

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

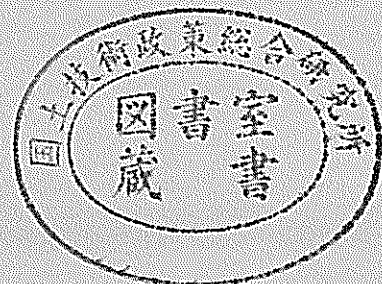
REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL.39      NO.2      June 2000

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第39巻 第2号 (Vol. 39, No. 2), 2000年6月 (June 2000)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Numerical Study on the Flow Characteristics of Tide-Induced Jet  
..... Jong-Chun PARK, Tomonari OKADA, Keita FURUKAWA,  
Keisuke NAKAYAMA and Yasushi HOSOKAWA ..... 3  
(潮汐噴流の流れ特性に関する数値的研究  
..... 朴 鍾千・岡田知也・古川恵太・中山恵介・細川恭史)
2. Compressive Behavior of Sensitive Ariake Clays  
..... Zhenshun HONG and Takashi TSUCHIDA ..... 27  
(鋭敏な有明粘土の圧縮特性に関する一考察  
..... 洪 振舜・土田 孝)
3. 内湾域の水環境に影響を及ぼす物理的要因に関する考察  
— 瀬戸内海総合水質測定調査データによる解析 —  
..... 宮野 仁 ・日比野忠史・中山恵介・岡田知也・細川恭史・浅井 正 ..... 47  
(Estimates of Physical Factors Influencing on Enclosed Shallow Water Environments  
— Water Exchange Analysis Based on the Data Sets of Comprehensive Investigations in Seto Inland Sea,  
Japan —  
..... Masashi MIYANO, Tadashi HIBINO, Keisuke NAKAYAMA, Tomonari OKADA,  
Yasushi HOSOKAWA and Tadashi ASAI)
4. 大船渡湾における湾外水の密度変動が湾内水環境に及ぼす影響の定量的評価  
..... 岡田知也・中山恵介・日比野忠史・細川恭史 ..... 73  
(A Quantitative Evaluation of the Influence of External Waters on the Water Environment of Ohfunato Bay,  
Japan  
..... Tomonari OKADA, Keisuke NAKAYAMA, Tadashi HIBINO and Yasushi HOSOKAWA )
5. ケーソン式岸壁の地震時変形に及ぼす上下動の影響について  
..... 野津 厚・上部達生・風間基樹・三籐正明 ..... 99  
(Effect of Vertical Ground Motions on Deformation of Caisson Quay Wall During Earthquake  
..... Atsushi NOZU, Tatsuo UWABE, Motoki KAZAMA and Masaaki MITOU)
6. 海洋環境下における再生コンクリートの耐久性に関する研究  
..... 早川健司・山路 徹・濱田秀則 .....153  
(A Study on Durability of Recycled Concrete under Marine Environment  
..... Kenji HAYAKAWA, Toru YAMAJI and Hidenori HAMADA)

## 海洋環境下における再生コンクリートの耐久性に関する研究

早川健司\*・山路 徹\*\*・濱田秀則\*\*\*

### 要 旨

コンクリート解体材から製造される再生骨材をコンクリート用骨材として利用するための技術開発は、我が国において重要な課題になっている。本研究は、再生コンクリートを海洋環境下のコンクリート構造物へ適用するための基礎資料を得ることを目的としている。すなわち本研究の目的は耐海水性に優れる高炉セメント B 種を用いた再生コンクリートの諸特性、特に耐海水性や鉄筋防食性能を、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いた普通コンクリートと比較して定量的に把握することである。このため、骨材品質を変化させた再生コンクリート供試体を作製して乾燥収縮、耐凍害性、中性化などを検討するとともに、促進劣化試験および長期暴露試験を実施して耐海水性や鉄筋の防食性能に関する試験を実施した。

