

論文

[1031] アルカリ骨材反応に及ぼす電流場の影響に関する基礎的研究

正会員○西林新蔵(鳥取大学)
 正会員 林 昭富(鳥取大学)
 正会員 王 鉄成(鳥取大学)
 鎌田隆志(大阪府庁)

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物は、経済的に設計、施工、さらには維持管理が行われるため、陸上構造物や海洋構造物として広く用いられてきているが、主として外部から侵入する水分や塩化物の作用によって、鋼材の腐食が原因となる損傷を受けやすい構造物でもある。陰極防食法は、通常の鉄筋コンクリート構造物ではその効果が認められ、世界各地で実用に供されているが、コンクリートに用いられた骨材がアルカリ骨材反応性であった場合には、アルカリ骨材反応を助長しかねない。それは電気化学的な影響が現われるため、通電によってアルカリイオン(K⁺, Na⁺, Ca²⁺)の濃縮が生じ、通常ではアルカリ骨材反応が発生し得ない条件下であっても反応が生じたり、あるいはすでにアルカリ骨材反応が生じている構造物ではさらに反応が促進されて、構造物に損傷を与える可能性がある。

また、現実には鋼材腐食は隣接した電気設備(変電所、電気鉄道、電解化学工場など)からの迷走電流に起因することも多い。この直流の迷走電流によってコンクリート中に埋め込まれた鉄筋に電池が形成され、局部的な腐食が生じる。また電食以外にも通気差電池、異種金属接触電池、コンクリート貫通部

と土壤中の電位差などによって自然腐食が発生する。このような腐食電池を無くすために陰極防食を適用した場合、鉄筋の腐食は防止されるが、先述したようなアルカリ骨材反応の助長という問題が生じてくる可能性がある。

本研究は、鉄筋コンクリート構造物における陰極防食の最適条件を確立せんとする一連の研究計画の段階において問題となった、コンクリートへの通電がアルカリ骨材反応の膨張挙動に及ぼす影響について実験的に検討するとともに、この検討結果をコンクリートのアルカリ骨材反応試験法への応用の可否についても検討せんとするものである。

表-1 実験計画

試験条件	骨材	反応性粗骨材	T1, T2	セメントのアルカリ量(%)	0.42, 0.5				
		非反応性粗骨材	NT	添加アルカリ	NaOH, NaCl				
配合条件		非反応性粗骨材	NS	全アルカリ量(eq. Na ₂ O%)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5				
	単位セメント量(kg/m ³)	スランブ(cm)	14~16	反応性粗骨材割合(%)	0, 100				
				細骨材率(%)	40, 50				
				水セメント比(%)	45				
供試体寸法(cm)	10×10×40		電流密度(mA/m ²)	0, 25, 50, 100, 200					
				陽極材料	Ti-Pt単線				
				保存条件	40°C, R.H. 100%				
測定項目		長さ変化、鉄筋の電位、ひびわれ特性							
打設計画	アルカリ量(%)	反応性粗骨材混合割合(%)	添加アルカリ	電流密度(mA/m ²)					
				0	25	50	100	200	
				○	○	○	○	○	
	0.5	100(T2)	NaCl	○	○	○			
	1.0	100(T2)	NaCl	○	○	○			
	1.5	100(T2)	NaCl	○	○	○	○	○	
	2.0	100(T2)	NaCl	○	○	○			
	2.5	100(T2)	NaCl	○	○	○			
	1.5	100(T2)	NaOH	○	○	○	○	○	
1.5	100(T1)	NaOH	○	○	○	○	○		
1.5	0	NaOH	○	○	○	○	○		

骨材の種類	岩石名	比重	吸水率(%)	F.M	化学法による結果		Sc/Rc
					Rc	Sc	
反応性粗骨材	T2 斜方輝石安山岩	2.64	1.48	6.53	67.5	301	4.46
反応性粗骨材	T1 斜方輝石安山岩	2.60	1.93	6.76	101	558	5.52

(注) Rc: アルカリ濃度減少量(mol/l) Sc: 溶解シリカ量(mol/l)

