

再生コンクリートの耐海水性および内部鉄筋の防食性

早川 健司* 伊藤 正憲* 大橋 潤一**

要約: 再生コンクリートを港湾コンクリート構造物へ適用するためには、再生コンクリートの耐海水性、およびコンクリート中の鉄筋の防食性を支配する塩化物イオン浸透性、酸素拡散などについての検討が必要となる。そこで本研究では、耐海水性に優れるとされる高炉セメントの使用が有効であると考え、これを用いた再生コンクリートの耐海水性および塩化物イオン浸透性などを普通コンクリートと比較して評価した。試験は供試体を海水の作用を受ける環境下に暴露し、耐海水性は強度および細孔構造により、鉄筋の防食性は塩化物イオン浸透性、鉄筋の電気化学的特性により評価した。その結果、普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較して、高炉セメントを用いた再生コンクリートの塩化物イオン浸透性は大きく改善され、骨材品質によっては海洋環境下の鉄筋コンクリート構造物へ適用できる性能を有していることを示した。

キーワード: 再生コンクリート, 海洋環境, 暴露試験, 耐海水性, 細孔構造, 塩化物イオン浸透性

目次: 1.はじめに
2.実験概要
3.結果および考察
4.おわりに

1. はじめに

再生骨材を使用したコンクリートを港湾構造物へ適用するためには、海水の作用に対する抵抗性、また、より付加価値の高い鉄筋コンクリート構造物への適用においては、コンクリート中の鉄筋の防食性に関する適切な評価が重要である。

これまでの研究¹⁾により、普通ポルトランドセメントを用いた再生コンクリートは、海水の作用を受ける環境下においても必要強度を確保することができ、無筋コンクリート構造物への適用は十分可能であることを示している。しかし、塩化物イオンの浸透は水セメント比を小さくしてセメント硬化体の組織を緻密としても大きく改善されず、鉄筋コンクリート構造物への適用は困難なのが現状である。

再生コンクリートの塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が低下するのは、再生骨材に含まれる旧コンクリートの付着モルタルの性質、量および新ペーストもしくはモルタルとの骨材界面性状の影響によると考えられる。塩化物イオン浸透性の改善方策の一つとしては、新ペーストもしくはモルタルを塩化物イオンの浸透に対する抵抗性に優れたものとし、骨材品質の低下による影響を補う方法がある。一般に、高炉セメントもしくは高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは海水の作用に対する抵抗性が高く、また塩化物イオン浸透に対して高い抵抗性を有しており、塩害に対する鉄筋腐食抑制に優れていることが報告されている²⁾。

そこで本研究では、高炉セメントB種を用いた再生コン

クリートの港湾構造物へ適用性を検討するために、耐海水性、コンクリート中の鉄筋腐食性状に関する試験を実施した。また、実験要因として再生細・粗骨材の吸水率、すなわち再生骨材の品質を変化させ、骨材品質の影響程度について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは密度 3.15g/cm³の普通ポルトランドセメント(OPC)、および密度 3.04g/cm³の高炉セメントB種(BB)の2種類を使用した。

表1に、使用した骨材の物理的性質を示す。再生細骨材は、吸水率の異なるRS1, RS2を、再生粗骨材には、吸水率の異なるRG1, RG2のそれぞれ2種類を使用した。表2に示すように、これらの再生細・粗骨材は、骨材の吸水率に

表1 骨材の物理的性質

	記号	粗粒率	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)	品質*)
普通細骨材	NS	2.50	2.59	1.9	—	—
再生細骨材	RS1	2.94	2.45	4.9	64.2	1種
	RS2	3.27	2.25	13.1	73.2	規格外
普通粗骨材	NG	6.68	2.70	0.2	62.0	—
再生粗骨材	RG1	6.73	2.51	3.3	60.5	2種
	RG2	6.54	2.38	6.8	64.7	3種

*) 建設省の用途別暫定基準(案)

表2 再生骨材の品質

種類	再生粗骨材			再生細骨材	
	1種	2種	3種	1種	2種
吸水率(%)	3以下	5以下	7以下	5以下	10以下

よって定まる建設省用途別暫定基準によると、RS1, RS2は再生細骨材1種、および2種よりも吸水率の大きい規格外、RG1, RG2は再生粗骨材2種および3種に相当するものである。再生骨材は使用前に24時間以上のプレウエツティングを行い、表乾状態で使用した。