本研究で得られた主要な結論を以下に要約する。

- 1) 高炉セメント B 種を用いた再生コンクリートの強度発現特性は、普通コンクリートの場合と同様に長期的には普通ポルトランドセメントを用いた場合と同等となる。
- 2) 再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは、骨材の品質の低下とともに大きくなる。
- 3) 再生コンクリートの耐凍害性は、骨材の品質によってはある程度確保することができる。
- 4) 再生コンクリートの中性化進行は、普通コンクリートより早くなる傾向にある。
- 5) 高炉セメント B 種を用いることにより、再生コンクリートの耐海水性を向上させることができる。
- 6) 再生コンクリートの塩化物イオンの拡散性状は、高炉セメント B 種の使用により普通ポルトランドセメントを使用した普通コンクリートと同等以上にすることができる。
- 7) 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。

キーワード：再生コンクリート、高炉セメント、海洋環境、塩化物イオン拡散性状、耐海水性、鉄筋防食性能

---

\* 構造部材料研究室研修生（東急建設株式会社）

\*\* 構造部材料研究室研究官

\*\*\* 構造部材料研究室室長

〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 運輸省港湾技術研究所  
電話：0468-44-5033 Fax：0468-44-0255 e-mail:yamaji@cc.phri.go.jp

## A Study on Durability of Recycled Concrete under Marine Environment

Kenji HAYAKAWA\*  
Toru YAMAJI\*\*  
Hidenori HAMADA\*\*\*

### Synopsis

In recent years, recycled concrete used recycled aggregate made from demolished concrete structures have been extensively studied. But, the applicability of recycled concrete to marine structure has not been sufficiently clear. Under the social circumstances, 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 see water proof cement, compared to normal concrete . So, by using some recycled aggregates, several kinds of concrete samples were made. And these concrete samples were tested from several aspects of durability. 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) Strength characteristics of recycled concrete used portland blast-furnace slag cement is almost same tendency to normal concrete.
- 2) Sea water resistance of recycled concrete is improved by using portland blast-furnace slag cement.
- 3) Chloride permeability of recycled concrete used portland blast-furnace slag cement is almost same property to normal concrete used portland cement.
- 4) Oxygen diffusion to steel in recycled concrete is the possibility of high value.

**Key Words:** Recycled concrete, Portland blast-furnace slag cement, Marine environment, Chloride permeability, Sea-water resistance, Corrosion prevention of steel

---

\* Trainee of Material Laboratory, Structural Engineering Division (Tokyu Construction Co.,Ltd)

\*\* Member of Material Laboratory, Structural Engineering Division

\*\*\* Chief of Material Laboratory, Structural Engineering Division

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-44-5033 Fax : +81-468-44-0255 e-mail:yamaji@cc.phri.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	153
1. はじめに .....	157
2. 実験概要 .....	158
2.1 使用材料 .....	158
2.2 実験要因 .....	159
2.3 コンクリートの配合 .....	159
2.4 練混ぜ方法および供試体 .....	159
2.5 暴露条件 .....	160
2.6 試験方法 .....	160
3. 結果および考察 .....	165
3.1 再生コンクリートの一般的性質 .....	165
3.2 海洋環境下での再生コンクリートの耐久性 .....	168
3.3 コンクリート中の鉄筋の防食性 .....	174
4. 結論 .....	176
5. あとがき .....	176
参考文献 .....	177

1. はじめに

平成3年に施行されたリサイクル法において、コンクリート解体材は再資源化すべき指定副産物に指定されており、再利用方法の確立が重要な課題となっている。現在、コンクリート解体材の再利用の用途は、そのほとんどが舗装用路盤材、埋戻し・裏込め材である。しかしコンクリート解体材の発生量の増加、またコンクリート用天然骨材の枯渇、環境保全といった観点から、コンクリート解体材から製造した再生骨材をコンクリート用骨材として積極的に利用していかなければならない状況になることが予想される。このような社会的背景から、近年再生骨材を用いたコンクリートに関する研究が各機関において盛んに行われている。

