

論文

[1117] 複合要因による鉄筋腐食と補修方法の検討

小林茂広*1・宮川豊章*2・菊池保孝*3・北後征雄*4

1. 目的

コンクリート構造物の損傷劣化のうち、複合した原因によるものと推察される事例が増加しており、その検討結果も種々報告されている。筆者等も中性化、塩害およびアルカリ骨材反応の複合による鉄筋腐食について検討を加え、アルカリ骨材反応による 1000×10^{-6} 程度の膨脹は中性化を促進する要因とは考え難いこと、また塩化物イオン量 $1.5 \sim 3.3 \text{ kg/m}^3$ 程度の混入量では、混入した塩分量が中性化を促進する要因ではないとの結果を報告した〔1〕。このような複合した要因により損傷を受けた、あるいは受ける危険性の大きい構造物の維持管理・補修においては、外観の変状がない、つまり鉄筋の発錆がないか、もしくは発錆が軽微な状態において、内部塩分の移動濃縮による塩害を含めて、鉄筋の発錆進行を今後どのように防止するかが重要な課題である。

本研究では、複合した要因による劣化について、塩化物イオン量を 5.0 kg/m^3 まで範囲を広げて検討を加えるとともに、種々の損傷要因・レベルの試験体を用い、代表的な補修材料である完全防水型および透湿柔軟型の材料の使用による鉄筋腐食の進行抑制効果について検討を加えた。

なお、本研究は、日本材料学会「コンクリートのひびわれ補修に関する基礎的調査研究委員会（委員長：京都大学工学部教授 藤井 学）」の調査研究活動の一環として行ったものである。

2. 実験方法

2. 1 試験要因およびコンクリートの配合

試験要因の組合せを表-1に、コンクリートの基本配合を表-2に示す。水セメント比54%は設計時の標準配合であり、70%は促進効果などを考慮したものである。各配合において、工業用食塩を細骨材の内割の形で所定量添加することにより、含有塩化物イオン量を0、1.5、3.3 および 5.0 kg/m^3 に変化させた。使用したコンクリート材料は、普通ポルトランドセメント、細骨材（瀬戸内海大槌島産海砂）、非反応性粗骨材（大阪府高槻産硬質砂岩碎石）、反応性粗骨材（碎石、Sc: 650 mmol/l 、Rc: 220 mmol/l ）、水道水および標準型A E減水剤である。粗骨材最大寸法はいずれも20mmとした。

2. 2 供試体作成方法

供試体には、2本の鉄筋をかぶり高が20mmとなるように埋設した。供試体は、所定配合のコンクリートを $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ 型枠の約15cm高さまで打設した後、鉄筋（ $\phi 9 \times 10 \text{ cm}$ みがき丸鋼、SS41）を2本コンクリート中に埋め込み、材令1日まで 20°C 恒温室中で養生した。材令1日で鉄筋保持用アダプターを取り外し、レイタンスを除去した後、同一配合のコンクリートを型枠の所定高さ20cmまで打継ぎした。これを 20°C 恒温室中で24時間静置した後、脱型し、以降所定の前養生を行った。

*1 ㈱中研コンサルタント 技術第一部部長（正会員）

*2 京都大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*3 西日本旅客鉄道㈱ 施設部工事課課長（正会員）

*4 ジェイアール西日本コンサルタンツ㈱ 新設計推進室長（正会員）

2. 3 供試体の養生・補修方法

中性化深さが0、かぶり-6mmおよびかぶり+6mmの3段階となるように、前養生（中性化促進養生）を行った。「中性化深さ0」に設定した供試体は、空気中の炭酸ガスの影響を受けないように、脱型後ビニールシートで密封して貯蔵した。「中性化深さ（かぶり-6mm）」および「(+6mm)」の条件については、中性化深さの進行度チェック用であるコントロール供試体と鉄筋を埋設した本供試体の両者を、炭酸ガス濃度5%・温度30℃・湿度60%の中性化促進槽に入れた。定期的にコントロール用供試体を取り出して、中性化深さの進行度を測定し、中性化深さが所定の値（かぶり-6および+6）になった時点で、本供試体を取り出し、ビニールシートで密封して貯蔵した。なお、アルカリ骨材反応を想定した供試体については、前養生として40℃：RH100%の恒温恒湿槽に4週間静置した。補修施工が終了した供試体は、所定の環境条件中（中性化促進養生、乾湿繰り返し養生）で3ヶ月間貯蔵した。

