

# 論文 電流密度の異なる再アルカリ化工法における付着応力に関する検討

笠松 大輔<sup>\*1</sup>・近藤 拓也<sup>\*2</sup>・吉田 隆浩<sup>\*3</sup>・佐野 世<sup>\*4</sup>

**要旨:** 通電期間を短縮させて、再アルカリ化工法のコストダウンを図り、さらなる適用拡大を進めるために、積算電流密度は同一であるが、電流密度と通電期間を変化させた再アルカリ化工法について、供試体を用いた試験を実施した。その結果、無通電供試体と比較し若干の付着強度の低下は確認されたものの、有意な低下までは至らなかった。また、強度低下の原因と考えられるケイ素の分布を測定したが、電流密度と通電期間の相違による有意な変化は確認できなかった。この結果より、積算電流密度は同一で電流密度を増加した場合、付着強度に与える影響は小さいことを確認した。

**キーワード:** 再アルカリ化工法, 電流密度, 付着強度, ビッカース硬さ, ケイ素

## 1. 序論

中性化が進行したコンクリート構造物の耐久性回復を目的とした補修方法の一つとして、再アルカリ化工法がある。再アルカリ化工法の効果保持については、実構造物における調査結果より、17年以上期待できる可能性が報告されている<sup>1)</sup>。このことは、コンクリート構造物の維持管理を考えるうえで、ライフサイクルコスト上、他工法と比較して有効な工法となることが期待できる工法であるといえる。

再アルカリ化工法について、更なる適用拡大を実現するための各種技術開発が実施されている<sup>2)</sup>。この報告では、積算電流密度は従来実施している工法と同一であるが、仮設陽極材の配置間隔を拡大し、かつ仮設陽極材をコンクリート表面に接近させることで通電期間の短縮を実現しており、所定の効果ならびに施工の効率化を実現できることが示されている。

ただし、コンクリート中に通電を行うことにより、コンクリートと鉄筋間の付着強度が低下するという知見が過去に報告されている<sup>3)</sup>。上記報告に示されている施工効率化工法では、積算電流密度は変化しないものの、電流密度は従来実施している工法と比較して大きくなるため、付着強度の低下が懸念される。そのため、実構造物への展開を実施するためには、本工法を実施した場合におけるコンクリートと鉄筋間の付着挙動を明らかにしておく必要がある。

本論文では、積算電流密度は同一であるが、電流密度と通電期間を変化させた再アルカリ化工法実施後における、鉄筋とコンクリート間の付着強度について示すものとする。また、付着強度を変化させる要因と考えられているケイ素の分布<sup>4)</sup>についても分析することにより、本工法の適

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	G <sub>max</sub> (mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
54	45	10	177	328	801	988

用性について論ずることとする。

## 2. 試験概要

### 2.1 供試体の分類

本試験は、調査目的に応じて2種類の供試体を用いた。

#### (1) コンクリート供試体

鉄筋-コンクリート間の付着強度測定を行うために、コンクリート供試体を用いた。

#### (2) セメントペースト供試体

鉄筋近傍のセメントペースト強度の分布測定や、元素分布の把握を目的として、セメントペースト供試体を用いた。

### 2.2 供試体概要

コンクリート供試体の配合を表-1に示す。配合については、山陽新幹線で使用されているものを参考とした。セメントペースト供試体については、コンクリート供試体と同様のW/C=54%とした。

作製した供試体の概要図を図-1に示す。供試体は、土木学会コンクリート標準示方書[規準編]に示されている「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法」(JSCE-G 503)、および上田らの報告<sup>3)</sup>に基づき作製した。コンクリート供試体、セメントペースト供試体ともに100mm×100mm×100mmの角柱供試体の中央に、長さ1000mmの異型鉄筋SD295 D13を配置した。なお、コンクリートの打込みについては、材料分離が付着強度

\*1 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室 修士 (工学) (正会員)

\*2 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室 博士 (工学) (正会員)