これまで当研究室では再生コンクリートを港湾構造物へ適用するための検討を行ってきた<sup>1)2)</sup>。これらの研究は、セメントに普通ポルトランドセメントを用い、骨材に再生細・粗骨材の両者を使用した再生コンクリートを対象として強度や各種耐久性の検討を行ったものである。その結果として、普通コンクリートより水セメント比を小さく設定すれば、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、また各種耐久性もある程度確保することができることから、消波ブロックなどの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が示されている。しかし、塩害の主要因である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であることが確認されている。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、また塩化物イオンの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<sup>3)4)</sup>。したがって、普通骨材より品質の劣る再生骨材を用いたコンクリートには、耐海水性の確保および塩化物イオン浸透に対する抵抗性の改善などの観点から、高炉セメントの使用が有効であると考えられる。また再生骨材は複数のコンクリート解体材から製造されることから、アルカリ骨材反応を生じる骨材が混入する危険性がある。このため再生コンクリートには、アルカリ骨材反応対策としても高炉セメントを使用することが望ましいと考えられる。

一方、建設省通達の「コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定基準(案)」<sup>5)</sup>では、再生骨材の吸水率によって再生骨材の品質を分類し、使用する再生骨材の種類によって再生コンクリートの用途を分類している(表-1、表-2 参照)。このなかで、例えば細骨材に普通細骨材を、粗骨材に再生粗骨材1種を用いた再生コンクリートIの使用用途としては鉄筋・無筋コンクリート構造物へ適用可能となっているが、海水の作用を大きく受ける港湾構造物への適用に対して、耐海水性やコンクリート内部の鉄筋の防食性を詳細に検討した研究は少なく、必ずしも十分な知見が得られていない。今後、再生コンクリートを港湾構造物へ使用していくためには、使用する再生骨材の品質とコンクリートの耐久性との関係を明確にし、再生骨材の品質別の使用用途を選定して

表-1 建設省の用途別暫定基準(案)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
項目					
吸水率 (%)	3以下	5以下	7以下	5以下	10以下

表-2 再生骨材の種類と再生コンクリートの用途

再生骨材コンクリートの種類	再生骨材コンクリートの設計基準強度 $\sigma_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	再生骨材コンクリートの用途	使用粗骨材	使用細骨材
I	20以上	鉄筋コンクリート、無筋コンクリート等	再生粗骨材1種	普通細骨材
II	15以上	無筋コンクリート等	再生粗骨材2種	普通あるいは再生細骨材1種
III	15以上	捨てコンクリート等	再生粗骨材3種	再生細骨材2種

おく必要がある。

このような背景から、本研究は高炉セメントB種を用いた再生コンクリートを港湾構造物をはじめ海洋環境下に建設される構造物へ適用するための基礎データを得ることを目的としている。すなわち、再生骨材の品質を変化させた再生コンクリートに対して、乾燥収縮、中性化、耐凍害性などの一般的な耐久性の評価、および耐海水性やコンクリート内部の鉄筋の防食性能などの海洋環境下での性能評価を、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いた普通コンクリートと比較して定量的に把握することである。

高炉セメントB種を用いた再生コンクリートの強度、乾燥収縮、中性化、耐凍害性などの一般的な硬化コンクリートの性質に関する試験は、標準水中養生した供試体に対して実施した。耐海水性に関しては、海洋環境への暴露試験および60℃海水による劣化促進試験を行い、圧縮強度試験などで評価した。内部鉄筋の防食性については、鉄筋を埋め込んだ供試体を作製して海洋環境への暴露試験を行い、内部鉄筋の電気化学的測定を中心とした評価試験を実施した。なお、本文は長期耐久性のうち材齢6ヶ月までの試験結果について報告するものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

#### (1)セメント

表-3にセメントの試験成績を示す。実験で使用したセメントは普通ポルトランドセメント(略号OPC)、および高炉セメントB種(略号BB)の2種類である。

#### (2)骨材

表-4に使用した骨材の物理的性質を、図-1、図-2に再生細・粗骨材の粒度分布をそれぞれ示す。

再生細骨材には吸水率の異なるRS1およびRS2を、また再生粗骨材にはRG1、RG2のそれぞれ2種類を使用した。RS1、RG1は、再生骨材製造工場に集積された廃コンクリートを2次破碎処理まで行い分級して製造した。RS2、RG2は所在の明らかな原コンクリートを1次破碎処理のみ行い分級して製造したものであり、旧付着モルタルの大小と密接な関係にある吸水率がRS1、RG1より大きい低品質な骨材である。また粒度分布は、1次破碎処理のみにより製造したRS2、RG2は、土木学会の粒度の標準からはずれているが、RS1、RG1は比較的良好な粒度分布を示している。

