

論文 中性化を受けたコンクリート構造物への電気化学的補修技術の基礎検討

石橋 孝一*1・友澤史紀*2・芦田 公伸*1・宇田川秀行*3

要旨：中性化を受けたコンクリートの電気化学的再アルカリ化工法について、処理過程、耐久性、鉄筋の状態変化、副作用の影響について供試体レベルでの基礎的な検討を行った。再アルカリ化はアルカリ溶液の浸透と鉄筋周辺での水酸イオンの発生により進行し、処理部での炭酸ガスに対する耐久性、および鉄筋腐食の抑制効果が確認された。

また、処理の副作用として考えられるアルカリシリカ反応、およびコンクリートと鉄筋の付着強度の変化は問題ないレベルであった。

キーワード：電気化学的補修, 中性化, 再アルカリ化, アルカリ浸透, 耐久性, 副作用,

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物にとってコンクリートのアルカリ性の低下を引き起こし鉄筋を腐食させる中性化は一般的な環境下で生じる劣化であり、建築後数十年程度の比較的新しい構造物にも見受けらことからその補修法に関する多くの研究が行われている。最近になりヨーロッパにおいて中性化を受けた構造物への電気化学的再アルカリ工法の適用が開始され、国内においても基礎的な検討に続き適用事例も次第に多くなっている[1], [2]。

本工法は、コンクリートの内部鉄筋を陰極とし、コンクリート表面にアルカリ溶液を保持した陽極を仮設して、直流電流を一定期間流すことによりコンクリート表面からアルカリ溶液を浸透させると共に、陰極として用いた内部鉄筋近傍のコンクリート環境を十分なアルカリ性として鉄筋に腐食を生じせないようにする工法である。

本研究では、電気化学的な再アルカリ化工法の検討として、再アルカリ化の処理過程の確認、処理後の耐久性、処理後の鉄筋の状態変化、処理に伴う副作用の影響について供試体レベルでの基礎的な検討を行ったので報告する。

2. 実験概要

2.1 試験用供試体

コンクリート調合を表1に、また中性化供試体の断面写真を写真1の(a)、(b)に示す。

表1. コンクリート調合

Gmax (mm)	スラング° (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	AEA
20	18.3	3.6	60	46.2	168	280	860	1002	0.7

試験用供試体は、10(W)×10(H)×20(L)cmの大きさで、φ13mmの磨き丸鋼(SR235)をかぶり2cmで上下に含む形状とした。試験目的により中性化部分は片側と両側の2種類とし、促進中性化処理槽(CO₂=15%, 40℃×70%R.H.)で鉄筋部分まで中性化処理を行った。

試験用供試体の中性化の確認は、フェノールフタレイン溶液による中性化深さ測定とセメントペースト部の熱分析(TG/DTA)により行った。

*1 電気化学工業(株)青海工場 セメント・特殊混和材部研究所 (正会員)

*2 東京大学教授 工学部 建築学科 工博 (正会員)

*3 電気化学工業(株)特殊混和材事業部 施工開発課 (正会員)

2. 2 再アルカリ化処理

再アルカリ化処理方法の概要を図1に示す。アルカリ溶液には、炭酸ソーダと炭酸リチウムの混合物を主成分とする溶液を用い、リチウム/ナトリウムのモル量が $Li/Na=0.15/1.00$ 、 $0.15/0.15$ 、となるように調整した。供試体内部の処理面側の鉄筋を直流電源の陰極に、アルカリ溶液中に設置した外部電極を陽極に接続し、コンクリート表面積当たり $1A/m^2$ の電流密度で14日間処理した。処理途中での再アルカリ化の状況を確認するために、一定期間の処理を行った後にフェノールフタレインによる中性化深さの測定を行った。

また、処理面側より1cm間隔でコンクリート中に含まれるナトリウム量、リチウム量の分析を行った。

2. 3 処理後の耐久性

再アルカリ化処理後の炭酸ガスに対する耐久性を確認するために、再アルカリ化処理を行った後の供試体を室内($20^{\circ}C \times 60\%R.H.$)、および促進中性化処理槽($CO_2=5\%$, $30^{\circ}C \times 60\%R.H.$)で所定の期間処理し、大気中で1日放置した後に、処理過程の確認と同様にフェノールフタレイン溶液による中性化深さの測定を行った。

