするのに有効に役立っている（表－15参照）。

表－14　Cの各水準の平均値差の検定結果
（実験Ⅰ前半部）

材令／水準	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
C_1～C_2	＊＊	＊＊	＊	＊＊＊	＊＊＊	＊＊＊
C_1～C_3	○	＊＊＊	＊	＊＊＊	＊＊＊	＊＊
C_1～C_4	小	小	小	小	小	小
C_2～C_3	小	小	小	＊	○	＊
C_2～C_4	○	＊	＊＊	＊＊＊	＊＊＊	＊＊＊
C_3～C_4	小	＊＊	＊	＊＊＊	＊＊＊	＊

○　10%以下の危険率で有意
＊　5%以下の危険率で有意
＊＊　1%以下の危険率で有意
＊＊＊　0.1%以下の危険率で有意

1ヶ年目の結果の解折のさい，C_2とC_4との発錆面積の矛盾について考察したので，ここではC_2とC_3，C_3とC_4との比較について述べてみる。

C_2とC_3

A_1水準では発錆が殆どなく差はない。

A_2水準では表－16の通り常にC_3の方が発錆は多い。水セメント比よりも防錆剤量の多少の方がきいているのではないか。

A_3水準。表－16には参考のために後半部試料も併記してある。いづれもC_3の方が多い。No. 3とNo. 9とでは1ヶ年まであまり差がなく僅かにC_3の方が多いが，1年半と2年目とではC_3の方が圧倒的に多くなっている。これはC_3E_1のため，鉄筋に沿うひびわれが入り易いので，幅広い亀裂が入ったためである。後半部試料についてもほぼ同じことが言える。

A_4水準。最初からC_2の方が多く，その差は段々と拡がり，1年半からはC_2の方が圧倒的に発錆量が多くなっている。A_4水準の場合，C_2の方の防錆剤量D_4が逆効果でC_3の方のD_3より不利であり，1年半からの開きは鉄筋に沿うひびわれのためである。

結局，C_2とC_3とで，C_2の方が発錆面積が大きいのは，A_4水準で防錆剤の組合わせが不利なため，発錆量に著しい差ができたためである。A_1からA_3水準までの結果から判断すればC_2の方が発錆量は少なく，防錆上有利であると常識的結果におちつく。水セメント比の大小よりも，塩分量および，それと防錆剤添加量

表－15　C_1の各実験の発錆量の経過（実験Ⅰ前半部）

実験番号	記　号	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
1	$A_1C_1D_1E_1$	0	0	0	0	0	0
4	$A_4C_1D_2E_4$	426	525	477	588	795	948
5	$A_3C_1D_3E_2$	112	194	541	296	269	356
8	$A_2C_1D_4E_3$	0	7	25	5	5	0

との組合わせの方が発錆に強い影響を及ぼすわけである。

C_3とC_4

A_1水準。表－17にある通り，発錆量少なく差はない。C_4の方が防錆剤量も少ないので，所々で局所的に小さな発錆がある。

A_2水準。No.14はC_4E_1で透過性大きいにもかかわらず，発錆量は大体において，No.12を下回る。これはA_2水準において，D_3がD_1より防錆上有効なためである。ただし，No.14はC_4E_1故に一部供試体にうすいひびわれが入っており，今後の発錆量はC_3つまりNo.12を上回るに至るであろう。

A_3水準。表－17には後半部試料も併記してあるので，色々の方法でC_3とC_4とを比較できる。まずNo.9とNo.15とを比較すると，防錆剤の差がきいて，初期の間はC_4つまりNo.15はC_3つまりNo.9の半分程度の発錆量であり，材令と共にその差は大きくなり，No.9の方はかぶりがうすいので，ひびわれも当初から入っており，1年半もたつと，その影響が顕著にでてきてしまい，C_3供試体の方が圧倒的に発錆面積が大きくなってしまう。後半部試料No.30とNo.28も当初は防錆剤の差で前者（C_3供試体）が発錆量は少ない。しかし，まもなく一部供試体にひびわれが入り，発錆量はNo.30が上回る様になる。しかし，No.28も防錆剤がD_2と少ないので，発錆量は仲々多く，2年現在では，ひびわれも入ったらしく，発錆量も急増しており，No.30に追いつく勢を示している。No.15とNo.30とを比較すると，塩分量・防錆剤量共に同じなので発錆量の差は当初は空気の

表－16　C_2とC_3との発錆面積の比較（実験Ⅰ，前半部）

実験番号	記　号	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年	
2	$A_2C_2D_2E_2$	60	101	76	98	97	121	
12	$A_2C_3D_1E_4$	278	148	300	238	324	212	
3	$A_3C_2D_1E_3$	693	793	1176	1128	823	1079	
9	$A_3C_3D_2E_1$	866	834	1113	1298	1857	2134	
24	$A_3C_2D_3E_4$	680	921	884	1025	723	930	後半部試料
30	$A_3C_3D_4E_2$	520	440	653	878	1156	1593	後半部試料
6	$A_4C_2D_4E_1$	504	688	1188	1457	3029	3257	
16	$A_4C_3D_3E_3$	274	470	729	616	829	890	

いずれも3本の鉄筋の発錆面積の合計　$\times 10^{-1}$cm²

表－17　C_3とC_4との発錆面積の比較
（実験Ⅰ，前半部）

表－17　C_3とC_4との発錆面積の比較（実験Ⅰ，前半部）

実験番号	記　号	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年	
13	$A_1C_3D_4E_2$	0	0	1	2	0	0	いずれも3本の鉄筋の発錆面積の和 $\times 10^{-1}$cm²
11	$A_1C_4D_2E_3$	0	9	2	6	4	1	
12	$A_2C_3D_1E_4$	278	148	300	238	324	212	
14	$A_2C_4D_3E_1$	148	144	213	254	170	288	
9	$A_3C_3D_2E_1$	866	834	1113	1298	1857	2134	
15	$A_3C_4D_4E_4$	433	496	392	593	661	710	
30	$A_3C_3D_4E_2$	520	440	653	878	1156	1573	後半部試料
28	$A_3C_4D_2E_3$	578	512	423	633	653	1004	後半部試料
16	$A_4C_3D_3E_3$	274	470	729	616	829	890	
10	$A_4C_4D_1E_2$	240	231	248	375	328	749	

透過性の差，後には，ひびわれ発生の有無によるものと考えられる。№9と№28の関係も同じ理由で説明がつく。

A_4水準。この塩分量に対しては，防錆剤の使用量が多い程（ただし標準量の2倍まで）発錆は多い。従って，2年に至るまでずっと№16つまりC_3の方が発錆量は多い。但し№10の方もC_4E_2なので，ひびわれが一部に入った様子で，今後は何とも予想がつかない。

以上より，C_4よりC_3が発錆量が多いのは，C_3の方が，A_3，A_4水準で，塩分量と防錆剤との関係が不利だからである。

〔防錆剤量Dの影響〕

（1）　分散分析によるDの有意性は6，9ケ月目でなくなっているが，1年目以降1%水準に回復している（表－6参照)。これは主として，D_3とD_4との間の発錆量の差のひらきによる。

（2）　Dの各水準間の発錆面積の平均値差は材令の経過と共に開く傾向にある（表－18参照)。Dの効果のあらわれと云うよりも，ひびわれしたものとしないものとの発錆量の格差によるものであろう。

表－18　発錆面積の平均値差の検定，Dの場合.
（実験Ⅰ，前半部）

材令	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
D_1~D_2	小	小	小	小	*	*
D_1~D_3	* *	小	小	*	小	小
D_1~D_4	小	小	小	小	* * *	* *
D_2~D_3	* * *	*	小	* *	* *	* *
D_2~D_4	小	小	小	小	○	小
D_3~D_4	小	小	小	* * *	* * *	* * *

○　10%以下の危険率で有意
*　5%以下の危険率で有意
* *　1%以下の危険率で有意
* * *　0.1%以下の危険率で有意

（3）　1年目よりD_4の発錆量の増加が目立ち，2年目でかなりの差が他のDの水準との間に生じてしまっている。これは全く，№6供試体に幅広いひびわれが入り，発錆が急増したためである（表－19参照)。

