

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6 ー実験6 塩分量が少ない場合、その1ー

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2010-08-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 具志, 幸昌, 和仁屋, 晴謹, 伊良波, 繁雄, Gushi, Yukimasa, Waniya, Haruyoshi, Iraha, Shigeo メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/17690

コンクリート中の鉄筋の発錆実験 その6

—実験Ⅵ、塩分量が少ない場合、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

—Experiments VI, In Case of Small Dosage of Salt, 1—

Yukimasa GUSHI, Haruyoshi WANIYA, Shigeo IRAHA

Synopsis

This is the first report of the results of the series of experiments which have been carried on by the authors from December 1978 to February 1979. This series of experiments, named Experiments VI, aimed to determine the threshold values of NaCl concentrations in concrete for steel bar rusting.

A method of electrical potential difference measurements of spots of concrete specimen surfaces over Cu/CuSO₄ half cell, having been developed by California Division of Highways and having been widely used to detect the rusting spots of steel bars in concrete, are also performed in this series of experiments. We planned to examine the method, if it can be applicable to the RC structures in Okinawa Prefecture to detect rusting spots.

The following results about steel bar corrosion are obtained by and at six months after embedding steel bars in concrete.

1. Steel bars in the concrete contained 0.033% of NaCl have not corroded yet without adding any amount of corrosion inhibitors.
2. Steel bars in the concrete contained 0.067% of NaCl do not also corrode yet, if adequate amount of corrosion inhibitors are added to the concrete.
3. In case of the concrete contained 0.100% of NaCl by weight, there have been steel bars corroded some, but their areas of corrosion were small. Some of the steel bars have no corrosion spots where adequate amount of corrosion inhibitors had added to the concrete.
4. All steel bars in the concrete contained 0.133% of NaCl by weight except A₄D₂C₂O₁ specimens have been observed some corrosion. And as the time has passed, the areas of corrosion on steel bar surfaces are

becoming larger.

5. There have not been any significant differences in the effects of types of corrosion inhibitors on steel bar corrosion.
6. The effects of water-cement ratio on corrosion of steel bars are not obvious.
7. The beneficial effects of doubled dosage of corrosion inhibitors into concrete are observed on steel bar corrosion.

The results of electrical potential measurements on the basis of Cu/CuSO₄ half cell are as follows.

1. It has not been decided yet that the standards of California Division of Highways on steel bar corrosion in concrete can be applicable to the RC structures in Okinawa Prefecture.
2. Steel bars in concrete need not be connected by metallic means each other when half cell potential measurement method is applied.
3. Rusting spots on steel bar surfaces have high potentials, and the electrical circuit directly contained a rusting spot exhibit high potentials in the sense of absolute value.
4. Almost rusting places have occurred in the underside of steel bars, and the underside of the specimen has considerable larger cover depth over steel bars than the upperside. The electrical potentials measured on the underside of a specimen were always higher than on upperside.
5. Moisture condition of the specimen concrete has strong effect on measured potential values.
6. There have been no corrosion on the steel bars in the specimens which exhibit 0.2 volt or less of electrical potential.
7. There have been very few specimens which exhibit the electrical potential value of 0.3 volt or higher.
8. The almost specimens having corroded steel bars at 3 or 6 months after embedding exhibit 0.20 to 0.30 volt higher on the basis of Cu/CuSO₄ half cell.

1. 序 説

本実験シリーズは1978年12月から翌年2月までの間に供試体を製作したもので、実験Ⅰから始まった、コンクリート中に埋込んだ鉄筋の発錆試験の第6番目のシリーズに相当する。本シリーズの実験はコンクリート中の塩分量が少ないことが特徴である。従来行ってきた各実験シリーズは実験Ⅳを除いては塩分量が多い部分を含んでいることが特徴であった。そのため、塩

分量水準の間の差が大きく、微妙な塩分量の差による発錆量の差や、防錆剤を加えた場合も含めての、発錆限界塩分量等について、はっきりしない点があった。本シリーズは、その点を解明するため、塩分量のレベルを全体的に低くとり、その間隔も、従来の経験を参考にして、小さくとってある。更に本シリーズの実験は米国のカリフォルニア州道路局の開発した銅／硫酸銅半電池による鉄筋の自然電位測定法^{1)~4)}（半電池、電位測定法と名付ける）を沖縄県内で実用化するため

の第一歩としての予備研究の意味もかねている。鉄筋を埋め込んだコンクリート供試体の表面の電位を測定する半電池電位測定法については、国内では古くは善⁸による研究があり、最近では、片脇・守屋の研究^{9, 7}、アメリカでの研究を参考にして、岸谷・朴^{8, 9}及び岡田・小柳・宮川の研究¹⁰がある。善の研究は15年程前に行われたもので、海水を含めた種々の環境条件の下でのセメント硬化体に包まれた鋼材の腐食傾向を調査することが主目的で、構造物中の鉄筋の腐食個所の探知を目標としておらず、鋼材全体の海水塩化銀電極に対する電位を測定している。研究報告は詳細を極め、本研究を実施するさいに参考となる点があった。岸谷氏の研究は、同氏の今迄の研究成果をふまえ、その一環として、コンクリート表面の自然電極電位測定を行って、鉄筋の腐食傾向や腐食程度を判別する非破壊方式の確立を目標とされているようで、既に実際の建物に応用している段階まで進んでいる。そして表面注水や接触のさせ方のコンクリート表面電位に対する影響にも論及されている。そして、この方法が実用化しうるとされている。片脇・守屋の研究は一部が海中に没する条件で暴露したRC供試体の表面電位を飽和甘こう電極を用いて測定して、鉄筋の発錆時点の判定、鉄筋の腐食位置の決定等ができることと結論しておられる。その他、コンクリートの塩分浸透部分やひびわれ部分の推定ができること及び自然電位が $-0.30V$ より卑の部分では腐食がみとめられ、その電位分布が不均一である程局部的腐食が烈しいことも指摘されている。岡田氏等の研究も鉄筋を埋め込んだ供試体の表面電位（塩化銀電極に対する）を測定することにより、腐食電池の存在を推定できること、及び電位そのものだけでなく、電位のばらつきが重要であることも指摘されている（岡田氏の研究報告のうち関連部分だけを取上げてある）。

筆者がこの研究で目的とする事項は米国で開発された事項をもとにコンクリート中の鉄筋の腐食の有無や、その範囲を同定するための基礎研究であり、上にあげた諸研究のうち、岸谷氏のものに最も近い。米国での研究は橋のスラブの鉄筋腐食による損傷（目視や表面軽打によって確認できない部分）の範囲を決定する方

法で、方法としては確立されており、これとコンクリート中の Cl^- イオン濃度の測定により、コンクリート床版の補修の範囲や方法を決定する方法として、広く実施されている¹¹。しかしながら、細かい点で記述されない事項も多く、現在の所、沖縄県内で塩害をうけた普通の鉄筋コンクリート構造物にいきなり適用することには若干の逡巡を感じている。

以上、コンクリート中の塩分が少ない時の種々の防錆措置の効果をしらべるためと、半電池電位測定法の確立のための基礎研究として、本研究は計画され、実施された。

2. 使用材料・供試体製作・実験計画

使用したセメントはA社製の普通ポルトランドセメントで、工場よりセメント専用船で運び県内で袋詰めしたものを3回にわけて、建材店から購入した。28日強度は圧縮で407, 311, 379 kg/cm^2 、曲げて77, 68, 70 kg/cm^2 であった。

細骨材は沖縄本島の一部で使用されている台湾からの輸入砂で川砂に大理石の砕砂を混入してある。その性質は表-1及び図-1にかかげておく。比重・吸水量の面では沖縄県産の海砂よりよろしいが、粒度分布は細粒分が不足で、ブリージングが多くなっている原因となっている。

粗骨材は沖縄本島北部の本部半島産硬質石灰岩碎石で粒度（図-2参照）を除いて優良な品質の骨材である（表-2参照）。なお、細・粗骨材共に塩分含有量は殆ど零であった。

練りませ水は水道水を使った。

混和剤は防錆剤以外使用していない。防錆剤は市販品で、実験IIで使用した O_1 と O_3 とであるが、今回の O_3 は前回と異なり、減水剤が入っているようである。いずれも、ねりませ水の半分程度にあらかじめ混ぜてから、ミキサーに投入している。

食塩は専売公社製の粗製塩を使い、あらかじめ練りませ水の一部にとかしておいて使用した、粗製塩の成分を表-3に示す。

配合は防錆剤毎に2種（水セメント比55%と70%に対応）で計4種である。表-4に示す。スランプは一応10cmを目標としてある。

骨材は使用に先立ち、1日前に翌日練る分を骨材置場から取り出し、十分空練りし、よくませた後、バケ

* 米国では、橋梁のコンクリート床版の鉄筋腐食の存在を探知する、非破壊試験法として広く実用化されているが、文献入手不十分で不確な点や不明な点が多い。

表-1 細骨材の性質

名 称	比 重	吸水量 (%)	粗粒率	粒度 (累加通過百分率), ふるい目の開き(mm)						
				5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	受皿
台湾産川砂	2.66	1.08	2.86	100	81	57	38	25	12	0

表-2 粗骨材の性質

名 称	最大寸法 (mm)	比 重	吸 水 量 (%)	単位重量 kg/m ³	粒度 (累加通過百分率), ふるい目の開き(mm)						
					25	20	15	10	5	2.5	受皿
本部産碎石	20	2.70	0.33	1600	100	99	84	41	2	1	0

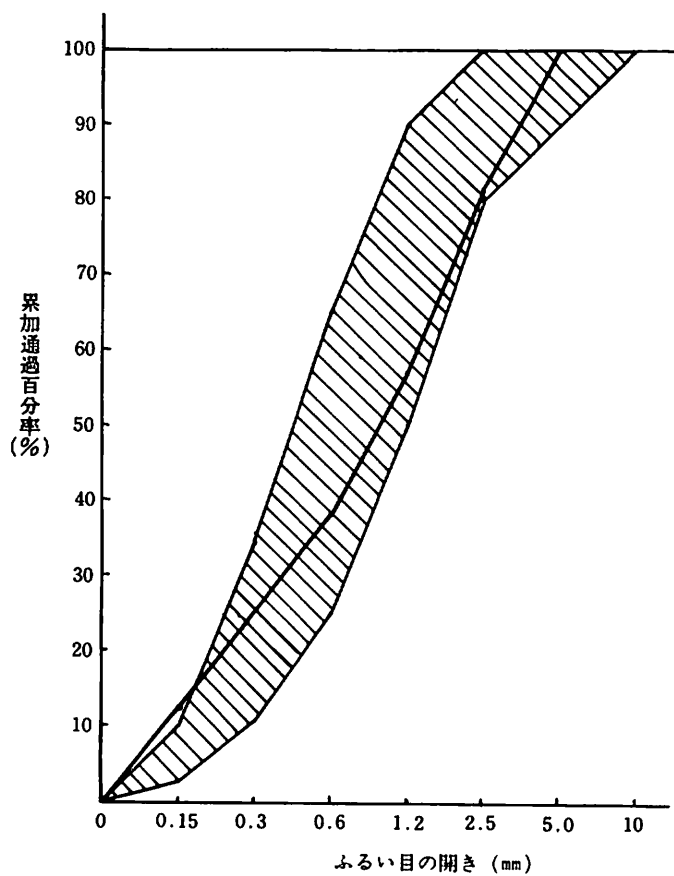


図-1 細骨材粒度

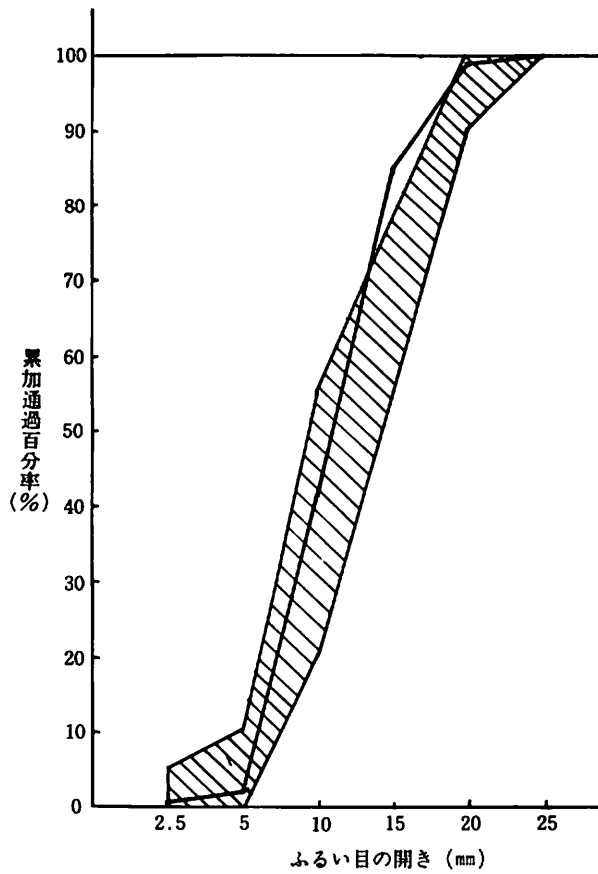


図-2 粗骨材粒度

表-3 粗製塩の成分

イオン	Cl ⁻	Na ⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻	CO ₃ ⁻
%	60.3	39.5	0.02	0.02	0.10	0.05

表-4 配 合 表

防錆剤の種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 (%)	粗骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	防 錆 剤 (g/m ³)
O ₁	20	10	1.00	55	41.4	195	355	752	1080	{ 3.0 6.0
O ₁	20	10	1.00	70	43.4	195	279	816	1080	
O ₃	20	10	1.00	55	42.7	185	336	794	1080	{ 2.4 4.8
O ₃	20	10	1.00	77	44.6	185	264	855	1080	

