

論文 鉄筋コンクリートへの通電がアルカリ含有量および ASR 膨張に与える影響

黒田 保^{*1}・井上 正一^{*2}・高井 伸一郎^{*3}・西林 新蔵^{*4}

要旨: 鉄筋コンクリートへの通電がアルカリ含有量分布および ASR 膨張に与える影響について検討を行い、以下の結果が得られた。(1) 供試体に供給する電流密度の増大とともに鉄筋周辺に集積するアルカリ金属イオン量が増大し、その移動量は積算電流密度の大きさに依存していると考えられた。(2) 通電により ASR 膨張は助長されるが、W/C の相違により通電が ASR 膨張に与える影響が異なる可能性がある。また、電流密度に関するベシマム値の存在が確認された。(3) 現時点では、5mA/m² 程度の電流密度であれば ASR 膨張は大きく助長されることはなかった。(4) ASR による膨張率を電流密度と通電期間の関数として表すことができた。

キーワード: ASR, 膨張率, アルカリ含有量, 電流密度, 電気防食工法

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を低下させる要因の一つにアルカリシリカ反応 (ASR) がある。ASR は反応性骨材中のある種の鉱物 (クリストバライト, トリディマイト, オパールなど) と細孔溶液中のアルカリとの反応であり、長い年月にわたってコンクリート構造物にひび割れによる劣化を生じさせる。ASR が生じるとそれを完全に停止させることはきわめて困難であり、現在のところ、補修や補強により ASR による劣化を完全に停止させる方法はないのが現状である。一方、塩害による劣化を生じた鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食を停止させるために最も効果のある補修工法として電気防食工法がある。しかし、鉄筋コンクリート構造物に電気防食工法を適用した場合に、コンクリート中のアルカリ金属イオン (Na⁺, K⁺) が鉄筋近傍に集積するために ASR が助長され、それによる劣化を助長させる可能性があることが指摘されている¹⁾。塩害と ASR による複合劣化を生じた鉄筋コンクリート構造物に対して電気防食工法を適用する場合には、鉄筋コンクリートへの通電が ASR に与える影響について明らかにしておくことが重要である。現在のところ、鉄筋コンクリートに通電を行った場合に、ASR が助長されたという報告は数例ある^{2), 3), 4)}が、それらはいずれも電気防食工法で一般的に供給される電流密度の範囲よりも大きい電流密度を供給した結果である。

そこで、本研究では、電気防食工法で一般的に適用される範囲内の電流密度を鉄筋コンクリートに供給し、通電がコンクリート中のアルカリ含有量分布およびコンクリートの ASR 膨張に与える影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験に使用したセメントは普通ポルトランドセメント (密度: 3.15 g/cm³, 全アルカリ (R₂O) = 0.53%) である。細骨材にはアルカリシリカ反応性試験で「無害」と判定された砕砂と陸砂を質量比で 9:1 となるように混合したもの (表乾密度 = 2.64 g/cm³) を使用した。粗骨材には「無害でない」と判定され、実構造物において ASR による劣化を生じさせたことが認められた反応性骨材 (安山岩, 表乾密度 = 2.60g/cm³, アルカリ濃度減少量 (R_c) = 172mmol/l, 溶解シリカ量 (S_c) = 732mmol/l, モルタルバー法による材齢 6 ヶ月時の膨張率 = 0.38%) と「無害」と判定された骨材 (表乾密度: 2.62g/cm³) を質量比で 6:4 となるように混合したものを使用した。コンクリートの空気量の調整用に AE 剤 (主成分: アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤) を使用し、また、コンクリート中のアルカリ総量の調整には塩化ナトリウム (NaCl) を使用した。

2.2 コンクリートの示方配合および供試体作製方法

本実験に使用したコンクリートの示方配合を表-1 に示す。コンクリートの空気量は 4.5 ± 1.5% となるように AE 剤を使用して調整した。また、コンクリートのアルカリ総量を 8kg/m³ となるように塩化ナトリウムを混入