表-1 試験要因の組み合わせ

補修後の環境条件	中性化促進	乾湿繰り返し	
補修材料	完全防水型 透湿柔軟型	○ ●	☆ ★

完全防水型：特殊軟質エポキシ樹脂
透湿柔軟型：シラン+ポリマーセメント

塩分量 (Cl) kg/m ³	中性化深さ	非反応性骨材		反応性骨材	
		W/C 54%	W/C 70%	W/C 54%	W/C 70%
0	0mm	●●	○●	○●☆☆	○●☆☆
	かぶり+6mm	○●	○●		○●☆☆
	かぶり-6mm	○●☆☆	○●☆☆		
1.5	0mm	○●	○●		
	かぶり+6mm	○●	○●		
	かぶり-6mm	○●	○●		
3.3	0mm	○●	○●		○●☆☆
	かぶり+6mm	○●☆☆	○●☆☆	○●☆☆	○●☆☆
	かぶり-6mm	○●☆☆	○●☆☆		
5.0	0mm	○●	○●		
	かぶり+6mm	○●	○●		
	かぶり-6mm	○●	○●		

注) 反応性骨材系のうち、「かぶり+6mm」については前養生としてASR促進養生も行った。

表-2 コンクリートの基本配合

粗骨材の種類	W/C (%)	S/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
非反応性	5.4	4.5	8	4	328	177	783	1003	0.820
Gmax20mm	7.0	4.8	8	4	256	179	860	979	0.640
反応性	5.4	4.5	8	4	331	179	778	949	0.828
Gmax20mm	7.0	4.8	8	4	261	183	852	921	0.652

2. 4 評価

補修施工後3ヶ月間所定の環境条件中においた後、本供試体を割裂し、中性化深さおよび埋設鉄筋の発錆度（発錆面積率、発錆による重量減少率）を測定した。中性化深さの測定はフェノールフタレイン噴霧法により、また発錆による重量減少率の測定はセメント協会コンクリート専門委員会報告F-40に示された方法により行った。さらに、代表的な試験体については、水銀圧入式ポロシメータ法によるモルタル部分の細孔径分布の測定を行った。

3. 結果および考察

3. 1 使用コンクリートの特性

圧縮強度は、材令7日においては、水セメント比54および70%とも塩分量が多いほど強度が高い傾向が認められるが、材令28日では、W/C54%では塩分量が多いほど小さくなっており、70%では塩分量にかかわらずほぼ同等である。表-3に示した細孔径分布の測定結果では、塩化物イオン量が多いほど、水和反応が促進され生成する水和物結晶が粗大化するためか、全細孔量はやや増加

しているものの、最大と最小の差は $0.67 \times 10^{-2} \text{ ml/g}$ と比較的小さな値である。

3. 2 塩分量と中性化深さの進行度の関係

中性化深さの測定結果を、図-1に示す。この図より明らかなように、中性化深さの進行は、①水セメント比が大きいほど早い。②塩分量0～5 kg/m³の範囲で4段階の塩分量を設定したが、この範囲内においては、水セメント比54および70%とも、塩分量の大小と中性化深さの進行度には明確な相関関係が認められない。これは、表-3に示したように、細孔径分布において塩分量の大小による差が比較的小さかったことに起因しているものと考えられる。なお、塩分量が本実験の範囲よりも多大となった場合等においては、スランプ、細孔径量等の物性も大きく異なってくるものと考えられ、さらに検討が必要であろう。

