

論文 中性化した鉄筋コンクリートの補修工法に関する研究

福田杉夫*¹・梶田佳寛*²・鹿毛忠継*³・亀井雅弘*⁴

要旨：鉄筋位置まで中性化したコンクリートの補修工法として、亜硝酸リチウムを高濃度に添加したモルタル塗布工法の中性化進行抑制効果と鉄筋腐食抑制効果を検討した。中性化進行抑制効果は、中性化させたコンクリートに各種補修工法を施し、その後の中性化進行を測定した。腐食抑制効果は、中性化及び乾湿処理をさせ鉄筋を腐食環境下においた後、各種補修処理を施し、促進試験及び屋外曝露試験により鉄筋の腐食進行を測定した。その結果、亜硝酸リチウムを高濃度に添加したモルタル塗布工法は、中性化進行抑制効果が良好であること及び、鉄筋腐食抑制効果が良好であることを確認した。

キーワード：中性化抑制、鉄筋腐食抑制、亜硝酸リチウム、補修、コンクリート

1. はじめに

鉄筋位置まで中性化したコンクリートの補修工法には、補修後の中性化進行抑制と、中性化によって腐食環境に入った鉄筋に対する防錆が必要になる。

本研究は、塩化物イオンが含まれるコンクリート内の鉄筋腐食の抑制効果が期待できる亜硝酸リチウムを高濃度に添加したモルタル塗布工法[1]において、中性化進行抑制効果と中性化が進行したコンクリートの内部鉄筋に対する腐食抑制効果について検討したものである。

2. 実験概要

実験は、中性化進行抑制効果を確認するシリーズAと、鉄筋腐食抑制効果を確認するシリーズBとした。

シリーズAは、コンクリート供試体を作製し、促進中性化前処理させた後、補修工法を施し促進中性化試験を行った。

シリーズBは、鉄筋コンクリート供試体（かぶり厚：10mm、20mm）を作製し、中性化深さ20mmを目標に促進中性化処理及び、乾湿繰り返し処理させ鉄筋を腐食環境下においた後、補修工法を施し促進乾湿繰り返し試験及び屋外曝露試験を行った。

2. 1 使用材料

コンクリートは目標圧縮強度を2,450 N/cm²とした。コンクリートの配合と試験結果を表1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は大井産砂（吸水率1.41%、絶乾比重2.62）、粗骨材は青梅産硬質砂岩碎石

表1 コンクリートの配合と試験結果

塩分量 Cl ⁻ (kg/m ³)	単 位 量 (kg/m ³)					スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	圧縮強度 28日 (N/cm ²)
	セメ ント	水	細骨 材	粗骨 材	A E 剤			
0.3	274	192	885	916	0.069	18.0	4.1	3,136

*1 田島ルーフィング(株) 開発部 主任研究員（正会員）

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科、工博（正会員）

*3 建設省建築研究所 第二研究部 材料環境研究室 主任研究員、Ph.D.（正会員）

*4 田島ルーフィング(株) 開発部 研究員

(吸水率0.78%、絶乾比重2.62、最大骨材寸法20mm)を用いた。なお、鉄筋はみがき棒鋼 (SGD-3、 $\phi 12 \times 268\text{mm}$) を使用した。

2. 2 コンクリート供試体

シリーズAの供試体の形状は $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$ とした。また、シリーズBの供試体は、図1に示す形状とした。

供試体はコンクリート打設後、材齢2日で脱型し、材齢7日まで湿空養生、材齢28日まで気中養生を行った。その後、打設側面(試験面)を除きエポキシ樹脂でシールし、材齢77日から促進中性化処理を行った。なお、シリーズBの供試体は両端部の鉄筋をシリコンでシール処理した。

2. 3 補修工法の種類

補修工法の種類を表2に示す。

LNPCP、LNPCMは亜硝酸リチウム混入SBRエマルジョンとプレミックスパウダーとを混練したものであり、その配合は表3に示すとおりである。

2. 4 シリーズAの促進中性化前処理と補修

促進中性化前処理は、 20°C 、60%RH、 CO_2 濃度5%で14日間行った。その後室内で約4カ月放置した後、全ての供試体を端部から約5cm位置で中性化深さを測定し、補修前の中性化深さとした。中性化深さは、平均で11.3mm(最小10.0mm、最大13.2mm)であった。

