

# 論文 通電方法の相違が電気防食工法を適用した鉄筋コンクリートの ASR 膨張に与える影響

黒田 保<sup>\*1</sup>・吉野 公<sup>\*2</sup>・井上 正一<sup>\*3</sup>・西林 新蔵<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究では、電気防食工法を適用する際にアルカリシリカ反応により生じる膨張 (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) 100mA/m<sup>2</sup>までの範囲内で継続して通電を行なうことにより、ASR 膨張は大きく助長された。(2) 電気防食工法で一般的に供給される範囲内の電流密度においてペシマム値が存在しない場合でも、電気防食工法適用前に大きな電流密度を一定期間供給することによって、電気防食中の ASR 膨張を抑制できる可能性のあることが明らかとなった。(3) 無通電の供試体よりも電気防食中の ASR 膨張を抑制することができる前処理条件は、2A/m<sup>2</sup>の電流密度を 12 週間供給する条件であった。

**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<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) が鉄筋近傍に集積するためにアルカリシリカ反応 (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<sup>1), 2), 3), 4)</sup>。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 膨張は小さくなるという報告もある<sup>5)</sup>。

既往の研究において、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: 1A/m<sup>2</sup>あるいは 2A/m<sup>2</sup>) を電気防食工法適用前の一定期間 (4 週間あるいは 8 週間) 供給することによって、その後の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ことを報告した<sup>6)</sup>。しかし、この研究では、コンクリートの配合を水セメント比 45% の 1 種類のみで検討したものであり、たとえば、イオンの移動速度が速いと考えられる高水セメント比のコンクリートについても同様の抑制効果が得られるかどうかは不明である。

そこで本研究では、水セメント比が 60% のコンクリートで作製した供試体を用いて、電気防食工法適用中の ASR 膨張を抑制するため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/cm<sup>3</sup>, 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/cm<sup>3</sup>, アルカリ濃度減少量 (Rc) =97 mmol/L, 溶解シリカ量 (Sc) =439 mmol/L, モルタルバー法による材齢 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/cm<sup>3</sup>) 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碎石 (表乾密度=2.67 g/cm<sup>3</sup>) 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 60% とし、空気量が 4.5±1.5% となるように AE 剤を使用して調整した。

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
60	45	180	300	829	966

また、コンクリートのアルカリ総量が 8 kg/m<sup>3</sup> となるように、塩化ナトリウム (NaCl) を混入して調整した。な

\*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)

\*3 鳥取大学名誉教授 工博 (正会員)

お、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/m<sup>3</sup>、表-1 の単位細骨材量は S=811 kg/m<sup>3</sup> となり、その他の単位量は同じである）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。

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示す。

まず、100×100×300 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（コンクリートをウェ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℃の恒温室内で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プ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、それと直角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「鉄筋位置」、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）。直角方向の測定位置は、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

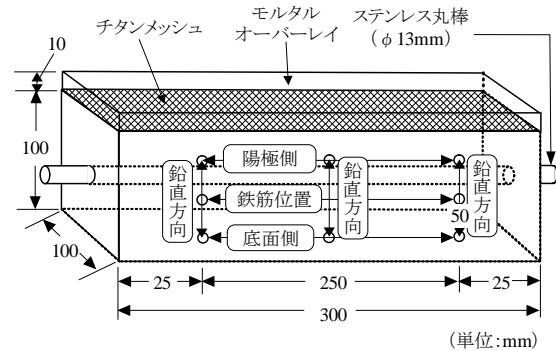


図-1 供試体概略図

の長さ変化を測定し、それぞれの測定位置（「陽極側」、「鉄筋位置」、「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、最小目盛 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/m<sup>2</sup> とした。100 mA/m<sup>2</sup> 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℃ の恒温室内に静置し、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/m<sup>2</sup> あるいは 2 A/m<sup>2</sup>）を一定期間（4 週間、8 週間あるいは 12 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、電流密度が 30 mA/m<sup>2</sup> となるように継続して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℃ の恒温室内で供試体温度が 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

