

## 論 文

## [1090] 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（日本国土開発）

正会員 牛島 栄（青木建設研究所）

正会員○越川松宏（小野田開発研究所）

## 1. はじめに

筆者らは、鉄筋コンクリート内部に残存する塩化物により鉄筋が腐食する場合の抑制方法として、腐食抑制剤（亜硝酸カルシウム系）をコンクリート表面に塗布してコンクリート内部の鉄筋位置まで腐食抑制剤を浸透させて、腐食を抑制する方法を試みている。

既に、塩害や施工不良等で劣化したコンクリート構造物に対する腐食抑制剤の効果について検討するため、内部のC<sup>1-</sup>量を最大1.8 kg/m<sup>3</sup>、鉄筋かぶりを10 mmとした条件について、鉄筋の腐食抑制効果を確認している〔1〕〔2〕。特に内部に塩化物がある場合に、鉄筋の腐食抑制効果を十分に得るために、鉄筋位置における内部塩化物の量と腐食抑制剤の量の比であるNO<sub>2</sub> / C<sup>1-</sup>モル比をある一定値以上にする必要がある。例えば、筆者らの研究によれば、内部に塩化物が残存していてもNO<sub>2</sub> / C<sup>1-</sup>モル比が0.7～0.8程度あれば、鉄筋腐食は生じない〔3〕。かぶりコンクリートにひびわれ等の変状が現れない程度に腐食した鉄筋にはモル比を2.0程度にすれば、以降の腐食を抑制する事ができる〔4〕。更に、ひびわれを誘発するような場合の鉄筋の腐食に対しては、腐食を抑制するに必要なモル比を把握する事はできなかったが、腐食抑制剤を塗布した後、ひびわれを注入して補修すれば、その後の腐食の進行を抑制することが可能であった〔5〕。

しかし、塩害により劣化したコンクリート構造物中の内部塩化物量は、既往の報告〔6〕によれば低濃度から高濃度まで幅広い範囲の値を示し、特に、海岸付近の構造物ではC<sup>1-</sup>換算で最大10 kg/m<sup>3</sup>以上に及ぶ例もある。

そこで、本報告では腐食抑制剤をコンクリート表面に塗布して、コンクリート中の内部に多量の塩化物が残存する構造物の補修を行なう場合に、必要な腐食抑制剤の塗布量及びNO<sub>2</sub> / C<sup>1-</sup>モル比を把握し、鉄筋腐食の抑制効果を確認するために、コンクリート中の塩化物量及び腐食抑制剤の塗布量を変化させた試験を行った。また、NO<sub>2</sub>が存在する部位と存在しない部位がコンクリート中に混在すると、一般的に前者がカソード域、後者がアノード域となりマクロセル腐食が生じる恐れがある。そのため、マクロセル腐食についてNO<sub>2</sub>混入と無混入モルタルの打継ぎを行なう事により検討した。

## 2. 高濃度塩化物を含有したコンクリート中の鉄筋に対する腐食抑制剤の効果

## 2. 1 試験概要

本試験では、高濃度塩化物としてC<sup>1-</sup>換算で3～10 kg/m<sup>3</sup>を混入したコンクリート中にかぶりを10～40 mmと変えた鉄筋入りコンクリート供試体を使用した。ここに腐食抑制剤を0～8 kg/m<sup>3</sup>塗布し、腐食促進試験を行なった後に、鉄筋の腐食量を測定し、腐食抑制剤の効果及び腐食抑制に必要な塗布量とNO<sub>2</sub> / C<sup>1-</sup>モル比の推定を行った。

## 2. 2 試験方法

## (1) コンクリートの調合及び供試体の作製方法

コンクリートの調合及び供試体の形状・寸法を表-1及び図-1に示す。コンクリートの材料として、普通ポルトランドセメント、小笠産砂、岩瀬産碎石2005及びAE減水剤（ポゾリスNO.70）を用いた。塩化物量はC1<sup>-</sup>換算で3、5、7及び10kg/m<sup>3</sup>になる様にNaCl試薬を混入した。かぶりは10、30及び40mmとした。混入C1<sup>-</sup>量とかぶりの組合せを表-2に示す。また、鉄筋はJIS A 6205に規定されるみがき棒鋼（φ10×100mm）を使用した。成形後、2日で脱型し、4日間40℃乾燥及び1日空冷（室内）した。