2. 4 鉄筋の状態変化

供試体の未処理部、および処理部の鉄筋について再アルカリ化処理前、処理直後、および処理3ヶ月後に分極曲線の測定を行い鉄筋の腐食状態の評価を行った。

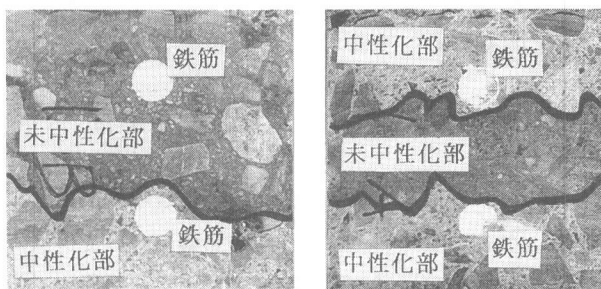
2. 5 処理の副作用

1) アルカリシリカ反応

骨材に九州地方産の輝石安山岩($Sc=1001/183$)を用い、セメント中の全アルカリ量が 0.70% となるように $NaOH$ 試薬により調整し、モルタル供試体を作製した。供試体を促進中性化槽中で中性化処理した後、再アルカリ化処理を行った。膨張率の測定はモルタルバー法(JIS A 5308)に準じた方法で行い、再アルカリ化処理前を基長とした。また、未中性化供試体は膨張率測定の時期に合わせて作製したものをを用いた。

2) 鉄筋とコンクリートの付着強度

公称径 $22mm$ の異形鉄筋を含む円筒形の供試体($\phi 10 \times 15cm$)、および強度補正用供試体を作製し、促進中性化処理槽中で中性化した試験体を作製した。 $Li/Na=0.15/1.00$ のアルカリ溶液を用い、コンクリート表面積当たりの電流密度を 0.0 、 0.5 、 1.0 、 2.0 、 $5.0A/m^2$ に設定して14日間の再アルカリ化処理を行った後、「引き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)」に準じて付着強度の測定を行った。



(a)片側中性化供試体

(b)両側中性化供試体

写真1. 試験用中性化供試体

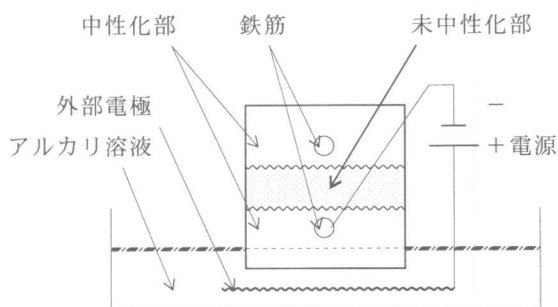


図1. 再アルカリ化処理方法

3. 結果および考察

3. 1 再アルカリ化の処理過程

再アルカリ化の処理過程の確認の一例として、処理溶液にLi/Na=0.15/0.15のアルカリ溶液を用いた場合の処理前、及び再アルカリ化処理3日、14日後におけるフェノールフタレイン溶液でのコンクリート供試体の未中性化部と中性化部の確認をした結果を写真2(a)、(b)、(c)に示す。処理前は、鉄筋部分まで完全に中性化しているが、再アルカリ化処理により、処理面(下面)からのアルカリ溶液の浸透と、陰極として用いた内部鉄筋周辺での水の電気分解による水酸イオンの発生により中性化部分にアルカリ性の回復が認められた。処理3日後(写真2(b))には、鉄筋近傍での水酸イオンの発生と溶液の浸透によりアルカリ性

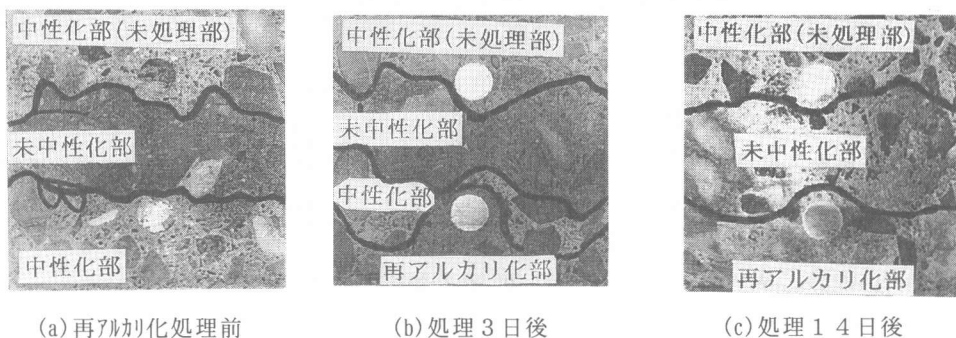


写真2. 再アルカリ化処理状況のフェノールフタレインによる確認

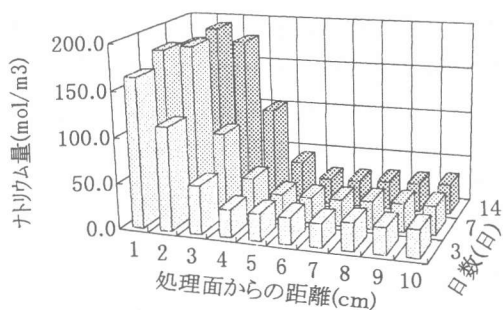


図2(a) ナトリウム浸透量(Li/Na=0.15/1.00)

