

一般05 積雪寒冷地における再生骨材コンクリートに関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平18～平22

担当チーム：耐寒材料チーム

研究担当者：下谷 裕司、吉田 行

【要旨】

塩化物を多量に含んだコンクリート解体材を原料とする再生骨材を、鉄筋コンクリートの骨材に利用範囲拡大するためには、再生骨材中に残存した塩化物イオンが新規コンクリート中の鉄筋腐食に及ぼす影響を明らかにする必要がある。このため、本研究では塩化物イオンを含む再生粗骨材を使用した鉄筋コンクリート供試体の促進腐食試験を実施した。この結果、再生粗骨材中の塩化物イオンは新規セメントペースト分に拡散し、鉄筋腐食に影響を及ぼすことから、普通コンクリートと同等の塩化物イオン量の規制が必要であることが明らかとなった。また、鉄筋の腐食抑制対策として、水密性に優れるセメントの使用など、コンクリート組織の密実性を高める対策が有効であることが明らかとなった。

また、再生骨材の効率的な品質管理に向けて、試験紙タイプの測定計を使用した簡易な塩化物濃度測定方法の有効性について検討を実施した。この結果、簡易法により再生粗骨材の塩化物濃度の管理指標である全塩化物濃度を推定でき、簡易法が塩化物濃度の検査に適用できることが明らかとなった。

キーワード：再生粗骨材；塩化物イオン；鋼材腐食；簡易塩分測定法

1. はじめに

平成20年度のコンクリート解体材の排出量は3,130万tであり、このうち約97%が再生骨材としてリサイクルされ、主に道路の路盤材等に利用されている¹⁾。しかしながら、今後は公共事業の縮減等に伴い、再生骨材の利用先である路盤材の需要が大幅に減少することが予測されており、再生骨材の新たな用途の確立が求められている。

このため、資源の循環利用の観点から、再生骨材をコンクリート用骨材として利用するための取り組みが各方面で行われている。耐寒材料チームにおいても、再生粗骨材を用いたコンクリートの強度特性や凍結融解抵抗性をはじめとする各種耐久性に関する研究を行い、研究成果を(社)日本コンクリート工学協会北海道支部より発行された「プレキャスト無筋コンクリート用再生粗骨材の品質規格(案)」²⁾および「再生粗骨材を用いたプレキャスト無筋コンクリートおよびその材料と製造に関する規格(案)」²⁾に反映した。

今後、更なる再生骨材の利用範囲拡大のためには、再生粗骨材を鉄筋コンクリート構造物の骨材に適用する必要がある。

2005年から2007年にかけて再生骨材と再生骨材を用いたコンクリートに関する日本工業規格(JIS)が制定された。この中で、再生骨材の原料となるコンクリ

ート(以下、原コンクリートと記す)に飛来塩分や海水の影響を直接受けた沿岸部のコンクリート構造物の解体材を使用しないことを規定し、さらに再生骨材の塩化物(NaCl)濃度を0.04%以下、再生骨材コンクリートの塩化物イオン量を0.3kg/m³以下に規制することで、再生骨材の鉄筋コンクリート構造物への適用を認めている。

しかしこの規定は、再生骨材における付着ペースト中の塩化物量の影響について明確に評価が出来ていないことを前提として、レディミクストコンクリート用骨材における塩化物量の規定を準用している³⁾。従って、再生骨材中に含まれる塩化物イオンが新規コンクリート中でどのような挙動を示すのかを明らかにして、再生骨材コンクリートの鉄筋腐食のメカニズムと、再生粗骨材の発錆限界塩化物濃度に関する検討をおこなうことで、上記規定外の再生骨材であっても鉄筋コンクリートに適用出来る可能性がある。とくに積雪寒冷地では冬期間の安全かつ円滑な交通を確保する目的で塩化物系凍結防止剤の散布が行われており、内陸部のコンクリート構造物であっても多量の塩化物を含有している可能性があるため、塩化物を含有しているコンクリート解体材を原コンクリートに利用出来るとなると、積雪寒冷地においても再生骨材の利用範囲拡大が期待できることになる。したがって、本研究では、再

生粗骨材中に含まれる塩化物イオンが鋼材腐食に及ぼす影響を明らかにすることで、再生粗骨材を鉄筋コンクリートの骨材に使用する場合の品質規格を提案することを目的とした。

また、再生骨材は一般的に複数のコンクリート構造物を原コンクリートとするため品質のばらつきが大きく、JIS Q 1011⁴⁾においては、再生骨材の品質検査頻度を砕石・砂利等の普通骨材の2倍程度に定めている。このため再生骨材の品質管理を効率的に行うためには、コンクリート製造工場や現場で簡易に実施できる検査手法が必要であるが、先述したJISで規定されている再生粗骨材の塩化物濃度の検査は、種々の薬品や器具を使用するため現場での実施が困難であった。

そこで本研究においては、再生粗骨材中の塩化物の抽出過程を省力化して試験紙タイプの塩化物濃度測定計を用いて塩化物濃度を定量する方法(以下、「試験紙法」と記す)を考案し、その適用性を検討した。

2. 再生粗骨材中の塩化物イオンの存在状態に関する検討

2.1 試験概要

2.1.1 再生粗骨材の製造およびその品質

表-1 に本研究において使用した再生粗骨材の原コンクリートの諸元と、再生粗骨材の製造方法およびその品質の一覧を示す。

再生粗骨材 RBO・RBI・RBH の原コンクリートは、北海道の日本海に面したの厳しい塩害環境下で約 30 年間供用された橋梁のコンクリート桁である。6 列配置のうち最も海側の桁を選び、塩化物の含有量が多いと

考えられる表層部 10cm 部分と、桁内部をそれぞれ分けて小割りし、原コンクリートとして使用した。なお、桁の配合等については設計時の資料が残っていないため不明であるが、建設当時(1973 年)の橋梁関係設計要領⁵⁾および供用地区のレディーミクストコンクリート工場の資料等から設計基準強度 240kg/cm²、水セメント比 55%であると推測される。

再生粗骨材 RBO・RBI については原コンクリートを乾式破碎して製造した。また、処理程度の違いが再生粗骨材の品質に及ぼす影響を確認するため、再生粗骨材 RBH については、乾式の破碎処理に加えて湿式の摩砕処理および比重選別処理を行い、比重が高く品質の良い再生粗骨材のみを分別回収して製造した。

製造した再生粗骨材の品質を見ると、再生粗骨材 RBO・RBI は、JIS A 5023 付属書 1「コンクリート用再生骨材 L」⁶⁾に規定されている品質(吸水率 7.0%以下)を満たしていなかった。また、再生粗骨材 RBH の品質は JIS A 5022 付属書 A「コンクリート用再生骨材 M」⁷⁾に規定されている品質(絶乾密度 2.3g/cm³以上、吸水率 5.0%以下)相当であった。

また、再生粗骨材 RBO・RBI・RBH のように実構造物を取り壊して製造した再生粗骨材は、塩化物イオンの分布にばらつきがあると考えられるが、後述する再生粗骨材コンクリートの腐食メカニズムおよび再生粗骨材の発錆限界塩化物濃度の検証にあたっては、この塩化物イオン分布のばらつきの影響により、発錆限界塩化物濃度の特定が困難になることが懸念された。

このため、再生粗骨材 Ra~Rj については、塩化物濃度の分布を均一にするため、練り混ぜ水に塩化ナト

表-1 原コンクリートの諸元および再生粗骨材の製造方法とその品質

再生粗骨材種類	原コンクリート					再生粗骨材		
	種類	水セメント比 (%)	塩化ナトリウム添加量 (kg/m ³)	作製時期	破碎時の材齢	製造方法	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
RBO	実橋桁表層	55	—	1973 年頃	約 30 年	乾式破碎	2.24	7.84
RBI	実橋桁内部	55	—	1973 年頃	約 30 年	乾式破碎	—	—
RBH	実橋桁表層	55	—	1973 年頃	約 30 年	乾式破碎+湿式摩砕+比重選別	2.52	3.34
Ra	コンクリートブロック	50	1.420	2006 年	28 日	乾式破碎+乾式摩砕(ER)	2.52	3.22
Rb	コンクリートブロック	50	6.670	2006 年	28 日	乾式破碎+乾式摩砕(ER)	2.44	4.54
Rc	コンクリートブロック	50	0.900	2008 年	28 日	乾式破碎+乾式摩砕(R)	2.46	3.63
Rd	コンクリートブロック	50	3.800	2008 年	28 日	乾式破碎+乾式摩砕(R)	2.48	3.46
Re	コンクリートブロック	50	4.703	2005 年	約 3 年	乾式破碎+乾式摩砕(R)	2.51	2.96
Rf	コンクリートブロック	50	7.148	2005 年	約 3 年	乾式破碎+乾式摩砕(R)	2.48	3.38
Rg	コンクリートブロック	50	12.540	2005 年	約 3 年	乾式破碎+乾式摩砕(R)	2.48	3.19
Rh	コンクリートブロック	50	1.500	2009 年	28 日	乾式破碎+乾式摩砕(R)	2.47	3.45
Ri	コンクリートブロック	50	2.000	2009 年	28 日	乾式破碎+乾式摩砕(R)	2.47	3.59
Rj	コンクリートブロック	50	2.500	2009 年	28 日	乾式破碎+乾式摩砕(R)	2.46	3.72

リウム (NaCl) を混入して作製したコンクリートブロックを原コンクリートとした。コンクリートブロックの水セメント比はいずれも 50%とし、塩化物イオン濃度の異なる再生粗骨材を製造するため、NaCl 添加量を変化させた。

再生粗骨材の目標品質は、現在最もその普及が期待されている中品質 (再生粗骨材M) 相当の品質⁸⁾に設定した。再生粗骨材 Ra・Rb については、比較的処理量が多かったことから、ジョークラッシャーによる乾式の破碎処理を行った後、偏心ローター方式による乾式の摩砕処理を行って製造した。また、再生粗骨材 Rc～Rj については、比較的処理量が少なかったことから、粒径 20mm 以下になるまでジョークラッシャーまたは人力による乾式の破碎処理を行った後、ロサンゼルス試験装置を使用し、乾式の摩砕処理を行って製造した。

製造した再生粗骨材の品質を見ると、再生粗骨材 Re は、JIS A 5021「コンクリート用再生骨材H」⁹⁾に規定されている品質 (絶乾密度 2.5g/cm^3 以上、吸水率 3.0%以下) 相当であったが、その他の再生粗骨材は、いずれも JIS A 5022 付属書Aで規定される品質相当であり、全体的には目標通りの品質の再生粗骨材が製造できた。

2.1.2 塩分分析試験の概要

再生粗骨材中の塩化物イオンの分布を明らかにするため、再生粗骨材 RBH を樹脂に埋め込み、鏡面研磨および炭素の蒸着を行って分析面を作製し、電子線マイクロアナライザー (EPMA) による分析を実施した。

また、製造した 12 種類の再生粗骨材について、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法—電位差滴定法—」(以下、「JCI 法」と記す)¹⁰⁾に準拠し、全塩化物 (NaCl) 濃度と可溶性塩化物濃度の測定を実施した。

2.2 試験結果

2.2.1 塩化物イオンの分布

図-1 に EPMA による塩化物イオンの分析結果と再生粗骨材 RBH を埋め込んだ分析面の写真を合成した図を示す。分析結果は、白→赤→黄→緑→青の順に塩化物イオン濃度が低くなっている。

再生粗骨材中の塩化物イオンは、製造段階で除去しきれなかった骨材に付着した原コンクリートのセメントペースト分 (以下「付着セメントペースト分」と記す) に含まれていた。コンクリート中の塩化物は一般的にセメントペースト中の水和物中に固定・吸着されている非可溶性塩化物イオンと、比較的容易に水に溶け出す可溶性塩化物イオンで構成されているが、再生

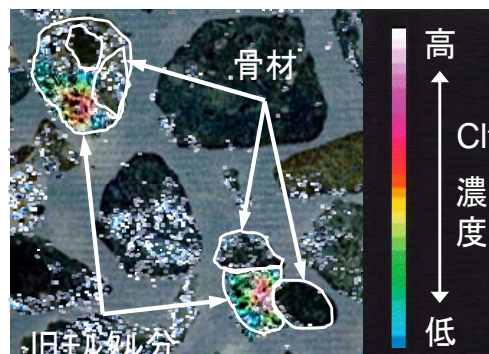


図-1 再生粗骨材中の塩化物イオンの分布

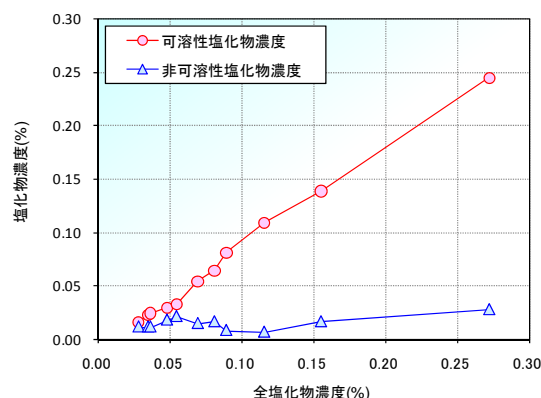


図-2 JCI 法により測定した塩化物濃度の関係

粗骨材中の塩化物イオンも、非可溶性塩化物イオンと可溶性塩化物イオンから構成されているものと考えられる。

2.2.2 再生粗骨材中の塩化物イオンの存在状態

図-2 に、JCI法により測定した再生粗骨材の全塩化物濃度と可溶性塩化物濃度および非可溶性塩化物濃度 (=全塩化物濃度-可溶性塩化物濃度) の関係を示す。

原コンクリートの種類に関わらず、可溶性塩化物濃度は全塩化物濃度の増加に概ね比例して増加する傾向が見られた。一方、非可溶性塩化物濃度は、全塩化物濃度が増加しても大きな変化が見られなかった。再生粗骨材中の非可溶性塩化物としては、コンクリートと同様に骨材に付着した旧セメントペースト中のセメント水和物 (C-S-H ゲル) に物理的に吸着されている塩化物やセメント水和物相に化学的に結合される塩化物 (フリーデル氏塩等) などがあるものと考えられる。他方、Stark らによると、いずれのセメント水和物にも塩化物を結合出来る限界量が存在することが示されている¹¹⁾。このことから、再生粗骨材中の非可溶性塩化物濃度に変化が見られなかったのは、非可溶性として存在する塩化物量が限界に達したためである可能性が考えられる。

