

論文 塩害により劣化した RC 部材の高流動コンクリートによる補修

渡辺 佳彦^{*1}・小林 孝一^{*2}・服部 篤史^{*3}・宮川 豊章^{*4}

要旨：塩害により劣化した RC 部材に対してかぶり部分を石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートを用いて補修することを想定した供試体を用い、鉄筋の自然電位・分極抵抗およびマクロセル電流を経時的に測定して、その耐久性状を評価した。その結果、石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートを打ち継いだ部材では同一 W/C の普通コンクリートを用いた場合に比べてマクロセル腐食を抑制でき、W/C の小さい高流動コンクリートを用いた場合にはさらにその効果が大きいことが明らかになった。

キーワード：塩害、断面修復、マクロセル腐食、高流動コンクリート、自然電位

1. はじめに

塩害により劣化した鉄筋コンクリート構造物の耐久性を回復させるために断面修復工法などの補修工法が適用されてきた。しかし、断面修復を行っても補修部近傍でマクロセル腐食による再劣化が生じることもあることがよく知られている¹⁾。

数年前から研究開発が進められている高流動コンクリートは、過密配筋にも対応できる自己充填性を有しているほか、ブリーディングの発生がないか、あっても非常にわずかなため、レイタンスなどにより打継ぎ部に形成される脆弱部が普通コンクリートに比べて著しく少ないことが特徴として挙げられる。従って高流動コンクリートは断面修復材として適した特性を有すると考えられるが、高流動コンクリートを断面修復に適用した研究例²⁾は少ない。

そこで本研究では、塩害により劣化した RC 部材に対してかぶり部分を石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートを用いて補修する事を想定した供試体を用い、自然電位・分極抵抗およびマクロセル電流を経時的に測定して、その耐久性状を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1 に、配合を材令 28 日圧縮強度とともに表-2 に示す。普通コンクリートについては、W/C=60%、目標スランプを 8cm、目標空気量を 4.5%に設定し、その上で、塩化物イオン(以下 Cl⁻とする)を全く混入しない配合 [NN]と、Cl⁻を練り混ぜ時に単位水量の 3%(5.5 kg/m³)混入した配合[NB]、さらにその中間をとって Cl⁻を単位水量の 1.5%(2.75kg/m³)混入した配合[NA]の 3 種類を用いた。なお、Cl⁻の混入は NaCl(市販の食塩を使用)で行い、混入した

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 比重3.15、比表面積3260cm ² /g
石灰石微粉末	比重2.73、比表面積6770cm ² /g
細骨材	川砂、比重2.57、吸水率1.80%、 F.M. 2.63
粗骨材	碎石、最大寸法15mm、比重2.64、 F.M. 6.18
AE減水剤 ^{**1}	リグニンスルホン酸系
高性能AE減水剤 ^{**2}	ポリアルキルカルボン酸エーテル系 と架橋ポリマーの複合体
AE助剤	陰イオン系界面活性剤

^{**1} 普通コンクリートに使用

^{**2} 高流動コンクリートに使用

*1 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 京都大学大学院助手 工学研究科土木システム工学専攻 工修 (正会員)

*3 京都大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)

*4 京都大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの配合および材令28日圧縮強度

配合	W/C (%)	W/(C+Lp) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						(高性能) AE減水剤* (C+Lp)×%	AE助剤 (C+Lp)×%	材令28日 圧縮強度 (N/mm ²)
				W	C	Lp	S	G	NaCl			
NN	60	60	50.0	183	305	0	867	891	4.575	0.25	0.0053	32.4
NA			49.9				863					30.1
NB			49.7				858					29.2
SL	60	32.4	50.0	170	283	242	780	800	0	2.1~2.2	0.01	34.9
SH	45	33.1	50.1	174	387	138	783	800	0	2.2	0.01	49.0

*配合NN・NA・NBにはAE減水剤を、SL・SHには高性能AE減水剤を使用(表-1参照)

NaClの増量分だけ細骨材量を減じた。一方高流動コンクリートは、普通コンクリートと同じW/C=60%の配合[SL]およびSLより強度が高いW/C=45%の配合[SH]の2種類とし、所要の自己充填性を得るために目標スランプフロー値を65cm、目標空気を4.5%とした。

