

# 電気化学的手法によるコンクリートの改質と補修効果に関する実証的研究

北後征雄<sup>1</sup>・ 芦田公伸<sup>2</sup>・ 菊田憲弘<sup>3</sup>・ 宮川豊章<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 ジェイアール西日本コンサルタンツ (株) (〒 532-0011 大阪市淀川区西中島 5 丁目 4-20)

<sup>2</sup> 正会員 電気化学工業株式会社大阪支店 (〒 530-0001 大阪市北区梅田 1 丁目 12-39)

<sup>3</sup> 正会員 西日本旅客鉄道株式会社 (〒 530-8341 大阪市北区芝田 2 丁目 4-24)

<sup>4</sup> フェロー会員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

本論文は、塩化物イオンと水酸イオンの比率をパラメータとしてコンクリート中の鉄筋腐食の定量化を目的に実験室レベルで試験を行うとともに、既設構造物がデサリネーション、再アルカリ化によってどのように改質されるかについて述べ、処理後 5 年間の追跡結果について報告するものである。モルタルにおける実験結果から判断して、 $\text{pH} = 12$  以上であって  $[\text{Cl}^-] / [\text{OH}^-]$  が 1.0 以上であれば、鋼材は腐食しないものと考えられる。デサリネーション、再アルカリ化を実施することによって、実構造物の鉄筋周辺における  $\text{pH}$  値は 12.6 ~ 13.2 に改質され、可溶性塩分も  $0.47 \sim 0.56 \text{ kg/m}^3$  に減少した。処理後 60 ヶ月でも含有塩分量にはほとんど変化は認められず、鉄筋の背面における顕著なシャドースポットは認められない。

**Key Words :** *corrosion of reinforcing steel, threshold of  $[\text{Cl}^-] / [\text{OH}^-]$ , repair, desalination, realkalization*

## 1. はじめに

コンクリートは耐久性に優れた材料として知られており、事実、長期にわたって供用され、今も十分にその機能を果たしている構造物も少なくない。しかし、様々な原因から劣化が進行するのをもたまたま事実であり、メンテナンスフリーの代表的な材料と考えられてきたコンクリートも適切な維持管理がなされなければ耐久な構造物とはならないという、ある意味では当然のことが認識されるようになってきている。

RC ラーメン高架橋などに代表される鉄道構造物に見られる変状の多くは鉄筋腐食に起因している。これらの変状に対して構造物が通常環境条件にある場合、現状では「ライニング工法」と呼ばれるコンクリートの表面塗装によって対処されることが多い。過去の調査結果<sup>1) 2)</sup>は、鉄筋腐食の原因が除塩不十分の細骨材がもたらす「塩分」と「中性化」、特に後者であることであることを示唆している。ライニング工法の適用に際して、コンクリート中の含

有塩分量を測定していない箇所も多く、含有塩分量が多い場合にはそれを除去したうえでライニングをおこなうなどの補修は必ずしもなされてはいないのが実態である。また、ライニング材料そのものの耐久性に限界があるなどの認識を踏まえて、近年、ライニング工法に代わる抜本的方法として電気化学的方法によってデサリネーション(脱塩)し、再アルカリ化することによってコンクリートそのものを改質する方法が試みられている。この場合、デサリネーション、再アルカリ化によってどの程度の塩分量、どの程度のアルカリ環境とすれば、その後鉄筋腐食を生じないかを明らかにする必要があるが、鉄筋腐食に対して塩分と中性化のそれぞれがどのように影響するかについては必ずしも明らかとはなっていない。

本研究では塩化物イオンと水酸イオンの比率 (=  $[\text{Cl}^-] / [\text{OH}^-]$ ) をパラメータとしてコンクリート中の鉄筋の腐食の可能性について定量化することを実験室レベルで試みるとともに、実構造物のコンクリートが脱塩、再アルカリ化工法によってどのよう

表-1 [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] の閾値

	pH	Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup>	実験条件
Hausmann	11.6 ~ 12.4	0.6	アルカリ水溶液中の鋼材
Gouda & Diamond	11.8 12.1 12.6 13.0 13.3	0.57 0.48 0.29 0.27 0.30	アルカリ水溶液中の鋼材
Page	13.91	0.54	セメントペースト中の鋼材
Page & Havadahl		62	シリカフューム30%を含むセメントペースト中の鋼材
米澤 (Yonezawa)		5	セメントモルタル中の鋼材
Syed, Ehtesham & Hussain	13.3 以下 13.3 以上	1.7~ 2.0 1.28~ 1.86	セメントモルタル中の鋼材

に改質されるかについて述べ、処理後5年間の追跡調査の結果について報告する。

## 2. 塩化物イオンと水酸イオンの比率 ([Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]) が鉄筋腐食に与える影響

過去に行った調査結果<sup>9)</sup>は、通常のある環境にある構造物では、ある程度の塩分含有量が認められても、中性化が鉄筋にまで及んでいなければ鉄筋腐食はそれほど顕著には認められないことを示唆するものであった。これは、塩化物イオン [Cl<sup>-</sup>] が存在しても、水酸イオン [OH<sup>-</sup>] がある一定濃度以上存在すると鋼材表面の不動態皮膜の生成が促進され、破壊された不動態皮膜は再修復されるとする考え方と合致する。すなわち、鋼材に腐食が生じるかどうかは、鋼材の存在する環境中での塩化物イオン濃度と水酸イオン濃度の比 [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] に大きく影響を受け、閾値が存在するものと考えられる。既往の研究結果を表-1に示す。

### (1) アルカリ水溶液中の鋼材腐食に関する閾値

アルカリ水溶液中の鋼材腐食に関する閾値としては、Hausmannの [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] ≤ 0.6<sup>9)</sup>がよく知られている。Hausmannは、pH値が11.6、12.4、13.2の時、[Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] がそれぞれ0.5、0.61、0.83であれば、腐食しないことを見いだした。なお、0.83の値は測定が困難なことから信頼性は低いと述べており、Hausmannの結論は、pH値が11.6から12.4の範囲にお

いて腐食閾値としての [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] は増大傾向にあるものの、およそ0.6であるとするものである。

Gouda は、pH値が11.75から13を越えるアルカリ性の溶液についての研究<sup>9)</sup>を行った。Diamond は、NaOHの活量係数を使ってpH値から水酸イオンの濃度を推測することによって Gouda の結果を修正した。照査の結果は、pHが増加するにつれて閾値 [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] は減少することを示している。pHの範囲が11.8から12.1の間ではHausmannの値、0.60と良い一致を示している。

なお、Hausmann<sup>9)</sup>は、これらの値が酸素の供給量によって影響されるとしている。したがって、密実に飽水したコンクリートであれば、閾値は大きくなると報告している。

### (2) セメントペースト中の鋼材腐食に関する閾値

Pageらは、セメントペースト中に埋め込まれた鋼棒を用いた試験で、細孔溶液中のpHと [Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] がそれぞれ13.91と0.54のとき、鋼材は不活性であること<sup>10)</sup>を見いだしている。pH13.91の時の0.54という値は、Goudaによる結果から推定で計算したpH13.91に対する値 [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] = 0.23の2倍以上である。したがって、セメントペースト中に埋め込まれた鋼材の場合、腐食閾値としての [Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] 値は、アルカリ水溶液中のそれよりもはるかに高いものと考えられる。また、シリカフュームを30%含む硬化したセメントペーストに対し、Pageらは、埋め込まれた鋼材が [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] が62まで不活性であること<sup>10)</sup>を見いだしている。

### (3) セメントモルタル中の鋼材腐食に関する閾値

セメントモルタル中では更に条件は緩やかで、米澤らは [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] ≤ 約5であるとの結果<sup>9)</sup>を得ている。米澤らは鋼棒とモルタルの間の付着状態が a)、b) に示す二つの異なる状態での鋼棒の腐食に関する性質について報告した。

a) 埋め込まれた鋼棒とモルタルの間にフィルターペーパーが存在するもの。

b) 鋼棒を直接モルタルに埋め込んだもの。

米澤は閾値としての [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] が、アルカリ水溶液中のそれと比較して、両方の付着条件ともセメントモルタルに埋め込まれた鋼棒の方がずっと高いことを見いだしている。

Syed, Ehtesham & Hussain らの報告<sup>10)</sup>は、水セメント比55%のモルタル中の鋼材腐食に関するものである。水酸イオン濃度をpH13.26から13.36と比較的狭い範囲で変化させているとはいえ、水酸イオンの増加につれて [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] の閾値が減少してい