（4）　D_3水準の発錆が一番少ないが，D_3が防錆

表－19　Dの水準別発錆面積の合計
（実験Ⅰ，前半部）

水　準	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
D_1	1211	1172	1724	1741	1475	2040
D_2	1352	1469	1668	1987	2753	3204
D_3	534	808	1483	1173	1268	1534
D_4	937	1191	1606	2056	3695	3967

いずれも12本の鉄筋の発錆面積の和
$\times 10^{-4}cm^2$

上一番有利と言うことではない。また，D_4が好ましくないと言うわけでもない。前報[4]でも述べた通り，DはAに応じて添加すべきである。塩分量が多い時，Dが少ないとかえって害となる。

（5）　表－20にかかげてある通りA_1水準では差はない。A_2水準ではD_4は事実上発錆を2年に至る迄抑止している。これはC_1E_4と云う条件も大いに寄与している筈である。D_3の発錆が最も多いが，水セメント比とかぶり厚の条件が最悪なのも考慮しても，無添加の場合とほぼ同じか，それを超過する発錆量であることは注目に値する。D_2については発錆抑制効果はみとめられる。

0.5%含塩量のA_3水準では2倍量迄の防錆剤添加では発錆を抑えることができない。この段階でD_3の発錆が最も少ない。D_4も№15や№30（ただし6ケ月まで）にみられる様に明らかに抑制効果がみられる。D_3の場合は水セメント比40%が大きく寄与していると思われる。№9のD_2の場合，かぶりがうすく，3ケ月目から，鉄筋に沿うひびわれがみられ，2年現在発錆量は最も多い。№18と28とを比較した場合，D_2のA_3に対する発錆抑制効果は或程度みとめられる。

塩分量が1%と非常に多い場合，2倍標準量までの防錆剤添加はむしろ有害である。D_4の場合の発錆量が一番多く，特に1年以降は他の防錆剤量との差が著しい。これは先述した様に鉄筋に沿って入ったひびわれの作用である。

以上より，防錆剤添加量の各水準で，D_4が一多い理由はA_4水準での逆作用と鉄筋に沿って入ったひびわれのためであり，D_3が一番よく効くようにみえるのは，A_3水準で水セメント比の条件が一番よく，D_4の場合最悪であったからである。

（6）　AとDとの関係を論じる場合，単にAとDとの2元表等から判断してはならない。本実験は実験

表－20　塩分量と防錆剤各水準の効果の比較（実験Ⅰ，前半部）

実験番号	記　号	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
1	$A_1C_1D_1E_1$	0	0	0	0	0	0
11	$A_1C_4D_2E_3$	0	9	2	6	0	1
7	$A_1C_2D_3E_4$	0	0	0	8	0	0
13	$A_1C_3D_4E_2$	0	0	1	2	0	0
12	$A_2C_3D_1E_4$	278	148	300	238	180	212
2	$A_2C_2D_2E_2$	60	101	76	98	97	121
14	$A_2C_4D_3E_1$	148	144	213	254	170	288
8	$A_2C_1D_4E_3$	0	7	25	5	5	0
3	$A_3C_2D_1E_3$	693	793	1176	1128	823	1079
9	$A_3C_3D_2E_1$	866	834	1113	1298	1857	2134
5	$A_3C_1D_3E_2$	112	194	541	296	269	356
15	$A_3C_4D_4E_4$	433	496	392	593	661	710
18	$A_3C_1D_1E_1$	757	668	1103	737	1235	794
28	$A_3C_4D_2E_3$	578	512	423	633	653	1004
24	$A_3C_2D_3E_4$	680	921	884	1025	723	930
30	$A_3C_3D_4E_2$	520	440	653	878	1156	1573
10	$A_4C_4D_1E_2$	240	231	248	375	328	749
4	$A_4C_1D_2E_4$	426	525	477	588	795	948
16	$A_4C_3D_3E_3$	274	470	729	616	829	890
6	$A_4C_2D_4E_1$	504	688	1188	1457	3029	3257

いずれも3本の鉄筋の発錆面積の和
$\times 10^{-1}cm^2$

計画法による一部実施法によっているから，他の条件もよく頭に入れて結果を判断しなくてはならない。特に材令を経た場合，鉄筋に沿うひびわれの発錆による発錆促進効果を考慮に入れるべきである。

〔かぶり厚Eの影響〕

（1）　E_1（1 cm）の場合の発錆が1.5年目より急速に増加している。これはかぶりのうすい供試体に幅広い鉄筋に沿うひびわれが入り，発錆が急に拡がったためである。E_1の発錆が急速にふえたことはEの寄与率の増大にも現われている（表－5参照）。またE_1と他の水準との平均値差の有意性も1年以降ずっと0.1%台を保っている（表－21参照）。

（2）　E_1の場合の発錆量が格段に多いことは別にして，E_2，E_4，E_3の順に発錆量が増大していることは，常識とは矛盾した結果である。その理由は何回も云う様に塩分量と防錆剤量との組合わせの有利・不利が大きく発錆に影響しているからである。

（3）　E_1を除いたE_2～E_4迄の供試体の発錆面積の増加の速度は割合とゆるやかである。これはかぶり厚の関係でひびわれが入りにくいことに関している（表－22参照）。

表－21　発錆面積の平均値差の検定，Eの場合
（実験Ⅰ，前半部）

材令／水準	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
E_1～E_2	＊＊＊	＊＊＊	＊＊	＊＊＊	＊＊＊	＊＊＊
E_1～E_3	＊	○	小	＊＊＊	＊＊＊	＊＊＊
E_1～E_4	小	＊	＊	＊＊＊	＊＊＊	＊＊＊
E_2～E_3	＊	＊＊	○	＊＊＊	○	小
E_2～E_4	＊＊	＊＊	小	＊＊	＊	小
E_3～E_4	小	小	小	小	小	小

表－22　Eの水準別発錆面積の合計
（実験Ⅰ，前半部）

水準／水準	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
E_1	1518	1666	2514	3008	5056	5676
E_2	412	526	866	771	694	1226
E_3	967	1279	1932	1754	1661	1970
E_4	1137	1169	1169	1427	1780	1870

（4）　E_1の検討

E_1の各供試体の発錆量の時間的経過については表－23を参照されたい。塩分量がごく少ないA_1水準の場合を除いて各供試体ともに発錆しており，2年現在，塩分量の大小によって発錆面積は左右されている。しかし，ひびわれの効果が及ばない6ヶ月位までは，塩分量と防錆剤との組合わせからNo.9のA_3水準の発錆が一番多い。9ヶ月目頃から，鉄筋に沿うひびわれの発錆に対する影響がではじめ，1ヶ年を経過した頃からは，その影響がNo.9とNo.6に強く現われて発錆が急激に増加し，この傾向は特にNo.6に強くでている。

（5）　E_3とE_4とでは発錆面積の差は3ヶ月以来少なく，平均値差が統計上有意になったことはない。かぶり3cmと5cmとで防錆上の効果で大差はないと言うことではなく，表－24からわかる様に塩分量と防錆剤との組合せからそうなったにすぎない。つまりA_1水準では発錆は両者共，殆んどない。A_2水準ではE_4が多いが，これはD_1とD_4の効果の差である。A_3水準ではE_3が常に多いが，これもD_1とD_4との差である。A_4水準では防錆剤はD_2とD_3とで，両者共きいてなく，発錆はかなりみられるが，数値的には発錆量にあまり差が生じない。結局，E_3とE_4との場合，発錆量に明瞭な差がでてこない。

（6）　E_2はE_3，E_4にくらべて，3ヶ月以来終止一貫して発錆面積は小さいが，前報[4]でもE_2とE_4との比較と言う意味で，その理由にふれている。結局，発錆量の多くなるA_3，A_4水準で，防錆剤添加量や水セメント比が有利な組合わせとなっているからである。