\*3 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部施設部土木技術課 修士 (工学) (正会員)

\*4 株式会社デンカリノテック 取締役テクノコンサルタント部長 (正会員)

に与える影響を排除するため、図-1 に記入する方向から実施した。

コンクリート供試体には、引抜き試験時の供試体破壊を防ぐために、横拘束スパイラル筋（φ6）を設置した。また、スパイラル筋には、通電時の電食を防ぐために、エポキシ樹脂を塗布した。また、付着区間を4D（D:鉄筋径）とするために、コンクリート供試体、セメントペースト供試体ともに付着区間を52mmとした。供試体中に埋め込まれた鉄筋長のうち、残り48mmは付着を切るためにビニルテープを鉄筋周辺に巻きつけた。

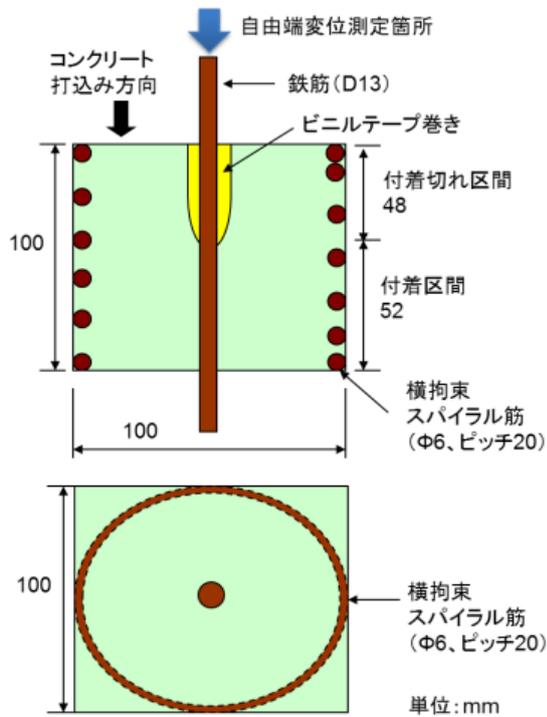


図-1 供試体概要図

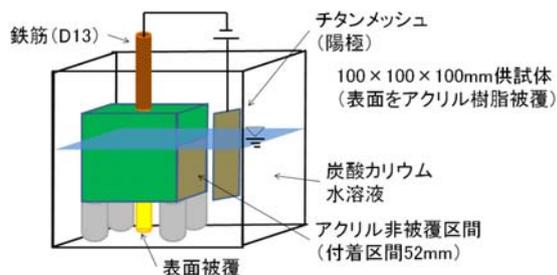


図-2 再アルカリ化処理時の状況

表-2 試験パラメータ

要因	水準
電流密度	<ul style="list-style-type: none"> <li>0A/m<sup>2</sup></li> <li>1.25A/m<sup>2</sup>-14日間（従来型）</li> <li>2.50A/m<sup>2</sup>-7日間（効率施工型）</li> </ul> （※電流密度は鉄筋表面積に対する電流量表示とした）
試験時期	<ul style="list-style-type: none"> <li>通電終了直後</li> <li>通電終了後1ヶ月</li> <li>通電終了後3ヶ月</li> </ul>

キシ樹脂を塗布した。また、付着区間を4D（D:鉄筋径）とするために、コンクリート供試体、セメントペースト供試体ともに付着区間を52mmとした。供試体中に埋め込まれた鉄筋長のうち、残り48mmは付着を切るためにビニルテープを鉄筋周辺に巻きつけた。

今回の検討は、付着強度の確認を主目的としたため、供試体の中性化処理は実施しなかった。そのため、コンクリート打込み後28日で通電処理を開始した。通電面以外は、コンクリート表面にアクリル樹脂を塗布した。再アルカリ化処理は、質量濃度15%の炭酸カリウム溶液中に供試体を浸せき後、図-2に示す電気回路により、所定の期間通電することにより実施した。