表-1 示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
45	45	180	400	752	924
60	45	180	300	800	968

*1 鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻土木工学講座准教授 博 (工) (正会員)

*2 鳥取大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻土木工学講座教授 工博 (正会員)

*3 村本建設 (株) 営業統括部 工修 (正会員)

*4 鳥取大学名誉教授 工博 (正会員)

して調整した。

本実験では、長さ変化測定用の供試体として、**図-1**に示す 100×100×300mm の角柱供試体を使用した。供試体の 100×100mm 断面の中央部に直径 13mm の黒皮付き丸鋼を配置した。また、陽極にはチタンメッシュを使用した。コンクリート打設面 (100×300mm) にチタンメッシュを配置した後に、厚さ 10mm のモルタル (使用したコンクリートから粗骨材のみを取り除いた配合) でオーバーレイを行い、チタンメッシュを固定した。コンクリートを打設した翌日に、いずれの実験に用いる供試体についても、作製後に供試体に湿布を巻きつけて、その上からポリエチレンラップとガムテープを用いて密封して、20℃の恒温室で 28 日間湿布養生を行った。湿布養生終了後、供試体から突き出した鉄筋とチタンメッシュに電源に接続するためのコードを接続し、コードを接続した箇所にはプチルゴムテープおよびビニールテープを巻きつけた。さらに、水分の影響を避けるために、端面に突き出した鉄筋およびチタンメッシュを含む供試体端面 (100×100mm) をエポキシ樹脂で被覆した。コンクリート中のアルカリ含有量を測定するための供試体寸法は 100×100×200mm として、長さ変化の測定に使用したものと同様の手順で供試体を作製した。

2.3 実験条件

本実験では、水セメント比 (W/C) を 45 および 60% の 2 水準選定した。供試体に供給する電流密度は、陽極側のコンクリート面積 (100×300mm) に対して 0 (無通電)、5, 30 および 100mA/m² の 4 水準選定した。また、供試体の保存条件は、40℃, R.H.100%とした。

2.3 実験方法

(1) アルカリ含有量の測定

コンクリート中に含有するアルカリ量の測定には、W/C=60%の供試体を用いた。この配合の供試体に対して、40℃, R.H.100%の保存槽で保存した無通電供試体 (0mA/m²) および 5, 30, 100mA/m² の電流密度となるように通電を行った通電供試体から通電開始直前 (0 週)、通電開始後 24 および 48 週後に試料を採取して、それらの試料に含有するアルカリ量の測定を行った。試料の採取方法およびアルカリ含有量の測定方法を以下に述べる。

まず、供試体の長手 (200mm) 方向の中央部から厚さ 50mm の試料 (100×100×50mm) を鉄筋軸と直交する方向に切り出した。さらに、**図-2** に示すように、その試料を 100×100mm 断面に対して 1 辺が 25mm の正方形となるように切断し、これらをアルカリ含有量測定用の試料 (25×25×50mm) とした。採取した各試料 (25×25×50mm) に対して、建設省 (現国土交通省) 総合技術開発プロジェクトの「コンクリート中の水溶性アルカリ金属元素の分析方法 (案)」⁵⁾ に準拠して水溶性アルカリ量 (Na₂O

