

# 論文 中性化と初期塩化物イオンによる鉄筋腐食に対する脱塩・再アルカリ化補修の適用性

鳥取誠一\*1・北後征雄\*2・原与司人\*3・宮川豊章\*4

要旨：表題について屋外暴露試験により検討した。試験は塩化物イオンを含む供試体を鉄筋位置程度まで促進中性化させた後、暴露、脱塩・再アルカリ化処理の手順で実施した。また、補修工の経済性の観点から、再アルカリ化処理のみによる効果についても検討した。その結果、脱塩・再アルカリ化処理によって明確な防食効果が認められること、再アルカリ化処理のみによっても、ある程度の効果が得られることがわかった。

キーワード：脱塩・再アルカリ化、中性化、塩化物イオン、補修

## 1. はじめに

近年、鉄筋腐食に対する補修法の1つとして電気化学的手法を利用した脱塩・再アルカリ化工法が注目されているが[1]，既往の研究においては、塩害あるいは中性化単独の場合についての検討が主体で、塩害、中性化の複合的な劣化に対する適用性を検討した事例は少ない。

そこで、本報においては塩害、中性化の影響を受けた部材に対する脱塩・再アルカリ化補修の適用性を暴露試験により検討することとした。暴露試験は、塩化物イオンを含む供試体を促進中性化させた後、脱塩・再アルカリ化処理を施す試験をシリーズⅠ、上記供試体に再アルカリ化処理のみを施す試験をシリーズⅡとして実施した。シリーズⅡは補修工の経済性の観点から、比較的、塩化物イオン量が少ない場合に再アルカリ化のみで、どの程度の補修効果が得られるかについて検討するために実施したものである。

## 2. 脱塩・再アルカリ化処理の検討（シリーズⅠ）

### 2. 1 供試体の概要

コンクリートの配合を表1に示す。水セメント比は60あるいは70%とし、塩化物イオンをNaCl（一級試薬）を用いて5 kg/m<sup>3</sup> 混入した。鉄筋にはSS41，径9 mmのみがき丸鋼を用いた。供試体の条件を表2に示す。供試体は打設後、材齢6日まで湿润養生を施した後、炭酸ガス濃度10%，

表1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
10	10	4	70	48	173	247	882	955
	13	4	60	47	177	295	839	964

\* 1 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 構造システム 主任技師 (正会員)

\* 2 ジェイ・エル西日本コンサルタンツ(株) 技術部 担当部長 (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)

\* 4 京都大学大学院工学研究科 助教授 (正会員)

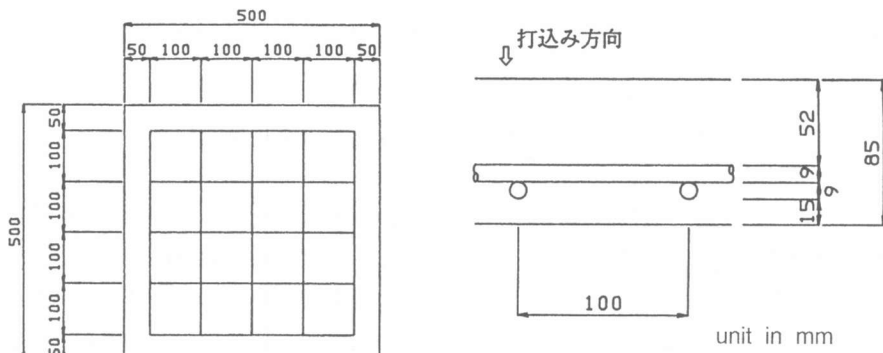


図1 供試体の寸法, 形状

表2 供試体条件および解体試験結果

グループ	No.	W/C (%)	cl <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	中性化深さ <sup>1)</sup> (mm)	脱塩・再アルカリ化の有無	解体時の材齢 (days)	腐食面積率 (%)		腐食量 (mg/cm <sup>2</sup> )	
							上筋	下筋	上筋	下筋
A	1	70	5	18	無	227	18~26	15~31	0~19 (8)	20~30 (27)
	2	70	5	(20)	無	—	—	—	—	—
	3	60	5	20	無	559	25~30	27~55	2~12 (6)	43~63 (51)
	4	60	5	(20)	無	—	—	—	—	—
B	1	70	5	17.0, 5	有	98+55+464=617 <sup>2)</sup>	7~41	26~54	3~11 (6)	4~8 (7)
	2	60	5	12.0, 3	有	同上	12~23	18~22	5~14 (9)	4~10 (7)