2. 実験概要

実験計画を表-1に示す。なお供試体記号は(粗骨材の種類) - (アルカリ量) - (添加アルカリの種類) - (電流密度)を表わす。

図-1に供試体の概形を示す。陰極防食法には流電陽極方式と外部電源方式とがあるが、本研究では外部電源方式を採用した。供試体中央部に陰極としてD13, S S41のみがき丸鋼を配置し、打設面には、陽極として白金メッキのチタン単線を設置し、打設面全体に電気が流れ、さらに陽極のTi-Pt線を固定するために導電性の良いカーボン素材の塗料を塗布した。図-1に示すように供試体側面には、長さ測定用の測点を通電内、鉄筋沿、通電外の3ヶ所設けた。各供試体と定電流供給装置が直列配列となるように銅線を接続してから、40°C, R.H.100%の保存槽中に入れた。

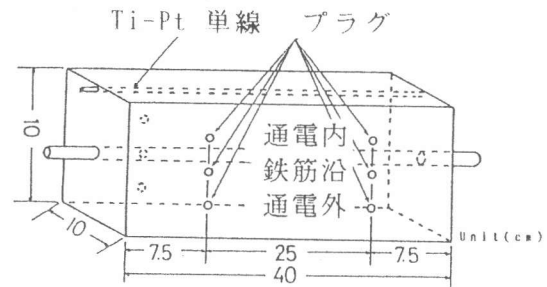


図-1 供試体完成図 (Ti-Pt 単線)

3. 結果と考察

3.1 骨材の種類

図-2, 3に、電流密度 50mA/m^2 、アルカリ量 1.5%、添加アルカリNaOH、反応性、非反応性骨材を試験条件とした場合の膨張率の経時変化を示す。

図-2の反応性骨材の場合、通電内の膨張が最も大きく、次は鉄筋沿で、最も膨張が小さいのは通電外である。これは、通電内は打設面の陽極材料と鉄筋間に位置し、電気の影響を受けるためであり、鉄筋沿も電気の影響を受けているものの、鉄筋によって拘束されるために、膨張率はやや小さくなったものと考えられる。通電外においても膨張は生じているがその値は小さい。

図-3の非反応性骨材の場合は、膨張率が非常に小さいので、通電しても膨張が生じないことがわかる。

図-4は、反応性骨材の種類を変えた他は図-2と同一条件の場合の膨張率を示す。両者とも通電内が最も大きく、以下、鉄筋沿、通電外の順に膨張率は小さくなっている。さらに、同一材令においては、T2骨材のほうがT1骨材よりも大きな膨張が現われているが、これは骨材自体の膨張特性の差によるものと考えられる。

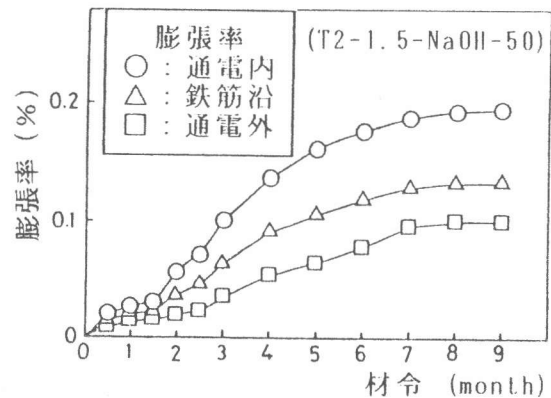


図-2 膨張率の経時変化

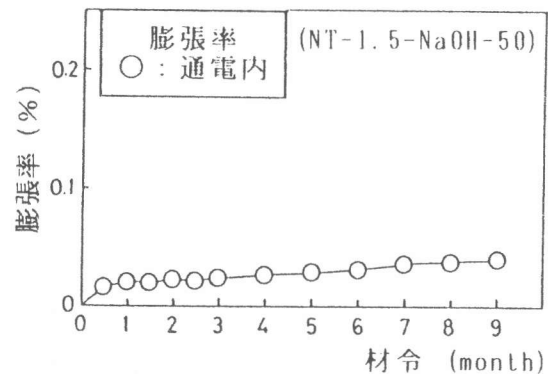


図-3 膨張率の経時変化

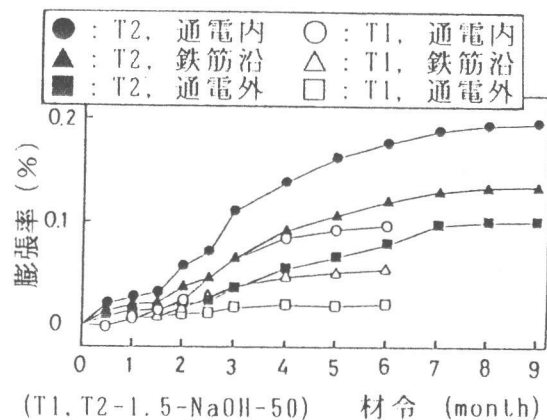


図-4 骨材種別の膨張率

これらの結果から、反応性骨材を用いたコンクリートにおいては、通常の電気防食で用いられている電流密度 ($5\sim 10\text{mA/m}^2$) よりも大きい場合に、電気の影響を少なからず受け、アルカリ骨材反応が助長されることになる。