そこで、JCI 法により測定した全塩化物濃度と全塩化物濃度に対する非可溶性塩化物濃度の割合の関係を整理した。結果を図-3 に示す。原コンクリートの種類に関わらず、再生粗骨材中の全塩化物濃度が約 0.1% 以下の範囲においては、非可溶性塩化物濃度の割合は全塩化物濃度に比例して減少しており、全塩化物濃度が約 0.1% より大きくなると、非可溶性塩化物濃度の割合は概ね 10% で一定となっていた。この結果からも、再生粗骨材中の非可溶性として存在する塩化物量は全塩化物濃度の増加に伴って減少し、全塩化物濃度がある値以上になると一定割合になる傾向が認められた。

以上のことから、次のことがわかった。

- (1) 再生粗骨材中の塩化物イオンは、処理の際に除去しきれなかった骨材に付着した旧セメントペースト分に存在する。
- (2) 再生粗骨材中の非可溶性塩化物の割合は、全塩化物濃度に比例的に減少し、ある全塩化物濃度に達すると、非可溶性塩化物として結合できる量が一定割合になる。

3. 再生粗骨材コンクリート中の鉄筋腐食メカニズムと腐食抑制対策に関する検討

3.1 試験概要

3.1.1 促進腐食試験用供試体の作製

表-2 に促進腐食試験用供試体の配合、形状および JCI 法によって測定した塩化物イオン量を示す。図-4 に供試体の寸法および配筋を示す。

再生粗骨材の塩化物イオン濃度の違いが鉄筋腐食に及ぼす影響を検討するため、普通ポルトランドセメントを使用した角柱供試体（以下、「NS シリーズ」と

記す）を作製した。粗骨材には、製造した再生粗骨材 Ra、再生粗骨材 Rb に加え、比較用として小樽見晴産の砂利 V を単独で使用した。また、実際に供用されたコンクリート構造物を取り壊して製造される再生骨材のように粗骨材の塩化物イオン濃度にバラツキがあるケースを想定して、砂利 V と再生粗骨材 Rb を混合使用し、コンクリート中の塩化物イオン量が再生粗骨材 Ra を

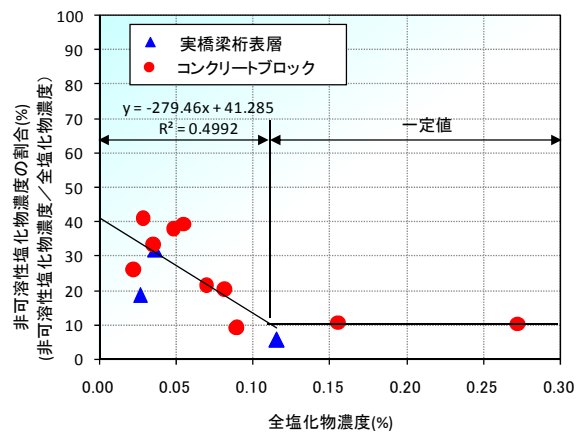


図-3 全塩化物濃度に対する非可溶性塩化物濃度の割合

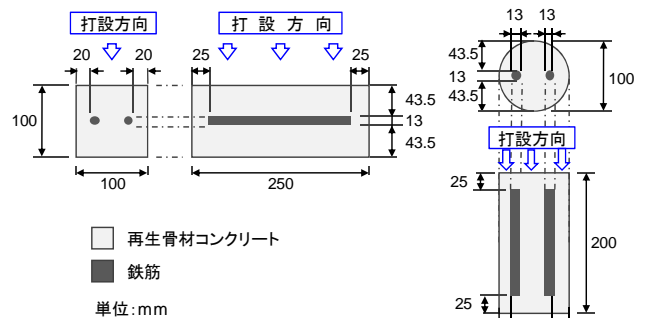


図-4 促進腐食試験用供試体の寸法および配筋

表-2 原コンクリートの諸元および再生粗骨材の製造方法とその品質

配合名	使用セメント	水セメント比 (%)	単位容積質量 (kg/m³)					供試体形状	配筋	塩化物イオン量 (kg/m³)	
			セメント	水	細骨材	粗骨材					
						砕石 V	再生粗骨材 Ra Rb				
NS-V-50	普通ポルトン	50	150	300	847	1102	—	—	□100×250mm 角柱供試体	横筋	0.09
NS-Ra-50						—	1094	—			0.21
NS-VRb-50						640	—	448			0.24
NS-Rb-50						—	—	1068			0.51
BBS-Ra-50	高炉B種BB	50	150	300	869	—	1069	—	□100×250mm 角柱供試体	横筋	0.23
BBS-Rb-50						—	—	1045			0.51
NC-Ra-50	普通ポルトン	50	150	300	853	—	1094	—	φ100×200mm 円柱供試体	縦筋	0.29
NC-Rb-50						—	—	1068			0.55

単独で使用した供試体 (NS-Ra-50) と同程度になるよう調整した供試体 (NS-VRb-50) も作製した。供試体形状は□100×250mm 角柱供試体とし、リード線を接続した2本のφ13mm みがき棒鋼を、各鉄筋の最小かぶりが2cmとなるよう、打設面に対して水平方向 (以下、「横筋」と記す) に配筋した。供試体数量は各配合7個とした。

また、腐食抑制対策として、水密性に優れた高炉セメントB種を使用した角柱供試体 (以下、「BBS シリーズ」と記す) を作製した。粗骨材に製造した再生粗骨材 Ra、再生粗骨材 Rb を単独で使用した。供試体形状は NS シリーズと同様に□100×250mm 角柱供試体とし、リード線を接続した2本のφ13mm みがき棒鋼を、各鉄筋の最小かぶりが2cmとなるよう、横筋方向に配筋した。供試体数量は各配合6個とした。

また、配筋方向の違いが鉄筋腐食に及ぼす影響を検討するため、普通ポルトランドセメントを使用した円柱供試体 (以下、「NC シリーズ」と記す) を作製した。粗骨材には、製造した再生粗骨材 Ra、再生粗骨材 Rb を単独で使用した。供試体形状はφ100×200mm 円柱供試体とし、リード線を接続した2本のφ13mm みがき棒鋼を、各鉄筋の最小かぶりが2cmとなるよう、打設面に対して垂直方向 (以下、「縦筋」と記す) に配筋した。供試体数量は各配合6個とした。

いずれの配合の供試体も、細骨材には苫小牧樽前産の海砂を使用した。また、水セメント比は50%とし、目標スランプ 8 ± 2.5 cm、目標空気量 $5 \pm 1\%$ として、AE減水剤により配合を調整した。供試体は材齢1日で脱型し、その後材齢7日まで封緘養生を行い、試験を開始した。

3.1.2 鉄筋の促進腐食試験

図-5 に促進腐食試験の概要を示す。試験は JCI-SC3 「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法-乾湿繰り返し法-」¹²⁾ に準拠し、湿潤期間 (温度 70°C、相対湿度 99%) 3日間、乾燥期間 (温度 12°C、相対湿度 55%) 4日間を1サイクルとし、乾湿繰り返しを行う方法で実施した。また、鉄筋腐食の開始時期を明らかにするため、湿潤期間終了後に、JSCE-E 601-2007 「コンクリート構造物における自然電位測定方法」¹³⁾ に準拠し、鉄筋の自然電位測定を実施した。測定は各鉄筋の最小かぶり (20mm) の面に照合電極をあてて行った。

NS シリーズの供試体については、促進サイクル数 10 サイクル時点で各配合 1 供試体を、20・40・60 サイク

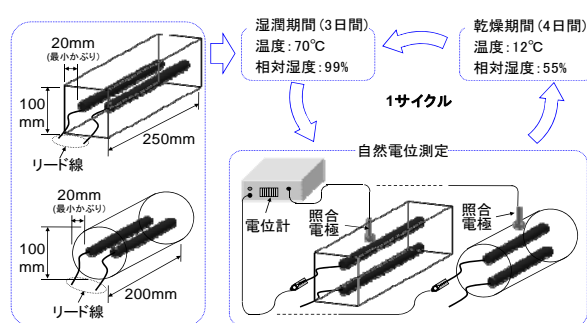


図-5 促進腐食試験の概要

ル時点で各配合 2 供試体を、各断面に鉄筋がそれぞれ 1 本含まれるよう長手方向に割裂し、鉄筋腐食の有無を確認した。なお、NS シリーズの供試体について鉄筋の自然電位測定を実施した結果、腐食を生じた鉄筋では、いずれも 0~5 サイクルの早期段階で鉄筋腐食の発生を示す自然電位の低下が生じており、促進腐食試験の基準サイクルである 20 サイクル以降は試験を継続しても、自然電位の変化は生じなかった。

このため、NC シリーズの供試体と BBS シリーズの供試体については、促進サイクル数を最大 20 サイクルとし、促進サイクル数 10 サイクル時点で各配合 2 供試体を、促進サイクル数 20 サイクル時点で残りの各配合 4 供試体を各断面に鉄筋がそれぞれ 1 本含まれるよう、長手方向に割裂し、鉄筋腐食の有無を確認した。

腐食が確認された鉄筋においては、いずれも全面に薄い錆が生じていたことから、腐食面積率 (腐食部分の表面積/鉄筋全体の表面積) の測定を実施し、腐食の程度を評価した。

また、促進腐食試験が終了した各シリーズの供試体について、塩化物イオンの分布を観察するため、EPMA (電子線マイクロアナライザー) による分析を実施した。

分析対象は各シリーズの供試体のうち、塩化物イオン濃度が高い再生粗骨材 Rb を単独で使用し、促進サイクル数 10 サイクル時点で試験を終了した供試体とした。

また、高炉セメントB種の使用による塩化物イオンの拡散抑制効果を検証するため、NS シリーズと BBS シリーズの供試体については、塩化物イオン濃度が高い再生粗骨材 Rb を使用し、促進サイクル数 20 サイクル時点で試験を終了した供試体についても同分析を実施することとした。

分析面は、供試体から鉄筋下面 (界面) を含むよう 40×40mm の試料を切り出し、鏡面研磨を行った後に炭素を蒸着して作製した。

3.1.3 細孔径分布測定

1) 対象供試体

セメント種類の違いによるコンクリート組織の密実性の違いを検討するため、促進腐食試験終了後の供試体について、細孔径分布の測定を実施することとした。試験対象は、NSシリーズとBBSシリーズの供試体のうち、塩化物イオン濃度が高い再生粗骨材Rbを単独で使用し、促進サイクル数20サイクル時点で試験を終了した供試体（NS-Rb-50 供試体、BBS-Rb-50 供試体）とした。

また、配筋方向の違いによる鉄筋界面のコンクリート組織の密実性の違いについて検討するため、配筋が縦筋の供試体と横筋の供試体について、細孔径分布の測定を実施することとした。なお、促進腐食試験用の供試体のうち、配筋を縦筋としたNCシリーズについては、鉄筋取り出し時に供試体が大きく破損しており、鉄筋界面付近からコンクリート試料を切り出すのが困難であったことから、新規に配筋が縦筋の供試体と横筋の供試体を作製し、細孔径分布の測定を実施した。

図-6 に細孔径分布測定用供試体の配合および JCI 法によって測定した塩化物イオン量を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には樽前産の海砂を、粗骨材には製造した再生粗骨材 Rf を単独で使用した。水セメント比は50%、目標スランプ 8 ± 2.5 cm、目標空気量 $5 \pm 1\%$ とし、AE 減水剤により配合を調整した。

表-3 に供試体の寸法および配筋を示す。供試体形状は 100×53 mm 角柱供試体とし、 $\phi 13$ mm のみがき棒鋼を1本埋設した。配筋方向の違いによる鉄筋界面の密実性の違いを検討するため、配筋を横筋とした供試体と配筋を縦筋とした供試体の2種類を作製した。供試体は材齢1日で脱型し、その後材齢7日まで封緘養生を行った。

2) 試料の採取位置および測定方法

促進サイクル20サイクル時点で試験を終了したNS-Rb-50 供試体およびBBS-Rb-50 供試体については、鉄筋上面より約10mm間隔を開けた位置から5mm厚さのコンクリート試料を採取した。

また、新規に作製した配筋方向の異なる供試体のうち、配筋が横筋の供試体については、打設面表層から5mm、鉄筋下面から5mm、さらにそこから下面側に10mm間隔を開けた位置（下面側の部位）から5mmの厚さのコンクリート試料を採取した。また、配筋が縦筋の供試体については鉄筋界面から5mm、さらにそこから10mm間隔を開けた位置（界面以外の部位）から5mmの

表-3 細孔径分布測定用供試体の配合

配合名	使用セメント (%)	水セメント比 (%)	単位容積質量 (kg/m^3)				塩化物イオン量 (kg/m^3)
			セメント	水	細骨材	再生粗骨材 Rf	
N-Rf-50	普通ポルトランド N	50	150	300	853	1069	0.59