促進環境下（40℃、R.H.100%）で保存された無通電（0 mA/m<sup>2</sup>）の供試体と 5、15、30 および 100 mA/m<sup>2</sup> 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）の測定位置のうち「陽極側」の測定位置における膨張率の経時変化を図

-2 に、「鉄筋位置」における膨張率の経時変化を図-3 に示す。また、上記と同じ供試体について、ステンレス丸棒の軸方向と直角な方向（以下、軸直角方向と略記する）である「鉛直方向」の測定位置における膨張率の経時変化を図-4 に示す。図-2 に示す陽極側の測定位置については保存期間 12 週から膨張を生じ始め、45 週までは供給する電流密度の相違による膨張率の差は小さい。保存期間 45 週以降には、5mA/m<sup>2</sup> で通電を行なった供試体の膨張率が、無通電の供試体やその他の電流密度で通電を行なった供試体の膨張率よりやや大きくなった。図-3 に示す鉄筋位置については、保存期間が概ね 14 週以降から 100mA/m<sup>2</sup> で通電を行なった供試体の膨張率が、無通電の供試体やその他の電流密度で通電を行なった供試体のそれよりもやや大きくなったものの、陽極側と同様に、電流密度の相違による膨張率の差は小さかった。底面側の膨張率についても陽極側と同様の傾向であった。一方、図-4 に示す「鉛直方向」の測定位置について、100mA/m<sup>2</sup> で通電を行なった供試体は他の電流密度で通電を行なった供試体よりも膨張開始時期が早く、その後の膨張率は大きくなった。また、軸方向の測定位置（「陽極側」、「鉄筋位置」および「底面側」と比較して、鉛直方向の測定位置では膨張率が大きくなり、電流密度の相違による膨張率の差が大きくなった。このように、軸方向と軸直角方向では膨張率の大きさや、電流密度の相違による膨張率の差が異なるのは、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の影響により、コンクリートが軸方向に拘束されるためと考えられる。すなわち、ASR により膨張するコンクリートが軸方向に拘束されるため、コンクリートの軸方向の膨張率は小さくなる。一方、軸方向の拘束によるポアソン効果により、鉛直方向の膨張率は大きくなり、その結果、電流密度の相違による影響が膨張率の差として大きく現れたと考えられる。

図-5 および図-6 に、軸方向の測定位置および鉛直方向の測定位置における膨張率と供試体に供給した電流密度との関係を示す。図-5 に示す軸方向の測定位置について、陽極側における膨張率は、5mA/m<sup>2</sup> で通電を行なった場合に他の電流密度で通電を行なった供試体のそれより膨張率はやや大きくなっており、既往の研究<sup>9)</sup>でも確認されたペシマム現象が現れたものと考えられる。一方、鉄筋位置および底面側における測定位置については、無通電の供試体と比較して、通電を行なった供試体の方が膨張率は大きくなり、供給した電流密度が最も大きい 100mA/m<sup>2</sup> で通電を行なった供試体の膨張率が最大となった。これは、通電によって、コンクリート細孔溶液中のアルカリ金属イオン (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) が陰極であるステンレス丸棒周辺に集積すること、および、カソード反応によりステンレス丸棒周辺に水酸化物イオン (OH<sup>-</sup>) が発