ツに入れ、ぬれた布で被って保管した。その際、試料を採取し含水量を測定し、翌日、ねりませの際、それにもとづいて、水分の調整を行った。また、ねりませの際も骨材試料の抜き取りを行い、後日、配合をそれにもとづいて補正した。スランプがほぼ予想通りの値が得られ、2日間での含水量の変化はごく僅かであった（表-4及び7を比較参照）。

ねりませは実験室用の容量60ℓの可傾型ミキサーを使い、全材料を投入してから、3分間ねりませた。ミキサー2回練り分を一諾にして、ねり板上でさらにねりませ、それから圧縮強度供試体（径10cm）3個、発錆試験用供試体（以後、単に供試体と呼ぶ）10個を作り、スランプ・ブリージング・空気量等の測定も同時に行った。

供試体に埋込んだ鉄筋は丸鋼でSR24に属し、実験Vに使ったものとはほぼ同じものである。引張強さは平均 $46.8\text{kg}/\text{cm}^2$ であった。鉄筋は20cm（一部は22cm）に切断し、ワイヤブラシ及び紙やすりでみがいて黒皮を落としたものを使用した。

供試体の大きさは12（高さ）×20（幅）×30（長さ）

cmの直方体で、長さ方向に鉄筋を5cm間隔に平行にならべてある。供試体の型枠は木製で、ボルトを使って組立て、脱型が容易にできる様に工夫をこらし、隅角部はグリースをつめて水漏れを防いであり、数回の使用に耐えるようにしてある。鋼製定規を使って、所定のかぶり（本実験では上面より2cm）を保つようにした。コンクリートは2回に分けて打ち込み、突き棒及び棒状バイブレーターを使って、十分に締め固めた。更に、打ち込み後2時間程して、表面や側面を軽打して、ブリージング水の滯溜を除去することにつとめた。翌日脱型し、1週間はそのまま室内に放置し、その後、実験室前の骨材置場に移し、製作時の上面を上にして、自然の風雨・日照にさらした。各実験番号の供試体でNo.7、8、9、10のものは、3本のうち1本の埋込み鉄筋（端に位置している）は長さ22cmにしておき、その一端にビニール被覆した径1.5mmの電線を巻いてハンダ付けし（供試体製作時の上面部に）、鋼電線はそのまま鉛直に立てて、供試体の外部に出してある。これは埋込み鉄筋の腐食電位を測定するためである。巻いてハンダ付けした鉄筋の部分（端から約2

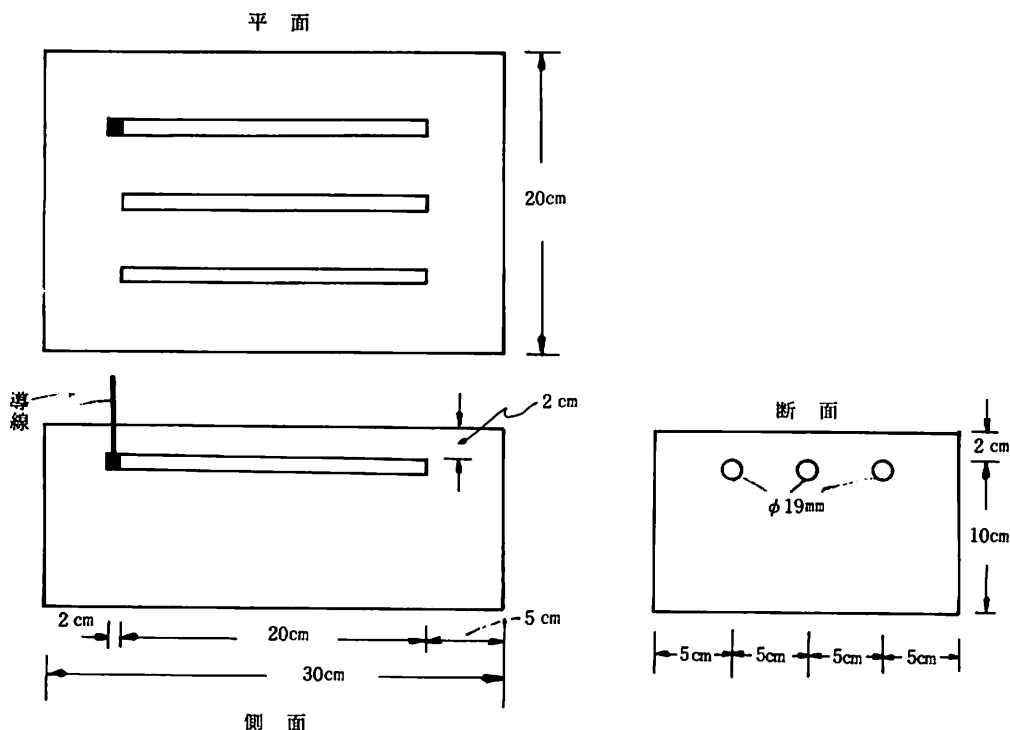


図-3 供試体の寸法（No.7～10、各実験番号共通）

cmの部分)は、エポキシ系の接着剤(ショーボンド#101)を使って、十分な厚さ(ハンタ付けの盛り部分をおおいかくし、さらに2mm程度、ハンタ付けのない部分はうすい)に被い、コンクリートとの直接の接触はさけるようにしてある。なお、エポキシ系接着剤の塗覆はコンクリート打ちの前日に行った。この有様は図-3のスケッチを参照されたい。

実験は実験計画法に従って行われ、要因としてはコンクリート中の塩分量(記号A)4水準、水セメント比(C)2水準、防錆剤の種類(O)2水準、防錆剤の添加量(D)2水準で、以上の要因・水準を直交表 $L_{16}(2^5)$ にわりつけてある。要因・水準は一括して表-5に示してあり、わりつけはスランプ値等と共に表-6に示してある。本実験の塩分量は従来筆者等

多い部分をそのまま水洗等の処理をしない場合の塩分量であり、防錆剤使用等の対策によって、鉄筋の発錆を防止できるか否か興味ある事項である。A₄水準は0.133%の塩分で、海砂換算で約0.40%に対応している。この塩分量は海砂中の塩分集中部の値に対応するものとしてえらんである。なお、本実験は直交表を使った一部実施法であるので、主効果と交互作用との交絡がでてくる。そこで従来の経験から、水セメント比、防錆剤の種類、防錆剤の添加量との間には交互作用はないものとして、実験を計画してあり、塩分量とこの3つの主効果との間の交互作用は測定できるようにしてある。その結果、水セメント比と防錆剤添加量との交互作用は防錆剤の種類の主効果と交絡する結果となっている。

表-5 因子と水準

因子 水準 記号	塩分量* (%)	防 錆 剤 添加量**	水セメント 比(%)	防 錆 剤 の 種 類
	A	D	C	O
1	0.033	標 準 量	55	O ₁
2	0.067	標 準 量 の 2 倍	70	O ₃
3	0.100			
4	0.133			

* 配合時のコンクリート重量に対するNaClの重量パーセント

** メーカーの海砂に対する推奨量に対して

が行ってきた実験とは異なり、比較的低濃度域に集中し、その間隔もせまい。これはコンクリート中の鉄筋を発錆させる塩分量の「しきい値」を知りたかったからである。塩分量水準A₁は0.033% (配合時のコンクリート重量に対する値、以下、特に断わらないかぎり同じ)で、海砂に換算すると約0.10%に相当し、従来から、防錆剤を使用しない場合の塩分上限量とされている値である。また、この値は日本建築学会や土木学会の海砂塩分量上限値である。第2水準A₂は0.067%で海砂換算0.20% (使用細骨材量が配合によって異なるので、海砂換算塩分量は配合によってかなり異なる。実際の値は表-7参照)で、建設省住宅局建築指導課長の通達の上限值に等しい。水準3のA₃の0.100%は海砂換算塩分量で約0.30%で、普通の海砂の含塩量の

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮強度およびその他の性状

本実験では断面積測定以外に、供試体製作時にコンクリートの諸性質を測定したので、それらの結果を因子・水準わりつけと共に表-6に示してある。

まず強度に対する塩分量や防錆剤の影響をみるため、ねりませ時の骨材の含水量やコンクリートの空気量による配合の修正を行った。当然、これによって水セメント比に多少の変化が起こるわけで、その強度に対する影響が解析に入ってくるのを防ぐため、水セメント比55%附近及び70%附近で、セメント水比→圧縮強度の関係を夫々最小二乗法により求めて、それによる強度の修正を行った。修正した配合及び強度を表-7に示す。1実験番号当り3回のくり返しとみても、3個の平均値をとってみても、分散分析の結果は水セメント比の影響が圧倒的に大きい。その他の主効果はO (防錆剤の種類)を除いて交互作用の方が大きい結果となっている。防錆剤の種類の強度に及ぼす影響は平均値を採用した場合有意とならない(3回のくり返しとみた場合は1%台の有意性成立)が、傾向としてはO₃>O₁となっている。しかし、本実験が一部実施法なので、水セメント比55%の場合がD₁O₁、D₂O₃、水セメント比70%の場合がD₂O₁、D₁O₃と云う組合せとなっている。防錆剤添加量の場合、有意性は成立しないし、差もごく僅かである。つまり2倍量程度迄の添加は強度に殆ど影響しないと言うことである。無添加の場合

表-6 スランプ、ブリージング、圧縮強度

実験 番号	実験 順序	列 番 号				・ス ラン プ (cm)	率 ブ リ ー ジ ン グ (%)	継 ブ リ ー ジ ン グ 時 間 (分)	気 温 (℃)	湿 度 (%)	温 度 (℃)	コン ク リ ー ト	強 度 **			*** 単 位 重 量 kg/m³
		(1)(2) (3)	(4)	(8)	(12)											
		要 因 名														
		A	D	C	O								(kg/cm²)			
1	1	1	1	1	8.0	12.01	300	16.5	78	19.0	313	275	330	2381		
2	13	1	1	2	2	10.5	22.58	270	16.0	77	19.5	212	215	211	2383	
3	16	1	2	1	2	7.5	11.46	360	21.0	84	23.0	349	348	350	2390	
4	7	1	2	2	1	13.0	17.93	240	21.0	80	23.5	194	205	202	2365	
5	14	2	1	1	1	11.0	9.28	300	16.0	77	20.0	298	289	309	2383	
6	9	2	1	2	2	12.5	22.39	300	21.0	80	22.5	236	222	236	2381	
7	11	2	2	1	2	10.0	17.19	360	16.0	77	20.0	282	305	303	2393	
8	15	2	2	2	1	10.0	14.13	270	21.0	84	23.5	212	212	220	2370	
9	6	3	1	1	1	10.5	11.63	270	18.5	74	20.0	345	351	336	2385	
10	18	3	1	2	2	10.0	20.33	300	15.8	70	16.5	244	231	247	2390	
11	17	3	2	1	2	8.0	9.64	360	21.0	84	24.0	313	305	313	2388	
12	5	3	2	2	1	11.0	22.52	270	18.5	74	20.0	247	229	254	2370	
13	2	4	1	1	1	10.5	11.02	300	16.5	78	18.5	349	353	351	2381	
14	10	4	1	2	2	10.5	25.50	300	21.0	80	24.0	233	234	230	2387	
15	8	4	2	1	2	9.5	17.94	360	21.0	80	22.1	343	348	350	2394	
16	12	4	2	2	1	13.0	19.26	240	16.0	77	19.5	184	195	185	2368	
11'	3	3	2	1	2	14.0	18.64	420	16.5	78	18.5	354	352	351	2381	
10'	4	3	1	2	2	17.0	20.26	300	18.5	74	20.0	227	217	227	2383	
17	19	1	0	1	0	9.5	7.33	330	15.8	70	17.0	350	340	353	2386	
18	20	1	0	2	0	9.5	19.11	270	15.8	70	16.5	224	233	229	2373	

* 2回の測定値の平均を0.5cm単位に丸めた値

** $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の供試体の28日圧縮強度

*** 配合時の重量で、骨材の含水量の変化による配合修正は考慮してある。

とくらべても大差はない。塩分量水準 A_1 で、同一水セメント比で比較した場合、 $W/C=70\%$ の場合、差がなく、 $W/C=55\%$ の場合 $D_2>D_6>D_1$ となるが、これは防錆剤の種類の影響とみた方がよろしい。塩分量の影響は複雑で、統計的には平均値を採用した場合有意とはならない。傾向としては従来の実験の傾向 ④ と一致し、塩分量がふえるに従い、強度は一旦減少し、後に増加している。今回の場合 $A_4>A_3>A_1>A_2$ となっている。全体として言えることは、供試体製作日の影響が大きく作用している。例えば、1月19日製作の供試体はすべて平均値を下回っており、1月12日製作の供試体は4実験のうち、3が平均値を上回っている。これはセメント強度の影響とみられる。

スランプについては、最も影響の強いとされている

単位水量や混和剤の種類が異なるので、各因子の影響についてははっきりとした傾向はつかめない。

ブリージング傾向は細骨材の粒度の関係から、著しく多くなっており、水セメント比55%でブリージング率は平均12.52%、70%で20.58%となっている。分散分析で有意な因子は水セメント比(1%台)と防錆剤の種類(5%台)とである。後者の場合C×Dの交互作用と交絡しているのもので、どちらの影響かははっきりしない。単位水量がほぼ同一の場合、水セメント比がブリージング率に与える影響は決定的で、水セメント比が小さい程ブリージングは少ない。この傾向は従来の実験結果 ④ と一致している。防錆剤の種類の影響はC×Dと交絡しているが、 $O_3>O_1$ となっている。防錆剤の添加量の影響はみとめられない。塩分量の影響は塩分

