

デサリネーションが鉄筋の付着挙動に与える影響

上田隆雄¹・服部篤史²・芦田公伸³・宮川豊章⁴

¹正会員 工修 徳島大学助手 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町)

²正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

³正会員 電気化学工業 特殊混和材部 (〒949-03 新潟県西頸城郡青海町 青海工場)

⁴正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

中性化や塩害により腐食劣化した鉄筋コンクリート構造物の補修工法として、電気化学的手法を用いた補修方法が近年注目を集めている。デサリネーションはコンクリート中の Cl^- 除去を目的とする電気化学的手法であり、その効果が期待されているものの、いくつかの問題点についての十分な検討はなされていないのが現状である。本研究は、デサリネーションの問題点の一つである鉄筋とコンクリートとの付着挙動への影響について、練混ぜ時の混入塩化物量および通電量を主要因として検討を加えたものである。

Key Words: desalination, electrochemical technique, migration of ions, pull-out test, bond stress, Vickers hardness, flexural test of beam

1. はじめに

コンクリート構造物は、適切に設計施工された場合、きわめて耐久性に富む構造形式であるとされてきたが、近年塩害による早期劣化が問題となっている。デサリネーションはコンクリート中の Cl^- 除去を目的とする電気化学的手法であり、現在代表的な電気化学的手法である電気防食の 100 倍近い電流を用いるものの、ある一定期間だけ通電すればよいという特色を有している。

デサリネーションの原理を Fig. 1 に示す。コンクリート中の鉄筋を陰極とし、コンクリート表面に電解質を介して設置した陽極との間に電流を流すことにより、陰イオンである Cl^- は陽極に移動し、コンクリート中から除去することができる。一方 Na^+ や K^+ などの陽イオンは陰極（鉄筋）表面に移動する。このため、デサリネーションの問題点として、付着強度の低下、アルカリ骨材反応および水素脆性の誘発などが指摘されている¹⁾が、これらの課題に関する体系的な研究は少ないのが現状である。

本研究では塩化物を含んだコンクリートにデサリネーションを施すことにより、 Cl^- 除去の効果を確認するとともに、デサリネーションが鉄筋とコンクリートとの付着挙動に与える影響についての基礎的な検討を行うこととした。

2. 実験概要

実験は、デサリネーション適用後の片引試験用供試体を用いた化学分析、自然電位の測定、微小硬度分布の測定、引抜き試験、および RC はりの曲げ試験（曲げ破壊型、せん断破壊型）からなる。これらの概要を Table 1 に示す。なお、本研究では鉄筋とコンクリートとの界面において生じる現象を主な検討対象とするため、電流密度や積算電流密度の値は鉄筋表面積に対する値として示す。

(1) 供試体の作製および通電方法

a) コンクリートの配合

コンクリートの示方配合を Table 2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、練混ぜ時に混入する塩化物は精製塩 (NaCl , 純度 99%) を用いた。なお、塩化物の混入時には同質量の細骨材を減ずることとした。

b) 片引試験用供試体

片引試験用供試体は、土木学会規準「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（案）」を準用して作製した。コンクリート部分の寸法は $10 \times 10 \times 10 \text{cm}$ の立方体とし、その中央部分に長さ 1 m の異形鉄筋 D13 SD295A (JIS 規格に対応) を配した。付着長は鉄筋の直径の 4 倍にあたる

Table 1 Outline of test program

Amount of Cl ⁻ (kg/m ³)	0.0			4.0				6.0				8.0				10.0							
Current Density (A/m ²)	0.0	5.0	0.0	5.0				0.0	5.0	0.0	2.5	8	4	8	12	0.0	5.0	0.0	5.0				
Period of Treatment (weeks)	8	8	8	4	5	6	7	8	8	4	8	16	8	2	8	4	8	12	8	4	8	12	
Chemical Analysis	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Microhardness Measurement															○		○						
Pull-out Test	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Flexural Test of RC Beam															○		○						

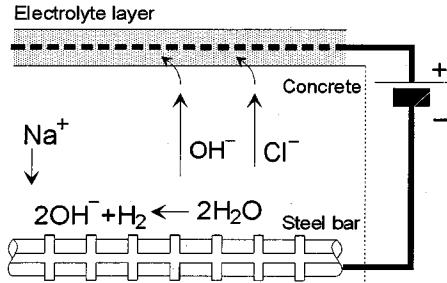


Fig. 1 Mechanism of desalination

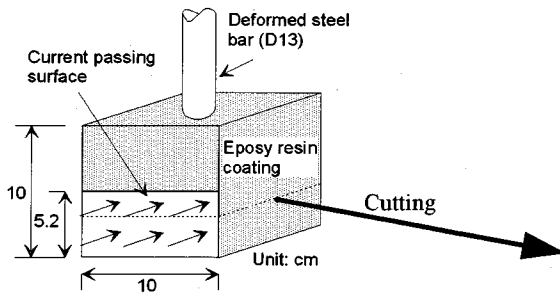


Fig. 3 Specimen for pull-out test
(Bottom surface was also coated)

Table 2 Mix proportion of concrete

W/C	s/a	NMS	Unit mass (kg/m ³)						
			W	C	S	G	AEA	WRA	
(%)	(%)	(mm)							
54	45	13	177	328	801	988	0.82	1.8	

5.2cm とし、引抜き試験を行うものには割裂補強筋としてφ6スパイラル筋を2cmピッチで配した。

c) RCはりの曲げ試験用供試体

RCはりの曲げ試験用供試体は、幅 10cm、高さ 20cm、全長 160cm とし、主筋として異形鉄筋 D13 SD295A (JIS 規格に対応) を 1 本、有効高さ 17.5cm の位置に配した。曲げ区間におけるひび割れ挙動を観察する目的で、定着部の付着破壊を防止するため、主筋の定着部分には 180° のフックを設けた。また、曲げ破壊型供試体のうち、重ね継手を有するシリーズについては、コンクリート標準示方書設計編²⁾の規定により、スパン中央部分に主筋の公称直径の 20 倍にあたる 25.4cm の重ね継手を設けた。継手部分の