2.2 供試体の作製

本研究では2種類の供試体(Type-1およびType-2)を作製した。

Type-1は、図-1に示すように、長さ70cmの鉄筋(D10)を2本、かぶり2cmとして配筋した10×10×80cmの角柱供試体である。打設方法は、1日目に補修材(Y)を中央部30cmに打設し、2日目に打継面をあらかじめ水で湿らせた後、基材(X1)・(X2)をその両端部各25cmに打ち継ぎ、3日目に脱型した。補修材はW/Cの異なる2種類の高流動コンクリートおよびCl⁻無混入の普通コンクリートの計3種類、基材は混入Cl⁻量の異なる2種類の普通コンクリートとした。作製した供試体の要因の一覧を表-3に示す。

Type-2は、図-2に示すように、長さ30cmの鉄筋(D10)を打設面および底面からのかぶりをそれぞれ2cmとして2本ずつ、計4本配筋した10×10×40cmの角柱供試体である。打設方

法は、1日目に補修材(Y)を底部5cmに打設し、2日目に打継面をあらかじめ水で湿らせた後、基材(X)をその上部5cmに打ち継ぎ、3日目に脱型した。補修材にはType-1と同様に3種類のコンクリート、基材にはCl⁻を5.5kg/m³混入した普通コンクリートを用いた。作製した供試体の要因の一覧を表-4に示す。

なお、ここで補修材を先に打設したのは、基材と補修材の位置関係を実構造物の桁部材と同一にすることを目的としたためであり、また実際の補修では逆打ちされることが多いことから、逆打ちと対応させるため、打継ぎに際しブリーディングによるレイタンスの処理を行わず、打継面を水で湿らせた程度の処理とした。またType-1・2ともに各要因につき供試体を2体ずつ作製し、塩分濃度3%(Cl⁻換算)の人工海水を毎日1回散水した。

2.3 測定項目

Type-1では、図-1に示す各鉄筋位置において、材令約120日の時点で自然電位(vs. Ag/AgCl:飽和塩化銀)および交流インピーダンス法(交流電圧±10mVp-p, 周波数10Hz~1mHz)による分極抵抗を測定した。なお交流インピーダンス法による測定結果は、電圧と電流の比で

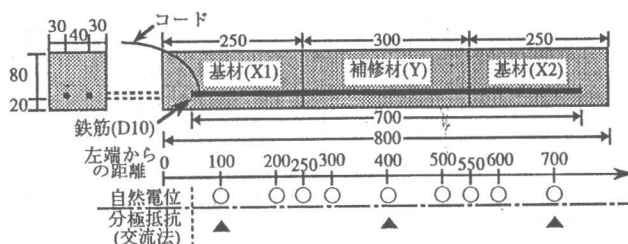


図-1 Type-1供試体の形状と測定位置 (単位:mm)

表-3 Type-1供試体要因一覧

名称	基材(X1)	補修材(Y)	基材(X2)
SL-1	NA	SL	NA
SH-1		SH	
NN-1		NN	
SL-2	NB	SL	NB
SH-2		SH	
NN-2		NN	
SL-3	NA	SL	NB
SH-3		SH	
NN-3		NN	

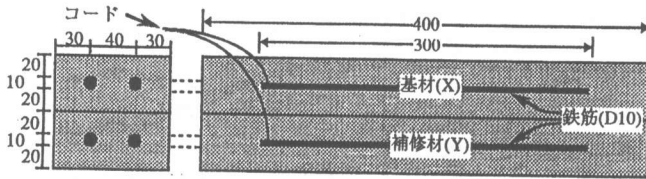


図-2 Type-2供試体 (単位: mm)