### 2.3 試験パラメータ

試験パラメータを表-2に示す。電流量については、従来の施工方法であるもの、文献2)で効果が確認された効率施工型のもの、そして無通電供試体の3種類とした。試験時期については、供試体中に浸透させたアルカリ溶液の影響を確認するため、3時期を設定した。

### 2.4 試験方法

#### (1) 付着強度試験

所定の期間再アルカリ化処理を行ったコンクリート供試体については、土木学会コンクリート標準示方書[規準編]に示される「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法」（JSCE-G 503）に基づき、単調漸増載荷を行った。測定項目は荷重および自由端変位とした。測定間隔は表-3とし、自由端変位が10mm程度になるまで測定した。

#### (2) ビッカース硬さ試験

鉄筋周辺部分のセメントペースト付近の強度低下傾向を確認するため、セメントペースト供試体を用いてビッカース硬さ試験を行った。

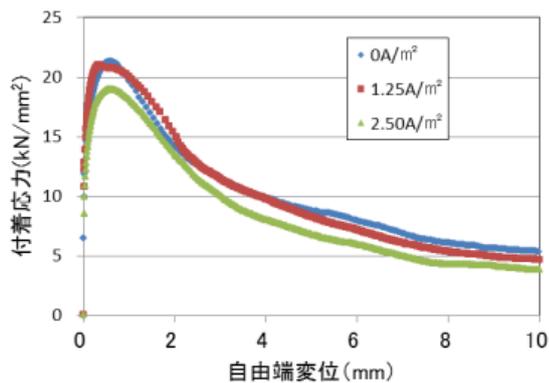
所定の通電期間終了後、セメントペースト供試体の付着区間から測定用の試料プレートを切り出した。その後、

表-3 付着強度試験の測定間隔

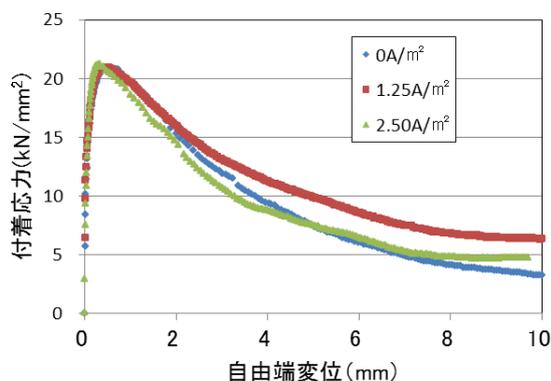
自由端すべり量の範囲		測定間隔
	0.1mm未満	0.01mmごと
0.1mm以上	0.2mm未満	0.02mmごと
0.2mm以上	0.5mm未満	0.05mmごと
0.5mm以上		0.1mmごと

表-4 ビッカース硬さ試験の測定間隔

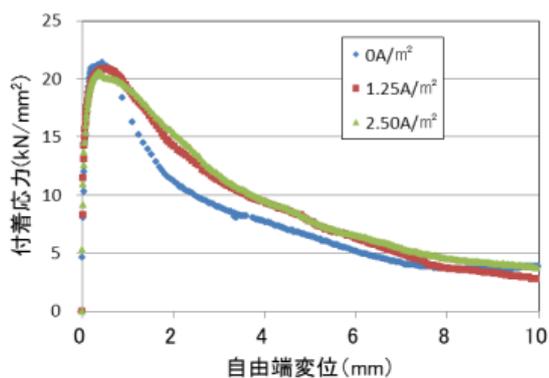
鉄筋からの離れ	測定間隔	
鉄筋表面から	300μmまで	50μmごと
300μmから	1000μmまで	100μmごと
1000μmから	2000μmまで	200μmごと
2000μmから	6000μmまで	500μmごと