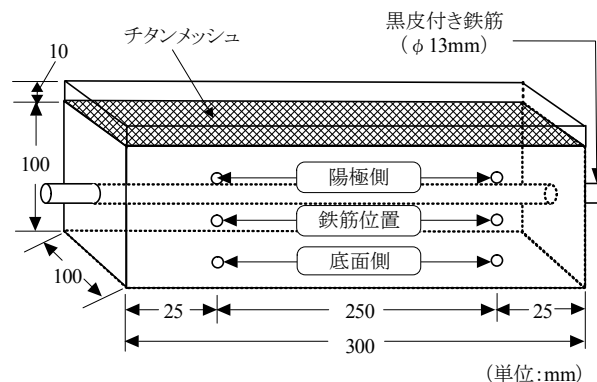


図-1 供試体概略図

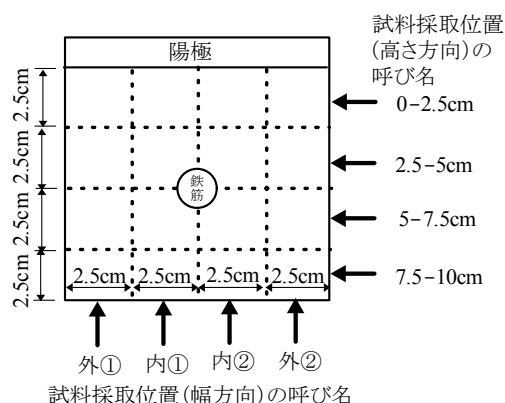


図-2 アルカリ含有量測定用試料の採取位置

量および K₂O 量) を測定し、測定した Na₂O 量と K₂O 量からコンクリートに含有するアルカリ量 (R₂O 量) を求めた (R₂O=Na₂O+0.658 K₂O)。なお、各試料の採取位置の呼び名を**図-2**に示すとおりとする。

(2) コンクリートの長さ変化の測定

W/C=45 および 60%の供試体を 40℃, R.H.100%の保存槽で保存した無通電供試体 (0mA/m²)、および電流密度が 5, 30, 100mA/m²となるように通電を行った通電供試体に対して、所定の保存期間経過後に長さ変化の測定を行った。このとき、測定時の供試体温度を 20℃とするために、長さ変化測定日の前日に供試体を保存槽から取り出し、それを 20℃の恒温室で 24 時間静置してから長さ変化の測定を行った。長さ変化の測定は、ダイヤルゲージ (検長 250mm, 最小目盛 0.001mm) を用いて、1つの供試体につき 2つの側面で行い、それぞれの面で長手方向の 3つの位置 (**図-2** 参照) における膨張率を求めた。なお、**図-2** に示すように、3つの長さ変化測定位置を、チタンメッシュを設置した面を上にして、上から「陽極側」、「鉄筋位置」、「底面側」と称す。

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリート中のアルカリに与える通電の影響

通電開始直前の供試体のアルカリ含有量 (R₂O) 分布を**図-3**に示す。断面内のいずれの位置においても、ほ

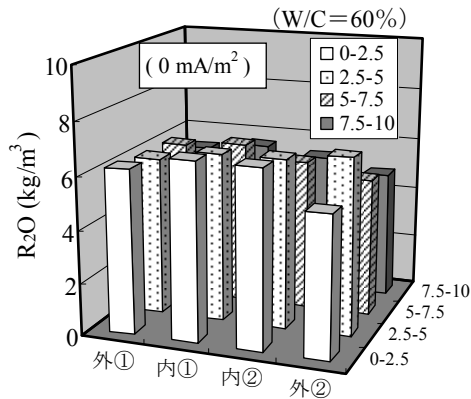


図-3 アルカリ含有量分布（無通電供試体）

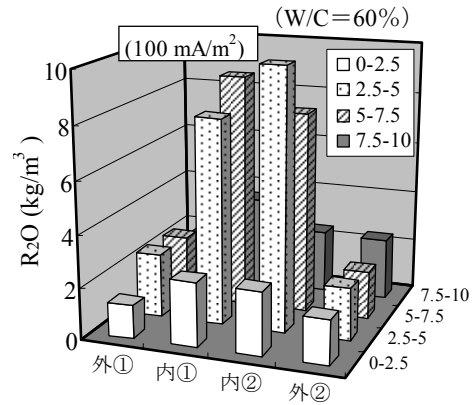


図-4 アルカリ含有量分布（48週）

ば同量のアルカリ含有量（ 6kg/m^3 ）であった。ここで、アルカリ含有量がアルカリ総量（ 8kg/m^3 ）よりも少なくなっているのは、水溶性のアルカリの量を測定しているためである。通電を行なった供試体断面のアルカリ含有量分布の一例として、図-4に 100mA/m^2 で48週間通電を行なった供試体の結果を示す。通電を行なった供試体は、断面の外周部から陰極である鉄筋周辺部（断面中央部）に向かってアルカリ金属イオン（ Na^+ および K^+ ）が移動し、そこでそれらが集積していることがわかる。