補修は、表2の補修工法の実験計画に従い打設側面に施した。その後、28日間気中養生をし、促進中性化試験を実施して、各補修工法の中性化抑制効果を確認した。

2. 5 シリーズAの促進中性化試験

促進中性化試験の条件は、 20°C 、60%RH、 CO_2 濃度5%で行い、一定期間毎に中性化深さを測定した。中性化深さの測定は、供試体を順次端部から割裂しフェノールフタレイン1%溶液を吹き付けて、コンクリート表面から着色した部分までの距離を測定した。

2. 6 シリーズBの前処理と補修

前処理は、促進中性化(20°C 、60%RH、 CO_2 濃度5%)を96日間行った後、乾湿繰り返し処理5サイクル(1サイクル： 60°C -95%RH-48hr/ 60°C -50%RH-36hr)を行い、その後供試体全ての自然電極電位を測定し、補修前の値とした。また、供試体3体を解体し、中性化深さの確認(平均；18.5mm)、鉄筋腐食による質量減少を測定した(かぶり厚10mm平均；0.31%、同20mm；0.35%)。

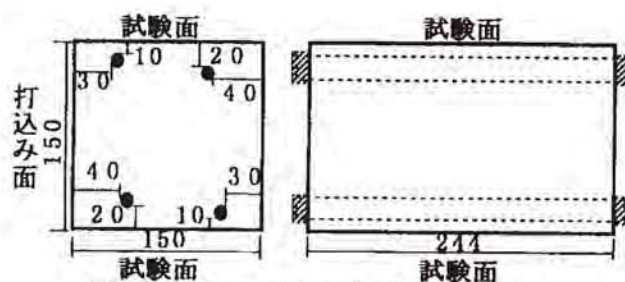


図1 シリーズBの供試体の形状

表2 補修工法の種類

工 法 名	略 称
無処理	無処理
防水型単層仕上塗材(アクリル系エマルジョン)	単層材
ポリマーセメントペースト 2mm	P C P
亜硝酸リチウム40%水溶液 200g/m ²	L N S
L N S + 単層材	LNS+単層材
亜硝酸リチウム添加ポリマーセメントペースト2mm	L N P C P
L N S + L N P C P 2mm	LNS+LNPCP
亜硝酸リチウム添加ポリマーセメントモルタル5mm	L N P C M

表3 補修材の配合と試験結果

	配合比			固形分/セメント(%)		圧縮強度28日 (N/cm ²)
	セメント	珪砂他	水	LiNO ₃	SBR	
P C P	100	100	40	0	10	2,793
L N P C P	100	100	40	10	10	2,969
L N P C M	100	200	40	10	10	2,764

補修は表2の実験計画に従い打設側面に施した。その後、28日間気中養生をし、鉄筋腐食抑制効果を検討するために、促進乾湿繰り返し試験及び、屋外曝露試験を実施した。

2. 7 促進乾湿繰り返し試験

促進乾湿繰り返し試験の条件は、60℃-95%RH-48hr/60℃-50%RH-36hrを1サイクルとし、100サイクル実施した。10サイクル毎に自然電極電位（Cu・CuSO₄電極）の測定及び、ひび割れの有無について観察した。自然電極電位の測定は、1日間水道水を含ませた養生シートを貼り付け、測定面を十分に湿らせて行った。また、100サイクルで各供試体を2体解体し、鉄筋腐食による質量減少を測定した。

2. 8 屋外曝露試験

屋外曝露試験は、建設省建築研究所の曝露試験場で行った。供試体は、試験面が東西に向くように設置した。自然電極電位の測定及び、ひび割れの有無について観察は、原則的に6ヶ月毎に実施した。また、曝露34ヶ月後に各供試体を2体解体し、鉄筋腐食による質量減少を測定した。

3. シリーズAの実験結果と考察

促進中性化試験における試験期間とその間の中性化深さとの関係を図2に示す。

図2によると補修材を施したものは、ある促進中性化期間が過ぎてから中性化の再進行が始まることが認められる。その状況は、図3の概念図に示される。このような状況を考慮し、各種補修工法の補修時から進行した中性化深さにより、中性化速度式

$X = A\sqrt{t} - B$ (X ；補修後に進行した中性化深さ、 t ；補修後の促進中性化期間、 A ；中性化速度係数)を求め、さらに中性化速度式より中性化が再進行するまでの月数を求めた結果を表4に示す。