これらの再生細・粗骨材は、表-1に示した骨材の吸水率に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3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

表-3 セメントの試験成績

種類	密度 g/cm <sup>3</sup>	比表面積 cm <sup>2</sup> /g	凝結			安定性	圧縮強さ N/mm <sup>2</sup>			酸化マグネシウム %	三酸化硫黄 %	強熱減量 %	全アルカリ %	塩化物イオン %
			水量 %	始発 h-min	終結 h-min		3day	7day	28day					
普通ポルトランドセメント	3.15	3370	27.7	2-12	3-30	良	27.7	42.5	60.4	1.6	2	1.6	0.6	0.008
高炉セメントB種	3.04	3930	29	3-01	4-52	良	20.5	33.4	59.3	3.7	2	1.6	---	0.006

備考：高炉スラグ微粉末の分量(40~45%)

表-4 骨材の物理的性質

種類	記号	粗粒率	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	単位容積 質量 (kg/l)	実積率 (%)	安定性 (%)	洗い損失 量(%)	品質 <sup>注)</sup>
普通細骨材	NS	2.50	2.59	1.9	---	---	---	---	
再生細骨材	RS1	2.94	2.45	4.9	1.503	64.2	11.8	---	1種
	RS2	3.27	2.25	13.1	1.440	73.2	32.4	5.63	規格外
普通粗骨材	NG	---	2.70	0.2	---	62.0	---	---	
再生粗骨材	RG1	6.73	2.51	3.3	1.474	60.5	16.2	---	2種
	RG2	6.54	2.38	6.8	1.440	64.7	54.0	0.76	3種

注)表-1参照



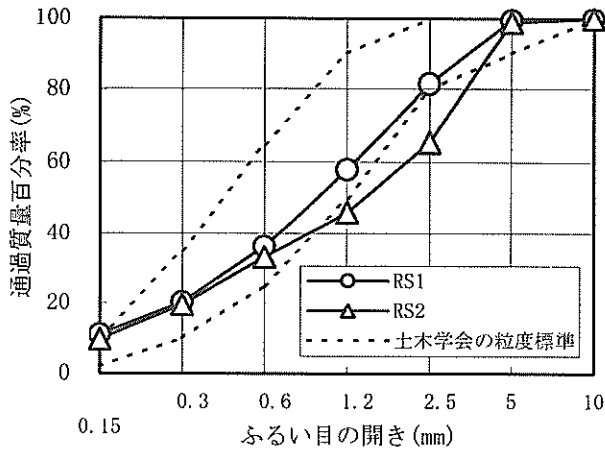


図-1 再生細骨材の粒度分布

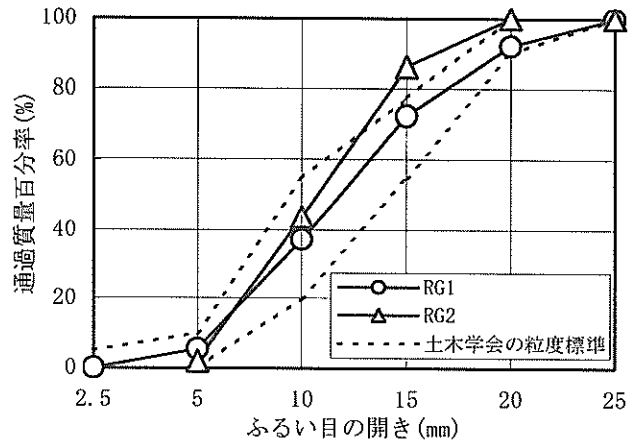


図-2 再生粗骨材の粒度分布

に相当するものである。

なお再生骨材は使用前に 24 時間以上のプレウエッティングを行い、表乾状態で使用した。

また普通細骨材には千葉県君津産の陸砂(NS)、普通粗骨材には青森県八戸産の砕石(NG)を用いた。

### (3) 混和剤および練混ぜ水

混和剤にはリグニンスルホン酸系の A E 減水剤、アルキルアリスルホン酸系の空気連行助剤を使用した。また練混ぜ水には上水道水を使用した。

## 2.2 実験要因

表-5 にセメントおよび骨材の組合せを示す。ここでコンクリートの種類を示す記号中の OPC, BB はセメントの種類を示しており、また R1~R4 中の数字は、再生コンクリートの品質のグレードに対応している。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、骨材品質の影響を検討するため、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。これらのコンクリートは、表-2 の暫定基準のコンクリート用途によると、R1 は鉄筋・無筋コンクリートへ、R2, R3 は無筋コンクリートへ、R4 は捨てコンクリートなどの非構造体へ適用できる再生コンクリートの種類 I, II, III に概ね相当するコンクリートである。