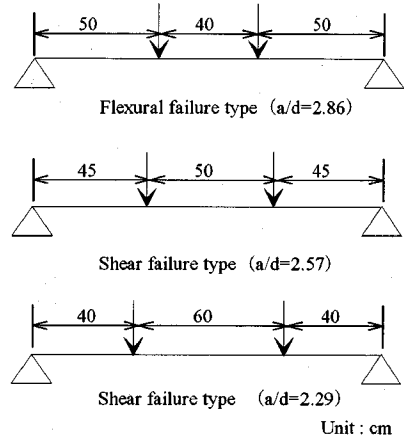


Fig. 2 Loading conditions of RC beam

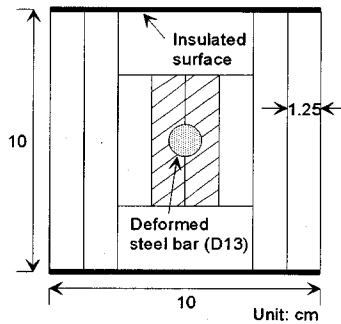


Fig. 4 Cutting for chemical analysis

かぶりは、コンクリート標準示方書設計編で束ねた鉄筋の断面積の和に等しい断面積を持つ一本の鉄筋の直径以上である事が求められていることを勘案すれば、今回の実験ではかぶりが 1.87cm あり、この条件(1.80cm 以上)を満たしている。曲げ破壊型供試体には 10cm 間隔でせん断補強筋を配した。せん断補強筋および組立て筋には電流が流れないようにエポキシ樹脂塗装鉄筋 D10 SD295A を用いた。せん断破壊型供試体にはせん断補強筋を用いなかった。載荷時のスパン割りを Fig. 2 に示す。

d) 通電方法

片引試験用供試体は、コンクリート打設 1 日後に脱型し、ポリエチレン袋中で 28 日間の湿空養生を行った後、電極を取り付け、電解液中で電流を流した。

RCはりの曲げ試験用供試体は、打設後、養生マットをかけ表面に散水しながら28日間室外養生した。その後脱型し、室内にて電極を取り付け、電解液に浸して電流を流した。電解液は共に飽和水酸化カルシウムとし、陽極は白金メッキチタンメッシュを用いた。

通電方法は共に2面通電とし、Fig. 3に示すように通電面以外はエポキシ樹脂を塗り絶縁した。所定の通電期間経過後、以下の測定を行った。

(2) 化学分析

供試体の切断方法をFig. 4に示す。

a) Cl^- の測定

片引試験用供試体から所定の形状に切り出したコンクリートを全量粉碎し、酸抽出溶液で Cl^- を抽出後、イオン電極を用いた検量線法により全 Cl^- 量を測定した。

b) Na^+ および K^+ の測定

Cl^- の場合と同様に切り出したコンクリートを全量粉碎し、0.15mmのふるいを全通させ、100°Cの乾燥器で約3時間乾燥した後、酸抽出溶液で各イオンを抽出後、原子吸光光度計で測定した。

(3) 自然電位の測定

通電後の片引試験用供試体の自然電位を測定した。照合電極には飽和塩化銀電極(Ag/AgCl)を用いた。

(4) 微小硬度分布の測定

片引試験用供試体から測定用の試料プレートを切り出し、研磨紙#800と#1200を用いて鏡面仕上げを行った測定面のセメントペースト部分のヴィッカーズ硬度を測定した。荷重は5gfとし、測定点は鉄筋表面から6~7mm程度離れたところまで無作為な方向に選んだ。

(5) 引抜き試験

a) 測定項目

載荷荷重を容量10tfのロードセルで、それに伴う鉄筋の自由端変位を容量20mm(精度0.005mm)の変位計で測定した。

b) 載荷方法

土木学会規準「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(案)」を準用して行った。単調漸増載荷とし、自由端変位が10mm程度になるまで測定した。

(6) RCはりの曲げ試験

a) 測定項目

載荷荷重を容量10tfのロードセルで測定し、スバ

ン中央たわみを容量10cm(精度0.01mm)の変位計で測定した。

また、主筋位置($d=17.5\text{cm}$)でのひび割れ幅を測定するために、検長5cmの π 型ゲージ(容量2mm)を14個連続させて貼り付けた。

b) 載荷方法

ひび割れ発生まで0.25tfずつ載荷し、ひび割れ発生後、一旦0.25tfまで除荷した。さらに0.25tfずつ再び載荷し、降伏点に達した時点で変位制御に切り替え0.3mmずつ載荷した。中央変位が5mmを越えた時点から0.5mmずつ、10mmを越えた時点から1mmずつそれぞれ載荷し、荷重が最大荷重の8割以下になるまで載荷した。

14個の π 型ゲージはどれか一つが容量を越えたところすべて取り外した。また、載荷終了後に曲げスパンのひび割れ間隔を測定した。

3. 化学分析

(1) Cl^- の移動

鉄筋近傍(Fig. 4の斜線部分)の全塩分量と通過電荷量の関係をFig. 5に示す。通過電荷量が大きいほど鉄筋近傍の全塩分は減少しており、デサリネーションの効果が現れている。

コンクリート中にはフリーデル氏塩として固定された Cl^- がセメント量に対して約0.4%存在することが知られている³⁾。 Cl^- 量が 4.0kg/m^3 の場合には25160C(4週通電)で鉄筋近傍の遊離した Cl^- はほぼ抽出できたが、 Cl^- 量が 6.0kg/m^3 および 8.0kg/m^3 の場合には25160Cでは鉄筋近傍のセメント量に対する全塩分量は0.4%を若干上回っている。基本的な傾向としては、通電期間が延びるにしたがって抽出 Cl^- 量は大きくなっているが、鉄筋近傍のセメント量に対する全塩分量が0.4%を下回ってからは抽出速度は小さくなっている。