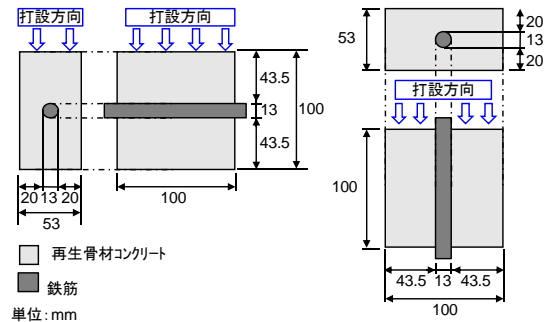


図-6 細孔径分布測定用供試体の寸法および配筋

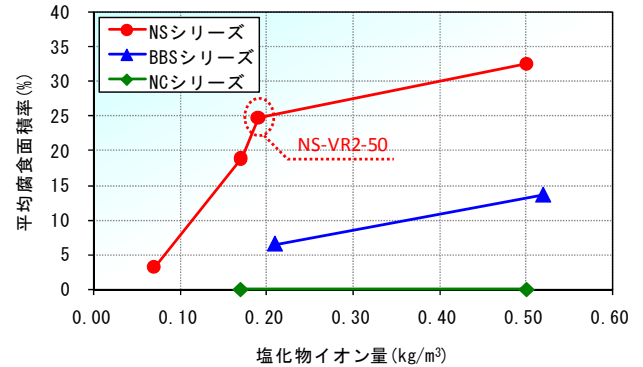


図-7 塩化物イオン量と腐食面積率の関係

厚さのコンクリート試料を採取した。

分析試料には、採取したコンクリート試料から再生粗骨材を除外した新規モルタル部分を使用した。細孔径分布は、分析試料をアセトン中で攪拌・洗浄し、真空乾燥装置で1昼夜真空下で減圧して乾燥した後、水銀圧入法により測定した。また、同一の分析試料を用いて測定した不溶解残分量より、細骨材量の補正を行い、分析試料中の新規セメントペースト分に対する空隙率を求めた。なお、コンクリートのイオン透過性には、 $0.05 \mu\text{m}$ 以上の範囲の空隙率が、透水・透気性にはコンクリート中の連続気泡の径である $0.1 \mu\text{m}$ 以上の範囲の空隙率が大きく影響する可能性があることが報告されているため¹⁴⁾、 $0.05 \mu\text{m}$ 以上の範囲の空隙率と、 $0.1 \mu\text{m}$ 以上の範囲の空隙率に分けて評価した。

3.2 試験結果

3.2.1 鉄筋の腐食状況

図-7 に各供試体中の鉄筋の腐食面積率の平均値を

示す。なお、腐食を生じていなかった鉄筋の腐食面積率は0として平均値を計算している。

NSシリーズの供試体では、塩化物イオン量の多い供試体ほど鉄筋の腐食面積率が高くなる傾向が見られた。この結果より、再生骨材中の塩化物イオン濃度が高いほど鉄筋腐食に及ぼす影響が大きいものと考えられる。

また、砂利Vと再生粗骨材Rbを混合使用した供試体NS-VRb-50(供試体)についても、同様の傾向にあったことから、実際に製造される再生粗骨材のように、塩化物濃度の異なる再生粗骨材が混在した場合であっても、粗骨材全体の平均塩化物イオン濃度が高ければ、鉄筋腐食に及ぼす影響が大きいものと考えられる。

また、鉄筋の腐食面は、いずれも鉄筋下面(型枠面側)であり、鉄筋上面(打設面側)には腐食は発生していなかった。コンクリート打設時に、鉄筋界面のコンクリート組織が粗になったことが可能性があることから、これにより腐食因子(塩化物イオン・水・酸素)が供給されやすい状態になり、腐食が鉄筋下面に集中したものと考えられる。写真-1に鉄筋取り外し後の供試体を示す。鉄筋下面には錆が発生していたが、縦筋界面には錆が発生していなかったことが判る。

また、高炉セメントB種を使用したBBSシリーズでも、NSシリーズの供試体と同様に、塩化物イオン量が多い供試体ほど鉄筋の腐食面積率が高くなる傾向があり、また腐食を生じた鉄筋の腐食面はいずれも鉄筋下面に集中していた。他方、BBSシリーズとNSシリーズの供試体の腐食面積率を比較すると、塩化物イオン量が同程度の供試体であってもBBSシリーズの供試体の方が腐食面積率が低かった。高炉セメントB種を使用した場合、コンクリート組織が緻密になることから、これによって腐食因子(塩化物イオン・水・酸素)の移動が抑制され、鉄筋腐食が抑制出来たと推測される。

また、配筋を縦筋としたNCシリーズの供試体では、いずれの再生粗骨材を使用した供試体においても鉄筋腐食は発生していなかった。配筋が縦筋の場合、鉄筋界面におけるブリーディング水の滞留が生じないものと考えられることから、配筋が横筋の供試体に比べ、鉄筋界面のコンクリート組織が密実になり、鉄筋腐食が発生しなかったものと推測される。

3.2.2 塩化物イオンの分布

1) セメント種類および配筋の違いによる塩化物イオンの分布の比較(10サイクル時点)

図-8に10サイクル時点で促進を終了した供試体について、EPMAにより塩化物イオンの分布を分析した結果を示す。分布は、塩化物イオン濃度が高い順から



写真-1 鉄筋取り外し後の供試体状況
(左: NS-Rb-50 右: NC-R2b-50)

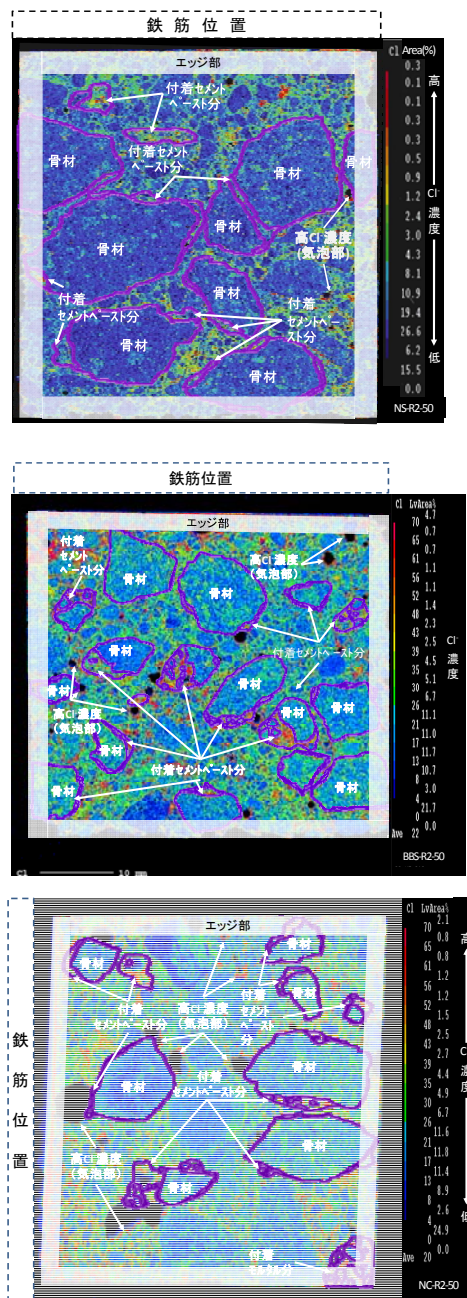


図-8 塩化物イオンの分布状況(10サイクル)
(上: NS-Rb-50、中: BBS-Rb-50、下: NC-R2b-50)

赤→橙→黄→緑→青→黒で表しており、図中の紫枠で囲った部分は、再生粗骨材の骨材部分と付着セメントペースト部分を示している。また、本試験においては塩化物イオンの溶出を防ぐ観点から乾式研磨を行っているため、分析面のエッジ部（4辺）に10 μ m程度の凹凸があり、この影響によりエッジ部の塩化物イオン濃度が高く表示される傾向があった。このため、図中に白色の枠で示したエッジ部については、評価対象から除いている。さらに、この結果は定性分析の結果であり、各図の塩化物イオン濃度の下限値およびピーク値が異なるため、図間での塩化物イオン濃度の比較は出来ない。

分析結果をみると、いずれの分析面においても、気泡部周辺の塩化物イオン濃度が高かった。これらの供試体で使用した再生粗骨材 Rb の可溶性塩化物イオンの比率は約 79%と高かったことを考慮すると、練り混ぜ時に再生粗骨材から塩化物イオンの一部が溶出し、この塩化物イオンを含むブリーディング水とともに上昇し、ブリーディング水が通過または滞留した気泡部の塩化物イオン濃度が高くなったものと推測される。

また、再生粗骨材の付着セメントペースト分と新規セメントペースト分の塩化物イオン濃度を比較すると、付着セメントペースト分に塩化物イオン濃度の高い部分が多く見られた。この付着セメントペースト分は周囲の新規モルタル分と比べ、組織が粗であるものと考えられるが、練り混ぜ時の短期間にブリーディング水が付着モルタル分の内部まで浸透したとは考えにくい。

一方、2章で述べた通り、再生粗骨材中の塩化物イオンは付着セメントペースト分に含まれており、また、既往の研究によると、普通ポルトランドセメントを使用した場合、促進サイクル数が20サイクル以上になると、この塩化物イオンが周囲の新規モルタル分に移動することが明らかとなっているが、本分析は、促進サイクル数10サイクルの比較的試験材齢の若い供試体を対象に実施したものであることから、10サイクル時点においては、練り混ぜ時に再生粗骨材から溶しなかった塩化物イオン（付着セメントペースト分に化学的・物理的に固定されている非可溶性塩化物イオン等）が再生粗骨材中に残存していることを示しているものと考えられる。

また、高炉セメントB種を使用したBBS-Rb-50供試体の塩化物イオンの分布と、普通ポルトランドセメントを使用したNS-R2-50供試体およびNC-Rb-50供試体の塩化物イオンの分布には大きな違いは確認されなかった。高炉セメントB種を使用した場合、一般的にコ

ンクリート組織が緻密になることから、再生粗骨材中の塩化物イオンの拡散を抑制出来る可能性があるが、本分析を行った10サイクルの段階では、再生粗骨材中の塩化物イオンの拡散が進行しておらず、セメント種類の違いによる塩化物イオンの分布に差が生じなかったものと考えられる。

2)セメント種類の違いによる塩化物イオンの分布の比較 (20サイクル時点)

図-9に20サイクル時点で促進を終了したNSシリーズとBBSシリーズの供試体について、EPMAにより塩化物イオンの分布を分析した結果を示す。分布は、塩化物イオン濃度が高い順に赤→橙→黄→緑→青→黒で表示されており、図中の紫枠で囲った部分は、再生粗骨材の骨材部分と付着セメントペースト部分を示している。また、図中に白色の枠で示したエッジ部については、凹凸の影響により、塩化物濃度が高く表示され

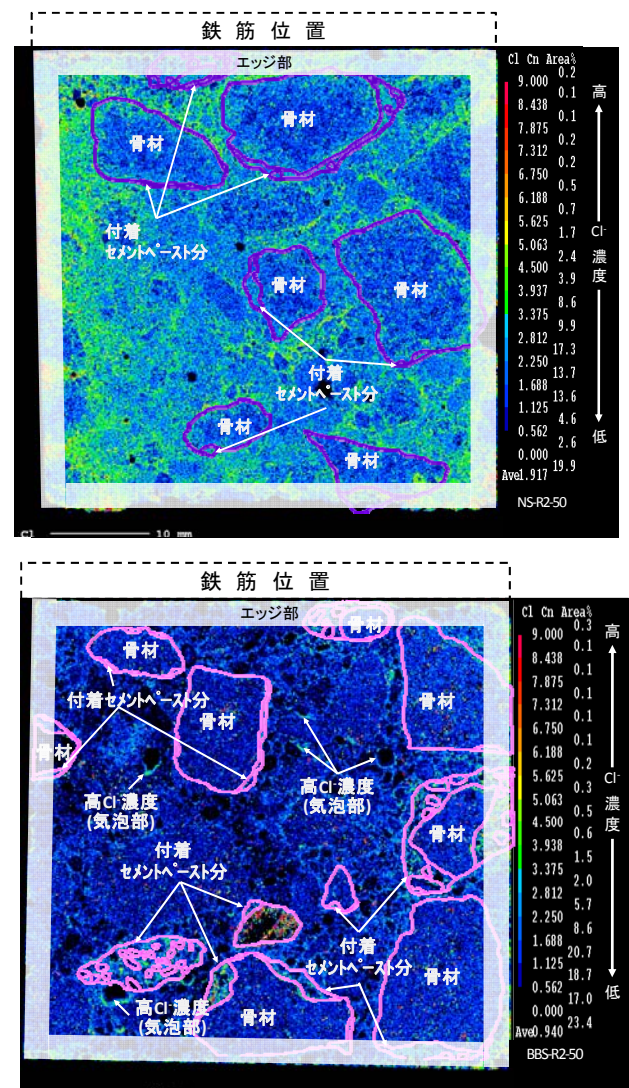


図-9 塩化物イオンの分布状況 (20サイクル)
(上: NS-Rb-50、下: BBS-Rb-50)

る傾向があったため、評価対象から除いている。

なお、この分析結果は定量分析の結果であり、図間の塩化物イオン濃度の下限値およびピーク値が同一になるよう調整している。このため、特にBB-Rb-50 供試体の分析結果は、10 サイクル時点に比べ、全体的に暗色で表示されている。