比較用の普通細骨材は千葉県君津産の陸砂(NS)、普通粗骨材は青森県八戸産の砕石(NG)である。

2.2 コンクリートの配合および製造

表3に、実験で使用したコンクリートの配合を示す。セメント種類の影響に関する検討は、普通コンクリート(OPC-N, BB-N)および低品質再生細・粗骨材(RS2, RG2)を使用した再生コンクリート(OPC-R4, BB-R4)で行った。また、骨材品質による耐海水性の違いを検討するため、粗骨材に再生粗骨材(RG1)、細骨材に普通細骨材(NS)、再生細骨材(RS1)、およびこれらを等量混合した細骨材を使用した配合を用い、使用骨材の品質を5段階(N, R1~R4)に変化させた。

一般に、同一W/Cの再生コンクリートの性能は普通コンクリートより低下するため、再生コンクリートを使用する場合には、強度、耐久性の両面から水セメント比を小さく設定する必要があると考える。そこで本研究では、水セメント比の設定を普通コンクリートで55%、再生コンクリートで50%とした。

配合は、目標スランプ 8 ± 2.5 cm、空気量 4.5 ± 1.5 %となるように、単位水量、細骨材率、AE減水剤の使用量を調整して決定した。

2.3 練混ぜ方法および養生、暴露条件

コンクリートの練混ぜには、容量50リットルの強制練りパン型ミキサーを用いた。練混ぜ方法は、セメントと細骨材を空練りした後注水して30秒練り混ぜ、さらに粗骨材を投入して60秒間練り混ぜる方法とした。

打設した供試体は翌日脱型し、材齢28日まで20℃標準水中養生を行った。材齢28日以降は、20℃海水、劣化促

進を目的とした60℃海水、飛沫帯(飛沫帯を模し、1日2回約3時間の海水噴霧を行い乾湿繰り返しを受ける屋外施設)に暴露した。なお、使用した海水は、すべて神奈川県横須賀市の久里浜湾より採取したものである。

2.4 試験方法

(1) 耐海水性の評価方法

耐海水性の評価は、各海洋環境下に暴露した材齢182日の供試体の圧縮強度、および細孔構造を標準水中養生した場合と比較することで行った。

細孔径分布の測定は、水銀圧入式ポロシメータによって行った。試験には、標準水中養生、20℃海水、60℃海水に暴露した材齢182日の $\phi 10 \times 20$ cmの供試体を用いた。なお、試料の採取位置は、供試体の表面部および中心部である。

(2) 塩化物イオン浸透性の評価方法

塩化物イオン浸透性の評価は、標準水中養生した材齢182日の供試体に対して電気泳動試験による拡散係数の算出³⁾、および海洋環境下に暴露した供試体中の塩化物イオン量で行った。

図1に電気泳動による拡散係数の評価試験の概要図を示す。本実験においては、アノード側にCa(OH)₂飽和水溶液、カソード側にNaCl5%水溶液を満たし、両セル間に15Vの電位差を与え、アノード側水溶液のCl⁻の濃度変化を経時に測定した。塩化物イオンCl⁻の濃度変化は図2に示すようになる。拡散係数D_{Cl}は、(1)~(3)より求めた。すなわち、濃度変化が定常になったときの傾きである透過速度 ΔQ (mol/l·sec)から単位時間・単位面積あたりの物質移動量であるフラックスJ_{Cl} (mol/cm²·sec)を求め、溶液の濃度勾配C_{Cl}および電位勾配 $d\phi/dx$ から電氣的移動度u_{Cl}を算出し、拡散係数D_{Cl} (cm²/sec)に変換した。

$$J_{Cl} = \Delta Q_{Cl} \frac{V}{A} \tag{1}$$

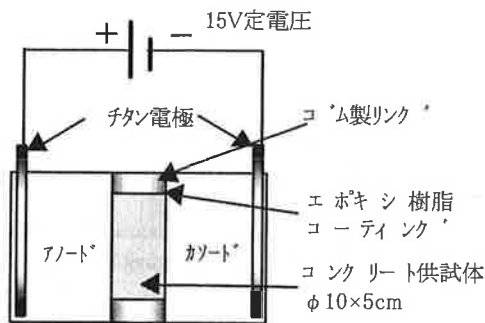
$$u_{Cl} = \frac{J_{Cl}}{C_{Cl} \cdot d\phi/dx} \tag{2}$$

