

論文

[1098] コンクリート中の鉄筋発錆に対する塗布型腐食抑制剤の効果

正会員 小林明夫 (鉄道総合技術研究所)

正会員 牛島 栄 (鉄道総合技術研究所)

家室育夫 (小野田 開発研究所)

正会員○越川松宏 (小野田 開発研究所)

1. はじめに

筆者らは、コンクリート内部に残存する塩化物によって鉄筋が腐食する場合の抑制方法として、コンクリート表面に腐食抑制剤（亜硝酸塩）を塗布しコンクリート内部の鉄筋の周辺部まで浸透させて、鉄筋の腐食を抑制する方法を試みている。〔1〕〔2〕

この方法により鉄筋の腐食を抑制する場合の問題点としては、コンクリート中の塩分量と腐食抑制剤の塗布量との関係である $\text{NO}_2^- / \text{Cl}^-$ モル比が考えられる。新設時にコンクリート中の鉄筋の防食を目的として予防保全的に腐食抑制剤を塗布する場合の $\text{NO}_2^- / \text{Cl}^-$ モル比は、予め腐食抑制剤を混和剤としてコンクリート中に内添した試験で確認した結果、0.82 程度であるという知見を得ている〔3〕。しかし、鉄筋が既に塩分によって腐食している場合には、腐食抑制剤を塗布することにより鉄筋腐食の抑制効果は認められるが、明確な腐食抑制剤の必要量については十分な結果（ $\text{NO}_2^- / \text{Cl}^-$ モル比の値）を得ていない〔2〕。

本報告では既に腐食が生じている鉄筋の補修方法として、腐食抑制剤を塗布し鉄筋腐食の進行を抑制するために必要な塗布量を明らかにする事が重要であり、この塗布量を求めるためにコンクリート中の塩分量と腐食抑制剤の塗布量を変化させてその抑制効果を検討した。また腐食抑制剤を塗布した場合に、ひびわれ部はひびわれがない場所と比較して、より内部へ腐食抑制剤が浸透する事が確認できた〔3〕。そこで、ひびわれ幅を変化させた場合の腐食抑制剤の浸透性、鉄筋の腐食抑制効果及び $\text{NO}_2^- / \text{Cl}^-$ モル比についても検討した。

2. コンクリート中の有錆鉄筋に対する腐食抑制剤の効果

2. 1 試験概要

予め部分的に腐食させた有錆鉄筋に対しては、腐食抑制剤の塗布による抑制効果は無錆部分において認められたが〔2〕、有錆部分の腐食の進行を抑制する効果について十分な知見が得られなかった。したがって、本試験では予め全面を腐食させた鉄筋をコンクリート中に埋め込み、腐食抑制剤を塗布した場合の腐食抑制効果について必要塗布量を検討した。

2. 2 試験方法

2. 2. 1 供試体の作製

(1) 有錆鉄筋の調整方法

コンクリート中の鉄筋が塩化物によりすでに腐食を生じている場合を想定して、鉄筋を腐食させるために、表-1 に示す配合のモルタルに鉄筋を埋め込みオートクレーブ (180℃, 10 kgf/cm²) と水中浸せきによる促進養生を4サイクル行った。更に塩水の乾湿

表-1 モルタルの配合 (単位: kg)

C	S	W	Cl^-
100	300	84	0.2

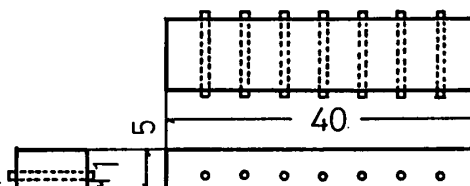


図-1 供試体の形状・寸法 (単位: cm)

食量は $32\text{mg}/\text{cm}^2$)。錆の調整に使用したモルタル供試体の形状・寸法を図-1に示す。

鉄筋はJIS A 6205に規定するみがき棒鋼 ($\phi 10 \times 100\text{ mm}$) を使用した。

(2) 供試体の配合及び作製方法

試験に使用したセメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は小笠産の川砂、粗骨材は G_{max} 20mmの岩瀬産の砕石を用いた。コンクリートの配合を表-2に示す。予めコンクリート中の Cl^- イオンが $0, 600, 1200$ 及び $1800\text{g}/\text{m}^3$ になるように NaCl 試薬を混入した。供試体は(1)で調整した有錆鉄筋を図-2に示すように、かぶり厚が 1cm となるように作製した。