1) Aグループの値は供試体解体時の中性化深さを表す。ただし、( )内の値は目標設定値である。Bグループの値は脱塩・再アルカリ化処理前, 処理後および供試体解体時の中性化深さを表す。

2) 第1項は脱塩・再アルカリ化処理前, 第2項は処理期間, 第3項は処理後の期間を表す。

温度20℃, 湿度70%の条件下において促進中性化させた。所定の中性化深さが得られた段階で, 供試体を屋外(東京都国分寺市)に暴露した。暴露期間中は鉄筋に近い50×50cmの面を下に向け, 1週間に数回の散水時, あるいは降雨時にある程度の湿潤状態を保持するため, 供試体を養生シートで覆った。

供試体の寸法, 形状を図1に示す。下側の鉄筋(以下, 下筋という)のかぶり厚は15mmで, 下筋位置程度までの中性化深さを与えることを目標とした。

## 2.2 通電方法

鉄筋に近い50×50cmの面にチタンメッシュ陽極を設置し, 脱塩時には電解液として水酸化リチウムとホウ酸の混合溶液, 再アルカリ化時には炭酸ナトリウムと炭酸リチウムの混合溶液を用いた。電流密度はコンクリート面に対して1 A/m<sup>2</sup>(鉄筋表面積に対して2.1 A/m<sup>2</sup>)とした。通電期間は脱塩時5週, 再アルカリ化時1週とした。

## 2.3 塩化物イオン量および中性化深さ

脱塩・再アルカリ化処理前, 処理直後に供試体から数箇のコアを採取して, 塩化物イオン量を測定した。また, 供試体解体時にも同様の測定を行った。測定は「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法(JCI-SC 4)」に規定される電位差滴定法によった。結果を図2に示す。これより, ①供試体は単鉄筋スラブに似た状態に配筋されており, 鉄筋かぶりも比較的小さいため, 塩化物イオン量の減少はコンクリート表面から2 cm程度の範囲においてのみしか認められないこと, ②脱塩・再アルカリ化処理後, 約1.3年経過した供試体解体時においても, 塩化物イオンの分布状態には変化が認められないこと, ③可溶性塩化物イオン量の減少傾向も全塩化物イオン量のそ

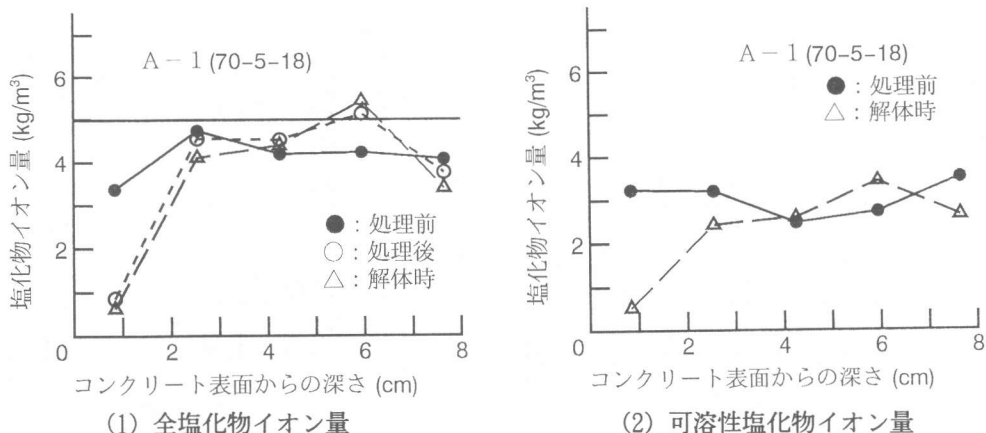


図2 脱塩・再アルカリ化処理前後における塩化物イオン量の分布

れと概ね同様であること、等がわかる。

供試体解体時に測定した中性化深さは表2に示すとおりであるが、脱塩・再アルカリ化処理を施した供試体においても3～5mmの中性化が認められた。脱塩・再アルカリ化処理直後に調査した時点では、中性化深さが0であったので、約1.3年の暴露期間に中性化が進行したことになる。Oddenは再アルカリ化処理後5年経過した建物の調査から、雨水の影響がある場合には電解液が洗い流される可能性を指摘しており[2]、本試験においても同様の状態が生じたと想定されるが、詳細については今後の検討が必要と考えられる。なお、再アルカリ化処理を施した部分では、フェノールフタレイン溶液を噴霧後にコンクリートが赤変するまでに数分間を要した。これは、上記部分においてフェノールフタレインが細孔溶液中に浸透したアルカリ溶液と反応して赤変するためには、フェノールフタレイン溶液中のアルコールが蒸発する必要があるためである。