NS-Rb-50 供試体の分析結果を見ると、再生粗骨材の付着セメントペースト分と新規セメントペースト分に均等に塩化物イオンが分布していた。この結果より、NS-Rb-50 供試体においては、促進サイクルの経過に伴い、再生粗骨材の付着セメントペースト分中の塩化物イオンの拡散移動が進行したものと考えられる。

一方、BBS-Rb-50 供試体の分析結果を見ると塩化物イオンは主に再生粗骨材中の付着セメントペースト分に集中しており、鉄筋界面および気泡部周辺の一部にも塩化物イオン濃度が高い部位が見られた。これは、10 サイクル時点における塩化物イオンの分布傾向とほぼ同様の結果であり、高炉セメントを使用した場合については、10 サイクル時点から塩化物イオンの拡散移動があまり進行していないものと推察される。この結果よりセメントに水密性に優れた高炉セメントB種を使用することにより、再生粗骨材コンクリート中の塩化物イオンの拡散移動が抑制されたものと考えられる。

また、表-2 に示したとおり JCI 法により測定した NS-Rb-50 供試体と BBS-Rb-50 供試体の塩化物イオン量はいずれも 0.51kg/m³ であったが、この分析結果によると、NS-Rb-50 供試体の平均塩化物イオン濃度は 1.917%、BBS-Rb-50 供試体の平均塩化物イオン濃度は 0.940% であり、約 2 倍の差があった。先述した通り、NS-Rb-50 供試体においては塩化物イオンがコンクリート全体に拡散移動しており、同一供試体であればどこから分析面を採取しても、平均塩化物イオン濃度に差は生じないと考えられる。一方、BBS-R2-50 供試体においては、特に再生粗骨材中に塩化物イオンが集中しており、分析面中の再生粗骨材の密度が平均塩化物イオン濃度の大小に影響するものと考えられることから、本分析で使用した分析面中の再生粗骨材の密度が低く、平均塩化物イオン濃度に差を生じたものと考えられる。

3.2.3 コンクリート組織の密実性

1) セメント種類の違いによる空隙率の比較

図-10 に 20 サイクル時点で促進を終了した NS シリーズと BBS シリーズの供試体について、細孔範囲毎の空隙率を求めた結果を示す。

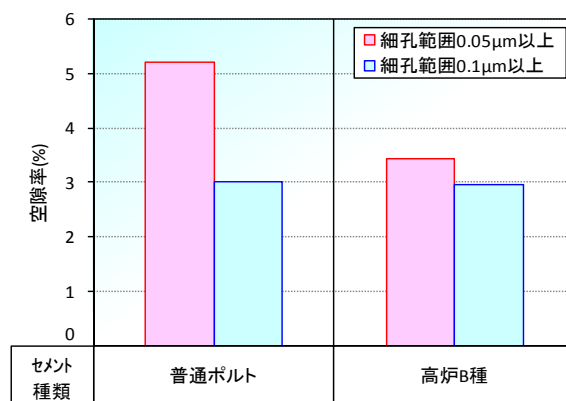


図-10 セメント種類と空隙率の関係 (NS-Rb-50 供試体、BBS-Rb-50 供試体、20 サイクル)

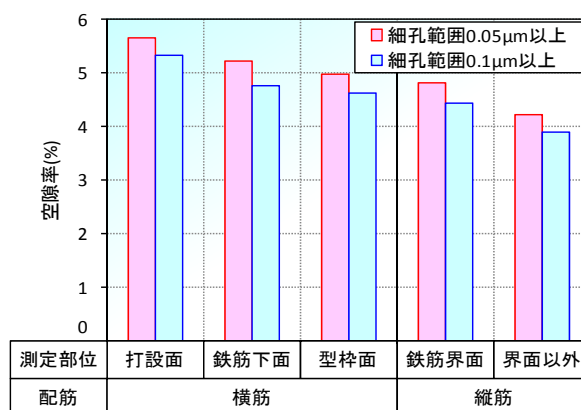


図-11 配筋の異なる供試体における部位別の空隙率 (新規作製供試体、材齢 7 日)

0.1 μm 以上の細孔範囲の空隙率は、セメント種類に関わらず、いずれも同等の値であったが、0.05 μm 以上の細孔範囲の空隙率を見ると、高炉セメントB種を使用した供試体の方が普通ポルトランドセメントを使用した場合に比べて小さくなっていった。先述した通り、0.05 μm 以上の細孔範囲の空隙率は、コンクリートのイオン透過性に大きな影響を及ぼす可能性が指摘されており、また、この結果は、図-9 で示した高炉セメントを使用した供試体において塩化物イオンの拡散移動が抑制されていた結果とも一致する。

以上の結果をまとめると、高炉セメントB種を使用した供試体においては、コンクリート組織が緻密になり、再生粗骨材中の塩化物イオンの拡散移動が抑制された結果、鉄筋腐食が抑制出来たものと考えられる。

2) 配筋の違いによる空隙率の比較

図-11 に配筋の異なる供試体中の部位毎の各細孔範囲の空隙率を示す。配筋が横筋の供試体の空隙率は、いずれの細孔範囲においても、打設面側ほど高くなる傾向にあった。本試験で使用した供試体はサイズが小さいため空隙率の差の絶対値は小さいものの、この傾

向はブリーディング水が打設面側に上昇し、打設面側の部位ほど水セメント比が高くなり、コンクリート組織が粗になったことを示しているものと考えられる。

また、配筋が縦筋の供試体の空隙率は、いずれの細孔範囲においても、鉄筋界面の方が高くなる傾向にあった。配筋が縦筋の供試体においても、鉄筋界面はブリーディング水の通り道となることから、鉄筋界面の水セメント比が高くなり、コンクリート組織が粗になったことを示しているものと考えられる。

また、配筋の異なる供試体間の鉄筋界面の空隙率を比較すると、いずれの細孔範囲においても、配筋が横筋の供試体の方が縦筋の供試体に比べて空隙率が高かった。先述したとおり、横筋の供試体においてはブリーディング水が鉄筋界面に滞留した可能性があり、一方の縦筋の供試体においてはブリーディング水が鉄筋界面を通過することはあっても、滞留は生じないものと考えられることから、横筋の供試体の方が、縦筋の供試体に比べ、鉄筋界面のコンクリート組織が粗くなり、腐食因子（塩化物イオン・水・酸素）が供給されやすい状態になっていたものと考えられる。

また、以上の結果をまとめると、配筋が横筋の供試体において鉄筋腐食が顕著に発生していたのは、鉄筋界面のコンクリート組織が粗になり、塩化物イオン以外の腐食因子（水・酸素）が供給されやすい状態になっていたことが原因だと考えられる。

以上のことから次のことがわかった。

- (1) 再生粗骨材中に含まれる塩化物イオンの一部は、フレッシュ時において、練り混ぜ水に溶出する。
- (2) 使用する再生粗骨材の塩化物濃度が高いほど、再生粗骨材コンクリート中の鉄筋腐食が顕著に発生する。
- (3) 実構造物を取り壊して製造した再生粗骨材のように、塩化物濃度の異なる再生粗骨材が混在するケー

スにおいても、粗骨材全体の平均塩化物濃度が高いほど、鉄筋腐食に及ぼす影響が大きい

(4) 鉄筋腐食には再生粗骨材中の塩化物イオンの影響に加え、鉄筋界面のコンクリート組織の密実性が大きく影響する傾向があり、特にブリーディングの影響等により鉄筋界面組織が粗になると鉄筋腐食が発生しやすくなる。このため、ブリーディングを抑制する観点から、入念な締め固めを行うなど、施工上の対策が有効と考えられる。

(5) 水密性に優れた高炉セメントB種を使用することで、再生粗骨材中の塩化物イオンの拡散移動を抑制できるため、高炉セメントB種の使用は、腐食抑制対策として有効である。

4. 再生粗骨材中の発錆限界塩化物濃度に関する検討

4.1 試験概要

4.1.1 コンクリートの配合

表-4にコンクリートの配合およびJCI法に準拠して測定したコンクリート中の塩化物イオン量を示す。

本試験においては、再生粗骨材の発錆限界塩化物濃度を検討することを目的とし、コンクリート中の目標塩化物イオン量を段階的に変えた5配合を作製した。具体的には、コンクリート標準示方書に示されている練り混ぜ時のコンクリート中の塩化物イオン量の許容値(0.3kg/m³)と、コンクリート構造物供用後の発錆限界塩化物イオン量の値(1.2kg/m³)を参考とし、コンクリートの目標塩化物イオン量を0.15kg/m³、0.3kg/m³、0.6kg/m³、0.9kg/m³、1.2kg/m³の5水準に設定した。

コンクリートの塩化物イオン量は、製造した再生骨材Ra~Reの混合比率を変えることで調整し、セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材には樽前産の海砂を使用した。

コンクリートの水セメント比は50%とし、配合は、

表-4 コンクリートの配合および塩化物イオン量

配合番号	セメント種類	水セメント比 W/C (%)	目標スラング (cm)	目標 Air (%)	細骨材率 s/a (%)	単位容積質量(kg/m ³)					コンクリートの塩化物イオン量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	砂 S	粗骨材G						
									合計	Rc		Rd	Re	Rf	Rg
N-0.15	普通ポルトN	50	8±2.5	2±1	43	150	300	853	1049	1049	—	—	—	—	0.19
N-0.3									1053	678	375	—	—	—	0.33
N-0.6									1066	—	—	1066	—	—	0.62
N-0.9									1055	113	—	—	942	—	0.94
N-1.2									1054	287	—	—	—	767	1.08

目標スランブ $8 \pm 2.5\text{cm}$ として、AE 減水剤により配合を調整した。なお、コンクリート中の実測塩化物イオン量は、概ね目標塩化物イオン量に近い値であった。

4.1.2 ブリーディング量測定および塩化物濃度測定

3章で述べたとおり、再生粗骨材中の塩化物イオンの一部は、練り混ぜ時にブリーディング水に溶出している可能性が考えられた。このため、練り混ぜ時における再生粗骨材からの塩化物イオンの溶出の有無を検討することを目的とし、ブリーディング量測定およびブリーディング水中の塩化物イオン濃度測定を実施した。ブリーディング量測定は、JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に準拠し、 $\phi 25 \times 28.5\text{cm}$ の容器にコンクリートを打設した後、1時間経化時までには10分ごとに打設面にしみ出したブリーディング水を採取し、それ以降はブリーディングが収束するまで30分ごとに採取を継続した。また、ブリーディング水の塩化物イオン濃度の測定には、**図-12**に示す一般的に現場等で用いられている試験紙タイプの塩化物濃度測定計を使用し、採取したブリーディング水に測定計を3本差し込み、その平均塩化物イオン濃度を求めた。

4.1.3 供試体作製

3章で述べたとおり、供試体の配筋方向を横筋にした場合、ブリーディングの影響を受けるため、再生粗骨材の発錆限界塩化物濃度を正確に特定できない可能性があった。このため、供試体は**図-4**に示す $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体とし、2本の $\phi 13\text{mm}$ みがき棒鋼を、各鉄筋の最小かぶりが 2cm となるよう、打設面に対して垂直方向（縦筋方向）に配筋した。

供試体は各配合10供試体ずつ作製し、養生はJCI-SC3法に準拠し、材齢1日で脱型後、材齢7日まで封緘養生を行った。

4.1.4 室内促進腐食試験

再生粗骨材の発錆限界塩化物濃度を検討するため、各配合10供試体のうち、4供試体について、室内における鉄筋の促進腐食試験を実施した。試験はJCI-SC3法に準拠し、湿潤期間（温度 70°C 、相対湿度99%）3日間、乾燥期間（温度 12°C 、相対湿度55%）4日間を1サイクルとし、乾燥繰り返しを行う方法で実施した。

最大促進サイクル数は、3章で実施した自然電位測定の結果を参考とし、20サイクルに設定した。サイクルの進行が鉄筋腐食に及ぼす影響を検討するため、促進サイクル数10サイクル時点、20サイクル時点において、それぞれ各配合2供試体を対象とし、鉄筋腐食の有無を確認した。なお、供試体は、各断面に鉄筋が1

本含まれるよう、長手方向に割裂した。

また、促進試験終了後の供試体中の塩化物イオンの分布を観察するため、促進サイクル数10サイクル、20サイクルで促進を終了した供試体のうち、N-0.6供試体およびN-1.2供試体を対象とし、EPMAによる塩化物イオンの定量分析を行った。分析面は、2本の鉄筋の界面を含むよう供試体中央部から試料（約 $3.4 \times 5\text{cm}$ ）を切り出し、鏡面研磨を行い、炭素を蒸着させて作製した。

4.1.5 暴露試験

実環境下における再生粗骨材コンクリート中の鉄筋腐食傾向および塩化物イオンの分布を検討するため、各配合10供試体のうち、6供試体を対象について、屋外での暴露試験を実施した。

本試験においては再生粗骨材コンクリート中に内在する塩化物イオンの影響を検証することから、暴露場所は外来塩分の侵入がない寒地土木研究所構内の第一実験棟屋上とした。なお、鉄筋腐食に影響する環境



図-12 塩化物濃度測定計の外観

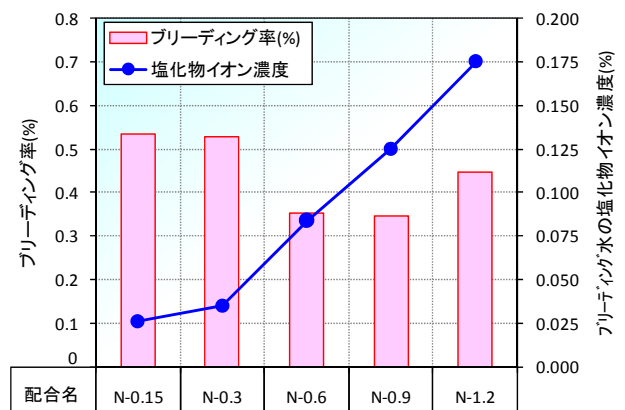


図-13 ブリーディング率と塩化物イオン濃度

条件として、塩化物イオンおよび酸素の拡散速度に影響する外気温¹¹⁾¹²⁾と、腐食因子である水分の供給状態を示す湿度が考えられたことから、温湿度センサーを用いて暴露期間中の外気温および湿度を測定した。