成形後、2日で脱型し4日間 40°C 乾燥及び1日空冷(室内)した。

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m^3)			
		W	C	S	G
70	50	173	247	932	938

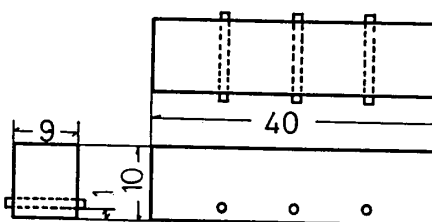


図-2 供試体の形状・寸法 (単位: cm)

(3) 腐食抑制剤の塗布方法

かぶりの小さい面から腐食抑制剤を $0, 500, 1000, 1500, 2000\text{ g}/\text{m}^2$ 下向きに塗布した。塗布後、直ちに供試体を1ヶ月間(室内)放置した。

2. 2. 2 腐食促進養生方法

腐食促進方法はオートクレーブ養生 (180°C , $10\text{ kgf}/\text{cm}^2$)と水中浸せきを4サイクル行った。

2. 3 試験項目

(1) 腐食抑制剤の浸透性

腐食促進後、腐食抑制剤の塗布面から深さ方向に 10mm 間隔で切断し、それぞれに含有する NO_2^- イオンを定量分析した。

(2) 有錆鉄筋に対する腐食抑制剤の抑制効果

腐食促進後、供試体から鉄筋を取り出し、腐食減量及び浸食深さ(目視して最も深いと思われる孔食の深さ50点の平均値)を測定した。測定にあたっては有錆鉄筋の調整時に既に腐食させた腐食減量及び浸食深さは除いた。

2. 4 試験結果及び考察

(1) 腐食抑制剤の浸透性

コンクリート中の NO_2^- イオンの濃度分布は、混入 Cl^- イオン量に左右されず、ほぼ同じ傾向を示した。図-3に Cl^- イオン $1200\text{ g}/\text{m}^3$ の場合の例を示す。図より、 NO_2^- イオンの浸透性は腐食抑制剤の塗布量に大きく影響されコンクリート中の NO_2^- イオン濃度や浸透深さは、塗布量の増加に伴い増加する傾向にあることがわかる。

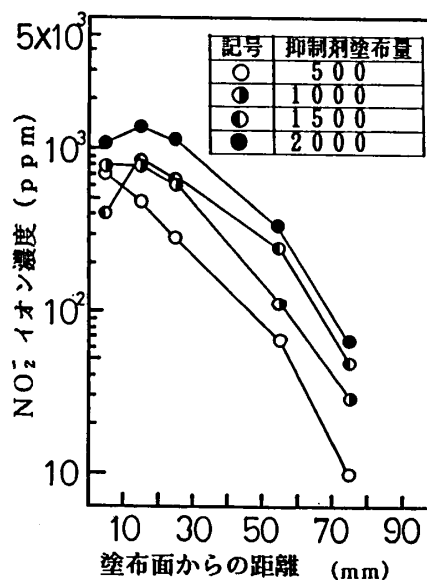


図-3 NO_2^- イオンの濃度分布

(2) 有錆鉄筋に対する腐食抑制剤の効果

腐食抑制剤の塗布量と鉄筋の腐食減量及び浸食深さの関係を図-4及び図-5に示す。

図より、腐食抑制剤の塗布量が増加するに伴い、腐食減量や浸食深さは減少する傾向にあることから腐食抑制剤の抑制効果が伺える。しかし、図-4に示すように腐食抑制剤を2000 g/m² と多量に塗布した場合においても、完全に腐食を抑制する事はできなかった。この原因としては、供試体の両端から5 mmずつ露出鉄筋の腐食減量が含まれているためと考えられる。そこで、図-4中のCl⁻イオン量が無い場合に注目すると、腐食抑制剤の塗布量に関係なく腐食減量は210mgとほぼ一定であるため、これが露出部の腐食減量であると思われる。

本試験で使用した有鍍鉄筋の腐食量(32mg/cm²)は、腐食減量から考慮すれば鉄筋腐食の膨張圧によりひびわれを生じさせる腐食限界量(5~20mg/cm²)〔4〕〔5〕を大幅に越えており、しかも既往の文献〔6〕によるとCl⁻イオンが1.5 kg/m³ 混入されたコンクリート中の鉄筋の腐食速度は0.6 MMD と推定され、これから換算すると本試験の促進養生条件は自然放置で15年程度経過したものに相当すると思われる。したがって、コンクリート中にCl⁻イオン量が600, 1200及び1800 g/m³ 存在するかぶり1cmの有鍍鉄筋に対しては、腐食抑制剤をそれぞれ500, 1500及び2000 g/m² 塗布すれば、その後の腐食進行を十分抑制できる事がわかった。