表-2 コンクリート並びにモルタル中の鋼材腐食に関する閾値<sup>1)</sup>

	鋼材腐食に関する全塩化物イオン量の閾値 (Cl <sup>-</sup> wt% Cem)
コンクリート構造物	0.17~2.2 (4)
コンクリート供試体 (屋外曝露)	0.32~1.9 (4)
コンクリート供試体 (実験室)	0.5 ~2.5 (4)
モルタル供試体 (実験室)	0.25~1.5 (2)

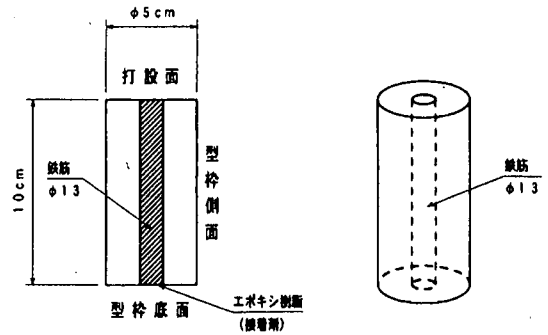


図-1 供試体の外観・寸法

表-3 供試体の種類

pH	12.0	12.5	13.0	13.5	4水準	
Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup>	0	0.1	0.5	1.0	1.5	10水準
	2.0	3.0	5.0	7.5	10	

( )は、もととなる文献数  
 る。たとえば、pH13.30以下の水酸イオンの濃度で [Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] の閾値は1.7から2.0の範囲、pH13.30以上の水酸イオンの濃度で [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] の閾値は1.28から1.86の範囲である。

#### (4) コンクリート中の鋼材腐食に関する閾値

以上のような報告に対してGlassらは、公表されたデータを基に、提案されている [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] の閾値と塩化物閾値について検討<sup>1)</sup>を行っている。対象となるのは、鉄筋コンクリート構造物、屋外環境に曝されたコンクリート供試体、実験室環境におけるコンクリート、モルタル、セメントペースト供試体と模擬された細孔溶液での研究であり、上記(1)~(3)の一部を含んでいる。

検討結果の要旨は次の通りである。

- ・水酸化物の濃度に対する塩化物量もしくは可溶性塩化物量の率として閾値を示す方法については、その有効性が入手したデータから証明できない。
- ・初期のアノードに起こる酸性化は、局所的な塩化物の活性を増大させ、固定塩化物の開放を促進する。
- ・固定された塩化物であっても腐食の危険性を有する。
- ・セメントの最も重要な防食性能はpH値が局所的に12.6以下に低下しないように制限することである。
- ・コンクリート中の鋼材腐食の閾値は、セメント重量に対する全塩化物量として示すのが最も良い。

コンクリート並びにモルタルに関するデータの最大値、最小値を表-2に示す。ただし、閾値はセメント重量に対する全塩化物量として与えられている。

### 3. セメントモルタル中における

#### [Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]の鉄筋腐食閾値に関する実験

セメントモルタル中における [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] の

鉄筋腐食閾値に関する実験を行った。

#### (1) 実験方法

pH値と [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] の値を変えたモルタル供試体を作製し、デシケーター内に静置し、供試体内部に埋め込まれた鉄筋の腐食の有無を調べる。

#### a) 使用材料

鉄筋：鉄筋用棒鋼 (JIS G 3112) を削って磨き鋼棒 (φ13 mm×100 mm) とした。元の鉄筋の化学成分と引張試験の結果は次の通りである。

C=0.14%, Si=0.18%, Mn=0.49%, P=0.017%, S=0.011%,  
 降伏点=330N/mm<sup>2</sup>, 引張強度=472N/mm<sup>2</sup>, 伸び率=29%。

砂：標準砂 (JIS R 5201に規定される「セメント強さ試験用標準砂」) (比重：2.64)

セメント：普通ポルトランドセメント (比重：3.16)

アルカリ：水酸化ナトリウム

塩化物：市販食塩 (NaCl : 99%)

#### b) 供試体

直径 5cm, 高さ10cm, 中心部分に鉄筋を埋め込んだ円柱モルタル供試体を作製した。かぶりは19mmとした。鉄筋はモルタル打設に先だって型枠底面にエポキシ樹脂を用いて接着した。供試体端部のかぶりは0である。供試体の外観・寸法を図-1に示す。

供試体の種類は、表-3 に示すpH値 4水準, [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] 10水準とし、各2体を作製した。

モルタルはJIS標準モルタルとし、W/C=50%のものを使用した。1m<sup>3</sup>に対する配合を表-4 に示す。

pH値は練り混ぜ水中のNaOHの量を増減させることにより設定した。ただし、pH=12.0は、飽和カルシウム水溶液と見なし、NaOHによる調整は行っていない。

表-4 モルタルの配合

普通ポルトランドセメント	502kg/m <sup>3</sup>
標準砂	1507kg/m <sup>3</sup>
水	251kg/m <sup>3</sup>

表-5 モルタル打設時の [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] ,  
モルタル中の全塩分量 [g/m<sup>3</sup>] および全  
塩分量のセメント量に対する比率 [wt%]

		pH			
		13.5	13.0	12.5	12.0
[Cl <sup>-</sup> ] / [OH <sup>-</sup> ]	0	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	0.1	285.1 (0.057)	89.1 (0.018)	26.7 (0.005)	8.9 (0.002)
	0.5	1425.7 (0.284)	445.5 (0.089)	133.7 (0.027)	44.5 (0.009)
	1	2851.4 (0.568)	891.0 (0.177)	267.3 (0.053)	89.0 (0.018)
	1.5	4277.1 (0.852)	1336.5 (0.266)	401.0 (0.080)	133.5 (0.027)
	2	5702.8 (1.136)	1782.0 (0.355)	534.6 (0.106)	178.0 (0.035)
	3	8554.2 (1.704)	2673.0 (0.532)	801.9 (0.160)	267.0 (0.053)
	5	14257.0 (2.840)	4455.0 (0.887)	1336.5 (0.266)	445.0 (0.089)
	7.5	21385.5 (4.260)	6682.5 (1.331)	2004.8 (0.399)	667.5 (0.133)
	10	28514.0 (5.680)	8910.0 (1.775)	2873.0 (0.572)	890.0 (0.177)

( )は、全塩分量のセメント量に対する比率(wt%)  
網掛けは、腐食していたことを示す。

例えば、pH=13.0, [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] =1.0の設定は  
pH=13.0より [OH<sup>-</sup>] = 0.1mol/l, [Cl<sup>-</sup>] / [OH<sup>-</sup>] =  
1.0であるから、[Cl<sup>-</sup>] = 0.1mol/l = 3.55g/l (∵  
塩素の分子量35.5より), モルタル1m<sup>3</sup>の使用水量は  
251kgであるから、実験に使用した塩化物イオン量  
は次式で求めることができる。

$$3.55(\text{g/l}) \times 251(\text{l/m}^3) = 891(\text{g/m}^3)$$

実験に用いた塩化物イオン量の一覧を表-5に示す。

### c)環境条件

鋼材の腐食を促進させるための実験装置を図-2.1  
~2.3に示す。

中性化の進行を避けるために炭酸ガスを含まない  
酸素20%, 窒素80%の混合ガスを蒸留水中を潜らせた  
上で供試体を静置したデシケータ内に誘導した。

デシケータ内の供試体は、表面に水滴が生じるこ  
うことはないが、ある程度湿った状態にある。温  
湿度はデシケータ内の自己記録型温湿度計により計  
測した。実験期間は、材齢115日までとした。ただ