暴露期間の違いが鉄筋腐食に及ぼす影響を検討するため、暴露後1年目と2年目にそれぞれ各配合2供試体を対象とし、鉄筋腐食の有無を確認した。なお、供試体は各断面に鉄筋が1本含まれるよう、長手方向に割裂した。残りの各配合2供試体については継続して暴露試験を実施しており、暴露期間が5年以上経過した時点で鉄筋腐食の有無を確認する予定である。

また、暴露試験終了後の供試体中の塩化物イオンの分布を観察するため、1年目、2年目で暴露を終了した供試体のうち、N-0.6供試体およびN-1.2供試体を対象とし、EPMAによる塩化物イオンの定量分析を行った

分析面は、2本の鉄筋の界面を含むよう供試体中央部から試料(約3.4×5cm)を切り出し、鏡面研磨を行い、炭素を蒸着させて作製した。

4.2 試験結果

4.2.1 ブリーディング水への塩化物イオンの溶出状況

図-13に配合別のブリーディング率とブリーディング水中の塩化物濃度を示す。ブリーディング率は、約0.35~0.52%であり、配合毎に若干異なる結果となった。既往の報告では、ブリーディング率には単位水量等の配合条件に加え、骨材の粒度構成、密度、微粒分量の違いが影響を及ぼすことが指摘されている。本試験で使用した再生粗骨材の密度はほぼ同等であることから、粒度構成および微粒分量の違いが、配合毎のブリーディング率の差に影響したものと推察される。

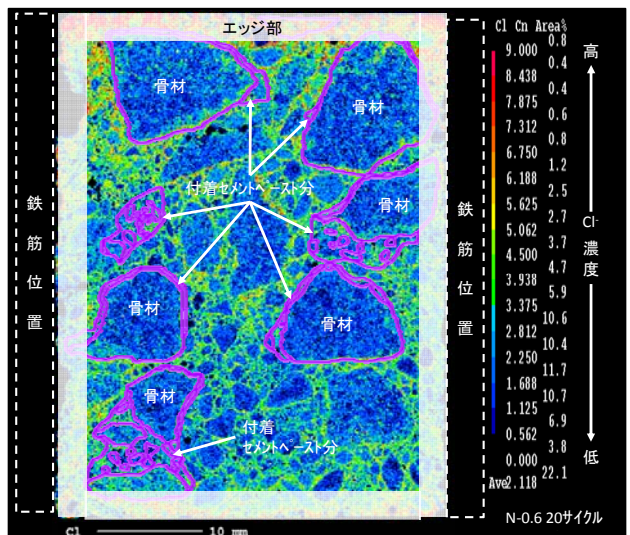
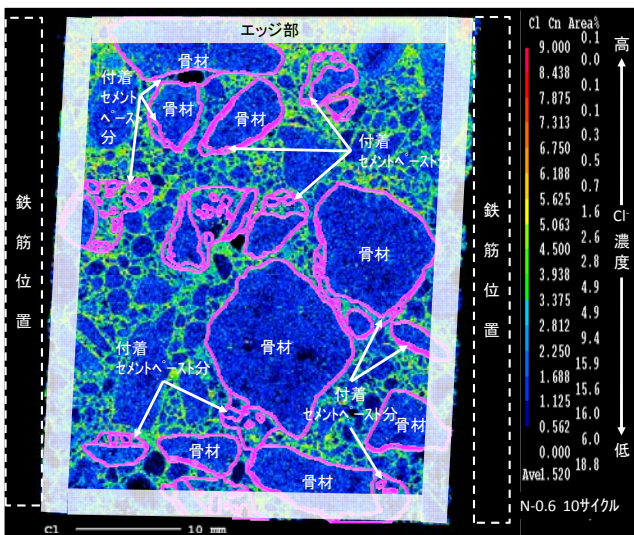


図-14 室内促進腐食試験試験後の塩化物イオンの分布 (N-0.6 供試体、左：10 サイクル、右：20 サイクル)

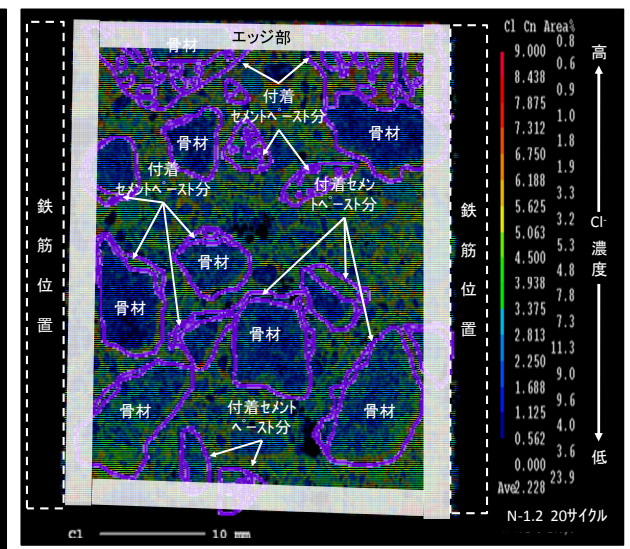
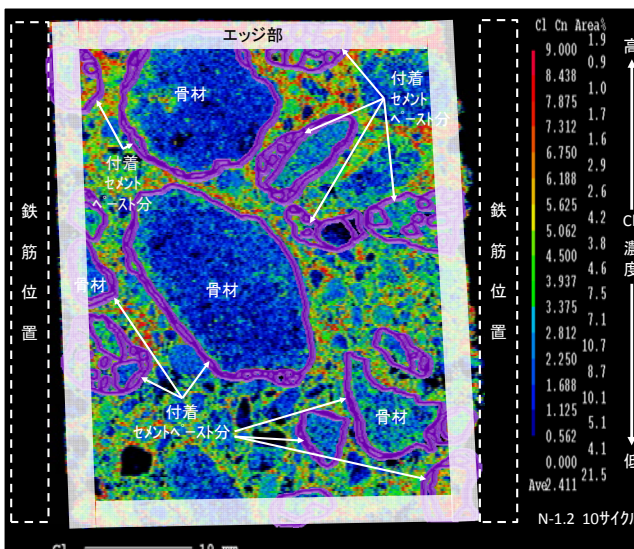


図-15 室内促進腐食試験試験後の塩化物イオンの分布 (N-1.2 供試体、左：10 サイクル、右：20 サイクル)

また、ブリーディング水中の塩化物イオン濃度をみると、使用した再生粗骨材の塩化物濃度が高いほど、ブリーディング水の塩化物イオン濃度が増加する傾向がみられた。この結果より、再生粗骨材に含まれる塩化物イオンの一部は、フレッシュ時に練り混ぜ水に溶出しているものと考えられる

4.2.2 室内促進腐食試験

1) 鉄筋の腐食状況

室内促進腐食試験を実施したφ10×20cm 供試体を割裂し、鉄筋腐食の有無を確認した結果、コンクリートの塩化物量や促進サイクル数に関わらず、鉄筋腐食は発生していなかった。これは、配筋を縦筋にしたため、鉄筋とコンクリートの付着が改善され、塩化物イオンを含む腐食因子が供給されにくくなったためと考えられる

他方、3章で示した配筋が横筋の供試体の試験においては、再生粗骨材コンクリートの塩化物イオン量が0.3kg/m³以下であっても鉄筋腐食が発生していたことから、再生粗骨材を使用したコンクリート中の鉄筋の腐食には、再生粗骨材中の塩化物イオンの影響に加え、鉄筋界面のコンクリート組織の密実性が大きく影響するものと考えられる。

2) 塩化物イオンの分布

図-14にN-0.6 供試体の塩化物イオンの分布を、図-15にN-1.2 供試体の塩化物イオンの分布を示す。なお、塩化物イオンの分布は、濃度の高い順に赤→橙→黄→緑→青→黒で示されている。また、図中に白色の枠で示したエッジ部については、凹凸の影響により塩化物濃度が高く表示される傾向があったため、評価対象から除いている。

N-0.6 供試体の分析結果をみると、促進サイクル数に関わらず塩化物イオンが均一に分布しており、再生粗骨材の付着セメントペースト分と新規セメントペースト分の塩化物イオン濃度にも差が認められなかった。なお、3章で述べた同分析の結果によると、同N-0.6 供試体と塩化物イオン量が同等で、普通ポルトランドセメントを使用したNS-Rb-50 供試体およびNC-Rb-50 供試体では、促進サイクル10サイクル時点において、再生粗骨材中の付着セメントペースト分の塩化物イオン濃度が高かったが、この結果とは異なる傾向である。N-0.6 供試体に使用した再生粗骨材Rcの全塩化物イオンに対する可溶性塩化物イオンの比率は90%、再生粗骨材Rbの全塩化物イオンに対する可溶性塩化物イオンの比率は79%であり、再生粗骨材Rcの方が可溶性塩化物イオン濃度の比率が高いことを考慮すると、再生

粗骨材Rcを使用したN-0.6 供試体の方が塩化物イオンの拡散が早期に進行したものと考えられる。また、この結果より、再生粗骨材に含まれる可溶性塩化物イオンの比率が高いほど、新規コンクリート中で早期に塩化物イオンの拡散が進行するものと考えられる。

次にN-1.2 供試体の分析結果を見ると、促進サイクル数に関わらず塩化物イオンが均一に分布しており、再生粗骨材の付着セメントペースト分と新規セメントペースト分の塩化物イオン濃度にも差が認められなかった。この結果より、N-1.2 供試体においてもN-0.6 供試体と同様に、促進10サイクル時点から再生粗骨材中の付着セメントペースト分に含まれる塩化物イオンが新規セメントペースト分に拡散移動していたものと考えられる。

以上の結果より、再生粗骨材に含まれる塩化物イオンの大半は、材齢の進行に伴い、新規セメントペースト中に拡散移動することが明らかとなった。本試験においては、配筋を縦筋としたため、鉄筋とコンクリート組織の付着が改善され、いずれの供試体においても鉄筋腐食は発生していなかったが、3章で実施した試験のように、鉄筋界面のコンクリート組織が粗で、腐食因子（塩化物イオン、水、酸素）が供給されやすい状態であれば、再生粗骨材に含まれる塩化物イオンが拡散移動し、鉄筋腐食に影響を及ぼすことが懸念され

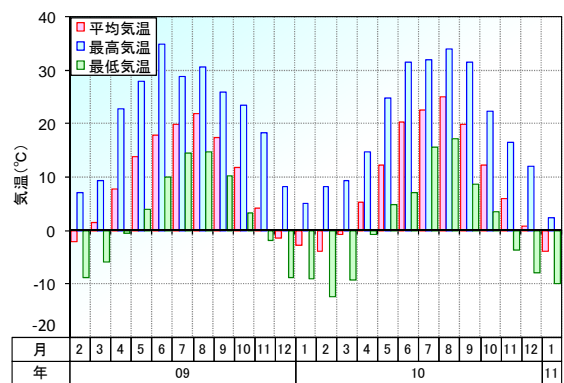


図-14 暴露場の測定外気温

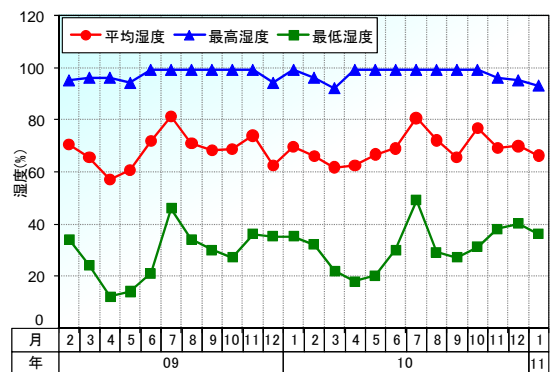


図-15 暴露場の測定湿度

る。このため、積雪寒冷地において発生する再生粗骨材の場合、再生粗骨材の塩化物濃度としては冒頭に述べた JIS 相当の規制 (0.04%以下) が、再生粗骨材コンクリートとしては普通コンクリートと同等の塩化物イオン量の規制 (0.3kg/m³以下) が必要になるものと考えられる。

4.2.3 暴露試験

1) 暴露期間中の気温および湿度

図-14 に暴露期間中 (2009年2月~2011年1月) に測定したおける暴露場の外気温の推移を、図-15 に暴露場の湿度の推移を示す。

最も平均気温が高いのは8月、最も低いのは2月であり、暴露期間中の最高温度は34.9℃、最低気温は-12.5℃であった。湿度は外気温に比べて季節変動が小さく、平均湿度は概ね60~80%の範囲であり、暴露期間中の最高湿度は100%、最低湿度は12%であった。また、暴露環境と、室内促進腐食試験の環境を比較すると、最高湿度はいずれもほぼ同等であるため、水分の供給条件に関しては、大きな差はないと推察される。一方、温度については、特に冬期間における外気温が低いことから、温度に依存する酸素および塩化物イオンの拡散速度については、室内試験に比べると移動が生じにくい環境であるものと考えられる。

2) 鉄筋の腐食状況

暴露試験を実施したφ10×20cm 供試体を割裂し、鉄筋腐食の有無を確認した結果、コンクリートの塩化物量や暴露年数に関わらず、鉄筋腐食は発生していなかった。

これは室内促進腐食試験と同様の結果であり、配筋を縦筋にしたため、鉄筋とコンクリートの付着が改善され、塩化物イオンを含む腐食因子が供給されにくくなったためと考えられる。