3. 3 A S Rと中性化深さの進行度の関係

反応性骨材を用いA S Rを促進させた後、中性化促進させた場合の中性化深さの測定結果を、非反応性の

場合と対比させて図-2に示す。塗布時の膨張率は約 1000×10^{-6} であった (W/C 54% : 塩分量 3.3 kg/m³)。初期養生条件が異なり、コンクリートの硬化体組織が異なっていることが推測されるため、単純に比較することはできないが、傾向としては、今回の条件下でのA S Rによる 1000×10^{-6} 程度の膨張率であれば、A S Rによって中性化の進行度が早くなることはないとの結果を得た。

3. 4 補修材の塗布による中性化進行抑制

補修材を塗布した供試体の中性化深さの進行度測定結果を、図-3に示す。2種類の補修材とも、

表-3 使用コンクリートの細孔径分布

種類		細孔量 ($\times 10^{-2} \text{ ml/g}$)	
W/C	塩化物イオン量	全細孔量	50 nm以上
54%	0 kg/m ³	6.55	1.31
54%	3.3 kg/m ³	6.69	1.26
54%	5.0 kg/m ³	7.22	1.46

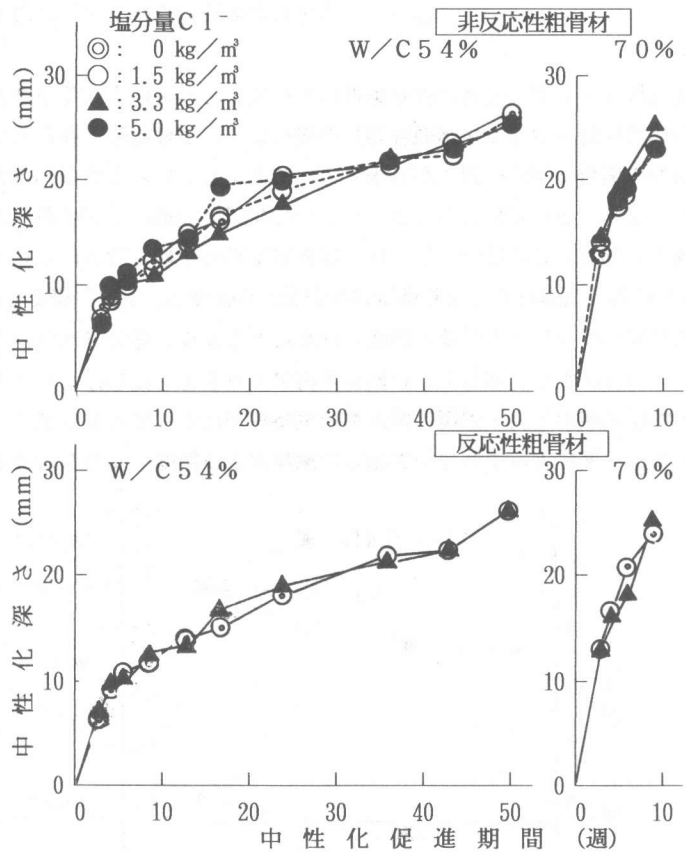


