

高流動コンクリートを打ち継いだ 塩害コンクリート部材の鉄筋腐食特性について

小林孝一¹・渡邊佳彦²・服部篤史³・宮川豊章⁴

¹正会員 工修 京都大学大学院助手 土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
(現在：中部大学講師 土木工学科/〒487-8501 春日井市松本町1200)

²正会員 工修 西日本旅客鉄道株式会社 金沢支社 (〒930-0001 富山市明輪町1-227)

³正会員 工修 京都大学大学院助手 土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

本研究では、塩害劣化構造物およびそれを高流動コンクリートで断面修復補修した場合を想定し、その鉄筋腐食性状について、電気化学的手法を用いて検討を行なった。その結果、普通強度の高流動コンクリートは同一強度の普通コンクリートと比較して鉄筋防食性能に優れており、塩害補修に高流動コンクリートを用いた場合には、マクロセル腐食による再劣化が抑制されるが、補修時に塩分を適切に取り除かないと、かえってマクロセル腐食が大きくなる可能性があることが明らかになった。

Key Words : corrosion, chloride, repair, half-cell potential, polarization resistance, macro-cell corrosion, self-compacting concrete

1. はじめに

コンクリート構造物は本来、耐久性に優れているが、一方では近年コンクリート構造物の早期劣化が顕在化しており、これらの劣化の原因のひとつとして鋼材の腐食をあげることができる。鋼材の腐食は腐食ひび割れの発生した段階で目視によっても発見可能となるが、その場合には腐食はすでに進行しており、さらに腐食ひび割れの発生によって腐食が加速されることが多い。また腐食が進行するほど補修による対策も困難となるので、コンクリート構造物に対してモニタリング等を用いた適切な維持管理を行ない、腐食ひび割れによって鋼材の腐食が顕在化する前にそれを把握することが極めて重要である。

また既に鋼材の腐食が生じてしまったコンクリート構造物においては、場合によっては何らかの補修を行なうことになるが、例えば断面修復を行なう場合には、腐食メカニズムを正しく理解、把握した上で適切な対処を行わないと、再び腐食が生じ、マクロセル腐食によってかえって劣化が加速されることも起こりうる。

そこで本研究では、塩害によって劣化した構造物を高流動コンクリート、あるいは普通コンクリートで断面修復を行なうことを想定し、その際に塩分濃度差によって生じる鉄筋のマクロセル腐食について、電気化学的手法を用いて¹⁾調査、検討を行なうことを目的とした。

ここで高流動コンクリートとは、打設時に締め固めを行なわなくとも自重のみで型枠の隅々まで行きわたることのできる、自己充填性に優れたコンクリートである。例えば塩害により劣化した橋梁等において断面修復を行なう場合、その打設は逆打ち、または狭窄部に対する打設となることが多いが、高流動コンクリートはその優れた変形、流動性能のために、このような場合での適用が極めて有効であると考えられる。

また、高流動コンクリートはブリーディングをほとんど生じないことが特徴であり、そのため付着が良好、あるいは鉄筋、骨材界面が緻密であるために物質透過抵抗性に優れる²⁾。反面、既存部材に打ち継いだ場合には、鉄筋腐食に対して従来のコンクリートとは異なる影響を与える可能性もあると考え

表-1 コンクリートの示方配合

	W/C (%)	W/(C+Lp) (%)	s/a (%)	単位質量 (kg/m ³)						減水剤 (C+Lp)×%	AE助剤 (C+Lp)×%	材齢28日での圧縮強度 (N/mm ²)
				W	C	Lp	S	G	NaCl			
NN	60	60	50.0	183	305	0	867	891	0	0.25*	0.0053	32.4
N15			49.9	183	305		864	892	4.582			30.1
N30			49.7	184	306		861	894	9.181			29.2
SL	60	32.4	50.0	170	283	242	780	800	0	2.1**	0.01	34.9
SH	45	33.1	50.1	174	387	138	783		2.2**	0.01	49.0	

* AE減水剤 ** 高性能AE減水剤

表-2 材料の性質

セメント	普通ポルトランドセメント 比重：3.15，ブレン比表面積：3260cm ² /g
石灰石微粉末	CaCO ₃ 含有率：95%以上，比重：2.73，ブレン比表面積：6770cm ² /g
細骨材	川砂，比重：2.57，吸水率：1.80%，粗粒率：2.63
粗骨材	碎石，比重：2.64，最大寸法：15mm，粗粒率：6.18
AE減水剤	リゲニンスルホン酸化合物
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
AE助剤	陰イオン系界面活性剤

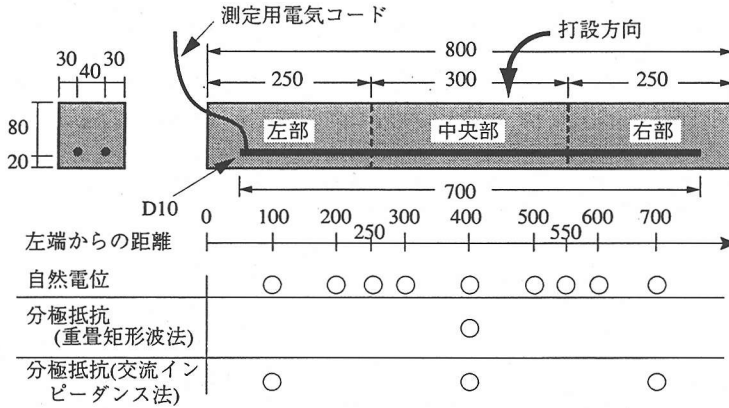


図-1 鉛直打継目供試体 (単位: mm)

られる。

2. 実験概要

(1) 使用材料と配合

用いた配合を表-1に，その使用材料を表-2に示す。普通コンクリートと2種類の高流動コンクリートを用いた。

普通コンクリートは塩害を想定し，塩化物イオン (Cl⁻) を練混ぜ時に単位水量の1.5% (2.75kg/m³) 混入したもの (N15)，3.0% (5.5kg/m³) 混入したもの (N30)，全く混入しないもの (NN) の3種類とした。これらの塩分量は，従来複数の研究者によって報告されている鉄筋発錆に対するコンクリート中の塩分量のしきい値である1.2~2.5kg/m³を若干上回る量と，その2倍の量に相当する⁸⁾⁹⁾。Cl⁻の混入はNaCl

で行い，NaClの増量分は単位細骨材量を減じた。ここで，単位細骨材量を減じたのは，海砂に対する塩分の付着を想定した場合と実験条件を同一にするためであるが，水にNaClを溶解させた場合には水の体積は変化しないため，表-1には1m³あたりに換算したコンクリートの体積を示した。

高流動コンクリートは石灰石微粉末を用いた粉体系高流動コンクリートで，普通コンクリートと同一水結合材比 (W/C=60%) で普通強度のもの (SL) と，低水結合材比 (W/C=40%) で比較的高強度のもの (SH) の2種類を用いた。

RC構造物に塩害の発生する恐れのある海洋コンクリートの場合には，水セメント比を少なくとも50%以下とすることが土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] に定められているが¹⁰⁾，施工時における分離の発生等によって，建設されたRC部材が必ずしも

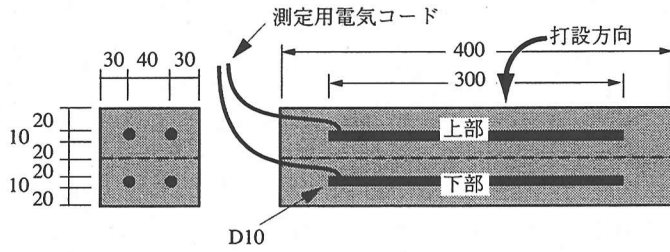


図-2 水平打継目供試体 (単位: mm)