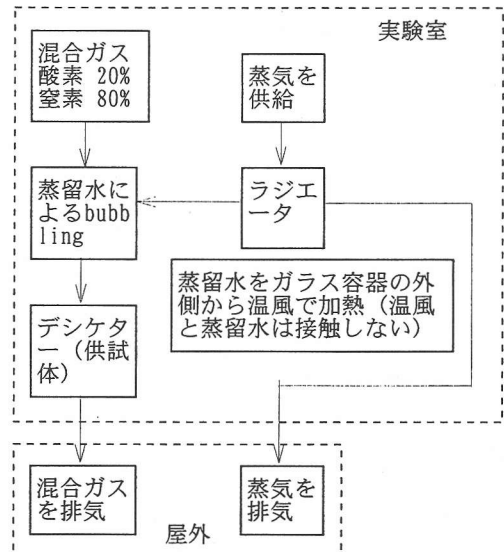


図-2.1 実験装置の概要

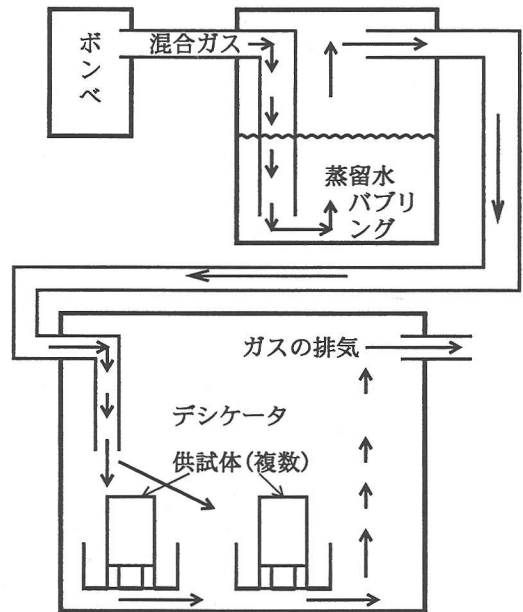


図-2.2 実験装置略図

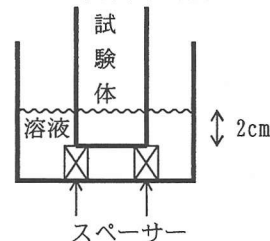


図-2.3 供試体の設置方法

し、当初の設定条件では、長期にわたる実験を行  
っても鉄筋に腐食が発生しない可能性もあったので、  
一部実験環境の変更を行った。すなわち、材齢4日

～材齢33日間での間の条件は、温度=20～30℃、湿度=80～90RH%とした。その後、材齢90日までの間は、温度=20～30℃、湿度=80～90RH%、モルタル供試体の下部2cmを水溶液に浸漬した。また、bubblingに用いる蒸留水を温めることにした。更にその後、材齢115日までの間は、環境温度を60℃とした。実験終了後、供試体のモルタル部分の吸水率の測定を行った。

吸水率の測定は、JIS A 1110に準じるものとし、次の手順で行った。

モルタル供試体を20±2℃の水中で24時間吸水させた。試料を水中から取り出し、吸水性の布で目に見える水膜を拭って表面乾燥飽水状態とした後、直ちにその質量( $m_s$ )を測定した。

質量( $m_s$ )を判定後、試料を100～110℃で24時間乾燥し、室温まで冷やした後、その質量( $m_0$ )を判定した。

供試体の吸水率を次式により算出した。

$$Q = \frac{m_s - m_0}{m_0} \times 100$$

ここに、Q：吸水率(%)

$m_s$ ：表面乾燥飽水状態における試料の質量(g)

$m_0$ ：乾燥後の試料の質量(g)

## (2) 実験結果

温湿度は設定条件を満足していた。材齢115日の段階で鉄筋を取り出し、腐食の程度を調べた。結果を写真-1に示す。

表-5に腐食の有無に関する判定結果を示す。表中網掛け部分が腐食が認められる供試体である。供試体端部のかぶりを0としたことから、一部には端部から腐食が進行したと考えられるものもあった。ここでは、実構造物においてはしばしば見られるひび割れやかぶり不足等の影響も考慮して、安全側にそれも含めて腐食有りと判定した。

供試体のモルタル部分の吸水率は、測定の結果、7.6wt%を示した。また、モルタルの単位体積質量は2050 kg/m<sup>3</sup>であった。割裂して鉄筋を取り出したモルタルから、鉄筋表面に直接接触していたペースト部分を採取し、X線回折を行った。回折の結果、フリーデル氏塩としての明確なピークは認められなかった。

実験条件から考えて、当初設定した [Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] 条件が実験中に変化することが予想されたので、実験終了後、[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>] = 1.0, 1.5, 2.0のものについて供試体のモルタルのpH値を測定した。

測定方法は以下の通りである。

表-6 実験終了後のpH値

		pH			
		13.5	13.0	12.5	12.0
[Cl <sup>-</sup> ] / [OH <sup>-</sup> ]	1.0	13.07 (13.58)	12.46 (12.97)	12.07 (12.58)	11.56 (12.07)
	1.5	12.56 (13.07)	12.27 (12.78)	11.96 (12.47)	11.57 (12.08)
	2.0	13.10 (13.61)	12.41 (12.92)	12.18 (12.69)	11.59 (12.10)

上段：測定値  
下段：計算値

- ① 60℃の乾燥機にて7日間モルタルを乾燥処理。
- ② 乾燥後のモルタルを粗粉碎した後、乳鉢にて88 μm以下に微粉碎。
- ③ 微粉碎したモルタル100gに対して、蒸留水を40g加えて、20℃のデシケータ(N<sub>2</sub>ガス充填)内にて7日間保管。
- ④ 蒸留水を加えた微粉碎モルタルから、水分を吸引濾過法にて分離。
- ⑤ 分離した水分をpH電極にて測定。
- ⑥ [OH<sup>-</sup>] / 40g × 1000g = [OH<sup>-</sup>] モル。
- ⑦ [OH<sup>-</sup>] モル × モルタルの水量。

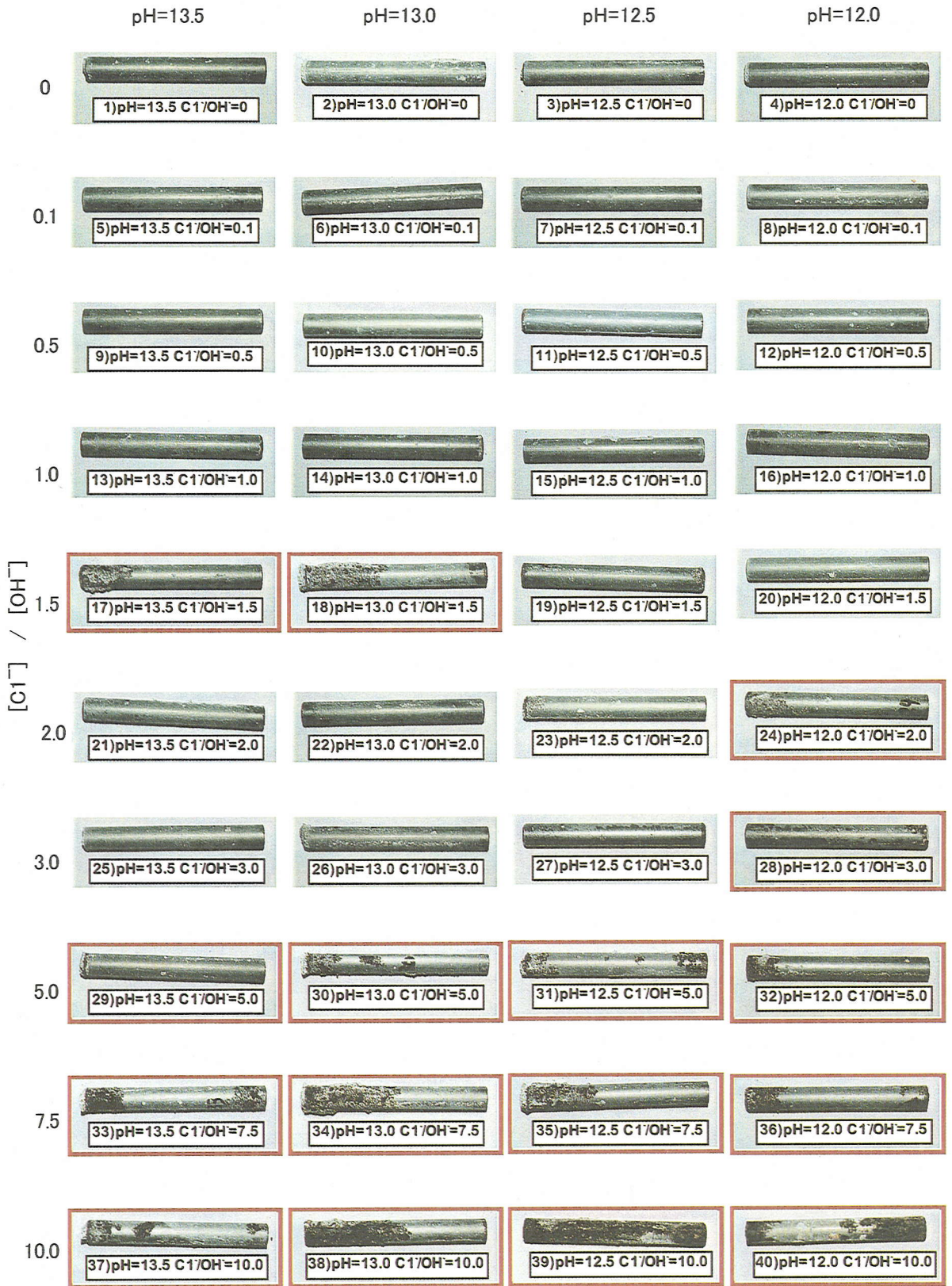
結果を表-6に示す。試験期間中に温度条件を変更したため、溶液のpH値は変化しているものと考えられる。例えば、pH=12.0のものは、飽和カルシウム水溶液とし、NaOHによる調整は行っていない。20℃でのpH値は、12.6、60℃では11.4であることから、実験中のpH値は、11.4～12.6の間で変化していることになる。ただ実験終了後に得られたpH値と設定pH値との差は、0.07～0.1で、当初目標とした値に近似している。