(2) アルカリ金属イオンの移動

鉄筋近傍(Fig. 4の斜線部分)のナトリウムとカリウムの濃度から計算される等価アルカリ量($R_2O = \text{Na}_2O + 0.658\text{K}_2O(\text{kg/m}^3)$)と通過電荷量の関係をFig. 6に示す。

図に示すようなアルカリの鉄筋近傍への集積は、主として Na^+ の陰極(鉄筋)方向への移動によるものであるために、今回の実験のように塩化物がNaClの形でコンクリートに混入されるとコンクリートの含有塩分量が大きいほど、通電により多量のアルカリが鉄筋近傍に集中する可能性が高い。Fig. 6においても鉄筋近傍でのアルカリ量のピーク値は通電前の

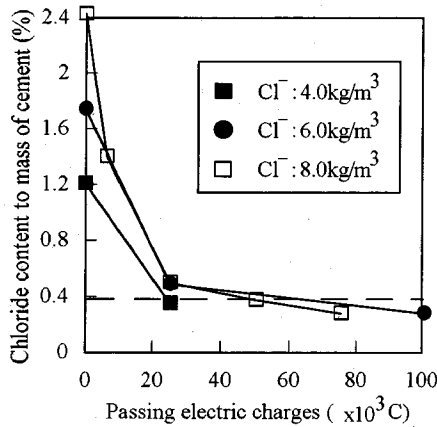


Fig. 5 Removal of chlorides around the steel bar

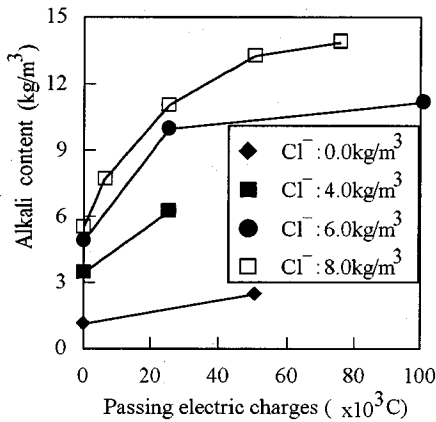


Fig. 6 Accumulation of alkali around the steel bar

混入塩化物量が大きいほど大きくなっている。また、 Cl^- の場合と同様に基本的には通電期間が長いほどアルカリの集積量も大きくなるが、ある一定期間を過ぎると集積量の変化は小さくなっている。

これより、補修時に塩化物(NaCl)を多量に含んでいる場合は、デサリネーションにより鉄筋近傍に多量のアルカリが集中する可能性があると考えられる。

(3) イオンの移動と積算電流密度

Cl^- の抽出量は電流密度に通電期間をかけた積算電流密度に依存するものと考えられている⁴⁾。今回の実験では Cl^- 量が 8.0kg/m^3 で 2.5A/m^2 を 8 週通電した供試体と 5.0A/m^2 を 4 週通電した供試体はともに積算電流密度が $3360\text{A}\cdot\text{h/m}^2$ となる。これらの供試体の塩分分布を Fig. 7、アルカリ量分布を Fig. 8 に示す。これらの結果から、電流密度が異なっても積算電流密度が等しければ Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ の移動程度はほぼ等しいことがわかる。

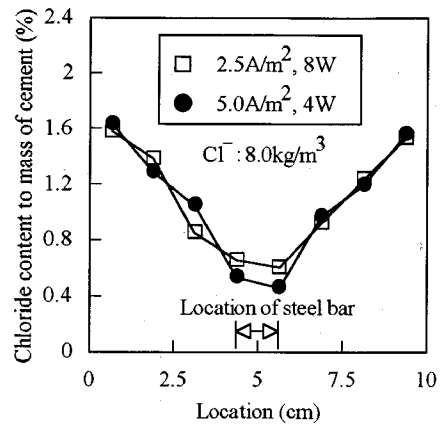


Fig. 7 Distribution of chlorides ($3360\text{A}\cdot\text{h/m}^2$)

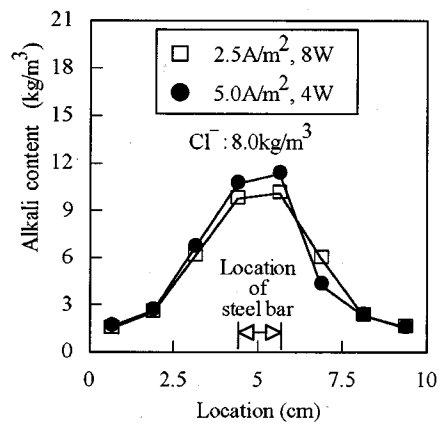


Fig. 8 Distribution of alkali ($3360\text{A}\cdot\text{h/m}^2$)

(4) イオンの再分布

通電終了後の供試体中では全塩分量、アルカリ量ともに不均一な分布となっているためその後、時間が経過するとともに、各種イオンは新たな平衡状態に向かって再拡散するものと考えられる。これにより、コンクリート表面付近の Cl^- が鉄筋近傍へ移動すれば、鉄筋腐食が再発する恐れもあると同時に、鉄筋近傍に濃縮されたアルカリ濃度が時間とともに緩和される効果も期待できる。

Cl^- 量 8.0kg/m^3 、 5.0A/m^2 で 8 週通電後の全塩分量の再分布状況を Fig. 9、アルカリ量の再分布状況を Fig. 10 に示す。これらの図より Cl^- の再分布はほとんど見られないが、鉄筋近傍に集積した Na^+ や K^+ は比較的速い速度で再拡散していることがわかる。