表-7 修正した配合及び強度

実験 番号	水セ メント 比 (%)	セ メント 水 比	細 骨 材 率 (%)	空 気 量 (%)	単 位 量						修 正 強 度			含 塩 率	
					水	セ メント	細 骨 材	粗 骨 材	塩 分 量	防 錆 剤 量	(水セメント比 55.2或は70.1 %に換算) (kg/cm ³)			に1コ 対1トン し重ク て量り	し重海 で量砂 に乾 対燥
					(kg/m ³)				(g/m ³)	(cc/m ³)					
1	55.2	1,812	41.3	1.00	196	355	750	1080	786	3001	313	275	330	0.033	0.106
2	70.6	1,417	44.4	1.00	186	264	851	1080	786	2397	216	219	215	0.033	0.093
3	55.1	1,814	42.7	1.20	185	336	791	1078	789	4792	348	347	349	0.033	0.114
4	71.1	1,406	43.3	1.05	198	278	811	1077	780	5985	213	214	211	0.033	0.097
5	55.4	1,806	41.3	1.00	196	355	749	1082	1572	3000	301	292	312	0.066	0.212
6	71.3	1,402	44.1	1.05	187	262	844	1087	1560	2379	247	233	247	0.065	0.187
7	55.4	1,804	42.6	1.10	186	336	790	1080	1578	4791	286	309	307	0.066	0.202
8	70.8	1,413	43.4	0.95	197	278	814	1079	1563	5996	218	218	226	0.066	0.194
9	54.8	1,826	41.4	1.00	194	355	752	1082	2359	3004	338	344	329	0.099	0.317
10	69.0	1,449	44.6	1.05	183	265	858	1082	2363	2403	233	221	237	0.099	0.278
11	55.7	1,796	42.7	1.25	187	335	789	1075	2362	4781	321	313	321	0.099	0.302
12	69.7	1,435	43.4	1.05	194	279	817	1080	2347	6001	243	225	250	0.099	0.290
13	55.2	1,812	41.3	1.00	196	355	750	1081	3143	3002	349	353	351	0.132	0.424
14	71.3	1,403	44.1	0.90	187	262	846	1088	3124	2382	233	244	240	0.131	0.373
15	55.9	1,787	42.6	1.00	188	336	789	1078	3155	4791	355	360	362	0.132	0.404
16	70.5	1,418	43.3	1.00	196	278	812	1081	3126	5995	188	199	189	0.132	0.389
11'	55.2	1,812	41.3	1.00	196	355	750	1080	2357	4802	354	352	351	0.099	0.318
10'	69.7	1,435	43.4	0.50	195	280	821	1086	2366	2414	223	213	223	0.099	0.293
17	54.1	1,848	41.5	1.05	192	355	755	1082	787	—	333	323	336	0.033	0.105
18	69.1	1,448	43.5	1.05	193	279	819	1082	783	—	214	223	219	0.033	0.097

量の差が大きくないので、統計的には有意差もなく、平均値をくらべても殆ど差がない。傾向としては、塩分量がふえると、ブリージング量も増加することが認められる。これは他の実験シリーズの傾向と矛盾するが、塩分量間の差が小さいためであろう。

ブリージング継続時間に対する各因子の影響のうち、水セメント比と防錆剤の種類との影響は分散分析（主効果以外は誤差に算入）の結果では1%以下の危険率で有意性がみとめられている。ブリージング率の場合と異なり、ブリージングの多いW/C=70%の方が早くブリージングを終了する。防錆剤の種類の影響ではブリージングの多いO₃の方が継続時間も長くなっている。塩分量及び防錆剤添加量はブリージング継続時間に殆ど影響を与えない。

3.2 発錆試験

今回発表の分は3ヶ月と6ヶ月目の発錆面積測定結果である。いずれも各実験番号毎に違った供試体から1本ずつ計3本の鉄筋をとり出してあり、とり出した供試体は各材令共に共通で、3ヶ月目は端部、6ヶ月目は中央に埋込まれた鉄筋である。鉄筋のとり出し方は従来と同じ¹³⁾で、とり出すべき鉄筋位置の上下面に鉄筋を当て、割裂引張試験の要領で、圧縮力をかけ、供試体を割り、とり出した鉄筋が腐食していた場合、上、下面の写真を撮る。その後、鉄筋にビニールシートを当てて、錆面積をふちどりし、更に、それを広げて、方眼紙にうつしとり、方眼紙の目数を数えて、腐食面積を算出した。結果は10⁻¹cm²単位に丸めて、表-8に示してある。空白部分は発錆がないので零を省略してある。

表-8をみて気付くことは空欄が多いことで、発錆

表-8 発錆面積測定結果

実験 番号	実験 順序	列 番 号			発錆面積 (10 ⁻¹ cm ²)			
		(1)(2) (3)	(4)	(8) (12)				
		要 因 名			3 ヶ 月		6 ヶ 月	
		A D C O						
		水 準				計		計
1	1	1	1	1		0		0
2	13	1	1	2	2		0	0
3	16	1	2	1	2		0	0
4	7	1	2	2	1		0	0
5	14	2	1	1	1		0	0
6	9	2	1	2	2		0	0
7	11	2	2	1	2		0	0
8	15	2	2	2	1		0	0
9	6	3	1	1	1	12 0 0	12	15* 9 0 24
10	18	3	1	2	2		0	0
11	17	3	2	1	2		0	0
12	5	3	2	2	1		0	0 9 0 9
13	2	4	1	1	1	0 0 13	13	0 12 25 37
14	10	4	1	2	2	22 18 5	45	56 10 0 66
15	8	4	2	1	2	19 0 9	28	24 0 0 24
16	12	4	2	2	1		0	0
11	3	3	2	1	2	0 25 0	25	0 0 14 14
10	4	3	1	2	2	26 8 0	34	0 5 34 39
17	19	1	0	1	0		0	0
18	20	1	0	2	0		0	0

* 95と云う数値が得られたので、もう1本鉄筋を取り出して、この値を得た。

している鉄筋の方が少ないことである。これは塩分量が従来の実験シリーズにくらべ少ないためである。また、発錆しているものは材令3ヶ月から発錆が生じており、材令の経過と共に発錆面積は増大していて、発錆が止まる傾向はみられない。この点は他のシリーズも同じである¹³⁻¹⁷。

まず発錆に対する塩分量の影響であるが、従来の諸実験と同じように、この因子の影響は他の因子の影響にくらべて圧倒的に大きい。分散分析の結果は表-9に示されているように3ヶ月で1%以下、6ヶ月で5%以下の危険率で有意となっている。しかしながら表-9の寄与率をみると、従来の実験の値^{13, 17, 18}にくらべて非常に小さい。これは誤差の占める寄与が大きいので、原因は発錆していない鉄筋が多いためであ

表-9 分散分析の結果

要 因	有 意 性		寄 与 率 (%)	
	3 ヶ 月	6 ヶ 月	3 ヶ 月	6 ヶ 月
A	**	*	27.2	14.7
C	なし	なし	小	小
O	なし	なし	2.2	2.3
D	なし	なし	1.4	小
A×C	なし	なし	小	小
A×O	**	なし	15.33	1.5
A×D	なし	なし	小	2.4

* 5%以下の危険率で有意

** 1%以下の危険率で有意

ろう。全体として供試体の塩分量が少なく、材令が若いせいでもある。塩分量が少ないA₁(0.033%), A₂(0.067%)の供試体は6ヶ月迄、全然発錆がみられない。この程度までの塩分量では防錆剤の効果は十分みとめられると云うことであろう。A₁水準では防錆剤を入れなくても発錆はない(No17, 18供試体), A₁水準は海砂換算で約0.10%の塩分量で、建築学会¹⁹や土木学会²⁰の規定上限値の正しさを実証している。但し実験IIシリーズでは配合時のコンクリートの塩分量0.05%で防錆剤を加えても発錆が少量ながらみられている¹⁹。A₂水準の塩分量は海砂換算で0.187%から0.212%の間にある。この程度の塩分量では本実験では鉄筋の発錆はないが、場合によっては防錆剤を適量添加しても発錆があることになる¹⁹。A₃水準(0.10%)では3ヶ月から一部に発錆がみられ、No10', No11'を加えると過半の鉄筋が防錆剤の種類に関せず発錆している。市販防錆剤の効果はこの程度の塩分量になると発錆を防止できないと云えよう(実験I¹⁹でも同じ結果), 発錆量自体はごく少なく、発錆面積率は材令6ヶ月までで小さいものは零、大きいものは7.9, 2.8, 2.2%であるが、3ヶ月から6ヶ月へと材令の経過と共に発錆量は増大の傾向がみられる。海砂の塩分量でみると0.278%から0.318%で、この程度の塩分は海砂の塩分としてはよくみかける量である。特にスランプの大きいNo10', 11'供試体の発錆が多いことに注目したい。A₄水準(0.133%)ではNo16を除いて、すべての供試体中の鉄筋に発錆がみられ、発錆面積の合計及び平均は他の水準のそれにくらべて格段に大きく、t-検定で3ヶ月では0.1%台、6ヶ月では5%台の有意差がある

表-10 平均値の有意性検定結果 (塩分量)

	3 ヶ 月	6 ヶ 月
A ₁ ~ A ₂	な し	な し
A ₁ ~ A ₃	な し	な し
A ₁ ~ A ₄	* * *	* *
A ₂ ~ A ₃	な し	な し
A ₂ ~ A ₄	* * *	* *
A ₃ ~ A ₄	* * *	*

* * * 0.1%以下の危険率で有意

表-11 発錆面積 * 2 元表 (A と C)

		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
C ₁	3 ヶ月	0	0	12	41
	6 ヶ月	0	0	24	61
C ₂	3 ヶ月	0	0	0	45
	6 ヶ月	0	0	9	66

* いずれも 3 本の鉄筋についての和 ($\times 10^{-1} \text{cm}^2$)

(表-10参照)。海砂換算の塩分量は0.373% から0.424% で、海砂の塩分集中部の塩分量に相当しており、市販生コンで実際に実現されている塩分量である。このような塩分量では鉄筋は発錆するし、材令の進行と共にその増大はさけられない。ただ、Na16供試体 A₃D₂C₂O₁ が 6 ヶ月に至るも発錆していないことに注目したい。実験 V でもこれと同じ傾向がみられる。これについては後程言及する。

鉄筋の発錆に対する水セメント比の影響は小さい。3, 6 ヶ月共に分散分析及び t-検定で有意とはならない。これは因子水準のわりつけの関係も影響している様で、鉄筋の発錆がみられる A₃, A₄水準で、水セメント比70% の方の鉄筋のうち、Na12, Na16が殆ど発錆零であるためである。これは因子の組合せ D₂O₁ が影響していると思われる。実験 V では水セメント比50% であるが 1 年半に至るも塩分量0.15% でこの組合せは発錆していない。この Na12, Na16供試体の存在のため、水セメント比70% の方が55% のものより鉄筋の発錆量はわずかながら少なくなっている (表-11参照)。水セメント比が大きい方が小さいものよりも防錆上有利であると云う表面的現象は実験 I 10, 19でも実験 III 17でもみられている。実験 I の場合、水セメント比の影響よりも、塩分量と防錆剤添加量との組み合わせの影響の方が発錆に対し強く作用するためと説明している。実験 III に対しては、くわしく検討していない。本実験の場合は A₃, A₄ 水準の塩分量に対し、D₂O₁ が有効に発錆を抑制したためであり、水セメント比70% の方が50% よりも防錆上有利とはならないと指摘しておく。なお、水セメント比の発錆に対する影響については、後日、新しいシリーズの実験でたしかめるつもりである。

鉄筋の発錆に対する防錆剤の種類 (O) 及び添加量 (D) の影響については一諸に考察する。分散分析の結果は両方の因子共に有意となっていない。平均値差をくらべてみても、防錆剤の種類・添加量共に、3, 6 ヶ月において、発錆面積に有意差はない。しかし、発錆面積を比較してみると、3, 6 ヶ月共に O₁ の方が O₃ よりも少ない (表-12)。3 ヶ月では大差があったが、6 ヶ月ではあまり差がなくなっている。両方の防錆剤の効果を比較して、O₁ の方が O₃ より有効であるとは簡単には言えない。6 ヶ月では差が小さくなっているし、表-10をよく観察すると、A₃段階では、O₁ は僅かであるが発錆がみられるのに対し、O₃ には発錆している鉄筋は全然ない。それなら、A₃段階では O₃ が O₁ より効くかと云うと、必ずしもそう云えない。と言うのは、Na10', Na11' 供試体はスランプが多少大きい方が、いずれも O₃ を使用しており、かなりの発錆がみられるからである。A₄段階では O₃ の方が圧倒的に発錆量が多い。これは水セメント比の影響の所で述べたように、O₁ D₂ の組み合わせが防錆上有効に作用しているからである。A₄段階では O₁ の方が有利のようにみえるが、防錆

表-12 発錆面積 2 元表 (D と O)

	O ₁	O ₂	合 計
3 ヶ 月			
	D ₁	25*	45
	D ₂	0	28
合 計	25	73	
6 ヶ 月			
	D ₁	61	66
	D ₂	9	24
合 計	70	90	

* いずれも 12 本の鉄筋についての和 ($\times 10^{-1} \text{cm}^2$)