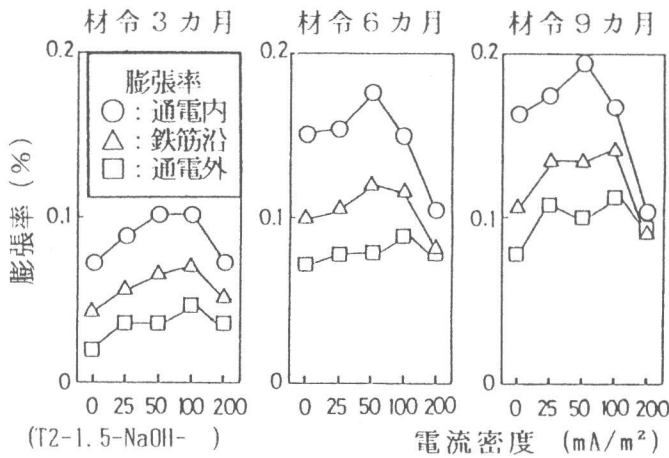


図-5 電流密度と膨張率の関係

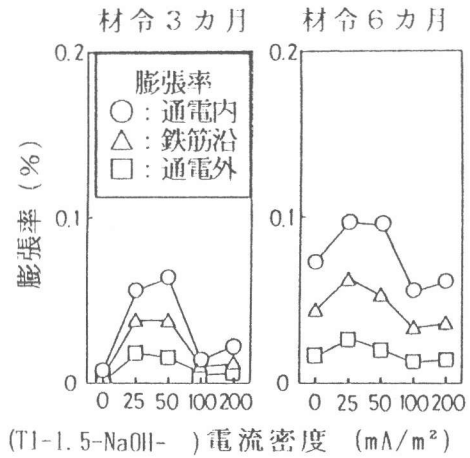


図-6 電流密度と膨張率の関係

3.2 電流密度

図-5、6、7は電流密度と膨張率との関係を各材令別に示したものである。通電内の膨張率に着目すると、図-6、7に示すように、膨張率は電流密度 $25\sim 50\text{mA/m}^2$ で最も大きく現われ、電流密度がそれより大きくても小さくても膨張率は小さく、電流密度による膨張率の差はかなり大きい。これは通電することによってアルカリイオンが鉄筋（負極）方向に移動して、イオンが濃縮し、そのためにアルカリ骨材反応が促進されたことを示している。しかし、電流密度が大きくなると、アルカリイオン ($\text{K}^+, \text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}$) の過剰な集中によってアルカリイオン濃度が上昇しすぎるために反応生成物が流動化し、これが多量のカルシウムを含有している低膨張性の生成物となるので、その影響を受けて膨張率が小さくなり、膨張率と電流密度との関係を表わす図が、このような凸形の形状を示したものと考えられる。このことから、アルカリ骨材反応による膨張が最も促進される電流密度、つまり電流密度にもベシマム値が存在するものと思われる。

3.3 添加アルカリ

図-8は、添加アルカリを NaOH と NaCl の2種類とし、その他の試験要因は同じとした場合の結果である。通電内では NaOH が NaCl より大きい膨張を、鉄筋沿では逆に NaCl の方が NaOH よりも大きい膨張を示すが、通電外では両者はほとんど同じである。このように骨材が同じであれば、NaOH と NaCl による膨張率に差は見られるものの、両者の差はそれほど大きく