3) 塩化物イオンの分布

図-18 に N-0.6 供試体の塩化物イオンの分布を、図-19 に N-1.2 供試体の塩化物イオンの分布を示す。なお、塩化物イオンの分布は、濃度の高い順に赤→橙→黄→緑→青→黒で示されている。また、図中の紫枠は、再生粗骨材の骨材および付着セメントペースト分に該当する部分である。また、図中に白色の枠で示したエッジ部については、凹凸の影響により、塩化物濃度が高く表示される傾向があったため、評価対象から除いている。

N-0.6 供試体の分析結果をみると、1年経過時においては、一部の再生粗骨材の付着セメントペースト分 (左下、右上、右下) の塩化物イオン濃度が高かったが、それ以外の付着セメントペースト分と新規セメントペースト分の塩化物イオン濃度には差が認められなかった。また、付着セメントペースト分の塩化物イオン濃度は、高い部位では9%程度、低い部位では4.5~5%程度であり、約2倍の差が生じていた。本試験では塩化物イオン濃度が均一になるよう再生粗骨材を製造しているため、この塩化物イオン濃度の差が製造時より生じていたものとは考えにくく、さらに N-0.6 供試体には再生粗骨材 Rc を単独で使用していることを考慮すると、N-0.6 供試体においては、1年経過時から一部の再生粗骨材に含まれる塩化物イオンが新規セメントペースト中に拡散移動しているものと考えられる。2年経過時における分析結果をみると、一部の再生粗骨材の付着セメントペースト分 (左下、中央、右下) の塩化物イオン濃度が高かったが、それ以外の付着セメントペースト分と新規セメントペースト分の塩化物イオン濃度には差が認められず、暴露1年経過時と同様の傾向であったことから、一部の再生粗骨材中の塩化物イオンが新規セメントペースト中に拡散移動してい

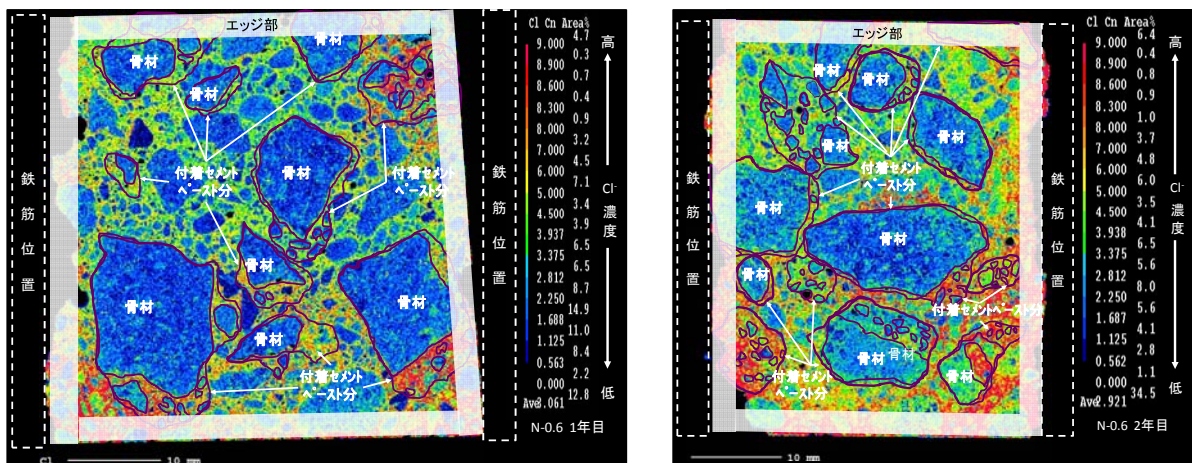


図-18 暴露試験試験後の塩化物イオンの分布 (N-0.6 供試体、左: 1年経過時、右: 2年経過時)

るものと考えられる。

次に、N-1.2 供試体の分析結果をみると、1 年経過時点においては分析面の左上部分の塩化物イオン濃度が比較的低かったが、それ以外の部位においては塩化物イオンが概ね均一に分布しており、再生粗骨材の付着セメントペースト分と新規セメントペースト分の塩化物イオン濃度にも差が見られなかった。この結果より、N-1.2 供試体においては、1 年経過時から、再生粗骨材中の塩化物イオンが新規セメントペースト中に拡散移動していたものと考えられる。また、2 年経過時における塩化物イオンの分布をみると、分析面左下側は塩化物イオン濃度が比較的高く、分析面右上側は塩化物イオン濃度が比較的低くなっていた。しかしながら、分析面中の同一側の再生粗骨材中の付着セメントペースト分と新規セメントペースト分の塩化物イオン濃度には大きな差がなかったことから、1 年目と同様、再生粗骨材中の塩化物イオンが新規セメントペースト中に拡散移動していたと考えられる。

次に、暴露 1 年経化時と 2 年経化時の塩化物イオンの分布を比較すると、いずれの配合の供試体でも、暴露年数の進行による塩化物イオンの分布の変化は認められなかった。これは、特に冬期間における外気温が低く、塩化物イオンの拡散移動が進行しにくい環境下にあったことが影響しているものと考えられる。

次に、図-14～図-15 に示した室内促進腐食試験後の供試体中の塩化物イオン濃度と暴露試験終了後の各供試体の塩化物イオン濃度を比較すると、暴露試験終了後の供試体の方が比較的塩化物イオン濃度が高かった。塩化物イオンの分布をみると、室内促進腐食試験終了後の供試体は塩化物イオン濃度が均一に分布し

ていたことから、同一供試体であればどこから分析面を採取しても、平均塩化物イオン濃度に差は生じないと考えられる。一方、暴露試験終了後の供試体については、同一分析面においても塩化物イオンの分布に偏りがあり、分析面の採取箇所によっては塩化物イオン濃度が高い部位があるものと考えられる。このため、室内促進腐食試験と暴露試験終了後の供試体の塩化物イオン濃度に差が生じたのは、この塩化物イオンの拡散状態の違いが影響したものと考えられる。

以上のことから、次のことが判った。

- (1) 再生粗骨材中に含まれる塩化物イオンの一部はフレッシュ時に練り混ぜ水に溶出するが、再生粗骨材中に残存した塩化物イオンも、硬化後、材齢の進行に伴い、大半が新規セメントペースト中に拡散移動する。このため、再生粗骨材の塩化物濃度については JIS 相当の規制値 (0.04%) が、塩化物イオンを含む再生粗骨材を使用したコンクリートについては、普通コンクリート相当の塩化物イオン量の規制値 (0.3kg/m³) が必要と考えられる。
- (2) 再生粗骨材中の塩化物イオンの拡散には、外気温等の環境条件の違いが影響する。また、再生粗骨材に含まれる可溶性塩化物イオンの比率が高いほど、早期に進行する傾向がある。

5. 再生粗骨材中の簡易塩化物濃度評価手法に関する検討

5.1 再生骨材の塩化物濃度管理の現状

1 章で述べたコンクリート用再生骨材に関する JIS に

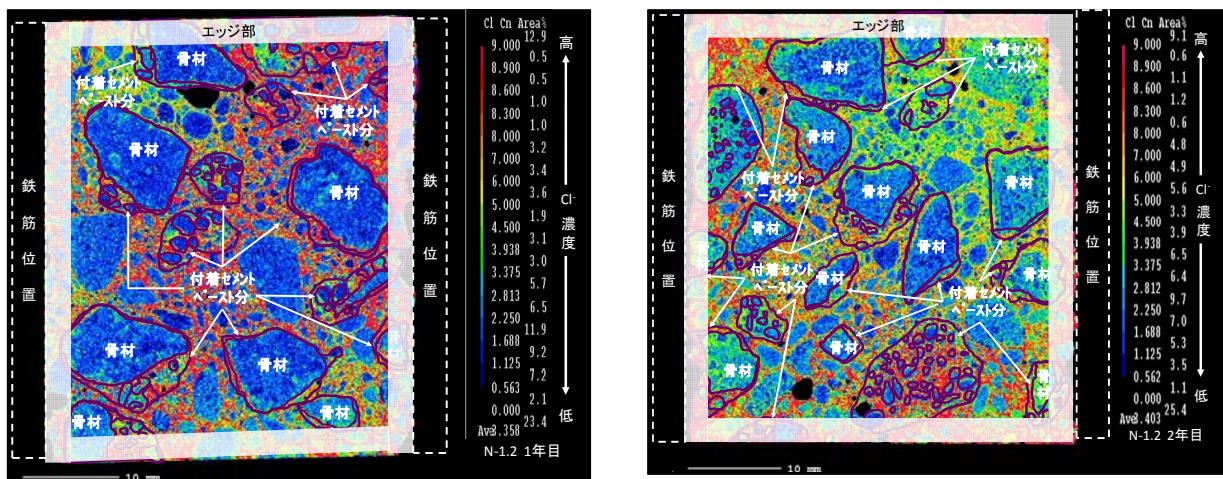


図-19 暴露試験試験後の塩化物イオンの分布 (N-1.2 供試体、左：1 年経過時、右：2 年経過時)

おいては、再生骨材の塩化物 (NaCl) 濃度は再生骨材中に含まれる塩分の全量である全塩化物濃度で管理することされている。また、その測定には JIS A 5002「構造用軽量コンクリート骨材」¹⁵⁾に準拠して求めた塩化物濃度に一定係数 (4.0) を掛けて全塩化物濃度とする方法 (以下、「JIS 法」と記す) が用いられている。しかしながら、同方法には、塩化物濃度の定量に各種薬品や滴定器具が必要となるため、試験機関等で無ければ測定が困難である。

また、他の塩化物濃度の測定方法としては、再生粗骨材コンクリートの塩化物濃度測定に使用した JCI 法が挙げられる。同方法の全塩化物濃度の測定方法は、分析試料を酸で溶解して粗骨材中の全塩化物を抽出し、それを直接定量する方法であるため、全塩化物量を確実に把握することができる。しかしながら、この方法では塩化物の定量時に加え、塩化物の抽出の際にも薬品を使用することから、JIS 法と同様に試験機関等で無ければ実施が困難である。

5.2 考案した試験紙法の概要

先述したとおり、既存の試験方法では、塩化物の抽出過程および塩分の定量過程で種々の薬品や滴定器具、分析装置を使用するため、現場での実施は困難である。このため、本研究では、塩化物濃度測定計以外の器具や薬品を必要とせず、再生粗骨材の塩化物濃度が測定可能な試験紙法を考案した。具体的方法は、再生粗骨材と水を混合・振とうして塩化物の抽出を行い、次に現場等でフレッシュコンクリートの塩化物濃度の検査に一般的に用いられている塩化物濃度測定計 (図-12) を使用して塩化物を定量した。なお、この測定計は差し込み後、5～10 分程度と比較的迅速に塩化物濃度の定量ができる。また、この測定計で求めた塩化物濃度は、塩化物の定量方法の中で比較的高精度な電位差滴定法で求めた塩化物濃度と比較しても±10%以内であり、塩化物濃度を精度良く定量できる。

5.3 試験紙法における塩化物抽出条件の検討

5.3.1 抽出条件の設定

先述したとおり、試験紙法は再生粗骨材と水を混合・振とうすることで塩化物の抽出を行う方法である。このため、塩化物の抽出条件として、試料の状態 (粒径および乾燥程度)、抽出水の温度、振とう時間を考慮することとし、表-5 に示す各抽出条件を組み合わせた試験水準を設定して、これらの条件が塩化物の抽出量に及ぼす影響を検討した。

表-5 予備試験における抽出条件の組み合わせ

試験ケース	試料の状態	抽出水の温度	振とう時間
ケース 1	未破碎試料 200g (5-15mm)	80℃	5 分間
	粗碎試料 200g (5mm 以下)		
	粉末試料 40g (0.15mm 以下)		
ケース 2	粉末試料 40g (0.15mm 以下)	20℃	5 分間
		50℃	
		80℃	
ケース 3	粉末試料 40g (0.15mm 以下)	80℃	1 分間
			5 分間
			15 分間

ケース 1 では試料の状態に着目して、試料に未破碎試料 (5-15mm)、粗碎試料 (5mm 以下)、粉末試料 (0.15mm 以下) の 3 種類を使用し、抽出水の温度は 80℃、振とう時間は 5 分間とした。ケース 2 では抽出水の温度に着目して、20℃、50℃、80℃の 3 条件とし、試料には粉末試料を使用し、振とう時間は 5 分間とした。ケース 3 では振とう時間に着目して、1 分間、5 分間、15 分間の 3 条件とし、試料には粉末試料を使用し、抽出水の温度は 80℃とした。なお、振とう回数は、いずれのケースにおいても 80～100 回/1min とした。

また、本試験においては、試験法の適用性の検討を行うことから、再生粗骨材自体の塩化物濃度のバラツキの影響をできるだけ除外する必要があった。このため、実験室において塩化ナトリウムを添加して作製したコンクリートブロックを原料として製造した再生粗骨材のうち、本検討時に製造済みであった再生粗骨材 Ra を使用することとした。

分析試料は、再生粗骨材を所定の粒径になるまで破碎・粉碎した後、一昼夜試験室内 (温度 20℃～30℃、湿度制御なし) に静置してから使用した。試験は、試料と抽出水 200ml を保温容器 (魔法瓶) 内で混合し、直ちに振とうした後にろ過処理を行い、ろ過した抽出水の塩化物イオン (Cl⁻) 濃度を塩化物濃度測定計を用いて測定した。なお、塩化物濃度測定計は、1 試料につき 3 本の測定計を使用した。

