

# 論文 デサリネーションがコンクリートのアルカリ骨材反応に与える影響

小川 智広<sup>\*1</sup>・上田 隆雄<sup>\*2</sup>・芦田 公伸<sup>\*3</sup>・宮川 豊章<sup>\*4</sup>

**要旨:** デサリネーションを適用する構造物が反応性骨材を含む場合にはアルカリ骨材反応が促進されることが懸念される。そこで本研究では、反応性骨材を含む供試体に通電処理を施したときのコンクリートの膨張特性を検討することとした。その結果、コンクリート中にアルカリが一定以上存在する場合には、通電処理によりアルカリ骨材反応が促進されることが明らかとなった。また、電解液から浸透するリチウムイオンにはそれを抑制する効果が認められた。さらに、通電期間を長くした場合には膨張率が小さくなる傾向が見られた。

**キーワード:** デサリネーション, アルカリ骨材反応, リチウムイオン浸透

## 1. はじめに

デサリネーションは鉄筋コンクリート中の塩化物イオン( $\text{Cl}^-$ )を電気化学的手法を用いて除去する方法である。従来から比較的よく用いられてきた電気防食が、連続的に電流を流し続けることによって鉄筋の腐食を防ぐのに対して、デサリネーションは電気防食の100倍近い電流をある一定期間流すことで通電処理が終了するという特色を有している。電流は、コンクリート中の鉄筋を陰極とし、コンクリート表面に設置した陽極との間に流され、それによって、 $\text{Cl}^-$ や $\text{OH}^-$ などの陰イオンは陽極に、 $\text{Na}^+$ や $\text{K}^+$ などの陽イオンは陰極に引き寄せられる。そのため、カソードである鉄筋近傍には、陽イオン( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ )が蓄積する。これにより適用する構造物が反応性骨材を含む場合にはアルカリ骨材反応が促進されることが懸念される。

これまで、電気防食レベルの通電がアルカリ骨材反応に与える影響についてはいくつかの検討例が見られる<sup>1)2)</sup>が、デサリネーションレベルの

通電に関する検討はわずかしは見られない<sup>3)</sup>。

そこで、本研究では、反応性骨材を含む鉄筋コンクリート供試体にデサリネーションを施したときのコンクリートの膨張挙動を検討することとした。実験要因として、アルカリ量、電流密度、通電期間、電解質溶液( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Li}_3\text{BO}_3$ )、鉄筋量(拘束効果)を選び、膨張量の経時変化の測定および化学分析( $\text{Cl}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{Li}$ )を行った。なお、電解液からのリチウムイオン浸透の効果についても併せて検討することとした。

## 2. 実験概要

実験に用いた供試体は、 $75 \times 150 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体とし、 $75 \times 150\text{mm}$ の断面中央に鋼材を配した。なお、実験に用いた鋼材は、D6(鉄筋比  $p=0.282$ )、D13( $p=1.14$ )であり、比較のために、鉄筋無し(通電もなし)、リード線の供試体も作成した。コンクリート中のアルカリ( $\text{R}_2\text{O}$ )量は2.0, 4.0, 8.0  $\text{kg/m}^3$ の3レベルを選んだ。コンクリートの配合を表-1に、供試体の一覧を

\*1 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 徳島大学助手 工学部建設工学科, 工修 (正会員)

\*3 電気化学工業 (株) 青海工場セメント特殊混和材研究所 (正会員)

\*4 京都大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

表-1 コンクリート配合

水セメント比 W/C %	細骨材率 s/a %	粗骨材の 最大寸法 mm	単体量(kg/m <sup>3</sup> )					
			セメント	水	細骨材	反応性 粗骨材	非反応性 粗骨材	AE 減水剤
54	45	15	328	177	801	692	296	1.31

注) NaCl 混入時は同重量の細骨材を減ずる。

表-2 供試体一覧

R <sub>2</sub> O量 (kg/m <sup>3</sup> )	電流密度 (A/m <sup>2</sup> )	通電期間 (週)	電解質溶液	鉄筋無し	リード線	D6	D13	
2.0	1.0	8	Ca(OH) <sub>2</sub>			4*		
4.0	0.0			4*		2		
	1.0	8	Ca(OH) <sub>2</sub>			4*		
8.0	0.0			4*	3	2	2	
	0.5	8	Ca(OH) <sub>2</sub>			4*		
		4	Ca(OH) <sub>2</sub>			4*		
	1.0	8	Ca(OH) <sub>2</sub>			3	4*	2
				Li <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>			3	4*
		12	Ca(OH) <sub>2</sub>			4*		