## 2.3 コンクリートの配合

表-6 にコンクリートの配合を示す。一般に、同一水セメント比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られる。そこで本研究では、再生コンクリートの水セメント比を普通コンクリートより一律 5% だけ小さく設定し、普通コンクリートで 55%、再生コンクリートで 50% とした。

コンクリートの配合は、目標スランプ  $8 \pm 2.5$  cm、空気量  $4.5 \pm 1.5$  % となるように、単位水量、細骨材率、A E 減水剤の使用量を調整して決定した。

## 2.4 練混ぜ方法および供試体

コンクリートの練混ぜには、50 および 100 リットルの強制練りパン型ミキサを用いた。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。圧縮強度、中性化、耐海水性および塩化物イオン透過性を検討するための供試体には  $\phi 10 \times 20$  cm の円柱供試体

表-5 セメントおよび骨材の組合せ

記号	セメントの種類	骨材の種類		コンクリートの種類 <sup>(注)</sup>
		細骨材	粗骨材	
OPC-N	普通ポルトランドセメント	NS	NG	普通
BB-N				
BB-R1		高炉セメント B 種	NS+RS1 等量混合	RG1
BB-R2				
BB-R3	RS1			再生 II
OPC-R4	普通ポルトランドセメント	RS2	RG2	再生 III
BB-R4	高炉セメント B 種			

注) 表-2 参照



表-6 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				AE減水剤
			W	C	S	G	
OPC-N	55	43	154	280	793	1096	0.70
BB-N		43	148	269	800	1106	0.67
BB-R1	50	43	148	296	790	1015	0.74
BB-R2		43	150	300	765	1011	1.50
BB-R3		46	154	308	789	948	1.54
OPC-R4		48	162	324	745	854	1.62
BB-R4		48	159	318	747	856	1.59

注) 記号R1~R4は再生骨材品質の高低に対応

を、乾燥収縮および凍結融解試験には10×10×40の角柱供試体を、および耐摩耗性の検討には20×20×5cmの平板供試体をそれぞれ用いた。図-3に鉄筋の防食性を検討するための供試体を示す。この供試体は、鉄筋にφ9mmの丸鋼を使用し、かぶり1,2cmの位置にガイド孔を有するアクリル樹脂製の底板に鉄筋を設置し、コンクリートを打設して作製した。なお、鉄筋はクエン酸二アンモニウム溶液に浸漬して黒皮を除去した状態で用い、電気化学的測定を行うためにリード線を配置した。ここで、かぶりを薄くしたのは、鉄筋腐食が早期に発生するようにしたためである。