（7）　かぶりが1cmとうすい供試体は前半部だけでなく実験Ⅰ全体を通して，発錆面積にむらが多い様で，各材令時の合計値に矛盾が比較的多い。かぶりコンクリートがうすいので欠陥ができ易く，またそれの発錆に及ぼす影響もかぶりが厚い場合にくらべて大きいからであろう。

〔実験Ⅰ前半部のまとめ〕

（1）　実験Ⅰ前半部はあらかじめコンクリート中に塩分を混入した場合であり，海砂や一部の深井戸水・感潮河川水使用の沖縄県での実情にあわせた実験である。塩分量も調査結果[2]にもとづいて定めてあるので，かなり高い場合を含んでいる。

表－23　E_1の発錆の経過（実験Ⅰ，前半部）

実験番号	記　号	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
1	$A_1C_1D_1E_1$	0	0	0	0	0	0
14	$A_2C_4D_3E_1$	148	144	213	254	170	288
9	$A_3C_3D_2E_1$	866	834	1113	1298	1857	2134
6	$A_4C_2D_4E_1$	504	688	1188	1457	3029	3257

表－24　E_3，E_4の発錆面積の比較（実験Ⅰ，前半部）

実験番号	記　号	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
11	$A_1C_4D_2E_3$	0	9	2	6	4	1
7	$A_1C_1D_2E_4$	0	0	0	8	0	0
8	$A_2C_1D_4E_3$	0	7	25	5	5	0
12	$A_2C_3D_1E_4$	278	148	300	238	324	212
3	$A_3C_2D_1E_3$	693	793	1176	1128	823	1079
15	$A_3C_4D_4E_4$	433	496	392	593	661	710
16	$A_4C_3D_3E_3$	274	470	729	616	829	890
4	$A_4C_1D_2E_4$	426	525	477	588	795	948

いずれも3本の鉄筋の発錆面積の和

$\times 10^{-1}cm^2$

（２）　前半部の全体的傾向をみると，当然のことながら材令の進行にともない，発錆面積は増大している。これは全発錆面積の合計でも，各因子の各水準についても言える。更に，前半部の個々の実験番号についても多少の凹凸を除いて成立している。

（３）　寄与率の推移（表－５）からみると，塩分の影響は依然として圧倒的に大きいが，多少減少傾向にあり，他の要因の寄与率が相反的に増大傾向にある。特にかぶり厚Ｅの寄与率は１年半・２年でそれ以前の倍近くにふえている。これはかぶりのうすい供試体に発錆量がましたために鉄筋に沿う幅広いひびわれが入り，発錆を加速したためである。このひびわれ発生による錆面積の急増が，１年半・２年目の新しい傾向である。

（４）　塩分量水準A_1の場合，２ケ年を経た現在も実質的に錆の発生がない。建築学会の許容値[6]以内にあるので当然である。

（５）　塩分量水準A_2の場合，水セメント比40%，防錆剤を標準量の２倍添加した時だけ発錆は２年現在起ってない。この塩分量は海砂換算で約 0.3%に相当し，かなりの高塩分量であることは注目してよい。ただし，この程度の塩分量は沖縄県下の海砂を使った構造物では至る所にみられる[8),9)]*

（６）　発錆に対する塩分量の影響は圧倒的に大きく，発錆面積の大小は主として塩分量の多少によってきまると言うことを述べたが，１年目までの発錆量はA_3水準（0.5%）で最大であった。その理由として，塩水中の鉄の発錆速度は約 3.6%で最大となる[7]と言うことに関連しているのではないかと述べておいた[4]。１年半・２年目は様子がかわり，A_4水準（ 1.0%）の発錆面積がA_3水準のそれを追越してしまい，発錆量はコンクリート中の塩分量の多いものが多いと言う結論になってしまった。こういうことになったのはA_4のうち，かぶりのうすいNo.６ $A_4C_2D_4E_1$に幅広いひびわれが入り，鉄筋の発錆が急増したためである。なおNo.６供試体の鉄筋の発錆面積率は２年現在ほぼ限界に達し，平均で90%をこえている。

（７）　かぶりがうすいE_1，E_2で水セメント比の大きいC_4を含む供試体はひびわれが入り易く，そのために発錆量が急にふえることがある。ひびわれが入らない場合，或は入ってもごくうすい場合は，錆面積の増大は漸増と言う形をとる。従来，本実験の報告では，かぶりの発錆に対する影響力を割合と小さく評価してきたが，ひびわれの発生し易すさと，ひびわれ後の発錆速度の増大と言うことを考慮する場合，かぶり厚さの発錆に対する影響は大きいと言えよう。

（８）　水セメント比40%の場合の発錆量は少く，その防錆能力は高く評価してよろしいが，塩分量が多い場合，かなりの量の発錆はさけられない。

（９）　塩分量と防錆剤添加量との関係

A_1水準。防錆剤は加えなくてもよい。加えても防錆上害はない。

A_2水準（配合時のコンクリート重量に対し，0.1%）。D_4（標準量の倍量）の効果はみとめられる（ただし，水セメント比を小さくする）。D_3の効果はみとめられない。

A_3水準（0.5%）。D_3，D_4の効果は一応みとめられ，他の防錆措置と併用すれば，無添加の場合より，かなり発錆量を下げることができるが，発錆量そのものはかなり多い。

A_4水準（ 1.0%）。標準量の２倍までなら，加えない方がよい。防錆剤を加えた方が発錆量は多い。

3.2　実験Ｉ後半部の解析

〔総説〕

実験Ｉは当初，実験計画法のL_{32}直交表にもとづいて計画されたが，過去２回の発表[3),4)]と同じ様に前半部・後半部に分けて，夫々L_{16}表にもとづく実験として解析する。そうすることにより，前半分は塩分があらかじめ，混練時からコンクリート中に存在していて，しかも相当濃度の高い場合の埋込み鉄筋の発錆状況を表現することになる。後半分は最初塩分は殆どコンクリート中に存在せず，後からコンクリート中に入り込む場合の鉄筋の発錆状況を調査できることになる。

後半分を上記目的に適合させるために，後半分の実験のうち，記号Ｆ＝ＡＢの水準８のものを前半分の１のものととりかえる。更にL_{32}実験の後半分をL_{16}実験にとりかえるためには直交表の列番のとりかえを行なわなくてはならない。その状況は表－25に示してある。くわしいことは既報[3),4)]を参照してほしい。表－25は元の割付け表と共に，変更後の割付けも示してあ

*その他文献は多数あり，琉球大学紀要８号～14号の具志の報告をみよ。

表－25　実験Ⅰ後半の割付け表とデーター（1年半，2ケ年）

実験番号	供試体順序	L_{32} による実際のわり付け表 列番号				L_{16} による変更割付け 要因記号 B	C	D	E	データー（発錆面積）（$\times 10^{-1}$cm） 3ケ月計	6ケ月計	9ケ月計	1ケ年計	1年半			計	2ケ年			計
		(1) (15) (16)	(2) (25)	(4) (19)	(8) (21)	(7) (8)	(1) (12)	(2) (9)	(4) (10)												
17	25	7	2	2	2	1	1	1	1	11	5	0	8	6	6	0	12	0	0	0	0
18→1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	29	5	1	2	4	3	2	1	3	0	0	0	0	27	3	0	30	0	0	0	0
20	2	6	2	1	3	4	1	2	4	0	7	80	41	56	110	35	201	20	109	123	252
21	30	5	2	4	1	3	1	3	2	0	0	7	93	37	81	25	143	84	12	12	108
22	21	6	1	3	2	4	2	4	1	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0
23	13	7	1	4	3	1	2	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8
24→7	14	1	2	3	4	2	1	4	3	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0
25	9	5	4	1	2	3	3	2	1	36	51	90	183	104	67	64	235	142	75	144	361
26	15	6	3	2	1	4	4	1	2	172	114	74	121	47	116	76	239	39	203	119	361
27	3	7	3	1	4	1	4	2	3	0	0	3	0	6	4	5	15	0	0	0	0
28→11	18	1	4	2	3	2	3	1	4	0	9	2	6	3	1	0	4	1	0	0	1
29	5	7	4	3	1	1	3	4	2	3	25	8	33	20	19	43	82	10	4	3	17
30→13	19	1	3	4	2	2	4	3	1	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
31	17	5	3	3	3	3	4	4	4	0	0	0	9	146	57	0	203	102	59	2	163
32	26	6	4	4	4	4	3	3	3	13	12	63	50	36	46	16	98	46	10	63	119