表-3 鉛直打継目供試体の配合

	左	中央	右	
N15-NN-N15	N15	NN	N15	普通コンクリート NNを中央部に使用
N15-NN-N30			N30	
N30-NN-N30			N30	
NN-SL-N15	NN	SL	N15	普通強度の高流動 コンクリートSLを 中央部に使用
N15-SL-N15			N15	
NN-SL-N30			NN	
N15-SL-N30			N15	
N30-SL-N30	N30	N30	N30	
NN-SH-N15	NN	SH	N15	高強度の高流動 コンクリートSHを 中央部に使用
N15-SH-N15			N15	
NN-SH-N30			NN	
N15-SH-N30			N15	
N30-SH-N30			N30	
NN	NN			打継目の影響の 検討用
NN-NN-NN	NN	NN	NN	
N15	N15			
N30	N30			
N30-N30-N30	N30	N30	N30	
SL	SL			
SL-SL-SL	SL	SL	SL	
SH	SH			

意図した配合となっていないことが考えられる。また、ここでは試験を促進することも目的として、W/C=60%の配合も用いることとした。

(2) 供試体

本研究では2種類の供試体を作製した。

鉛直打継目供試体(図-1)は、桁部材下面のパッチング補修により同一部材内で塩分濃度差が生じた場合を想定した100×100×800mmの供試体で、鉛直打継目を有し、測定用コードを接続した長さ700mmの黒皮つきD10鉄筋を2本、鉄筋径の2倍に相当するかぶり20mmで配筋した。測定用コード(14Ω/m vs100V、長さ500mm)は、鉄筋の端部をグラインダーで研磨して黒皮を取り除いた部分にハンダ付けした上を自己融着テープとエポキシ樹脂で被い、この部分で水分が鉄筋に達し腐食が生じるのを防いだ。同様に鉄筋の切断面もすべてエポキシ樹脂で被

表-4 水平打継目供試体の配合

	上	下	
N30-SL	N30	SL	打継ぎあり
N30-SH		SH	
N30-NN		NN	
NN	NN		一体打設
N30	N30		

い、腐食が切断面で生じるのを防いだ。かぶりの確保には、スペーサを用いず、アクリル板とテフロン線を用い、打設後これらを静かに除去することによって行なった。

供試体中央部の長さ300mmの部分には配合NN, SL, SHを打設した。供試体の両端部分それぞれ250mmには配合NN, N15, N30を打設した。打設方法は、1日目に中央部300mmの打設を行ない、2日目に中央部コンクリートの打継面を霧吹きで湿らせた後、その左と右に各250mm打継ぎ打設を行ない、3日目に脱型した。

供試体一覧を表-3に示すが、各2体ずつ作製した。また、打継目からの塩化物イオンの浸透や打継目でのコンクリート抵抗の変化が予想され、結果に影響を与える恐れがある。そこで、打継目を有せず、同一配合で一体打設を行なった供試体と、中央部と左右両端部で同一の配合のコンクリートを使用するが、他の供試体と同様に2日にわたって打設を行ない打継目を設けた供試体も作製し、検討を行なった。

水平打継目供試体(図-2)は、マクロセル腐食とマイクロセル腐食を分離して検討を行うために作成した100×100×400mmの供試体で、水平打継目を有し、鉛直打継目供試体と同様に測定用コードを接続した長さ300mmのD10鉄筋を、打設面および底面からのかぶり20mmとしてそれぞれ2本ずつ、計4本配筋した。供試体の下部50mmには配合NN, SL, SHを打設した。また供試体上部50mmには、塩分を含む配合N30を打設した。打設方法は、1日目に供試体下部を打設し、2日目にあらかじめ打設面を霧吹きで湿らせた後、その上に供試体上部を打継ぎし、3日目に脱型

した。

供試体一覧を表-4に示すが、各2体ずつ作製した。また、鉛直打継目供試体と同様に、打継ぎを行わずに一体打設した供試体も作製した。

鉛直打継目供試体と水平打継目供試体とも、脱型後、大気温中にある実験室内で、塩分濃度3% (Cl⁻換算)の塩水を一日一回、鉛直打継目供試体と水平打継目供試体、合わせて52体の供試体に合計で約0.012m³散水した。脱型以後も供試体は常に打設面を上、木材のスペーサ上に静置したが、供試体底面は常に湿潤状態となった。

なお、本研究において打継ぎ面に対してチッピング等の通常の打継ぎ処理を行なわなかったのは、高流動コンクリートは打継目において良好な附着強度を有するため¹¹⁾、また通常の施工が困難な個所に適用されることが多いため、断面修復に際して、このような通常の処理を行わずに打設を行なう場合も考えられるためである。さらに、桁部材の補修に関しては、逆打ち工法が多く用いられると考えられるため、打継ぎ部に生じるブリーディングによるレイタンスの処理も困難であると考えられる。

また、水平打継目供試体において、断面補修材に相当する塩分を含まない部分を先に打設したのは、実際の構造物における桁補修の場合と、既存部材と補修部の上下位置関係を同一にするためである。鉛直打継目供試体において塩分を含まない部分を先に打設したのは、水平打継目供試体と打設順序を同一にするためである。

なお、表-1に示した各配合のコンクリートの材齢28日での圧縮強度は、これら供試体と同様の脱型、散水を行なったφ100×200mmの供試体から得られたものである。

(3) 測定項目

鉛直打継目供試体、水平打継目供試体のそれぞれの鉄筋の自然電位、分極抵抗を測定した。

鉛直打継目供試体は図-1に示したように、100mm間隔および打継目位置での鉄筋の自然電位を測定した。照合電極には飽和塩化銀電極 (Ag/AgCl) を用い、鉄筋のかぶり側から測定を行なった。また重量二重矩形波法 (電流値: 10μA~1mA, 周波数: 0.1Hzと800Hz) により鉄筋の分極抵抗を測定した。ただし分極抵抗測定時には100×800mmの銅板を湿布を介して供試体のかぶり側の表面に密着させ対極とし、照合電極は供試体側面の鉄筋中央部に設置して (図-1参照) 測定を行なった。測定は第1日目の打設から数えて材齢3日, 5日, 7日, 14日, 以降は1~2週間間隔で行なった。

また材齢160日の時点で、交流インピーダンス法 (交流電圧: ±10mVp-p, 周波数: 10Hz~10mHz) による分極抵抗も測定した。測定位置は図-1に示したとおりで、主対極とそれを囲むガード対極の二重円盤からなる二重対極を用いてかぶり側から測定を行なった¹²⁾。

水平打継目供試体は、4本の鉄筋に接続されたコードを測定時以外は常時結線して、マクロセル腐食電流が流れるようにした。また、それぞれの鉄筋の中央位置での自然電位を、飽和塩化銀電極 (Ag/AgCl) を照合電極として、鉄筋のかぶり側から測定した。さらに100×400mmの銅板を対極として、湿布を介して供試体のかぶり側の表面に密着させ、鉛直打継目供試体と同様の方法で重量二重矩形波法 (条件は鉛直打継目供試体と同様) による分極抵抗を測定した。材齢160日の時点では交流インピーダンス法 (条件は鉛直打継目供試体と同様) を用い、鉄筋中央部での分極抵抗を測定した。これらの測定は、各鉄筋のコードの結合を解除した直後に行なった。

また材齢28日を経過した時点から供試体下部の鉄筋から供試体上部の鉄筋に流れるマクロセル腐食電流量を、無抵抗電流計で測定した。

鉛直打継目供試体、水平打継目供試体ともに材齢160日の時点で、各2体ずつの供試体のうち1体を解体し鉄筋をはつりだして、鉄筋の腐食状況をスケッチし、鉄筋の腐食面積率を求めた。さらにJCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」¹³⁾により、鉄筋の腐食減量を測定した。