脱塩・再アルカリ化処理を施していない供試体の中性化深さは18～20mmであり、目標設定値に近い値が得られた。

#### 2.4 供試体の外観および解体による鉄筋腐食量測定

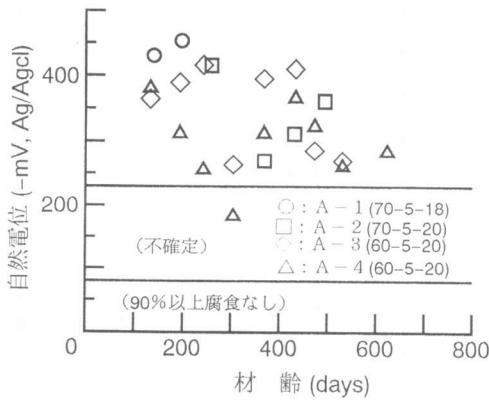
脱塩・再アルカリ化処理を施していない供試体には、暴露後0.5～1年の間にかぶりの小さい鉄筋に沿ったひび割れが認められた。ひび割れ幅は0.05mm程度であった。一方、処理供試体にはひび割れが生じていなかった。

表2中にはかぶりが15mmの鉄筋を下筋、かぶりが24mmの鉄筋を上筋として、各々の鉄筋腐食量および腐食面積率を示す。表中の値は供試体中の1本ずつの鉄筋の測定結果を範囲で示したもので、( )内の値は5本の鉄筋の平均値である。鉄筋腐食量は、クエン酸二アンモニウム水溶液による錆落としを行い、鉄筋質量を0.1mgの単位まで測定することにより求めた。

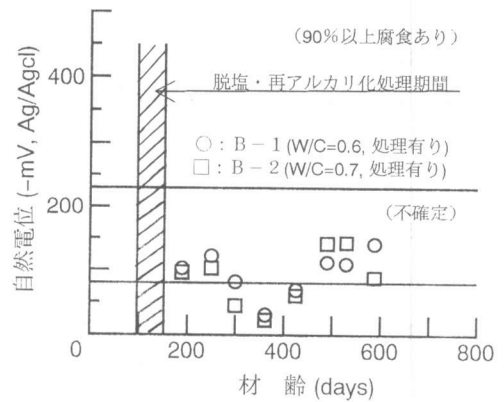
これより、①脱塩・再アルカリ化処理供試体の鉄筋腐食量は、無処理供試体の10～30%程度で、処理の効果が明確に認められること、また、後述の自然電位等の経時変化から判断して、脱塩・再アルカリ化処理供試体における鉄筋腐食量の大部分は脱塩・再アルカリ化処理前に生じたものであろうと推測されること、②無処理供試体の鉄筋腐食面積率は上筋と下筋でそれほど大きな差がないが、鉄筋腐食量には差が生じており、中性化の影響が認められること、等がわかった。

#### 2.5 自然電位の経時変化

図3に脱塩・再アルカリ化無処理および処理供試体の自然電位の経時変化を示す。図中のプロットは各供試体中の自然電位の平均値である。これより、無処理供試体における大部分の測定値



(1) 無処理供試体



(2) 処理供試体

図3 脱塩・再アルカリ化処理が自然電位の経時変化に及ぼす影響

はASTMの評価基準で「90%以上腐食あり」の評価となるのに対し、処理供試体の自然電位は-150mV(Ag/AgCl)より貴な値を示しており、「不確定」～「90%以上腐食なし」の評価となった。この結果は前述の鉄筋腐食調査結果と整合するものであるといえる。

### 2.6 腐食電流の経時変化

図4にACインピーダンス法による分極抵抗の測定から求めた腐食電流  $i_{corr}$  の算定結果を示す。腐食電流  $i_{corr}$  は式(1)により求めた。

$$i_{corr} = K/R_p \cdot A \quad \dots\dots (1)$$

ここに、K : 係数(ここでは岡田らの実験[3]に基づき、27mVの値を用いた)

$R_p$  : 分極抵抗の測定値

A : 作用極の領域面積で、後藤らの解析[4]から求めた

データ数は少ないものの、図4から脱塩・再アルカリ化処理供試体の腐食電流(黒塗記号)は、無処理供試体のそれ(白抜記号)に比べて1オーダー程度小さいことがわかる。

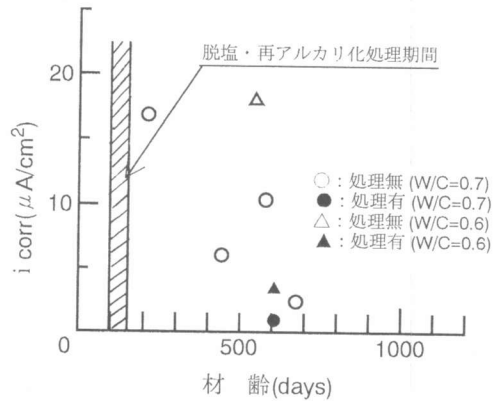


図4 脱塩・再アルカリ化処理が腐食電流に与える影響

表3 供試体の条件(シリーズII)