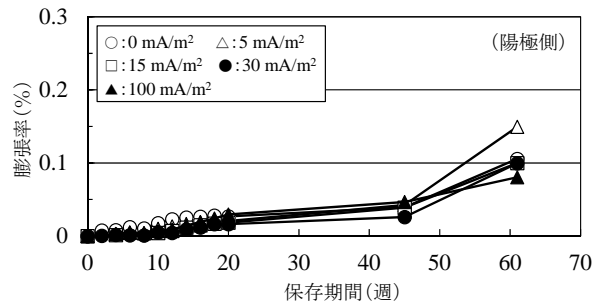


図-2 膨張率と電流密度との関係（陽極側）

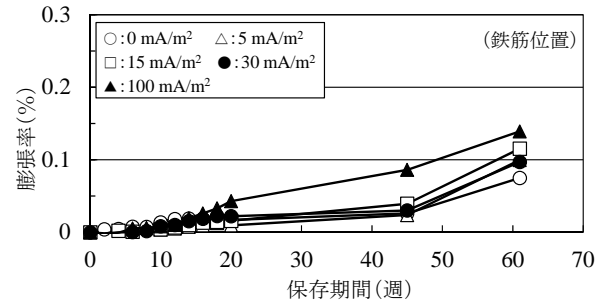


図-3 膨張率と電流密度との関係（鉄筋位置）

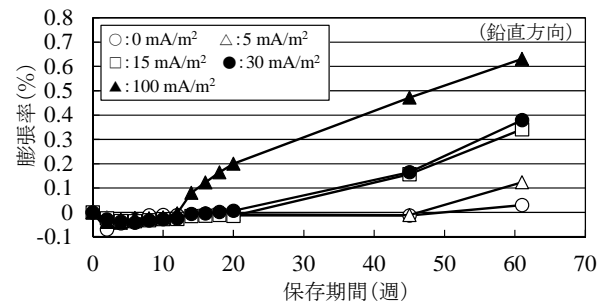


図-4 膨張率と電流密度との関係（鉛直方向）

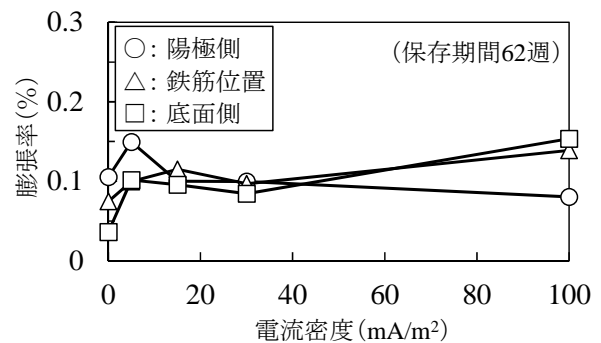


図-5 膨張率と電流密度との関係（軸方向）

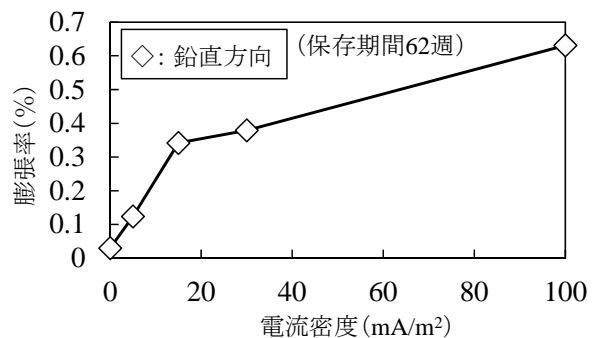


図-6 膨張率と電流密度との関係（軸直角方向）

生することにより、ASR が助長されたためと考えられる。図-6 に示す鉛直方向の測定位置については、無通電の供

試体と比較して通電を行なった供試体の方が膨張率は大きくなり、電流密度の増大とともに ASR 膨張が大きく助長された。このように、軸方向の測定位置と比較して軸直角方向の膨張率が電流密度の増大とともに大きく助長されたのは、上述したように、通電によりステンレス丸棒周辺でアルカリ金属イオン ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) と水酸化物イオン ( $\text{OH}^-$ ) の濃度が上昇して ASR が助長されたことと、軸方向の膨張が拘束されることによる影響 (ポアソン効果) を受けたためと考えられる。