図-5に、48週間通電を行なった供試体について、高さ方向に2.5cm間隔で切断した試料（「0-2.5」, 「2.5-5」, 「5-7.5」および「7.5-10」）に含有する R_2O 量と電流密度との関係を示す。なお、図に示す R_2O 量は、図-2に示す供試体断面のうちの「内①」と「内②」の平均値である。図より、鉄筋に近い「2.5-5」および「5-7.5」の位置では、供試体に供給する電流密度の増大とともに R_2O 量が多くなるのがわかる。また、電流密度が比較的小さい 5mA/m^2 でも、アルカリ金属イオンが鉄筋方向へ移動している。一方、陽極に近い「0-2.5」の位置では、他の電流密度のものとは比べて 100mA/m^2 の電流密度で通電を行った場合に R_2O 量が少なくなり、また、鉄筋をはさんで陽極と反対側の「7.5-10」の位置では電流密度の違いによる R_2O 量の差は見られない。「0-2.5」の位置において、電流密度の増大とともに R_2O 量が少なくなるのは、通電によってアルカリ金属イオンが鉄筋方向に移動したためと考えられる。これらのことから、通電期間が同じであれば、供試体に供給する電流密度の増大とともに鉄筋周辺へのアルカリ金属イオンの集積量が多くなると考えられる。

各測定位置（「0-2.5」, 「2.5-5」, 「5-7.5」, 「7.5-10」）における R_2O 量と積算電流密度（電流密度と通電期間の積）との関係を図-6に示す。鉄筋近傍（「2.5-5」および「5-7.5」）では積算電流密度が大きくなるほど R_2O 量は多くなっており、また、積算電流密度が 403mA/m^2 付近で R_2O 量は一定値に収束している。一方、陽極側

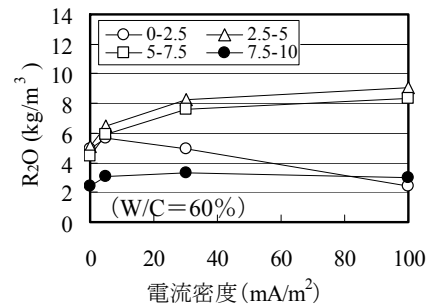


図-5 R_2O 量と電流密度との関係（48週）

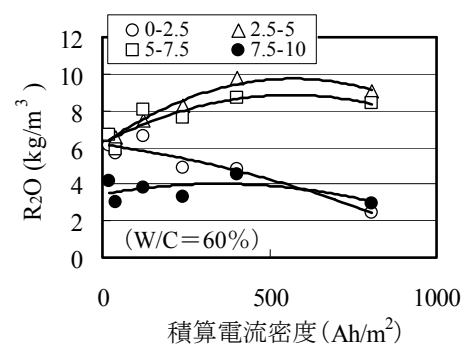


図-6 R_2O 量と積算電流密度との関係

（「0-2.5」）では通電によってアルカリ金属イオンが鉄筋方向へ移動するため、積算電流密度が大きくなるほど R_2O 量は少なくなる。また、陽極と反対側（「7.5-10」）では、積算電流密度にかかわらず R_2O 量はほぼ一定値となっている。以上のことから、コンクリート中のアルカリ金属イオンの鉄筋近傍への移動量は積算電流密度の大きさに依存していると考えられる。