表-1 コンクリートの調合

スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	細骨材 率 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	重量 (kg/m <sup>3</sup> )		
						セメント	細骨材	粗骨材
15	3.8	70	20	50	173	247	932	938

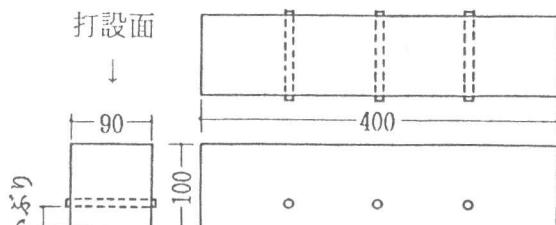


図-1 供試体の形状・寸法 (単位:mm)

表-2 各水準の組合せ

混入Cl <sup>-</sup> 量(kg/m <sup>3</sup> )	かぶり(mm)	抑制剤の塗布量(kg/m <sup>2</sup> )
3	30, 40	0, 2, 3, 4
5	30, 40	0, 2, 3, 4
7	10, 30, 40	0, 3, 4, 5
10	10, 30, 40	0, 5, 6, 8

## (2) 腐食抑制剤の塗布方法

打設底面を上面にして、腐食抑制剤を0～8kg/m<sup>2</sup>刷毛を用いて塗布した。塗布量と各水準の組合せを表-2に示す。塗布後直ちに供試体を1ヶ月間室内(20℃、55%R.H.)に放置した。

## (3) 腐食促進試験方法

腐食促進試験は、JIS A 6205（鉄筋コンクリート用防せい剤）に準じたオートクレーブ養生(180℃、10kgf/cm<sup>2</sup>)と水中浸せきの繰返しを行った。サイクル数は、かぶり10mmの場合に4サイクル、30及び40mmの場合に8サイクルとした。

## 2. 3 試験項目

### (1) 腐食抑制剤の浸透性

腐食抑制剤の浸透性は、促進試験後に供試体を腐食抑制剤の塗布面から深さ方向に所定間隔で切断し、それぞれに含有するNO<sub>2</sub>の定量分析(α-ナフチルアミン法)を行ない確認した。

### (2) 腐食抑制剤による鉄筋の腐食抑制効果

腐食促進後、供試体から鉄筋を取り出し腐食面積及び腐食減量を測定した。

## 2. 4 試験結果及び考察

### (1) 腐食抑制剤の浸透性

腐食抑制剤の浸透性は混入塩化物量に全く影響されなかった。そこで、供試体中のNO<sub>2</sub>の濃度分布の例として、混入C1<sup>-</sup>量が8kg/m<sup>3</sup>で腐食促進試験を8サイクル行った結果のものを図-2に示す。図から、腐食抑制剤の塗布量は浸透性に多く関与することがわかる。例えば、塗布面から50～60mmの位置におけるNO<sub>2</sub>濃度は、腐食抑制剤を3kg/m<sup>2</sup>、4kg/m<sup>2</sup>及び5kg/m<sup>2</sup>塗布するとそれぞれ2800ppm、3200ppm及び3800ppmを示した。

### (2) 腐食抑制剤による鉄筋の腐食抑制効果及び鉄筋の腐食抑制に必要な塗布量

本試験における鉄筋の腐食量の評価は腐食面積率及び腐食減量とした。その両者の関係を図-3に示す。腐食面積率と腐食減量の関係は既往〔7〕の結果と同様な傾向にあり、腐食面積率が0～60%の範囲では両者の間に直線的な比例関係にあるが、60%以上になると腐食進行過程が横の拡がりと深さ方向の浸食の両者が複合化するため、両者の間には比例関係は成立しなくなる。特に、腐食面積率が100%の場合に腐食減量は20～50mg/cm<sup>2</sup>と孔食により大きく変動する。そこで、腐食量の評価を腐食減量の項目に限定し以降の項目について検討した。腐食抑制剤の塗布量と腐食減量の関係を図-4に示す。図から、腐食抑制剤無塗布における鉄筋の腐食減量と混入C1<sup>-</sup>量の関係は顕著に認められ、当然ながら比例関係にある。また、腐食減量と腐食抑制剤の塗布量との間には反比例関係にあり、腐食抑制剤の効果が認められる。例えば、混入C1<sup>-</sup>量が10kg/m<sup>3</sup>の場合における抑制効果の最大値は、かぶりが10、30及び40mmのコンクリートに腐食抑制剤をそれぞれ5kg/m<sup>2</sup>、8kg/m<sup>2</sup>及び6kg/m<sup>2</sup>塗布すると、腐食減量は無塗布と比較しそれぞれ13%、23%及び38%までの抑制となる。このように、腐食促進期間が異なっている事も起因して、腐食抑制剤の腐食抑制効果は当然ながらかぶりにより変化する。