### 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

既往の研究<sup>6)</sup>において、電気防食工法において一般的な電流密度の範囲内に電流密度に関するペシマム値が存在する場合には、その電流密度よりもきわめて大きい電流密度 ( $1\text{A}/\text{m}^2$  あるいは  $2\text{A}/\text{m}^2$ ) をある一定期間 (4 週間あるいは 8 週間) 供給することにより、電気防食工法適用中に ASR 膨張が助長されることはなく、むしろ抑制されることを報告した。本研究で用いた配合のコンクリートについては、陽極側の膨張率については  $5\text{mA}/\text{m}^2$  で膨張率が最大となった (電流密度に関するペシマム値が確認された) もの、その他の測定位置については、 $100\text{mA}/\text{m}^2$  までの電流密度の範囲では、電流密度の増大とともに膨張率が大きくなった (電流密度に関するペシマム値は確認されなかった)。このような配合のコンクリートについても、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極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に生じる ASR 膨張を抑制できるか否かを検討する。

本研究では、電気防食工法適用前に供給する電流密度とその供給期間として、 $1\text{A}/\text{m}^2$  の電流密度を 8 週間 (1A-8W) および 12 週間 (1A-12W)、 $2\text{A}/\text{m}^2$  の電流密度を 4 週間 (2A-4W)、8 週間 (2A-8W) および 12 週間 (2A-12W) と設定した。この電気防食工法適用前の通電を「前処理」と呼ぶことにする。

図-7~10 に、 $40^\circ\text{C}$ 、R.H.100%の促進環境下で各種条件の前処理 (1A-8W, 1A-12W, 2A-4W, 2A-8W および 2A-12W) を行い、その後に同様の促進環境下で  $30\text{mA}/\text{m}^2$  の通電を継続して行なった供試体の各測定位置 (陽極側, 鉄筋位置, 底面側および鉛直方向) における膨張率の経時変化を示す。なお、これらの図には、前処理を行わず、促進環境下で  $30\text{mA}/\text{m}^2$  の通電を継続して行なった供試体の各測定位置 (陽極側, 鉄筋位置, 底面側および鉛直方向) における膨張率の経時変化も示す。この前処理を行わない供試体を、図には「前処理なし」と記す。また、図の横軸に示す保存期間は、前処理開始後からの期間 (前処理を行わないものは、 $40^\circ\text{C}$ 、R.H.100%の環境下に保存してからの期間) を示す。

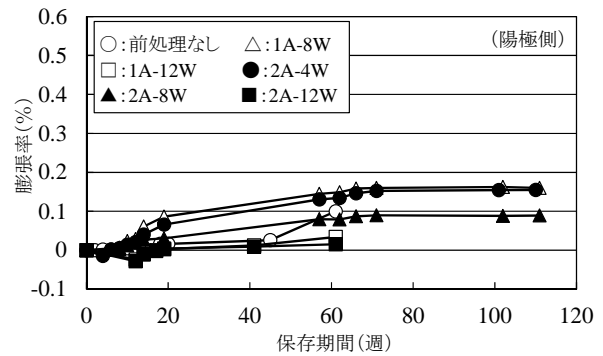


図-7 膨張率の経時変化 (陽極側)

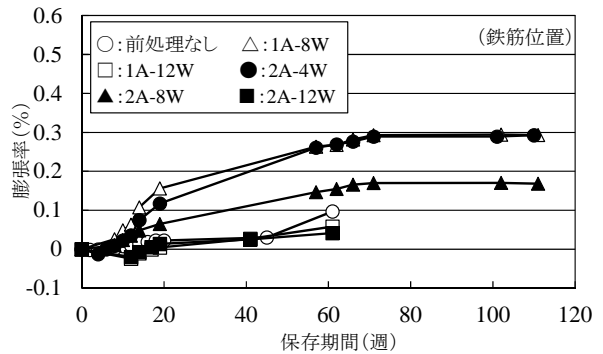


図-8 膨張率の経時変化 (鉄筋位置)

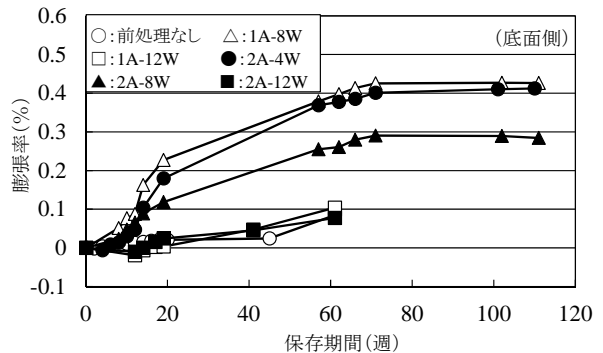


図-9 膨張率の経時変化 (底面側)