さらに、水平打継目供試体の供試体N30-NNおよび供試体NNにおいて、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」¹³⁾に従い、鉄筋をはつり出した時点での供試体中の全塩分および50℃温水可溶性塩分の測定を電位差滴定法により行なった。ただし、試料の採取にはドリル法を用い¹⁴⁾、各測定における試料量は1gとした。

3. 実験結果および考察

(1) 鉄筋の腐食状況

a) 鉛直打継目供試体

鉛直打継目供試体からはつりだした鉄筋の腐食減量を、鉄筋の表面積あたりに換算した値 (g/cm²) で図-3に示す。なお、ここで示した腐食減量は、鉄筋全面の平均値である。また得られた腐食減量は、クエン酸二アンモニウム ((NH₄)₂HC₆H₅O₇) による鉄筋黒皮の溶解の影響を含んでいると考えられるため、腐食のほとんど生じていなかった鉛直打継目供試体SHから得られた腐食減量を差し引くことにより

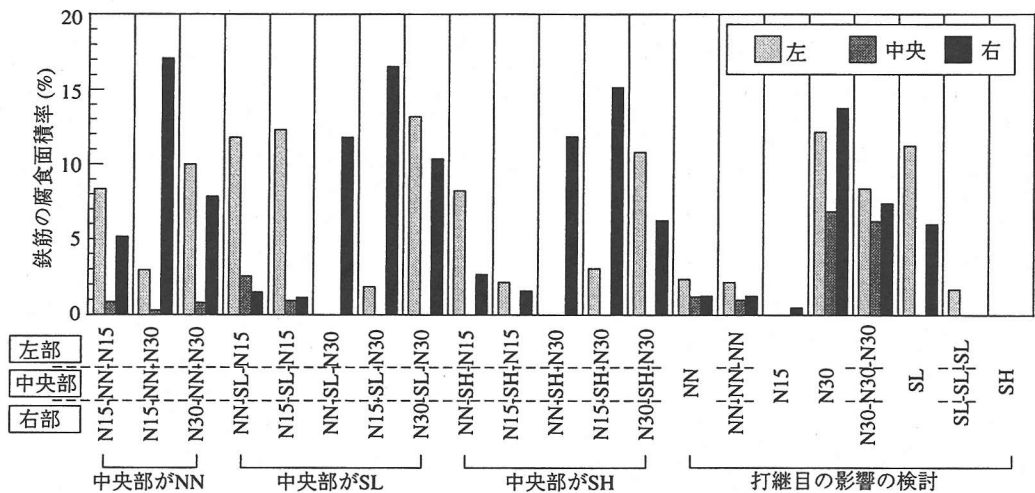


図4 鉄筋の腐食面積率 (鉛直打継目供試体)

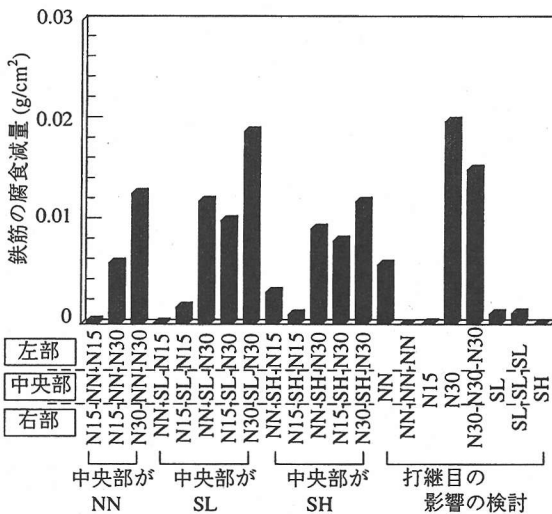


図3 鉄筋の腐食減量 (鉛直打継目供試体)

補正したものを示している。

また鉛直打継目供試体からはつりだした鉄筋の腐食面積率を、それぞれ左部、中央部および右部の別に図-4に示す。ただし、打継目を有しない供試体の場合も、鉄筋の中央300mmの部分と両端それぞれ200mmづつの部分の腐食面積率を別個に示した。

供試体SL-SL-SLとSL、N30-N30-N30とN30、NN-NN-NNとNNをそれぞれ比較すると、塩分が供試体中に浸透する欠陥部となりうる打継目を有する供試体よりも、むしろ打継目を有しない配合の方が腐食減量あるいは腐食面積率が大きいという結果になった。本研究では供試体を定常状態に置かず、塩水を散布するという手法を用いたため、供試体間で塩分の浸透に差が出たものと考えられるが、いずれにせ

よ、これら供試体に関しては目視による腐食状況の観察によっても、打継目付近の鉄筋に腐食が集中して見られた例はほとんどなかったため、散水による外来塩分が打継目から集中的に供試体内部へ浸透してはいないと考えられる。したがって本研究の結果はおおむねそれぞれの配合のコンクリートの固有の特性を反映したものであると考えられる。

また高流動コンクリートの打設時には振動締めを行っていないにもかかわらず、打継目からの塩分浸透が少ないと考えられることから、高流動コンクリートの優れた自己充填性によって、打継目の組織が密実となっているものと考えられる。

供試体中央部に用いたコンクリートの種類にかかわらず、供試体左右部に練混ぜ時に塩分を単位水量の3% (Cl⁻換算) 混入した配合N30を用いた供試体の腐食減量、およびその供試体の中でも配合N30を打設した部分の鉄筋の腐食面積率が大きくなっている。したがって、これら供試体における鉄筋の腐食減量の大部分は配合N30を打設した供試体左右部の鉄筋の腐食によるものである。

それに対し、塩分を単位水量の1.5% (Cl⁻換算) 混入した配合N15を供試体左右部に用い、配合N30を含まない供試体の腐食減量は、供試体左右部、中央部ともに練混ぜ時に塩分を混入していない供試体の腐食減量と大きな差はなかった。しかし、配合N15を打設した部分の鉄筋の腐食面積率は、塩分無混入部分の鉄筋と比較して大きく、配合N30の部分の腐食面積率とほとんど同じほど大きいものもあった。従来、コンクリート中の鉄筋の腐食が激しくなる塩分量のしきい値は、コンクリート質量に対して1.2~2.5 kg/m³とされている⁸⁾⁹⁾。本研究で用いた配合N15の塩分

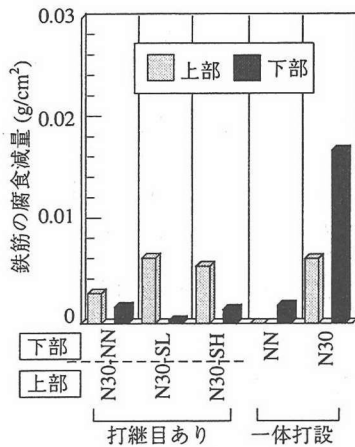


図-5 鉄筋の腐食減量 (水平打継目供試体)

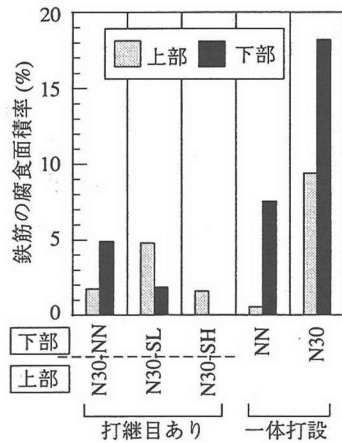


図-6 鉄筋の腐食面積率 (水平打継目供試体)

量は 2.75kg/m^3 に相当し、この値を若干上回っており、腐食が生じてはいるが、腐食減量が小さく、現時点ではそれほど激しい腐食は生じていない。ただし、すでに塩分によってこの部分の鉄筋の不動態被膜は破壊されていると考えられることから、今後この部分の腐食の進行が激しくなることも予想されるため、その経過を継続して検討することが必要であると考えられる。