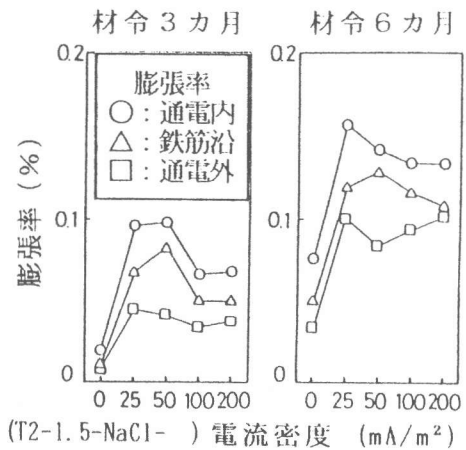
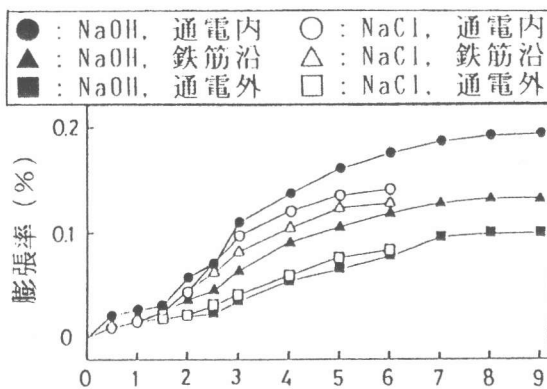


図-7 電流密度と膨張率の関係

なく、また膨張率の増加傾向もほぼ同様であることがわかる。

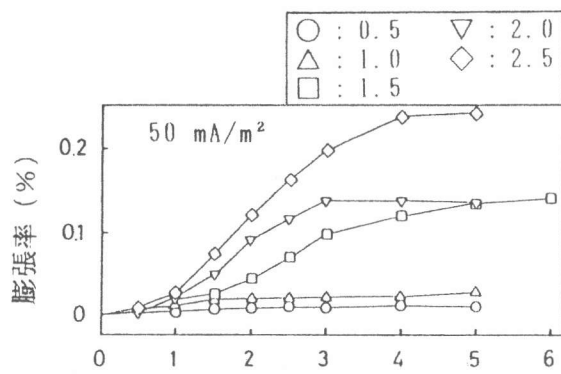
図-9は添加アルカリ量別の膨張率の経時変化を示したものである。アルカリ量が2.0%と2.5%では材令初期からかなりの膨張を示しているが、材令が3カ月を過ぎると膨張率の増加割合が少なくなり収束の傾向が見られる。これは、多量のアルカリが存在する環境下で通電すると、急激な膨張特性を示すが、長期における膨張率の伸びは小さくなるという傾向を示すものであり、3.2の電流密度の項で述べたように、多量のアルカリの存在による反応生成物の流動化に起因しているものと考えられる。

また、アルカリ量0.5%と1.0%ではほとんど膨張を示していないが、通電によるアルカリの移動ならびに濃縮によって長期材令で膨張が現われ、ひびわれ損傷が生ずる可能性があるので、今後とも通電と測定を継続することになっている。



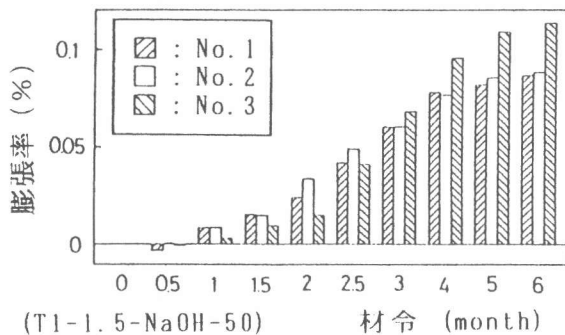
(T2-1.5-NaOH, NaCl-50) 材令 (month)

図-8 添加アルカリ別の膨張率



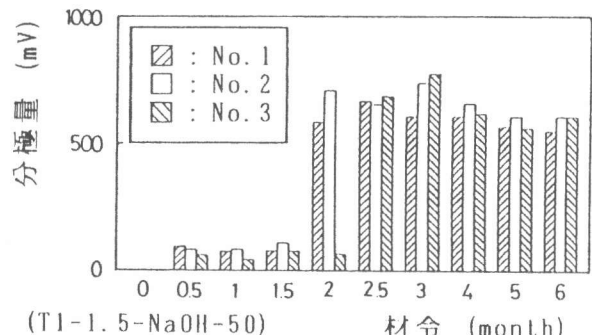
(T2- -NaCl-50) 材令 (month)

図-9 アルカリ量別の膨張率



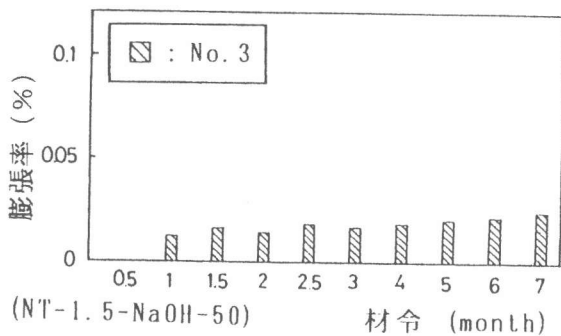
(T1-1.5-NaOH-50) 材令 (month)