り，更に1年半と2年目の個々のデーターも表－4からぬき出して載せてある。以後の説明には元の割付けの水準記号を使う。

後半分の要因は環境条件Bが，前半分の塩分量Aと交替して登場し，その他の要因の水セメント比・防錆剤（添加）量・かぶり厚については前半部と同じである。夫々4水準で，C，D，Eについては前半分と全く同じである。環境条件の水準はB_1が「自然」で前半分のA_1と全く同じものであり，塩分は殆どなく，後からも入りこまない。B_5は「ふりかけ」で毎日一定濃度（3％）の食塩水を一定量（1.2ℓ/個）ふりかけたものである。B_6は「半浸」と称し，供試体を立て、，半分の高さ迄3％の食塩水に浸したもの。B_7は「完浸」で，3％食塩水に完全に水没させたものである。くわしいことはこの報告の2．章または既報[3),4)]を参照されたい。

いずれにしてもL_{16}実験に4因子4水準を割付けてあるため，一部実施法となり，主効果の測定のみを目的としている。

前半分と異なり，全供試体共に，最初の間は殆どコンクリート中に塩分が存在せず，後から，夫々の環境条件に応じて，比較的ゆっくりコンクリート中に塩分が滲透していく場合であるので，前半分の様に塩分の発錆に対する影響は圧倒的ではない。従って実験の初期に於ては，塩分の効果が他の因子の主効果を乱しておかしな結果を生じると言うことはない。しかしながら，材令も2年を経過すると，漸く塩分がかなり多量にコンクリート中に滲透し，鉄筋の周辺に推積するようになるので，塩分の影響が強くでてくる。このことは分散分析による各要因の有意性検定結果（表－26）にも現われているし，また，それから計算した各要因の寄与率（表－27）からは一層はっきりわかる。環境因Bの寄与率の増大は，ふりかけ・半浸の諸供試体の塩分滲透にもとづく発錆量増加によるものである。それとうらはらに，水セメント比を除いた他の2因子の寄与率，つまり発錆に対する影響は2年現在かなり減少している。

塩分のコンクリート中への滲透の結果として，後半部の実験での発錆面積の総和は当初は漸増であるが，1年半から急増している。後半部の場合の発錆の急増

表－26　分散分析による有意性の検定結果の推移
（実験Ⅰ，後半部）

材令 / 因子	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
B	*	小	**	**	**	**
C	*	小	*	**	**	*
D	*	小	*	*	小	小
E	*	小	小	**	小	小

*　5％以下の危険率で有意
**　1％以下の危険率で有意

表－27　実験Ⅰ後半部の寄与率の推移(％)

材令 / 因子	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
B	10.7	2.1	25.6	15.3	32.7	28.3
C	8.6	3.2	9.4	10.5	11.4	8.3
D	8.1	1.4	10.0	3.5	0.1	4.2
E	8.6	3.5	小	7.6	5.2	1.8
BCDE	51.8	18.6	49.7	48.5	52.3	54.8
e	64.0	89.9	58.4	63.1	50.7	57.4

の原因は前半部の場合のひびわれ発生とは違って，外部から滲入してきた塩分が鉄筋のまわりに集積して，そこに存在する防錆剤の防錆能力を上回った場合に生じる。従って発錆の開始時期や発錆速度は水セメント比やかぶり厚の他に，存在する防錆剤量によって支配される。

発錆面積や発錆速度から判断すると，後半部のB_5，B_6の塩分量はまだ前半部のA_3水準には達していない様である。

前半部にくらべ，まだ発錆面積率は小さいので，鉄筋に沿った幅広いひびわれも発生せず，1年時点と比較して全体的な発錆傾向に大きな変化はない。また，№20，№31は1年半から，上記理由で発錆量が急増し，№25と26には2年目からその徴候がみえていることぐらいが傾向の変化であろう。

〔環境因Bの影響〕

（1）　総説の所で述べた様に環境因子Bの影響は材令と共に増加しており，寄与率，分散分析の有意性の増大がそれを示しているわけであるが，環境因子の水準間の格差も開く一方である。各水準の発錆面積の平均値差の検定結果を表－28に示す。B_5，B_6グループとB_7，B_1グループ相互間の有意性は1年以後 0.1乃至1％台となっている。具体的に発錆面積の合計で両グループの差を示すと表－29の通りとなり，差は開く一方である。理由は，B_5，B_6グループはコンクリート中の塩分が材令と共にどんどんふえるので発錆面積もそれに応じて増加するのに反し，B_7では塩分は材令と共にふえていっても，酸素の供給がごく限られているので，事実上発錆量は殆んどふえないし，B_1は塩分がごく少量で，その後も増加しないので発錆が殆んど起らないからである。

（2）　表－30はBの各水準の発錆面積の合計の時間的推移を示したものであるが，B_5，B_6供試体の発錆が1年半時点で急増していることおよび，それがそ

表－28　発錆面積の平均値差の検定，Bの場合
（実験Ⅰ，後半部）

材令 / 因子	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
B_5~B_6	*	小	*	小	小	小
B_5~B_7	小	小	○	***	***	**
B_5~B_1	小	小	○	***	***	**
B_6~B_7	**	小	***	**	**	***
B_6~B_1	**	○	***	***	***	***
B_7~B_1	小	小	小	小	小	小

表－29　環境グループ別発錆面積の和のひらきの推移

材令	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
B_5+B_6	221	184	314	499	1151	1364
B_1+B_7	4	39	14	56	113	26
差	217	145	300	443	1038	1338

表－30　Bの水準別の発錆面積の和の推移
（実験Ⅰ，後半部）

材令 / 水準	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	1ヶ年	1年半	2ヶ年
B_5	36	51	97	286	611	632
B_6	185	133	217	213	540	732
B_7	4	30	11	41	109	25
B_1	0	9	3	15	4	1
合　計	225	223	328	555	1264	1390

いずれも12本の鉄筋の発錆面積の和
$\times 10^{-1}$cm²

のまま後半部の発錆総面積の急増にもなっていることがよみとれる。

（3）　ふりかけ供試体B_5の各実験番号の実験の結果の時間的推移は表－31に記してある。外部から塩分が滲透してくる場合，発錆のはじまる時期はかぶりコンクリートの透水性（主として水セメント比によって左右される）とかぶり厚さ，さらに鉄筋のまわりに存在する防錆剤濃度によって支配される。鉄筋のまわりに一番塩分が到達し易いNo.25は防錆剤も添加していないので，3ケ月時点から，はや発錆しており，2年現在，発錆量も最も多い。No.19は水セメント比が40%，かぶりが5cmで，鉄筋まで塩分は最も到達しにくい。防錆剤量はD_2と少ないので，1年半で僅かに発錆が生じているが，2年現在，発錆は実質的に生じていない。いずれ発錆は起る筈であるが，いつになるか今の所見当はつかない。

No.21はC_2E_1で，かぶりが1cmと浅いが水セメント比は50%と小さく，防錆剤はD_4と多いので，実質的な発錆は1ケ年から始まっている。その後の発錆量の増加速度もD_4が効いてか，比較的ゆったりとしている。2ケ年迄で一番発錆が多かったものの面積発錆率は6.7%で，鉄筋に沿うひびわれが入るにはまだ時間がある。従って，発錆量の急増も当分の間ないと思われる。

No.31は前報で予想したようにNo.21より少しおくれて実質的に1年半目から発錆しているが，これはC_3E_3とD_3の相乗作用で発錆をその時点まで抑制していたものと思われる。2年までの最大発錆面積率は12.2%でNo.21の倍近くであるが，鉄筋に沿うひびわれは当分入りそうもない[4]ので，当分の間，ゆっくりと発錆量を増加させていくものと思われる。