PCPは、中性化が再進行するまでの期間は0.21カ月となったが、中性化速度の抑制には効果が認められなかった。LNSは、亜硝酸リチウム40%水溶液200g/m²塗布のみであるが、中性化が再進行するまでの期間が0.39カ月となり、PCPより効果があったが、中性化速度抑制の効果は認められなかった。

防水型単層仕上材は、6カ月までは中性化が進行せず、補修時から1年後の中性化深さも無処理の1/10と良好な中性化進行抑制効果を示した。

亜硝酸リチウムを高濃度に添加したモルタル(LNPCP、LNPCM)は、PCPと同種・同ポリマー量であるが、亜硝酸リチウムの添加効果に

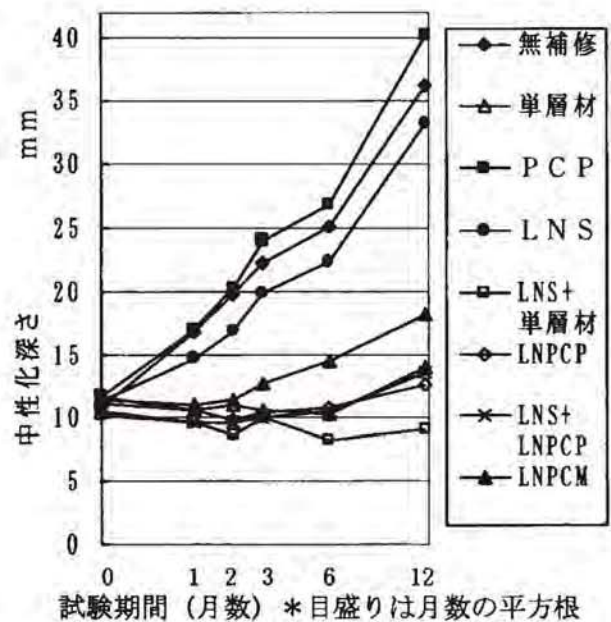


図2 促進中性化試験結果

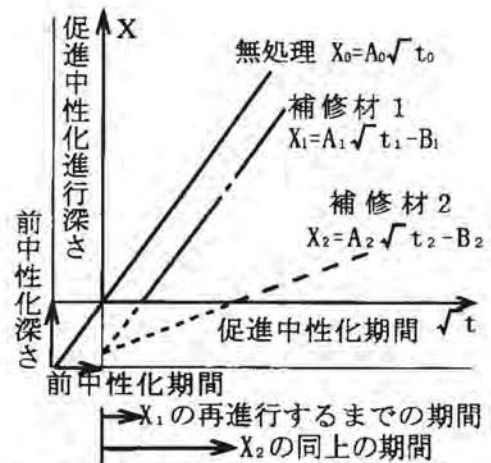


図3 補修後の中性化進行の概念図

より、良好な中性化進行抑制効果を示した。
 LNPCPは、防水型単層仕上材と同様に6ヵ月までは中性化が進行せず、1年後も無処理の1/17の中性化深さであった。LNPCMは、中性化が再進行するまでの期間が1.92ヶ月となり、中性化速度係数Aも3.21と無処理の約1/2弱の数値となっており、中性化の進行抑制が認められる。LNSとLNPCPの組み合わせは、中性化の進行はLNPCPとはほぼ同様であり、LNSの併用効果は今回の実験では認められなかった。

また、LNSと防水型単層仕上材の組み合わせでは、1年後も中性化は進行せず、良好な中性化進行抑制効果を示した。

4. シリーズBの実験結果と考察

4. 1 ひび割れの発生

ひび割れの発生時期と解体時の最大ひび割れ幅を表5に示した。

促進乾湿繰り返し試験では、無処理のかぶり厚10mmで、早期（30サイクル）にひび割れが発生した。PCP10mmは無処理に比べ発生時期が抑制された。屋外曝露試験では、無処理10mmとPCP10mmにひび割れが発生した。いずれのひび割れも、中性化を原因とする鉄筋腐食によるものと推察される。また、他の供試体は、促進試験、曝露試験ともひび割れの発生は認められなかった。