あるインピーダンス(絶対値)と両者の位相差(角度)をもとにした複素平面表示により整理した。

Type-2 では、4本の鉄筋の各中央位置における自然電位(vs. Ag/AgCl)および矩形波電流分極法(電流値 10 μ A~1mA, 周波数 0.1Hz, 0.8kHz)による分極抵抗のほか、材令約 28 日を経過した時点から、打設面(基材)側の 2本の鉄筋と底面(補修材)側の 2本の鉄筋同士を結線し、電流計によってマクロセル電流を経時的に測定した。なお、マクロセル電流を測定し始めてからは、測定時を除いて 4本の鉄筋を常時結線しておいた。

3. 実験結果および考察

3.1 鉛直打継がマクロセルに与える影響

(1) 基材部左右の Cl⁻量が同一の場合

図-1 で示した Type-1 の供試体について、左右の基材ともに Cl⁻を 2.75kg/m³ 混入した普通コンクリートとし、補修材として異なる 3種類のコンクリートを鉛直に打ち継いだ供試体の、材令約 120 日における各測定位置での自然電位および交流インピーダンスの軌跡を図-3 および図-4 に示す。ASTM C 876⁹⁾において、鉄筋の自然電位 E(V vs Ag/AgCl)に対する鉄筋の腐食状況を推定する目安は、E<-240mV ならば 90%以上の確率で腐食が生じており、E>-90mV ならば 90%以上の確率で腐食が生じておらず、その間是不確定領域としている。また、交流インピーダンスの軌跡から得られる半円の直径は腐食速度に直接関与している分極抵抗に対応し、また分極抵抗 R_p(k Ω)と鉄筋の表面積 A(cm²)の積の逆数(R \times A)⁻¹ が大きいほど腐食電流の値が大きくなり、腐食傾向が進む。

いずれの供試体も基材部と補修部とで自然電

表-4 Type-2供試体要因一覧

名称	基材(X)	補修材(Y)
SL-4	NB	SL
SH-4		SH
NN-4		NN

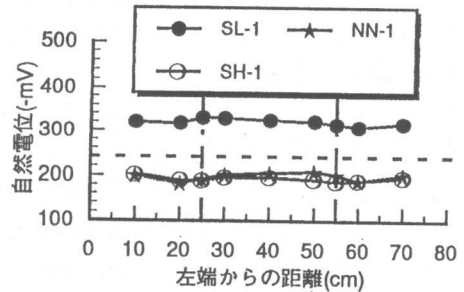


図-3 材令約120日の自然電位(1)

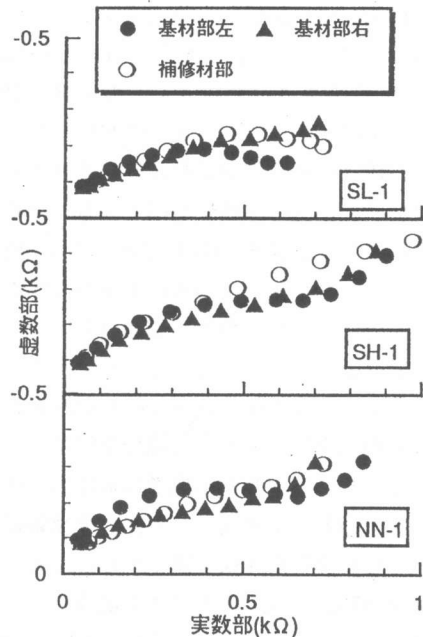


図-4 材令約120日の交流インピーダンス軌跡(1)

位にあまり差が見られない。また補修材として W/C=60%の高流動コンクリートを用いた供試体は、W/C=45%の高流動コンクリートや W/C=60%の普通コンクリートに比べて自然電位が卑な値を示している。しかし交流インピーダンスの軌跡から得られる半円はいずれの供試体のどの位置においてもほぼ同じ径であり、このことから基材コンクリートの Cl⁻量が 2.75kg/m³ の場合はマクロセル腐食は生じてい

ないと考えられる。

一方、左右の基材ともに Cl^- を 5.5kg/m^3 混入した普通コンクリートとし、補修材として異なる3種類のコンクリートを鉛直に打ち継いだ供試体の、材令約120日における各測定位置での自然電位および交流インピーダンスの軌跡を図-5および図-6に示す。