No.21と25供試体はB_5水準の1ケ年時点での発錆量の急増に寄与しているし，No.31は同じく1年半目の急増に寄与している。

（4）　半浸供試体は塩分の浸透がふりかけよりも早いので，発錆量は3ケ月時点からふりかけ供試体より多かった。途中で，ふりかけに追い越されたが，2年目でまた追い抜き，1ケ年以来，B_5～B_6間の発錆面積に有意差はなくなっている（表－28および30）。

No.22は水セメント比が40%であり，防錆剤量もD_3なので，2ケ年現在，発錆は起っていない。ふりかけのNo.19供試体とあわせて考えて，外部から塩分が浸透してくる場合の水セメント比40%の防錆上の優越性は否定できない。

C_3E_1と比較的に塩分が鉄筋に到達しやすいNo.26供試体は，防錆剤量がD_2と言うこともあって，3ケ月時点からかなりの発錆がみられ，その後，ゆっくりとした速度で錆面積を増していき，2年現在，量大の発錆量である。しかし，発錆面積率は1年半で 9.7, 6.4, 3.9%，2年目で17.0, 10.0, 3.3%なので，1つを除いて，ひびわれ発生にはかなり時間的余裕があり，今後も，比較的ゆっくりと錆面積をふやしていくものと考えられる。

No.20はC_2E_3なので，鉄筋までの塩分浸透は時間がかかるはずであるが，防錆剤を添加してないので，6ケ月から一部にわずかな発錆が生じ，9ケ月目では，

表－31　環境水準別の各実験の発錆量の推移（実験Ⅰ後半部）

実験番号	記　　号	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
19	$B_5C_1D_2E_4$	0	0	0	0	30	0
21	$B_5C_2D_4E_1$	0	0	7	93	143	108
25	$B_5C_4D_1E_2$	36	51	90	183	235	361
31	$B_5C_3D_3E_3$	0	0	0	9	203	163
20	$B_6C_2D_1E_3$	0	7	80	41	201	252
22	$B_6C_1D_3E_2$	0	0	0	0	2	0
26	$B_6C_3D_2E_1$	172	114	74	121	239	361
32	$B_6C_4D_4E_4$	13	12	63	50	98	119
17	$B_7C_2D_2E_2$	1	5	0	8	12	0
23	$B_7C_1D_4E_3$	0	0	0	0	0	8
27	$B_7C_3D_1E_4$	0	0	3	0	15	0
29	$B_7C_4D_3E_1$	3	25	8	33	82	17

いずれも3本の鉄筋の発錆面積の和

$\times 10^{-1}cm^2$

全供試体に発錆がみられる。1年半目に発錆が急増した形になっているが，これは1年目の発錆量が少ないためである。最大発錆面積率は10.3%なので，鉄筋に沿うひびわれにはまだ間があり，発錆はこのままゆっくりと増加していくものと考えられる。

№32はC_4E_4で水セメント比が70%なので，透過性は大きい。したがって3ケ月時点から，ごくわずかだが発錆はみられる。しかし防錆剤量がD_4と多いので，発錆量自体は2年現在無添加の場合の半分以下である。D_4の発錆抑制効果がみとめられる。発錆面積率からみても，発錆量の急増はまだ当分の間おこらないものと考えられる。

なお，半浸供試体の場合，発錆は浸水面よりも上の部分に圧倒的に多い。コンクリート中の水分の蒸発移動に伴う塩分の集中と酸素供給の関係とからであろう。

（5）　完浸供試体は表－31にみられる通り，2年現在，実質的に発錆は生じていないと判断できる。№29だけは各材令で少量づつ発錆が生じているが，変動が激しく，増加の徴候はみられない。C_4E_1と塩分を最も手易く鉄筋に到達させる供試体であり，早くから，D_3で抑制できない程の塩分が鉄筋のまわりのコンクリート中に蓄積されているはずである。しかし，酸素の供給が水中を通して行なわれるので，至って少なく，発錆は偶発的なものになっている。海水中に完全に水没する鉄筋コンクリート構造物では，完全にいつも水没の状態に保っておくことが大切であり，水セメント比を小さくすることも必要であるが，防錆剤を加えることには疑問がある。

〔水セメント比Cの影響〕

（1）　実験Ⅰ後半では，水セメント比の発錆に対する影響は大体において塩分量に次いで大きいのであるが，寄与率でみると6ケ月目を除いて8%から11%の間にある（表－27参照）。分散分析の結果は1年，1年半と1%台の有意差であったが，2年目になると再び5%以下の危険率でしか有意とは言えなくなっている（表－26参照）。理由は塩分量の影響の増大である。

（2）　水セメント比の各水準の発錆面積の平均値の差の検定結果の推移を表－32に載せておく。3ケ月，6ケ月は水セメント比の水準差による発錆量の差は少ないが，これは，外部から塩分がまだ十分に浸透せず，発錆量自体がまだ少ないからである。9ケ月以降，水

表－32　Cの各水準の発錆面積の平均値の差の検定（実験Ⅰ，後半部）

因子＼材令	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
C_1～C_2	小	小	○	＊＊	＊	○
C_1～C_3	＊	○	小	＊	＊＊	＊＊
C_1～C_4	小	小	＊＊	＊＊＊	＊＊	＊
C_2～C_3	＊	小	小	小	小	小
C_2～C_4	小	小	小	＊	小	小
C_3～C_4	○	小	○	＊＊	小	小

セメント比やかぶり厚さの差で，鉄筋のまわりに発錆を促進する程の塩分が集積する供試体もふえてきて，水セメント比の水準差の発錆に対する影響の有意性が強まってくるわけである。しかし今後は塩分の浸透量がふえて，防錆剤量との関係が浮上してくるので，発錆に対する水セメント比の影響は弱まってくるのではないか。

（3）　発錆面積は3ケ月以来ずっと，水セメント比40%の時量小であると云うよりも，実質的に発錆は零である。透水性が小さいため，2年現在，鉄筋のまわりに防錆剤で抑制できぬ程多量の塩分が蓄積されてないわけである。C_2，C_3，C_4の場合は，外部からの塩分が除々に浸透するにつれ，B_5，B_6供試体に塩分が防錆剤で抑制できぬ以上に集積し，発錆は除々にあるいは急激に増大する（表－33参照）。

表－33　Cの各水準の発錆面積の和の推移（実験Ⅰ，後半部）

水準＼材令	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
C_1	0	0	0	0	32	8
C_2	1	12	87	150	356	360
C_3	172	114	78	132	457	524
C_4	52	97	163	271	419	498

いずれも12本の鉄筋の発錆面積の和
$\times 10^{-1}$cm²

依然として，C_1とC_2との間に発錆量で大きな格差があることに注目すべきである。

（4）　C_3とC_4との発錆面積の大小が，常識と反する結果になっているのは，浸透・蓄積する塩分と存在する防錆剤量との関係からであり，前報[4]にも説明してあるが，もう少しくわしく考察してみる。B_1水準

表－34　C_3とC_4との発錆面積の比較（実験Ⅰ，後半部）

実験番号	記　号	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
31	$B_5C_3D_3E_3$	0	0	0	9	203	163
25	$B_5C_4D_1E_2$	36	51	90	183	235	361
26	$B_6C_3D_2E_1$	172	114	74	121	239	361
32	$B_6C_4D_4E_4$	13	12	63	50	98	119
27	$B_7C_3D_1E_4$	0	0	3	0	15	0
29	$B_7C_4D_3E_1$	3	25	8	33	82	17
13	$B_1C_3D_4E_2$	0	0	1	2	0	0
11	$B_1C_4D_2E_3$	0	9	2	6	4	1

いずれも3本の鉄筋の発錆面積の和
$\times 10^{-1}$cm²

では殆ど発錆がないので，C_3とC_4との差はない（表－34参照）。

B_7水準（完浸）では水中にあるので，発錆を支配するのは酸素の供給速度であり，C_3E_4のNo.27の方がC_4E_1のNo.29より発錆は少ない。しかし，発錆量自体が少ないので，差はそれほど問題にならない。