また塩分濃度の異なるコンクリートを打ち継いだ場合には、供試体左右部側の打継目に隣接する鉄筋位置で腐食が生じている場合が多くみられた。隣接するコンクリートの塩分濃度が異なる場合には、鉄筋にマクロセル腐食が生じ、さらにその腐食は打継目近傍に生じることが報告されている¹⁵⁾¹⁶⁾。また前述のように打継目そのものからの供試体内部への外来塩分の進入はそれほど多くないと考えられるために、本研究で塩分濃度差を有する供試体で観察された打継目近傍の腐食も、塩分濃度差により生じたマクロセル腐食によるものであると考えられる。

さらに供試体中央部に普通コンクリートNN、普通強度の高流動コンクリートSLを用いた場合には、逆に供試体左右部側の打継目近傍にも鉄筋腐食が観察される場合があった。塩分を含む供試体左右部から塩分が濃度拡散によって供試体中央部側に移動し、この部分の鉄筋に腐食が生じた可能性が考えられる。

供試体中央部に低水セメント比の高流動コンクリートSHを用いた供試体は、供試体中央部の鉄筋の腐食面積率がいずれの場合にも0%であることから、このコンクリートは鉄筋の防食性能が高いといえる。ただし、それらの供試体の供試体左右部では鉄筋の腐食面積率、腐食減量ともに、他の配合を供試体中央部に用いた場合と同様の値となっていること

から、塩害構造物の補修を行なう際には、塩分が鉄筋に発生が生じる濃度以上に含まれている部分を残らず除去したうえで断面修復を行なうことが、きわめて重要であるといえよう。

普通強度の高流動コンクリートSLを供試体中央部に用いた供試体は、供試体中央部の鉄筋に若干の腐食が認められた。塩水の散水によって、供試体の鉄筋表面まで塩分が到達したため、あるいは供試体左右部の塩分が濃度拡散によって供試体中央部に移動したためであると考えられ、その腐食面積率は塩分を含まない普通コンクリートNNを供試体中央部に用いたものと同様であった。ただし、供試体中央部に普通コンクリートNNを用いたものは、すべての供試体において供試体中央部に鉄筋腐食が生じていたのに対し、高流動コンクリートSLを用いたものは、腐食面積率が0%のものもあった。

同一水セメント比で比較した場合、石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートは普通コンクリートよりも遮塩性に優れることが報告されている⁷⁾。したがって、打設時には塩分を含まない供試体中央部においては、高流動コンクリートSLを用いたものは、普通コンクリートNNを用いたものよりも、若干腐食の発生が遅くなったものと考えられる。

b) 水平打継目供試体

水平打継目供試体からはつり出した鉄筋の腐食減量を図-5に示す。ただし図-3と同様に、腐食のほとんど生じていなかった水平打継目供試体NNの下部から得られた腐食減量を差し引くことにより補正を行なった。また水平打継目供試体からはつり出した鉄筋のそれぞれ上部と下部から得られた腐食面積率を図-6に示す。

配合N30と打継ぎを行なった供試体は、塩分が当初から存在するN30側(上部)の鉄筋の腐食減量が大き

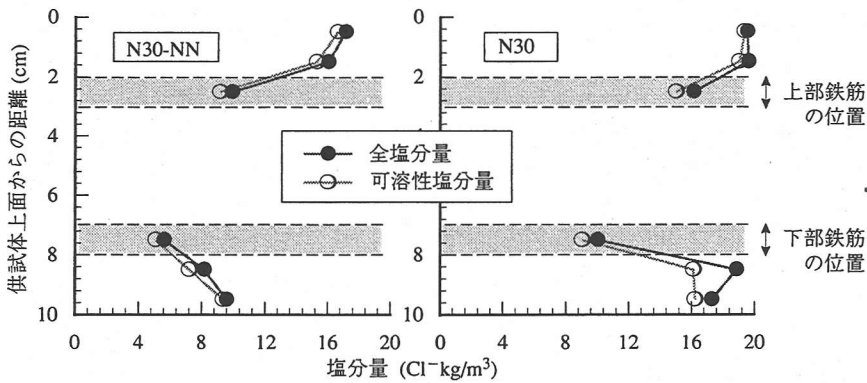


図-7 塩化物イオン量の分布 (水平打継目供試体)

いという結果になった。また供試体N30-SL, N30-SH, N30とも塩分を混入した上部側の鉄筋の腐食減量はほぼ一致し、供試体下部のコンクリート配合の違いが供試体上部の鉄筋の腐食に与える顕著な影響はみられなかった。

一方、作製時の供試体中の塩分濃度が均一である供試体NNと供試体N30は、供試体下部の鉄筋の方が腐食減量が大きいという結果になった。ここで、供試体N30-NNと供試体NNに対して行なった材齢160日の時点での塩分量分析の結果を図-7に示す。どちらの供試体も鉄筋位置における塩分量は、供試体の下部の方が少なかった。

にもかかわらず供試体NNにおいて供試体下部の方が鉄筋の腐食量が大きくなったのは、「2.実験概要」で述べたように、打設面側から散布した塩水が供試体底面に滞留し、この部分が常に湿潤状態に置かれ、そのため供試体下部の鉄筋の不動態被膜が外部からの塩分の進入によって破壊された後は、供試体上部よりも腐食が進行しやすい環境となったためであると考えられる。また供試体上部は下部と比較してカソード反応に必要な酸素の供給量も多い環境となり、マクロセル腐食のカソードとして作用したものと考えられる。

腐食面積率に関しても、供試体N30-NNを除いて、腐食減量と同様の傾向が見られ、打継目を有する供試体は供試体上部の方が鉄筋の腐食面積率が大きく、一体打設を行なったものに関しては供試体下部の鉄筋の方が腐食面積率が大きかった。

しかし、供試体N30-NNに関しては、供試体下部の鉄筋の腐食減量が、他の打継ぎを行なった供試体と比べて大きいに加え、鉄筋の腐食面積率も供試体下部の方が供試体上部よりも大きかった。供試体の下部のコンクリートには、打設時には塩分が含まれていないため、この腐食は散布された外来塩分によるものであると考えられる。上記のように、鉄筋の

不動態被膜が破壊された場合には、供試体の底面側の方が腐食がより進行しやすい環境にあると考えられるが、普通コンクリートの塩分浸透に対する抵抗性が高流動コンクリートより劣るため⁸⁾、供試体下部の不動態被膜が早期に破壊され、この部分の鉄筋の腐食量が大きくなったものと考えられる。

また、供試体N30-SHの場合には、供試体下部、すなわち低水セメント比の高流動コンクリートSHを用いた部分でも腐食減量は $0\text{g}/\text{cm}^2$ ではなかった。しかし、この部分では腐食は目視では観察されず、腐食面積は0%であるため、実際には腐食は生じていないと見做すのが妥当であると考えられる¹⁷⁾。

同一水結合材比の普通コンクリートNNと高流動コンクリートSLを供試体下部に用いた供試体N30-NNとN30-SLを比較すると、供試体上部（配合N30を用いた部分）の腐食量は、高流動コンクリートを用いた供試体N30-SLの方が大きく、供試体下部（配合NN, SL側）の腐食量は普通コンクリートを用いた供試体N30-NNの方が大きい。このような大小関係となった理由については、次項にて考察を行う。