基材コンクリートの Cl^- 量が 2.75kg/m^3 の場合と異なり、自然電位の値は供試体によって差はあるもののすべての位置において腐食領域に達している。また、 W/C の異なる2種類の高流動コンクリートを補修材に用いた場合、基材部左右の交流インピーダンスの軌跡はほぼ等しく、これらに比べて補修部での交流インピーダンスの軌跡から得られる半円は大きい。しかし、 $\text{W/C}=60\%$ の普通コンクリートを補修材に用いた場合、交流インピーダンスの軌跡から得られる半円の径は基材右側が基材左側に比べて小さく、腐食速度が基材左側に比べて大きくなる傾向を示している。両側の基材部は同じ Cl^- 量を混入したコンクリートであるにも関わらずこのような違いが得られるのは、普通コンクリートは高流動コンクリートに比べてブリーディング量が大きいため打継面に脆弱な部分が形成され、塩水散水養生中にこの部分に塩分が浸透し、これによってマクロセルが形成される可能性があることも一因として考えられるが、今後鉄筋のはつりだしも含めた詳細な調査が必要であろう。

(2) 基材部左右の Cl^- 量が異なる場合

図-1で示した Type-1 の供試体について、 Cl^- を左側の基材に 2.75kg/m^3 、右側に 5.5kg/m^3 に混入した普通コンクリートとし、補修材として異なる3種類のコンクリートを鉛直に打ち継いだ供試体の、材令約120日における各測定位置での自然電位の測定結果および交流インピーダンスの軌跡を図-7および図-8に示す。

供試体位置で比較すると、補修材の異なる3種類の供試体ともに、自然電位は右に行くほど卑となっており、 Cl^- 量が多いほど自然電位が卑な値を示している。また、交流インピーダン

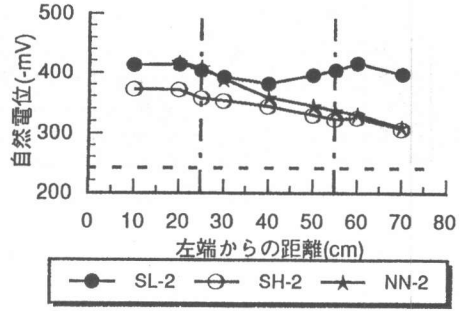


図-5 材令約120日の自然電位(2)

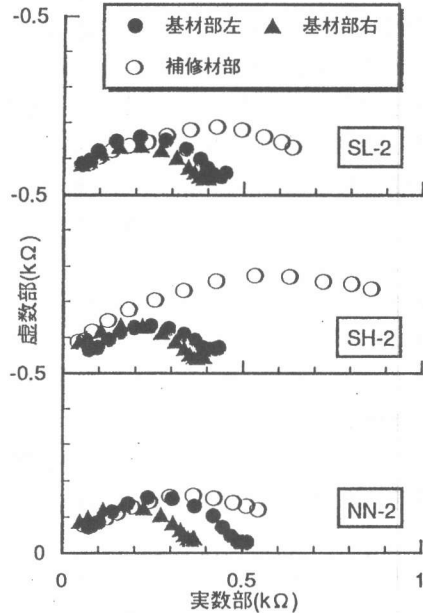


図-6 材令約120日の交流インピーダンス軌跡(2)

スの軌跡から得られる半円も基材位置の Cl^- 量が多いほど小さく、腐食速度が大きくなる傾向を示している。さらに、 W/C の異なる2種類の高流動コンクリートを補修材に用いた場合、 W/C の大きい方が供試体のいずれの位置においても自然電位は卑な値を示し、交流インピーダンスの軌跡から得られる半円の大きさも小さく、腐食速度が大きい傾向を示している。しかし、 $\text{W/C}=60\%$ の普通コンクリートを補修材に用いた場合、補修材位置における交流インピーダンス法で求めた半円の軌跡は Cl^- を 2.75kg/m^3 混入した基材位置よりも小さく、腐食速度が大きい傾向を示す結果となった。この原因としては(1)で述べた普通コンクリートの打継ぎによる