結局C_3とC_4の場合の発錆量の差はB_5とB_6の場合に生じるのであるが，両者共，水セメント比は大きい方のため，透水性が大きく，$C_3D_3E_3$のNo.31を除いて，3ケ月から発錆がみられる。6ケ月まではNo.25とNo.32との合計発錆面積はNo.26より少ない。その理由はふりかけよりも，半浸の方が早く塩分が到達するため，C_3E_1のNo.26がいち早く多量に錆びるためである。9ケ月になると，ふりかけ及び半浸のC_4供試体も充分塩分が鉄筋のまわりに到達し，錆び始め，その合計はNo.26のC_3単独の発錆量を超過するに至る。この状態が1年目まで続くが，1年半になると，今まで発錆が抑止されていた$B_5C_3D_3E_3$のふりかけ供試体が多量に発錆を開始し，C_3の合計発錆面積はC_4のそれを上回るに至る。こう云うわけで，2年現在C_3の方がわずかに発錆量は多い。今後もしばらくは大差のないまま経過していくものと思われる（以上表－34参照）。

〔防錆剤量Dの影響〕

（1）　分散分析，水準間の平均値差の有意性の検定結果はそれぞれ表－26および35に示してある通りで，防錆剤添加量の多少による発錆に対する影響は4つの要因中最も小さい。これは寄与率の表－27からもうかがえる。1年半では各水準の平均発錆面積に有意差がなくなり，2年目も5％台の有意性が一部に成立するだけである。これは浸透塩分量の増大にともない，コンクリート中に存在する防錆剤量と複雑にからみあったためであり，防錆剤はいくら加えても同じと云うことではない。

（2）　表－36をみれば判る通り，材令の経過と共にDの各水準の発錆面積の合計は順調にふえている。

表－35　Dの各水準の平均発錆面積の差の検定
（実験Ⅰ，後半部）

材令／水準	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
D_1～D_2	*	小	○	○	小	小
D_1～D_3	小	小	**	**	小	*
D_1～D_4	小	小	*	小	小	*
D_2～D_3	*	小	小	小	小	小
D_2～D_4	*	○	小	小	小	小
D_3～D_4	小	小	小	○	小	小

表－36　Dの各水準の発錆面積の和の推移
（実験Ⅰ，後半部）

材令／水準	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
D_1	36	58	173	224	451	613
D_2	173	128	76	136	285	362
D_3	3	25	8	50	287	180
D_4	13	12	71	146	241	235

いずれも12本の鉄筋の発錆面積の和
$\times 10^{-1}$cm²

このことは防錆剤は効かないと言うことでなく，防錆剤を加えても，塩分がふえれば発錆はさけられないと言うことを示しているのである。防錆剤に発錆抑制効果があることは表－36をみれば歴然としている。

（３）　防錆剤を適切に用い，水セメント比やかぶり厚にも考慮をはらえば，２年を経過しても，かなり苛酷な条件（ふりかけや半浸）のもとでも発錆を抑止することが判明した。例えばNo.19の$B_5C_1D_2E_4$やNo.23の$B_6C_1D_3E_2$であるが，これらの供試体の防錆効果はCの所で述べた様に水セメント比40%に負う所が大きい。

（４）　D_1水準での発錆量が９ケ月以後，とびぬけて多いが，これは塩分量が当初零で材令の経過と共に増加する一方なので，当然である。３ケ月と６ケ月時点ではD_2水準の発錆面積が最大となっている。これはNo.26の$B_6C_3D_2E_1$の鉄筋のうち，１本づつがとびぬけて発錆量が多かったためである。かぶりが１cmとうすい場合，かぶりコンクリートに欠陥ができ易く，それが防錆上致命的となることがあるのである。

（５）　１ケ年までの傾向と特に変った点は，D_3の発錆面積が急増したことである。これはNo.31の$B_5C_3D_3E_3$が１年半から急増したことによる。この供試体の鉄筋のまわりにD_3では抑止できぬ程の塩分が集積したためである。今後もこの供試体の発錆量は多いものと判断される。

〔かぶり厚さEの影響〕

（１）　分散分析や平均値差の検定による有意性は，試料数の多かった１ケ年目を除いて，低い（表－26および表－37）。このことは寄与率の低さとも合致する（表－27参照）。

（２）　材令の経過にともなって，当然のことながら，Eの各水準での発錆面積は増加している（表－38参照）。

表－37　平均値差の検定結果（実験Ⅰ，後半部）

材令／水準	３ケ月	６ケ月	９ケ月	１ケ年	１年半	２ケ年
E_1～E_2	*	小	小	小	小	小
E_1～E_3	*	○	小	**	小	小
E_1～E_4	*	○	小	**	*	○
E_2～E_3	小	小	小	*	小	小
E_2～E_4	小	小	小	*	小	小
E_3～E_4	小	小	小	小	*	小

表－38　Eの各水準の発錆面積の和の推移（実験Ⅰ，後半部）

材令／水準	３ケ月	６ケ月	９ケ月	１ケ年	１年半	２ケ年
E_1	175	139	89	247	464	486
E_2	37	56	91	193	249	361
E_3	0	16	82	56	408	424
E_4	13	12	66	58	143	119

いずれも12本の鉄筋の発錆面積の和
$\times 10^{-1}cm^2$

（３）　１ケ年時点までは大体において，統計上の有意差がない場合はあっても，かぶりが厚い程発錆面積は小さくなっている。しかし，１年半と２ケ年とでは少し傾向が違ってきて，E_3＝３cmの場合の発錆量が急激にまして，E_2をぬきE_1の場合に追いついてしまっている。この点をもう少し追求してみる。

（４）　E_2とE_3

B_1とB_7とでは発錆量が少ないので，あまり影響はないので，B_5とB_6との場合を検討する。表－39にみる通り，１ケ年時点まで，発錆量の多いのはD_1を含

表－39　E_2とE_3との比較（実験Ⅰ，後半部）

実験番号	記　号	３ケ月	６ケ月	９ケ月	１ケ年	１年半	２ケ年
25	$B_5C_4D_1E_2$	36	51	90	183	235	361
31	$B_5C_3D_3E_3$	0	0	0	9	203	163
22	$B_6C_1D_3E_2$	0	0	0	0	2	0
20	$B_6C_2D_1E_3$	0	7	80	41	201	252

いずれも３本の鉄筋の発錆面積の和
$\times 10^{-1}cm^2$

表－40　E_4の発錆状況の推移（実験Ⅰ，後半部）

実験番号	記　号	3ケ月	6ケ月	9ケ月	1ケ年	1年半	2ケ年
19	$B_5C_1D_2E_4$	0	0	0	0	30	0
7	$B_1C_2D_3E_4$	0	0	0	8	0	0
27	$B_7C_3D_1E_4$	0	0	3	0	15	0
32	$B_6C_4D_4E_4$	13	12	63	50	98	119

いずれも3本の鉄筋の発錆面積の合計値
$\times 10^{-1}$ cm²

む場合のNo.25とNo.20とで，そのうち，透水性の高いC_4E_2のNo.25の方がC_2E_3のNo.20より発錆面積は大きい。1年半となると，それまで発錆のほとんどなかった$C_3D_3E_3$のNo.31が，D_3の防錆限界をこえる塩分を蓄積して，急激に発錆量をます。もう一つのE_2供試体であるNo.22は$C_1D_3E_2$がきいて，塩分量がまだ十分に鉄筋のまわりに浸透せず，D_3が発錆をほぼ完全に抑制している。したがって，1年半および2年目ではNo.20とNo.31の合計発錆面積がNo.25の発錆面積より大きく，E_2よりかぶりが厚いE_3の方が発錆量が多いと云う矛盾した結果となっているのである。

