

論文 電気防食工法適用時における ASR 膨張抑制方法に関する検討

黒田 保^{*1}・井上 正一^{*2}・吉野 公^{*3}・西林 新蔵^{*2}

要旨: 本研究では、鉄筋コンクリートへの通電がコンクリートの ASR 膨張に与える影響および電気防食を適用する際に ASR 膨張を抑制する方法について検討し、以下の結果を得た。(1) 鉄筋コンクリートへの通電は ASR 膨張を助長するが、ASR 膨張を最大にするような電流密度に関するペシマム値の存在が確認された。(2) 電気防食工法を適用する前に、電気防食工法における電流密度よりもきわめて大きな電流密度を一定期間供給することにより、電気防食工法適用中の ASR 膨張を抑制できる可能性のあることが示唆された。その際、供給する電流密度が大きく、その電流密度を供給する期間が長いほど、ASR 膨張の抑制効果は大きくなった。

キーワード: ASR, 膨張率, ASR 膨張抑制, 電気防食工法, 電流密度

1. はじめに

塩害による劣化を生じた鉄筋コンクリート構造物において、鉄筋腐食を停止させるための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のあることが指摘されている^{1), 2), 3), 4)}。したがって、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。一方、鉄筋コンクリートに通電を行った場合、電流密度に関してペシマム値が存在し、その値よりも大きな電流密度を供給すると、電流密度の増大とともに ASR によって生じる膨張 (ASR 膨張) は小さくなるという報告もある⁵⁾。

本研究では、電流密度に関してペシマム現象が現れることに着目し、脱塩や再アルカリ化工法などで適用される大きな電流密度 (ペシマム値を超える電流密度) を電気防食工法を適用する前の一定期間供給することによって、電気防食工法適用中に ASR 膨張が助長されるのを抑制できるか否か、その方法について検討した。

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=3.14 g/cm³, 全アルカリ=0.55%) である。細骨材には、アルカリシリカ反応性試験で「無害でない」と判定された安山岩砕砂 (表乾密度=2.71 g/cm³, アルカリ濃度減少量 (Rc) =97 mmol/L, 溶解シリカ量 (Sc) =439 mmol/L, モルタルパー法による材齢 26 週における

膨張率=0.309%) を使用した。また、**2.2 節**で説明する陽極材を設置するためのオーバーレイ用のモルタルには、アルカリシリカ反応性試験で「無害」と判定された安山岩砕砂と陸砂を質量比で 8:2 となるように混合したもの (表乾密度=2.65 g/cm³) を使用した。粗骨材には、アルカリシリカ反応性試験で「無害」と判定された安山岩砕石 (表乾密度=2.67 g/cm³) 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、コンクリート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。コンクリートの水セメント比は 45% とし、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が 8 kg/m³ となるように、塩化ナトリウム (NaCl) を混入して調整した。なお、コンクリート供試体製造用の細骨材には、アルカリシリカ反応性試験で「無害でない」と判定された安山岩砕砂を使用するが、後述する陽極を設置するために用いるオーバーレイ用のモルタルには、「無害」と判定された安山岩砕砂と陸砂の混合砂を用いて製造したコンクリート (アルカリ総量=8 kg/m³) をウェットスクリーニングして得られるものを使用した。

表-1 示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C	S	G
45	41	180	400	721	1020

本実験では、**図-1**に示す供試体を使用した。この供試体の作製方法を以下に述べる。まず、100×100×300

*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教授 博 (工) (正会員)

*2 鳥取大学名誉教授 工博 (正会員)

*3 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 工博 (正会員)

mm のコンクリート角柱供試体の横断面 (100×100 mm) 中央部にφ13 mm のステンレス丸棒 (SUS304) を配置した。ここで、ステンレス丸棒を使用したのは、鋼材の腐食による膨張の影響を排除するためである。この供試体の打設面 (100×300mm) に陽極材としてチタンメッシュを配置した後に、厚さ 10mm のモルタル (コンクリートをウエットスクリーニングして得られたもの) 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、供試体に湿布を巻きつけ、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、それを 20℃ の恒温室で 28 日間湿布養生を行なった。湿布養生終了後、供試体から突き出したステンレス丸棒とチタンメッシュに直流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ブチルゴムテープおよびビニ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、端面に突き出したステンレス丸棒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。長さ変化測定用に、**図-1** に示す箇所にコンタクトゲージ用のチップを貼り付けた。