また、塩化物濃度測定計で測定される値は抽出水の塩化物イオン濃度であり、骨材においては規制値として塩化物 (NaCl) 濃度が用いられていることから、式(1) によって分析試料の塩化物濃度に換算 (NaCl 原子量 58.5、Cl⁻原子量 35.5 より、NaCl = 1.65Cl⁻として計算) した。

$$NaCl'(\%) = \frac{W_g(g)}{R_g(g)} \times Cl^-(\%) \times 1.65 \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $NaCl'$: 試験紙法による塩化物濃度(%)
 W_g : 試験紙法で用いた抽出水の質量(g)
 R_g : 試験紙法で用いた分析試料の質量(g)
 Cl^- : 3本の塩分量測定計の読み値より求めた塩化物イオン(Cl^-)濃度の平均値(%)

5.3.2 各抽出条件が塩化物の抽出量に及ぼす影響

図-16 に各試験ケースにおける塩化物濃度を示す。

ケース1の結果を見ると、試料が細かいほど塩化物の抽出量は増加する傾向があり、粗砕試料の塩化物濃度は未破砕試料の約2倍、粉末試料の塩化物濃度は粗砕試料の約3倍であった。これは試料の比表面積が増加し、試料に抽出水が浸透しやすくなったためと考えられる。

ケース2の結果を見ると、抽出水の温度が高いほど塩化物の抽出量は増加する傾向があり、抽出水の温度が50℃の場合の塩化物濃度は20℃の約2倍、80℃の場合の塩化物濃度は50℃の約2倍であった。

ケース3の結果を見ると、振とう時間が長いほど塩化物の抽出量は増加する傾向があるものの、5分間振とうの場合の塩化物濃度は1分間振とうの場合の約1.2倍、15分間振とうの場合の塩化物濃度は5分間振とうの場合の約1.1倍と他の条件を変えた場合に比べ、塩化物の抽出量の変化が小さかった。このため、振とう時間が塩化物の抽出量に及ぼす影響は比較的小さいものと考えられる。

以上から、塩化物の抽出量は試料が細かく、抽出水の温度が高い方が多くなる傾向を確認した。しかしながら、粉砕ミル等の特殊な器具を使用せず、短時間に試料を0.15mm以下に微粉砕するのは困難であるため、試験紙法では未破砕試料よりも多くの塩分抽出が可能で、粉末試料よりも簡便に作製できる粗砕試料を用いることとした。さらに、先述した通り塩化物の抽出には、試料へ抽出水を十分浸透させることが重要と考えられたことから、塩化物の抽出量をより多くするため、試料と抽出水を混合した後、24時間静置する工程を設けた。また、抽出水の加熱には、簡便性の観点から市販の電気ポットを用いることとし、蒸留水を沸騰するまで加熱して使用することとした。さらに振とう時間が塩化物の抽出量に及ぼす影響は比較的小さかったことから、振とう器等を使用せずに振とうできる時間を想定して5分間(振とう回数は80~100回/1min)とした。

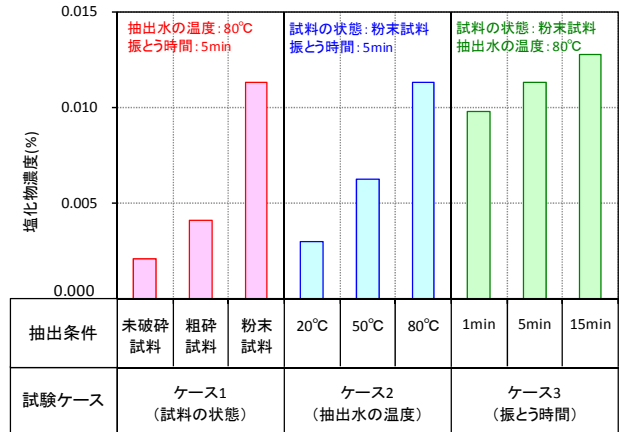


図-16 各試験ケースにおける塩化物濃度

5.4 試験紙法の適用性に関する検討

5.4.1 既存の方法と試験紙法による塩化物濃度の関係

試験紙法の適用性を検討するため、試験紙法、JIS法、JCI法による試験を実施し、その結果を比較した。また、塩化物濃度の測定可能領域を調べる目安として、塩化ナトリウムを混入したコンクリートブロックを原料とし、本検討時に製造済みであった、塩化物濃度の異なる再生粗骨材Ra、Rbの2種類を対象に各試験法による試験を実施した。

表-6に試験紙法、JIS法、JCI法の試験条件を示す。試験紙法およびJIS法は、抽出過程で24時間静置を行うため、JCI法に比べて時間がかかるが、その分塩化物の抽出工程を省力化している。また、試験紙法は、試料の乾燥状態の調整や塩化物の定量の過程において、各種薬品や特殊な器具(乾燥機、滴定器具)が不要な方法である。

また、測定結果のばらつきの影響を除外するため、変動係数(平均値を1とした際の、測定値の平均値に対する変動を示す指標)が一定値になるまで各試験法による測定を繰り返した。このため、試験紙法では8回、JIS法では3回、JCI法では10回測定を行い、その平均値を用いて比較を行った。また、各試験法による再生粗骨材の塩化物イオン濃度は塩化物濃度に換算して評価した。

5.4.2 各試験法による塩化物濃度の比較と試験紙法の適用性評価

図-17に各試験法による塩化物濃度を示す。試験紙法とJIS法による塩化物濃度を比較すると、試験紙法による塩化物濃度はJIS法の1.5倍~1.9倍であり、試験紙法によって現行の再生粗骨材中の塩化物濃度検査法であるJIS法と同等以上の塩化物を抽出できることが

明らかとなった。

また、試験紙法と JCI 法による塩化物濃度を比較すると、試験紙法による塩化物濃度は可溶性塩化物濃度の 0.9 倍、全塩化物濃度の 0.5 倍～0.7 倍と比較的低く、また、試験紙法による塩化物濃度は可溶性塩化物濃度に近い値を示した。図-1 に示したとおり再生粗骨材中の塩化物は製造段階で除去しきれなかった付着セメントペースト分に存在していることから、再生粗骨材中の塩化物はコンクリートと同様に可溶性塩化物と非可溶性塩化物（セメント水和物に物理的・化学的に固定されている塩化物等）の形で存在しているものと考えられる。試験紙法は可溶性塩化物の測定法と同様に水を使用して塩化物を抽出することから、本試験で実施した試験紙法の抽出条件で抽出できる塩化物は再生粗骨材中の可溶性塩化物の一部であり、試験紙法による塩化物濃度は可溶性塩化物濃度に近い値を示したと考えられる。

また、試験紙法により抽出できる塩化物量は、既存の試験法で抽出した塩化物量と同様に、再生粗骨材の塩化物濃度の高低に対応して変化していたことから、試験紙法は再生粗骨材の塩化物濃度測定に適用できる可能性があることが明らかとなった。

5.5 試験紙法による全塩化物濃度の推定方法の提案

5.5.1 試験紙法による全塩化物濃度の推定方法の検討

5.1 で述べたとおり、再生粗骨材中の塩化物は全塩化物濃度で管理されるため、試験紙法の測定結果より全塩化物濃度を推定する必要がある。このため、塩化物濃度の異なる複数種類の再生粗骨材について、試験紙法と JCI 法による塩化物濃度の比較を行い、試験紙法による全塩化物濃度の推定方法を検討することとした。

具体的には、再生粗骨材 Ra、Rb は 5.4 の検討において既にデータを取得していたことから、これと塩化物濃度の異なる再生粗骨材 Re～Rj について新たに試験を行い、合計 8 種類の再生粗骨材の試験紙法と JCI 法による塩化物濃度の比較を行った。

なお、5.4 で述べたとおり再生粗骨材 Ra、Rb については試験紙法で 8 回、JCI 法で 10 回測定を繰り返したが、追加製造した再生粗骨材 (Re～Rj) については試験紙法で測定 6 回目から、JCI 法で測定 5 回目から変動係数が概ね一定値に収束する傾向が見られた。このため、試験紙法では 6 回、JCI 法では 5 回測定を繰り返し、その平均値を求めた。

5.5.2 試験紙法による塩化物濃度と全塩化物濃度の比較

図-18 に試験紙法による塩化物濃度と JCI 法による全塩化物濃度の関係を示す。なお、赤丸は実測値、実線は直線回帰により求めた推定式を示している。

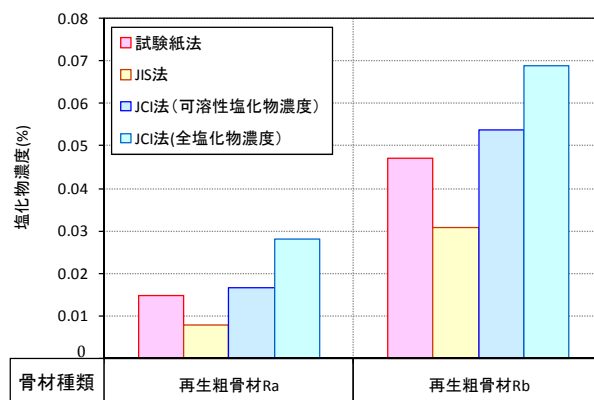


図-17 各試験法による塩化物濃度

表-6 各試験法の試験条件

試験条件		試験紙法	JIS 法	JCI 法	
				可溶性塩化物濃度	全塩化物濃度
分析 試料	状態	破碎試料 (5mm 以下、 一昼夜試験室内に静置)	未破碎試料 (5-15mm、絶乾)	粉末試料 (0.15mm 以下、一昼夜試験室内に静置)	
	量	200g	1000g	40g	
	温度	常温	常温	50℃	—
抽出方法		試料と抽出水 (200ml、 96.5℃以上※) を保温ビン 内で混合 ↓ (24 時間静置) 5 分間振とう後、ろ過	試料と抽出水 (1000ml、 常温) を混合 ↓ (24 時間静置) 5 分間隔で 3 回転倒振とう 後、上澄み液を採取	試料と抽出水 (200ml、 50℃) を混合・保温 ↓ (30 分間振とう) 5～10 分静置・ろ過	硝酸溶液で試料を 溶解 ↓ 不溶解残分をろ過
定量方法		塩化物濃度測定計	硝酸銀滴定法	電位差滴定法	

※電気ポットで沸騰するまで加熱

両者の関係を見ると、全体的には再生粗骨材の全塩化物濃度の増加に伴い、試験紙法による塩化物濃度も増加する傾向があり、良い相関が確認できる。しかしながら、詳細に見ると、塩化物濃度が低い領域と高い領域では、回帰直線の傾きが異なっており、塩化物濃度が高い領域における増加割合（推定式の傾き）は比較的小さくなっていた。これは2章で述べた再生粗骨材中に非可溶性として存在する塩化物量に限界値があり、さらに5.4.2で述べた通り試験紙法により抽出できる塩化物の大部分が可溶性塩化物であることが影響しているものと考えられる。

また、4章で述べた通り、再生粗骨材中の塩化物イオンは新規セメントペースト分に移動し、鉄筋腐食に影響を及ぼす可能性があるため、塩化物濃度としては冒頭に述べた JIS 相当の規制（0.04%以下）が必要になるものと考えられる。このため、試験紙法を実際に塩化物濃度の管理に適用する場合、試験紙法の測定値より推定した再生粗骨材中の全塩化物濃度がこの規制値を満足するかを確認することとなる。

試験紙法による塩化物濃度は全塩化物濃度に比べて小さいことから、試験紙法による再生粗骨材中の塩化物濃度が規制値を超えている場合、コンクリート用骨材として使用不可という判定になる。また、試験紙法による再生粗骨材中の塩化物濃度が規制値以下であれば、図-18 に示した推定式に基づき、全塩化物濃度を推定することとなる。しかしながら、この推定式は、試験紙法による塩化物濃度が 0.03%の点を変曲点とする直線で表され、試験紙法による塩化物濃度が 0.03%以下の範囲と 0.03%より大きい範囲で式が異なるため、実際の運用が煩雑となる。このため、試験紙法による再生粗骨材の塩化物濃度が規制値以下の場合には、安全側を考慮し、低濃度領域における直線回帰式の傾きを用いた式(2)によって全塩化物濃度を求めることを提案する。

$$NaCl(\%) = \frac{W_g(g)}{R_g(g)} \times Cl^-(\%) \times 1.65 \times \alpha \dots (2)$$

ここに、NaCl：全塩化物濃度 (%)

W_g ：試験紙法で用いた抽出水の質量(g)

R_g ：試験紙法で用いた分析試料の質量(g)

Cl^- ：3本の塩分量測定計の読み値より求めた塩化物イオン(Cl^-)濃度の平均値 (%)

α ：一定係数 = 2

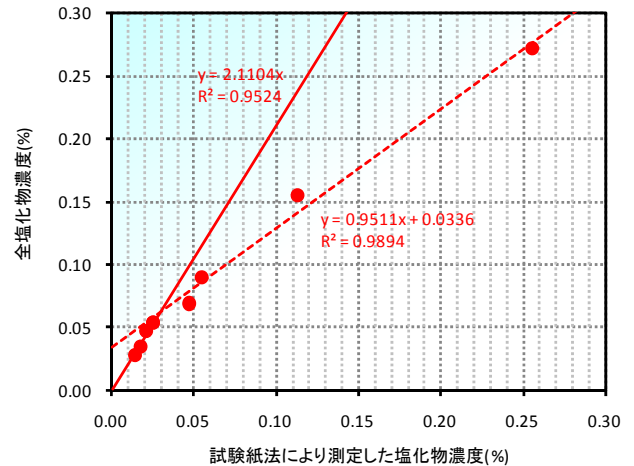


図-18 試験紙法による塩化物濃度と全塩化物濃度の関係

5.6 塩化物濃度の異なる再生粗骨材が混在する試料への試験紙法の適用性に関する検討

5.6.1 平均塩化物濃度の評価に関する検討

1) 混合試料の作製

5.3~5.5 においては、塩化物濃度が均一になるように製造した再生粗骨材単体を対象とし、試験紙法の適用性に関する検討を行った。しかしながら、実構造物を取り壊して製造した再生粗骨材は、塩化物濃度の異なる再生粗骨材が混在した状態になっていると考えられる。