NaOHを加えたものについても温度条件によって、溶液のpH値は変化しているものと考えられる。実験終了後に得られたpH値と設定pH値との差は、0.03～0.43であり、当初設定した値とはかなりのばらつきを示した。

## (3) 考察

試験環境から考えて、供試体は湿潤飽和状態にあり、細孔(=空隙)がすべて細孔溶液で満たされている状態に近いと思われる。

水和反応の過程で細孔溶液が消費されると考えられるが、十分な水分の補給を行っている実験環境であることから、細孔溶液中のCl<sup>-</sup>およびOH<sup>-</sup>が濃縮されることはないかと仮定した。また、設定温度を変化させたことによってpH値は、変動したものと考えられ、実験終了後のpH値もかなりのばらつきを持って



(凡例) 腐食した鉄筋

写真-1 鉄筋の腐食状況

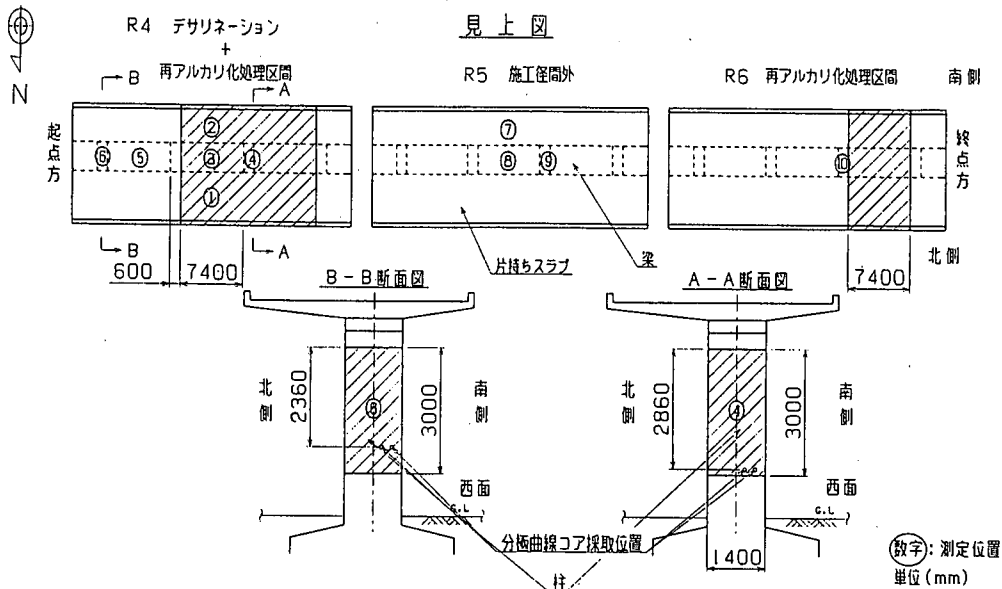


図-3 試験対象構造物

いる。しかし、ここでは  $[Cl^-] / [OH^-]$  の比率は変化せず、当初設定したpH値は変化しないと考える。

表-5中、「網掛け」部分は腐食が認められた供試体である。比較的安全側の判定ではあるが、 $pH=12$ 以上であって  $[Cl^-] / [OH^-]$  が1.0以下であれば、鋼材は腐食しないものと考えられる。なお、 $pH=13.5$ で  $[Cl^-] / [OH^-]$  が1.5の場合と  $pH=13.0$ で  $[Cl^-] / [OH^-]$  が1.5の場合、腐食と判定されるものの、隣り合う供試体から判断して、判定結果は特異値の可能性もあり、今後さらに検討することが必要であると考えている。この結果は、アルカリ水溶液中での閾値とはかなり異なる。すなわち、モルタル中の閾値は、 $pH=12.0 \sim 13.0$ ではアルカリ水溶液中に比べて高い値となり、 $pH=13.5$ ではほぼ等しい。また、米澤らの結果と比較すると小さな値となっているが、これは端部かぶり $\theta$ が0であり、酸素の供給条件の違いが大きいものと考えられる。

表-5から判断する限り、鋼材腐食の有無は、pH値の影響を受けており、Glassらのいう、「コンクリート中の鋼材腐食の閾値は、セメント重量に対する全塩化物量として示すのが最も良い」は必ずしもあたらないようである。

また、本実験は、研磨した鉄筋を用いて  $[Cl^-] / [OH^-]$  の限界値を検討したが、研磨した鉄筋とミルスケールの付いた通常の鉄筋とでは、限界となる  $[Cl^-] / [OH^-]$  の値も異なることが知られている。今回の実験は、あくまでも基礎的な知見を得るために行ったもので

あり、ミルスケールの影響についても、今後の検討課題としたい。

実験後の供試体のモルタル部分における吸水率は、測定の結果7.6wt%であった。また、モルタルの単位体積質量は、測定結果から  $2050kg/m^3$ であった。したがって、モルタル中の吸水量は

$$2050kg/m^3 \times 7.6wt\% = 155.8kg/m^3$$

となり、吸水に関与する細孔量は、約15.6vol%となる。

一方、実際のコンクリート構造物からサンプリングしたコンクリートコア（サンプル数38）の含水率は、実測の結果、7wt% (=16.1vol%，ただし、コンクリートの単位体積質量を  $2300kg/m^3$ と仮定したとき)を示し、実験に用いたモルタル供試体の吸水率とほぼ近い値であった。したがって、実構造物の評価にあたって今回得られた結果を参考とすることができるものと考えられる。

なお、実構造物における含水率の測定にあたっては、中性化によって細孔構造が変化するといわれている点に配慮し、サンプリングは中性化していない部分を選んでいる。

#### 4. 電気化学的手法による実構造物コンクリートの改質実験

デサリネーション、再アルカリ化によって実構造物のコンクリートがどのように改質されるかについて述べるとともに、処理後5年間の追跡調査の結果について述べる。また、隣接する構造物で再アルカリ化のみの処理を実施した。その結果並びに処理後

表-7 コンクリートの推定示方配合

設計基準強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W / C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
					水	セメント	粗骨材
240	25	12 ±2	4.5 ±1	53	157	297	699

混和剤：AE減水剤

表 8 腐食度段階表

腐食度	目視による観察状況
0	施工時の状況を保ち、以降の腐食が認められない
I	部分的に腐食が認められる軽微な腐食
II	表面の大部分が腐食している部分的に断面が欠損している
III	鉄筋の全周にわたり、断面の欠損がある
IV	鉄筋の断面が当初の1/6～1/3位欠損している

1年間の追跡調査の結果についても述べる。

(1) 試験施工の対象構造物

試験施工を行った構造物は、図-3に示す1線1柱式ビームスラブ型ラーメン高架橋である。

コンクリート中の塩分規制が明確ではない時期に建設され、海砂の利用により含有塩化物量が多く、また、中性化も進んでいる。

建設時のコンクリートの示方配合を表-7に示す。なお、混和剤の添加量については不明である。

試験施工は、同高架橋の柱、梁、片持ちスラブ部分を対象として実施した。試験施工に先だって、構造物調査を実施した。調査項目並びに調査方法、調査結果は以下の通りである。

a) 外観目視調査

構造物全体について目視により外観調査を行ったが、顕著なひび割れは認められなかった。また、柱、梁の両方から採取したコアを長手方向に縦に半割りし、破断面を目視により調査したが、柱、梁ともひび割れ、ゲル状物質の浸出は観察されなかった。粗骨材の割れ、反応環も観察されなかった。

b) 鉄筋腐食度、かぶりおよび中性化深さの測定

かぶりコンクリートをはつり、表-8に示す腐食度段階表<sup>13)</sup>により鉄筋の腐食状況を判定するとともに、かぶり、中性化深さの測定を行った。

表-9 鉄筋腐食度、かぶり及び中性化深さ調査結果一覧表

部位	鉄筋種別	鉄筋径	腐食度	かぶり	中性化深さ
柱 (西面)	主鉄筋	D32	0	62	33.6
	帯鉄筋	φ9	II	52	
梁 (中央付近)	主鉄筋	D32	0	44	22.1
	スタ-ラップ	φ13	II	19	

表-10 コアの中性化試験

部位	中性化深さ (mm)					平均中性化深さ (mm)
	①	②	③	④	⑤	
柱 (東側/西面)	29	23	28	26	28	26.8
梁 (中央付近)	22	19	20	23	25	21.8

表-11 コンクリート中の塩分量 (kg/m<sup>3</sup>)