$$D_{Cl} = \frac{k \cdot T}{e \cdot Z_{Cl}} u_{Cl} \tag{3}$$

表3 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	骨材の種類		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Ad.
		細骨材	粗骨材			W	C	S	G	
OPC-N	普通ポルトランド	NS	NG	55	43	154	280	793	1096	0.70
BB-N	高炉セメントB種			55	43	148	269	800	1106	0.67
BB-R1	普通ポルトランド	NS	RG1	50	43	148	296	790	1015	0.74
BB-R2				50	43	150	300	765	1011	1.50
BB-R3				50	46	154	308	789	948	1.54
OPC-R4				RS1	50	46	154	308	789	948
BB-R4	高炉セメントB種	RS2	RG2	50	48	162	324	745	854	1.62
BB-R4	高炉セメントB種			50	48	159	318	747	856	1.59

ここに、 V ：被検出セル中の溶液量 (900ml)
 A ：コンクリート試料の断面積 (78.54cm²)
 k ：ボルツマン定数 (1.38×10^{-23})
 T ：絶対温度 (k)
 e ：電気素量 (1.60×10^{-19} C)
 Z_{Cl} ：塩化物イオンの価数



Ca(OH)₂飽和水溶液 容量約900ml
 NaCl-5%水溶液 容量約900ml

図1 電気泳動試験概要図

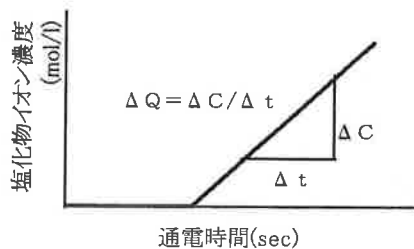


図2 塩化物イオンの濃度変化

20℃海水および飛沫帯に暴露した供試体は、暴露開始5ヶ月において供試体表面から内部方向に5点の全塩分量を JCI 規準 (案) SC-4 に準拠して測定した。

(3) コンクリート中铁筋の腐食状況の判定

コンクリート中铁筋の腐食状況の評価には、図3に示すようにかぶり1,2cmの位置に鉄筋を埋設したφ10×20cm供試体を用いた。この供試体を20℃海水中、飛沫帯に暴露し、暴露開始後5ヶ月において電気化学的手法により検討した。

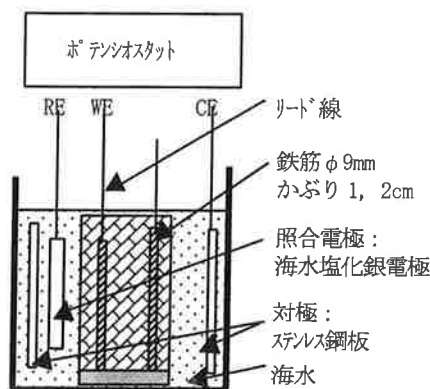


図3 電気化学的試験の概要

実施した電気化学的測定は動電位分極曲線による不動態のグレードの判定⁴⁾および定電位ステップ法⁵⁾である。両測定とも、照合電極に海水塩化銀電極、対極にステンレス鋼板を用い、図3に示す試験装置によって行った。

動電位分極曲線は、自然電位を基準に+1000mVと-1000mVの間を1mV/secで掃引した。不動態のグレードの判定は、分極曲線の通る位置によって判定され、0~5の6段階で評価され、5が不動態の状態が最もよく、0ではほとんど不動態がないと判断される。

定電位ステップ法は、鉄筋の電位を照合電極に対して-1000mVに保持し、そのときの鉄筋と対極間を流れる電流を経時に測定するものである。測定される電流の大きさは、鉄筋への酸素供給量に支配され、鉄筋への酸素供給量が大きいほど流れる電流は大きくなる。試験の評価は、1, 5, 10時間後の電流密度の平均値で行った。

3. 実験結果

3.1 耐海水性

図4は、20℃海水、飛沫帯、および劣化促進を目的とした60℃海水にそれぞれ暴露した場合の圧縮強度を標準水中養生した場合の圧縮強度に対する比率で示したものである。

20℃海水暴露した場合の圧縮強度比は OPC-N や BB-R1 で若干低下する傾向であったが、セメント種類の影響や骨材品質に対する明確な差異は認められなかった。飛沫帯に暴露した場合の圧縮強度比は 1.0 前後であり、20℃海水暴露の場合と同様に顕著な差異は認められなかった。これらの結果、海洋環境下における再生コンクリートの強度発現特性は普通コンクリートと概ね同等であると考えられる。しかし暴露日数が5ヶ月と短期間であることから、海水の作用はコンクリートのごく表面部だけに留まり供試体レベルの圧縮強度に影響を及ぼすまでには至っていないものと考ええる。