4. 2 自然電極電位による鉄筋腐食抑制効果の確認

促進乾湿繰り返し試験における自然電極電位の変化を図4に示す。

補修前の電位は中性化による鉄筋腐食の影響により、かぶり厚10mmでは-500mV前後、かぶり厚20mmでは-400mV前後と低い状態であった。無処理は、その後も常に電位が卑で推移した。

単層材は、50、100サイクル時に測定したが無処理とほぼ同程度の電位を示した。

PCPは、乾湿処理が進むにつれ電位の回復が起こったが、これはPCPを被覆することにより、内部への水分の補給が少なくなった為と思われる。しかし、その後電位は、貴と卑を繰り返し変化して推移した。

LNSは、補修後の亜硝酸イオンの防錆効果により、電位が貴に変化した。かぶり厚10mmで20サイクル、かぶり厚20mmで40サイクルから再度-300mV以下と卑に変化した。これは、乾湿繰り返し処理中と測定時（水道水を充分含ませた養生シートを1日貼り付けている）に外部へ亜硝酸イオンが流失したためと推察される。

LNS+単層材は、50、100サイクル時に約-200mV以上の貴の電位を示した。これは、単層材の表

表4 中性化速度式と
中性化が再進行するまでの月数

	中性化速度式	中性化が再進行するまでの月数
無処理	$X = 6.73\sqrt{t}$	
単層材	—	6ヶ月以上
PCP	$X = 9.05\sqrt{t} - 4.16$	0.21ヶ月
LNS	$X = 7.32\sqrt{t} - 4.60$	0.39ヶ月
LNS+単層材	—	12ヶ月以上
LNPCP	—	6ヶ月以上
LNS+LNPCP	—	6ヶ月以上
LNPCM	$X = 3.21\sqrt{t} - 4.45$	1.92ヶ月

表5 ひび割れの発生時期と解体時の最大幅

	供試体	かぶり厚	発生時期	最大幅 (mm)
促進試験	無処理	10mm	30サイクル	0.20(4本/4本発生)
	無処理	20mm	80サイクル	0.10(1本/4本発生)
	PCP	10mm	70サイクル	0.10(4本/4本発生)
	PCP	20mm	なし	—
曝露試験	無処理	10mm	18ヶ月	0.15(4本/4本発生)
	無処理	20mm	なし	—
	PCP	10mm	18ヶ月	0.25(4本/4本発生)
	PCP	20mm	18ヶ月	0.10(1本/4本発生)

* 解体時は、劣化試験100サイクル、屋外曝露34ヶ月

面被覆効果により亜硝酸イオンの外部への流出を防止したものと推察される。

亜硝酸リチウムを高濃度に添加したモルタル（L N P C P、L N P C M、L N S+L N P C P）は、補修後から電位の回復が認められる。30サイクルまではかぶり厚10mmが20mmより電位が貴を示している。これは、必要充分量の亜硝酸イオンの到達が早いものと推察される。

屋外曝露試験における自然電極電位の変化を図5に示す。促進乾湿繰り返し試験と同様に亜硝酸リチウムを高濃度に添加したモルタル（L N P C P、L N P C M、L N S+L N P C P）とL N S+単層材は、亜硝酸イオンの防錆効果により、電位の回復が認められた。

L N Sも促進乾湿繰り返し試験と同様に亜硝酸イオンの効果は認められなかった。しかし、L N S+単層材は、両者の効果により-200mV以上の貴の電位を示した。

無処理は、ひび割れが生じた18ヶ月までの電位は-300mV以下であったが、その後電位の回復が多少認められた。P C Pも促進乾湿繰り返し試験と同様に電位が貴と卑を繰り返し推移した。単層材は、34ヶ月で測定したが、-400mV前後の卑の電位を示した。

4. 3 鉄筋質量減少による 腐食抑制効果の確認

補修前より進行した乾湿繰り返し100サイクル後の質量減少と電位を図6に示す。なお、減少量は補修前の値を除いて求めた。

全ての供試体にひび割れが生じた無処理10mmとP C P 10mmの質量減少が大きくなっており、次に電位が卑の傾向で推移した無処理20mm、P C P 20mm、L N S、単層材が大きくなっている。

亜硝酸リチウムを高濃度に添加したモルタル（L N P C P、L N P C M、L N S+L N P C P）とL N S+単層材は、小さい質量減少を示した。