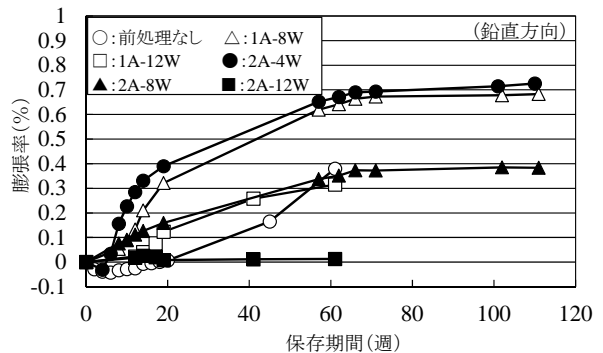


図-10 膨張率の経時変化 (鉛直方向)

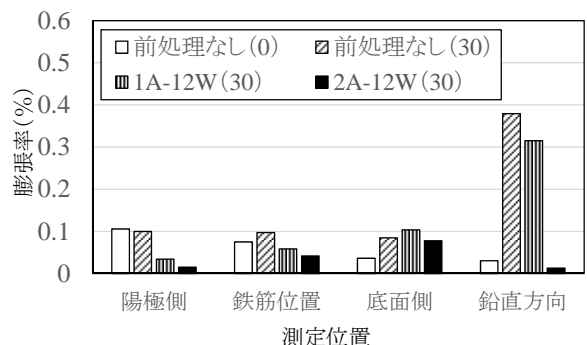


図-11 保存期間 62 週における膨張率の比較

図-7 に示す陽極側の測定位置における膨張率の経時変化より、保存期間 62 週までは、前処理を行なわない供試体と比較して、前処理条件を 1A-8W および 2A-4W とした供試体の膨張率は大きくなっている。しかし、1A-8W および 2A-4W の供試体の膨張率は保存期間 66 週以降で膨張が終息しており、一方で、前処理を行なわない供試体は膨張を開始し始めたところであり、まだ膨張曲線の傾きが大きいことから、最終的には前処理なしの供試体の膨張率の方が大きくなる可能性があると考えられる。前処理条件を 1A-12W, 2A-8W および 2A-12W とした供試体の膨張率は、前処理を行なわない供試体の膨張率よりも小さい。すなわち、電気防食を開始する前に、1A/m<sup>2</sup> の電流密度を 12 週間、2A/m<sup>2</sup> の電流密度を 8 週間、あるいは 2A/m<sup>2</sup> の電流密度を 12 週間供給することにより、電気防食工法適用中の ASR 膨張を抑制できている。なお、1A-12W および 2A-12W の供試体については、保存期間 62 週までの結果であるが、2A-4W と 2A-8W の供試体と比較すると、同一の電流密度（前処理時）であればその供給期間が長いものほど膨張率は小さいこと、また、1A-8W, 2A-4W および 2A-8W の供試体の膨張率はいずれも保存期間 66 週以降に終息していることから、1A-12W および 2A-12W の供試体の膨張率はそれぞれ 1A-8W および 2A-8W の供試体のそれより小さく考えられる。

以上のように、電気防食を開始する前に、1A-12W, 2A-8W, あるいは 2A-12W の条件で前処理を行なうことにより、電気防食工法適用中の ASR 膨張を抑制できた原因として、以下の 2 つの原因が考えられる。1 つ目の原因として、大きな電流密度をある期間以上供給することにより、陽極側のアルカリ金属イオン (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) が急速にステンレス丸棒周辺に移動するため、陽極位置でのそれらの濃度が減少し、そこでの ASR が起こりにくくなることが考えられる。また、2 つ目の原因として、ステンレス丸棒周辺でアルカリ金属イオン (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) 濃度が急速に上昇するため、その位置で生成されるアルカリシリカゲル (ASR ゲル) が粘性の低い高アルカリ型 (Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> のモル比が大きい) の ASR ゲル<sup>7, 8)</sup> となるため、その膨張圧が緩和されることが考えられる。