2.3 実験条件および実験方法

本実験では、電気防食工法で用いられる一般的な電流密度を継続して供試体に供給するシリーズと、ASR 膨張を抑制することを目的として、一般的な電流密度を供給する前に、脱塩工法や再アルカリ化工法で適用されるようなきわめて大きな電流密度を一定期間供給するシリーズの実験を行った。いずれのシリーズについても、所定の保存期間が経過した後に、**図-1** に示すように供試体側面において、ステンレス丸棒の軸方向と平行な方向の測定位置における長さ変化と、それと直交方向の測定位置における長さ変化を測定し、膨張率を算出した。供試体側面におけるステンレス丸棒の軸方向と平行な方向の測定位置については、陽極 (チタンメッシュ) と陰極 (ステンレス丸棒) の中間位置「陽極側」、ステンレス丸棒に沿った「陰極位置」、およびステンレス丸棒と底面との中間位置「底面側」とした (いずれも基長 250 mm)。直交方向の測定位置は、供試体端部から 25 mm の位置と供試体側面中央の位置 (**図-1** の「鉛直方向」と記載した位置で、基長 50 mm) である。1 体の供試体について 2 側面の長さ変化を測定し、それぞれの測定位置 (「陽極側」、「陰極位置」、「底面側」、「鉛直方向」) における膨張率は、2 体の供試体の平均値とした。長さ変化の測定には、最小メモリ 0.001mm のダイヤルゲージを用いた。

(1) 一般的な電流密度を継続して供給するシリーズ

28 日間の湿布養生終了後、供試体の各測定位置における初期長さを測定した。供試体を 40℃、R.H.100% の保存槽で保存し、所定の電流密度 (陽極単位面積当たり) となるように、ステンレス丸棒を陰極として直流電流を

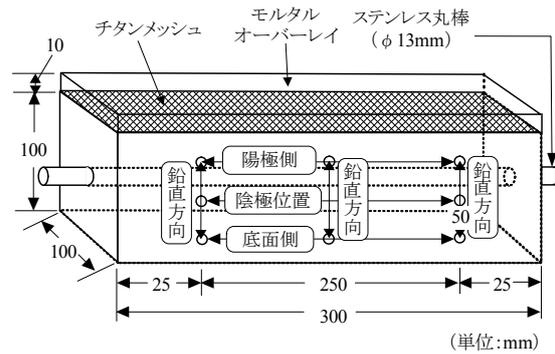


図-1 供試体概略図

供給した。供試体に供給する電流密度は、0 (無通電)、5、15、30、100 mA/m² とした。100 mA/m² の電流密度は電気防食工法としては大きな電流密度であるが、比較のためにこの電流密度を設定した。所定の保存期間終了後に供試体を保存槽から取り出し、それを 20℃ の恒温室に静置し、供試体温度が 20℃ となった後 (約 24 時間後) に各測定位置の長さ変化を測定した。

(2) 一般的な電流密度を継続して供給する前に大きな電流密度を一定期間供給するシリーズ

28 日間の湿布養生終了後、供試体の各測定位置における初期長さを測定した。供試体を 40℃、R.H.100% の保存槽で保存し、電気防食工法で適用されるものよりきわめて大きな電流密度 (1 A/m² あるいは 2 A/m²) を一定期間 (4 週間あるいは 8 週間) 供給した後、各測定位置の長さ変化を測定した。その後、40℃、R.H.100% の保存槽で保存し、通電を行なわない無通電 (0 mA/m²) の供試体と 30 mA/m² で通電を行なった供試体について、各測定位置における長さ変化を測定した。長さ変化の測定は、20℃ の恒温室で供試体温度が 20℃ となった後 (約 24 時間後) に行なった。