(a) 通電直後

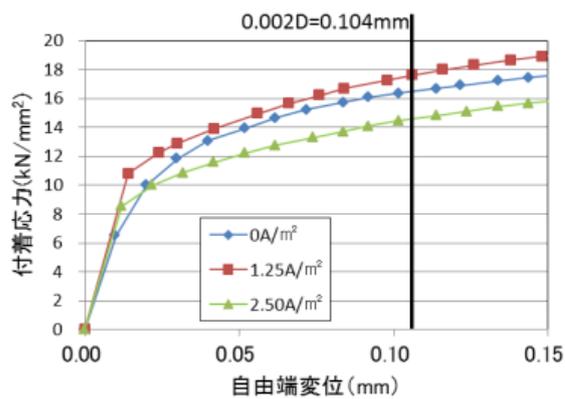


(b) 通電終了後 1 ヶ月

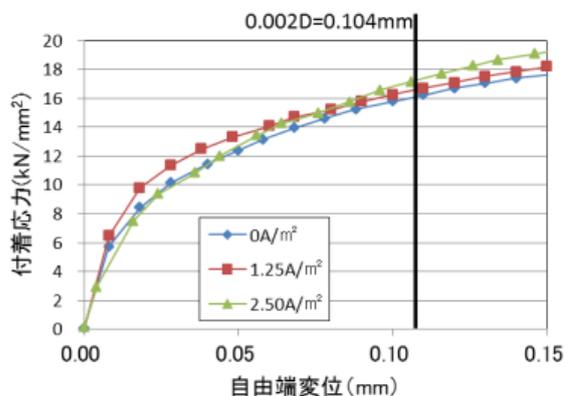


(c) 通電終了後 3 ヶ月

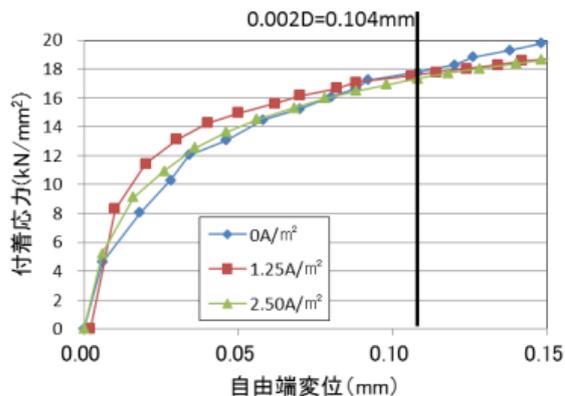
図-3 付着応力-自由端変位の関係 (10mm まで)



(a) 通電直後



(b) 通電終了後 1 ヶ月



(c) 通電終了後 3 ヶ月

図-4 付着応力-自由端変位の関係 (0.15mm まで)

試料プレートの測定面を研磨紙#800 と#1200 を用いてターンテーブル上で鏡面仕上げを行った後に、「ビッカース硬さ試験-試験方法」(JIS Z 2244) に基づき試験を行った。

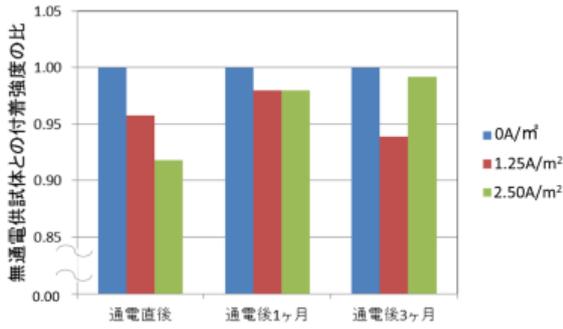
ビッカース硬さの測定は、鉄筋面から陽極に向かう方向に対して実施した。1 測定線上での測定間隔は表-4 のとおりとする。