剤添加量と水セメント比の組み合わせの関係も多少影響しているように思われる。D₁とD₂との効果の比較では表-12からわかるように、メーカー標準量の2倍量添加のD₂の方がかなり、発錆面積は小さい。A₂水準までは両者の効果に差がないが、A₃段階からは実験計画のL₁₆(2¹⁵)表の範囲外のNa10', Na11'を含めて、D₂の方が発錆面積は半分以下である。特に、O₁D₂はA₃、A₄段階を通じて、発錆を有効に抑制していることは前述の通りである。また、発錆面積の推移をみた場合、D₁は材令と共に確実にふえていけると言えるが、D₂の場合、必ずしも、発錆面積が増加しているとは、6ヶ月現在、確言はできない。

Na10, Na11とNa10', Na11'とは単位水量又はスランプを除いて、他の条件はすべて同じである。単位水量の少ないNa10と11とは6ヶ月現在、発錆がみられないのに対し、Na10'と11'の方は、僅かであるが発錆はみられる。しかし、今後共にこの傾向が続くか否か不明である。単位水量が少ないことは耐久性上有利であると言われているが、その実証となるか否かは、今後の推移を待つ必要がある。

3.3 半電池電位測定試験

銅／硫酸銅半電池に対するコンクリート中に埋め込まれた鉄筋の電位測定方法は、アメリカのカリフォルニア州道路局が開発し、アメリカの橋のコンクリート床版の鉄筋の発錆箇所を発見するために広く用いられている方法^{11)~13), 21)~23)}で、本実験の供試体に対し

ては図-4の様に適用した。図中の電位差計はY社製の携帯用直流電位差計で10 μ Vまで測定できる精密なものであり、本実験に十分役立った。なお、昭和53年度科研費で購入したものである。半電池は手製で、直径2.5cm程の厚肉ガラス管の上・下端にコルクで栓をし、中に幅1.5cm、厚さ2mm、長さ10cm程の純銅板を電極として挿入してある。銅電極の上部は銅線を接続し、上部のコルク栓を通して外部に出してある。ガラス管の中には、約50°Cの蒸留水中に固形硫酸銅が常に存在するような状態で溶かして冷やした液を満たしておいた。なお、硫酸銅溶液は下側のコルク栓を通して、ごく僅かであるが、滴り落ちるように工夫した。これは電気回路を形成させるためである。

測定は早いものはコンクリート打設の翌日からおそいものでも4週間以内に開始した。その後1週間に1回各供試体に対して行ない、3ヶ月位後からは、1週間に1週日時を定めて、全供試体（埋め込み鉄筋につないだ導線が供試体の外に出ているもの、各実験番号毎に4個づつある）について一時に測定した。半年位までの測定は図-4に示してあるように、導線のつないである鉄筋について、供試体上面から（埋め込み鉄筋に近い面で、コンクリート打設時の上面でもある）半電池を当てて測定した。半電池を当てる箇所は図-5の点線の丸印の位置で、導線につないである鉄筋の真上から鉄筋に沿って、両端と中央3箇所である。測定電位は銅／硫酸銅半電池に対しマイナス0.35ボルト等と表現し、絶対値が増えればより卑に傾く等の表現を使うべきであるが、面倒なので、マイナス符号は取

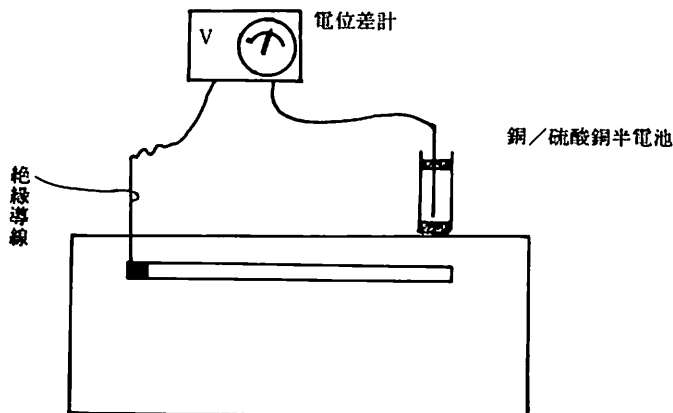


図-4 鉄筋電位測定方法略図

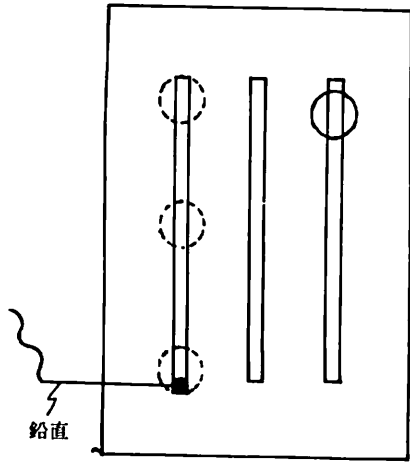


図-5 電位測定箇所(平面)

り去り、絶対値が増加したとき、電位が高くなるとか、増加したとか表現することにする。

上記のような測定方法、測定箇所、半電池電位測定を開始してから、約6ヶ月位の間に次のような事実があらわになった。

(1) 測定される電位は測定箇所及び時間の経過につれて変化する。

(2) コンクリートの含水状態、特に半電池と鉄筋との間に存在するコンクリートの含水状態によって、測定電位は変化する。一般に湿っている場合が高く、表面がぬれている時も高い。その有様の一例をあげれば、日中、太陽に当たっているものを簡単にぬれ雑布で表面をしめさせた時は0.1ボルト台であるが、2時間程前から水をまき、十分吸水させた時は同一実験番号の供試体でも0.2~0.3ボルト台になることがある。

(3) コンクリート表面を湿らした場合、一応測定し、10分後に測定しても、その間に供試体コンクリートの表面部のコンクリートの乾燥が進み測定電位は一般に低下する。逆にぬれ雑布をかぶせ、その上から散水する等の措置を講ずると電位は上昇する。その電位の変動は小数点以下2桁目で1及至4位の値である。供試体の乾燥が進行する様な状況のもとで測定を実施すると短時間の間でも測定のために電位はかなり違う。

(4) 半電池とコンクリート表面との間の接触のさせ方でも電位は変動するが、これは半電池とコンクリートの間に液体接触があれば、(2)、(3)の事項に比べればずっと小さい。

(4) 以上、述べたことにより、半電池電位測定を実施するには、表面及びその近くのコンクリートを十分湿らせておく必要がある。本実験の場合、雨天を除き、2時間程前に、自然放置してある供試体に十分散水後、テント布で被っておいてから、室内にもち込み電位測定をした。しかし、コンクリートのしめり具合を一定にすることはむづかしく、測定された各供試体の日時の経過にともなう電位のバラツキは大きい。

(5) 供試体制作直後の電位は供試体の如何にかかわらず電位は高く、低いもので0.30ボルト附近、高いものは0.40ボルトを上回っていた、これはアメリカの基準¹¹⁾で云う腐食が生じている電位である。製作直後電位が高いのは、コンクリート中に十分水分が存在し、電流をよく通すためと、コンクリートのアルカリ分に接触した鉄筋が表面に酸化保護膜を形成する過程にあるためと推察している。酸化保護膜の形成は一種の腐食過程である。腐食が盛に行われている時に電位が上昇するのである¹²⁾。なお、不動態膜(酸化膜)の形成のためと思われる電位が高い期間は本実験では鉄筋埋込み後2週間から5週間位の間であった。

(6) 測定電位は日時の経過と共に変動はあるが大局的にみて低下していく。この低下傾向は供試体の塩分含有量如何にかかわらず生じた。これはコンクリートの乾燥化が原因であると考えられる。また初期の急速な電位の低下がすべての供試体で観察された(図-6~11)が、これは、保護酸化膜形成活動の停止を意味するものと理解している。

(7) 電位は一本の鉄筋について3ヶ所で測定したが(図-5参照)、測定位置に(半電池をおいた場所)により電位は異なり、電流引き出し用導線接続位置(図-4参照)に近いと電位は高いと言うような一定の傾向は観察されなかった。供試体により、また、日時により電位が高い箇所は異なった。同一日時での測定3ヶ所の電位の差は小さく、最大で小数点以下2桁目の2のオーダー、最小で小数点以下3桁目で3のオーダーであった。理由としては、コンクリートの含水量が時間的に変化することと、腐食活動や酸化膜の形成活動の活発な場所が日時により変化したことが考えられる。

(8) 同一実験番号の供試体でも電位の高さはかなり異なる。その差の大きい時は小数点以下1位で1のオーダーにも達する。これは腐食活動が行われている個所に半電池を当てた場合とそうでない場合とがあ