注) \*は、うち1本を化学分析用とする。

表-2 に示す。また、供試体の概要図を図-1 に示す。

使用セメントは、普通ポルトランドセメント(R<sub>2</sub>O量=0.61%)である。細骨材は非反応性の砕石(新潟県姫川産)であり、粗骨材は非反応性の砕石(新潟県姫川産)と反応性の砕石(佐賀県有明産輝石安山岩質, JIS A5308 (Sc=650 mmol/l, Rc=200mmol/l; 判定:有害))をペシマム値で混合した。コンクリート打設後、6週間の湿空養生を行った後に通電を開始した。電流密度はコンクリート表面に対して 1.0A/m<sup>2</sup> を、通電期間は 8週間を基本レベルとし、R<sub>2</sub>O量 8.0 kg/m<sup>3</sup> については、0.5A/m<sup>2</sup>, 4, 12週間の通電処理も行ったが、処理終了を同時とし、材令を合わせた。通電は 2面通電(図-1 参照)とし、基長測定後に、電流を流さない面はエポキシ樹脂を塗り、鉄筋も接続部分以外は絶縁した。電解液として、飽和 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液と 1規定の Li<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>(3LiOH·H<sub>2</sub>O + H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> → Li<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> + 6H<sub>2</sub>O) 溶液を用い、無通電の供試体は湿空中に保存した。化学分析は、通電終了直後に行い、Cl, Na, Li の濃度分布を測定した。化学分析時の供試体切断方法を図-2 に示す。通電処理終了

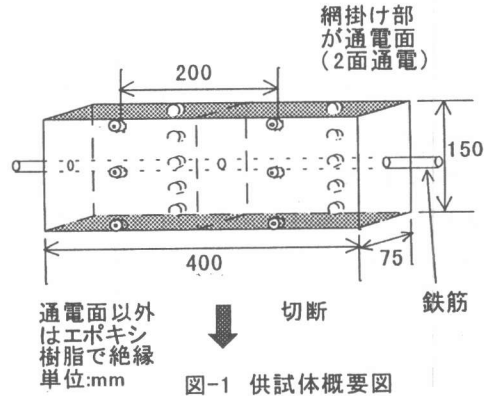


図-1 供試体概要図

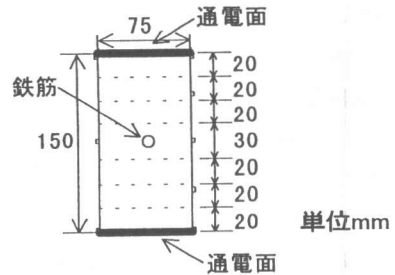


図-2 切断方法

後の静置環境条件としては、40℃, R.H.95% とした。長さ変化測定用のプラグは、養生終了後、コンクリート表面の乾燥を待って、基長を 200mm として図-1 に示すように一方の側面で 5点、もう一方の側面で 3点、計 8点に貼り付けた。なお、通電処理終了

後、電解液の影響でプラグが外れる恐れのあるものは貼り直した。測定は通電処理前後および終了後経時的に行った。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 通電処理の影響

(1)  $R_2O$  量 2.0, 4.0  $kg/m^3$  ( $Ca(OH)_2$ , D6)

総アルカリ含有量が  $R_2O$  量で 2.0, 4.0  $kg/m^3$  の供試体に、電流密度 1.0  $A/m^2$  で 8 週間通電処理を施した後、40℃, R.H.95% の環境下に静置した場合の膨張挙動を、 $R_2O$  量 4.0  $kg/m^3$  で通電処理を施さなかった供試体の膨張挙動と比較して図-3 に示す。鉄筋は D6 で、図中の点は同要因すべての供試体の 8 点の平均値を示している。期間 5 週および 24 週付近で長さ変化が負となっているのは、通電処理前にエポキシ樹脂などで絶縁する際およびプラグ貼直し時に乾燥したためと考えられる。また図-4 には同要因の通電処理終了直後の Na の分布を示す。図-3 より、3 者とも長さ変化率は  $400 \times 10^{-6}$  以下と小さく、現在のところ 4.0  $kg/m^3$  の通電処理を施した供試体はわずかながらひび割れが見られるものの、それ以外の供試体には全くひび割れが見られなかった。図-4 より 4.0  $kg/m^3$  の供試体については鉄筋近傍にかなりのアルカリが移動していることから、今後の挙動に注意する必要があると考えられる。