### (3) EPMA 法による元素分布の把握

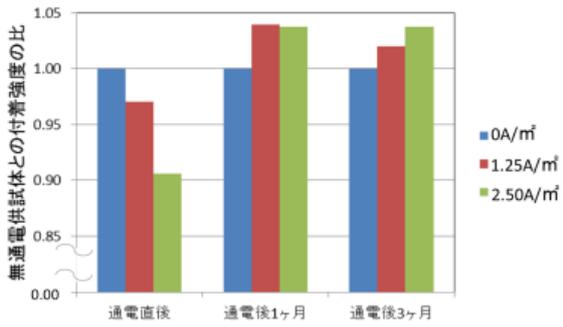
再アルカリ化工法実施後のコンクリート中の元素分布

を把握するため、EPMA 法を実施した。

試料採取は、セメントペースト供試体の付着区間内において、(2) と異なる断面から行った。測定方法は土木学会コンクリート標準示方書[規準編]に示される「EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法(案)」(JSCE-G 574 2013) に従った。測定対象元素は Si および Ca とし、鉄筋を含む 50×50mm 面での面分析を行った。また、それぞれの測定元素に対して定量分析を実施した。

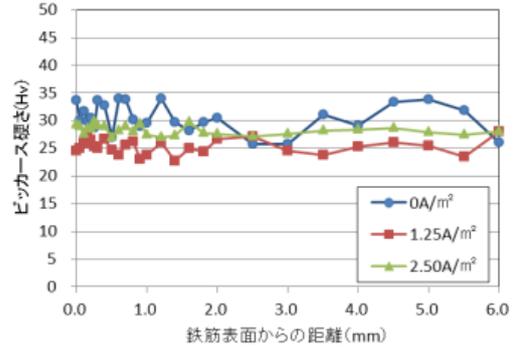


(a) 最大荷重時

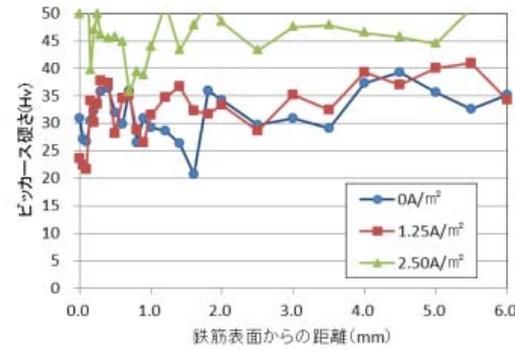


(b) 0.002D 変位時

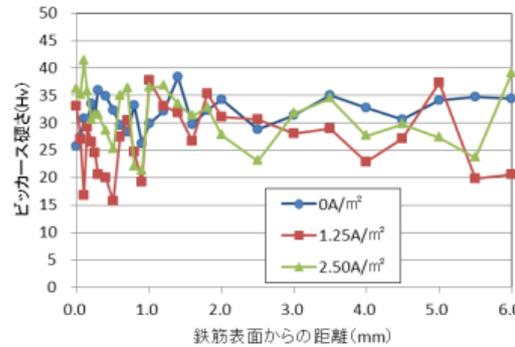
図-5 無通電供試体との付着強度の比



(a) 通電直後



(b) 通電終了後 1 ヶ月



(c) 通電終了後 3 ヶ月

図-6 ビッカース硬さ分布

### 3. 試験結果

#### 3.1 付着強度試験

通電直後、通電後1ヶ月、および通電後3ヶ月における付着強度試験で得られた付着応力-自由端変位の関係を図-3に示す。また、それぞれにおける自由端変位 0.15mm までの付着応力-自由端変位の関係を図-4に示す。応力算定にあたって、鉄筋直径は公称断面積を用いた。なお強度試験については、各パラメータで3体試験を行っているが、同一パラメータ内において試験結果に大きなばらつきが確認されなかったことより、ここではそれぞれのパラメータにおいて代表的な1ケースについて示している。

図-3においては、通電終了直後で試験を行ったもののうち、2.50A/m<sup>2</sup>-7日間通電したものにおいて、付着強度の低下は確認できた。しかし、付着強度の差に相違は確認できるものの、付着強度以降の挙動に明確な相違は確認できなかった。また、通電終了後1ヶ月および3ヶ月で試験を行ったものについては、付着強度およびそれ以降の挙動に明確な差は現れなかった。