60℃海水に暴露した場合、普通ポルトランドセメントを用いた普通・再生コンクリートの圧縮強度比は 0.7 前後であった。これに対して高炉セメントを用いた普通・再生コンクリートの圧縮強度比は 0.73~0.92 であり、いずれも

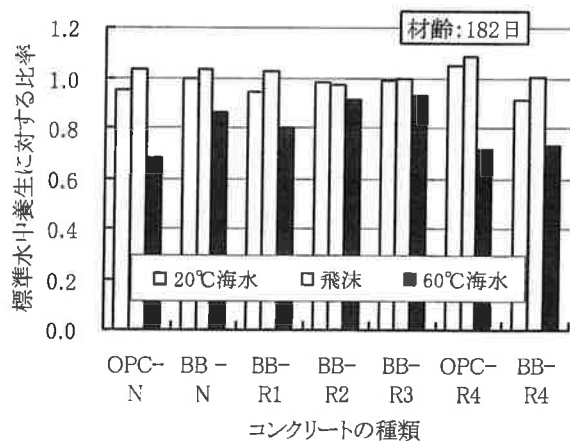


図4 海水の作用が圧縮強度に及ぼす影響

普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより大きくなった。

以上の結果をコンクリート供試体の微細構造から考察する。内川ら⁹⁾によると、モルタルの強度は0.05~2 μ mおよび30 μ m以上の比較的大きな細孔容積と強い相関があるとされている。表4、表5に各条件に暴露した供試体の全細孔容積および0.04 μ m以上の細孔容積をそれぞれ示す。強度低下率の大きい60℃海水に暴露したOPC-N、OPC-R4およびBB-R4の0.04 μ m以上の細孔容積が標準水中養生した場合より大きい。また、供試体の表面部と内部では、表面部の細孔容積がより大きい。これは海水より供給されるNaClやMgCl₂とセメント水和物であるCa(OH)₂とが反応し、カルシウム分が溶出することによってコンクリートが多孔質になったためである。高炉セメントはこのような反応を抑制し、普通ポルトランドセメントを用いた場合より高い耐海水性を示し、圧縮強度の低下率が小さかった。しかし、再生コンクリートOPC-R4、BB-R4のように吸水率が大きい低品質な骨材を使用した場合にセメントの種類の影響が小さいのは、骨材の影響が卓越したためと考える。

以上の結果、再生コンクリートOPC-R4、BB-R4のように吸水率の大きい再生細・粗骨材を使用した場合には耐海水性に対する高炉セメントの使用効果が小さくなるものの、高炉セメントを用いた再生コンクリートの耐海水性は、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートと比較して同等以上であると考えられる。

表4 全細孔容積 (mg/l)

養生および暴露条件	採取位置	コンクリートの種類			
		OPC-N	BB-N	OPC-R4	BB-R4
標準水中	内部	0.1042	0.0907	0.1269	0.1656
20℃海水	内部	0.0686	0.0697	0.1283	0.1370
	表面	0.0914	—	—	—
60℃海水	内部	0.0830	0.0708	0.1299	0.1560
	表面	0.0925	—	0.1773	0.1799

表5 0.04 μ m以上の細孔容積 (mg/l)

養生および暴露条件	採取位置	コンクリートの種類			
		OPC-N	BB-N	OPC-R4	BB-R4
標準水中	内部	0.0417	0.0288	0.0539	0.0669
20℃海水	内部	0.0286	0.0257	0.0510	0.0518
	表面	0.0457	—	—	—
60℃海水	内部	0.0427	0.0280	0.0671	0.0803
	表面	0.0554	—	0.1008	0.0915

3.2 塩化物イオン浸透性

図5に電気泳動試験によって算出した各コンクリートの見かけの拡散係数を示す。また、一部の供試体については、20℃海水中に5ヶ月間暴露した後、供試体の表面から深さ方向に5点の塩化物イオン含有量の測定を行い、Fickの第2法則より逆算して求めた見かけの拡散係数も示す。BB-R4の見かけの拡散係数は、