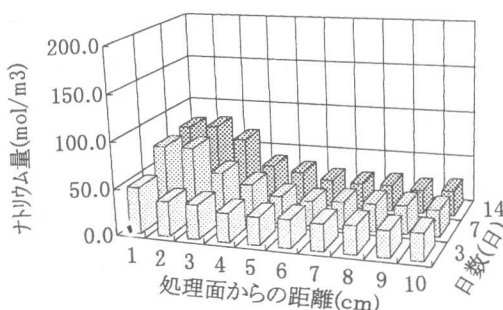


図3(a) ナトリウム浸透量(Li/Na=0.15/0.15)

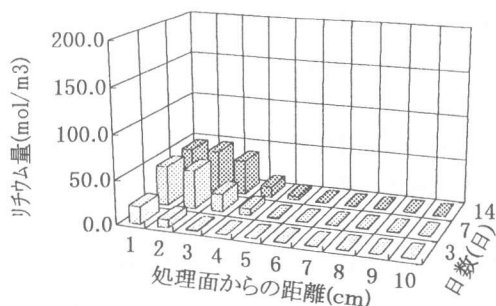


図2(b) リチウム浸透量(Li/Na=0.15/1.00)

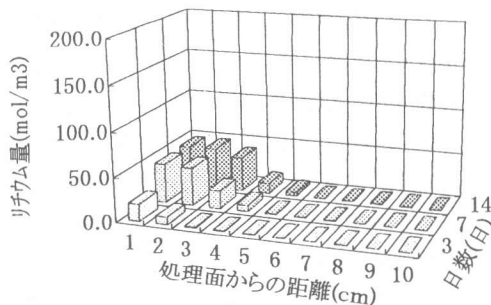


図3(b) リチウム浸透量(Li/Na=0.15/0.15)

の回復した部分が連続した状態となり、処理14日後（写真2(c)）では更に再アルカリ化が進み、再アルカリ化処理部分と未中性化部の境界が判別できなくなった。

これに対し、再アルカリ化処理を行わなかった部分（上面側：未処理部）では中性化部分に変化は見られなかった。再アルカリ化によるアルカリ溶液の浸透量を定量的に把握するための一例として、処理溶液にリチウムとナトリウムの混合割合の異なった溶液(Li/Na=0.15/1.00, 0.15/0.15)を用いた場合のコンクリート中のナトリウム量、リチウム量の変化を図2(a), (b)、図3(a), (b)に示す。フェノールフタレイン溶液での確認と同様に処理日数に伴い、処理面側よりアルカリ量(ナトリウム、リチウム)の増加が確認された。処理前に供試体中に含まれていたアルカリ量を補正すると、アルカリ溶液は、リチウム/ナトリウムの混合モル量の比率を維持してコンクリート中に浸透していき、処理7日後では処理面より2cm部分(かぶり深さ)、処理14日後では内部電極の鉄筋より深い部分においても処理溶液濃度のアルカリ量が確認された。

3.2 処理後の耐久性

未中性化部の炭酸ガスに対する耐久性の比較を行うために片側中性化供試体を用い、再アルカリ化処理を行った後に、室内大気(20℃×60%R.H.)、および促進中性化槽(CO₂=5%、30℃×60%R.H.)へ3ヶ月間放置した後にフェノールフタレイン溶液により中性化深さの確認

表2. 中性化深さ測定結果

溶液種類	測定部位	中性化深さ (mm)			
		室内大気中放置		中性化槽放置	
		初期	3ヶ月	初期	3ヶ月
Li/Na = 0.15/1.00	未中性化部	0.0	1.0	0.0	14.8
	再アルカリ化部	0.0	0.0	0.0	0.0
Li/Na= 0.15/0.15	未中性化部	0.0	1.2	0.0	12.3
	再アルカリ化部	0.0	0.0	0.0	0.0