(2)  $R_2O$  量 8.0  $kg/m^3$  ( $Ca(OH)_2$ , D6)

総アルカリ量が 8.0  $kg/m^3$  の供試体に、0.0, 0.5  $A/m^2$  で 8 週間および 1.0  $A/m^2$  で 4, 8, 12 週間通電処理を施した後、40℃, R.H.95% の環境下に静置した場合の膨張挙動を図-5 に示す。これも、鉄筋は D6 であり、平均値を示している。また、同要因の通電処理終了直後の Na の分布状況は図-6 に示す。図-5 より、0.0  $A/m^2$  の供試体については(1)と同様にほとんど膨張しておらず、ひ

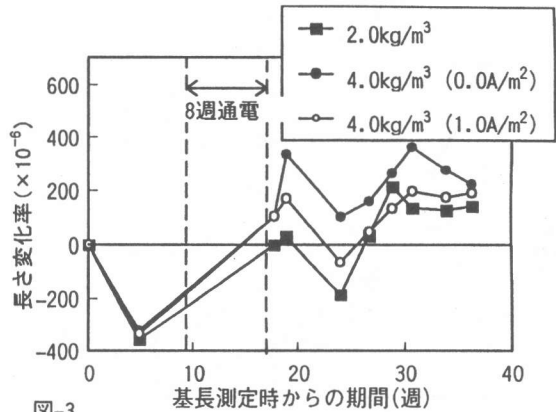


図-3 膨張量の経時変化( $R_2O$ 量: 2.0、4.0  $kg/m^3$ )

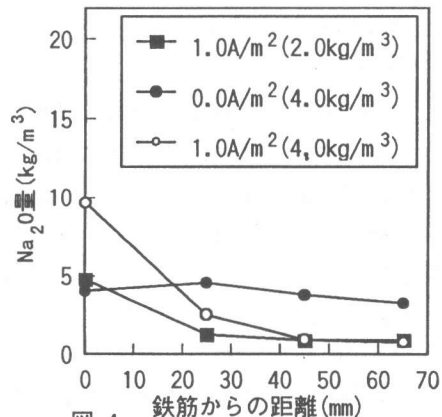


図-4 通電処理終了直後の Na の分布状況 ( $R_2O$ 量: 2.0、4.0  $kg/m^3$ )

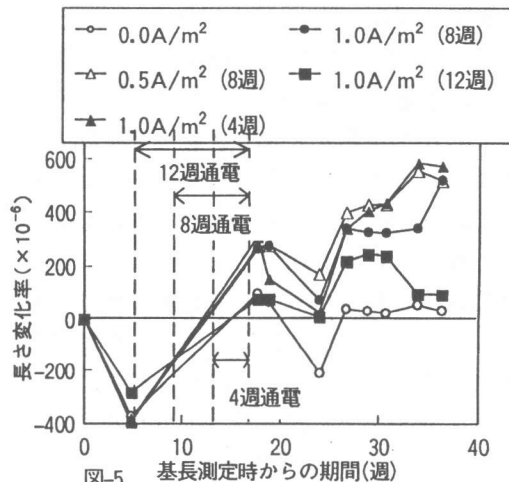


図-5 膨張量の経時変化( $R_2O$ 量: 8.0  $kg/m^3$ )

び割れも全く見られないが、0.5  $A/m^2$  で 8 週および 1.0  $A/m^2$  で 4, 8 週間通電処理した供試体はどれもほぼ同じように、静置 12