一般には、 Cl^- の拡散の方が Na^+ や K^+ の拡散より早いと考えられているのも関わらず、この場合、 Cl^- よりも Na^+ や K^+ の再分布が早かった理由として、供試体中の濃度勾配の差が考えられる。 Cl^- は通電処理に伴いコンクリートから抽出されるため、鉄筋近傍とコンクリート表面との濃度勾配が増加しつづける

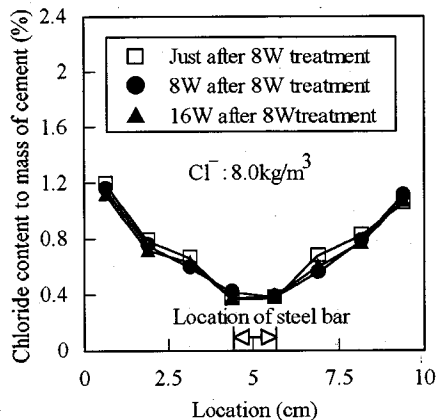


Fig. 9 Redistribution of chloride after 8 weeks' treatment

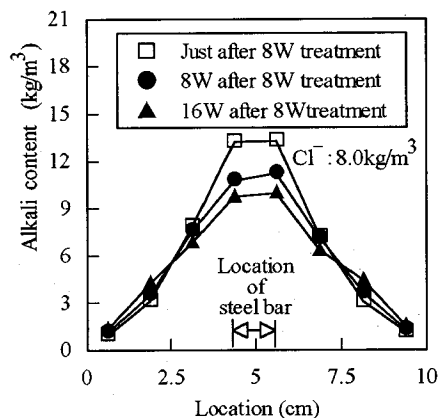


Fig. 10 Redistribution of alkali after 8 weeks' treatment

ることではない。さらに、固定された Cl^- の割合を考えると、遊離した Cl^- の濃度勾配はさらに小さくなるものと予想される。これに対して、供試体中のアルカリの総量は通電処理の前後で変化することはないために、鉄筋近傍とコンクリート表面のアルカリの濃度勾配は非常に大きくなる可能性がある。以上より、通電処理後の濃度勾配による拡散促進力はアルカリのほうが大きいと考えられる。

(5) Cl^- の輸率および脱塩率

次式により Cl^- の輸率 t_{cr} (%) を計算した。

$$t_{\text{cr}} = \frac{A}{T} \times 100, \quad T = \frac{M \cdot I \cdot t}{Z \cdot F}$$

ここに、A : 抽出塩分量 (g),
T : 通過電荷量によって抽出可能な塩分量 (g),
M : 原子量 (Cl は 35.5), $I \cdot t$: 通過電荷量 (C),
Z : 価数 (Cl は 1.0), F : ファラデー定数 (96500)

また、本研究では通電前に混入した塩分に対する、抽出塩分の重量%を脱塩率とした。

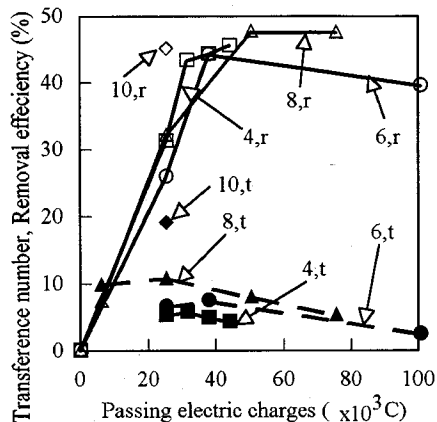


Fig. 11 Transference number and removal efficiency of chlorides

通過電荷量と Cl^- の輸率、脱塩率の関係を Fig. 11 に示す。図中、凡例の最初の数値は Cl^- 量を示しており、添字の t は輸率、r は脱塩率を表している。

脱塩率は混入 Cl^- 量の大小によらず 50% 程度で頭打ちとなる傾向が見受けられる。すなわち、ある一定の脱塩率に達した後はそれ以上長く通電処理を施してもあまり脱塩効果は期待できない。デサリネーションによってコンクリート中に存在する Cl^- がすべて除去可能であると仮定すると、固定された Cl^- の割合がセメント量の約 0.4% とほぼ一定であれば、混入塩化物量が大きいほど Cl^- 量は大きく、よって時間をかければ脱塩率は大きくなるはずである。ところがこのように脱塩率が大きくなる原因として OH^- の影響が考えられる。すなわち、通電にともないコンクリート中の鉄筋でおきるカソード反応で生成される OH^- の増加分とコンクリートから抽出される Cl^- の減少分でコンクリート中の全イオンに占める Cl^- の割合は通電期間が延びるにしたがって小さくなり、よって抽出 Cl^- 量や脱塩率はある一定値以上は大きくなりにくいと考えられる。

Fig. 11 によると、 Cl^- の輸率は通電初期については、 Cl^- 混入量が大きいほど大きくなっている。これは、通電によって抽出される Cl^- を初期に豊富に含んでいる方が Cl^- のコンクリート中の全イオンに占める割合が大きくなり、 Cl^- がよりたくさんの電荷を運ぶことができるということに起因すると考えられる。さらに、ある一定の通過電荷量に達するとそれ以上通電を行っても抽出 Cl^- 量は増加しないために Cl^- の輸率の値自体は小さくなっている。