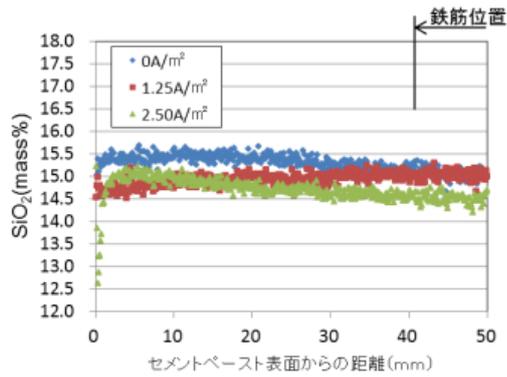
載荷初期の挙動を示す図-4では、通電終了直後で試験を行ったもののうち、2.50A/m<sup>2</sup>-7日間通電したものにおいて、JSCE-G503で示されている評価基準である0.002D時点での付着応力が低下している状況を確認できる。しかし、通電終了後1ヶ月および3ヶ月における0.002D時点での付着応力に大きな差は確認できなかった。

た。

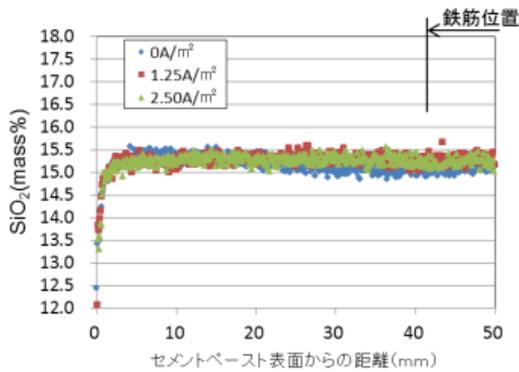
これら付着強度試験の最大荷重時および0.002D変位時の付着応力を、同一材令の無通電供試体で実施した付着強度試験との比で示したものを図-5に示す。なお、試験結果については供試体3体の平均値で表した。

最大荷重時における比較では、いずれの通電期間においても、無通電供試体と比較し低い値を示している。ただし、無通電供試体との比はいずれも0.9以上であり、また時間の経過とともに付着応力比が回復する傾向が確認できる。

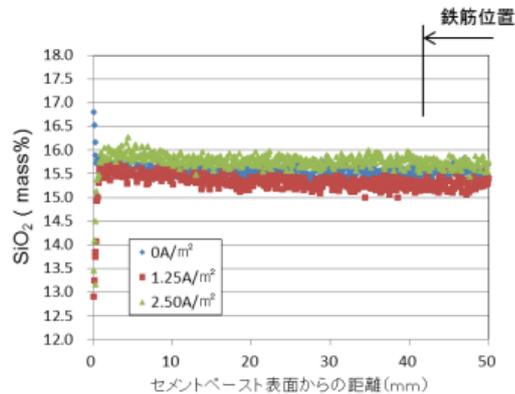
0.002D変位時における付着応力の比較では、通電直後における付着応力比は特に2.50A/m<sup>2</sup>-7日間で低下傾向が