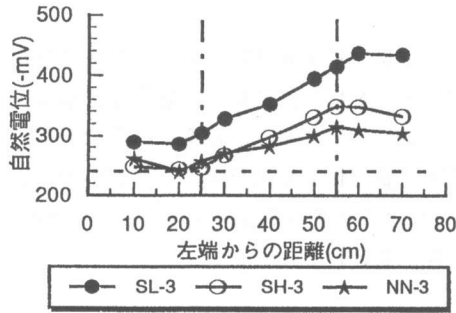


図-7 材令約120日の自然電位(3)

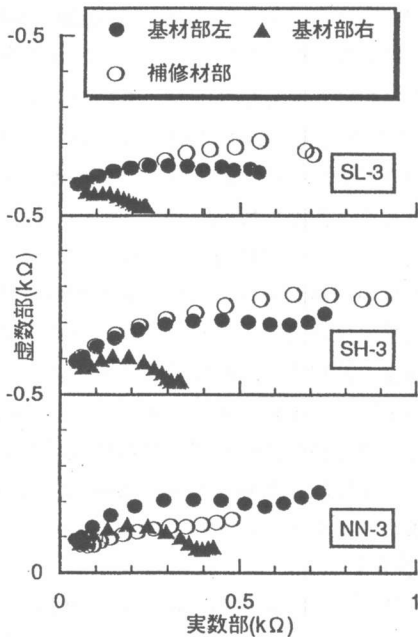


図-8 材令約120日の交流インピーダンス軌跡(3)

マクロセルの形成や、各部材の Cl^- の濃度差勾配に起因することなどと考えられる。

3.2 水平打継がマクロセルに与える影響

図-2 で示した Type-2 の供試体について、基材として Cl^- を $5.5kg/m^3$ 混入した普通コンクリートとし、補修材として異なる3種類のコンクリートを水平に打ち継いだ供試体の、自然電位・矩形波電流分極法による分極抵抗から求めた腐食速度指標および材令約28日以降におけるマクロセル電流の経時変化をそれぞれ図-9～図-11 に示す。なお電流値は、補修材部から基材部に流れる電流を正とする。

いずれの供試体も短期では基材部(打設面側)

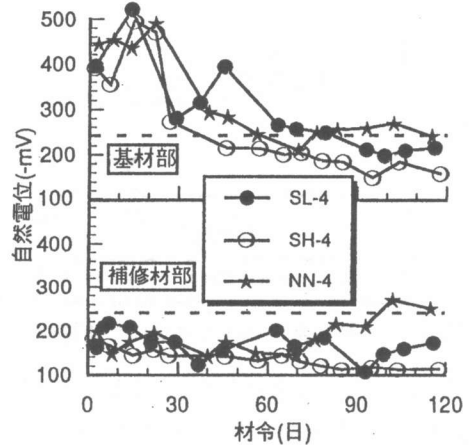


図-9 水平打継供試体の自然電位

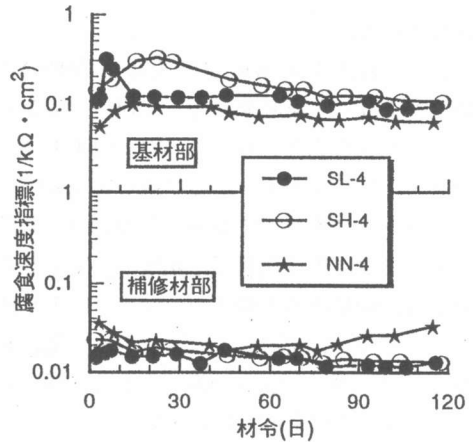


図-10 水平打継供試体の腐食速度指標

の自然電位は補修材部(底面側)に比べてかなり卑な値を示しているが、基材部の鉄筋と補修材部の鉄筋同士を結線した時点からは、基材部と補修材部との自然電位の差が小さくなっている。一方腐食速度指標は、 W/C の異なる2種類の高流動コンクリートを補修材として用いた場合にはどちらも暴露期間が経過しても基材部・補修材部ともほぼ一定であるが、 $W/C=60\%$ の普通コンクリートを補修材として用いた場合、基材部はほぼ一定であるにも関わらず補修材部は材令約80日を過ぎたあたりから大きくなる傾向を示し、この時点で塩分が鉄筋近傍に到達したと考えられる。筆者らの研究では、石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートは同じ W/C の普通コンクリートに比べて細孔構造が緻密であ