4. 自然電位の測定

Cl^- 量 8.0 kg/m^3 で、 5.0 A/m^2 を 8 週通電 (6720 A·

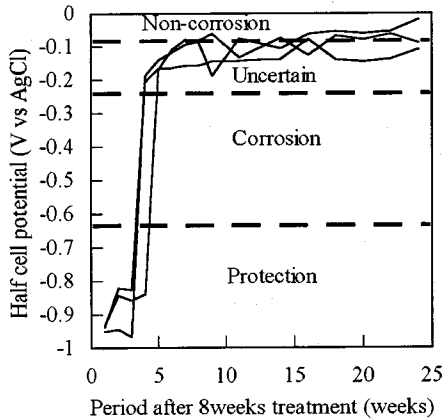


Fig. 12 Change of half cell potential after 8 weeks treatment

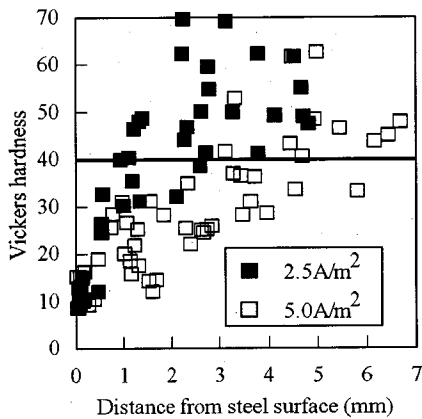


Fig. 13 Distribution of Vickers hardness of cement paste

h/m²)した供試体について、通電後の自然電位の経時変化を Fig. 12 に示す。図中の折れ線はそれぞれ1つの供試体に対応しており、領域の区分はASTMの判定基準に電気防食領域(鉄のプルベークによる)を加えたものである。処理終了直後の時期の自然電位は無処理の供試体についてはすべて腐食領域に入っていたのに対してデサリネーションを行った供試体についてはすべて電気防食領域に入っていた。処理終了後の時間の経過とともに、供試体中において新たな電気化学的平衡状態が形成され、自然電位が非腐食領域に入れば、鉄筋表面における不動態被膜の回復とともにデサリネーションによる補修効果が確認されることになる。

Fig. 12によると、4週放置後の測定ではまだ防食電流の影響が残っているようであるが、5週放置後の測定では全供試体が不確定領域に入り、その後は時間の経過とともに非腐食領域に近づいている。

5. 微小硬度分布の測定

Cl⁻量8.0kg/m³で、2.5A/m²を8週通電(3360A・h/m²)した供試体と5.0A/m²を8週通電(6720A・h/m²)した供試体について、鉄筋に垂直な断面のセメントペースト部分のヴィッカーズ硬度分布を調べた結果をFig. 13に示す。

結果はかなりばらついているが、どの供試体にも鉄筋に近い部分に柔らかい層ができていたことが分かる。また、2.5A/m²の供試体と比較して5.0A/m²の供試体の方が積算電流密度が大きいため、軟化しているセメントペーストの範囲も大きい。鉄筋表面から十分に離れた健全な箇所では、セメントペーストのヴィッカーズ硬度は40以上であった。したがって、積算電流密度が3360A・h/m²では鉄筋表面から3mm程度、6720A・h/m²では鉄筋表面から6mm程度の範囲でヴィッカーズ硬度が40に達していないことから、これらの範囲でセメントペーストが軟化しているものと考えられる。

このような通電による鉄筋近傍のセメントペーストの軟化現象は鉄筋とコンクリートとの付着強度を低下させる原因であると考えられ、セメントペーストの軟化は、化学分析結果で示したような通電に伴うアルカリの鉄筋近傍への集積により、鉄筋付近で濃度が高くなったNaOHやKOHの影響で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⁹⁾ために引き起こされるものと考えられる。

6. 引抜き試験

片引試験で測定した引抜き荷重を用いて付着応力を次式で計算した。

$$\tau = \frac{P}{4D \times \pi D} \cdot \alpha$$

ここに、 τ : 付着応力 (MPa)

P : 引抜き荷重 (N)

D : 鉄筋の直径 (mm) , $D=13\text{mm}$

$4D$: 付着長 (mm) , $4D=52\text{mm}$

πD : 鉄筋の公称周長 (mm) , $\pi D=40\text{mm}$

α : 補正係数, $\alpha=29.4/f_c$

f_c : 試験時のコンクリート圧縮強度 (MPa)

デサリネーションを行った供試体は無処理の供試体と比較して付着強度が減少した。これは、化学分析および微小硬度分布の測定結果に示したように、通電によって鉄筋近傍に集積したアルカリイオンの影響で鉄筋近傍のセメントペーストが軟化し、鉄筋とコンクリートとの付着界面が変質したことによる

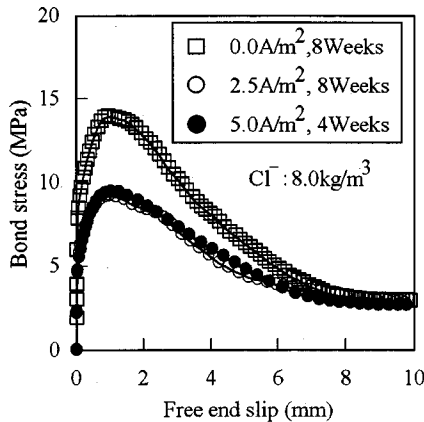


Fig. 14 Bond stress - free end slip relation ($3360A \cdot h/m^2$)

ものと考えられる。また、化学分析結果で述べたように、通電により鉄筋近傍に集積するアルカリ量は、通電前の混入塩化物量が大きいほど大きく、また、ある一定時期までは通電期間が長いほど大きくなっている。よって、混入塩化物量が大きく、通電期間が長いほど鉄筋とコンクリートとの界面の変質程度も大きくなり、最大付着応力の減少も大きくなるものと予想される。

以下に片引試験の結果を定量的に評価することを試みる。なお、付着応力比は、通電供試体の値の無通電供試体の値に対する比とする。

(1) 積算電流密度

化学分析結果から Cl^- やアルカリ金属イオンの移動量は積算電流密度に依存することが確認された。今回の実験では、 Cl^- 量 $8.0kg/m^3$ で、 $2.5A/m^2$ を8週流したものと $5.0A/m^2$ を4週流したものは共に積算電流密度が $3360A \cdot h/m^2$ となる。これらの付着応力-自由端変位曲線をFig. 14に示す。Fig. 14より、2本の曲線はほぼ一致していることが分かる。付着強度の低下が、鉄筋近傍へのアルカリ金属イオンの移動に起因しているとする、 Na^+ の混入量を支配する混入塩化物量が等しく、コンクリート配合も同一ならば、付着強度も積算電流密度にほぼ依存すると考えてよいようである。