3. 実験結果と考察

3.1 一般的な電流密度を継続して供給するシリーズ

無通電 (0 mA/m²) および 5、15、30 および 100 mA/m² で通電を行なった供試体について、ステンレス丸棒の軸方向と平行な方向 (以下、軸方向と略記する) の測定位置における膨張率の経時変化を**図-2** に示す。図の横軸に示す保存期間は、供試体に通電を開始してからの期間を示し、以下の図に示す保存期間においても同様である。「陽極側」については、保存期間 17 週までは、15 mA/m² までの電流密度で通電を行なった場合には無通電供試体と同等の膨張率となっているが、62 週では、無通電の供試体と比較して、電流密度の大きなものほど膨張率がやや小さくなる傾向を示した。30 mA/m² 以上の電流密度では、保存期間の早い時期から、電流密度の増大とともに膨張率が小さくなる傾向を示した。「陽極側」と比較して

明確ではないが、「陰極位置」についても無通電供試体よりも通電供試体の方が膨張率は小さく、特に、 100mA/m^2 で通電を行なった供試体の膨張率が最も小さくなった。

「底面側」についても、通電を行なった供試体の膨張率は、無通電供試体の膨張率以下となった。軸方向のASR膨張については通電によって助長されることはなく、むしろ通電によってASR膨張が低減される結果となった。

一方、**図-3**に示す「鉛直方向」のASR膨張については、保存期間17週において、 15mA/m^2 までは電流密度の増大とともにASR膨張が大きくなる傾向を示すが、それ以上の電流密度(30mA/m^2 および 100mA/m^2)とすると、電流密度の増大とともにASR膨張が低減される結果となった。保存期間62週においても、 15mA/m^2 で通電を行った供試体の膨張率が最も大きい。本実験においても、既往の研究⁵⁾において確認された、電流密度に関するペシマム値が確認された。このように、電流密度に関してASR膨張を最大とするペシマム値が存在するのは、次のことが一因と考えられる。電流密度の増大とともに、陰極であるステンレス丸棒周辺には早期にアルカリ金属イオン(Na^+ および K^+)が集積し、また、その周辺では、カソード反応により生成される OH^- 濃度が高まる。この結果、早期にASRゲルが多量に生成されるため、電流密度の増大とともにASR膨張は大きくなると考えられる。一方、電流密度が過剰に大きくなると、陰極周辺のアルカリ金属イオン濃度が過剰となり、粘性の低い高アルカリ型($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ のモル比が大きい)のASRゲル^{6),7)}となるため、膨張圧が緩和されて膨張率が小さくなると考えられる。これらのことが一因となり、電流密度に関してASR膨張を最大とするペシマム値が確認されたと考えられる(本実験では 15mA/m^2)。

なお、「軸方向」と「鉛直方向」では、膨張率と電流密度との関係が異なる結果となった。この結果の相違については、ステンレス丸棒とコンクリートとの付着やモルタルオーバーレイによる軸方向の拘束などの要因が影響していると考えられるが、本研究の範囲内ではこの理由について明らかにすることはできなかった。

3.2 一般的な電流密度を継続して供給する前に大きな電流密度を一定期間供給するシリーズ

コンクリートにアルカリシリカ反応性の骨材が使用されている場合に、電気防食工法適用時においてASRが助長されるのを防止し、ASR膨張を抑制する目的で、電気防食工法適用前に、脱塩工法や再アルカリ化工法で適用されるようなきわめて大きな電流密度を一定期間通電する方法について検討した。このような方法を検討するのは、**3.1節**でも確認されたように、ペシマム値を超える電流密度を供給すれば、ASR膨張を低減することができると考えたからである。