部位	表面からの採取深さ (mm)					
	0 ~ 15	15 ~ 30	30 ~ 45	45 ~ 60	60 ~ 75	75 ~ 90
柱	1.00	2.51	3.30	2.85	1.90	2.06
梁	1.06	2.51	4.53	4.00	3.01	2.54

なお、中性化深さの測定方法は、以下の通りである。

はつり後、コンクリート表面に付着しているコンクリートの粉末をブロー等により除去し、フェノール1%溶液をスプレーによりはつり面に吹き付け、コンクリート表面から赤色部分までの距離をノギスを用いて測定する。測定点は、はつり箇所の全周についてはほぼ等間隔に20点とし、その平均値をもって中性化深さとした。結果を表-9に示す。

また、採取したコアの中性化試験の結果を表-10に示す。

c) 塩分量分析試験

採取したコアに含まれる全塩分量の分析結果を表-11に示す。なお、分析結果はコンクリート1m<sup>3</sup>あたりの質量を2300kgと仮定して求めている。塩分量の分析はJCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準じて行った。



## (2) 試験施工の内容

試験施工は、まず、デサリネーションと再アルカリ化の施工（＝以下「デサリネーション＋再アルカリ化」という）を行い、その4年後隣接する高架橋を対象として再アルカリ化処理のみの施工（＝以下「再アルカリ化のみ」という）をおこなった。

「デサリネーション＋再アルカリ化」では、最初にデサリネーションとして60日間通電した後、15日間再アルカリ化の施工を行った。「デサリネーション＋再アルカリ化」における陽極は、コンクリートの表面にセルロース質のファイバーを所定の電解質溶液（＝飽和水酸化カルシウム水溶液）とともに吹き付け、その上にチタンメッシュを張り付け、その上にもう1層ファイバーと電解質溶液を吹き付けたものである。陽極を湿润状態に保ちつつ、構造物の内部鉄筋を陰極として、デサリネーションとして60日間にわたって直流電流を流した。電流密度はコンクリート表面積1m<sup>2</sup>当たり1Aである。

再アルカリ化は、電気浸透とよばれる方法で、コンクリートの表面からリチウム系アルカリ金属塩（＝炭酸リチウム）を鉄筋の近傍に送り込み、中性化したコンクリートの再アルカリ化をはかるものである。具体的には、デサリネーションに使用した陽極を炭酸ソーダ＋炭酸リチウム混合溶液(Li/Naモル比=0.1)を含んだ溶液で湿润状態に保つことにより再アルカリ化を行った。デサリネーションとしての通電後、15日間再アルカリ化としての通電を行った。

「再アルカリ化のみ」の場合も同様、15日間通電を行った。ただし、この時の陽極には鉄網を用いた。

## (3) 効果の確認

追跡調査は、「デサリネーション＋再アルカリ化」の箇所については、処理後3ヶ月、6ヶ月、9ヶ月、12ヶ月、18ヶ月、24ヶ月、36ヶ月、60ヶ月の計8回にわたって行った。

「再アルカリ化のみ」の箇所については、処理後3ヶ月、6ヶ月、12ヶ月の3回にわたって追跡調査を行った。いずれも通電処理前の状態と処理完了2日後（＝以下「処理直後」という）の状態を加えて比較を行う。

### a) コンクリートの塩分分析

処理前あるいは通電後定期的に採取したコンクリートコアを用いてコンクリート中の含有塩分量の測定を行い、デサリネーション効果の確認を行った。

「デサリネーション＋再アルカリ化」した柱部分についての塩分量の経時変化について、全塩分量を図-4に、可溶性塩分量を図-5に示す。

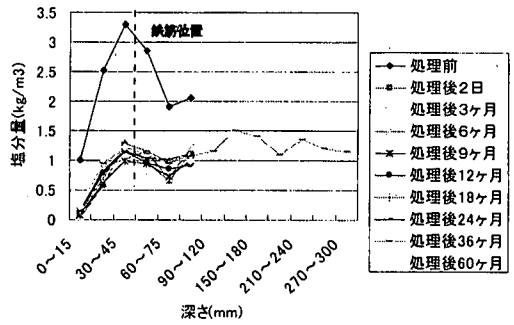


図-4 全塩分量(デサリネーション＋再アルカリ化)④柱

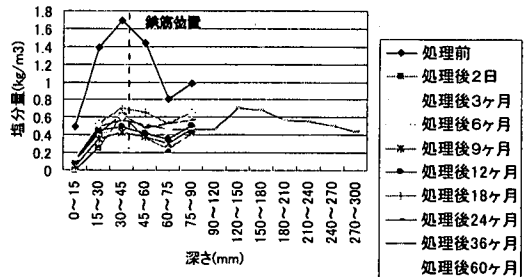


図-5 可溶性塩分量(デサリネーション＋再アルカリ化)④柱

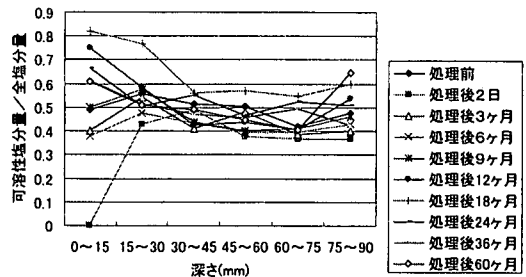


図-6 可溶性塩分の比率(デサリネーション＋再アルカリ化)

36ヶ月の時点で柱の中心までコアリングし、全塩分量、可溶性塩分量の測定を行った。塩分量の分析はJCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」のうち「塩化物イオン選択性電極を用いた電位差滴定法」に準じて行った。全塩分、可溶性塩分とも処理後は処理前に比較して顕著な低減効果が見られ、処理後60ヶ月でも含有塩分量にはほとんど変化は認められない。

図中破線で鉄筋の位置を示したが、コンクリート中の鉄筋近傍への塩化物イオンの再拡散はほとんど認められず、鉄筋の背面における顕著なシャドースポットも認められないようである。

全塩分量に対する可溶性塩分量の比率を図-6に示す。処理直後表面から15mmまででは可溶性塩分量の

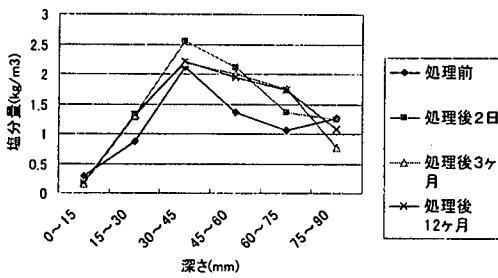


図-7 全塩分量（再アルカリ化のみ）

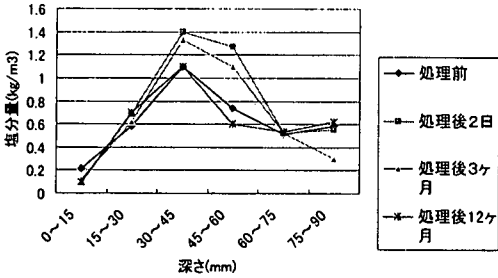


図-8 可溶性塩分量（再アルカリ化のみ）

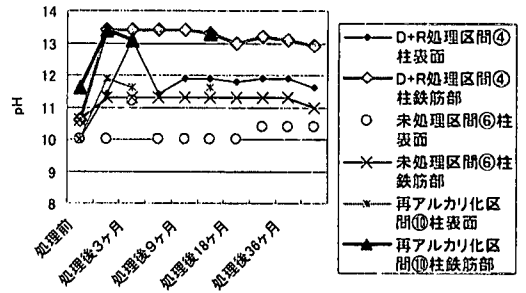
比率が0となっているが、全塩分量、可溶性塩分量ともほとんど0であったことに起因している。表面から30mm付近までの、可溶性塩分の比率が大きい部分は概ね中性化した部分と重なっており、中性化した部分では塩分は可溶性の形で存在するようである。

中性化していない30mmより深い部分では、60ヶ月経過後も50%程度で推移しており、大きな変動は認められない。デサリネーション処理によって可溶性塩分は減少するが、固定塩分が可溶化し、全塩分中に占める可溶性塩分の比率は、それほど変動しないものと考えられる。

「再アルカリ化のみ」を行った箇所における塩分量の経時変化について、全塩分量を図-7に、可溶性塩分量を図-8に示す。処理前と比較して全塩分量、可溶性塩分量とも再アルカリ化処理によってほとんど変化していない。

#### b) pH変化の測定、アルカリ保持の確認

コンクリートコアを割裂し、コンクリート表面側とコンクリート中の鉄筋部分にアリザリンイエロー（pH試験紙、pH10.0～12.0）および、アルカリブルー（pH試験紙、pH11.0～13.6）を浸し、再アルカリ化後のコンクリートのアルカリ性の保持の判定を行った。ただし、pH試験紙を用いたこの方法は、 $\pm 0.2 \sim 0.4$  というように幅を持つ値としてしか判定できない。また、同一コアの割裂面でも例えばpH=12.8～13.6というようにばらつきを示した。したがって、