（5）　E_4は当然のことながら，発錆量は最も少ない。しかし水セメント比40%のC_1の場合の発錆量の合計にくらべると，はるかに大きい。防錆上，かぶりを厚くするより，水セメント比を小さくした方がよいと言うことになる。しかし，土木学会の示方書[10]では海洋コンクリートのかぶり厚は7 cmとされているので，もう少しかぶり厚を増した実験を行ってから，この点の結論を出すべきであろう。

E_4の場合の発錆量が少ないのはかぶり厚が大きいこともさることながら，表－40にみられるように，通常塩分が多く発錆が多いB_5供試体（No.19）がC_1E_4であるため，鉄筋のまわりにまだ十分に塩分が到達してないので，発錆がほとんど生じていないためでもある。また，もう一つの発錆量が多くなるB_6の場合も，C_4E_4で，塩分が比較的鉄筋のまわりに到達しやすくても，防錆剤量がD_4と多いので，3ケ月から発錆していても，2年に至るまで，発錆量が低く抑えられている。以上のことが重なって，E_4の場合，発錆面積が小さいのである。これにくらべて，E_2はB_5供試体がC_4E_2でD_1，E_3はB_3は供試体がC_2E_3でD_1で，いずれも発錆量が多く，全体としての発錆面積の合計も大きくなっているわけである。

〔実験Ⅰ後半部のまとめ〕

（1）　実験Ⅰの後半部は，当初，コンクリート中に塩分が存在せず，硬化後，塩水のふりかけ，浸漬等によって，塩分がコンクリート中に表面から浸透していく場合である。比較供試体として自然状態の屋外放置したものを使っている。

（2）　2年現在，屋外放置の自然供試体は鉄筋に錆が生じていない。これは塩分が許容値[6]以下なので当然である。

（3）　「完浸」供試体は3%の塩水中に完全に水没させたものである。2年現在，若干の発錆が生じているのは，水セメント比70%，かぶり厚1 cmのものだけで，これには防錆剤が標準量配されている。それにもかかわらず発錆がみられるのはコンクリートがポーラスなため，すでに3ケ月で塩分は鉄筋の周辺に達し，標準量の防錆剤にうちかつだけの塩分が蓄積していたわけである。ただ水中にあるので，酸素の供給が乏しいので，発錆量は2ケ年まで，一進一退の状況で，あまり増加していない。その他の供試体は水セメント比・かぶり厚・防錆剤量の如何にかかわらず，時折り発錆した供試体がみいだされるが，発錆面積がごく小さく，実質上発錆せずとみなしうる。半浸供試体の発錆状況の推移から判断すれば，完浸供試体中には，防錆剤量の多少に関せず，鉄筋を錆びさせるに足るだけの十分な量の塩分が，コンクリート中に浸透しているはずである。酸素の供給を断つことが防錆上，いかに大切なことであるかを，この供試体の発錆状況が教えてくれる。また海水中に築造する鉄筋コンクリート構造物では，完全に水没させることが一番大切である。

（4）　実験Ⅰ前半部では塩分量の影響が減少する傾向がみられたが，後半部では最初塩分がほとんどコンクリート中になく，後からだんだん増えていく条件

なので，塩分量の影響，つまり環境要因の影響が材令と共に増加する傾向にある。また，水セメント比を除く他の要因の影響は強い塩分量の影響力に乱されて，減少の傾向にある。このことは，分散分析による検定や，寄与率の計算結果にも反映されている。

（5）「ふりかけ」「半浸」の各供試体は材令と共に増加する塩分量に応じて，発錆面積を増加しつつある。その増加の速度は水セメント比・かぶり厚の他，コンクリート中に存在する防錆剤量の影響をうける。また鉄筋が発錆を開始する時期も，それらの要因の作用を受ける。

（6）2ケ年現在，いずれの供試体も前半部の塩分の多い場合程の発錆量は生じていない。したがって鉄筋に沿う幅広いひびわれ等は生じていない。その結果，今の所，前半部にみられるような発錆面積の急増も生じていない。このことは混練のさい塩分がすでにコンクリート中に存在することは後から浸透していくよりも，鉄筋コンクリートにとってはるかに有害であることがわかる。もちろん，この話は程度問題で，いつもそう言うわけではない。

（7）水セメント比40%と50%とでは防錆能力に大差がある。水セメント比40%の時2年経過しても，ふりかけ・半浸両供試体共に実質上発錆は生じていない。もちろんこの場合，適切な量の防錆剤を用いることが肝要である。しかしながら，発錆がいつまでも生じないと考えるのは間違いで，実験Ⅰ前半部の結果から判断して，いずれ近いうちに鉄筋の発錆はさけられないものと考える。

（8）防錆剤の発錆抑制効果は表－36等から十分認められる。しかし，前半部と異なり塩分が少ない状況にもかかわらず，相当量の発錆はさけられない。つまり，発錆面積を少くする効果は明らかに認められるが，発錆を完全に防止することはできない。海岸構造物や，海岸に近い所に位置して，波しぶきを受ける様な構造物に防錆剤を使うことは疑問がある。鉄筋コンクリート構造物に期待されている耐用年限を考慮する時，波しぶきを受けることが時たまであっても，長年月の間にコンクリート中に浸透蓄積される塩分は莫大な量に達し，防錆剤の防錆能力をこえる塩分量にいずれは達してしまうものと考えているからである。

（9）水セメント比・防錆剤量・かぶり厚の各要因の各水準の発錆量の大小で常識とは反する結果が生じている所があるが，深く考察を行なえば，塩分量と防錆剤量との組合せの有利・不利のいたずらであることがわかる。防錆剤は塩分量に応じて，その添加量を加減しなければならない。不足なときは効かないし，またかえって，発錆を刺載することもある。

（10）かぶりを厚くすることは防錆上好ましいことであるが，海洋コンクリート*の場合，本実験での上限値5㎝では不足である。規定の7㎝でも十分であるか否か，本実験の結果からは疑問が残る。水セメント比はできるかぎり40%に近づけるべきである。この効果の方がはるかに大きい。

4．むすび

従来，実験Ⅰは前半・後半にわけて解析する以外に，全体的に前半・後半の実験を一つにした解析も行なってきた。しかしながら，全体的な解析からは得られる事項は前半部の解析から得られるものとほとんど同じなので，今回は全体的な解析は行なわない。前半部は塩分量が後半部よりずっと多いので，発錆量も多く，全体として，前半部の影響が強くでてしまうためである。

また，今回の解析では，時間の制約もあったので，広く内外の諸文献から引用したり，それと比較すると云う方法はとらなかった。前報[4]ではかなりの数を引用文献としてかかげておいたので参考にしてほしい。

実験Ⅰの前半部・後半部の内容のまとめは，それぞれの解析の所で述べておいたので，ここで再述することはしない。現在までに沖縄県下でとられている鉄筋コンクリート構造物の防錆対策について今回の実験と関連させてふれてみる。先の報告[2]で，沖縄県下で最初に防錆剤が使れたのは上山中学校（那覇市）新設工事であると述べたが，これは筆者の情報不足でこの機会に訂正しておく。沖縄本島中部の石川市埋立地の沖縄電力の火力発電所に使われたのが最初と思われる。東京大学岸谷教授の指導のもとに行われた。

現在，建設省住宅局長の通達があったので，海砂を洗って使うことが半ば義務づけられているものと考えているのだが，実情はその様でない。ＪＩＳ表示認可の生コン工場をはじめ，多くの工場が洗砂設備をもっているが，沖縄県下の水事情からほとんど稼動していない。復帰前，琉大附属病院の新営工事のさい，洗砂

*土木学会コンクリート標準示方書の定義による。

したとのことであるが，どの程度まで，塩分を除いて使用したのか，残念ながら情報を入手していない。生コン工場は敷地がせまく，市街地にあることもあって，洗砂を実行しても，その後の水処理に困るであろう。