図-10 供試体ごとの膨張率



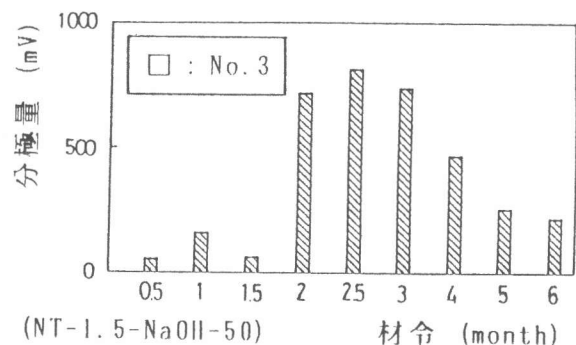
(T1-1.5-NaOH-50) 材令 (month)

図-11 供試体ごとの分極量



(NT-1.5-NaOH-50) 材令 (month)

図-12 供試体ごとの膨張率



(NT-1.5-NaOH-50) 材令 (month)

図-13 供試体ごとの分極量

3. 4 分極量と膨張率

本実験では、一つの要因について3本の供試体を作製している。そこで供試体ごとの通電内における膨張率の経時変化を図-10に、同様に分極量の経時変化を図-11にそれぞれ示す。

T1-1.5-NaOH-50においては、No.2の供試体は材令1.5カ月から2カ月にかけて、一方、No.3は2.5カ月以降、分極量、膨張率とも急上昇している。材令5カ月以降、分極量が安定するとともに、膨張率も急激な増加を見せることがなくなっている。

図-12,13は非反応性骨材を用いた供試体の膨張率と分極量の経時変化を示したものである。非反応性骨材の場合には明確な傾向が見られないことから、アルカリ骨材反応性を有する骨材を用いた供試体における分極量と膨張率の間には、密接な関係があると考えられるが、その詳細な検討を加えるだけの試験結果はまだ得られていない段階である。

3. 5 ひびわれ

図-14に T2-1.5-NaOH-50 の各材令ごとのひびわれのパターンを示す。いずれの材令においても供試体の通電内側に多くのひびわれが発生していることがわかる。材令の経過とともに通電内側から通電外のほうにひびわれが進展していく傾向が見られる。また、底面におけるひびわれが長手方向に入っているのが見られる、これは鉄筋を配置した方向であることから、この供試体は鉄筋の拘束を少なからず受けていることがわかる。側面におけるひびわれも長手方向に多く現われており、同様のことがうかがえる。

次に T2-1.5-NaClのひびわれと電流密度との関係を示す。図-15はひびわれ本数、図-16は平均ひびわれ幅、図-17は総ひびわれ幅と電流密度との関係を示したものである。

図-15では膨張率が大きくなるとひびわれ本数も増加することがわかり、通電による膨張の促進が確認できる。図-16では材令初期におけるひびわれ幅には大きな差がないことから、大きく膨張しても細かいひびわれが多く入ることがわかる。材令が経過すると電流密度による差が現われ、電流密度 $50\text{mA}/\text{m}^2$ で幅の大きいひびわれが現われることが確認できる。図-17では図-15と同様の傾向を示していることから、コンクリート供試体への通電は、ひびわれ本数を増すよりもひびわれ幅を大きくするような膨張特性を与えたと考えられる。