を行った結果を表2に示す。室内放置では未中性化部(未処理部)、再アルカリ化部ともに中性化部分はほとんど認められなかった。促進中性化槽に放置した場合は、未中性化部には3ヶ月後で約12~15mmの中性化部分が認められたが、再アルカリ化処理部では中性化部分は認められなかった。これは、再アルカリ化部では浸透したアルカリ溶液が炭酸ガスと平衡状態を保ちpHを維持しようとする緩衝作用を持っているため、促進中性化槽中に放置した場合でも大気中へ1日間放置することによりコンクリート中に存在するアルカリ溶液が大気中の炭酸ガスと再び平衡状態をとり溶液のアルカリ性が保たれたものと考えられる[3]。

3.3 鉄筋の状態変化

片側中性化供試体、および両側中性化供試体での未処理部と再アルカリ化処理部での処理前、処理直後、処理後3ヶ月の鉄筋のアノード分極曲線を測定した結果を図4(a), (b)に示す。分極曲線の測定に際しては、全自動分極曲線測定装置により、鉄筋の自然電位より測定を始め、自然電位より+1000mVまで電位を掃引して電位-電流密度曲線を測定した[4]。

1) 片側中性化供試体 (図4(a))

処理前において中性化部(処理部)の鉄筋の自然電位は未中性化部(未処理部)のより卑な値を示し、電位(Y軸)に対する電流密度(X軸)の値も大きく鉄筋が腐食している状態を示していた。目視観察においても中性化部の鉄筋には表面に均一の腐食が観察されたが、未中性化部の鉄筋には腐食は認められなかった。再アルカリ化処理を行った処理直後の鉄筋の分極曲線では、鉄筋の自然電位は不活性領域に相当する非常に卑な値を示し、電位に対する電流密度の値は大きな値を示した。しかし、処理後3ヶ月間大気中に放置した後は、自然電位も処理前に比べ貴な値

を示し曲線は鉄筋表面への不動態の存在を示すような急峻な立ち上がりをもつ形状となり電位に対する電流密度の値は小さな値を示すようになった。これは、処理前には腐食状態にあった鉄筋が、再アルカリ化による鉄筋の電気化学的な処理と、それに伴う鉄筋周囲のアルカリ性の回復により鉄筋の表面での腐食反応が停止し、さらに処理後3ヶ月では鉄筋表面に不動態の生成が行われたためと考えられる。

これに対し、処理を行わなかった未中性化部分の鉄筋に変化はなく、目視検査からも腐食していない状態を維持していた。

2) 両側中性化供試体 (図4(b))

処理前においては処理部、および未処理部ともに鉄筋の存在するコンクリート部はいずれも中性化しているために鉄筋には腐食が観察され、分極曲線の測定結果からも腐食していることが確認された。再アルカリ

化処理を行った後の処理部では、処理直後、および処理後3ヶ月間大気中に放置した後は何れも先に示した片側中性化供試体の場合と同様な自然電位、および分極曲線の変化が認められ、腐食状態にあった鉄筋の腐食反応が停止し、腐食しにくい状態へと変化したことが確認された。これに対し、処理を行わなかった中性化部分の鉄筋は腐食したままの状態を維持していた。

3. 4 処理の副作用

1) アルカリシリカ反応

未中性化供試体、中性化供試体、およびアルカリ溶液(Li/Na=0.15/1.00, 0.15/0.15)で再アルカリ化した中性化供試体の膨張率測定結果を図5に示す。

未中性化供試体は再アルカリ化処理を行わなくてもアルカリシリカ反応による膨張が認められたのに対し、中性化供試体では再アルカリ化処理の有無によらず膨張は未中性化供試体に比べ著しく小さかった。これは、再アルカリ化に使用するアルカリ溶液のpHが極端に高くなく、骨材中のシリカの溶解度が高くなる領域より低い値であるためアルカリシリカ反応が抑制されたものと考えられる[5]。