注) D+R: デサリネーション+再アルカリ化  
図-9 コアの平均pH値

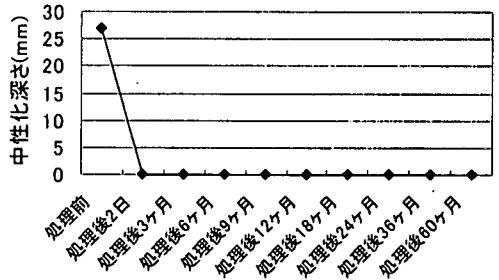


図-10 中性化深さの測定結果

結果は、最大値と最小値を加算して1/2を乗じた平均pH値として表すことにした。処理前と処理完了2日後及び処理後6ヶ月、12ヶ月、24ヶ月、36ヶ月、60ヶ月におけるコアの平均 pH値を図-9に示す。

「デサリネーション+再アルカリ化」の箇所では、処理直後から処理後60ヶ月の間、処理部のコンクリート表面でpH11.2～12.0、同じく処理部の鉄筋近傍はpH12.8～13.6を示しており、安定したアルカリ領域となっていることがわかる。

「再アルカリ化のみ」の箇所についても、処理後12ヶ月の時点で、処理部の鉄筋近傍はpH13.0～13.6を示している。

コンクリートコアにフェルフルイン1%溶液を散布し、中性化深さを測定した。測定結果を図-10に示す。処理直後より中性化深さは0mmとなり、処理後60ヶ月でも中性化深さは0mmであった。

#### c) 自然電位の測定

自然電位の測定は、以下の箇所について実施した。照合電極としては硫酸銅電極を用いた。

「デサリネーション+再アルカリ化」区間として、

- ①片持ちスラブ下面（北側）
- ②片持ちスラブ下面（南側）

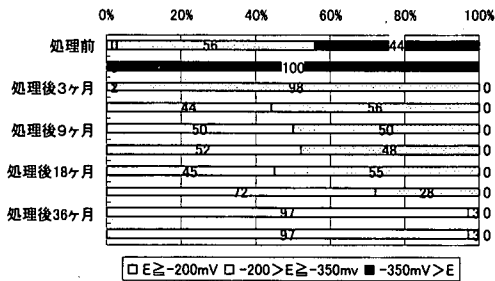


図-11 自然電位(梁下面③)測定結果/  
(デサリネーション+再アルカリ化)

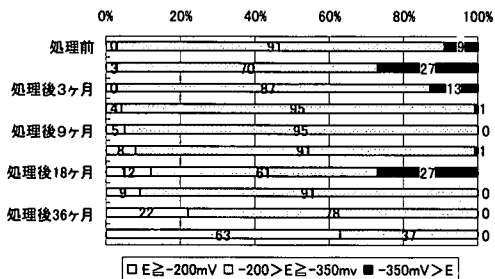


図-12 自然電位(梁下面⑤)測定結果/非処理部

③梁の下面

④柱の側面

同一高架橋の処理を行わなかった部分(=以下「非処理部」という)として、

⑤梁の下面

⑥柱の側面

隣接高架橋(=以下「施工径間外」)の測定箇所として、

⑦片持ちスラブ下面(南側)

⑧梁の下面

⑨柱の側面

自然電位の測定結果の例を、梁部分の③を図-11に、⑤を図-12に、⑧を図-13に示す。

「デサリネーション+再アルカリ化」区間における処理後18ヶ月の電位分布は、処理後12ヶ月と比較して大きな差は認められないが、処理後24ヶ月、処理後36ヶ月、処理後60ヶ月の電位分布は、処理後12ヶ月に比べて貴な方向にシフトしている。

一方、非処理部および施工径間外においては、一部貴な方向へ移行しているが、全体的には大きな電位の変化は認められない。

「再アルカリ化のみ」の部分における電位の変化を図-14に示す。比較的貴側にある部分に対して再アルカリ化を行ったことになる。処理後一旦卑側となったものが貴な方向にシフトしていることがわかる。

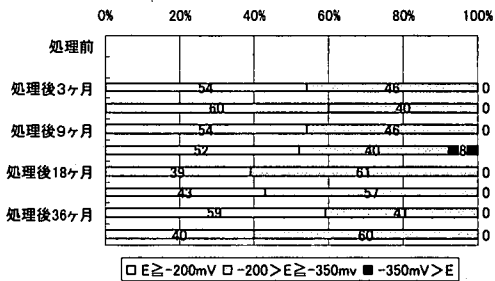


図-13 自然電位(梁下面⑧)測定結果/施工径間外

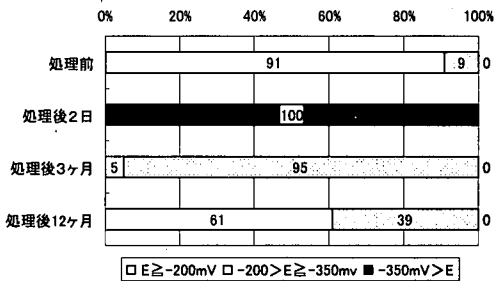


図-14 自然電位(柱部材⑩)測定結果/  
再アルカリ化のみ

表-12 自然電位と腐食確率

腐食性ランク	自然電位(mV) vs CSE	腐食の確率
I	$E > -200$	90%以上の確率で腐食なし
II	$-200 \geq E > -350$	不確定
III	$-350 \geq E > -500$	90%以上の確率で腐食あり
IV	$-500 \geq E$	約半数の供試体にクラック発生

A S T M による自然電位と腐食確率評価を表-12に示す。

「デサリネーション+再アルカリ化」を行った梁の下面において、処理前と処理後60ヶ月の自然電位の測定結果をA S T M C 876-87に準じて比較すると、処理前には腐食性ランク I ( $E > -200\text{mV}$ )で「90%以上の確率で腐食なし」とするものが0%であったのに対して、処理後60ヶ月のそれは97%を示した。処理前、腐食性ランク II ( $-200\text{mV} \geq E > -350\text{mV}$ )「不確定」とするものが56%であったのに対して、処理後60ヶ月のそれは3%に減少した。

処理前、腐食性ランク III及びIV ( $-350\text{mV} \geq E$ )「90%以上の確率で腐食あり」とするものが44%であったのに対して、処理後60ヶ月のそれは0%となった。

処理後60ヶ月を経過して全体に貴側にシフトして

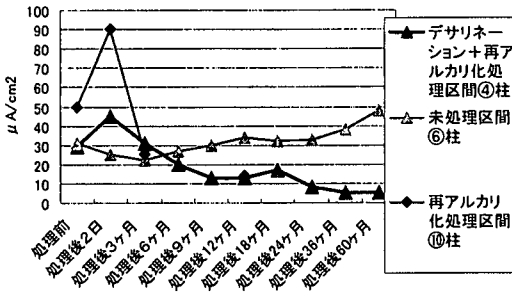


図-15 アノード分極試験の結果(Imax)

いることがわかる。

他の処理部〔スラブ下面(北側)、スラブ下面(南側)、柱の側面〕でも同様の結果が得られており、コンクリート中の鉄筋に不動態皮膜が形成される安定な自然電位領域に移行していると考えてよいと思われる。

これに対して、施工径間外の梁の下面、柱の側面に関しては、自然電位測定結果には殆ど変化は認められなかった。

d) 鉄筋のアノード分極曲線の測定 (室内)

帯鉄筋を含んだコンクリートコアを用いて鉄筋のアノード分極曲線を測定し、自然電位から+200mV~+600mV間の最高電流密度Imaxを求め、コンクリート中の鉄筋に不動態皮膜が形成されるかどうかの判定を試みた。

「デサリネーション+再アルカリ化」区間の柱部分〔④柱〕と比較用未処理区間の柱部分〔⑥柱〕から採取したコアサンプルを用いて、鉄筋の分極曲線を測定した。コアは帯鉄筋の一部が含まれる形で採取した。

「デサリネーション+再アルカリ化」区間の処理後60ヶ月までのImax並びに「再アルカリ化のみ」の部分における処理後12ヶ月までのImaxをプロットしたものを図-15 に示す。

「デサリネーション+再アルカリ化」区間の処理後18ヶ月は、17μA/cm<sup>2</sup>と若干増加したものの、処理後60ヶ月では5μA/cm<sup>2</sup>となり、不動態の再生が生じていると考えられる。