現在，生コン工場では，海砂と非海砂または海砂でも塩分が少ないものと混合して，塩分含有率を減らす努力はしている。その様な努力の証拠は沖縄県建設材料試験所の年報[11]にも明らかである。非海砂としては砕砂や県外産の河川砂や，台湾からの輸入砂が使われている。しかし，混合後の砂の塩分が建築学会や，建設省通達の許容値以内におさまっているのは，ごく僅かである。依然として，0.2%以上の含塩量の砂が使われているのが実状である。この様な海砂・非海砂混合方式では，多量の非海砂の使用が必要で，0.2%の含塩量の海砂を許容値以内におさめるためには，10倍の非海砂が必要である。これなら，全部非海砂を使用した方が経済的である。この海砂・非海砂混合方式は海砂の含塩量を落とす方法としてはあまり推奨できる方法ではない。また，混合が確実に均質になるまで行われたかも疑問が残る。海砂の塩分分布は一山の中でもかなり変動が大きく，塩分集中個所はそうでない所の10倍以上も塩分を含んでいることがある（1回降雨後の実測例)。塩分によるコンクリート中の鉄筋腐食は塩分の濃い，集中個所から起るのである。大切なのは塩分の平均値でなく最高濃度である。そのためには，一山の中から，かなりの数のサンプルを採取しないと，塩分量分布の実態は把握できない。

現在，沖縄県内の各地では鉄筋コンクリート造校舎の新築（海砂使用により，鉄筋が腐食して，老朽化した校舎の建替えも含む）が盛んに行われているが，この際，県教育庁は，防錆剤の使用を義務づけている。これは海砂対策としては数歩前進であり，他の機関にさきがけて実行しているのは大変よいことである。しかしながら，ここにも大きな問題がある。本実験の結果によれば，防錆剤は塩分量に応じて加減して使用されねば効果がないと云うことが明らかになっている。そのためには，使用する砂の塩分量の管理・実態把握が先決条件である。その様な管理や塩分量試験が，工事とともに実行されているとは聞いてない。塩分量の管理をしないで，防錆剤を使うのは，無駄な努力となりかねない。関係者のこの方面の一層の努力を望む次第である。

一般の住宅建築や商業建築物はどうであろうか。建設省の通達にもかかわらず，今の所，野放しで放置されているのが実状である。元来，一般の住宅建築の施主は，鉄筋の腐食等の原因について，知識がないのは当然で，住宅行政や建築行政に当たるものが，それをカバーしてやる必要があるのではないかと考える。折角の鉄筋コンクリート造のマイホーム（恒久建築物のイメージがある）の夢が20年先か30年先に破れてしまうことになる。建設業界全体の海砂に対する知識，海砂使用に伴う責任と云うことについて，レベルアップを図る必要がある。そのためには，建設行政にたずさわる人達の努力と指導性と責任感とが，まず第一に必要である。

次に土木関係の対応はどうであろうか。土木学会の示方書自体が，建築の場合と違って，海砂対策について，冷淡であるのを反映してか，海砂使用による被害が現実に起っていても，深刻な事態とは受取っていないようである。それには、「土木用のコンクリートは硬練りで，品質もよく，かぶりも厚いので大丈夫」と云う自信も影響しているようである。しかしながら，本実験の結果によれば，水セメント比を40%にし，かぶりを厚くとっても，塩分量が多ければ鉄筋の発錆はさけられないことがはっきりしており，当然海砂使用を含めたコンクリート中の塩分対策は真剣にとりくまれねばならない緊急必要事である。海岸に沿う主要道路の橋梁が20年でほとんど架替えられている事実を重視すべきである。この場合，コンクリート中の塩分の源泉はしぶきの形で入りこんだものが主であるが海砂の寄与も相当程度あり，しぶきがかからない橋梁も，20年足らずでひどい損傷をこうむっている実例（那覇市内の松川橋，大道橋，大道練兵橋，国頭村の安田橋，名護市のあなだ橋，恩納村の塩屋橋，佐敷村の港橋等多数ある）がある。

以上の実情をふまえた上で，筆者等は，現在行うべきコンクリート中の鉄筋の防錆対策を次の様に提案する。

（1）　海砂以外の砂の使用を奨励する。まずこれは公共工事から実施してほしい。現に県外からの河川砂，台湾からの輸入砂，砕砂，またはそれらの混合砂を使っている生コン工場やコンクリート製品工場も存在している。

（2）　海砂は洗って，許容限度まで塩分量を下げてから使用する。砂採取業者は零細企業が多いので，共同の洗砂場を設置させるべきである。水量の豊富な

河川（沖縄本島では北部にしかないが）に河口堰を作り，砂を浸漬して，自然に脱塩するのもよい方法と考えられる。しかしこの場合，河川は清浄でなければならない。生活汚水等が多量に放流される河川ではかえって砂を汚染させることになる。また河口堰をもうけたための増水時の氾濫や，護岸の決壊等の生起に留意しなければならない。さらに強雨時に上流からもたらされる土砂の流入にも留意せねばならない。なかなか実行はむつかしいことである。

（3）　砂の塩分量を減らした上で，防錆剤の適量使用，水セメント比の低減，かぶり厚の増加等の諸防錆措置を講じるべきである。

（4）　波しぶきや海風の直撃をうける位置にあるRC構造物はそれらが直接当らない様な措置をまず講ずべきである。消波工の設置，防風林，防潮堤あるいはその他の遮蔽物を構造物の前面に設置すること，構造物の表面を不浸透性の塗覆物で被うこと等の諸処置を行うべきである。その様なことを行うことを前提として，（3）項で述べた事項を実施すべきである。

（5）　一部が直接海水と接触するような構造物では，水セメント比を小さくし，かぶりを厚くとり，密実なコンクリートを打設すること等は構造物の耐用年限を増加させるには大いに役立つが，耐用年限そのものは，他の構造物より，かなり短くすることが必要である。この際，防錆剤の使用はすすめられない（本報告害験Ⅰ前半部のむすび参照）。（4）項の波しぶきをうける構造物でも，波しぶきをうけることがさけられないなら，この項と同様に考えるべきである。

謝　辞

本研究の実施にあたり，供試体の製作および6ヶ月までの発錆量の測定の経費は昭和51年度文部省科学研究費によりました。感謝の意を表します。また本実験の実施に多大の協力をしてくれた本学技官玉那覇宣雄氏およびコンクリート教室の卒業研究学生の諸氏に感謝致します。

参考文献

1）　具志幸昌：沖縄の鉄筋コンクリート構造物の耐久性――現況調査と考察，その2――，琉球大学理工学部紀要工学篇第8号，pp. 65～93，1975年3月。

2）　具志幸昌：沖縄県における鉄筋コンクリート構造物の耐久性，セメントコンクリート，№363，pp. 5～12，1977年5月。

3）　具志・和仁屋・伊良波：コンクリート中の鉄筋の発錆実験，その1――3ヶ月時と6ヶ月時――，琉球大学理工学部紀要工学篇第15号，pp. 23～56，1978年3月。

4）　具志・和仁屋・伊良波：コンクリート中の鉄筋の発錆実験，その2――9ヶ月および1ケ年時点――，琉球大学理工学部紀要工学篇第16号，pp. 1～41，1978年9月。

5）　具志・和仁屋：沖縄におけるコンクリートの強度および2，3の性質，琉球大学理工学部紀要工学篇第1号，pp. 71～80，1968年4月。

6）　日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS 5，鉄筋コンクリート工事，p. 8，日本建築学会，1975年5月。

7）　岸谷孝一：鉄筋コンクリート構造物における鉄筋の腐食について，コンクリートジャーナル，vol. 12，№2，pp. 1～16，1976年2月。

8）　岸谷孝一：那覇市における小・中学校校舎の被害状況，コンクリートジャーナル，vol.12，№10，pp. 66～71，1974年10月。

9）　具志幸昌：沖縄地区における被害状況（特集＝海砂とコンクリート），コンクリートジャーナル，Vol. 12，No.10，pp. 61～65，1974年10月。

10）　土木学会：コンクリート標準示方書（昭和52年版），p. 84，1978年3月。

11）　沖縄県建設材料試験所：試験年報―昭和51年―，pp. 60～67，沖縄県土木部建設材料試験所，1977年。