屋外曝露34ヶ月後の質量減少と電位を図7に示す。

促進乾湿繰り返し試験と同様に

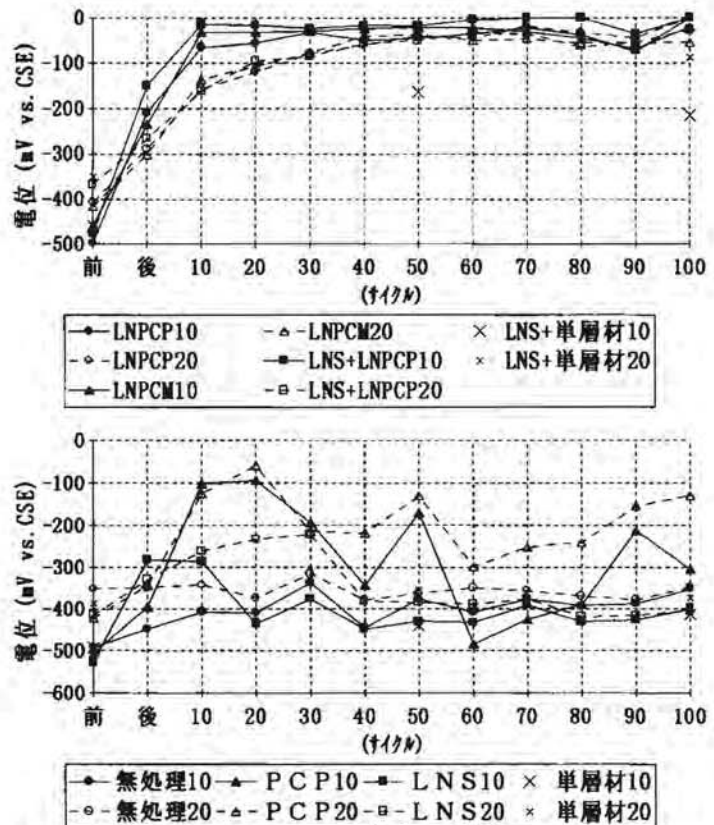


図4 促進乾湿繰り返し試験での自然電極電位の変化

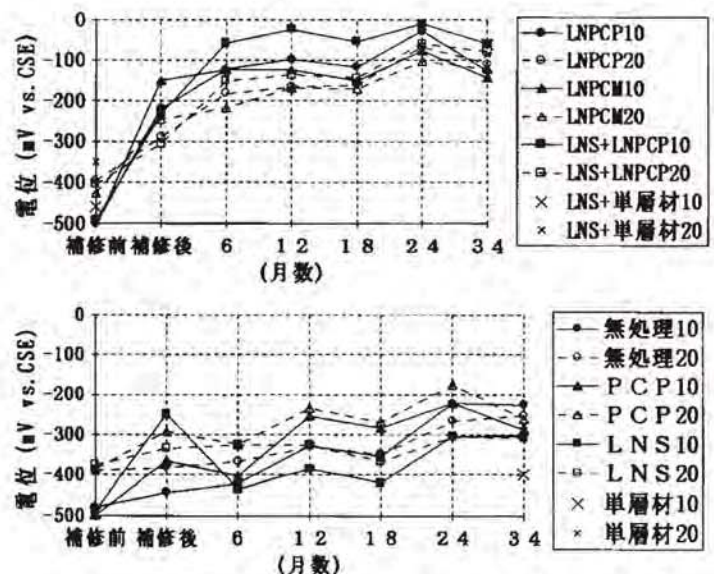


図5 屋外曝露試験での自然電極電位の変化

無処理、PCP、LNSの質量減少が大きくなっている。特にPCP10mmの量が大きい値となった。

次に単層材とLNS+単層材の質量減少が大きかった。LNS+単層材は、解体時の電位が貴を示していることから、初期に腐食が進行したことが考えられる。

亜硝酸リチウムを高濃度に添加したモルタル（LNPCL、LNPCLM、LNS+LNPCL）は、小さい質量減少を示した。

シリーズBの全体の結果を通し、促進乾湿繰り返し試験と屋外曝露試験は、ひび割れの発生状況、自然電極電位の変化、鉄筋の質量減少とも相関性の高い結果となった。

亜硝酸リチウムを高濃度に添加したモルタル塗布工法（LNPCL、LNPCLM、LNS+LNPCL）は、自然電極電位の変化及び、鉄筋腐食による質量減少の測定において良好な鉄筋腐食抑制効果を示した。