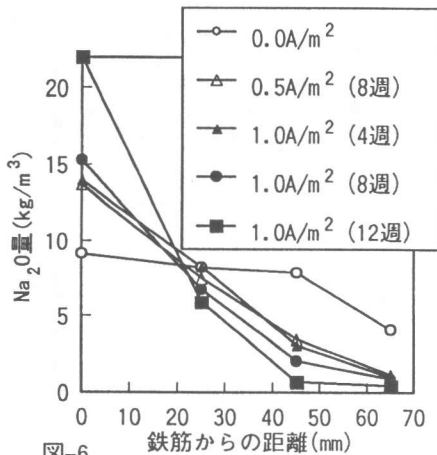


図-6 通電処理終了直後のNa<sub>2</sub>Oの分布状況 (R<sub>2</sub>O量：8.0kg/m<sup>3</sup>)

週間で  $500 \times 10^{-6}$  以上の比較的大きな膨張挙動を示している。また、供試体には鉄筋に沿ったひび割れが発生しており、さらに、その後の静置 12 週間で全体的にひび割れが発生している。図-6 よりそれら 3 者の Na<sub>2</sub>O の分布はほぼ一致している。このことから、Na の鉄筋近傍への移動は、比較的早期にある一定の濃度となるまで移動することと、電流密度が  $0.5 \text{ A/m}^2$  から  $1.0 \text{ A/m}^2$  に変化したときのアルカリ骨材反応に与える影響の変化は小さいと考えられる。

これらに比較して、 $1.0 \text{ A/m}^2$  で 12 週間通電処理を施した供試体は、Na が、8 週間の場合と比べかなり大きく鉄筋近傍に集中している。にもかかわらず、膨張率は上記の 3 者と比較すると  $300 \times 10^{-6}$  以下とかなり小さくなっている。ただし、鉄筋に沿ったひび割れのみが発生しておりゲルの流出が見られた。なお、鉄筋位置での膨張率も  $400 \times 10^{-6}$  程度であった。黒田らによると、電流密度  $0 \sim 200 \text{ mA/m}^2$  で反応性骨材を含むコンクリートに対し通電を行ったところ、 $50 \text{ mA/m}^2$  で膨張率が最大となり、このことから、アルカリイオンの過剰な集積によりいったん生成した反応生成物が流動化し、低膨張性の生成物となり、膨張量が小さくなったことが考えられるとしている<sup>2)</sup>。以

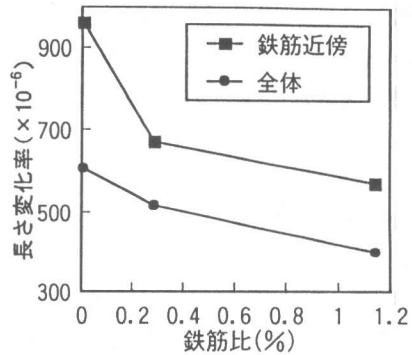


図-7 36週時の膨張量と鉄筋比 (R<sub>2</sub>O量：8.0kg/m<sup>3</sup>、1.0A/m<sup>2</sup>、8週通電)

上より、現在のところ、コンクリートがある一定以上のアルカリを含む場合、通電処理は、アルカリ骨材反応を促進することと、通電期間にはペシマムが存在することが考えられる。

### 3.2 鉄筋の拘束の影響

今回の実験で最も大きい膨張挙動を示した R<sub>2</sub>O 量  $8.0 \text{ kg/m}^3$ 、電流密度  $1.0 \text{ A/m}^2$  で 8 週間通電処理を施した、リード線、D6(p=0.282)、D13(p=1.14)を鉄筋とした供試体の基長測定時からの期間 36 週時の膨張量と、鉄筋比(p)の関係を図-7 に示す。リード線は p=0 とした。膨張量は全体でも右下がりの関係となっており、リード線を用いた場合に、特に鉄筋近傍においてこの傾向が顕著である。これらのことから、アルカリ骨材反応による膨張は鉄筋の付着により拘束抑制されていると考えられる。

### 3.3 Liの浸透の影響(D6)

R<sub>2</sub>O 量  $8.0 \text{ kg/m}^3$ 、電流密度  $1.0 \text{ A/m}^2$  で 8 週間、電解質溶液に飽和 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液および 1 規定の Li<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 溶液を用いて通電処理を施した供試体の、表面部(通電面近傍)、(通電面と鉄筋の)中間部および鉄筋位置における膨張率の経時変化をそれぞれ図-8、図-9 に示す。この結果、Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液を用いた供試体は、鉄筋位置においては  $650 \times 10^{-6}$  を超える膨張を示しているのに対し、Li<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 溶液を用いた供試体については全体