また、鉄筋の端部は、図-1を見てもわかるように供試体から露出しており、この露出部が局部的に孔食し、腐食減量は、完全に腐食抑制しても0mg/cm<sup>2</sup>とはならない。これから、鉄筋腐食の抑制に必要な塗布量を求めると、かぶり10mmの場合に腐食減量が0mg/cm<sup>2</sup>近くまで抑制した結果が得られており、混入C1<sup>-</sup>量が7kg/m<sup>3</sup>及び10kg/m<sup>3</sup>に対して、それはそれぞれ3kg/m<sup>2</sup>及び5kg/m<sup>2</sup>となる。それ以外の条件では、いずれも腐食減量は0mg/cm<sup>2</sup>近くまでには至らなく、完全に腐食抑制を行なうには本試験の塗布量範囲では不十分であった。

### (3) 鉄筋の腐食抑制に必要なNO<sub>2</sub><sup>-</sup>/C1<sup>-</sup>モル比の推定

供試体中の鉄筋位置におけるNO<sub>2</sub><sup>-</sup>/C1<sup>-</sup>モル比と鉄筋の腐食減量の関係を図-5に示す。

図から、腐食減量はNO<sub>2</sub><sup>-</sup>/C1<sup>-</sup>モル比が増加するとともに、指數関数的に減少する傾向

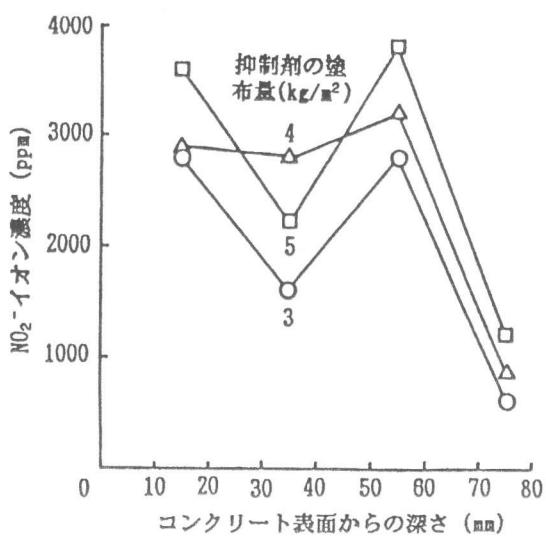


図-2 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>イオンの浸透状況

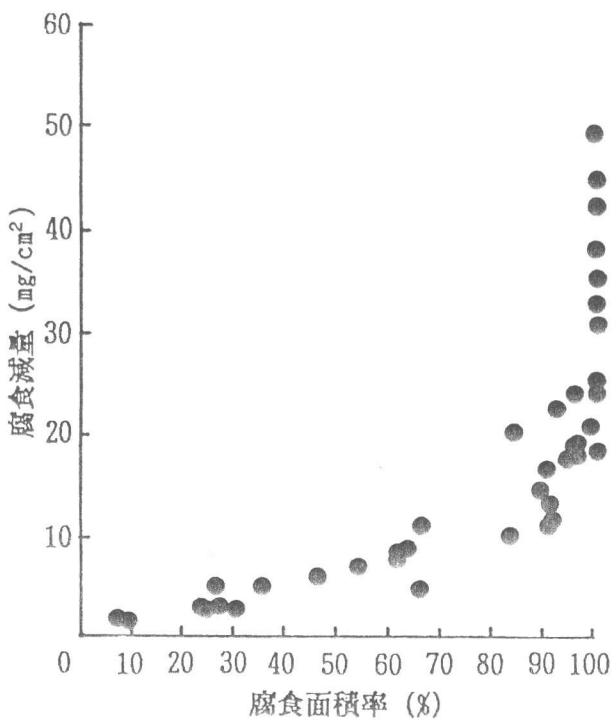


図-3 腐食面積率と腐食減量の関係

が認められる。しかも、その関係は各かぶり毎に異なっている。これより、各かぶりにおける鉄筋の腐食抑制に必要な $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比は、かぶり10mmの場合に0.8程度、かぶり30mmの場合に1.8程度及びかぶり40mmの場合に7.0程度となる。