7. まとめ

鉄筋位置まで中性化したコンクリートの補修工法として、亜硝酸リチウムを高濃度に添加したモルタル塗布工法の中性化抑制効果と内部鉄筋に対する腐食抑制効果を検討し、以下の知見を得た。

亜硝酸リチウムを高濃度に添加したモルタル塗布工法は、補修後の中性化の進行を抑制できること及び、中性化により腐食環境に入った鉄筋に対し、腐食抑制効果が良好なことを示した。

謝辞

本研究は、建設省社会資本総プロに関連して実施したものであり、（社）建築研究振興協会に設置された鉄筋腐食対策委員会の清水昭之主査他の委員の方々には、貴重なご意見を頂いた。

また、実験は日産化学工業（株）須藤裕司氏のご協力を頂いた。

参考文献

- [1] 堀 孝廣、山崎 聡、梶田佳寛：防錆モルタルに関する研究、コンクリート工学論文集、第5巻第1号、pp. 89-98、1994. 1

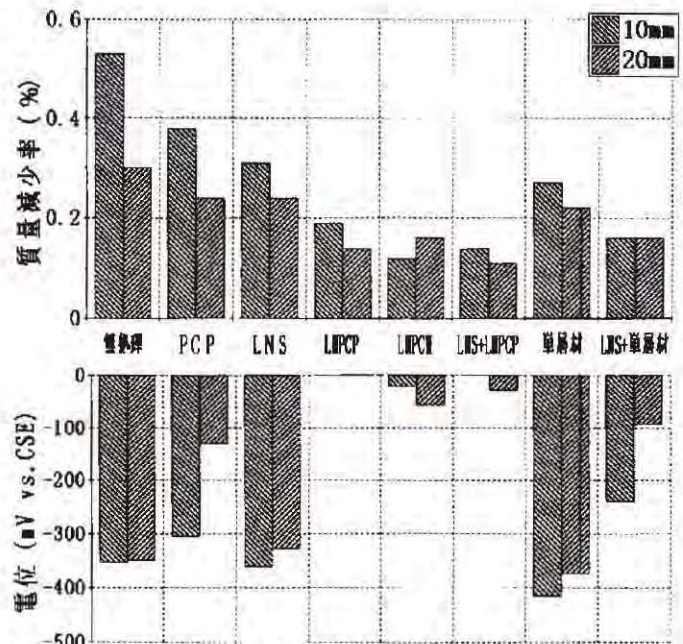


図6 促進乾湿繰り返し試験の補修前より進行した鉄筋質量減少率と100サイクル時の電位

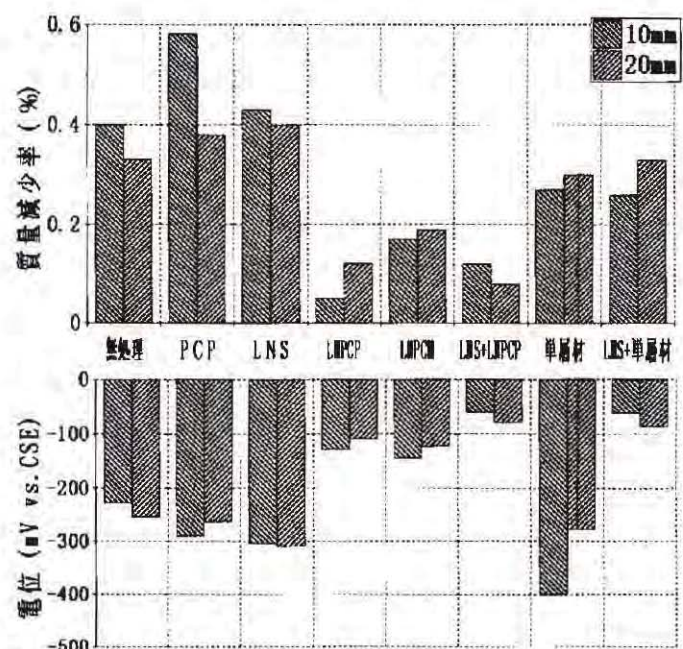


図7 屋外曝露試験の補修前より進行した鉄筋質量減少率と34ヶ月時の電位