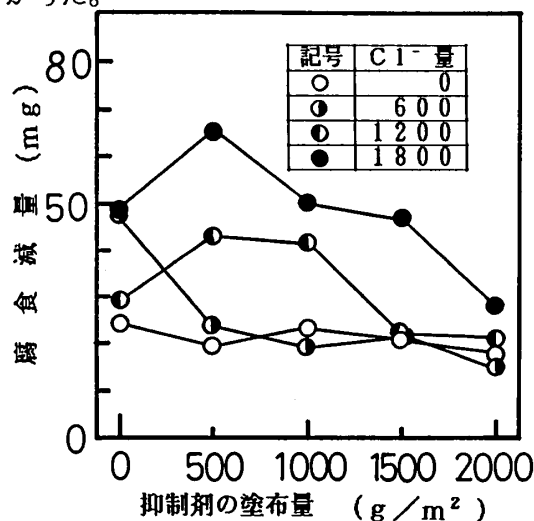


図-4 腐食減量と塗布量

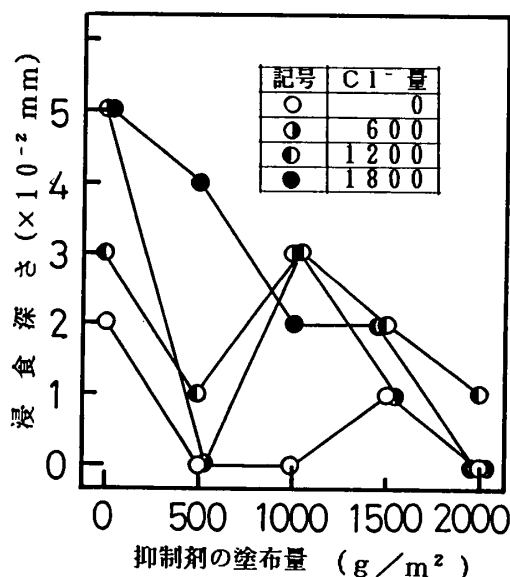


図-5 塗布量と浸食深さ

3. ひびわれ部における腐食抑制剤の浸透性と抑制効果

3. 1 試験概要

腐食抑制剤の塗布による腐食抑制効果について検討した現場試験施工の結果〔3〕によれば、ひびわれ部におけるNO₂⁻イオンの浸透性は、ひびわれが無い場合に比較してより内部へ浸透していた。したがって、本試験ではひびわれ幅と腐食抑制剤の浸透性及び鉄筋の腐食抑制効果の関係を検討するため、供試体を表-3に示す要因と水準で作製して、腐食抑制剤を塗布した後、塩水(人工海水)噴霧によって腐食促進を行った。

表-3 要因と水準

3. 2 試験方法

3. 2. 1 試験供試体の作製

(1) 有鍍鉄筋の調整方法

ひびわれを通じて、直に海水等の塩水が鉄筋に達し部分的に腐食した場合を想定し、図-6に示すように鉄筋にテープを予め張って露出部分のみの鉄筋が腐食

要 因	水 準
混入Cl ⁻ イオン	0 , 1,200 g/m ³
ひびわれの幅mm	0, 0.1~0.2 , 0.4~0.6 , 0.8~1.2
抑制剤の塗布量	0 , 500 , 1,000 g/m ²
ひびわれの補修	無 , 有

するように、30℃、R.H=90%一定で30日間塩水（人工海水）噴霧した。調整された有鍍鉄筋の腐食面積率は40%となった。

(2) 供試体の配合及び形状・寸法

試験に使用した材料は2.2.1 (2)と同様で、コンクリートの配合は表-2の通りである。供試体の形状・寸法を図-8に示す。鉄筋はJIS A 6205に規定するみがき棒鋼（ $\phi 10 \times 200$ mm）を使用した。供試体を成形後、1日で脱型し21日間水中（20℃）及び7日間乾燥（20℃、R.H=55%）養生した。