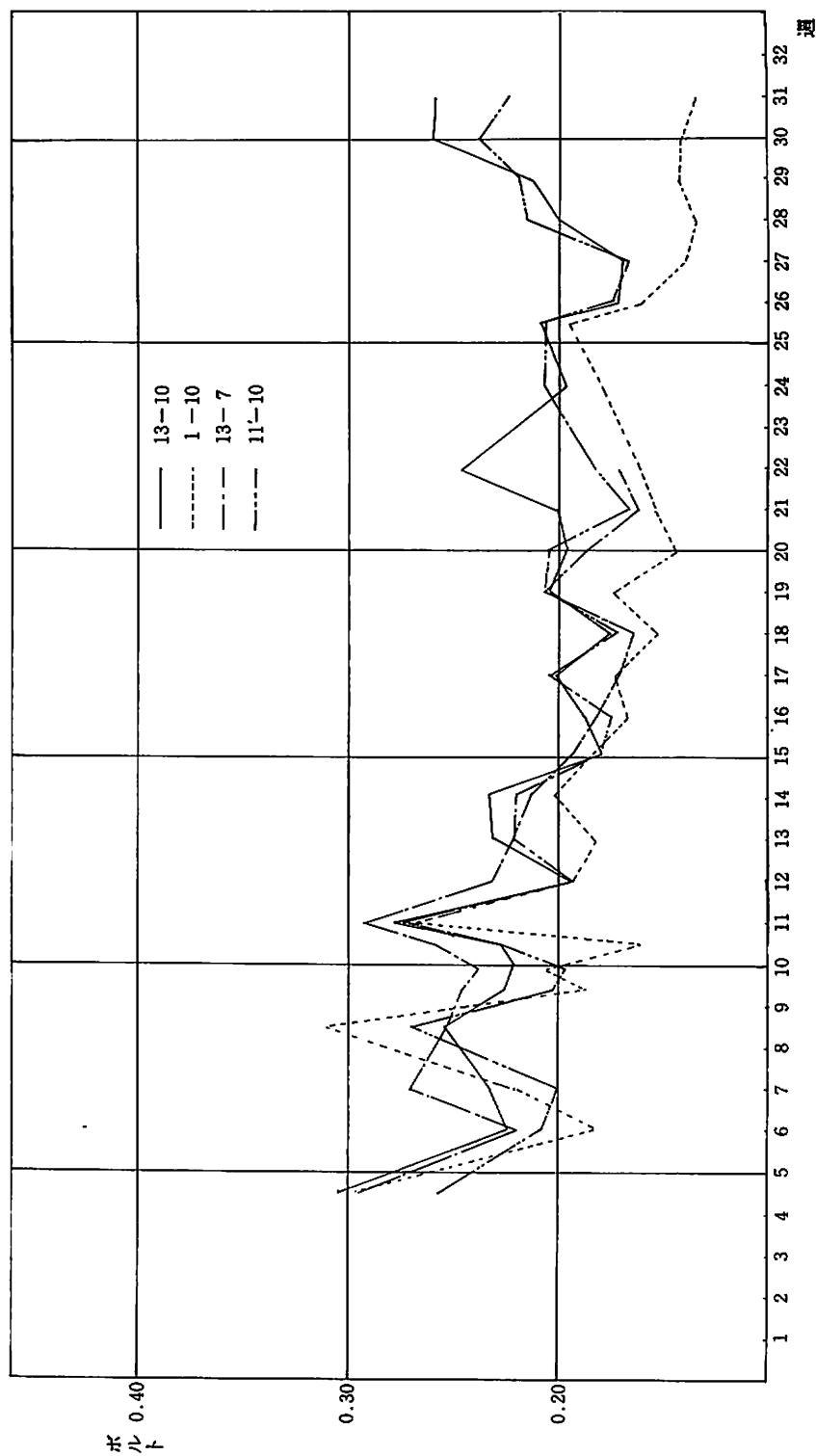


図-6 鉄筋の自然電極電位測定例 その1

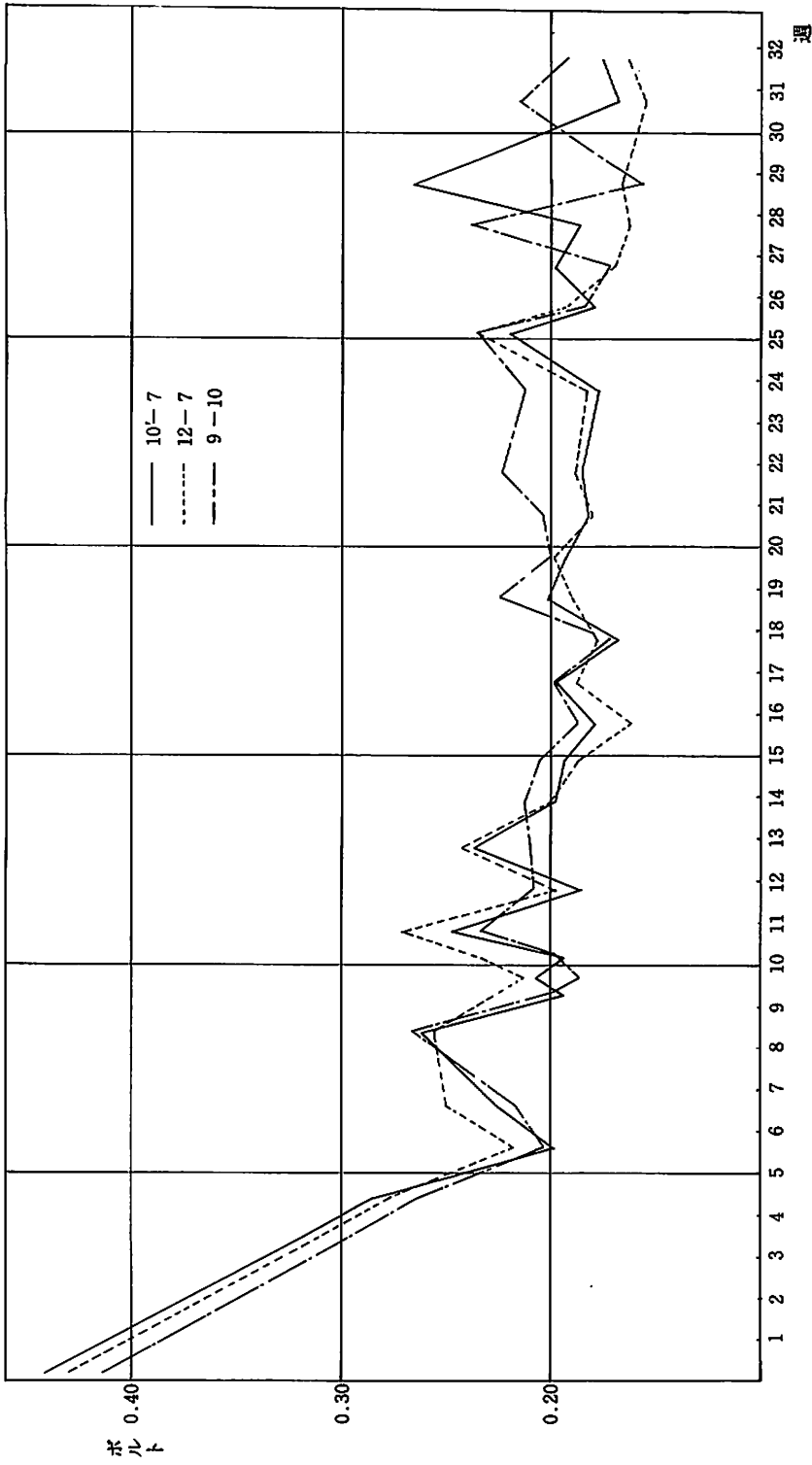


図-7 鉄筋の自然電極電位測定例 その2

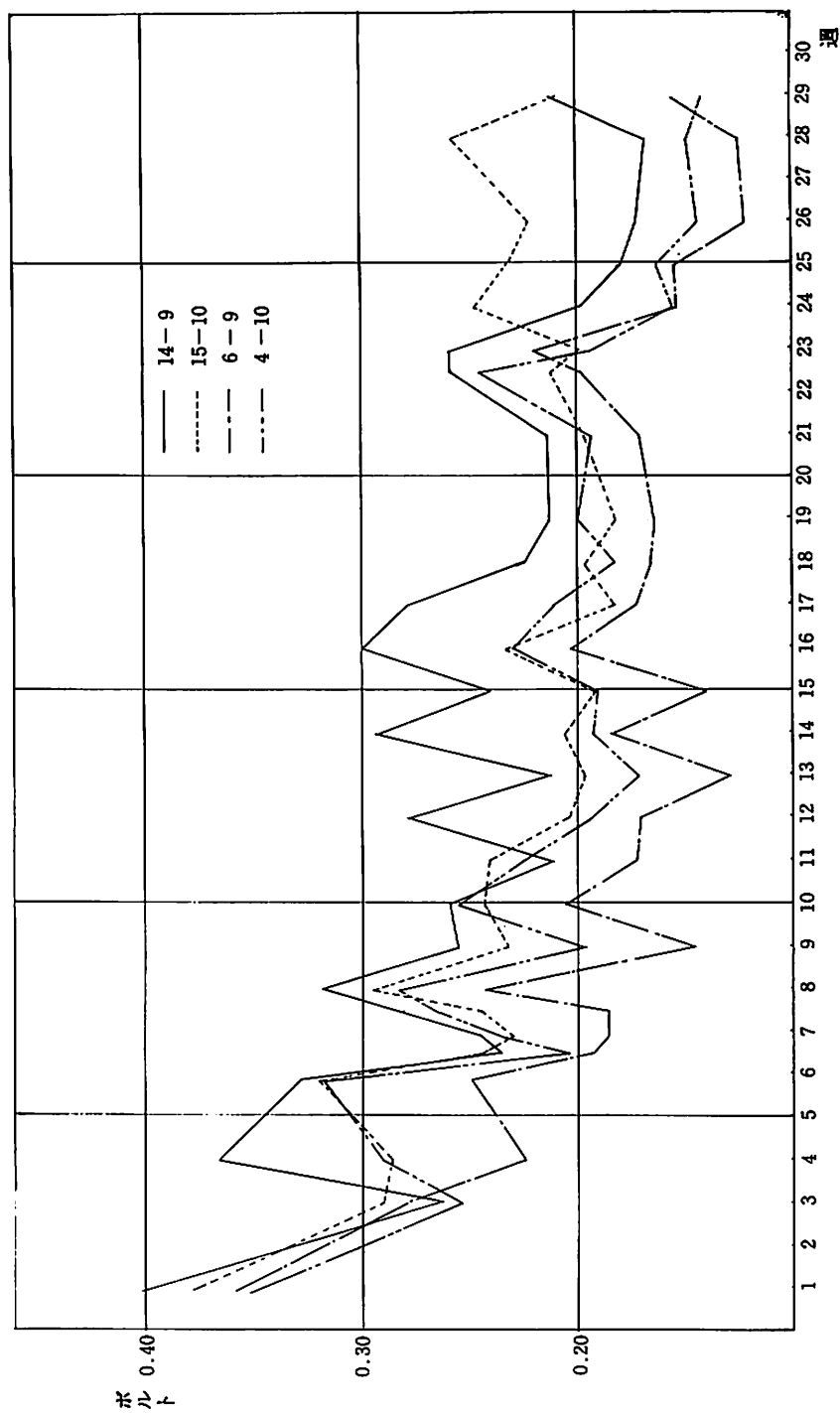


図-8 鉄筋の自然電極電位測定例 その3

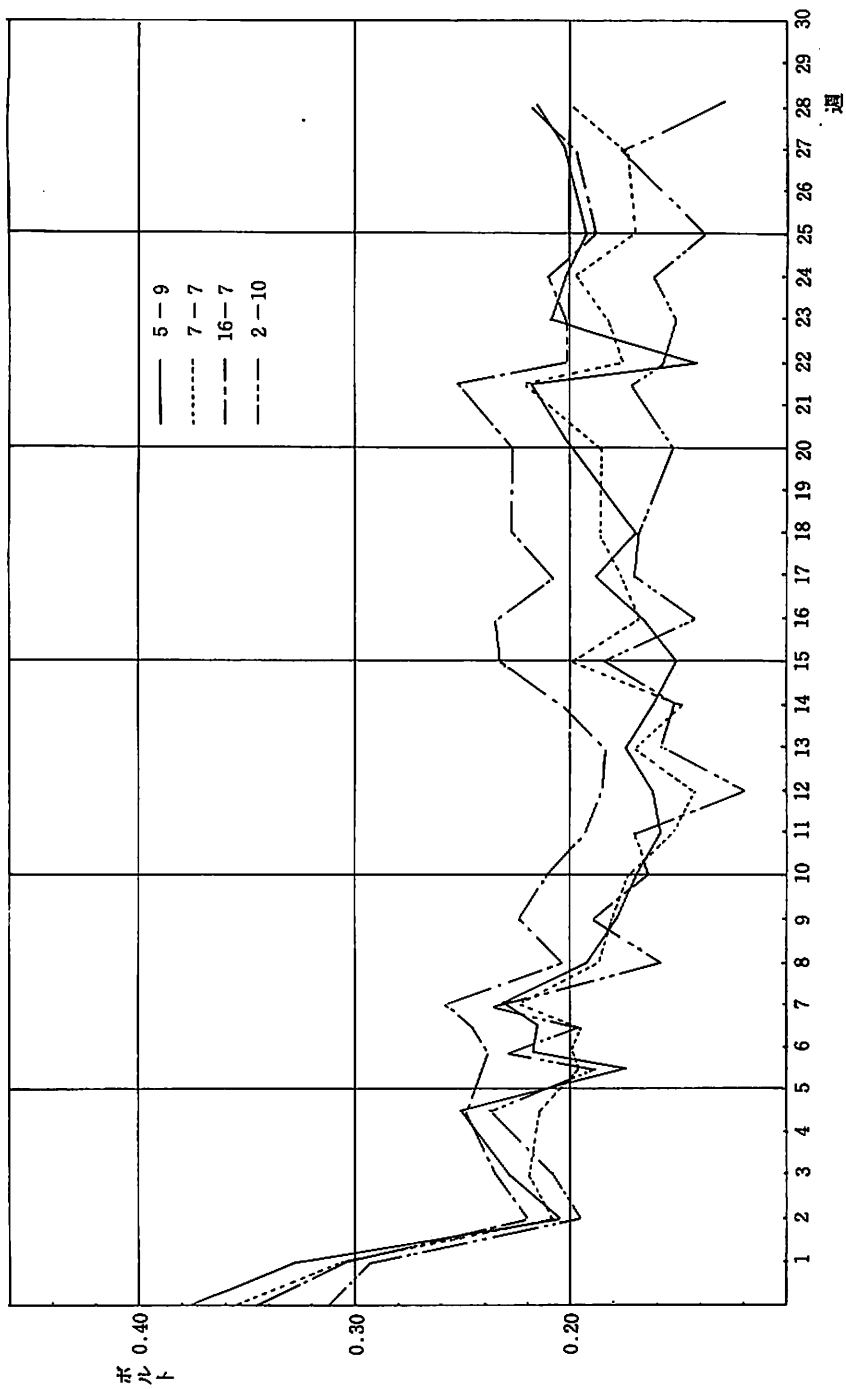


図-9 鉄筋の自然電極電位測定例 その4

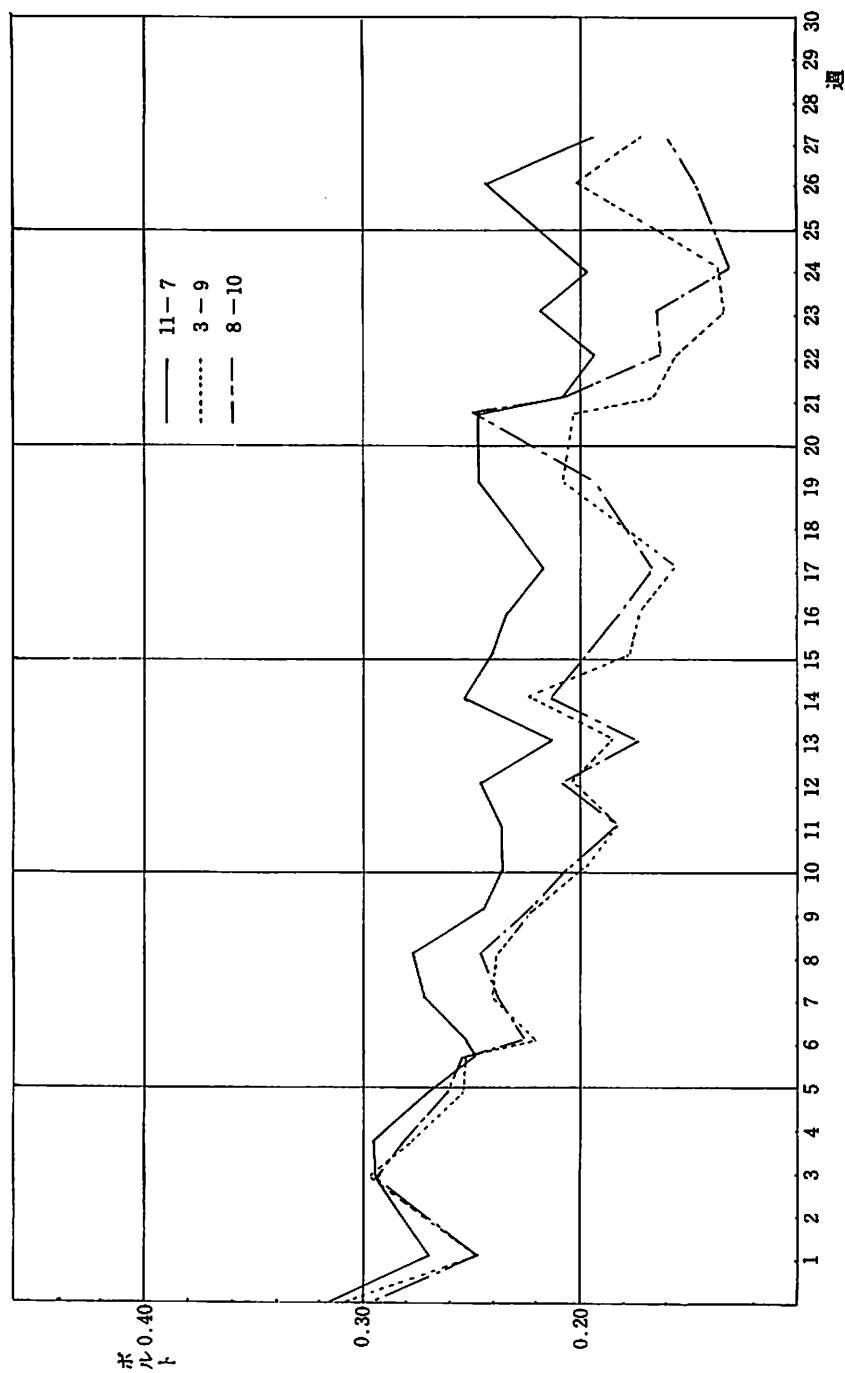


図-10 鉄筋の自然電極電位測定例 その5

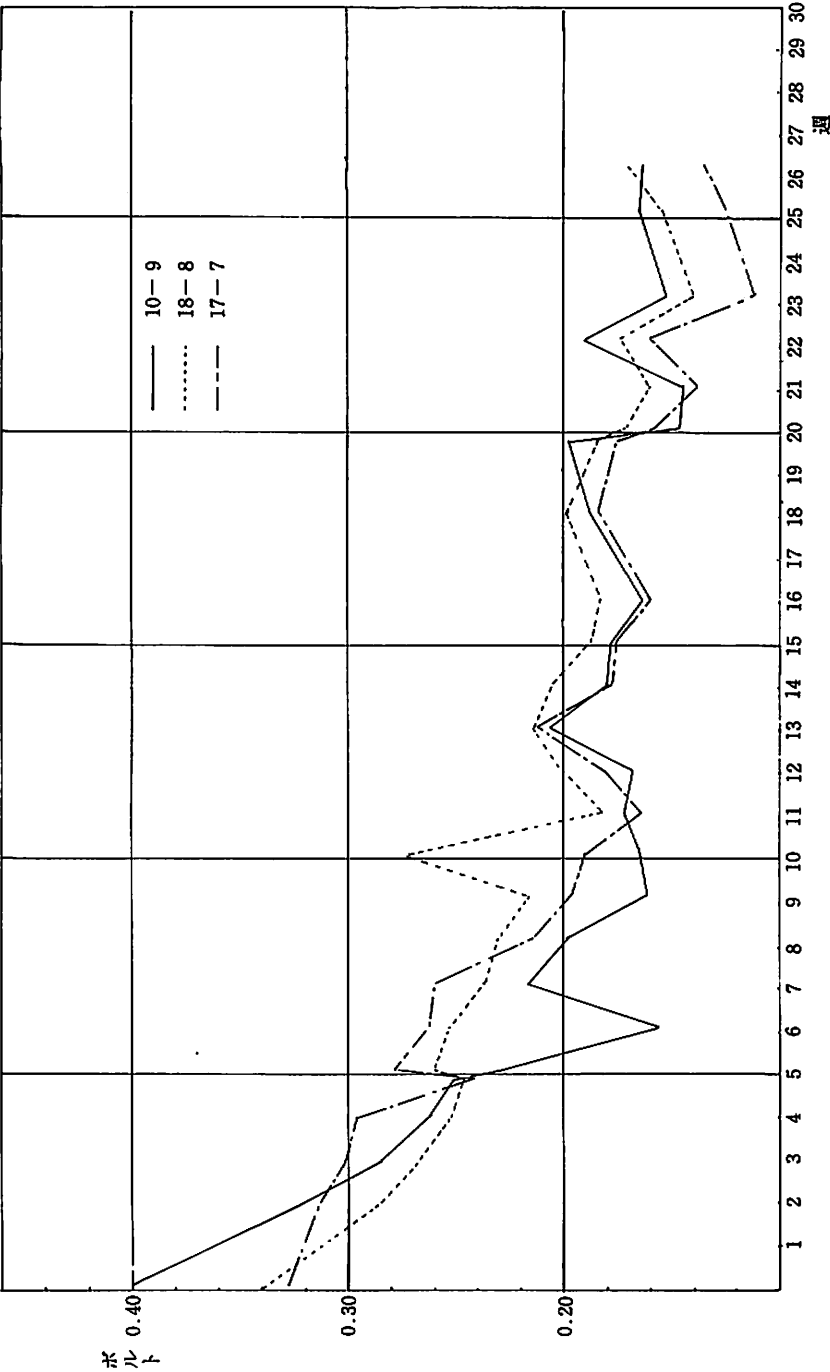


図-11 鉄筋の自然電極電位測定例 その6

ることも大きく関与していると思われる。

(9) コンクリート中の塩分量と測定電位とは明確な一定な関係は存在しない。しかし、測定電位が高い供試体は必ず塩分量が高かった。これはBerman²⁹の指摘するように、測定電位が高いことは腐食活動の活発さの指標であり、塩分量の大小や、それによるコンクリートの電導度の大小の指標でないからであろう。鉄筋を埋込み後、10週以上を経過して0.20ボルトをこえる電位を示した供試体は、皆、塩分量水準でいえばA₃以上であった。しかし、A₃、A₄水準の供試体でも、防錆剤の適切に添加してあるものは、0.20ボルト以下の電位を示した。

(10) 3ヶ月及び6ヶ月時点で腐食が認められた供試体と同一実験番号の供試体は10週以下で、すべて0.20ボルト以上の電位を必ず記録しており、0.20ボルト以上である期間が長い。

(11) 3、6ヶ月時点で発錆が確認された供試体と同一実験番号の供試体で、0.20ボルト以上の電位を示す回数が少ないものがあるが、(例えばNa12)、これは腐食面積測定試験で、3、6ヶ月時点で合計6本の鉄筋のうち、1本しか発錆してなかったことに対応するものである。つまり、電位測定をして、図-7に表示した供試体(Na12-7)もおそらく発錆していないものと考えられる。

(12) 3、6ヶ月の発錆面積測定試験で、発錆が認められなかった実験番号の供試体で電位がずっと0.20ボルト以上のものがあつた。この供試体番号はNa16で(図-9参照)、A₄D₂C₂O₁の組み合わせであり、塩分量が高いが、防錆剤量も多い。Na16の図示以外の供試体もすべて高い電位を記録している期間が長いので、おそらく、9ヶ月時点では発錆がみとめられるのではないと思われる。

(13) 0.20ボルト以下の電位では鉄筋が殆ど錆びていないと云うアメリカでの基準¹¹⁾は、埋め込み後10週以上を経過した場合、本実験でも成立している。但し、測定箇所でもたまたま発錆活動が行なわれていないことを示すだけで、それから数cm離れた所で錆が生じていないと云う保証とはなりえない。

(14) 0.20~0.30ボルトの電位を示す所では発錆しているか否か判らぬと云うことである¹¹⁾が、本実験の測定電位と、発錆面積測定試験と組み合わせて考察すると、0.20ボルト以上を示す回数が多かったり、期間が長ければ、腐食がみられると考えてよろしいよう

である。

(15) 0.30ボルト以上であれば殆ど必ず発錆が生じていると云う基準¹¹⁾は勿論正しいが、これを0.30ボルト以上の電位を示さなければ発錆はみられないと解釈してはならない。後者のように解釈すると、本実験シリーズでは4週以後、腐食活動はすべての供試体に生じていないことになる。

今迄述べてきた半電池測定結果及びそれに対する考察は、導線で外部と電気的につないである鉄筋上のあらかじめ定めておいた3点について定期的に半電池電位測定をくり返した場合に対するものであつた。当初の計画では、これだけで、鉄筋の発錆の有無、発錆開始時点等を非破壊的に探知できるものと考えていた。ところが、今迄述べてきた事項や図-6~図-11で明らか如く、この様な測定方法では、米国の基準に従えば、必ずしも発錆状態を明らかにすることができないことが判つた。つまり、0.30ボルト以上の値は鉄筋埋め込み後4週間を経た後は得られていないし、同一時点(10分間程度)・同一個所の測定でも、表面の湿润状況やコンクリートの含水状態により、乾燥や湿润が進行している状況では、かなり電位の差があることが判つた。しかも、0.20ボルトをはさんで、±0.02ボルト位の変動がみられることもあつた。勿論0.20ボルト以下であれば殆ど発錆がみられないことは確認できた。