以上の理由により、通電の程度を示す指標として積算電流密度を採用することとする。

(2) 混入塩分量

a) 最大付着応力比

最大付着応力比と積算電流密度の関係を Fig. 15 に示す。全体的な傾向として、 $5000A \cdot h/m^2$ 程度までは予想されたように混入塩化物量が大きく、通電期間が長いほど最大付着応力の減少も大きくなって

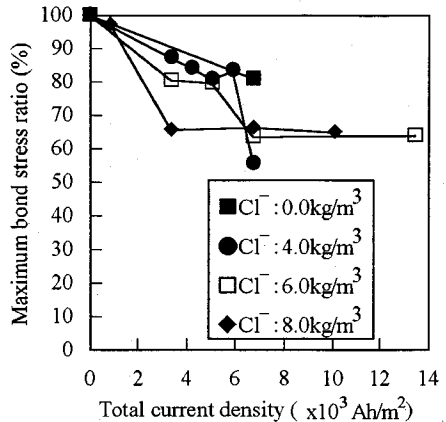


Fig. 15 Maximum bond stress ratio

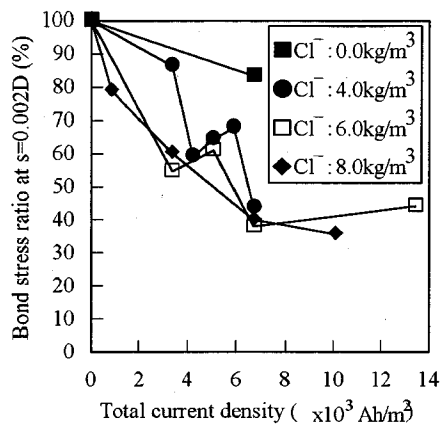


Fig. 16 Bond stress ratio at $s=0.002D$

る。ただし、 $6000A \cdot h/m^2$ を越えると Cl^- 量が $4.0kg/m^3$ であっても大きな付着強度の低下が生じている。

最大付着応力比が60%程度まで減少すると、その後は積算電流密度が増大しても最大付着応力比はほぼ一定となっている。この現象はFig. 6に見られたような、アルカリの集積量が一定値に収束していく現象に対応していると考えられる。ただし、アルカリ量が一定値に収束した後も、カソード反応によって鉄筋近傍に OH^- が生成していることから、付着界面の変質はさらに進むことも考えられる。

b) 自由端変位が0.002D時の付着応力比

土木学会規準「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着試験方法(案)」によると、すべりの小さな範囲での検討基準として自由端変位 s が0.002Dにおける付着応力を挙げている。今回の場合、 $0.002D=0.0254mm$ (Dは鉄筋の直径)となり、小さな自由端変位での指標として以下で検討する。

$s=0.002D$ での付着応力比と積算電流密度の関係を Fig. 16 に示す。最大付着応力比の場合と比較すると

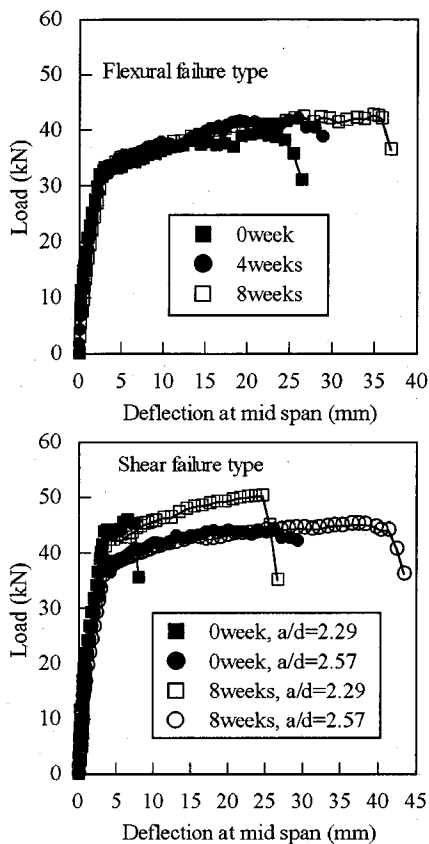


Fig. 17 Load - deflection relation at mid span

このレベルの付着応力比の方が積算電流密度の影響が大きくなっている。すなわち、通電処理による付着界面への影響は自由端変位が比較的小さい範囲で顕著に現れている。微小硬度の測定結果と併せて検討すると、Fig. 13より通電処理を行った供試体の微小硬度が20以下の非常に軟弱な部分は鉄筋表面から1~2mm程度のごく近傍に限られていることがわかる。この部分の変質が影響するのは、鉄筋の滑りの小さい段階であり、鉄筋の異形部による機械的付着作用の影響が小さい領域と考えられる。これに対して、最大付着応力に達する段階になると、鉄筋の異形部による機械的付着作用により、鉄筋周辺の比較的広い範囲でコンクリートにせん断力が働き、この影響で付着破壊が起きるため、通電処理による影響が緩和されるものと考えられる。