(3) ひびわれの導入方法

図-7に示すように、供試体の鉄筋かぶり位置に三角スペーサーを置き、表-3に示す所定ひびわれが得られるまでアムスラー型圧縮試験機で加圧しひびわれを導入した。

(4) 腐食抑制剤の塗布方法

ひびわれの導入後、腐食抑制剤を下向きに所定量塗布し恒温室（20℃、R.H=55%）で30日間放置した。

(5) ひびわれの補修方法

一部の供試体は腐食抑制剤を塗布後、ひびわれ部に無機系超微粒子注入材を注入した。

養生は室内で7日間とした。

3. 2. 2 腐食促進方法

ひびわれの導入面を上向きとし、その状態で室内にて塩水（人工海水）噴霧を1回/週の割合で1年間行った。その結果、 Cl^- イオンの噴霧量は $3.1 \text{ g/m}^2/\text{day}$ であった。

3. 3 試験項目

(1) ひびわれ部における中性化深さ

腐食促進後、ひびわれ部の断面にフェノールフタレインを散布し中性化深さを測定した。

(2) ひびわれ部における腐食抑制剤の浸透性

供試体中のひびわれ部位置を中心に6 cm幅で切出した試験片を、塗布面から深さ方向に10 mm間隔で切断し、それぞれについて含有する NO_2^- イオンを定量分析した。

(3) ひびわれ部における腐食抑制剤の効果

鉄筋は有鍍部と無鍍部が混在しているので（図-6）、無鍍部では腐食面積率を、有鍍部では浸食深さを測定して腐食抑制効果を評価した。

3. 4 試験結果及び考察

(1) ひびわれ部における中性化深さ

ひびわれがない場合の中性化深さは数mm程度であるのに対して、ひびわれがある場合には全て鉄筋位置まで中性化しており、その深さの程度はひびわれ幅に依存していた。

(2) ひびわれ部における腐食抑制剤の浸透性

ひびわれ幅が0.1～0.2及び0.4～0.6 mmにおけるコンクリート中の NO_2^- イオンの濃度分布を図-9に示す（図中のCはひびわれ幅の略）。図より、腐食抑制剤はひびわれ幅と塗布量の増加と共に内部まで浸透しており、特に0.4～0.6 mmの場合、抑制剤を 1 kg/m^2

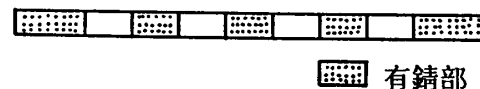


図-6 有鍍鉄筋の調整

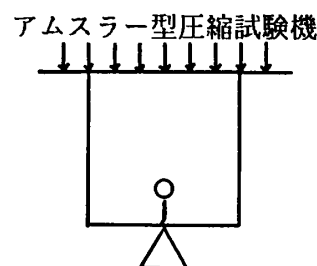


図-7 ひびわれの導入方法

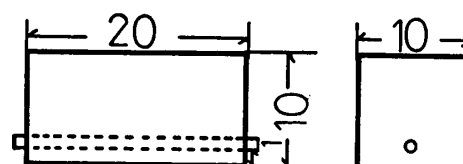


図-8 供試体の形状（単位：cm）

塗布すれば深さ70mmの位置で500ppm (NO_2^- イオン換算) 浸透していた。

また、ひびわれ部に注入材を充填した場合の有意差は認められず、これは抑制剤の塗布後に注入充填したので、塗布時において既に相当量の腐食抑制剤が浸透していたためと考えられる。

(3) ひびわれ部における腐食抑制剤の抑制効果

無錆部における腐食面積率及び腐食抑制率と抑制剤の塗布量の関係を図-10及び図-11に、モル比と腐食面積率の関係を図-12に、また有錆部における浸食深さと塗布量の関係を図-13に示す。腐食抑制率の計算は〔3〕による。

図-12のモル比はひびわれ部における鉄筋位置での NO_2^- イオンと Cl^- イオン(全塩素)定量分析から計算した。

図-10, 11から、無錆部における腐食量はひびわれ幅に大きく影響し、0.1~0.2 mmを越えるあたりから急激に増大する傾向にあり、既往の文献〔7〕〔8〕とよく一致していた。また、腐食抑制剤の効果も同え塗布量の増加に伴い腐食抑制率も大きく増大していた。特にひびわれ幅0.1~0.2 mmの時、顕著に腐食抑制効果が認められた。しかし、ひびわれ幅が0.4~0.6 mmを越えるとその抑制効果は半減していた。即ちこの原因として、図-12に示されるように腐食面積率はひびわれ幅に関係なくモル比と腐食量に指数的關係が成立ち、腐食抑制に必要なモル比は1.5程度と考えられるが、ひびわれ幅が大きい程腐食抑制剤はより深くまで浸透した事によって、モル比が小さくなったためと考えられる。実際にモル比を計算した結果1.0程度しか得られなかった。