アノード分極曲線の評価基準を表-13 に示す。

「デサリネーション+再アルカリ化」を行った箇所におけるImaxは、処理前29μA/cm<sup>2</sup>とグレード1「不完全ではあるが、若干は不動態がある」の領域にあったのに対して、処理後60ヶ月では5μA/cm<sup>2</sup>とグレード2または3の領域へと移行しており、不動態皮膜形成の方向へシフトしている。

「再アルカリ化のみ」の区間では、処理直後に電

表-13 アノード分極曲線の評価基準<sup>13)</sup>

グレード	評価基準
0	電流密度が1度でも100μA/cm <sup>2</sup> を超えるもの(全く不動態がないもの)
1	電流密度が10~100μA/cm <sup>2</sup> にあるもの(不完全ではあるが、若干は不動態があるもの)
2	電流密度が1度でも10μA/cm <sup>2</sup> を超え、且つグレード0, 1又は3に含まれないもの
3	電流密度が1~10μA/cm <sup>2</sup> にあるもの
4	電流密度が1度でも1μA/cm <sup>2</sup> を超え、且つグレード0, 1, 2又は3に含まれないもの
5	電流密度が1μA/cm <sup>2</sup> を超えないもの(非常に良好な不動態があるもの)

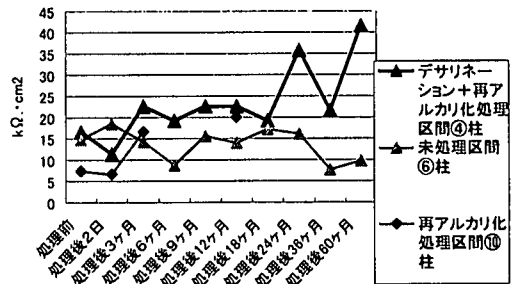


図-16 分極抵抗

流密度90μA/cm<sup>2</sup>となったが、処理後12ヶ月では14μA/cm<sup>2</sup>を示し、「デサリネーション+再アルカリ化」を行った箇所とほぼ同様な値となった。

未処理区間のアノード分極曲線での最高電流密度は、処理前の時点で31μA/cm<sup>2</sup>であったのに対して、処理後60ヶ月の時点でも38μA/cm<sup>2</sup>とほとんど変化は認められず、グレード1「不完全ではあるが、若干は不動態がある」の領域にとどまっている。

また、帯鉄筋を含んだコンクリートコアを用いて鉄筋のアノード分極曲線を測定し、自然電位+50mVにおけるアノード分極曲線の傾きから分極抵抗を求め、コンクリート中の鉄筋に不動態皮膜が形成されるかどうかの判定を試みた。処理前から処理後60ヶ月までの間の「自然電位+50mV」における分極曲線の傾きより求めた分極抵抗の値を図-16 に示す。

分極抵抗による腐食評価基準を表-14 に示す。

「デサリネーション+再アルカリ化」を行った部分の分極抵抗は、処理前16.7kΩ·cm<sup>2</sup>であったものが、処理後24ヶ月では、35.7kΩ·cm<sup>2</sup>となったものの、60ヶ月ではやや低下している。ただランクIV「鉄筋腐食が現れない領域、または、微量の領域」

表-14 分極抵抗による腐食評価基準<sup>10)</sup>

ランク	分極抵抗	腐食評価
I	4kΩ・cm <sup>2</sup> 以下	ひび割れの発生があり鉄筋腐食が大の領域
II	4～8kΩ・cm <sup>2</sup>	鉄筋腐食が中の領域
III	8～12kΩ・cm <sup>2</sup>	鉄筋腐食が中の領域
IV	12kΩ・cm <sup>2</sup> 以上	鉄筋腐食が表れない領域または微量の領域

(12kΩ・cm<sup>2</sup>以上)であり、「デサリネーション+再アルカリ化」により、分極抵抗は大きくなり、不動態皮膜形成の方向へシフトしていると考えられる。

「再アルカリ化のみ」の間では、処理直後は、「デサリネーション+再アルカリ化」を行った部分と比較してやや小さめの値を示したが、処理後12ヶ月では20kΩ・cm<sup>2</sup>を示し、「デサリネーション+再アルカリ化」を行った箇所とほぼ同様な値となった。施工径間外での分極抵抗は、処理前14.7kΩ・cm<sup>2</sup>であったものが、処理後60ヶ月の時点では、7.7kΩ・cm<sup>2</sup>となり、ランクII「鉄筋腐食が中の領域」(4～8kΩ・cm<sup>2</sup>)となっている。

#### (4) まとめ

実構造物における「デサリネーション+再アルカリ化」並びに「再アルカリ化のみ」の試験施工から概ね次のことがいえよう。

##### a) 「デサリネーション+再アルカリ化」の施工

①鉄筋の腐食性について自然電位、アノード分極曲線および分極抵抗から評価を行った結果、処理後60ヶ月での結果から推定して、鉄筋に不動態皮膜が形成されていく方向にあることがわかる。

②処理後のコンクリートのアルカリ性をpH試験紙およびフェノールフタレイン1%溶液散布による赤色変化を測定したが、処理後60ヶ月でも安定したアルカリ性を維持している。

③処理後のコンクリート中の塩分分布の測定結果からは、処理後60ヶ月でもコンクリート中の鉄筋近傍への塩化物イオンの再拡散は認められない。

④全塩分中に占める可溶性塩分の比率は、表面にごく近い部分をのぞいて60ヶ月経過後も50%程度で推移しており、大きな変動は認められない。

⑤鉄筋の背面に顕著なシャドースポットは確認できなかった。

##### b) 「再アルカリ化のみ」の施工

①処理後12ヶ月のアノード分極曲線、分極抵抗は「デサリネーション+再アルカリ化」の施工を行った場合とほぼ同等である。

②処理後12ヶ月の処理部の鉄筋近傍はpH13.0～13.6を示している。

表-15 「デサリネーション+再アルカリ化」の施工によるpH値と[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]の変化

	深さ(mm)	pH	全塩分(kg/m <sup>3</sup> )	可溶性塩分(kg/m <sup>3</sup> )	[Cl <sup>-</sup> ]/[OH <sup>-</sup> ]
処理前	45～60	10.4 10.8	2.85 (0.96)	1.44 (0.48)	790.8～ 1988.0
	60～75	10.4 10.8	1.90 (0.64)	0.80 (0.27)	526.1～ 1322.7
処理後60ヶ月	45～60	12.6 13.2	1.25 (0.42)	0.56 (0.19)	1.38～ 5.49
	60～75	12.6 13.2	1.16 (0.39)	0.47 (0.16)	1.28～ 5.10

注) pHは、処理対象④部における鉄筋部分での値

[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]の算出は全塩分を対象とし、コンクリートの細孔量を全体積の16.1vol%とした。

( )の数字は、単位セメント量に対する塩化物イオン量の割合(%)である。

## 5. 室内試験結果と実構造物での測定結果の比較

室内試験の結果と実構造物での測定結果を比較することにより、デサリネーション、再アルカリ化の評価を行う。

表-15に「デサリネーション+再アルカリ化」の施工によってpH値と[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]がどのように変化したかをとりまとめた。測定手法上の問題からpH値は特定できないが、「デサリネーション+再アルカリ化」を実施することによって、処理後60ヶ月の時点で構造物の鉄筋周辺におけるpH値は12.6～13.2に改質され、可溶性塩分量も0.47～0.56kg/m<sup>3</sup>に減少した。コンクリート中の細孔量を全体積の16.1vol%と考えると、[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]は1.28～5.49の間にあることになる。

室内実験に用いたモルタルと実構造物から採取したコンクリートコアの含水率がほぼ等しいことから、並行して行った室内実験で得られた結論、すなわち、pH=12以上であって[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]が1.0以下であれば、鋼材は腐食しないという条件をそのまま適用すると、pH値に関しては満足するが、[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]に関しては、満足しないことになる。

表-16には「再アルカリ化のみ」の施工によってpH値と[Cl<sup>-</sup>]/[OH<sup>-</sup>]がどのように変化したかをとりまとめた。「再アルカリ化のみ」の施工によって、処理後12ヶ月の時点で構造物の鉄筋周辺におけるpH

表-16 「再アルカリ化のみ」の施工による pH値と  $[Cl^-] / [OH^-]$  の変化

	深さ (mm)	pH	全塩分 (kg / m <sup>3</sup> )	可溶性 塩分 (kg / m <sup>3</sup> )	$[Cl^-] / [OH^-]$
処理後	45~	13.0	1.95	0.60	0.86~
	60	13.6	(0.66)	(0.20)	3.41
12ヶ月	60~	13.0	1.74	0.53	0.76~
	75	13.6	(0.59)	(0.18)	3.04

(注) pHは、処理対象⑩部における鉄筋部分での値  
 $[Cl^-] / [OH^-]$  の算出は全塩分を対象とし、コンクリートの細孔量を全体積の16.1vol%とした。  
 ( ) の数字は、単位セメント量に対する塩化物イオン量の割合(%)である。