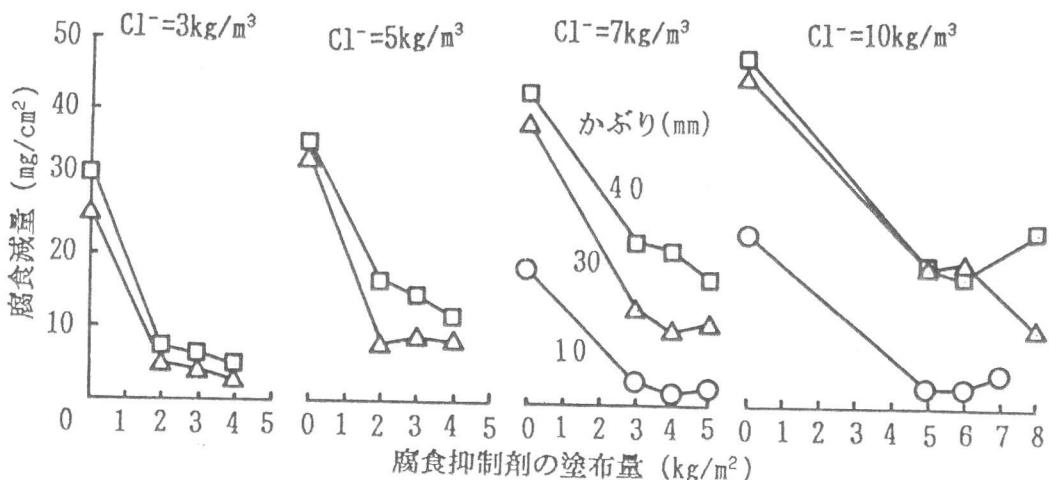


図-4 腐食抑制剤の塗布量と腐食減量の関係

かぶり10mmの場合に腐食抑制に必要な $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比が0.8程度と推定でき、これは前報〔5〕の結果で得られたモル比と一致している。しかし、防食要因であるかぶりが30mmから40mmに増加したにも係わらず、腐食減量や腐食抑制に必要な $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比は増加し、かぶりが大きくなると腐食環境が厳しくなる傾向にある。これは、既往〔8〕の結果と良く一致しているが、本試験の範囲で、この原因を追求するまでには至らなかった。

### 3. 腐食抑制剤の混入と無混入のモルタル打継ぎによるマクロセル腐食の検討

#### 3. 1 試験概要

コンクリート表面に腐食抑制剤を塗布することにより、不均一な構造をもつコンクリート中にも係わらず、腐食抑制剤は鉄筋まで拡散し十分に鉄筋の腐食を抑制し、鉄筋表面のミクロ的な空隙や骨材の接触により生じると思われるマクロセル腐食は前試験の結果を見る限りでは形成された様子はなかった。したがって、本試験では故意にアノード部とカソード部を形成させるために、腐食抑制剤混入モルタルと無混入モルタルを一本の鉄筋を介して打継いで、マクロセル腐食について検討した。