(2) マクロセル腐食の検討 (水平打継目供試体)

a) マクロセル腐食電流

水平打継目供試体におけるマクロセル腐食電流量の経時変化を図-8、図-9に示す。供試体N30を除き、材齢初期においてはいずれの供試体においても電流値は正の値を示しており、同一配合のコンクリートを打ち継いだ供試体NNも含めて供試体下部をカソード、供試体上部をアノードとしてマクロセル腐食反応が生じていることが推定される。しかし、供試体下部に普通コンクリートを用いた供試体N30-NNは、材齢40～80日で電流の向きが逆転し、それまでマクロセル腐食のカソードとして作用していた供試体下部がアノードとして作用し始めた。しかもその電流量はそれ以前のものと比較して大きい。供試体N30-

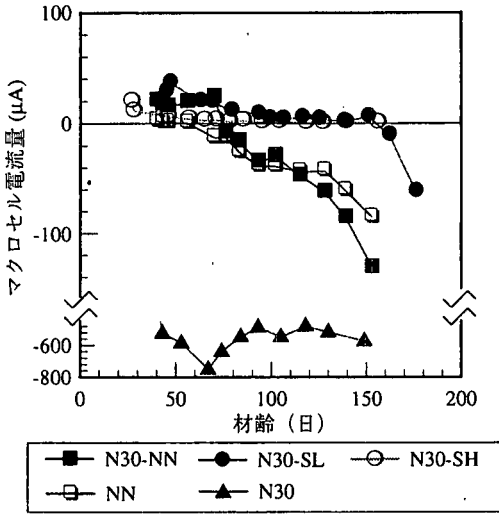


図-8 マクロセル電流量 (水平打継目供試体)

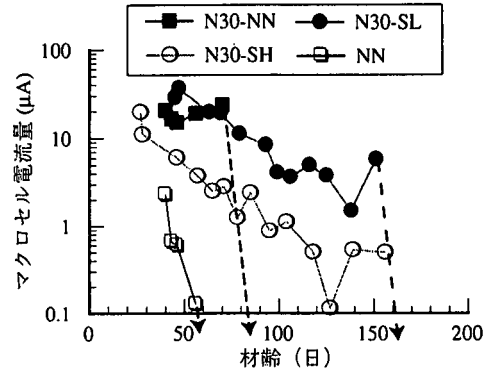


図-9 マクロセル電流量 (図-8で示したもののうち正の部分)

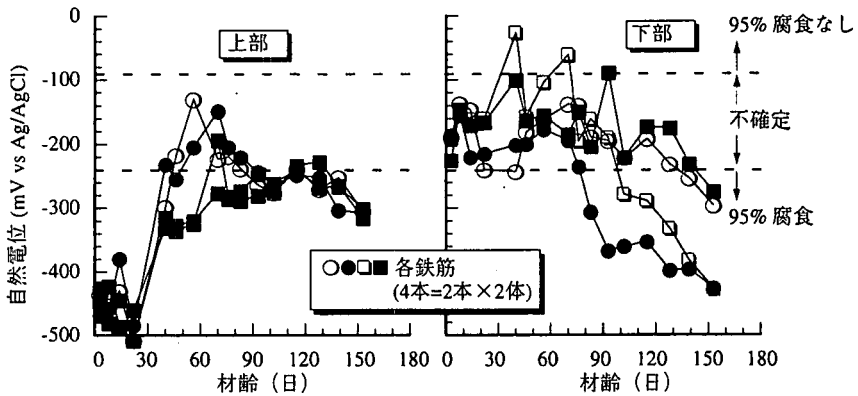


図-10 鉄筋の自然電位 (水平打継目供試体N30-NN)

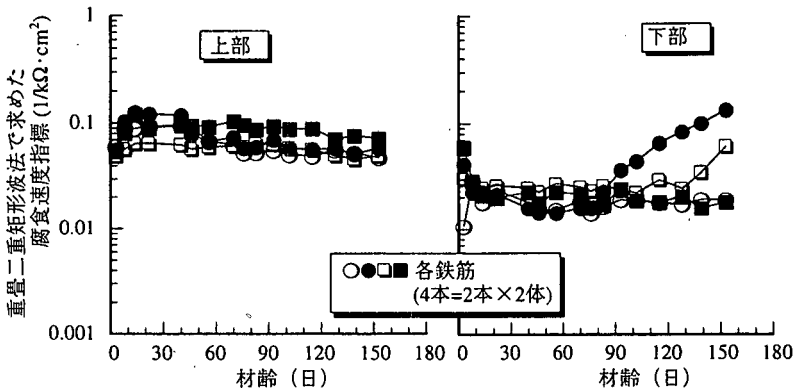


図-11 重畳二重矩形波法から求めた腐食速度指標 (水平打継目供試体N30-NN)

NNの自然電位と腐食速度指標を図-10、図-11にそれぞれ示すが、ここではよく用いられるASTM C 876による腐食判定基準を用いる¹⁸⁾。

- $-90\text{mV} < E$: 95%の確率で腐食
- $-240\text{mV} \leq E \leq -90\text{mV}$: 不確定
- $E < -240\text{mV}$: 95%の確率で健全

鉄筋の自然電位 E (vs 飽和塩化銀電極) に対して

また、腐食反応時に Fe がすべて二価のイオンにな

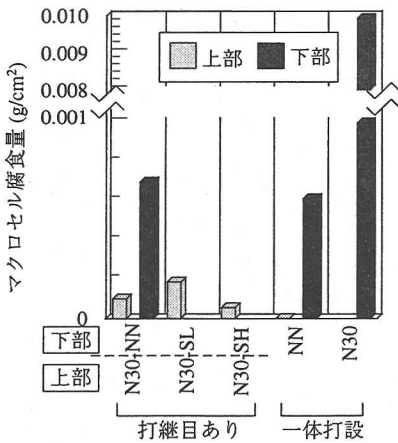


図-12 マクロセル電流量から算出したマクロセル腐食量 (水平打継目供試体)

ると仮定すると、鉄筋の腐食減量と分極抵抗の間には、以下のような関係があるため、分極抵抗の逆数を腐食速度指標と定義して用いることとした¹⁹⁾。

$$G = \frac{M}{2F_a} \int I_{corr} dt = K \times \frac{M}{2F_a} \times \int \frac{1}{R_p} dt \quad (1)$$

G: 腐食減量 (g/cm²)

M: 鉄の原子量 (=55.8)

F_a: ファラデー数 (=96500C)

I_{corr}: 腐食電流密度 (A/cm²)

R_p: 分極抵抗 (Ω·cm²)

K: 比例定数 (V)

供試体下部側の自然電位は材齢60日までは不確定領域と非腐食領域を推移しているが、それ以降は順次卑変し、供試体上部側よりも卑な値になる。同様に供試体下部の鉄筋の腐食速度指標も、材齢80日付近までは上部の鉄筋よりも小さな値を示すが、それ以降は大きくなる鉄筋もある。腐食減量の結果と併せて考えると、材齢60日付近で供試体下部の鉄筋において腐食が開始し、それ以降はむしろ供試体下部の鉄筋の方が腐食が激しく進展したと考えることができる。これは既に述べたように、供試体上部よりも供試体の底面側にある下部の方が鉄筋腐食の生じやすい環境にあるためであると考えられる。

また、ここには示していないが、供試体NNでも材齢60日付近で供試体N30-NNと同様の傾向が見られ、自然電位、分極抵抗の急変が観測された。さらに高流動コンクリートを用いた供試体N30-SLの場合には材齢150日付近で同様の現象が生じた。

配合SLは普通強度の高流動コンクリートで、圧縮

強度は配合NNとほぼ同じであるが、石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートは同一水セメント比の普通コンクリートと比較して若干遮塩性に優れているという結果が得られており⁷⁾、本研究でも供試体下部に配合SLを用いた場合の方が、配合NNを用いた場合よりも、外来塩分の鉄筋位置への到達が遅くなったものと考えられる。