このような状況を打開するために、鉄筋埋め込み後、約6ヶ月を経た後、測定方法をかえてみた。図-12に示してある様に供試体に格子状に測点をもうけ、格子点全部を一応一時に半電池電位を測定した。その後、周囲の格点より、高い電位を示した格点の付近で、最高の電位を示す点を、銅/硫酸銅半電池を動かすことによって、探知することにしたのである。これは文献に、電位の絶対値も大切であるが、電位の傾斜も大切であると指摘されているからである。念のため、半電池電位測定は上面(かぶりコンクリート厚2cmの方で、打込み時の上面)だけでなく、下面(この場合、かぶり厚は8cm程になる)についても、同じ様に格子点をもうけて、上面と同じように電位測定を行った(図-13参照)。上・下面の格点はいずれも埋め込み鉄筋の真上にあるようにしてある。また導線で外部とつないである1本を除いて、あとの2本の埋め込み鉄筋は供試体中では、金属的に連結されてはいない。つまり、図

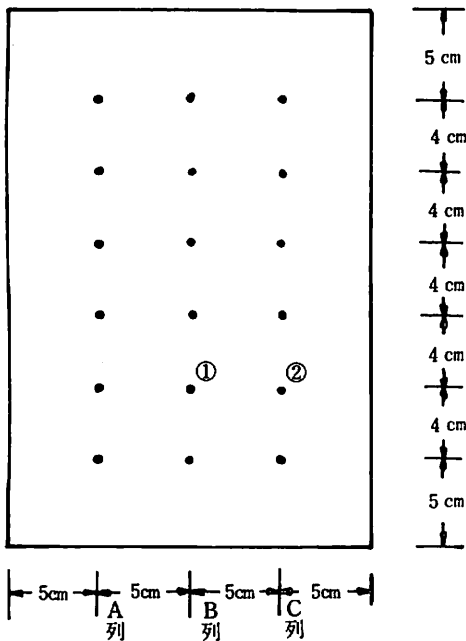


図-12 電位測定格点分布図(平面図)

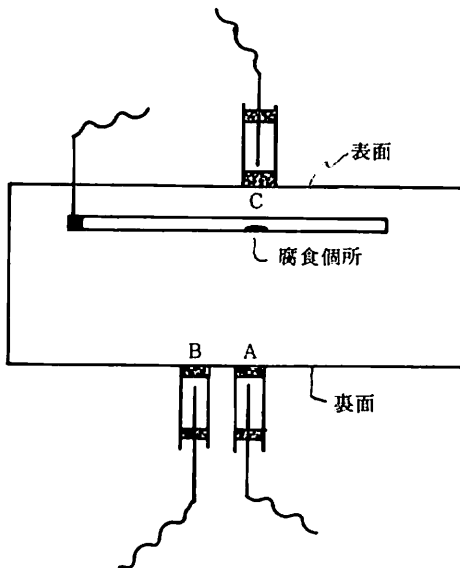


図-13

図-12で番号Aの鉄筋の上に半電池をあてた場合、回路は電圧計—銅／硫酸銅半電池—かぶりコンクリート—鉄筋—導線—電圧計と形成され、番号B, Cの鉄筋の上の格子点に半電池を当てた場合の回路は 電圧計—

銅／硫酸銅半電池—かぶりコンクリート—鉄筋—コンクリート—鉄筋—導線—電圧計 となっている。このような測定方法によって次の事実が明らかになった。

(1) 導線で直接電圧計に結ばれている鉄筋とコンクリート中に孤立している鉄筋とでは測定電位に特に差はあると云う結果はでなかった。最高の電位点は導線で直接結ばれている鉄筋の真上で必ずしも得られたわけではなかった。つまり、本測定法を実施する場合、鉄筋は必ずしも金属的に連結されている必要はない。また、5 cmや10 cm程度のコンクリートの抵抗は測定電位に殆ど影響を与えないようである。それよりも、コンクリートの湿り具合や、半電池とコンクリートの接触の方が測定電位にずっと大きな影響を与えている。

(2) 電位の分布状態・傾向或は極大電位を示す格点等は裏・表で必ずしも一致しなかった。

(3) 極大電位地点は、必ずしも、鉄筋の真上に存在するとは限らなかった。鉄筋の真上でない場合は、鉄筋上を少しはずれた鉄筋上近くに極大電位点があった。ごくまれに丁度鉄筋間の中央に位置していた。

(4) 3ヶ月又は6ヶ月時点で発錆のみられた供試体と同一実験番号の供試体では、裏面と表面との測定電位をくらべた場合、必ず裏面の方が電位が高かった。裏面は表面よりかぶりが数倍(裏面約8 cm, 表面2 cm)あるにもかかわらず、裏面の電位が高いのは、

(1)で述べたようにかぶりコンクリートの厚さの大小は測定電位にあまり影響しないことの例証であり、さらに本実験シリーズの供試体コンクリートはブリージング率が大きかったため、鉄筋の腐食は殆どすべて裏面に生じているためであると考えている。半電池電位測定をする場合、電流の回路が、腐食地点を経由すると電位が上昇すると解釈できる。

(5) 腐食活動が行われている場合に鉄筋全体の電位が上昇することは水溶液実験ではあるが、Berman²⁴⁾も指摘しており、筆者は更にそれをおし進めて、コンクリート中に埋込まれた鉄筋について半電池電位測定を行う時、腐食活動が行われている地点を電流が経由して流れる回路が形成されれば、そうでない場合よりも、かなり高い電位が測定されるのではないかと云うことを指摘しておきたい。つまり半電池電位測定法は鉄筋の腐食活動が行われている地点(必ずしも、割ってみて明瞭な錆がみえなくてもよい)を探知するのに極めて有効な方法と云えよう。このさいの電位の変動は極めて鋭敏で、最大電位地点の検出は容