7. RCはりの曲げ試験

(1) 荷重-変形性状と破壊形式

曲げ破壊型供試体およびせん断破壊型供試体の荷重-中央変位曲線をFig. 17に、耐力力と通電処理の関係をFig. 18に示す。

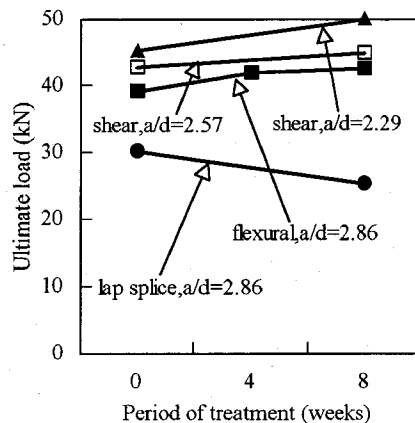


Fig. 18 Influence of treatment on maximum load

a) 曲げ破壊型

曲げ破壊型の供試体はすべてコンクリート上縁部の圧潰による曲げ破壊を示し、せん断スパンに斜めひび割れは入らなかった。Fig. 17によると、4週通電の段階では荷重-中央変位曲線に大きな変化は見られないが、8週通電の段階では最大変位は無通電の場合と比較して10mm程度大きくなっている。

また、Fig. 18によると、耐力力は通電処理によってほとんど変化していない。

このように、通電処理により曲げ破壊型はり部材の変形能力が大きくなったことの原因として、片引試験で既に確認されている鉄筋とコンクリートとの付着強度の低下が考えられる。一般に、曲げひび割れが入った後に変位が増大していくと、鉄筋とコンクリートとの付着力および定着力によって、ひび割れ幅の増大を抑制しようとする力が働き、その反力としてコンクリート上縁部分に圧縮力が作用して最終的には圧潰に至ることになる。しかし、付着強度が低下していると一定の荷重に対する鉄筋の滑り量が大きくなるために、ひび割れ幅の抑制効果が小さくなり、一定の変位に対応するコンクリート上縁部分に作用する圧縮力も小さくなると考えられる。これにより、コンクリートの圧縮強度が等しいとすると、鉄筋とコンクリートとの付着強度が小さいほどコンクリート上縁部が圧潰するときの変位は大きくなると考えられる。

一方、これらのほりでは主筋にフックを用いたため、主筋が降伏以降の領域まで到達し、耐力力への影響は小さかったものと考えられる。実構造物においても定着部における付着破壊が防止できれば、今回のレベルの通電が耐力力に与える影響は小さいことが予想される。

b) せん断破壊型

せん断破壊型供試体はすべてせん断圧縮破壊で壊

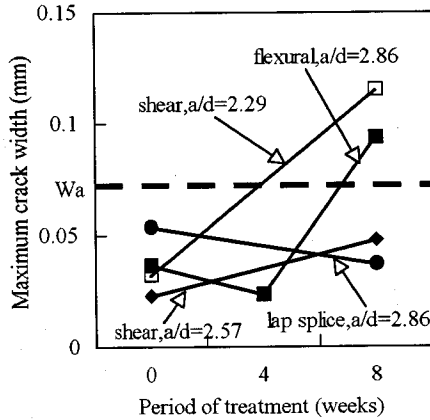


Fig. 19 Influence of treatment on maximum crack width

れた。Fig. 17, Fig. 18 によると、スパン割りによらずに通電処理を施した供試体は中央変位の最大値が著しく増加しており、耐荷力も若干増加している。

引張鉄筋に付着がない場合に最大耐力や、破壊時に吸収するエネルギーが増大することが報告されている⁹⁾。これは、引張鉄筋より上側のコンクリートが斜めひび割れに害されることなく強固な残存アーチリブを形成し、残存アーチ耐力として好条件の状態でも荷重に抵抗するためと考えられている。今回の実験でも通電処理を施した供試体は、主筋の付着強度の低下により、斜めひび割れが生じた後に堅固なタイドアーチを形成したものと考えられる。

c) 重ね継手

重ね継手を施した供試体はすべて非常に脆性的な付着割裂破壊を示した。コンクリートの上縁部は圧潰に至らず、はり底面の鉄筋軸方向に大きな亀裂が入って急激に耐力が低下した。このような破壊性状を示した理由としてはコンクリートのかぶり小さすぎたことが考えられる。今回採用したかぶりは1.87cmであり、コンクリート標準示方書により定められた方法で計算される値(1.80cm)よりは大きいものの比較的小さく、重ね合せ部分で生じた大きな割裂荷重に絶えられなかったものと考えられる。

Fig. 18 によると通電処理により耐荷力は低下している。重ね継手を施した場合には、鉄筋の連続性、さらには鉄筋とコンクリートとの一体性は継手部分の鉄筋とコンクリートとの付着力に依存している。このため、重ね継手を施した場合には、通電処理による付着力の低下は耐荷力にまで影響を与えるものと考えられる。

今回の実験では無通電供試体の破壊性状も非常に脆性的であったために、通電処理を行った供試体との違いは比較的小さかったが、実構造物で重ね継手を含む部分にデサリネーションを施した場合には、

その構造物の力学的挙動に大きな影響を与える可能性があり、補修前の十分な調査検討が必要であろう。

(2) ひび割れ性状

a) ひび割れ幅

コンクリート標準示方書では、腐食性環境における許容ひび割れ幅を0.004C(C:かぶり)としている。本研究で作成したはり試験用供試体のかぶりC=1.87cmを用いて腐食性環境における許容ひび割れ幅 w_a を算出すると、 $w_a=0.0746\text{mm}$ となる。

さらに、標準示方書において曲げひび割れの検討は、一般に次式で求めたひび割れ幅 w が許容ひび割れ幅 w_a 以下であることが規定されている。

$$w = k \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \epsilon'_{cs} \right]$$

ここに、 k : 鋼材の付着性状の影響を表す定数で、一般に、異形鉄筋の場合に1.0、

C : かぶり (cm)

C_s : 鋼材の中心間隔 (cm)

Φ : 鋼材径 (cm)

ϵ'_{cs} : コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひずみ

σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量 (kg/cm^2)

上式より $w_a=0.0746\text{mm}$ のひび割れが生じたときの鉄筋の応力の増加量を計算し、この応力が鉄筋にかかる時の鉄筋位置での最大ひび割れ幅をFig. 19に示す。なお、図中の w_a は許容ひび割れ幅(0.0746mm)である。