さらに低水セメント比の高流動コンクリートである配合SHを供試体下部に用いた場合には、本研究の範囲内では供試体下部の自然電位、腐食速度指標が腐食傾向を示すことはなく、配合SHは遮塩性に優れているといえる。

b) マクロセル腐食量の算出

ここで測定されたマクロセル腐食電流がすべてマクロセル腐食反応に起因すると仮定し、式(1)を用いて、腐食減量測定時、すなわち材齢160日の時点でのマクロセル腐食による腐食量を求め、図-12に示す。

マクロセル腐食電流の非常に大きかった供試体N30は、マクロセル腐食による供試体下部側の鉄筋の腐食量が、他のものと比較して非常に大きいと推定される。また供試体下部に同一の配合のコンクリートを用いた供試体N30-NNと供試体NNを比較すると、供試体上部のコンクリートの打設時の塩分濃度が異なるにもかかわらず、供試体下部の鉄筋のマクロセル腐食による腐食量はほぼ同一となった。供試体下部のマクロセル腐食は、図-8に示して既に考察を行ったように、供試体下部の方がより腐食が生じやすい環境となったために生じたと考えられるが、下部の劣化によるマクロセル腐食量はカソード側、すなわち供試体上部の当初の塩分量には依存しないという結果になった。

また、打設時に塩分を混入した配合を供試体上部に用いた供試体N30-NN、N30-SL、N30-SHにおいて、供試体上部側のマクロセル腐食量が全体の腐食量に占める割合はそれほど大きくなかった。

一般に腐食反応速度はカソード反応によって消費される酸素の供給速度²⁰⁾、あるいは電荷の移動性を制御するコンクリート抵抗によって律速されると考えられる。したがって、カソード部のコンクリートが低水セメント比で組織が緻密な場合には、酸素透過性が低下、あるいはコンクリート抵抗が増大するために防食上有利であると考えられ、本研究においてもN30-SHにおけるマクロセル電流量は他と比較して非常に小さく、マクロセル腐食の抑制には効果があるようである。

しかし実際にはアノード部 (供試体上部) でマクロセル腐食が生じており、マクロセル腐食に起因するものを含めたアノード部における全体の腐食量

表-5 重畳二重矩形波法で測定したN30-SL（水平打継目供試体）の腐食速度指標の例 (1) 供試体内のすべての鉄筋のコードを結合したまま測定 (2) 結合を分離して20分後に測定 (1/kΩ・cm²)

	結合のまま	分離20分後
上部	0.476	0.072
下部	0.101	0.034

は、他の配合と比較して小さくはなかった（図-5、図-6）。

また、供試体下部に同一水結合材比の高流動コンクリートSLと普通コンクリートNNを用いた供試体における、供試体上部のマクロセル腐食量を比較すると、供試体N30-SLの方がN30-NNよりも腐食量が大きい。これは、図-8、図-9に示したように、供試体N30-SLの方が、供試体上部をマクロセル腐食のアノードとしてマクロセル腐食が生じた期間が長いことも一因としてあげられるが、その期間におけるマクロセル腐食電流量の大きさは、両者に差はない。したがって、高流動コンクリートSLは同一水セメント比の普通コンクリートと比較して、腐食が発生するまでの期間は長くなるが、低水セメント比の高流動コンクリートSHと異なり、腐食発生後のマクロセル腐食反応速度を抑制することはできない、と考えられる。

(3) マクロセル腐食とマイクロセル腐食の関係

a) K値の算出

水平打継目供試体の場合には、供試体上部と下部の鉄筋が結合されていない状態で分極抵抗値の測定を行なった。

ここで、水平打継目供試体の鉄筋の腐食速度指標の測定例を、上部と下部の鉄筋にそれぞれ接続されたコードを腐食促進中と同様に結合したまま測定した分極抵抗から得たものと、コードの結合を解き20分が経過した後に、それぞれ個別に測定した分極抵抗から得たものの比較として表-5に示す。

この表に示すように、算出された腐食速度指標は、上部と下部の鉄筋が電気的に結合されているか否かによって異なる値を示した。上部と下部が接続されている場合にはマクロセル腐食反応が生じ、この状態で測定された分極抵抗値はマクロセル腐食反応とマイクロセル腐食反応の両方の腐食反応に対応すると考えられる。一方、コードの接続が絶たれた場合にはマイクロセル腐食反応しか生じていないために、分極抵抗値はマイクロセル腐食反応のみに対応するものであるために、両ケースの分極抵抗値に相違が生じたものと考えられる¹²⁾。

本研究ではコード間の接続を絶ってから5分程度以内に分極抵抗を測定している。実際には接続を絶った時点で分極抵抗が瞬間的に変化するのではなく、ある程度時間をかけて徐々に定常状態に収束していく²¹⁾ものと考えられるが、本研究で水平打継目供試体から得た腐食速度指標は、マイクロセル腐食のみに対応していると思ふべきとした。

その上で、水平打継目供試体の腐食減量から図-12のマクロセル腐食量を差し引いたものをマイクロセル腐食量と考え、重畳二重矩形波法および交流インピーダンス法によって測定した分極抵抗をマイクロセル腐食のみに対応すると見做すと、式(1)よりK値は0.0151 (V) となった。

一方、鉛直打継目供試体の場合には、腐食減量をマクロセル腐食とマイクロセル腐食のどちらに起因するものかを分離することは困難で、また重畳二重矩形波法および交流インピーダンス法により測定した分極抵抗も、水平打継目供試体でコードを結合したまま測定されたものに相当する。そこで、マクロセル腐食とマイクロセル腐食の合計に対応する腐食減量（図-3参照）と分極抵抗からK値を求めると、0.0278 (V) となった。

b) 水平打継目供試体

図-13に水平打継目供試体のマクロセル腐食電流量から求めたマクロセル腐食量と、上記のK値を用いて求めたマイクロセル腐食量の材齢の経過に伴う進行を示す。ここでは分極抵抗値から腐食量を算出するのにK値として0.0151 (V) を用いている。またここで求めた腐食量は計算値であるため、図-5に示した腐食減量の実測値とは必ずしも一致しない。

既に前節までに述べたように、供試体下部は湿潤状態に置かれ、上部と比較してより腐食が進行しやすい環境となったため、供試体上部ではマクロセル腐食はほとんど生じなかった。

一方、供試体上部では腐食のほとんどがマイクロセル腐食に起因するものであるのに対し、供試体下部では、N30-SHを除いて、腐食量全体のうち比較的大きな割合をマクロセル腐食に起因するものが占めている。その割合は、打継目を有する供試体において供試体下部の配合別でみると、NN>SL>SH=0%である。

また、ここでは鉄筋間を流れるマクロセル電流からマクロセル腐食量を求めたが、実際には同一鉄筋内にアノード部とカソード部が存在するマクロセル腐食も生じているものと考えられるため、マクロセル腐食量は図-12あるいは図-13に示したものよりも大きな割合を占めていると考えられる。