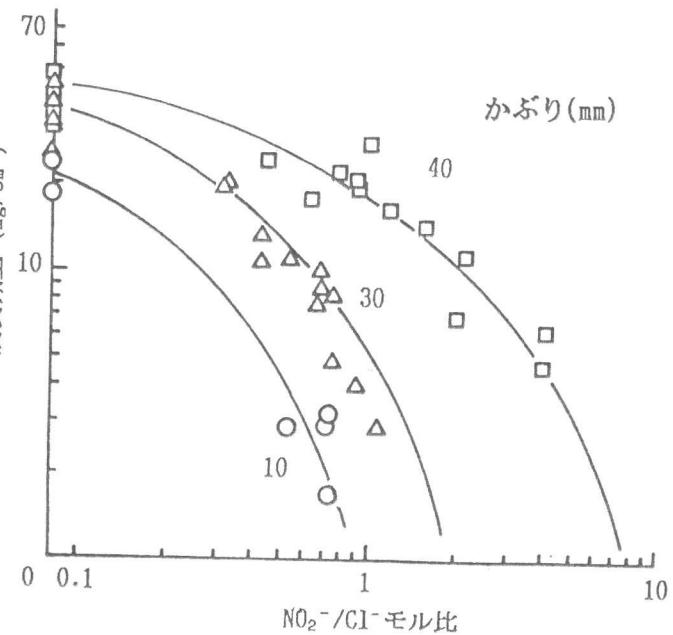


図-5  $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^-$ モル比と腐食減量の関係

### 3.2 試験方法

#### (1) モルタルの調合及び供試体の作製方法

モルタル供試体の調合及び形状・寸法を表-3 及び図-6 に示す。モルタルの材料として、普通ポルトランドセメント、豊浦標準砂及び塩化物はNaCl試薬を用いた。鉄筋は、JIS A 6205に規定するみがき棒鋼 ( $\phi 10 \times 160$  mm) を使用した。かぶりは15 mmとした。アノード部、カソード部を形成させるために、表-4 に示すNO<sub>2</sub><sup>-</sup>濃度及びアノード/カソード面積比を変えたモルタルを同時に打継いだ。供試体の成型後、3日で脱型し、4日間(20°C、90%R.H.)養生した。これを供試体とした。

#### (2) 腐食促進試験方法

腐食促進試験は、オートクレーブ養生と水中浸漬を3サイクル実施した。

### 3.3 試験項目

腐食抑制剤によるマクロセル腐食の検討  
腐食促進試験後、供試体中の鉄筋を取り出し、アノード部(腐食抑制剤無混入)とカソード部(腐食抑制剤混入)におけるそれぞれの腐食面積を測定した。

### 3.4 結果及び考察

鉄筋のカソード部及びアノード部における腐食面積率を図-7 に示す。カソード部における腐食面積率の結果から、腐食抑制剤の濃度が増加すれば腐食面積率は減少し、その濃度がNO<sub>2</sub><sup>-</sup>換算で1000 ppmに達すると完全に鉄筋腐食は抑制されていた。これからも、腐食抑制剤の腐食抑制効果は認められ、ここでは腐食抑制効果に必要なNO<sub>2</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>モル比は、0.6程度となる。

表-3 モルタルの調合(重量比)

セメント	砂	水	Cl <sup>-</sup>
100	300	79	0.6

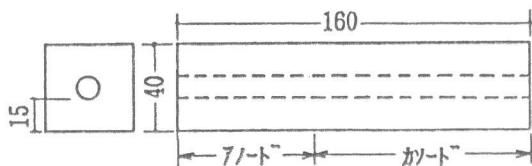


図-6 供試体の形状・寸法(単位:mm)

表-4 要因と水準

要因	水準
カソード/アノード比(mm)	160/0, 140/20, 130/30, 100/60
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 濃度(ppm)	0, 50, 100, 500, 1000, 5000