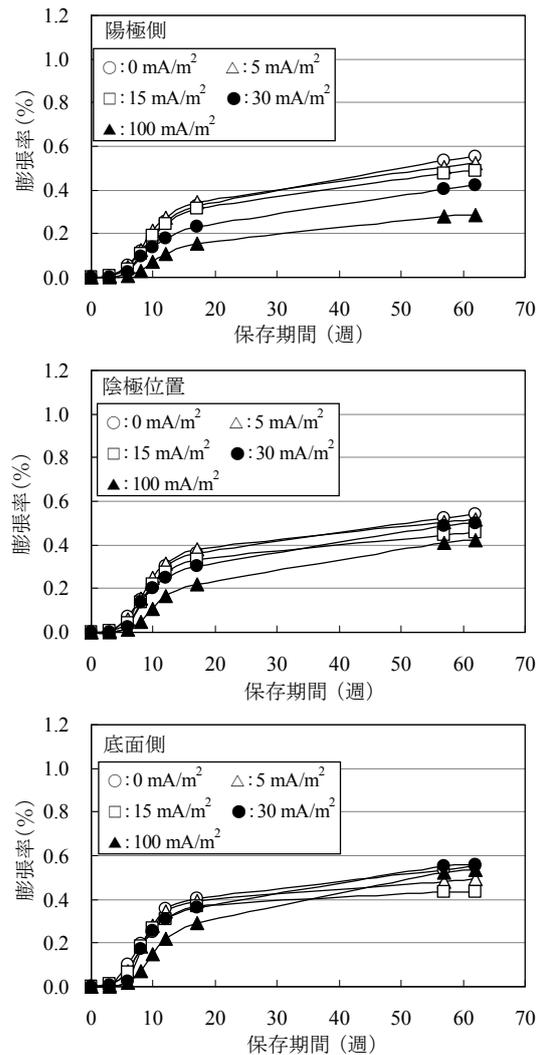


図-2 膨張率と電流密度との関係(軸方向)

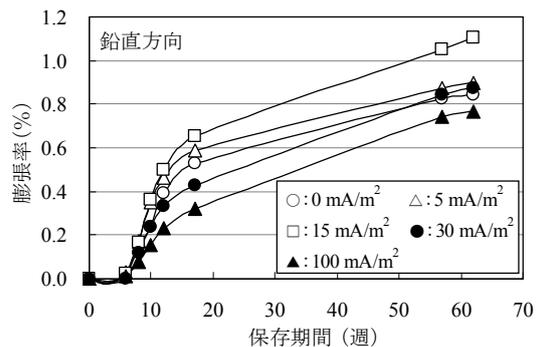


図-3 膨張率と電流密度との関係(鉛直方向)

図-4および**5**に、 40°C 、R.H.100%の環境下で、 1A/m^2 の電流密度を8週間(1A-8W)、 2A/m^2 の電流密度を4週間(2A-4W)および 2A/m^2 の電流密度を8週間(2A-8W)供給した後に、無通電(0mA/m^2)とした供試体の各測定位置における膨張率の経時変化を示す。なお、これらの図には、大きな電流密度を供給しないで、無通電のまま 40°C 、R.H.100%の環境下に保存した供試体の膨張率も示す(図には、この供試体を「前処理なし」と記す)。

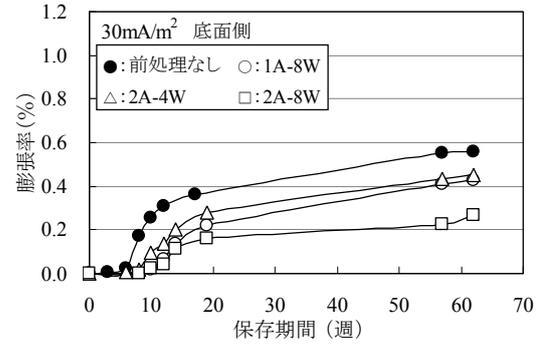
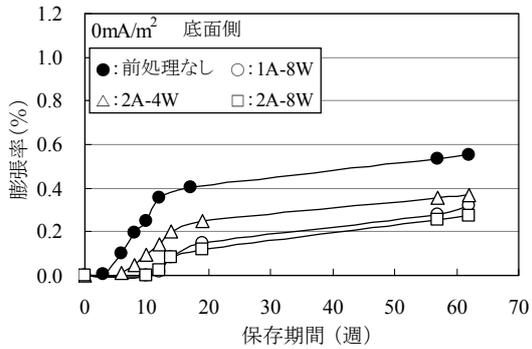
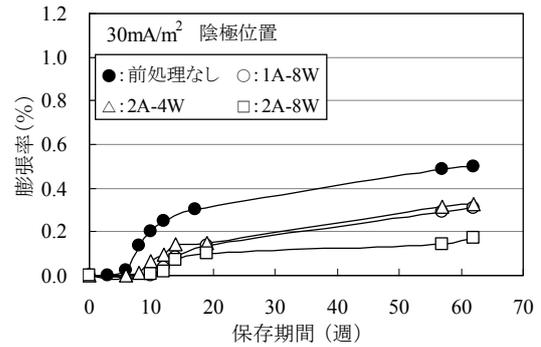
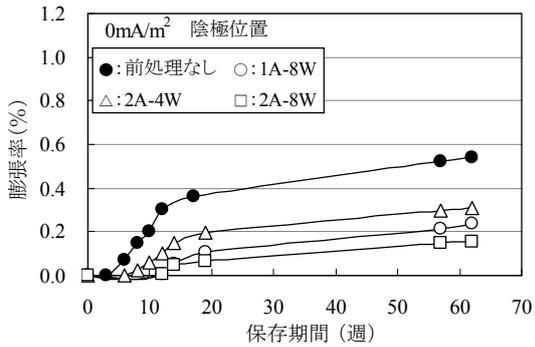
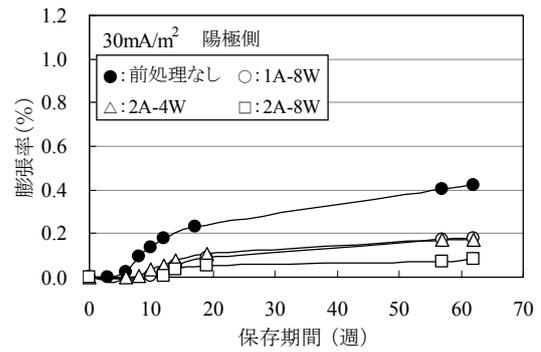
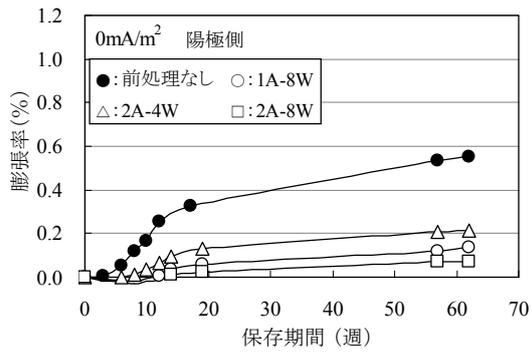