(a) 通電直後

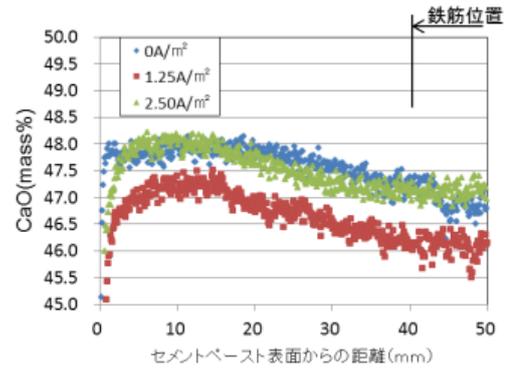


(b) 通電終了後1ヶ月

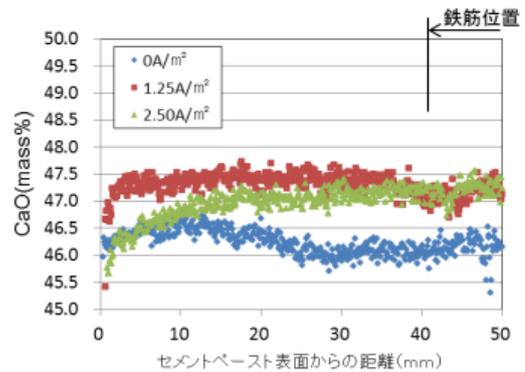


(c) 通電終了後3ヶ月

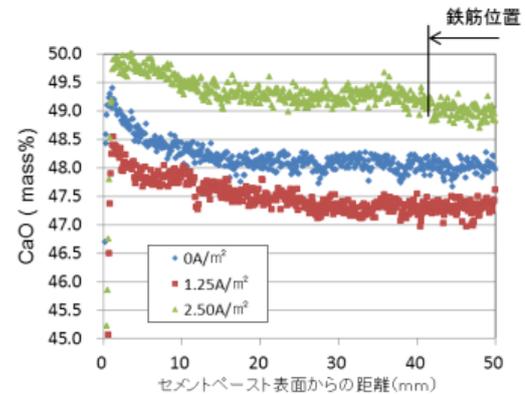
図-7 SiO<sub>2</sub>の分布



(a) 通電直後



(b) 通電終了後1ヶ月



(c) 通電終了後3ヶ月

図-8 CaOの分布

確認できるが、時間の経過とともに回復する状況が確認できた。

これら通電直後の付着強度低下の原因考察は後述するが、効率施工型による再アルカリ化工法では、付着強度低下は最大1割程度であり、かつ時間の経過とともに回復する傾向を示すことから、実用上はほぼ問題ない差異と考えられる。

### 3.2 ビッカース硬さ試験

セメントペースト供試体で実施したビッカース硬さ試験によるビッカース硬さ分布を図-6に示す。なお図-6に示したビッカース硬さ分布は10測点の平均値を示している。

上田らの論文<sup>3)</sup>では、積算電流密度  $6720\text{A} \cdot \text{h}/\text{m}^2$  で通電処理を行った場合、鉄筋表面から約5mmまでの間で軟弱な層が形成される旨示されている。しかし、本研究においては通電直後においてはわずかに無通電供試体と比較して、鉄筋表面から2mm以内の範囲でビッカース硬さが低い傾向が示される。しかし、通電終了後1ヶ月以降経過すると、通電供試体と無通電供試体で明確な差は確認されなかった。

また、上田らの論文<sup>3)</sup>で示されるように、鉄筋表面ではビッカース硬さが低く、鉄筋表面から離れるとともにビッカース硬さが大きくなるような傾向は確認できなかった。そのため、本試験の範囲における電流密度では、セメン

トペーストの軟化に対する影響は小さいものと考えられる。

### 3.3 EPMA 法の測定結果

ビッカース硬さ試験と別の部分から採取したセメントペースト供試体の  $\text{SiO}_2$  および  $\text{CaO}$  の質量%分布を図-7 および図-8 に示す。なお質量百分率は 50mm×50mm の平均値としている。また、図中 0mm は供試体表面、約 43mm の位置が鉄筋表面を示す。

$\text{SiO}_2$  の分布は、通電終了直後および時間経過後ともに大きな差は確認できなかった。また、 $\text{CaO}$  の分布についても、通電有無により明確な差は確認できなかった。