BB-Nよりは大きな値を示したものの、OPC-Nより小さ

くなった。また、使用骨材の品質の低下に伴い見かけの拡散係数は大きくなった。これらの試験から、高炉セメントB種の使用によって再生コンクリートの塩化物イオン浸透性を大幅に改善できることが示された。

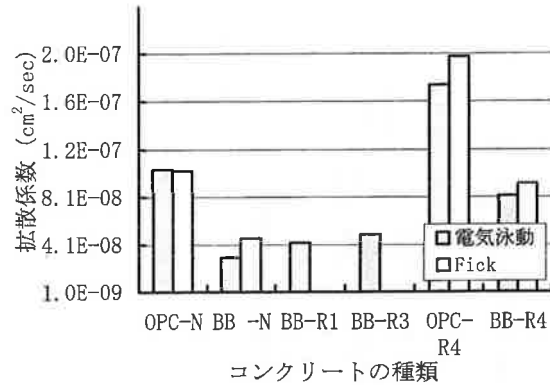


図5 塩化物イオンの拡散係数

以上のように、高炉セメントB種を用いた再生コンクリートは、普通コンクリートの場合と同様に、塩化物イオン浸透を抑制できることが明らかとなった。以下では再生コンクリートの微細構造観察により再生コンクリートの塩化物イオンの浸透性について考察する。

図6,7に上述の試験に用いたコンクリートと同様に材齢182日目で標準水中養生した供試体の中心部より採取した

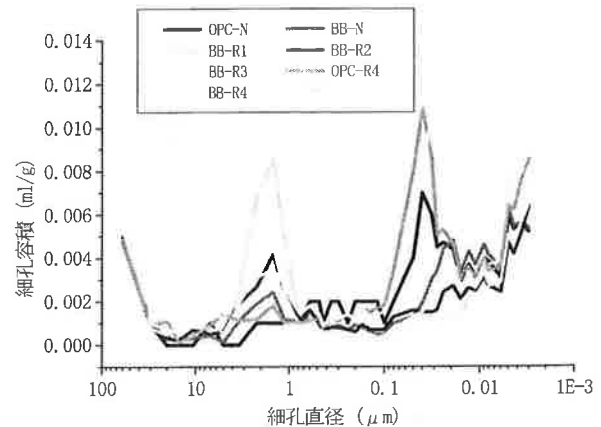


図6 細孔径分布 (標準養生, 材齢182日)

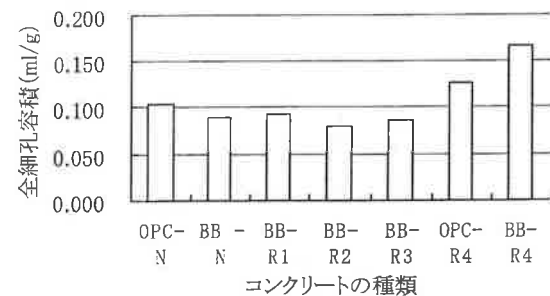


図7 全細孔容積 (標準養生, 材齢182日)

試料の全細孔容積および細孔径分布をそれぞれ示す。普通コンクリートの全細孔容積は、普通ポルトランドセメントを用いた OPC-N より BB-N の方が小さくなった。しかし、再生コンクリートでは高炉セメントを用いた BB-R4 の全細孔量は、OPC-R4 より逆に大きくなり、塩化物イオンの拡散係数の大小関係とは一致しなかった。また骨材品質が全細孔量に及ぼす影響は、R4 を除いてほとんど認められなかった。

細孔径分布については、普通・再生両コンクリートとも、高炉セメントを用いた細孔径分布の 0.01~0.1 μ m 付近のピークが普通ポルトランドセメントを用いた場合よりわずかに小さいほうへシフトしている。このような傾向は高炉セメント硬化ペーストの一般的な特徴⁶⁾であり、シフトの程度が拡散性状に依存するという知見と一致している。したがって、普通ポルトランドセメントを用いた場合との細孔構造の相違が、高炉セメントを用いた再生コンクリートの塩化物イオン拡散係数を小さくした一要因であるものとする。ただし、全細孔量は高炉セメントを用いた方が小さくなるという知見とは再生コンクリート R4 の場合一致していない。これは再生骨材の旧付着モルタルの量および性質が細孔径分布の測定結果に影響したためと考える。