図-4 前処理条件と ASR 膨張との関係 (軸方向)

図-6 前処理条件と ASR 膨張との関係 (軸方向)

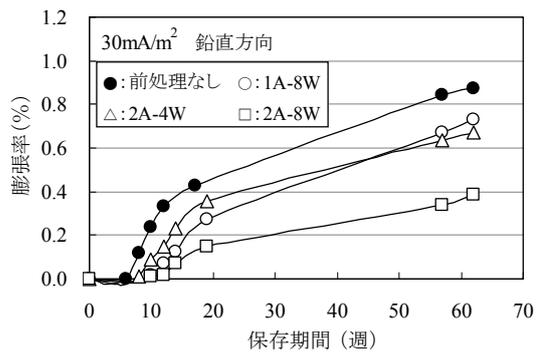
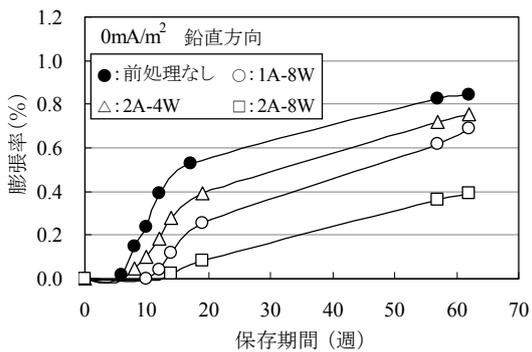


図-5 前処理条件と ASR 膨張との関係 (鉛直方向)

図-7 前処理条件と ASR 膨張との関係 (鉛直方向)

図の横軸に示す保存期間は、大きな電流密度を供給してからの期間を示す（「無処理」のものは、40℃、R.H.100の環境下においてからの期間）。いずれの測定位置においても大きな電流密度を供給している間（1A-8W、2A-4Wおよび2A-8W）に膨張は生じていない。軸方向の測定位置については（図-4）、前処理なしのものと比較して、大きな電流密度を一定期間供給した供試体（1A-8W、

2A-4Wおよび2A-8W）の ASR 膨張は大きく抑制されていることがわかる。特に、電流密度が大きく、その供給期間が長いものほど ASR 膨張の抑制される割合は大きい。この理由として、大きな電流密度を供給するほど、早期に陰極周辺のアルカリ金属イオン濃度が上昇し、粘性の低い ASR ゲルが生成されることが一因として考えられる。また、「鉛直方向」の測定位置においても、軸方