図-8 および 9 に示す鉄筋位置および底面側の測定位置については、前処理条件を 2A-8W とした供試体の膨張率も前処理なしの供試体よりも大きくなっており、前処理なしの供試体よりも ASR 膨張を抑制できる条件は 1A-12W と 2A-12W であった。

図-10 に示す鉛直方向の測定位置における膨張率は、軸方向の測定位置における膨張率よりも大きくなる傾向にある。このような大きな膨張を生じる場合（鉛直方向の測定位置）においても、軸方向の測定位置で得られた

結果と同様に、1A-12W, 2A-8W および 2A-12W の条件で前処理を行うことにより、前処理を行わない供試体と比較して ASR 膨張を抑制できることがわかる。

図-11 に、前処理なしと 1A-12W および 2A-12W の条件で前処理した供試体について、保存期間 62 週における各測定位置の膨張率を示す。図の凡例に示すカッコ内の数値は前処理後に継続して供給した電流密度（前処理なしのものは、前処理を行わずに継続して供給した電流密度）の大きさを示す。前処理なし (0) は無通電の供試体であることを示す。前処理条件を 1A-12W および 2A-12W とした供試体は、前処理なし (30) の供試体と同等以下の膨張率となっているものの、無通電の供試体（前処理なし (0)）と比較すると、1A-12W の供試体の鉛直方向の測定位置では、無通電の供試体よりも膨張率が大きくなっている。したがって、すべての測定位置で無通電の供試体よりも ASR 膨張が概ね同等以下となる前処理条件は 2A-12W の条件である。

図-12~15 に、保存期間 62 週における膨張率と、前処理における積算電流密度との関係を示す。ここで示す積算電流密度は、前処理において供給した電流密度 (A/m<sup>2</sup>) とその供給期間 (週) の積である。これらの図より、本研究の範囲内（前処理で供給する電流密度を 1A/m<sup>2</sup> および 2A/m<sup>2</sup> とし、積算電流密度を 8 (A/m<sup>2</sup>×週) 以上とした場合) では、いずれの測定位置においても、前処理における積算電流密度が大きいものほどその膨張率は直線的に小さくなる傾向がある。ただし、1A-12W で前処理した膨張率が相対的に小さく、1A/m<sup>2</sup> で前処理した供試体の結果を示す直線の傾きは、2A/m<sup>2</sup> で前処理した供試体のそれより大きいともいえる。本研究においては、1A/m<sup>2</sup> で前処理を行なう場合の供給期間を 8 週間と 12 週間の 2 つの期間のみ行なっているので、前処理で供給する電流密度の大きさが異なる供試体ごとに、それぞれの膨張率と積算電流密度との関係を詳細に比較することは困難である。したがって、前処理を行なう電流密度が異なっても、膨張率と積算電流密度との関係を示す直線の傾きが同じになるか否かの判断は、今後の検討課題としたい。

以上の結果より、電気防食工法において一般的に供給される範囲内の電流密度において ASR 膨張を最大にするペシマム値が存在しない場合においても、電気防食工法適用前に大きな電流密度を一定期間供給することによって、その後の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明らかとなった。無通電の供試体と比較して、いずれの測定位置においても電気防食工法適用中の ASR 膨張を概ね抑制できる条件は、2A/m<sup>2</sup> の電流密度を 12 週間供給する条件であった。