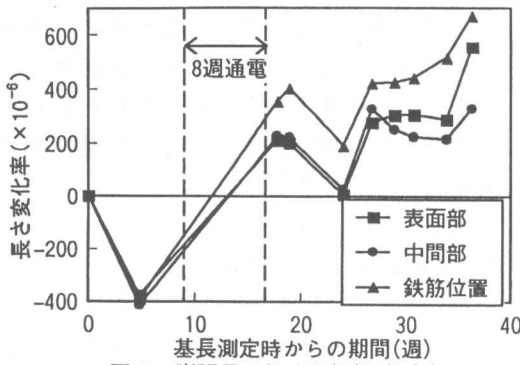


図-8 膨張量の経時変化(Ca(OH)<sub>2</sub>)

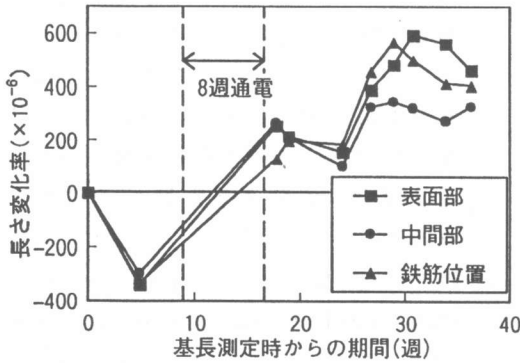


図-9 膨張量の経時変化(Li<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)

に  $600 \times 10^{-6}$  以下である。また、Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液を用いた供試体の方が供試体にひび割れが多数発生していた。

さらに、これらの要因の、通電終了直後の Na の分布を図-10 に示す。図-10 より、Li<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 溶液を用いた供試体においては、Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液を用いたものに比べ、Na の鉄筋近傍における濃度勾配が緩やかである。さらに通電終了直後の Li/Na モル比の分布を図-11 に示す。既往の研究より、コンクリート中に Li イオンを練り混ぜた場合、膨張抑制効果を顕すためには、Li/Na モル比で 0.6~0.9 以上<sup>4) 5)</sup>、Li イオンを含浸させた場合には 1.5 以上程度<sup>6)</sup> が必要であると報告されている。今回の供試体では Li/Na モル比 1.5 以上を達成しているのは、鉄筋からの距離が 45mm 程度以上の部分であるが、今回、鉄筋近傍においても膨張抑制効果が見られるのは、図-10 に見られるように、通電による鉄筋近傍への Na の集

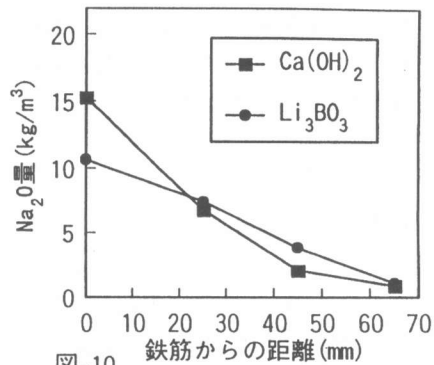


図-10 通電処理終了直後のNa<sub>2</sub>Oの分布状況(電解質溶液の影響)

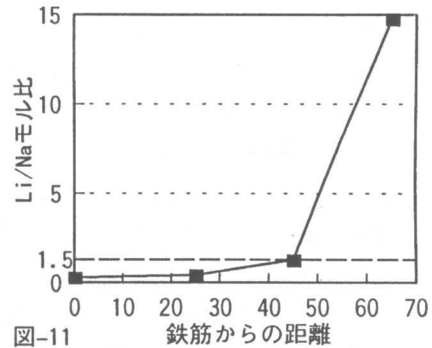


図-11 Li<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>を用いたときの通電処理終了直後のLi/Naモル比の分布 (R<sub>2</sub>O量:8.0kg/m<sup>3</sup>)