また、骨材とセメントペースト界面には遷移帯と呼ばれる 10 μ m 程度の水酸化カルシウムの脆弱層があり、この遷移帯は混合セメントを用いた場合、形成されにくいとされている⁷⁾。したがって、高炉セメントを用いた場合に塩化物イオンの拡散が抑制されるのは、上述のペースト部分の細孔構造の違いとともに、骨材とペースト界面の遷移帯、つまり空隙構造およびその量が改善されるためではないかと考えた。これを確認するために、再生コンクリート OPC-R4、BB-R4 について EPMA による面分析を実施した。写真-1 に EPMA の面分析による Ca の同定結果を示す。分析結果より、再生骨材の旧付着モルタルと新モルタルとの界面には普通骨材の場合と同様に遷移帯が形成されていること、また高炉セメントを用いた再生コンクリートは骨材とペースト界面の遷移帯の形成が抑制されていることが確認された。ただし、これらの結果は供試体のごく 1 部についての観察結果である。遷移帯の形成量と塩化物イオンの拡散性状の関

係を明確にする方法としては、遷移帯の形成量と細孔容積を関係づけることが考えられた。しかし、細孔径分布の測定に供した試料は粗骨材を取り除いて採取した 5mm 角のモルタル部分であり、試料の採取過程で遷移帯は除去されていることも考えられ、今回実施した細孔径分布の測定結果と遷移帯の形成量の関連づけはできなかった。

3.3 コンクリート内部の鉄筋の腐食状況

表 6 に動電位分極曲線による不動態のグレードの判定結果、図 8 に飛沫帯に暴露した供試体中の塩化物イオン含有量の測定結果について示す。不動態のグレードは、普通コンクリート BB-N では 3, 4 であったのに対し、再生コンクリートではグレード 2 の供試体も存在した。すなわち、再生コンクリート中の鉄筋表面の不動態形成状況は、普通コンクリートの場合より劣る結果となった。塩化物イオンは鉄筋埋設位置であるかぶり 1, 2cm まで達しており、その量は再生コンクリートのほうが大きかった。したがって、再生コンクリートで不動態の形成状態が劣った一要因は、外部より浸透した塩化物イオンの影響であると考えられる。

図 9 に定電位ステップ法の測定結果を示す。BB-N の電流密度は、0.09 μ A/cm² であったのに対し、再生コンクリートは 0.18~0.25 μ A/cm² と大きくなった。この結果は、再生コンクリート中の鉄筋表面への酸素供給量が普通コンクリートより大きくなることを示している。したがって、外部

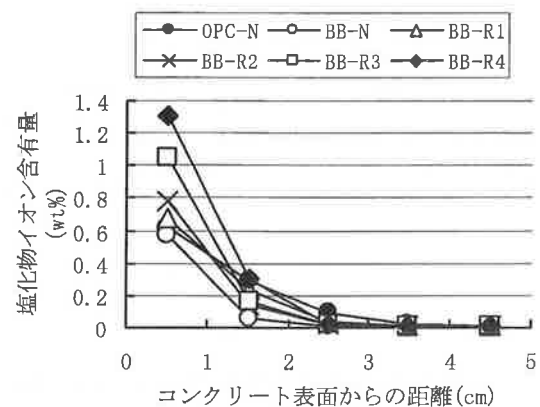
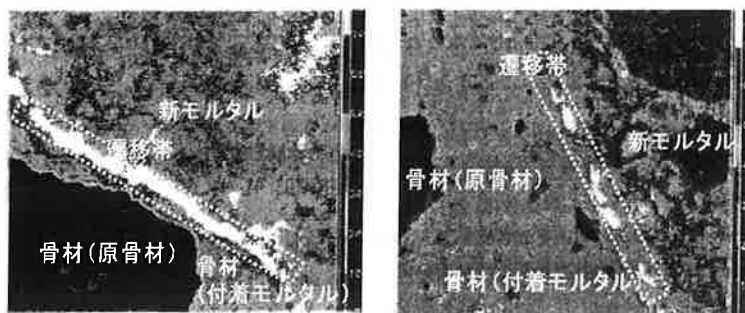


図8 塩化物イオン含有量の測定結果 (飛沫帯暴露, 材齢6ヶ月)



OPC-R4

BB-R4

写真1 EPMA の面分析試験結果

表 6 不動態のグレードの判定結果

種類	海水		飛沫	
	1cm	2cm	1cm	2cm
BB-N	4	4	3	3
BB-R1	3	3	2	3
BB-R2	3	3	2	2
BB-R3	3	3	3	3
BB-R4	2	2	2	2