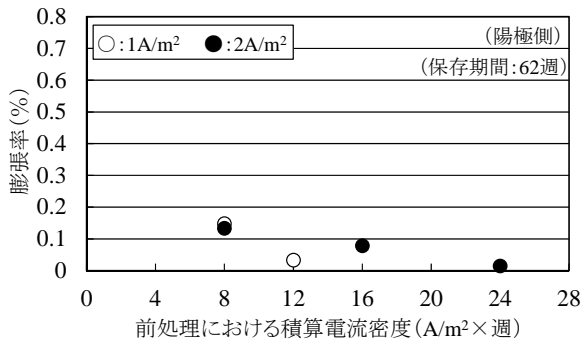


図-12 膨張率と積算電流密度との関係（陽極側）

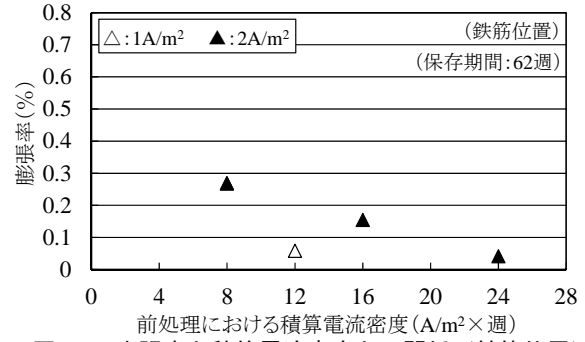


図-13 膨張率と積算電流密度との関係（鉄筋位置）

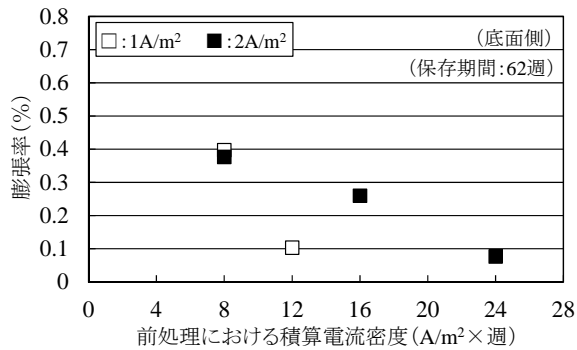


図-14 膨張率と積算電流密度との関係（底面側）

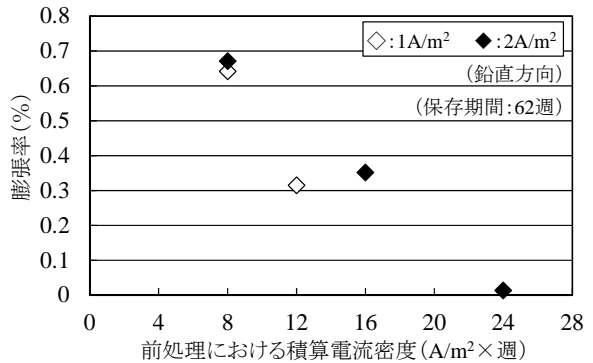


図-15 膨張率と積算電流密度との関係（鉛直方向）

#### 4.まとめ

本研究では、電気防食工法適用前に、通常の電気防食工法で適用されるものよりも大きな電流密度（1A/m<sup>2</sup>あるいは2A/m<sup>2</sup>）を一定期間（4週間、8週間あるいは12週間）供給することにより、その後の電気防食中のASR膨張を抑制できるか否かを検討した。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) 100mA/m<sup>2</sup> までの範囲内で継続して通電を行なうことにより、ASR膨張は大きく助長された。
- (2) 電気防食工法で一般的に供給される範囲内の電流密度においてペシマム値が存在しない場合でも、電気防食工法適用前に大きな電流密度を一定期間供給することによって、その後の電気防食中のASR膨張を抑制できる可能性のあることが明らかとなった。ただし、前処理の条件によっては、前処理を行なわない場合よりもASR膨張を助長する可能性があることに留意する必要がある。
- (3) 本研究で使用した供試体のいずれの測定位置においても、無通電の供試体よりもASR膨張を抑制することができる前処理条件は、2A/m<sup>2</sup>の電流密度を12週間供給する条件であった。

#### 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) 黒田保, 井上正一, 吉野公, 西林新蔵：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1102-1107, 2014
- 7) 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
- 8) 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