図-1 塩分量が中性化深さの進行におよぼす影響

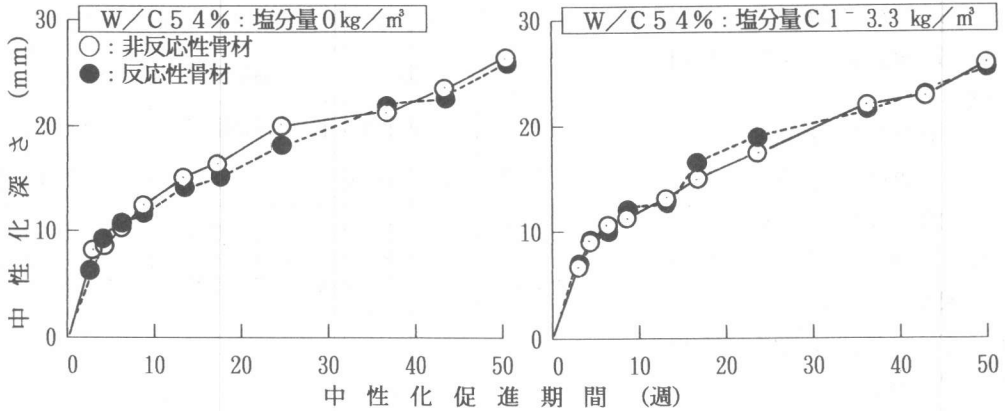


図-2 A S Rが中性化深さの進行におよぼす影響

塗布後3ヶ月間の促進中性化条件において、その後の中性化の進行をほぼ防止している。また材料自体の性能（炭酸ガス透過性等）の差により、中性化阻止性が異なることも考えられたが、透湿柔軟型の場合に中性化深さが若干大きな値を示しているものの、有意な差はほとんどないと考えられる。なお、表-4に示したように、中性化深さの進行度が塗布前よりも減少している供試体が多く認められる。この原因としては、補修施工時の中性化深さのばらつきもその一因であろうが、塗布前の中性化促進養生により供試体が表面から乾燥し、湿分の濃度分布勾配が形成されていたものが、補修材の塗布により外部と遮断されたことにより、湿分（水分）の移動・平均化が生じ、これにつれてOHイオンが移動し、いわゆる再アルカリ化を生じたためとも考えられる。補修施工による非中性化領域の拡大・回復は構造物の維持管理にとって大きなポイントであるが、フェノールフタレイン指示薬による中性化深さ測定の意味および精度の面をも含めて、さらに検討が必要である。