不動態のグレード
5←良 不動態状態 悪→0

より浸入した塩化物イオンが腐食発生濃度を超え、不動態被膜が破壊された後の再生コンクリートの腐食速度は、普通コンクリートより速く進行する可能性がある。

また、電気化学的測定を行った後、供試体を割裂して鉄筋を取り出して表面観察を行ったが、すべての鉄筋で腐食は認められなかった。これは暴露期間 5 ヶ月と短いためであり、内部鉄筋の防食性については引き続き暴露試験を継続してデータを蓄積する必要がある。

4. まとめ

港湾構造物への再生コンクリートの適用を目的として行った本研究により、以下のことが明らかとなった。

(1) 各海洋環境への暴露試験の結果、海水の作用を受ける環境下において、高炉セメントを用いた再生コンクリートの強度発現特性は普通コンクリートと同等であった。

(2) 60° 海水暴露試験の結果、高炉セメント B 種を用いた再生コンクリートの耐海水性は、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートと比較して同等以上であった。

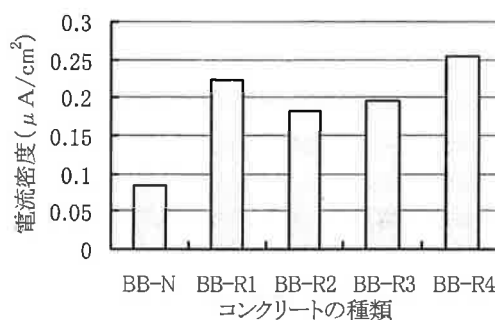


図9 定電位ステップ法による電流密度の測定結果

(3) 再生コンクリートの塩化物イオン浸透性は、高炉セメント B 種の使用により大幅に改善され、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートと同等以上であった。ただし、再生骨材の品質低下に伴って塩化物イオンの拡散係数は大きくなった。

(4) 再生コンクリートの酸素拡散係数は、普通コンクリートより大きくなる可能性がある。

謝辞

本研究は、運輸省港湾技術研究所 構造部 材料研究室の濱田秀則室長のご指導を受け、共同で行ったものである。本論文を作成するに当たり、多大なご指導・ご協力を頂いた運輸省港湾技術研究所構造部 福手勤部長、阿部正美主任研究官、山路徹研究官に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 伊藤正憲, 福手 勤ほか: 海洋環境下における再生コンクリートの適用性評価に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 37 巻, 第 4 号, 1998. 12
- 2) 例えば, 笹谷輝彦, 鳥居和之ほか: 自然環境下に暴露したコンクリート中の鉄筋の腐食性状, 16-1, 787, 1994
- 3) 大即信明, 久田 真ほか: 電気泳動法によるモルタル中の塩化物イオン拡散係数の推計, 土木学会論文集, No.592/V-39, 1998. 5
- 4) 濱田秀則ほか: 酒田港および鹿児島港に暴露したコンクリート梁の耐海水性, 港湾技術研究所資料, No. 614, 1988. 6
- 5) 濱田秀則ほか: コンクリート表面被覆の塩害防止効果ならびにその評価法について, 港湾技術研究所資料, No. 706, 1991. 6
- 6) 内川 浩: 硬化セメントペースト中のアルカリイオンの拡散に及ぼす高炉水砕スラグおよびフライアッシュ混合の効果, セメントコンクリート No. 460, 1985. 6, pp. 20~27
- 7) 内川 浩: セメントペーストと骨材界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学, Vol. 33, No. 9, 1995. 9, pp. 5~17

SEA WATER RESISTANCE AND REINFORCING STEEL ANTICORROSION OF RECYCLED CONCRETE

K.Hayakawa, M.Ito, and J.Oohashi

A purpose of this study is that investigates fundamental characteristics under marine environments of recycled concrete using portland blast-furnace slag cement, that has been sea water proof cement, compared to normal concrete. This paper presents the experimental results for sea water resistance, corrosion prevention of steel, chloride permeability, abrasion resistance, etc of recycled concrete. The main results obtained in this study are as following:

- 1) Sea water resistance of recycled concrete is improved by using portland blast-furnace slag cement.
- 2) Chloride permeability of recycled concrete used portland blast-furnace slag cement is almost same property to normal concrete used portland cement.
- 3) The oxygen supply quantity in recycled concrete to reinforcing steel may be more abounding than plain concrete.