さらに、図-8からも明らかのように、供試体N30-

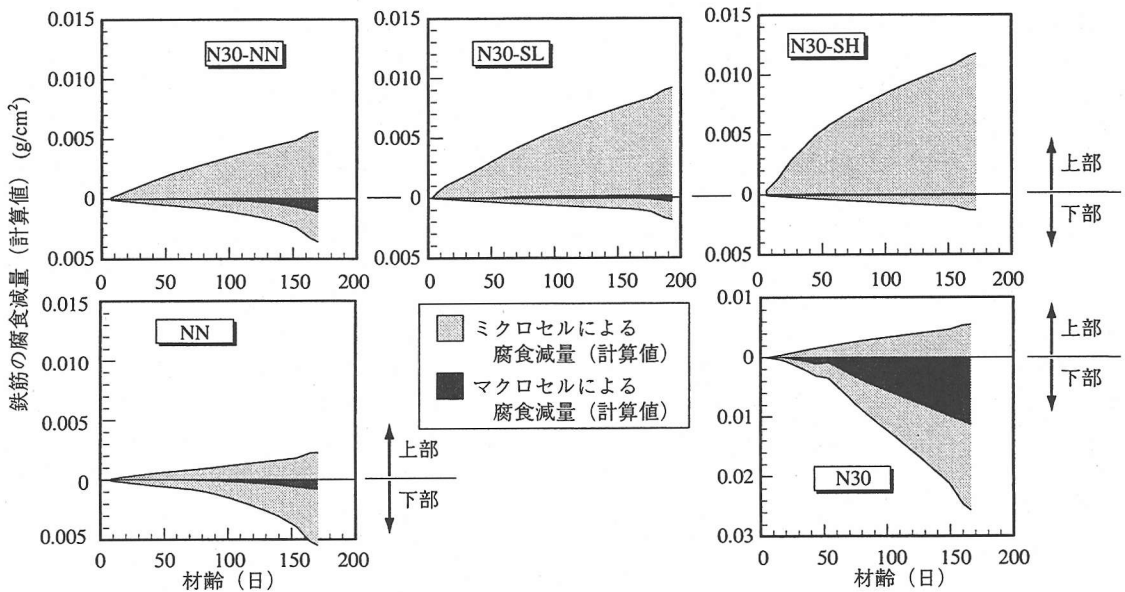


図-13 マクロセル腐食とマイクロセル腐食の進展 (計算値, 水平打継目供試体)

NN, N30-SLのマクロセル電流量は現在も増加傾向にあるため, 現在のマクロセル腐食による腐食傾向が, 塩分の鉄筋への到達時期の差異によるものなのか, あるいはコンクリート抵抗, コンクリート中の酸素の移動度の違いによるものなのかは明らかではなく, 今後も調査, 検討を継続する必要があると思われる。

しかし, 水平打継目供試体において測定されたマクロセル電流量, および腐食量の計算から, 同一水セメント比の高流動コンクリートと普通コンクリートを比較した場合, 塩害による鉄筋腐食の発生と進行, およびマクロセル腐食の発生と進行に, それぞれ異なる影響を与えることは確認できた。

c) 鉛直打継目供試体

水平打継目供試体の検討結果から, マクロセルの形成が腐食に影響を与えていることが明らかになったため, 鉛直打継目供試体に関してもマクロセル腐食に関する検討を行なうこととする。

鉛直打継目供試体のうち, 供試体左右部に配合N30を用い, 中央部に配合NNあるいはSLを用いたものについて考える。これらの供試体の腐食減量は図-3に既に示したが, それぞれ供試体中央部の腐食面積は0%, あるいはそれに近い値だったことから, この部分の腐食減量を0gとみなす。さらに, 配合N15を用いた場合, 供試体の配合N15の部分の腐食面積率は大きかったものの, 供試体N15-NN-N15, N15-SL-N15あるいは供試体N15の腐食減量は, ここで取り上げる供試体の腐食減量と比較して十分小さいので, これを

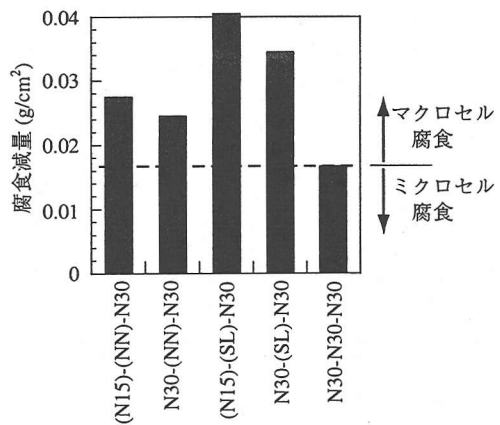


図-14 マクロセル腐食とマイクロセル腐食 (鉛直打継目供試体)

無視する。すると, これら供試体の腐食減量はすべて配合N30を用いた部分から得られたことになるので, その腐食減量を供試体中の配合N30を用いた部分の鉄筋の表面積あたりに換算して図-14に示す。

異種コンクリートの打継ぎを行なっておらず, マクロセル腐食が生じていないと考えられる供試体N30-N30-N30と比較すると, いずれの供試体も配合N30を用いた部分の鉄筋の腐食減量は大きくなった。腐食減量のうち, 供試体N30-N30-N30と同量分がマイクロセル腐食によるものとする, それ以外の腐食減量はマクロセル腐食によるものと考えられることができる。

ここで得られたマクロセル腐食量は, 水平打継目供試体から求めたものよりも大きくなった。両供試

体の形状が異なり、マクロセル腐食におけるアノードとカソード間の距離が両者で異なることが原因として考えられる。また、水平打継目供試体の場合には供試体上部と下部で環境条件が異なるのに対し、鉛直打継目供試体では供試体底面から鉄筋までの距離がいずれの鉄筋においても等しいため、マクロセル腐食が主に当初塩分を混入した供試体左右部においてのみ発生したためであると考えられる。

また、供試体左右部のそれぞれに配合N15と配合N30を用いたものと、左右部とも配合N30を用いたものを比較すると、左右部とも配合N30を用いたものが、単位面積あたりの腐食減量は小さい。供試体N15において腐食減量がほとんど生じていないことを考えると、ここでは供試体中の配合N15の部分はマクロセル腐食のカソードとして作用していると考えられる。したがって供試体N15-NN-N30、N15-SL-N30においては、供試体中央部および配合N15を用いた左部とが、配合N30を用いた右部に対するカソードとしてマクロセル腐食が形成されていると考えられる。一方、供試体N30-NN-N30、N30-SL-N30の場合には、供試体中央部のみが供試体両端の左右部に対するカソードとなり、カソード反応で消費される酸素の供給量が異なるため、腐食量に相違が生じたと考えられる。

また、同一水セメント比の高流動コンクリートと普通コンクリートをそれぞれ供試体中央部に用いた場合の比較を行う。配合N30を用いた供試体左右部の単位面積あたりの腐食減量は、供試体中央部に高流動コンクリートSLを用いた供試体の方が、普通コンクリートNNを用いた供試体よりも腐食量が大きかった。水平打継目供試体においても供試体N30-NNとN30-SLの上部の腐食量を比較すると、N30-SLの方が大きかった。

図-4に示したように、供試体N15-SL-N15とN15-SL-N30を比較すると、配合N15を打設した部分の腐食面積率は、両者でかなり異なり、供試体N15-SL-N15の場合には供試体左部で12%程度となっているのに対し、供試体N15-SL-N30の場合には2%程度である。マクロセル腐食は鉄筋の自然電位の卑な部分をアノードとして、貴な部分をカソードとして反応が生じるために、供試体N15-SL-N15の場合には配合N15を打設した部分が最も電位が卑となり、この部分をアノードとしてマクロセル腐食反応が生じ、供試体N15-SL-N30の場合には配合N30を打設した部分がアノードとなり、N15の部分の腐食面積率はそれほど大きくならなかったものと考えられる。

同様に、供試体中央部に高流動コンクリートSLを用いた場合と、普通コンクリートNNを用いた場合と

比較する。高流動コンクリートSLを用いた場合には、高流動コンクリートの耐塩分浸透性が普通コンクリートよりも優れているため、供試体中央部での鋼材の不動態被膜は、普通コンクリートNNを用いた場合よりも、その破壊の程度が小さいものと考えられる。これは、この部分での腐食面積が小さいという結果とも一致する(図-4参照)。したがって、供試体中央部と左右部の鉄筋の電位差が大きくなり、マクロセル腐食電流とそれに対応する供試体左右部での腐食量が大きくなったものと考えられる。