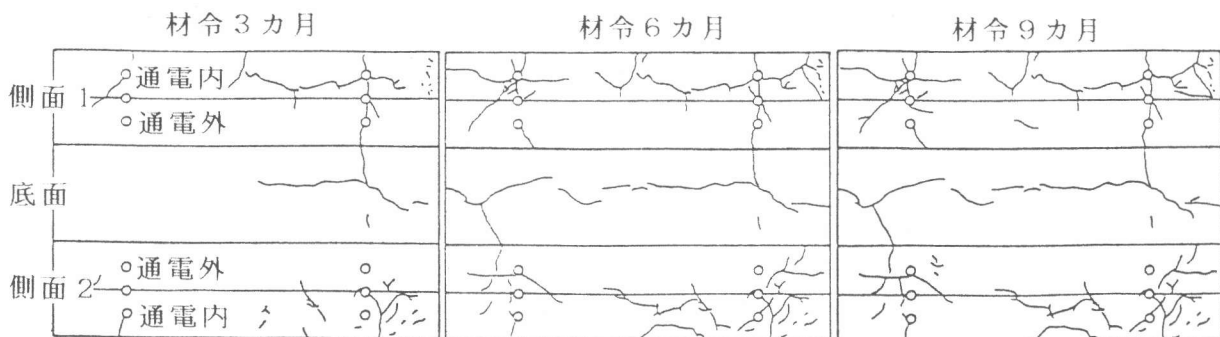


図-14 ひびわれパターン (T2-1.5-NaOH-50)

3. 6 鉄筋表面の観察

鉄筋を取り出してその表面状況を観察したところ、電流密度 $0\text{mA}/\text{m}^2$ ではアルカリ骨材反応によって起こったひびわれからの水の侵入と、ブリージングによる水で鉄筋には赤錆が生じ、

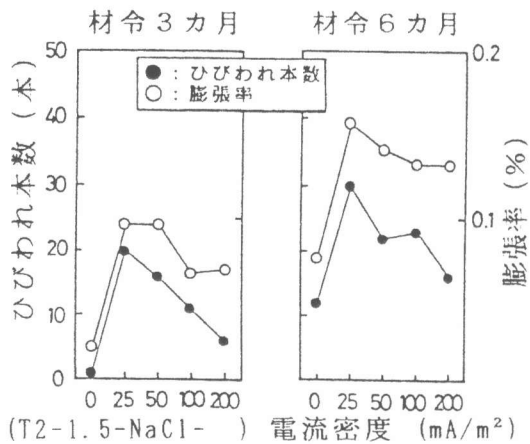


図-15 ひびわれ本数と膨張率の関係

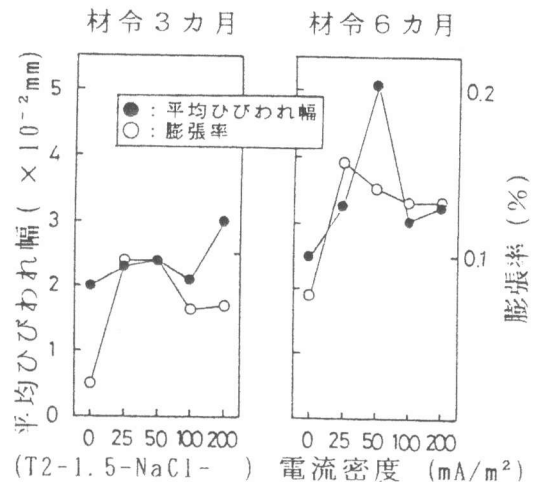


図-16 平均ひびわれ幅と膨張率の関係

ゲル状の白色生成物が所々に付着していた。電流密度 50mA/m²では電気防食の効果が現われたためか錆は確認されなかったが、反応生成物の他に通電側とは反対の面に褐色と黒色の付着物があり、これは焼付けをしたようであった。この付着物の生成と成分は未確認のため、今後十分な検討を行うことにしている。

4. まとめ

- (1) 鉄筋を配置したコンクリート供試体に通電すると、アルカリイオンが移動して濃縮されるので、反応性骨材を使用したコンクリートではアルカリ骨材反応が促進されるが、この現象がそのまま全て膨張量に関与するとは限らない。
- (2) 最も大きい膨張率を示す電流密度、つまり電流密度のベシマムが存在するが、実験要因の違いによって、このベシマム値は変化すると思われる。
- (3) 通電するとアルカリイオンが濃縮されるので、アルカリ量が小さいものでも長期材令で膨張を起こす可能性がある。
- (4) 陰極防食、つまりコンクリートへの通電がアルカリ骨材反応に及ぼす影響については、分極量やひびわれと膨張率との関係、電気抵抗値や電圧との関係など、多方面からの検討が必要である。

〔謝辞〕本研究の実施に際して、鳥取大学大学院生岸田達郎氏（現新井組）、同院生木村厚之氏、同学生井上浩之氏、小川雅彦氏に御尽力を頂き深く感謝する次第である。

- 【参考文献】 岡田 清編著：コンクリートの耐久性，pp122～125，1986
 福沢英刀：さびを防ぐ技術講演会発表論文「電気防食法の現状と今後の課題」
 中川防蝕工業，pp1～17，1986