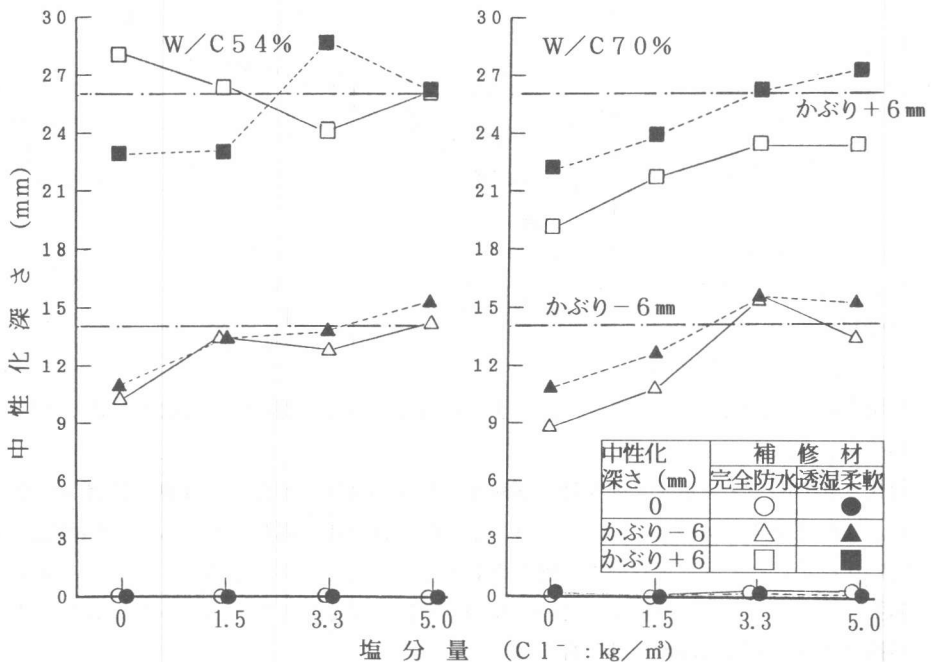


図-3 補修施工後の中性化深さと塩分量の関係（中性化促進養生）

3. 5 発錆の進行

鉄筋の発錆量（発錆面積率、発錆による重量減少率）の測定結果を図-4および5に示す。

(1) 中性化深さが0の場合

塩分量が最大5 kg/m²と多くても、中性化深さが0であれば、W/C54および70%とも鉄筋の発錆面積・量は0であった。

(2) 塗布時の中性化深さが鉄筋位置まで進行していない場合（中性化深さ=かぶり-6mmの条件）

中性化が進行しているものの、鉄筋位置までは達していない場合には、塩分量が多いものほど、発錆面積率が大きくなる傾向が若干は認められる。

(3) 塗布時の中性化深さが鉄筋位置より深い場合（中性化深さ=かぶり+6mmの条件）

①水セメント比54%の場合、塩分量の増加につれて発錆面積率が増加している。②水セメント比が70%の場合、塩分量0および1.5 kg/m²の場合の発錆面積率が54%に比べ小さいが、5 kg/m²の場合にはほぼ同程度の値である。③塩分を原因とする発錆が中性化の進行により促進されている状況が推察される。逆にいえば、塩分量がある程度多

表-4 補修材塗布による

中性化進行抑制効果

塩分量 kg/m ²	塗布時の 中性化 深さ	W/C 54%		W/C 70%	
		完全 防水	透湿 柔軟	完全 防水	透湿 柔軟
0	0 mm	0	0	0	+0.3
1.5		0	0	0	+0.1
3.3		0	0	+0.4	+0.4
5.0		0	0	+0.6	+0.2
0	かぶり	-4.7	-4.0	-4.0	-2.0
1.5		-0.9	-0.9	-3.2	-1.3
3.3		-0.5	+0.6	+0.7	+0.9
5.0		+0.5	+0.7	+0.8	+2.6
0	-6 mm	+1.2	-4.0	-6.7	-3.7
1.5		-0.2	-3.1	-3.7	-1.5
3.3		+2.0	+2.7	-2.7	+0.1
5.0		±0.0	+0.2	-2.5	+1.3
0	+6 mm				
1.5					
3.3					
5.0					