グループ	No.	W/C (%)	cl <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	中性化深さ目標値 (mm)	再アルカリ化の有無
C	1	70	2	20	無
	2	70	2	20	無
	3	70	2	20	無
	4	70	2	10	無
	5	70	2	10	無
	6	70	2	0	無
	7	70	0	20	無
	8	70	0	20	無
D	1	70	2	20	有
	2	70	5	20	有

### 3. 再アルカリ化補修の検討(シリーズII)

#### 3.1 試験に対する考え方

本シリーズの検討に用いた供試体を表3に示す。表中のうち、再アルカリ化補修を施していない供試体の自然電位の経時変化を図5に示す。図中の(1)には水セメント比70%、塩化物イオン

量を  $2 \text{ kg/m}^3$ 、促進中性化深さの設定目標値を  $20\text{mm}$ とした供試体（以下、70-2-20 供試体と略記する）、(2)には促進中性化深さの設定目標値を  $0$  または  $10\text{mm}$ 、あるいは塩化物イオン量を  $0$  として、70-2-20 供試体よりも劣化条件を緩和した供試体の自然電位を示している。

これらの図より、中性化と塩化物イオンは複合的に鉄筋腐食を促進する要因であるが、いずれかの要因が緩和されれば、自然電位はある程度貴な状態になることがわかる。また、腐食電流もほぼ同様の傾向を示しており[5]、鉄筋腐食量も少なくなると考えられる。ところで、前章で検討した脱塩・再アルカリ化処理においては、通常、脱塩処理に4週間、再アルカリ化処理に1週間程度要する。したがって、本論において検討している程度の塩化物イオン量、中性化深さの条件下で、再アルカリ化処理のみによって、実用上、許容される程度の鉄筋腐食状況に抑えられれば経済上の効果も大きいと考えられることから、以下の検討を行った。なお、検討に用いた暴露試験用の供試体は前章と同様である。再アルカリ化処理時の通電方法も前章と同様であるが、処理期間は2週間とした。

### 3. 2 塩化物イオン量および中性化深さ

再アルカリ化処理前後において測定した塩化物イオン量の結果を図6に示す。これより、再アルカリ化処理によっても、塩化物イオンはある程度減少することがわかる。コンクリート表面から  $2 \text{ cm}$  以深において、塩化物イオン量に変化が認められないのは、2. 2において述べたように配筋状態の影響によるものと考えられる。

再アルカリ化処理前の中性化深さは  $20\text{mm}$  以上であったが、処理によって中性化深さは  $0$  となった。しかしながら、供試体内部において一部、フェノールフタレイン溶液を噴霧しても赤変しない箇所があった。この原因として、鉄筋間のコンクリートに電解液が浸透しなかった領域が形成されたことが想定されるが、詳細については今後の検討課題としたい。

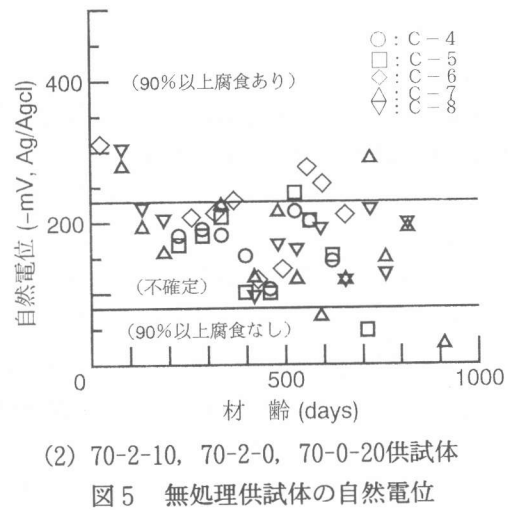
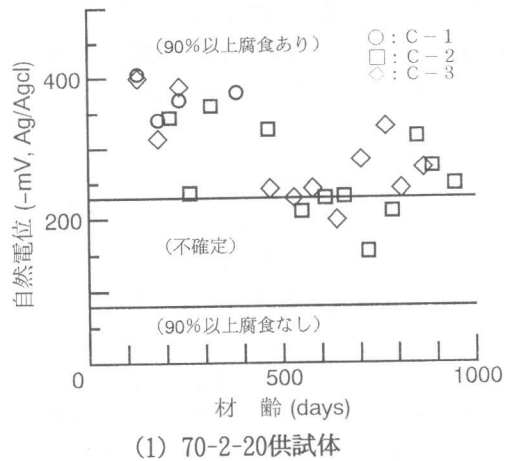
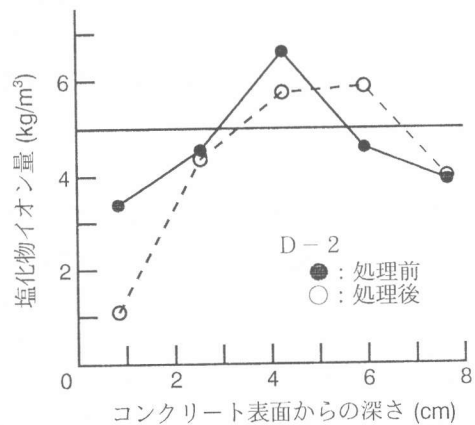