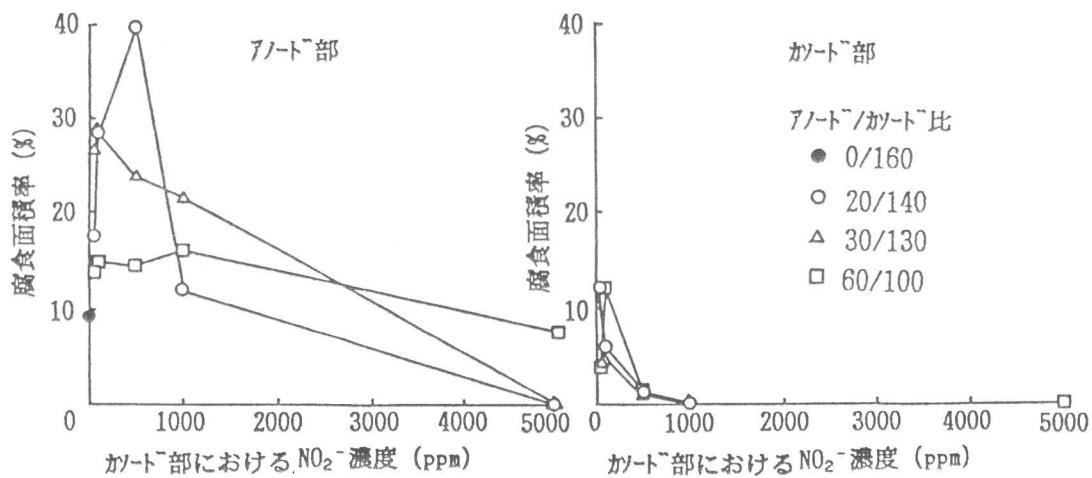


図-7 アノード部とかソード部における腐食面積率とNO<sub>2</sub><sup>-</sup>濃度の関係

腐食抑制剤の濃度勾配によるマクロセル腐食は、アノード部における腐食面積率から検討し

た。腐食抑制剤無混入のモルタルを打継ぎ無く、成形した供試体（以降、Plain と呼ぶ）中の鉄筋の腐食面積率と各水準で打継いた供試体におけるアノード部の腐食面積率を比較して、後者が前者を上回ればマクロセル腐食の可能性は有る、それと逆であれば無いと推定できる。これより、混入NO<sub>2</sub> が50～1000ppm の範囲にあるとPlain より腐食面積率は増加する傾向にあり、特に、500ppm の時にそれは最大に達している。また、マクロセル腐食はアノード／カソード面積比に大きく影響し、面積比が小さいほど大きく生じている。例えば、60/100より30/1 30/130より20/140の方が腐食面積率は大きい。しかし、アノード／カソード面積比に関係なく、NO<sub>2</sub> 濃度が5000ppm と高濃度になればマクロセル腐食は生じにくい傾向にある。これはカソード部のNO<sub>2</sub> イオンが高濃度のため、アノード部へイオン拡散しアノード部の鉄筋も腐食抑制したためと考えられる。このように、腐食抑制剤混入と無混入モルタルを打継いた場合はアノード部とカソード部が形成され、その面積比であるアノード／カソードの値がより小さい場合にマクロセル腐食は生じる可能性がある。しかし、その面積比が大きい場合には生じないと言われている。更に、コンクリート表面全体に均一に腐食抑制剤を塗布すれば、コンクリート中の部位ごとのNO<sub>2</sub> の浸透程度に異なる可能性はあるが、NO<sub>2</sub> は徐々に浸透して行き、アノード（NO<sub>2</sub> の浸透部）とカソード（無浸透部）の界面が固定化しなくなり〔1〕、マクロセル腐食は生じる可能性は少ないと考えられる。

#### 4. まとめ

本試験の範囲で得られた結果を以下に示す。

- (1) 塗布型腐食抑制剤は、高濃度含有塩分 (C1- 換算で 10 kg/m<sup>3</sup>) に対しても、鉄筋の腐食抑制効果が認められる。
- (2) 塗布型腐食抑制剤は、鉄筋のかぶりが 30 mm もしくは 40 mm あっても鉄筋位置まで浸透して行き、鉄筋の腐食抑制をできることと考えられる。
- (3) 鉄筋腐食の抑制に必要な NO<sub>2</sub> / C1- モル比はかぶりごとに異なり、かぶりが 10 mm、30 mm 及び 40 mm の場合に、それぞれ 0.8、1.8 及び 7.0 程度となる。
- (4) 塗布型腐食抑制剤の混入及び無混入モルタルを打継いた場合のマクロセル腐食は、カソード部の NO<sub>2</sub> 濃度が 50～1000 ppm の場合に形成される可能性があるが、それが 5000 ppm まで達すれば形成し難いと思われ、更に今後の検討を要する必要がある。

#### 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、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻 第1号、pp. 405～410、1987
- [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、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻 第2号、pp. 529～534、1988
- [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、日本コンクリート工学協会（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）、pp. 55～62、1989
- [4] 小林、牛島、家室、越川；塗布型腐食抑制剤によるコンクリート中の鉄筋の防食に関する研究、土木学会論文集 第420号 v-13、pp. 51～60、1990
- [5] 小林、牛島、家室、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、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻 第1号、pp. 585～594、1989
- [6] 小林；道路橋における被害の実態、コンクリート工学 Vol. 25、No. 11、pp. 53～56、1987
- [7] 棚田；仕上材のコンクリート保護効果を考える、日本建築仕上材工業会（講演会資料）、1991
- [8] 枝広、依田；オートクレーブによるコンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（中国）、pp. 153～154、1990