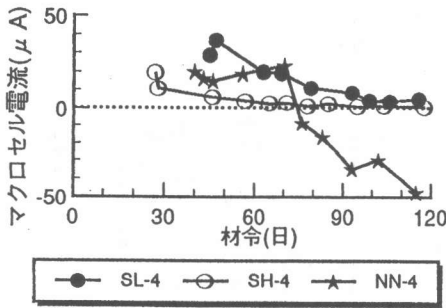


図-11 水平打継供試体のマクロセル電流

ることから Cl⁻の浸透が小さくなるとしており⁹⁾、高流動コンクリートは同一 W/C の普通コンクリートに比べて鉄筋近傍への Cl⁻の到達が遅いと推測される。

マクロセル電流は W/C の異なる 2 種類の高流動コンクリートを補修材として用いた場合のどちらもが正であり、中でも W/C の小さい高流動コンクリートの方が小さな値となっている。カソード反応によって消費される酸素の供給量が全体のマクロセル腐食反応速度を支配するはずであり、微細構造が緻密なコンクリートを補修材として用いた部材ほど、マクロセル電流が小さく、マクロセル腐食が抑制されると考えられる。一方、W/C=60%の普通コンクリートを補修材として用いた場合には、材令約 80 日を経過した時点、つまり補修材部の腐食速度指標の値が増加し始めた時点から負の値となり、しかも電流量の絶対値は高流動コンクリートを補修材として用いた場合に比べて大きくなった。W/C=60%の普通コンクリートを補修材として用いた供試体では、各々の鉄筋間を流れる電流の向きを調査したところ、補修材中の 2 本の鉄筋のうちの 1 本が、当初カソードとして作用していたにもかかわらず材令約 80 日を経過した時点からアノードとして作用しており、それに伴って基材中の 2 本の鉄筋と補修材中のもう 1 本の鉄筋の計 3 本がこの鉄筋に対するカソードとして作用していた。従って、カソード部の表面積が増加したため、カソード反応に必要な酸素の供給量が増加し、マクロセル腐食反応がより促進されていると思われる。

以上の結果、石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートを補修材料に用いた場合は普通コンクリートに比べてマクロセル電流を抑制でき、自然電位を貴に保つ効果があることがわかる。さらに、W/C の小さい高流動コンクリートほど、その効果が大きいといえよう。

4. 結論

[1]基材コンクリートの Cl⁻量が 2.75kg/m³の部材に鉛直打継ぎを行った場合、マクロセル腐食は生じていないと考えられるが、基材コンクリートの Cl⁻量が 5.5kg/m³の部材に普通コンクリートで鉛直打継ぎを行った場合、マクロセル腐食が発生したと推測される。

[2]補修材を水平に打ち継いだ場合、石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートを補修材料に用いた場合は普通コンクリートに比べてマクロセル腐食を抑制でき、W/C の小さい高流動コンクリートほど、その効果が大きいと思われる。

今後、はり型供試体を用いて載荷試験をおこない、耐荷性状の面からマクロセル腐食についての考察を加える予定である。

[参考文献]

- 1)例えば、C. E. Stewart: Consideration for repairing salt damaged bridge decks, Journal of ACI, Vol.72, No.12, pp.685-713, 1975.12
- 2)河井 徹ほか: 高流動コンクリートの打継ぎ強度に関する実験的研究, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集, V-190, pp.380-381, 1994.9
- 3)岡田 浩司: 補強工事に適した高流動コンクリートの開発と適用例, 建造物の診断と補修に関する第 8 回技術・研究発表会論文集, pp.63-67, 1996.11
- 4)ASTM C 876: Half Cell Potential of Reinforcing Steel in Concrete, 1977
- 5)小林 孝一ほか: 石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートへの塩分浸透性について, 高流動コンクリートシンポジウム論文報告集, pp.123-128, 1996.3