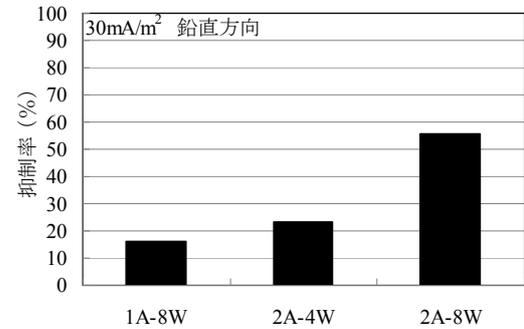
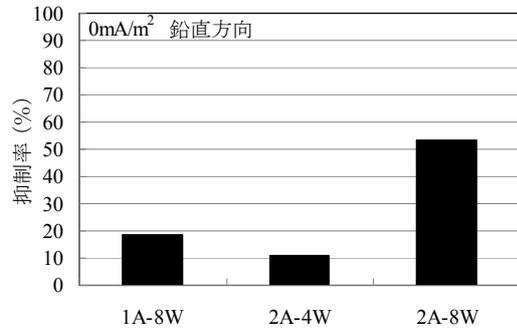
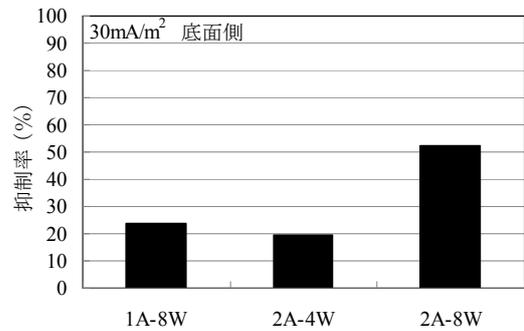
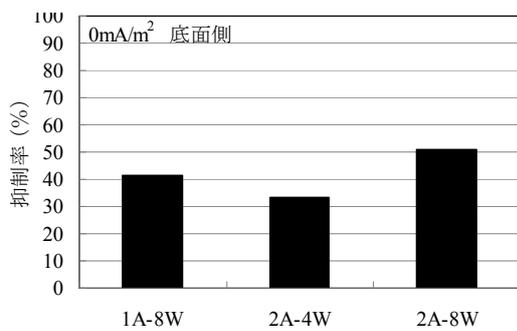
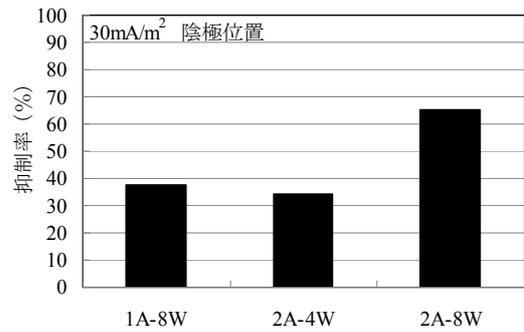
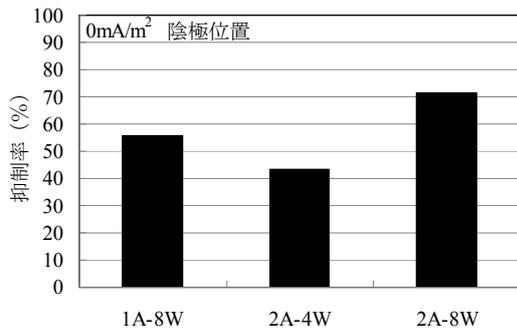
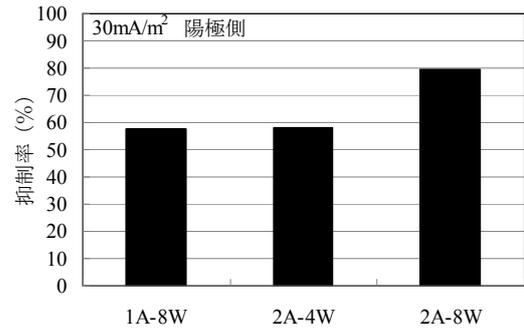
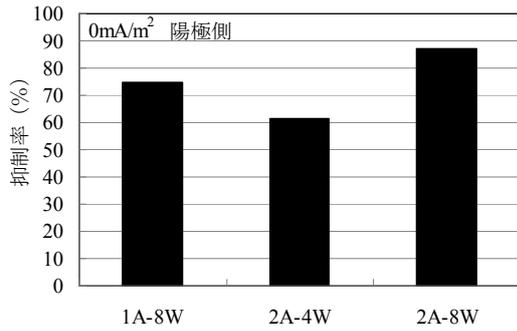