3.2 コンクリートのASR膨張に与える通電の影響

膨張率の経時変化の一例として、 $\text{W/C}=60\%$ の供試体の測定位置「陽極側」について、所定の電流密度（0, 5, 30 および 100mA/m^2 ）で通電を行った場合に生じる膨張率の経時変化を図-7に示す。 100mA/m^2 で通電を行なった供試体を除いて、無通電供試体と比較して、通電によりASR膨張が大きくなっている。図-8は、 $\text{W/C}=45\%$ および 60% の供試体の「鉄筋位置」における膨張率と電

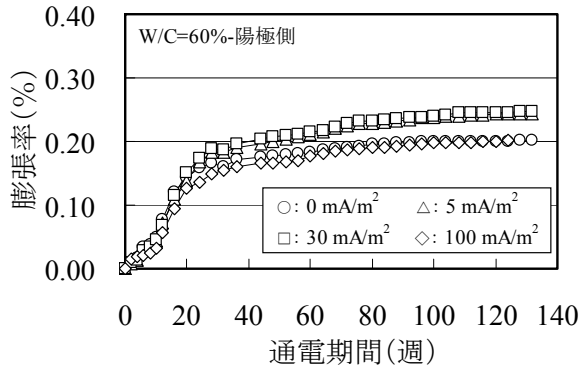


図-7 膨張率の経時変化

流密度との関係を示したものである。膨張率の結果は、通电期間 24, 48, 72, 88 および 124 週 (W) におけるものである。W/C=45%の供試体では電流密度の増大とともに膨張率が大きくなった。一方、W/C=60%の供試体では 30mA/m²の電流密度で通电を行った供試体の膨張率をもっとも大きくなり、100mA/m²の電流密度で通电を行った供試体の膨張率は無通电の膨張率よりも小さくなる傾向を示した。すなわち、既往の研究^{3), 4)}において報告されている電流密度に関するペシマム値 (ASR 膨張を最大にする電流密度) が本実験においても確認された。W/C=45%の供試体については、通电にともないアルカリ金属イオンが鉄筋周辺に集積してその濃度が上昇したこと、およびカソード反応によって鉄筋周辺に OH⁻が発生することから、電流密度の増大とともに膨張率が大きくなったと考えられる。一方、W/C=60%の供試体については、電流密度の増大とともに鉄筋近傍のアルカリ量が増加し、ASR によって生成されるアルカリシリカゲルが粘性の低い高アルカリ型 (Na₂O/SiO₂ が大きい) のゲルとなる⁶⁾ こと、また、W/C が大きいコンクリートの方が細孔の量およびその大きさが大きいため、アルカリシリカゲルの粘性低下による膨張圧の減少の影響を大きく受けること、が一因となり、30mA/m²の電流密度で通电を行った供試体の膨張率をもっとも大きくなったと考えられる。

以上のことから、通常の電気防食工法で使用される電流密度よりも大きい電流密度で通电を行った場合、W/C の相違により、供試体への通电が ASR 膨張に与える影響が異なる可能性があると考えられる。また、現在のところ、いずれの W/C の供試体についても、5mA/m²程度の通电では ASR 膨張は大きく助長されていないといえる。

3.3 ASR 膨張と電流密度との関係

W/C=45%および 60%の供試体について、通电の影響を大きく受けると考えられる「陽極側」と「鉄筋位置」における膨張率と通电期間との関係を、最小二乗法により (1) 式で近似した。