易にできる。また図-13を参照して述べると、A地点に半電池を置いた場合最も高い電位が測定でき、次いでB地点で、C地点はかなり低くなっている。

(6) 本実験の場合のように近接して3本の鉄筋を平行して並べてある場合、半電池測定電位は隣接鉄筋の腐食個所の影響をうける。例えば、図-12に於て、格点電位の測定を行ったとする。B列の①格点の電位がこの供試体で一番高く、C列の格点では②点の電位が極大である時、②点で必ずしも腐食活動が行われているわけではなく、②点の電位は①地点の附近の腐食活動の影響をうけて、C列で極大になっていることがある。この場合①、②をつなぐ線上を半電池を移動させれば、電位は連続的に変化していくので、識別できる。①地点の近傍で腐食が生じていて、他に腐食がない場合、①地点に隣接する格点の電位は他の格点にくらべて高くなる。その場合、A、B、C列の鉄筋は金属的に接続している必要はない。

(7) 裏面の電位は表面よりも一般に高いが0.30ボルトをこえる場合はごくまれであった。

(8) 一部供試体について、9ヶ月目の錆面積測定の際に、直前に電位を測定し、腐食地点との関連

をしらべてみた。詳細は次報にゆづるが、次の事項が判明した。

- a) 電位極大点で必ずしも発錆はみられなかった。
- b) 発錆箇所は大体に於て、電位極大点に対応していた。
- c) 電位極大点でない箇所でも発錆がみられたものがあるが、数はごく少ない。
- d) 電位が0.30ボルトをこえない箇所でも発錆はみられた。その場合0.20ボルトはこえていた。

(9) 18個の格点電位を測定する実験を始めてから別に、鉄筋を1本埋込んだ供試体を2個作り、銅／硫酸銅半電池による測定を行って、上に述べた事項の一部の確認を行った。得られた結果を次に記す。この供試体は発錆を促すためにコンクリート中に多量の食塩を含有させてある。

a) 一面上の測定地点でもかなりの電位差がみられた(埋め込み後1週間)。その差は0.02ボルトから0.08ボルトに達する。

b) 供試体の断面はほぼ正方形なので、4面から電位測定を行った。測定面によって大きな差があり、例えば一面につき6ヶ所の測定の平均値で、0.349ボル

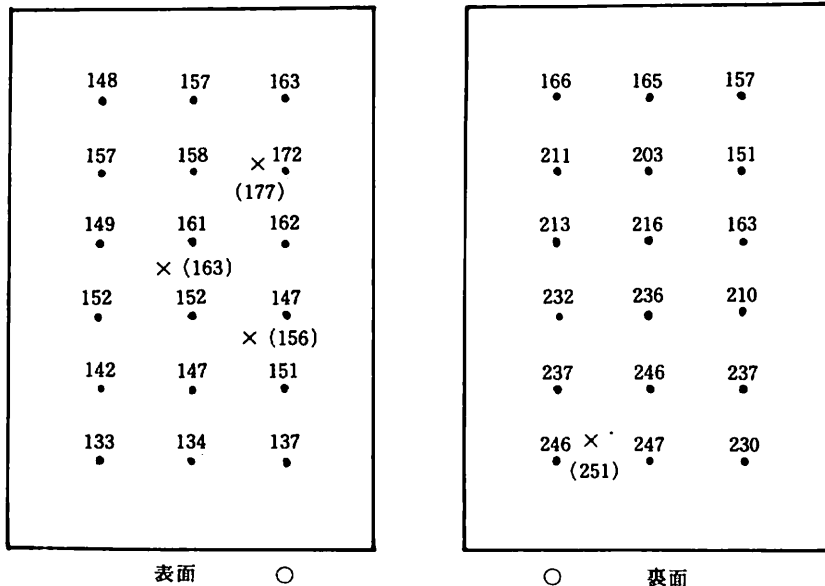
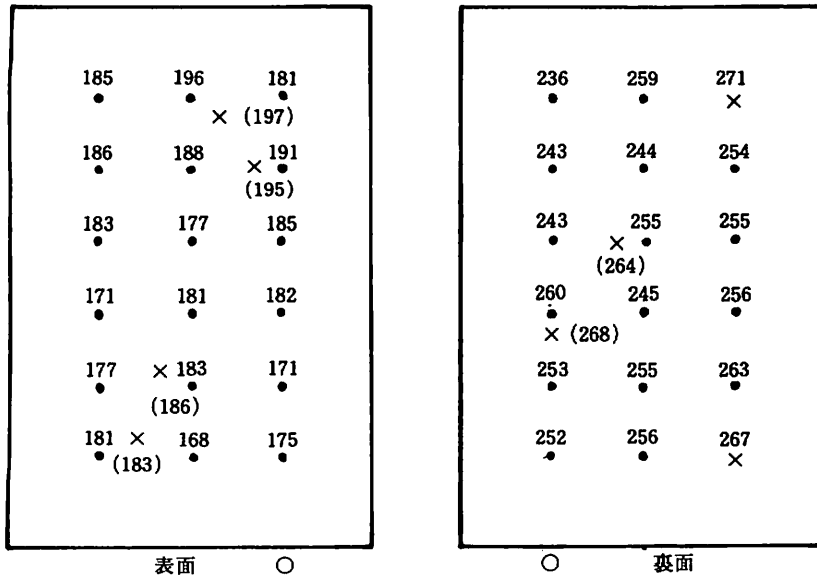
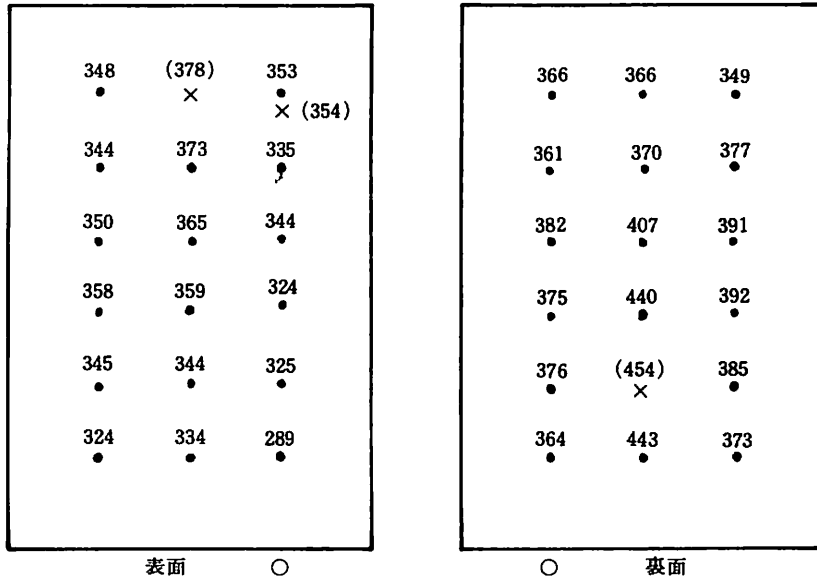


図-14 格子点電位測定例、AC6-8 供試体 (×10⁻³ボルト)

- 電位測定格子点
- × 極大電位点〔電位は()の中に示す〕
- 導線につないだ鉄筋の位置を示す。

図-15 格子点電位測定例、No.7 供試体 ($\times 10^{-4}$ ボルト)図-16 格子点電位測定例、No.8 供試体 ($\times 10^{-4}$ ボルト)

トと0.252ボルトであり大差がみられ、(4)、(5)項の指摘事項をうらがきした。

c) 電位は埋込み後、最初のうちは、やはりかなり高く、0.30ボルト以上の測定値を示す格点が大半を占めていた。時間の経過と共に減少の傾向がみられた。

d) 製作後、1ヶ月で鉄筋をとり出して、発錆の有無をしらべたが、発錆箇所と電位の極大点とは一致していた。

格点電位の測定例を図-14~16に示す。半電池電位測定と発錆との関係については9ヶ月目時点で全体的

にしらべる予定であるので、結果については次報に述べることにする。

4. 塩分量について

コンクリートの塩分量を問題にする場合、色々な表示方法があって、その相互関係が問題になる。本実験の要因の1つの塩分量は配合時の総重量（配合により得られた計算値）に対するNaClとしての重量比の%表示である。これは実験等を計画する場合には時々用いられる表示法である。これに対し、日本国内で塩分量の表示方法としてよく用いられているのは海砂の塩分量で、日本建築学会・土木学会・コンクリート工学協会等でコンクリート中の塩分量を制限するための方法として採用され、仕様書等に用いられている。これは日本国内で多量の海砂が細骨材として用いられている現状から当然である。これは海砂の乾燥重量に対する、その中に含まれるNaClの重量比を%表示したものである。これと配合時のコンクリート重量に対するNaCl重量比による塩分量（以下、配合時塩分量と略称する）表示方法との関係は表-7から、その大体的様子がわかる。配合のさいの単位細骨材量等によって、その相互関係は違ってくるが、大体、海砂塩分量の約1/3が配合時塩分量である。

次に、実際の構造物中の塩分量であるが、これは通例、コンクリート構造物からコア一試料を採取し、その一部又は全部を粗骨材をも含めたまま微粉砕し、一定時間定温乾燥したものに含まれる塩分量の重量比である。この場合Cl⁻イオンをモール法で滴定・定量するわけであるが、結果をNaClに換算するか、Cl⁻のまま表示するか2つの方法がある。アメリカの表示は通常Cl⁻のコンクリート全体に対する重量比を採用している様である^{11, 29}。これに対してNaClとしての重量比を採用することが我国では普通行われている³⁰。これら2つの表示方法の相互関係は至って簡明でCl⁻とNaClとのモル重量比を乗ずれば互いに換算できる。

これに対し、構造物中の普通コンクリートの塩分量を表示する方法として筆者が採用しているものは、採取したコンクリート試料から粗骨材（約5mm以上の石片）を去除いたモルタル部分について塩分量を定量・算出する方法である（他にも使用例あり³¹）。つまり粗骨材を取り除いたモルタル部分を微粉砕し、一定時間（24～48時間）110℃で定温乾燥したものについて、

一定時間（15～30分）沸騰水中で塩分を溶出し、溶出液について、Cl⁻を定量したものである。表示はモルタル部乾燥重量に対するNaCl重量の比の%である。コンクリート総重量を採用せず、粗骨材を取り除いたモルタル部重量を採用した理由は次の通りである。

a) 現実の構造物から試料を採取する場合、コア一試料をボーリングにより採取できることが少ない。普通は鉄筋の腐食のため、コンクリートがはく離した部分から、手でもぎとってくる試料が大部分である。こう云う試料は小さく、薄片であることが多い。中には、粗骨材が全然含まれていないものや、ごく僅かしが含まれていないものもある。普通、粗骨材はその内部にはモルタル部分にくらべればごく少量の塩分しか含まれていない場合が多い。従って、試料が小さい場合、その中に粗骨材がどの程度含まれているかによって、塩分量にかなりの差がでてくると思われる。こう云うことを防止するため、コンクリート試料から粗骨材部分をとり除いたのである。

b) コンクリート中の鉄筋の発錆に影響するのは主として、モルタル中の塩分量であって、粗骨材にとりこまれた塩分は鉄筋と直接接触することはあまりないと云う考えが成立するものと思われるからである。このさい、粗骨材中にとりこまれる塩分量は粗骨材の性質（主として吸水量）によって大きな影響をうける。

粗骨材を含むコンクリート全体部分の含塩量（以下、コンクリート全体含塩量と云う）にしる、粗骨材を取り除いたモルタル部分のみの含塩量（以下、モルタル部含塩量と云う）にしる、試料の微粉砕の程度、微粉砕試料の乾燥の方法と時間、塩分溶出の方法（冷水中、沸騰水中、さらに沸騰時間）等で結果に相当程度差がでてくるものと思われる。国の内外を問わず、発表されている諸論文では、こう云う測定に関する基本的事項が明示されていないことが多いので、塩分量の比較はむづかしい。

筆者は本実験の同一実験番号の供試体相互間にどの程度塩分量のばらつきがあるか、また、一つの供試体内で、鉄筋の腐食が生じた部分とそうでない部分とで塩分量に相違があるか等を調べるために、モルタル部含塩量の調査をした。その結果は表-13および表-14の通りである。数が少ないので、確定的なことはいえないが、大体の傾向は知ることができる。モルタル部含塩量は、同一バッチから（正確にはミキサーの

表-13 コンクリート供試体の塩分量比較測定例

実験番号	材令 (月)	モルタル 部含塩量	採取箇所	錆の有無
9-1	3	0.173	鉄筋端部付近	なし
9-2	6	0.173	鉄筋端部付近	あり
9-2	6	0.182	鉄筋中央部付近	なし
9-2	6	0.182	鉄筋の別の端部付近	あり
9-4	6	0.173	鉄筋端部付近	あり
9-4	6	0.160	鉄筋の別の端部付近	なし
9-5	3	0.169	鉄筋の端部付近	なし
9-6	6	0.201	鉄筋の端部付近	なし
9-8	8	0.182	鉄筋の端部付近	あり
9-8	8	0.173	鉄筋の別の端部付近	なし

注. 塩分量はすべて2個の試料について2回ずつ、
合計4つの分析値の平均値

表-14 コンクリート供試体の塩分量比較測定例

実験番号	材令 (月)	モルタル部含塩量(%)		コンクリート部含塩量(%)	錆の有無
		1	2		
13-1	3	0.190	0.196	0.147	なし
13-2	6	0.177	0.176	0.134	なし
13-3	3	0.202	0.180	0.163	なし
13-4	6	0.186	0.182	0.134	モルタル部(1)にあり
13-5	3	0.212	0.193	0.189	なし
13-6	6	0.190	0.180	0.149	モルタル部(1)にあり