注) 表中の数字は、塗布後3ヶ月間中性化促進環境条件に置いた後の中性化深さから、塗布時の中性化深さを引いた値（単位：mm）

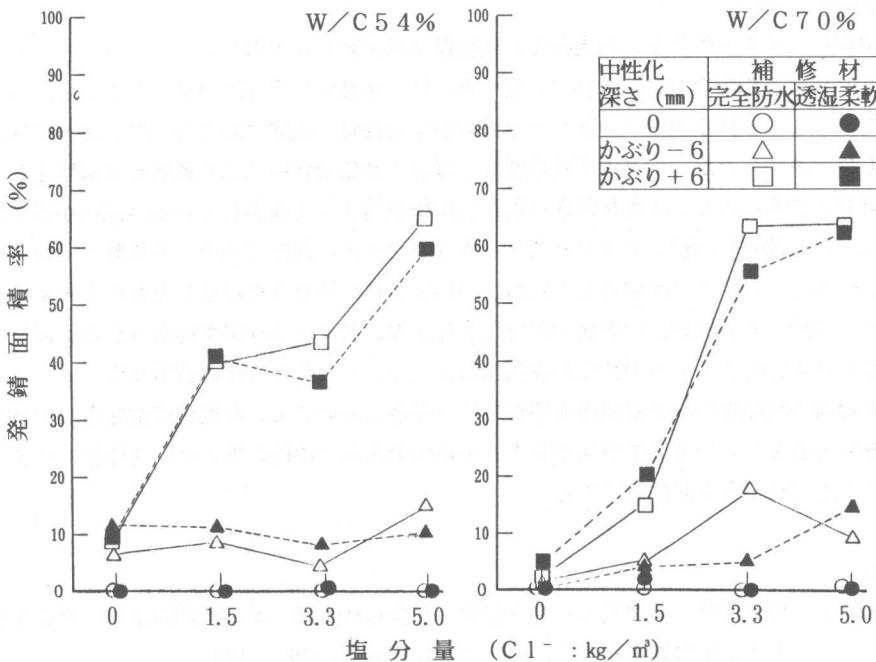


図-4 発錆面積率におよぼす塩分量の影響（中性化促進養生）

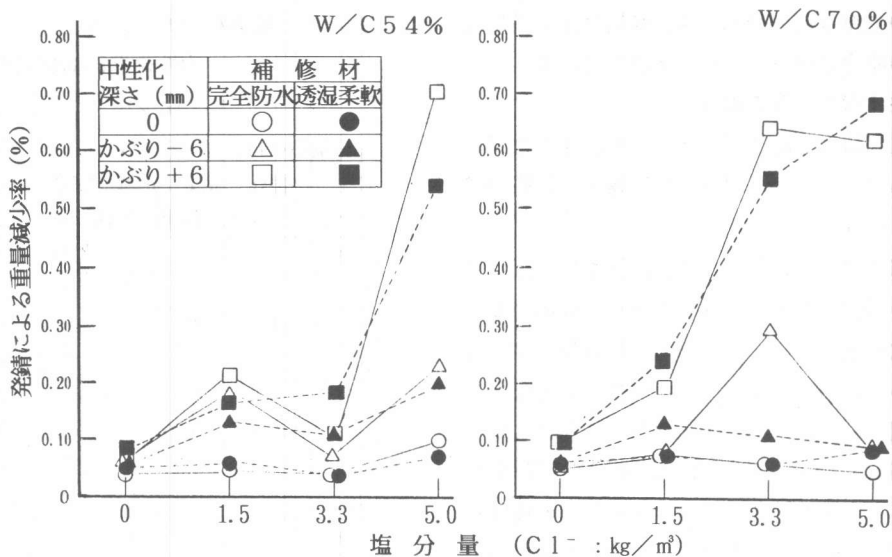


図-5 発錆による重量減少率におよぼす塩分量の影響 (中性化促進養生)

くても、中性化が鉄筋位置まで達していなければ発錆量は少ないといえよう。このことから、内的塩害の可能性のある構造物の補修を行う場合においても、中性化程度も指標のひとつとして補修の要否あるいは程度を判断することが適切であり、中性化深さが鉄筋位置に達するまでに補修施工を行うことが重要である。

4. まとめ

- 1) 塩分量の大小と中性化深さの進行度には相関関係が認められない。
- 2) A S Rによる膨脹率が 1000×10^{-6} 程度であれば、中性化の進行度が早くなることはない。
- 3) 現時点における代表的なコンクリート構造物用補修材2種類 (完全防水型、透湿柔軟型) を設定し検討を加えたが、促進中性化期間3ヶ月後の評価では中性化の進行をほぼ防止している。
- 4) 補修材の塗布により、中性化深さの進行度が塗布前よりも減少している供試体が多く認められる。これは、補修材の塗布により外部と遮断されたため、湿分 (水分) の移動・平均化が生じ、これにつれてOHイオンが移動したため、いわゆる再アルカリ化が生じたためと考えられる。
- 5) 塩分を原因とする発錆が中性化の進行により促進されている状況が推察される。逆にいえば、塩分量がある程度多くても中性化が鉄筋位置まで達していなければ発錆量は少ない。
- 6) 内的塩害の可能性のある構造物の補修を行う場合においても、中性化程度も指標のひとつとして補修の要否あるいは程度を判断することが適切である。中性化深さが鉄筋位置に達するまでに補修施工を行うことが効果的である。

参考文献

- 1) 北後征雄・菊池保孝・小林茂広・宮川豊章：複合した原因による鉄筋腐食に関する実験的研究
コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13, No.2 pp603-608、1991.6