高流動コンクリートSLは、同一水セメント比の普通コンクリートNNと比較して組織が緻密であり、若干遮塩性に優れているものと考えられ⁷⁾、そのため暴露開始から外来塩分により鋼材に腐食が発生するまでの期間は、長くなったものと考えられる(図-8～図-11参照)。

一方既に述べたように、鋼材の腐食反応速度はカソード反応によって消費される酸素の供給速度²⁰⁾、あるいは特にマクロセル腐食の場合には電荷の移動性を制御するコンクリート抵抗によって律速されると考えられる。

しかし、酸素供給量に関しては、W/C=30%の場合でもW/C=50%の場合の1/2.5にしか低減されず、水セメント比の影響をさほど受けないことが報告されており²²⁾、また、本研究で分極抵抗測定時に併せて測定したコンクリート抵抗(電流値:10 μ A~1mA, 周波数:800Hz)についても、配合SLと配合NNの値はほぼ同等であった。したがって、配合SLと配合NNにおけるマクロセル腐食反応に対する酸素の供給量、およびコンクリート抵抗はほとんど同じであると考えられる。

したがって、高流動コンクリートSLと普通コンクリートNNにおける組織の緻密さの相違は、塩化物イオンの拡散、浸透に対しては影響を与えるが、酸素の拡散、コンクリート抵抗にはほとんど影響を与えないと考えられる。

そのため、外来塩分に対しては、高流動コンクリートを用いた部分の鉄筋の発錆材齢は遅延するものの、逆に隣接して塩分を含むコンクリートが存在して、高流動コンクリートを用いた部分がマクロセル腐食のカソードとして機能する場合には、隣接部におけるマクロセル腐食量が大きくなるという結果となったものと考えられる。

以上をまとめると、塩害構造物に対して高流動コンクリートを用いて補修を行う場合には、3.(1)で述べたように、既存部材の塩分を含む部分を除去しないと、普通コンクリートを用いた場合と比較して、かえってマクロセル腐食が大きくなる危険性がある

ため、既存部材および補修材料の電気化学的コンパティビリティを考慮して補修設計を行う必要があるといえよう。

4. 結論

本研究では、塩害劣化構造物およびそれを高流動コンクリートで断面修復補修した場合を想定し、塩分を混入した普通コンクリートに、塩分を含まない普通コンクリートおよび2種類の高流動コンクリートを打ち継いだ供試体を作成した上で、供試体に塩分散布を行い、その鉄筋腐食性状について検討を行った。

その結果、以下のような結論が得られた。

(1) 塩分をコンクリート中に 2.75kg/m^3 混入しても腐食減量はそれほど大きくないが、腐食面積率は大きくなる。

(2) 塩分含有コンクリートに高流動コンクリートを打ち継いだ場合、同一水結合材比の普通コンクリートを打ち継いだ場合と比較して、塩分を含まない部分の鉄筋のマクロセル腐食による劣化が遅延される。

(3) 塩分含有コンクリートに高流動コンクリートを打ち継いだ場合、同一水結合材比の普通コンクリートを打ち継いだ場合と比較して、塩分含有部の鉄筋のマクロセル腐食量が大きくなる。

最後に、今後の課題として、環境条件の影響を検討することがあげられる。

本研究においては、打設面を上設置して、打設面側から散水および塩分の散布を行なった。しかし実橋の場合には、水分および塩分は桁の下面からコンクリート内に進入するものと考えられる。したがって、本研究の供試体の場合と条件が若干異なる。

さらに、本研究ではマクロセルのアノードとカソードの面積比と一定としたが、これも実際にはまちまちであり、また桁の湿潤状態等も環境条件によって異なるため、今後はそれらの影響も含めて検討を行なう必要がある。

参考文献

- 1) 武若耕司：鋼材腐食，コンクリート工学，Vol. 33，No. 3，pp. 123-128，1995.
- 2) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向，1997.

- 3) 岡田清，小林和夫，宮川豊章，本田哲：分極抵抗法を用いた鉄筋腐食モニタリングによる補修基準について，コンクリート工学年次講演会講演論文集，Vol. 5，pp. 249-252，1983.
- 4) Andrade, C., and Gonzalez, J. A. : Quantitative Measurements of Corrosion Rate of Reinforcing Steels Embedded in Concrete Using Polarization Measurements, *Werkstoffe und Korrosion*, Vol. 29, pp. 515-519, 1978.
- 5) 荒木弘祐，関博，金子雄一：コンクリートのかぶりを考慮した分極抵抗および分極電流の分布について，土木学会論文集，No. 592/V-39，pp. 53-62，1998.
- 6) 小林孝一，服部篤史，宮川豊章，藤井學：微粉末混和材を用いたセメントペーストと骨材の界面性状，材料，第45巻第9号，pp. 1001-1007，1996.
- 7) 小林孝一，服部篤史，宮川豊章：石灰石微粉末または高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートにおける塩分浸透と鉄筋腐食，土木学会論文集，No. 613/V-42，pp. 175-187，1999.
- 8) 大即信明，横井聡之，下沢治：モルタル中鉄筋の不動態に及ぼす塩素の影響，土木学会論文報告集，No. 360/V-3，pp. 111-118，1985.
- 9) 宮川豊章：Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete，京都大学博士論文，1985.
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，1996.
- 11) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書 (II)，pp. 185，1994.
- 12) 横田優：交流インピーダンス法によるコンクリート中でマクロセル腐食を起こしている鉄筋の腐食速度評価について，四国電力・四国総合研究所研究期報，No. 68，pp. 42-47，1997.
- 13) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準 (案)，1987.
- 14) 渡辺祥正，大濱嘉彦，出村克宣：鉄筋コンクリート構造物の塩害調査のためのせん孔式試料採取法の適用性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20，No. 1，pp. 347-352，1998.
- 15) 宮里心一，長滝重義，大即信明，柴田常德：自然電位法と交流インピーダンス法を用いた鉄筋のマクロセル腐食電流の推定，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19，No. 1，pp. 817-822，1997.
- 16) 長滝重義，大即信明，守分敦郎，宮里心一：鉄筋コンクリート部材の断面修復部における腐食形成に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 544/V-32，pp. 109-119，1996.
- 17) 岸谷孝一他：塩害 (I)，技報堂出版，1986.
- 18) ASTM C 876 : Half cell potentials of reinforcing steel in concrete, 1977.
- 19) 岡田清他：最新コンクリート工学，国民科学社，1986.
- 20) 米山宏：電気化学，大日本図書，1986.
- 21) 浪江雅幸：打継ぎ補修部における鉄筋腐食に関する研究，京都大学卒業論文，1998.
- 22) 松村卓郎：コンクリート中の酸素透過性と鋼材腐食に関する研究，京都大学修士論文，1988.

(1998. 9. 24受付)

CORROSION OF STEEL BAR IN PATCHED CONCRETE MEMBER WITH SELF-COMPACTING CONCRETE DAMAGED BY CHLORIDE INDUCED CORROSION

Koichi KOBAYASHI, Yoshihiko WATANABE, Atsushi HATTORI
and Toyo MIYAGAWA

In this study, the progress of steel corrosion in model specimens with chloride induced corrosion and then patched with self-compacting concrete were investigated. The formation of corrosion on steel bar in concrete was discussed with the aid of electrochemical methods.

Self-compacting concrete is superior in protecting steel bar from chloride induced corrosion to normal concrete with the same strength with self-compacting concrete. Also the formation of macro-cell corrosion on steel bar in self-compacting concrete and the re-deterioration of repaired member were impeded.

On the other hand, steel corrosion in chloride contaminated concrete with self-compacting concrete patching was more severe than the one with ordinary concrete patching.