図-8 各前処理条件における ASR 膨張抑制率 (0 mA/m²)

図-9 各前処理条件における ASR 膨張抑制率 (30 mA/m²)

向よりやや ASR 膨張が抑制される割合は小さくなっているが、電流密度の大きさが大きくその供給期間が長い供試体ほど膨張率は小さくなった。

図-6 および 7 に、上記と同じ条件で大きな電流密度を供給した後に、30 mA/m²の通電を継続して供給した供試体の膨張率の経時変化を示す。図に示す「前処理なし」は、大きな電流密度を供給せずに、40℃, R.H.100%の環境下で 30 mA/m²の通電を継続して供給した供試体を示す。無通電供試体と同様に、30 mA/m²で継続して通電を行なった供試体においても、「軸方向」および「鉛直方向」

の測定位置にかかわらず、あらかじめ大きな電流密度を供給することによって ASR 膨張が抑制されることがわかる。

図-8 および 9 に、大きな電流密度の供給条件（電流密度の大きさとその供給期間）と、大きな電流密度を供給することによる ASR 膨張の抑制率との関係を示す。図に示す抑制率は、保存期間 62 週におけるものである。ここに、ASR 膨張の抑制率とは、あらかじめ大きな電流密度を供給することにより、そのような処理を行なわない供試体（「前処理なし」）に対してどれだけ膨張率を低減

できるか、その割合を表すもので、式 (1) のように定義した。

$$R = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 R ：抑制率（%）、 E_1 ：あらかじめ大きな電流密度を供給しない供試体（「前処理なし」）の膨張率（%）、 E_2 ：あらかじめ大きな電流密度を供給する供試体の膨張率（%）、である。

あらかじめ大きな電流密度を供給することによって、その後無通電とした供試体および 30 mA/m^2 で通電を継続した供試体のいずれの供試体についても ASR 膨張は抑制されており、 2 A/m^2 の電流密度を 8 週間供給する条件が最も ASR 膨張を抑制することがわかる。また、 2 A/m^2 の電流密度を 8 週間供給することにより、「陽極側」で 80~90%、「陰極位置」で 60~70%、「底面側」で 50%、「鉛直方向」で 55% 程度の膨張を抑制することができた。

以上のことから、本研究の範囲内では、電気防食工法を適用する前に、それよりもきわめて大きな電流密度を一定期間供給することにより ASR 膨張を抑制できる可能性のあることが示唆された。本稿では、保存期間 62 週までの結果について述べたが、今後も測定を継続し、さらに長期的な ASR 抑制効果についても検討する必要があると考える。

4. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリートへの通電がコンクリートの ASR 膨張に与える影響について検討した。さらに、電気防食工法を適用する際に、ASR 膨張を抑制する方法について検討した。本研究の範囲内で得られた結果を以下にまとめて示す。

- (1) 鉄筋コンクリートに通電を行なうことによって、ASR 膨張は助長された。
- (2) 鉄筋コンクリートに通電を行なった場合、ASR 膨張を最大にするような電流密度に関するベシマム値の

存在が確認された。

- (3) 電気防食工法を適用する前に、電気防食工法における電流密度よりもきわめて大きな電流密度を一定期間供給することにより、電気防食工法適用中の ASR 膨張を抑制できる可能性のあることが示唆された。電気防食工法適用前に供給する電流密度が大きいほど、また、その電流密度を供給する期間が長いほど、電気防食工法を適用する際の ASR 膨張の抑制効果は大きくなった。

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) 黒田保, 井上正一, 高井伸一郎, 西林新蔵：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1021-1026, 2013
- 6) 川村満紀, 柳場重正：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
- 7) 中野錦一：アルカリ骨材反応の種類, メカニズムおよび特徴, コンクリート工学, Vol.24, No.11, pp.17-22, 1986.11