図-13から、有錆部に対する抑制効果を見ると腐食進行に対する抑制効果はあるものの、

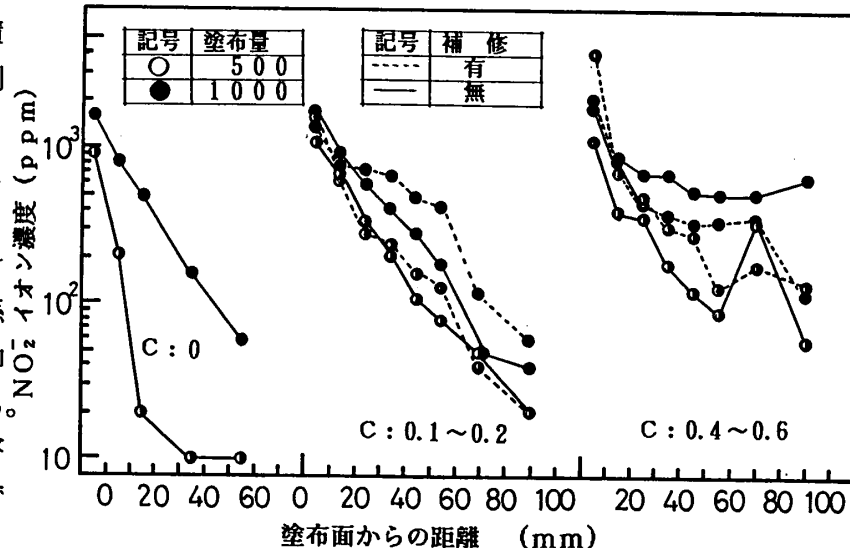


図-9 NO_2^- イオンの濃度分布

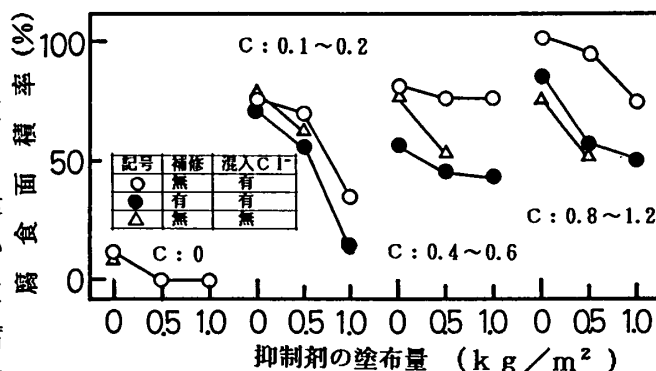


図-10 腐食面積率(無錆部)と塗布量

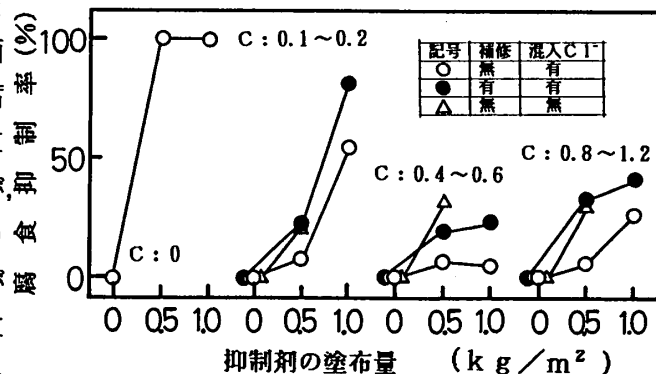


図-11 腐食抑制率(無錆部)と塗布量

その程度は小さかった。これは、先の有鍍鉄筋に対する効果の結果と同様に腐食抑制剤の量が少ないためと考えられ、塗布量を多くすれば図-4及び図-5と同様な結果が予想される。

Cl^- イオンの混入と無混入の差は見られないことから、ひびわれ部の鉄筋腐食は混入塩分よりも外部から進入する塩分の影響の方が大きいように思われる。

したがって、ひびわれ幅が0.1～0.2 mm程度認められるコンクリート内部の腐食鉄筋に対して腐食抑制剤を 1 kg/m^2 塗布すれば腐食の進行は抑制でき、ひびわれ幅が大きいものには、腐食抑制剤を多量に塗布して $\text{NO}_2^- / \text{Cl}^-$ モル比を1.5程度確保すれば抑制させる事が可能であり、更に多量塗布すれば有鍍鉄筋の腐食進行も抑制できると思われる。