再アルカリ化工法などの通電処理を実施した場合における付着強度低下の原因として、通電による鉄筋近傍へのアルカリ集積により、セメントペースト中の C-S-H 相に含まれるケイ酸塩が、溶解性のケイ酸塩に変質するためと言われている<sup>4)</sup>。C-S-H 相の溶解度積の考え方<sup>5)</sup>により、 $\text{OH}^-$  の増加とともに平衡状態が崩れると溶解度積を一定に保つため  $\text{Ca}^{2+}$  は減少し、 $\text{HSiO}_3^-$  は増加するものと考えられる。しかし、今回の結果では電流密度により  $\text{SiO}_2$  や  $\text{CaO}$  分布に差が確認されなかったことから、C-S-H 相のケイ酸塩が溶解性のケイ酸塩に変質させるほど、 $\text{OH}^-$  が鉄筋付近に集積しなかったものと考えられる。上田らの報告<sup>3)</sup>と比較し、付着力やセメントペースト強度の有意な低下が本試験では確認できなかったため、再アルカリ化工法による付着強度低下は、積算電流密度の大きさの影響が大きいと考えられる。

図-3 および図-4 で確認された、再アルカリ化工法実施直後の付着応力の低下原因は、通電によりコンクリート中の含水率が増加したことが一因として挙げられる。通電終了後は、湿った布で供試体を覆い、供試体中の水分状態を一定に保持したが、通電により強制的に溶液を鉄筋付近に集積させたため、鉄筋周辺のコンクリートが間隙水圧の作用により、付着強度の低下を招いたものと考えられる。ただし、載荷初期における変形挙動等、さらに検討を加える必要がある。また、本研究で用いたコンクリート供試体は材齢 28 日で通電処理を実施した。付着強度については、材齢の影響も受けると考えられるため、強度増加の影響を排除した検討も今後必要となる。

野村らの研究<sup>2)</sup>や本検討において、効率施工を目的とした再アルカリ化工法の有用性が確認されたものと考えられる。今後は実構造物における施工を通し、従来施工と比較した長期適用性の確認を行う必要があると考える。

## 4. 結論

コストダウンを目的として、従来工法と比較し積算電

流密度は同一であるが電流密度を 2 倍として通電を行った再アルカリ化工法の付着挙動について検討を行った。また、付着強度に影響を与えると考えられる項目について各種測定を行い、その有用性について検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 再アルカリ化工法を行ったコンクリート供試体の付着強度は、再アルカリ化工法を行わなかったものと比較し、最大値および 0.002D 変位時付着応力ともに若干の低下を示したが、時間の経過とともにその差は確認されなくなった。また、その低下は実構造物の耐荷力に影響を与える程度のもではなかった。また、電流密度の違いによる差も確認できなかった。
- (2) セメントペースト供試体を用いて鉄筋付近のビッカース硬さの測定を行ったが、電流密度の違いによるビッカース硬さの差は確認できなかった。
- (3) EPMA 法により元素分布を測定したが、電流密度の違いによる元素分布の差は確認できなかった。
- (4) これらより、本試験の範囲では電流密度の違いが再アルカリ化工法実施時の付着強度に与える影響は小さいものと考えられる。

## 謝辞

本検討は、(公財)日本材料学会「持続可能な鉄道コンクリート構造物に関する委員会」(委員長:宮川豊章京都大学大学院教授)において貴重なご意見を賜った。委員各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1)野村倫一,石橋昌史,七澤章;17年経過した脱塩,再アルカリ化工法の検討,コンクリート年次論文集,Vol.34, No.1, pp.1672-1677, 2012.7
- 2)野村倫一,柏原茂,松久保博敬,宮口克一;再アルカリ化処理されたコンクリート中のアルカリ濃度分布,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol.13,pp.523-528,2013.11
- 3)上田隆雄;塩害により劣化したコンクリート構造物へのデサリネーションの適用に関する研究,京都大学学位論文,1999.6
- 4)C.E.Locke, et.al: Effect of Impressed Current on Bond Strength between Steel Rebar and Concrete, Corrosion'83, Paper Number 178, 1983.4
- 5)西川直宏;Pore Solution, セメント・コンクリート, No.496, pp.33-35, 1988.6