Fig. 19 によると、曲げ破壊型供試体の最大ひび割れ幅は4週通電では無通電の場合より小さくなっているが、8週通電で大きく増加し、許容ひび割れ幅を上回っている。4週通電の段階では荷重-中央変位曲線にも大きな変化は見られなかったことから、このレベルの通電処理による付着強度の低下が部材レベルの力学的挙動に与える影響は小さいものと考えられる。ただし、8週通電の場合には、使用状態に対応すると考えられる荷重レベルにおいて、ひび割れ幅が増大する可能性が示された。

b) ひび割れ間隔

鉄筋とコンクリートとの付着強度の低下が鉄筋コンクリート部材の力学特性に与える影響の一つにひび割れ分散性の低下が考えられる。

載荷終了後のひび割れ間隔測定の結果、曲げ破壊型供試体の場合、8週間の通電処理により、ひび割れ本数が9本から6本に減少し、平均ひび割れ間隔が6.7cmから8.8cmに増加した。このような傾向はせん断破壊型供試体の場合にも見られ、これも通電処理による付着強度低下の影響であると考えられる。

ただし、実構造物の補修工法としてデサリネーションを適用することを考えると、通電処理を行う前の段階で、構造物の使用状態で形成されるようなひび割れは既に分散され、ひび割れの注入による断面修復を終えた後に通電処理が施されるものと考えられる。よって、ひび割れの分散性が通電処理により非常に悪くなる状況は考えにくく、ひび割れ幅に与える影響の程度も緩和されることが予想できる。

8. 結 論

以下に本研究の範囲内で得られた結果を要約し、本論文の結論とする。

- (1) 通電処理を行うことにより、供試体中の Cl^- を抽出することができた。通過電荷量が大きくなるほど、初期の脱塩率は大きくなったが、50%を越えることはなかった。通電初期において Cl^- の輸率は混入塩化物量が大きいほど大きくなったが、通過電荷量が大きくなるほど減少した。
- (2) Na^+ や K^+ のアルカリ金属イオンは鉄筋近傍に集積する傾向を示した。混入塩化物量が大きいほど、また、通過電荷量が大きいほど鉄筋近傍に集積するアルカリ量は大きくなったが、一定値に達するとアルカリ量の増加は停止した。
- (3) Cl^- 量が 8.0kg/m^3 の片引試験用供試体に8週通電後16週放置した時、 Cl^- の再分布は見られなかったが、鉄筋近傍のアルカリ量は通電停止直後の74%まで減少した。
- (4) 通電処理終了直後の供試体中の鉄筋の自然電位は電気防食領域内の値を示したが、放置期間の経過とともに鉄筋の自然電位は貴な方向に移行し、5週間の放置で不確定領域内の値を示した。
- (5) Cl^- 量が 8.0kg/m^3 の片引試験用供試体の鉄筋近傍のセメントペースト部分の微小硬度分布を測定した結果、通電処理を行った供試体は鉄筋近傍に軟弱な層を形成していた。また、この層の厚さは積算電流密度が大きいほど大きくなっていった。
- (6) 片引試験において、通電処理を行った供試体は

無通電供試体に比べて最大付着応力が減少した。この減少の程度は混入塩化物量が大きいほど、また、積算電流密度が大きいほど大きくなった。

(7) Cl^- 量が 8.0kg/m^3 の供試体を用いたはり試験において、重ね継手を持たない供試体は8週間の通電処理により、耐荷力にほとんど変化がなく、破壊時の変形が増大した。重ね継手を施した供試体は8週間の通電処理により耐荷力が低下した。

(8) 許容ひび割れ幅に対応して算定された鋼材の応力状態において、無通電の供試体については、鉄筋位置での最大ひび割れ幅が許容ひび割れ幅以下であったが、8週通電の場合には鉄筋位置での最大ひび割れ幅が許容ひび割れ幅を上回るものがあつた。また、通電処理によりひび割れの本数が減少し、ひび割れ分散性は低下した。

謝辞: 最後に、本研究の遂行に当たってご指導いただいた藤井學教授(京都大学)に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、Miller, J.B.: Structural Aspect of High Powered Electro-chemical Treatment of Reinforced Concrete, *Proc. of Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, pp.1499~1514, 1994.
- 2) コンクリート標準示方書[平成3年版] 10.6.2 重ね継手, 土木学会.
- 3) 大即信明, 榎野紀元, 片脇清士, 宮川豊章: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害 (I), 技報堂出版, 1987.
- 4) 例えば、Benett, J.E. and Schue, T.J., ELTECH Research Corporation: Electrochemical Chloride Removal from Concrete :A SHRP Contract Statues Report, *Corrosion 90*, Paper Number 316, 1990.
- 5) Locke, C.E., Dehghanian, C. and Gibbs, L.: Effect of Impressed Current on Bond Strength between Steel Rebar and Concrete, *Corrosion 83*, Paper Number 178, 1983.
- 6) 池田尚治, 小柳 洽, 角田興史雄: 鉄筋コンクリートの力学, 新体系土木工学 32, 技報堂出版, pp.106~109, 1982.

(1995. 11. 1 受付)

INFLUENCE OF DESALINATION ON BOND BEHAVIOR BETWEEN CONCRETE AND REINFORCING STEEL

Takao UEDA, Atsushi HATTORI, Masanobu ASHIDA and Toyo MIYAGAWA

Recently, some electrochemical methods have been developed as repair methods for reinforced concrete structures deteriorated by carbonation of concrete or chloride corrosion of reinforcing steel bar. Desalination is one of the electrochemical methods aiming to remove chlorides from reinforced concrete structures. However, few reports have been published concerning its availability. This paper mainly describes the influences of amount of chlorides and passing current on bond behavior between concrete and reinforcing steel bar.