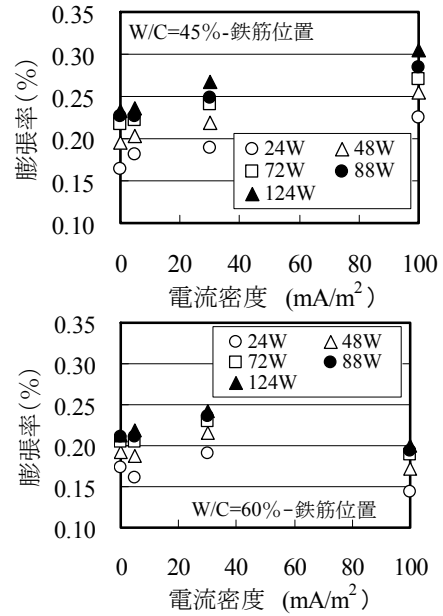


図-8 膨張率と電流密度との関係

表-2 a, b および r の値

W/C (%)	測定位置	電流密度 (mA/m ²)	a	b	r
45	陽極側	5	99.40	4.178	0.9931
		30	97.66	3.395	0.9962
		100	65.00	3.294	0.9943
	鉄筋位置	5	70.66	3.580	0.9893
		30	66.61	3.203	0.9941
		100	46.68	2.932	0.9906
60	陽極側	5	90.91	3.259	0.9931
		30	86.65	3.243	0.9919
		100	108.79	3.914	0.9913
	鉄筋位置	5	92.63	3.666	0.9897
		30	70.42	3.400	0.9872
		100	97.09	4.011	0.9786

$$Ex = \frac{t}{a + b \cdot t} \quad (1)$$

ここに、Ex: 膨張率 (%), t: 通电期間 (週), a, b: 実験定数, である。得られた a および b の値と相関係数 (r) を表-2 に示す。a および b と電流密度との関係を図-9 および図-10 に示す。いずれの測定位置 (「陽極側」および「鉄筋位置」) においても、a および b の値は、W/C=45%の供試体については電流密度の増大とともに小さくなり、W/C=60%の供試体については電流密度の増大とともに大きくなる傾向を示した。a と電流密度との関係を直線式で、b と電流密度との関係を累乗式で最小二乗法により回帰した結果をそれぞれの図中に示す。式中の CD は電流密度 (mA/m²) である。W/C=60%の供試体の「鉄筋位置」において両者の相関がやや悪いものの、その他のものについては、直線式と累乗式で回帰したと

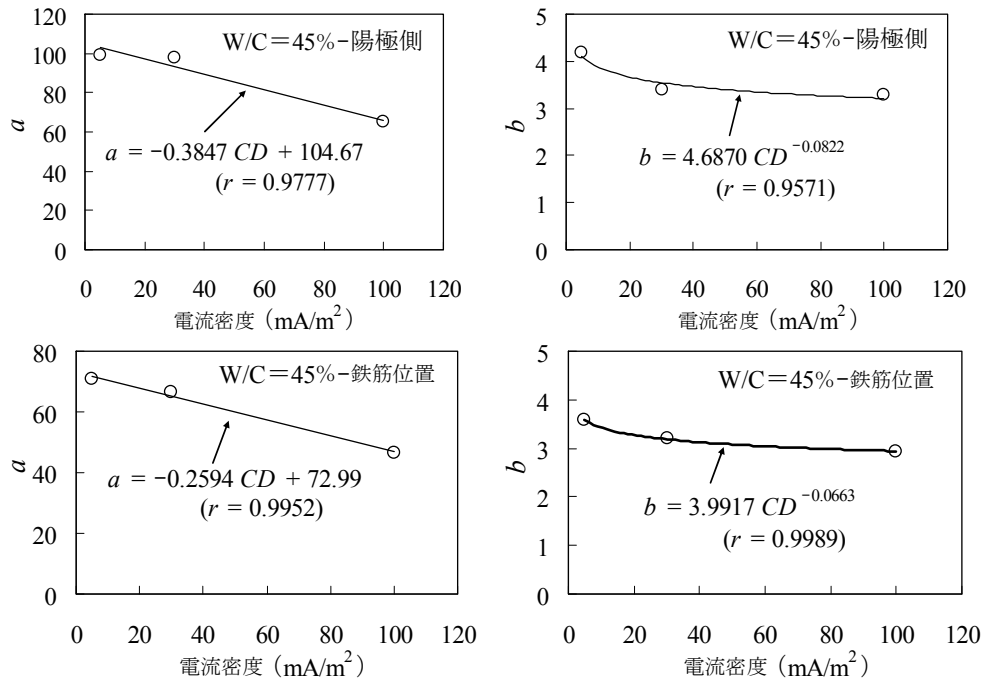


図-9 a および b と電流密度との関係 (W/C=45%)