また、3章で述べたとおり、全塩化物濃度が均一な再生粗骨材を用いた場合でも、塩化物濃度の異なる再生粗骨材が混在する粗骨材を用いた場合でも、使用粗骨材全体の全塩化物濃度に応じて、鉄筋コンクリート中の鋼材腐食に及ぼす影響が変化することが明らかとなり、試験紙法を用いて、塩化物濃度の異なる再生粗骨材が混在する試料全体の全塩化物濃度を評価できるかを確認する必要があった。

そこで、このような試料に対する試験紙法の適用性を検討するため、塩化物濃度の異なる2種類の再生粗骨材を混合した試料（以下、「混合試料」と記す）を作製し、試験紙法による塩化物濃度の試験を実施した。

表-7 に再生粗骨材の混合割合を示す。先述したとおり、試験紙法による塩化物濃度と全塩化物濃度の関係は、塩化物濃度が低い領域と高い領域で回帰式の傾きが異なっていた。このため、目標全塩化物濃度を2水準に設定し、JCI法による各再生粗骨材単体の全塩化物濃度をもとに、2種類の再生粗骨材の混合割合を調整した。具体的には、再生粗骨材 Ra と Rd の混合試料（記号 Rad）と、再生粗骨材 Ra と Re の混合試料（記号 Rae）については、目標全塩化物濃度を低い領域内に設定し、全塩化物濃度が同等となるよう質量割合を調整した。また、再

生粗骨材 Ra と Rg の混合試料（記号 Rag）と、再生粗骨材 Ra と Rh の混合試料（記号 Rah）については、目標全塩化物濃度を高い領域内に設定し、平均全塩化物濃度が同等になるよう質量割合を調整した。

測定結果のばらつきの影響を除外するため、各混合試料について6回試験紙法による測定を繰り返し、その平均値を求めた。また、図-18 に示した推定式より、試験紙法による塩化物濃度を全塩化物濃度に換算した。

2) 混合試料の推定全塩化物濃度

図-19 に試験紙法で求めた各混合試料の推定全塩化物濃度を示す。

混合試料 Rai および Raj の塩化物濃度は同等の値であり、表-7 に示した全塩化物濃度の計算値とも概ね合致していた。また、混合試料 Raf および Rag の塩化物濃度も同等の値であり、表-7 に示した全塩化物濃度の計算値とも概ね合致していた。

この結果より、塩化物濃度の異なる再生粗骨材が混在する試料を対象とした場合であっても、図-18 に示した推定式を用いることで、試験紙法で求めた塩化物濃度から試料全体の全塩化物濃度を推定できることが明らかとなった。

5.6.2 実構造物から製造した再生粗骨材への試験紙法の適用性

1) 分析対象

上述の検討により、試験紙法は、塩化物濃度が異なる再生粗骨材が混在する試料にも適用できる可能性があることが明らかとなった。このため、次の段階として、実橋梁桁より製造した再生粗骨材 RBo、RBI を対象とし、試験紙法により求めた推定全塩化物濃度と JCI 法による実測全塩化物イオン濃度の比較することで、試験紙法の適用性を検証した。

なお、測定結果のバラツキの影響を除外するため、試験紙法では6回、JCI 法では5回測定を繰り返し、その平均値を求めた。また、図-18 に示した推定式より、試験紙法による塩化物濃度を全塩化物濃度に換算した。

2) 実構造物から製造した再生粗骨材の試験紙法による塩化物濃度と全塩化物濃度の関係

図-20 に試験紙法で求めた推定全塩化物濃度と JCI 法で測定した実測塩化物濃度を示す。

いずれの再生粗骨材についても、推定全塩化物濃度は実測全塩化物濃度を上回っており、再生粗骨材 RBI では1割程度、再生粗骨材 RBo では2割程度の軽微な差が生じていた。しかしながら、これは試験紙法による推定全塩化物濃度が安全側の評価になっていることを示していることから、実構造物から製造した再生粗骨材につ

表-7 再生粗骨材の混合割合

試料	再生粗骨材	全塩化物濃度 (%)	質量 (g)	混合割合より計算される全塩化物濃度 (%)
Rai	Ra	0.028	95	0.038
	Ri	0.047	105	
Raj	Ra	0.028	116	0.038
	Rj	0.054	84	
Raf	Ra	0.028	95	0.095
	Rf	0.155	105	
Rag	Ra	0.028	147	0.093
	Rg	0.272	53	

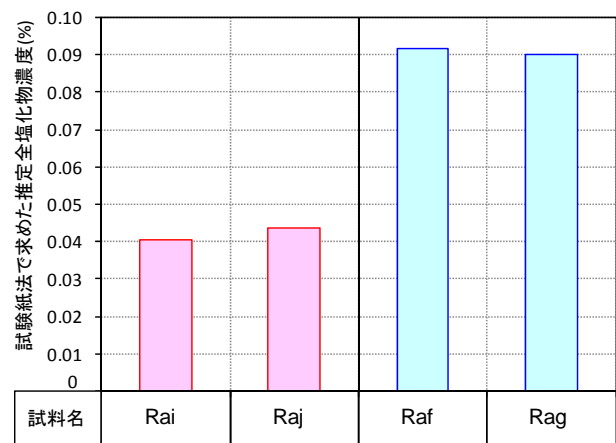


図-19 試験紙法で求めた混合試料の推定全塩化物濃度

いても、試験紙法により全塩化物濃度を推定できるものと考えられる。

5.7 試験紙法による塩化物濃度の測定許容誤差

先述した各検討では、測定結果のばらつきの影響を除外するため、再生粗骨材 Ra、Rb については8回、再生粗骨材 Re~Rj および再生粗骨材 RBo、RBI については6回試験紙法による測定を繰り返していた。しかしながら、試験紙法を実際に用いる場合、試験回数の増加は簡便性という観点から好ましくない。

他方、JCI 法などでは、1試料につき2回測定を繰り返し、その際の測定誤差が許容値以下であれば、2回の測定の平均値を塩化物濃度とする方法を用いている。試験紙法についても同様の方法をとる場合、測定誤差の許容値を設定する必要がある。

このため、各再生粗骨材の試験紙法による平均塩化物濃度と上述の回数だけ測定を繰り返した際の測定誤差（試験紙法による塩化物濃度の最大測定値と最小測定値の差）の関係を調べた。

結果を図-21 に示す。なお、マーカーは実測値、実線は直線近似式を示している。この結果をみると、原コン

クリートの種類に関わらず、測定誤差は概ね平均塩化物濃度に比例して増加する傾向があり、直線近似の結果によると、この測定誤差は平均塩化物濃度の約0.2倍であった。このため、試験紙法は、簡便性の観点から測定回数を2回に設定し、測定値の許容差は、2回測定を繰り返した際の平均塩化物濃度の0.2倍に設定するのがよいと考えられる。

以上のことから次のことが判った。

- (1)現場等でも簡易に実施出来る再生粗骨材の塩化物濃度検査法として、各種薬品や特殊な器具が不要で、各工程の省力化を図った試験紙法を考案した。
- (2)試験紙法により現行の再生粗骨材の塩化物濃度測定法である JIS 法と同等の塩化物濃度が測定出来る。
- (3)本研究で提案した推定式を用いることで、試験紙法により測定した塩化物濃度より、再生粗骨材中の塩化物濃度の管理値である全塩化物濃度が推定できる。
- (4)試験紙法により測定できるのは、再生粗骨材全体の平均塩化物濃度であり、実構造物を取り壊して製造した再生粗骨材のように、塩化物濃度の異なる再生粗骨材が混在する試料についても適用が可能である。
- (5)簡便性の観点から試験紙法の測定繰り返し回数は2回とし、測定値の許容差は、2回測定を繰り返した際の平均塩化物濃度の0.2倍に設定するのがよい。

6. まとめ

本研究の結果をまとめると、以下のことがいえる。

- (1)再生粗骨材中の塩化物イオンは、骨材に付着したセメントペーストに存在する。塩化物イオンの一部はフレッシュ時の練り混ぜ水に溶出し拡散移動する。フレッシュ時に溶出せず、再生粗骨材中に残存した塩化物イオンも、硬化後、材齢の進行に伴い、大半が新規セメントペースト中に拡散移動する。
このため、塩化物イオンを含む再生粗骨材を使用したコンクリートについては、普通コンクリート相当の塩化物イオン量の規制値(0.3kg/m³)が、再生粗骨材の塩化物濃度については JIS 相当の規制値(0.04%)が必要と考えられる。
- (2)再生粗骨材の塩化物濃度検査法として、各種薬品や特殊な器具を必要とせず、現場でも簡易に実施できるよう各工程の省力化を図った試験紙法を提案した。試験紙法は現行の測定法である JIS 法と同等の塩化物濃度を測定でき、本研究で提案した推定式を

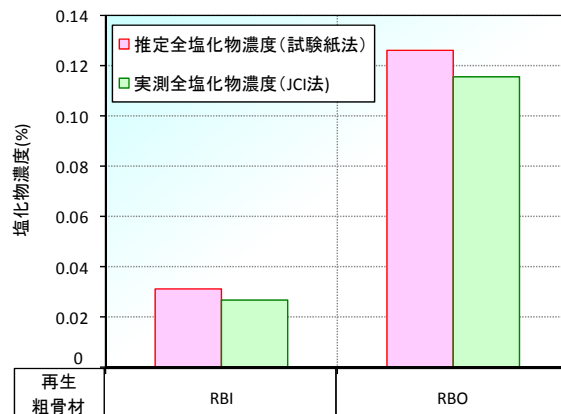


図-20 実橋梁桁から製造した再生粗骨材の試験紙法による推定全塩化物濃度と実測全塩化物濃度

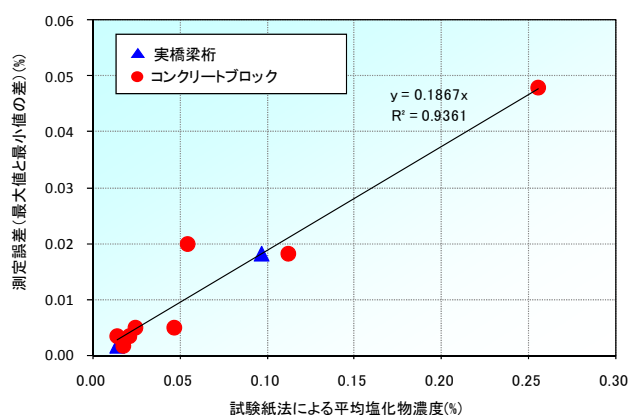


図-21 試験紙法による塩化物濃度と測定誤差の関係

用いることで、再生粗骨材中の塩化物濃度の管理値である全塩化物濃度を推定することができる。

また、試験紙法により測定できるのは、再生粗骨材全体の平均塩化物濃度であり、実構造物を取り壊して製造した再生粗骨材のように、塩化物濃度の異なる再生粗骨材が混在する試料についても適用が可能である。

- (3)本研究により、再生粗骨材コンクリート中の鉄筋の腐食には、鉄筋界面のコンクリート組織の密実性が大きく影響することが判った。これにより、再生粗骨材コンクリート中の鉄筋の腐食抑制対策として、ブリーディングの抑制や、水密性に優れた高炉セメントB種の使用が有効である。

参考文献

- 1) 国土交通省 HP、平成20年度建設副産物実態調査結果について、http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo20_hh_000012.html

- 2) (社) 日本コンクリート工学協会 北海道支部 : リサイクル研究委員会報告書、pp. 24～34、2002. 4
- 3) 日本規格協会 : JIS A 5021 コンクリート用再生骨材H、pp. 18、2005年3月
- 4) 財団法人 日本規格協会 : JIS Q 1011 「適合性評価ー日本工業規格への適合性の認証ー分野別認証指針 (レディーミクストコンクリート)」、pp. 11-12、2009年3月20日
- 5) 北海道開発局建設部 : 橋りょう関係設計要領、pp. 7、1971
- 6) 財団法人 日本規格協会 : JIS A 5023 「再生骨材Lを用いたコンクリート」、2006年3月
- 7) 財団法人 日本規格協会 : JIS A 5022 「再生骨材Mを用いたコンクリート」、2007年3月
- 8) プレキャストコンクリート製品への再生骨材の利用に関する取り組み、寒地土木研究所月報、No. 690、pp. 35～43、2010. 11
- 9) 財団法人 日本規格協会 : JIS A 5021 「コンクリート用再生骨材H」、2005年3月
- 10) (社) 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標準(案)、pp. 17～37、1987. 4
- 11) Jochen Stark、Bernd Wicht : コンクリートの耐久性 (第2版)、pp. 73-75、2003年8月
- 12) (社) 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標準(案)、pp. 9～15、1987. 4
- 13) 土木学会 : コンクリート標準示方書 [基準編 : 土木学会基準および関連基準]、pp. 174～176、2007
- 14) (社)セメント協会 : わかりやすいセメント科学、p. 102、1993. 3
- 15) 財団法人 日本規格協会 : JIS A 5005 構造用軽量コンクリート骨材、2005年3月