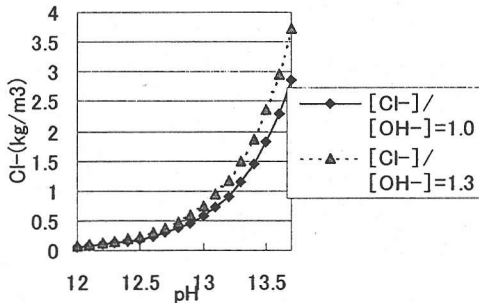


図-17 腐食閾値

値は13.0~13.6に改質され、 $[Cl^-] / [OH^-]$  は0.76~3.41の間にある。

この場合、鋼材腐食に関して、pH値に関しては満足し、 $[Cl^-] / [OH^-]$  に関しても1.0以下となる可能性がある。塩化物イオン量の減少とpHの向上(強アルカリへのシフト)の双方が  $[Cl^-] / [OH^-]$  の低下に寄与するが、pH値が対数であることからpHの向上による寄与が圧倒的に大きい。

実構造物における「デサリネーション+再アルカリ化」並びに「再アルカリ化のみ」の試験施工から得られたpH=12.6~13.6の範囲で  $[Cl^-] / [OH^-] = 1.0, 1.3$ としたときのpH値と全塩分量の関係を図-17に示す。

鉄筋腐食の閾値を室内試験の結果から得られた値、 $[Cl^-] / [OH^-] \leq 1.0$ とすると、図中の実線より下の部分が「腐食しない」と考えてよい範囲となる。

また、実構造物が「デサリネーション+再アルカリ化」の施工によって不動態皮膜形成の方向へシフトしていると考え、表-14より  $[Cl^-] / [OH^-] \leq 1.3$ まで許すと、図中の点線より下の部分が「腐食しない」と考えてよい範囲となる。

2に述べた既往の研究結果のうち、セメントモル

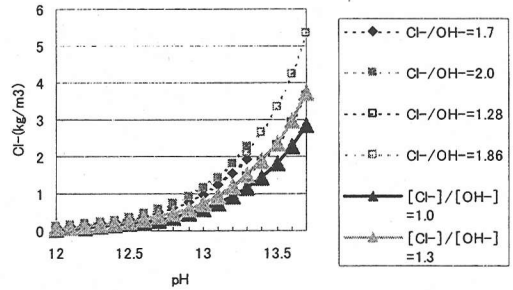


図-18 Syed, Ehtesham & Hussain らの腐食閾値と本研究における腐食閾値

タル中の鋼材腐食に関する閾値として、Syed, Ehtesham & Hussain ら<sup>10)</sup>は、pH13.30以下の水酸イオン濃度で  $[Cl^-] / [OH^-]$  の閾値は1.7~2.0の範囲、pH13.30以上の水酸イオン濃度で  $[Cl^-] / [OH^-]$  の閾値は1.28~1.86の範囲であるとしている。図-18には、この値をもとに、コンクリートの細孔量を全体積の16.1vol%として、全塩分量との関係を示し、更に、図-17を重ねたものを示した。

$[Cl^-] / [OH^-] \leq 1.3$ としても概ね安全側の数値を与えることがわかる。

## 6. 結論

以上の結果から次のことが言えよう。

①モルタルにおける実験結果から判断して、pH =12以上であって  $[Cl^-] / [OH^-]$  が1.0以下であれば、鋼材は腐食しないものと考えられる。本実験結果から判断する限り、鋼材腐食の有無は、pH値の影響を大きく受けている。また、実構造物における実験結果からは、 $[Cl^-] / [OH^-]$  が1.3以下であれば、鋼材は腐食しないものと考えられ、この結果は既往の研究結果と整合する。

②「デサリネーション+再アルカリ化」を実施することによって、処理後60ヶ月の時点で構造物の鉄筋周辺におけるpH値は12.6~13.2に改質され、可溶性塩分量も0.47~0.56kg/m<sup>3</sup>に減少した。処理後60ヶ月でもコンクリートのアルカリ性、含有塩分量にはほとんど変化は認められず、コンクリート中の鉄筋近傍への塩化物イオンの再拡散もほとんど認められない。また、鉄筋の背面における顕著なシャドースポットは認められない。

③全塩分中に占める可溶性塩分の比率は、表面にごく近い部分をのぞいて60ヶ月経過後も50%程度で推移しており、大きな変動は認められない。

④「再アルカリ化のみ」の施工を行った箇所は、処理後12ヶ月の時点で構造物の鉄筋周辺におけるpH値

は13.0~13.6に改質され,  $[Cl^-]/[OH^-]$ は0.76~3.41の間にあり, 「再アルカリ化のみ」の施工によって  $[Cl^-]/[OH^-]$ の閾値を満足する可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 石橋忠良, 北後征雄: 鉄筋コンクリート床版下面に施工した各種補修工法の効果, コンクリート工学年次講演会論文報告集, 第9巻, 第1号, pp.429-434, 1987年.
- 2) 石橋忠良, 北後征雄, 齊藤俊樹: 経年RC構造物より見た耐久性設計について, コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集, pp.1-6, 1988年4月.
- 3) 小林明夫, 佐藤勉, 長田晴道, 児玉育雄: 塩分を含んだコンクリート構造物の調査及び海砂中の塩分管理方法, 構造物設計資料, No.80, pp.3-9, 1984.12.
- 4) Hausmann, D.A.: "Steel Corrosion in Concrete: How Does It Occur?" Materials Protection, Vol.6, No.11, pp.19-23, 1967.
- 5) Gouda, V.K.: "Corrosion and Corrosion Inhibition of Reinforcing Steel:1-Immersion in Alkaline Solution," British Corrosion Journal, Vol.5, pp.198-203, Sept.1970.
- 6) Hausmann, D.A.: A Probability Model of Steel Corrosion in Concrete, Materials Selection & Design, pp.64-68, October, 1998.
- 7) Page, C.L. and Vennessland, O.: "Pore Solution Composition and Chloride-Binding Capacity of Silica Fume Cement Pastes", Materiaux et Constructions, Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions, Vol.16, No.91, pp.19-25, 1983.
- 8) Page, C.L. and Havdahl, J.: "Electrochemical Monitoring of Corrosion of Steel in Microsilica Cement Pastes", Materiaux et Constructions, Reunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions, Vol.18, No.103, pp.41-47, 1985.
- 9) 米澤敏男, V. Ashworth, R.P.M. Procter: コンクリートの鋼材腐食における塩素イオンの限界量について, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986.
- 10) Syed Ehtesham Hussain, Ahmad S. Al-Gahtani, and Rasheeduzzafar: "Chloride Threshold for Corrosion of Reinforcement in Concrete" ACI Materials Journal/November-December 1996.
- 11) Glass, G.K, and Buenfeld, N.R.: "The Presentation of the Chloride Threshold Level for Corrosion of Reinforcement in Concrete" Corrosion Science, Vol.39, No.5, pp.1001-1013, 1997.
- 12) (社) 日本コンクリート工学協会: 海洋コンクリート構造物の防食指針 (案), pp.136, 1983.
- 13) 大即信明, 池上明夫, 福手勤, 高木兼士: 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, 第1巻, 2号, pp.1-13, 1990年7月.
- 14) 大城武, 齊藤仁, 近藤忠生: 塩害を受けたRC構造物の腐食評価法について, コンクリート工学年次講演会論文報告集, 第14巻, 第1号, pp.649-654, 1992年.

(1999.4.20 受付)

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON IMPROVEMEN OF CONCRETE AND REPAIR EFFECT USING ELECTROCHEMICAL METHODS

Yukio KITAGO, Masanobu ASHIDA, Norihiro KIKUTA and Toyoaki MIYAGAWA

An experimental study was carried out to find out the threshold value of chloride ion and hydroxy ion ratio ( $= [Cl^-] / [OH^-]$ : mol ratio) for the onset of reinforcing steel corrosion in concrete. After the application of electrochemical method (desalination and realkalization), a five-year follow-up survey on the specimens was carried out in order to check the performance of the rehabilitation method.

The experimental results showed that when the pH value was 12 or more and  $Cl^-/OH^-$  ratio was 1 or less, the reinforcing steels were not corroded. The rehabilitation using the desalination and realkalization method increased the pH value to 12.6 ~ 13.2 and decreased water soluble chloride content to 0.47 ~ 0.56  $kg/m^3$  around the reinforced bars in concrete of existing structures. During the 5-year-follow-up survey, re-diffusion of chloride ion into the concrete around the reinforced bars had been hardly recognized, and also the presence of clear shadow spot surrounding the reinforcing steel had not been recognized.