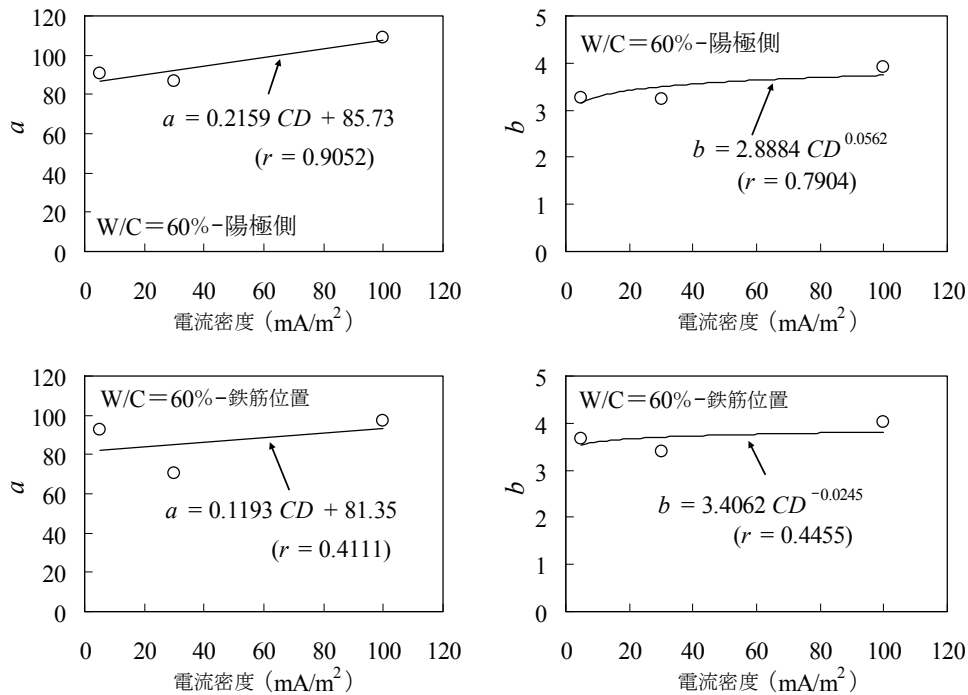


図-10 a および b と電流密度との関係 (W/C=60%)

ころ比較的よい相関が得られた。これらの直線式と累乗式を (1) 式に代入すると (2) 式が得られる。

$$Ex = \frac{t}{(c \cdot CD + d) + f \cdot CD^g \cdot t} \quad (2)$$

ここに、 c 、 d 、 f および g は実験定数である。

W/C=45% および 60% の供試体の陽極側と鉄筋位置について、膨張率の測定値と (2) 式により得られる膨張率の計算値との関係を 図-11 に示す。通電期間の短い

(膨張率が小さい) ときに計算値と測定値の差がやや大きい。また、30mA/m² で通電を行なった W/C=60% の供試体の「鉄筋位置」において膨張率の計算値と測定値の差がやや大きいものの、いずれの供試体についても、通電期間がある程度経過する (膨張率が大きくなる) とその差が小さくなり、両者は比較的良好に一致しているといえる。したがって、通電を行なったコンクリートの ASR 膨張は、通電期間と供給した電流密度で評価できる可能