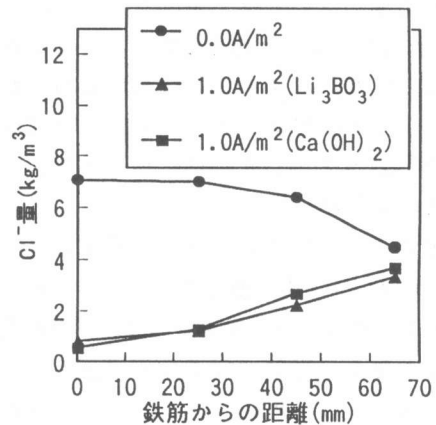


図-12 通電処理終了直後のCl<sup>-</sup>の分布状況(電解質溶液の影響)

中を抑制していることによると考えられる。また、通電処理終了後、自然暴露 6 ヶ月で Na、Li とともにその濃度勾配が緩和される方向へと拡散し、Li/Na モル比は全体として平均化するとの報告<sup>7)</sup>もあるため、膨張抑制効果は今後大きくなると予想される。ま

た、それぞれの溶液を用いたときの脱塩状況を図-12に示す。これより電解質溶液の違いによる脱塩効果の差異は認められない。

#### 4. 結論

本研究の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 総アルカリ量が 2.0, 4.0 kg/m<sup>3</sup> の供試体に、電流密度 1.0 A/m<sup>2</sup> で 8 週間通電処理を施した後、40℃, R.H.95% の環境下に 12 週間静置した結果、膨張率は  $200 \times 10^{-6}$  程度以下と小さかった。また同様に、R<sub>2</sub>O が 4.0 kg/m<sup>3</sup> で通電処理を施していない供試体についても膨張量は比較的小さかった。
- (2) 総アルカリ量が 8.0 kg/m<sup>3</sup> の供試体に、0.0, 0.5 A/m<sup>2</sup> で 8 週間および 1.0 A/m<sup>2</sup> で 4, 8, 12 週間通電処理を施した後、40℃, R.H.95% の環境下に 12 週間静置した結果、0.5 A/m<sup>2</sup> で 8 週間および 1.0 A/m<sup>2</sup> で 4, 8 週間、通電処理を施した供試体についてはアルカリ骨材反応による  $500 \times 10^{-6}$  を超える顕著な膨張が認められた。しかし、通電処理を施さなかった供試体および 1.0 A/m<sup>2</sup> で 12 週間通電処理を施した供試体は、比較的小さな膨張を示していた。
- (3) 総アルカリ量が 8.0 kg/m<sup>3</sup> の供試体に、1.0 A/m<sup>2</sup> で 8 週間通電処理を施した後、40℃, R.H.95% の環境下に 12 週間静置した結果、通電の際の電解質溶液に、Li<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 溶液を用いた供試体は、Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液を用いた供試体に比べ膨張が小さく、ひび割れも少なかったが、今後の挙動に注意する必要があると思われる。

以上より、反応性の骨材および一定以上のアルカリを (NaCl などの形で) 含む鉄筋コンクリート構造物にデサリネーションを適用すると、アルカリ骨材反応による膨張を促進させることが明らかになった。ただ

し、その際の電解質溶液にリチウムを含むものを使用した場合、膨張をある程度抑制する可能性があることが確認された。現在も実験は継続中であり、今後も長期的な検討を行っていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 鳥居和之, 西村敏明, 石井浩司, 川村満紀: 電気防食を実施した鉄筋コンクリート部材のアルカリシリカ反応と耐荷性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.937-942, 1997
- 2) 黒田保ほか: 電流場におけるアルカリ骨材反応に関する研究, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, pp.47-52, 1994.10
- 3) C. L. Page, S. W. Yu, : Potential effects of electrochemical desalination of concrete on alkali-silica reaction, Magazine of Concrete Research, 47, No.170, pp.23-31, Mar., 1995
- 4) 二村誠二: 水酸化リチウムがアルカリシリカ反応に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.1375-1381, 1993
- 5) 高倉誠, 坂口由里子, 友沢史紀, 阿部道彦: Li 化合物によるアルカリ骨材反応の膨張抑制に関する一実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.761-766, 1988
- 6) 北川明雄, 友沢史紀, 阿部道彦: 亜硝酸リチウムの含浸によるコンクリートのアルカリ骨材反応抑制効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.117-122, 1989
- 7) 芦田公伸, 石橋孝一, 酒井裕智: 電気化学的処理による鉄筋コンクリート中へのイオン浸透および拡散状態, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.1107-1112, 1996