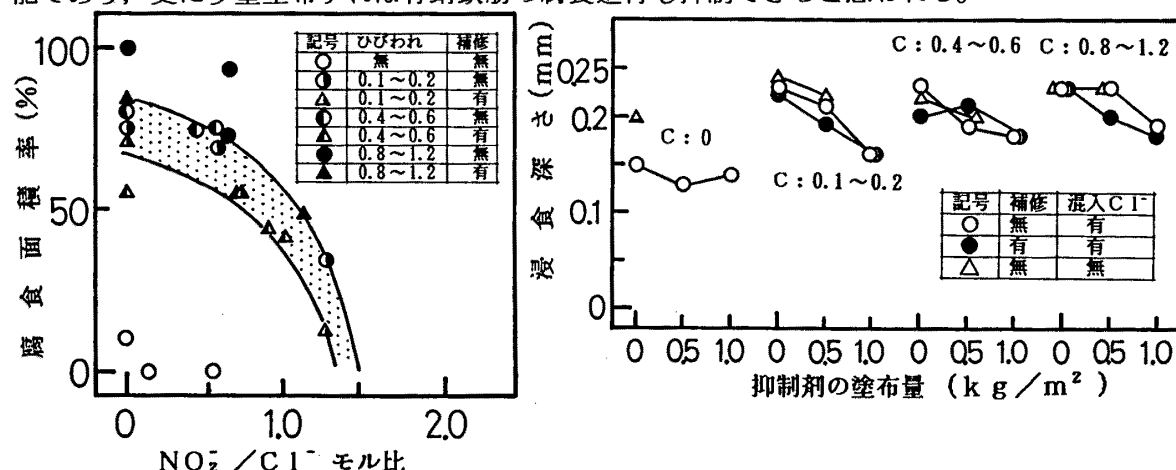


図-12 腐食面積率（無鍍部）とモル比 図-13 浸食深さ（有鍍部）と塗布量

4. まとめ

本試験の範囲で得られた結果を以下に示す。

(1) コンクリート中の鉄筋が内部塩分により更に腐食している場合は、腐食抑制剤を必要量塗布すれば腐食進行を抑制できると考えられ、その必要なモル比は別の機会に明らかにしたい。

(2) 現場試験施工と同様にひびわれ部における腐食抑制剤の浸透性は良好であり、その程度は塗布量やひびわれ幅に伴い増加している。

(3) 幅0.1～0.2 mmのひびわれが発生したコンクリートに対しては、腐食抑制剤を塗布する事により腐食の拡がりや進行を抑制でき、更にひびわれ補修によって効果は増大する。

(4) ひびわれは発生しているが、鉄筋が腐食していない場合は腐食抑制剤を鉄筋位置で $\text{NO}_2^- / \text{Cl}^-$ モル比1.5程度になるように塗布すれば腐食抑制はできると考えられる。

参考文献

- [1] 小林 八重樫 黒田 笹野：コンクリート中の鉄筋発錆に対する塗布型腐食抑制剤の効果その1，第9回コンクリート工学年次学術講演会
- [2] 小林 牛島 阿南 越川：コンクリート中の鉄筋発錆に対する塗布型腐食抑制剤の効果その2，第10回コンクリート工学年次学術講演会
- [3] 小林 牛島 家室 越川：鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物に対する亜硝酸塩の塗布による補修，鉄筋腐食による損傷を受けたコンクリート構造物の補修技術に関するシンポジウム，1989
- [4] 牛島 鳥取 田中：塩害で劣化したRC部材の補修方法に関する研究，鉄道総研報告，Vol. 2, No. 5, 1988
- [5] 森川 関 奥村：鉄筋の腐食膨張によるひびわれ発生機構に関する基礎的研究，土木学会論文集 第378号V-6 1987
- [6] 岸谷：海砂中の塩分が鉄筋に及ぼす影響と防錆対策，コンクリートジャーナル，Vol. 12, No. 10, 1974
- [7] 赤塚 関 浅岡：海水の作用を受ける鉄筋コンクリートのひびわれと鉄筋の腐食について，セメントコンクリート，No. 266 1969
- [8] 岡田 宮川：コンクリートの水セメント比およびひびわれが鉄筋腐食に与える影響について，セメント技術年報 33, 1979