図5 無処理供試体の自然電位



### 3. 3 自然電位および腐食電流の経時変化

図7に再アルカリ化処理供試体の自然電位の経時変化を示す。再アルカリ化処理後の経過期間が必ずしも十分でないが、再アルカリ化処理後に自然電位は貴化の傾向にあるようである。また、供試体D-1(70-2-20+再アルカリ化)とD-2(70-5-20+再アルカリ化)を比較すると、D-2のほうが卑な電位を示しており、「不確定」と「90%以上腐食あり」の境界付近に位置している。これより、塩化物イオン量がある値以上の場合には、再アルカリ化処理のみによる補修では、十分な効果が得られないことも想定される。

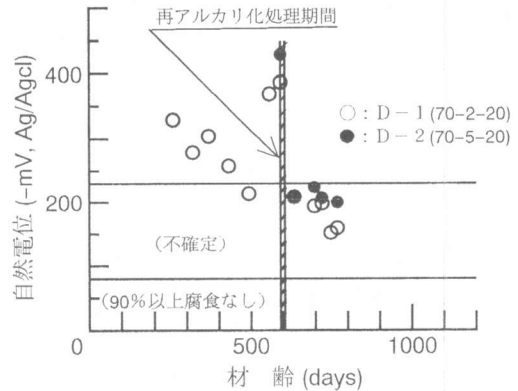


図7 再アルカリ化処理供試体の自然電位

### 4. まとめ

脱塩・再アルカリ化補修に関する検討(シリーズI)の結果、以下の点がわかった。

- (1) 脱塩・再アルカリ化補修によって、塩化物イオン量を減少させることが可能であるが、その程度は配筋条件によっても影響される。
- (2) 上記処理後にも中性化の進行が認められた。雨水等により電解液が洗い流されたことも想定されるが、今後の検討が必要である。
- (3) 鉄筋腐食量を調査した結果、脱塩・再アルカリ化補修の明確な効果が認められた。この結果は自然電位、腐食電流の経時変化の結果とも整合していた。

再アルカリ化補修に関する検討(シリーズII)の結果、以下の点がわかった。

- (4) 再アルカリ化補修時に用いたアルカリ溶液によっても、コンクリート中の塩化物イオン量を減少させることが可能である。
- (5) 供試体内の一部において、再アルカリ化されていない箇所が認められた。鉄筋間のコンクリートに電解液が浸透しなかったことも想定されるが、詳細については今後の検討が必要である。
- (6) 再アルカリ化補修によって、自然電位が貴化する傾向が認められたが、その程度はコンクリート中の塩化物イオン量に影響されるようであった。同様の傾向は、腐食電流の測定結果からも伺われた。

### 参考文献

- [1] J. B. Miller : The treatment of carbonated concretes by electro-chemical realkalisation, ACI, Fall Convention, Philadelphia, Nov. 1990
- [2] L. Odden : The repassivating effect of electro-chemical realkalisation and chloride extraction, Corrosion and corrosion protection, July. 1994
- [3] 岡田 清, 小林和夫, 宮川豊章ほか : 分極抵抗法を用いた鉄筋腐食モニタリングによる補修基準について : 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集 1983
- [4] 後藤信弘, 松岡和己, 伊藤叡 : 交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 12, No. 1 1990
- [5] 鳥取誠一, 井上寛美, 神野嘉希ほか : 中性化と内部塩による鉄筋腐食に対すライニング補修の適用性, コンクリート構造物の補修工法に関するソッドム論文報告集, 日本コンクリート工学協会, 1996. 10