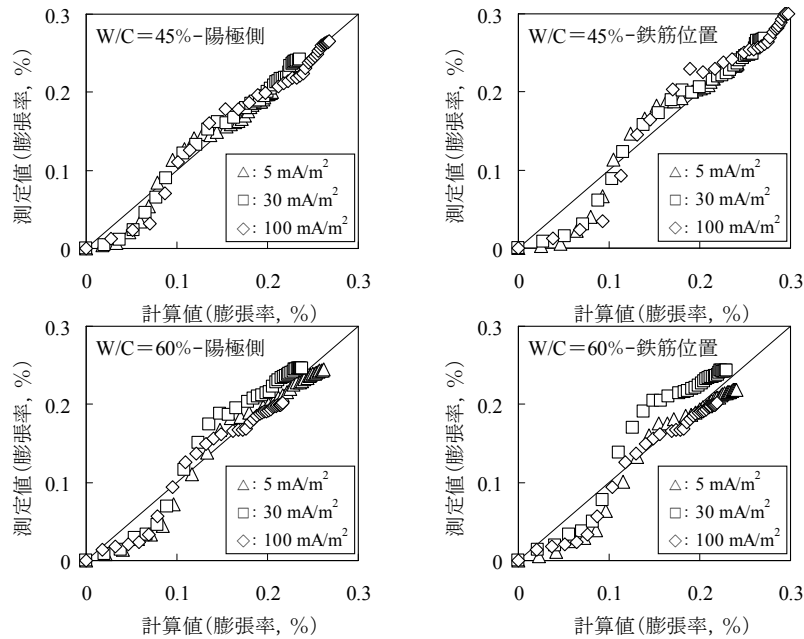


図-11 膨張率の測定値と計算値との関係

性があると考えられる。今後、十分に検討する必要があるが、通電する電流密度や通電期間から ASR による膨張挙動を推定できる手法が確立できれば、ASR と塩害による複合劣化を受けるコンクリート構造物への電気防食工法の適用を検討する際に有効であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリートへの通電（鉄筋を陰極）がコンクリートのアルカリ含有量分布および ASR 膨張に与える影響について検討を行った。本研究によって得られた結果を以下にまとめて示す。

- (1) 供試体に供給する電流密度の増大とともに鉄筋周辺に集積するアルカリ金属イオン量が増大する。また、コンクリート中のアルカリ金属イオンの鉄筋周辺への移動量は積算電流密度の大きさに依存していると考えられる。
- (2) 通電により ASR 膨張は助長されるが、W/C の相違により、供試体への通電が ASR 膨張に与える影響が異なる可能性がある。本研究においては、W/C=60% の供試体について、ASR 膨張を最大にするような電流密度に関するペンナム値の存在が確認された。
- (3) 現時点では、供給する電流密度が 5mA/m^2 程度であれば ASR 膨張は大きく助長されることはなかった。
- (4) ASR によるコンクリートの膨張率を電流密度と通電期間の関数として表すことができた。

謝辞

アルカリ含有量の測定において、日本エルガード協会およびコンクリート構造物の電気化学的補修工法研究会

に多大なるご支援とご協力をいただきました。ここに、謝意を表します。また、本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（課題番号：22560462）により実施したものであることを付記する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー107 電気化学的防食工法設計施工指針（案），土木学会，p.19, p.62, 2001.11
- 2) 石井浩司，鳥居和之，川村満紀，松本一昭：コンクリート構造物のアルカリシリカ反応に及ぼす電気防食の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.1, pp.861-866, 1996
- 3) T. Kuroda, S. Nishibayashi and Q. Bian: Study of Alkali-Aggregate Reactions in Electrical Fields, Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, pp.645-652, 1996
- 4) Ahmad Shayan: Combined Effects of Alkali-Aggregate Reaction(AAR) and Cathodic Protection Currents in Reinforced Concrete, Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, pp.229-238, 2000
- 5) 財団法人土木研究センター：建設省総合技術プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発（土木構造物に関する研究成果），財団法人土木研究センター，pp.159-161, 1989.5
- 6) 川村満紀，榎場重正：アルカリ・シリカ反応とその防止対策，土木学会論文集，No.348/V-1, pp.13-26, 1984.8