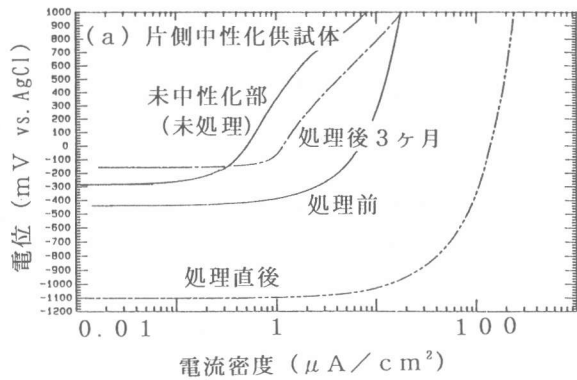


図4(a) 片側中性化供試体の分極曲線測定結果

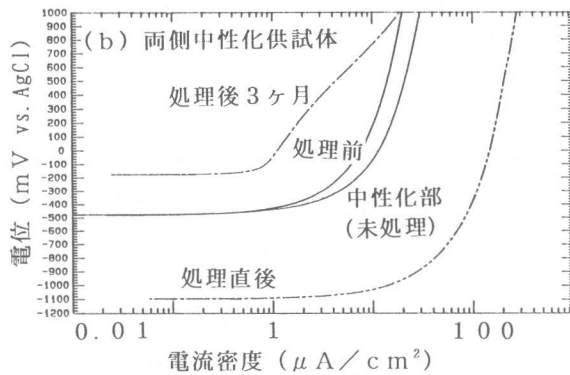


図4(b) 両側中性化供試体の分極曲線測定結果

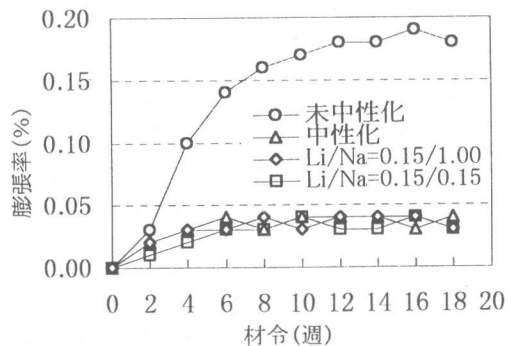


図5. 膨張率測定結果(モルタルバー法)

2) 付着強度

引き抜き試験による鉄筋とコンクリートの付着試験結果を表3に示す。最大付着強度は、電流密度を高くするほど低下する傾向にあったが、未処理を100%とした場合の鉄筋の表面積当たりの積算電流密度に対する付着強度の変化の割合は、コンクリート表面積当たり1A/m²で95%、5A/m²で

表3. 鉄筋とコンクリートの付着強度試験結果

電流密度 (vs. コンクリート) (A/m ²)	電流密度 (vs. 鉄筋) (A/m ²)	積算 電流密度 (A·h/m ²)	最大 付着強度 (MPa)	強度比 (%)
0.0	—	—	7.59	100
0.5	2.3	773	7.25	98
1.0	4.6	1546	6.89	95
2.0	9.2	3092	6.72	93
5.0	23.0	7730	6.23	86

86%であった。本結果は、塩害に対する電気化学的補修技術法である脱塩工法での塩分未含有供試体での結果と同等の値を示しており、塩害の場合に比べ鉄筋近傍でのアルカリ金属の集積量が少ないため付着強度の低下が少なかったものと考えられる[6]。

4. まとめ

本検討結果より、以下のことが確認された。

- (1) 電気化学的処理により中性化部分の再アルカリ化が可能であり、浸透するアルカリ量はアルカリ溶液の濃度を保ち浸透していくことが確認された。
- (2) 再アルカリ化部分は、溶液の炭酸ガスに対する緩衝作用により未中性化部のコンクリートより中性化に対する抵抗力が大きいことが確認された。
- (3) 再アルカリ化処理後の鉄筋は腐食の進行が停止し、鉄筋表面での不動態の再生が行われ腐食に対する抵抗力が大きくなることが確認された。
- (4) 再アルカリ化処理にともなう副作用（アルカリシリカ反応、コンクリートと鉄筋の付着強度）は制御された処理条件では問題ないことが確認された。

[謝辞]

本研究は、(財)建築研究振興協会における電気化学的補修技術検討委員会において行ったものであり、御指導および御助言を頂いた東京理科大学 清水昭之講師、宇都宮大学 榎田佳寛教授、建設省建築研究所 阿部道彦室長、鹿毛忠継主任研究員に深く感謝いたします。

[参考文献]

- [1] 佐野 世ほか：電気化学的手法を用いた鉄筋コンクリート構造物のアルカリ回復工法の適用事例、コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム、pp55, 1996. 10
- [2] 石橋孝一ほか：中性化を受けたコンクリート構造物の電気化学的補修技術に関する基礎検討(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 359, 1996. 9.
- [3] L. Odden : International Conference on Corrosion Protection of Steel in Concrete, England, pp1473. 1994.
- [4] 大即信明ほか：種々の材料の鉄筋防食性能についての電気化学的評価、コンクリート工学論文集、pp. 1, 第1巻、第2号、1990. 1
- [5] T. K. H. Al-Kadhimi et al. : Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp637, Aug. 1996.
- [6] 上田隆雄ほか：コンクリート工学年次論文報告集、pp. 1007, Vol. 16, No. 1, 1994