注1: 試料採取箇所は、モルタル部(1)は鉄筋端部付近で、
(2)は中央部付近であり、コンクリート部は、モルタル(1)と(2)の中間部である。

注2: モルタル部(1), (2)は4個の試料について2回ずつ、
合計8つの分析値の平均値。コンクリート部は2個
の試料について2回ずつ、合計4つの分析値の平均
値。

2回練り分を練り板上でショベルで混合) 作った供試体間である程度の差があり、実験番号No.9で0.16%から0.20%まで、Na13では0.18%から0.21%程度である。同一供試体内では、塩分量の差はほとんど0.01%以下であり、実験誤差の範囲内である。したがって、同一

供試体内での塩分量の多少と発錆の有無との関係ははっきりしない。

Na.9とNa13の配合条件は塩分量以外はすべて同じであり、配合時塩分量はNa.9で0.09%, 海砂換算で0.317%, Na13では、それぞれ0.132%および0.42%である。モルタル部分含塩量の測定値の平均は、Na.9で0.178% (配合時の1.8倍), Na13で0.189% (配合時の1.4倍)であり、ほとんど差がないという結果となっている。これについては、資料を増して後日検討したい。

コンクリート全体含塩量は、表-14に示してあるようにNa13しか測定してないが、平均値0.152%であり、当然モルタル部含塩量よりは少ない。なお、水セメント比は55.2%, 細骨材率41.3%であり、粗骨材の吸水率は0.33%と小さいので、塩分はほとんどモルタル部分中に存在していることになる。

筆者は、過去において、実在構造物について、コンクリート全体含塩量とモルタル部含塩量について比較調査したことがある³³⁻³⁹。その場合、配合や粗骨材の吸水量等は不明であるが、同種の粗骨材から推察すると、吸水量3~6%程度で、本実験に使用した粗骨材のそれよりもかなり大きく、両方の含塩量にあまり差がなかった。ややモルタル部含塩量が多いと云う結果になっている。実験結果を再録して表-15に示す。なお、試料は一辺が2~3cmから5~6cmまでの大きさで、コアボーリングしたものではない。

5. 結 論

本実験シリーズはコンクリート中の鉄筋の発錆に対する塩分量の「しきい値」(発錆しないための塩分量の上限値)を知るために、今迄の実験シリーズと異なり、コンクリート中の塩分量の水準を比較的少ない範囲に制限し、各水準間の差も小さくとってある。その結果、防錆剤を加えない時および加えた時の塩分量の「しきい値」の一端を知ることができた。表-8から判るように、塩分量水準A₁(配合時コンクリート含塩量0.033%, 海砂含塩量約0.10%)では防錆剤の有無に関せず、鉄筋は発錆していない。この塩分量は日本建築学会や土木学会等で海砂含塩量の上限値として採用されている値である。塩分量水準A₁およびA₂(配合時コンクリート含塩量0.067%, 海砂含塩量約0.20%)では、防錆剤をメーカー標準量或はその2倍量添加した時、発錆はみられない。A₃水準では一部に発錆がみら

表-15 実在構造物での含塩量測定例(%)

構造物		採取箇所	モルタル 部含塩量	コンクリート 全体含塩量	説明
上野小	宮古島	外柱	0.10	0.11	試料が別々
上野中		軒スラブ裏	1.24	0.66	
西城中		軒スラブ先端(裏)	0.31	0.36	
宮原小		2階内柱	0.06	0.06	試料が別々
西辺小		軒スラブ裏	0.46	0.40	
平良中		外廊下スラブ裏	0.20	0.10	
松島中	那覇市	3階柱	0.10	0.04	同上
真和志中		軒スラブ先端裏	0.18	0.17	試料が別々
寄宮中		梁底面	0.18	0.13	
神原中		外廊下スラブ裏	0.13	0.07	
那覇中		渡り廊下スラブ裏	0.02	0.02	同上
小禄中		室内屋上スラブ	0.42	0.40	同上
寄宮中		外階段スラブ裏	0.09	0.14	
寄宮中		同上	0.04	0.04	
寄宮中		同上	0.48	0.37	
奥間小	沖縄本島北部	軒スラブ裏	0.25	0.21	
塩屋小		内廊下スラブ裏	0.41	0.39	
塩屋小		軒スラブ裏	0.49	0.43	
佐手小		同上	0.71	0.66	
奥小		同上	0.59	0.48	

れるので、 A_2 が防錆剤を加えた時の「しきい値」となる。つまり、海砂をコンクリートの細骨材として使う時、その含塩量をこの水準(約0.2%)まで水洗等によって落すべきで、その際、防錆剤を十分量使用すべきである。

塩分量水準 A_3 (配合時コンクリート含塩量0.100%、海砂含塩量約0.30%)では、コンクリート中の鉄筋の過半の場合に発錆がみられる。また、材令の進行と共に発錆量の増加の傾向がみられる。しかし、防錆剤を2倍量加えた場合、発錆は零か或は非常に少なく、材令の進行と共に発錆量は必ずしも増大していると言えないので、この程度の塩分量までは、場合によっては許容できるのではないかと。つまり、構造物またはその部分の種類・重要度、そのおかれている環境等から、設計者等が判断すべき事項であろう。その際、水セメント比は小さくし、スランプも小さくすべきであるし、防錆剤も2倍量添加すべきである。 A_4 水準(配合時コンクリート含塩量0.133%、海砂含塩量約0.40%)で

は、コンクリート中の鉄筋は防錆剤を2倍量加えても発錆はさけられないし、材令の経過と共に、発錆量は増大の傾向にある。従って海砂なら、そのまま使わず、水洗により含塩量を落してから使用すべきである。

なお、今迄の結果は、長期的に実験を継続していく予定の耐久性実験の、わずか3ヶ月と6ヶ月時点の結果からの結論であり、中間報告的なものである。将来、変更の可能性は十分あることを、特に申し添えておきたい。

アメリカのカリフォルニア州道路局が開発した Cu/CuS_4 半電池による、非破壊方式の発錆箇所探知方法は、沖縄県の鉄筋コンクリート構造物にも一応適用可能と思われるが、米国でも指摘されているように、0.20ボルトないし0.30ボルト単の場合の判断方法が未解決である。しかも、この範囲の電位値を示すことが多いところに問題がある。コンクリートの乾湿の影響、電位差計に接続させる導線を引き出す鉄筋の位置・間

隔等, 研究すべき事項が, まだ多く残っている。

各所で発表されるコンクリート中の塩分量は, 測定方法・表示方法がまちまちのうえ, それらが, 論文或は報告中に明示されていない。筆者が行った実験について, それら塩分量の相互関係を求めてある。海砂含塩量は配合時コンクリート含塩量の約3倍である。硬化したコンクリートの粗骨材を除いたモルタル部分の含塩量は配合時コンクリート含塩量の約1.4~1.8倍である。硬化したコンクリートの粗骨材を含む全体の含塩量はコンクリートのモルタル部分の含塩量の約73%~93%程度であり, 採取試料中の粗骨材量や粗骨材の種類や配合によってかなりの差がでくる。

謝 辞

本実験の遂行に当り, 初期に要した費用の大部分は昭和53年度文部省科学研究費総合研究(A)「RCおよびPC構造物における海砂使用上の問題点解明に関する総合研究」(研究代表者, 九工大 渡辺明教授)の分担研究として支出されましたことを記し, 感謝の意を表します。

また, 本実験を遂行するに当り, 本学土木工学科技官玉那覇宣雄氏および, 卒研学生の河津・新城・末吉・仲村・長谷部・畑・安里・三浦・宮城・安次嶺・新垣・川村・浜元・古川の諸君の絶大なる協力をいただきましたことを附記しておきます。

参 考 文 献

- 1) Spellman, D. L. & Stratfull, R. F.; Chlorides and Bridge Deck Deterioration, Highway Research Record, No. 328, pp. 38~49, 1970.
- 2) Spellman, D. L. & Stratfull, R. F.; Concrete variables and Corrosion Testing, California Division of Highways, Materials and Research Department, Research Report No. M & R HRB 635116-6, 1972.
- 3) Kliethermes, J. C.; Repair of Spalling Bridge Decks, Highway Research Record, No. 400, pp. 83~92, 1972.
- 4) Clear, K. C.; Time to Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete Slabs, Transportation Research Record, No. 500, pp. 16~24, 1974.
- 5) 善一章; 港湾における鋼材防食法の研究(第一報), セメント硬化体による防食法, 港湾技術研究所報告, vol. 5, No. 9, 1966年6月
- 6) 片脇清, 守屋進, コンクリート中の鉄筋の腐食に関する電気化学的計測—港湾環境における3年間の暴露試験結果—, 土木技術資料, vol. 18, No.10, pp. 13~18, 1976年10月
- 7) 片脇清, 守屋進; 鉄筋コンクリート用防錆剤効果, 土木技術資料, vol. 20, No. 6, pp. 3~8, 1978年6月
- 8) 岸谷孝一, 朴春燮; 鉄筋コンクリート構造物の非破壊的耐久性診断方法に関する基礎的研究—自然電極電位法の利用に関して—, セメント技術年報 32, pp. 425~428, 昭和53年
- 9) 岸谷孝一, 朴春燮, 同上題名, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp. 129~130, 昭和53年9月
- 10) 岡田清, 小柳治, 宮川豊章; コンクリート部材のひびわれと鉄筋腐食に関する研究, 土木学会論文報告集第281号, pp. 75~87, 1979年1月
- 11) Van Daveer, J. R.; Techniques for Evaluating Reinforced Concrete Bridge Decks, ACI Journal, Dec, 1975, pp. 697~704
- 12) 具志・和仁屋・伊良波; 塩分及び防錆剤等がコンクリートの諸性質に及ぼす影響, 琉球大学工学部紀要第18号, pp. 25~36, 1979年9月
- 13) 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(その1)—, 琉球大学理工学部紀要工学篇第15号, p. 30 (pp. 23~56), 1978年3月
- 14) 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ヶ年時点—, 琉球大学理工学部紀要工学篇第16号, pp. 1~41, 1978年9月
- 15) 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—1年半および2ヶ年時点, その1—, 琉球大学理工学部紀要工学篇第17号, pp. 23~47, 1979年3月
- 16) 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5, 一防錆剤添加量が多い場合(実験V)—, 琉球大学工学部紀要第18号, pp. 53~59, 1979年9月
- 17) 和仁屋・具志・田野; コンクリート中の鉄筋の

発錆実験（その4）、土木学会西部支部昭和53年度研究発表会講演集，pp. 313～314，1979年2月

18) 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4，—1年半と2ヶ年時点，その2（実験II）—，琉球大学工学部紀要第18号，pp. 37～51，1979年9月

19) 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

20) 土木学会；コンクリート標準示方書解説（昭和49年度版），p. 105，土木学会，1975年2月

21) Crumpton, C. F. & Bukovatz, J. E. ; Corrosion and Kansas Bridges, Transportation Research Record No. 500, pp. 25～31, 1974

22) Clear, K. C. ; Reinforced Bar Corrosion in Concrete : Effect of Special Treatments, Corrosion of Metals in Concrete, ACI Publication SP-49, pp. 71～82, 1975

23) O'Connor, E. J. ; Iowa Method of Partial-Depth Portland Cement Resurfacing of Bridge Decks, Chloride Corrosion of Steel in Concrete, ASTM STP 629, pp. 116～123, 1977

24) Cook, A. R. & Radtke, S. F. ; Recent Research on Galvanized Steel for Reinforcement of Concrete, ASTM STP 629, pp. 51～60, 1977

25) Berman, H. A. ; Sodium Chloride, Corrosion of Reinforcing Steel, and the pH of Calcium Hydroxide Solution, ACI Journal, April, 1975, pp. 150～157

26) Cook, H. K. & McCoy, W. J. ; Influence of Chloride in Reinforced Concrete, Chloride Corro-

sion of Steel in Concrete, ASTM STP 629, pp. 20～29, 1977

27) 横道・林・前川・太田；架設後31年を経た鉄筋コンクリート橋の塩害調査，セメント・コンクリート，No. 273, pp. 37～45, 1969年11月

28) 前川・藤井・太田；長年月を経た鉄筋コンクリート橋の調査，セメント・コンクリート，No. 290, pp. 15～21, 1971年4月

29) 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，val. 10, No. 10, pp. 68～71, 1974年10月

30) 中島・高橋・富岡；実橋におけるコンクリート中の塩分含有量に関する2，3の調査例，セメント・コンクリート No. 345, pp. 35～39, 1975年11月

31) 具志・和仁屋・伊良波；沖縄の鉄筋コンクリート構造物の耐久性一現況調査と考察，その5，若狭市営住宅一，琉球大学理工学部紀要工学篇第14号，pp. 55～97, 1977年9月

32) 笠井・柴田；早期に海水に接するコンクリートの塩分浸透に関する一実験—水中打設コンクリートに関する研究—，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp. 49～50, 昭和45年9月

33) 具志・和仁屋・伊良波；宮古島の鉄筋コンクリート造校舎の耐久性調査，琉球大学理工学部紀要工学篇第12号，p. 18, 1976年3月

34) 具志・和仁屋・伊良波；那覇市内中学校の鉄筋コンクリート造校舎の耐久性調査，琉球大学理工学部紀要工学篇第13号，p. 37, 1977年3月

35) 具志・和仁屋・伊良波；沖縄本島北部3村の鉄筋コンクリート造校舎の耐久性，琉球大学理工学部紀要工学篇第13号，p. 97, 1977年3月