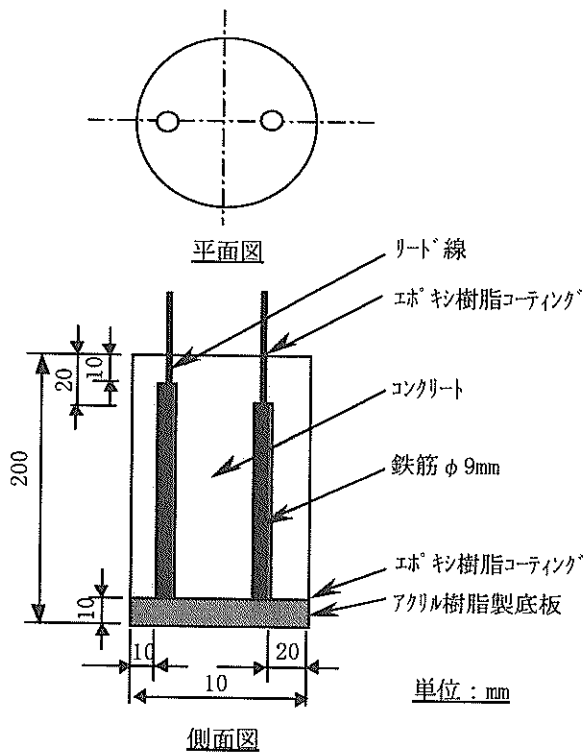


図-3 鉄筋防食性試験用供試体

### 2.5 暴露条件

図-4にコンクリートの養生および暴露方法を示す。

作製したコンクリート供試体は恒温室内に静置して翌日脱型し、材齢28日まで20℃標準水中養生を行った。材齢28日以降は、そのまま標準水中養生するもの、海洋環境下における耐久性の検討を行うために、20℃海水、劣化促進を目的とした60℃海水、および飛沫帯に暴露した。ここで飛沫帯とは、1日2回約3時間の海水噴霧を行い乾湿繰り返しを与える飛沫帯を模した当研究所内の屋外暴露施設である。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。

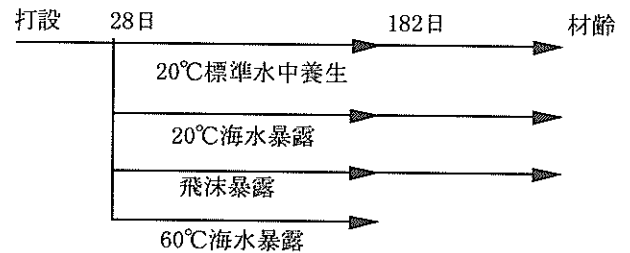


図-4 養生および暴露条件

### 2.6 試験方法

#### (1) 試験項目

表-7に、実施した試験の項目および条件を示す。

#### (2) フレッシュコンクリートに関する試験

##### a) スランプ試験

スランプ試験は、JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」に準拠して、練混ぜ直後のコンクリートに対して実施した。

##### b) 空気量試験

空気量試験は、JIS A 1128「フレッシュコンクリート

表-7 試験項目および条件

目的		試験項目	試験条件
フレッシュコンクリート		スランブ試験	練混ぜ終了直後
		空気量試験	
硬化物性および一般的耐久性		圧縮強度試験	標準水中養生
		静弾性係数の測定	材齢：7, 28, 56, 91, 182日
		乾燥収縮試験	乾燥日数182日まで
		促進中性化試験	暴露(20℃, 60%RH, CO <sub>2</sub> 濃度5%)期間：3ヶ月
		凍結融解試験	凍結融解サイクル300回まで
海洋環境下での耐久性	すり減り抵抗	すり減り試験	標準水中養生, 材齢182日
	海水の作用による物性の变化	圧縮強度試験	暴露条件：20℃海水, 飛沫, 60℃温海水, 材齢182日
		静弾性係数の測定	
	塩化物イオンの拡散	急速塩化物イオン透過性試験	標準水中養生, 材齢182日
		電気泳動試験	標準水中養生, 材齢182日より開始
		塩化物イオン量の測定	20℃海水, 飛沫暴露, 材齢182日
	酸素拡散	定電位ステップ法	飛沫暴露, 材齢182日
鉄筋腐食	鉄筋腐食観察		
		交流インピーダンス法	
微細構造の検討		細孔件分布の測定	標準水中, 20℃海水, 60℃温海水, 材齢182日
		電子顕微鏡観察	標準水中養生, 材齢28日
		EPMA面分析	

の空気量の圧力による試験方法「空気室圧力法」に準拠して実施した。

(3) 硬化コンクリートに関する試験

a) 圧縮強度試験および静弾性係数の測定試験

圧縮強度試験はφ10×20cmの円柱供試体を用い、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。また静弾性係数の測定はJSCE-G502に準拠して、コンプレッソメータを用いて圧縮強度試験と同時に実施した。

b) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は、埋設型ひずみゲージを10×10×40cmの中央部に埋設した供試体を作製して行った。試験条件としては、材齢7日まで標準水中養生したあと、温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室に保管した。測定はデータロガーによって材齢182日までのひずみを測定した。

c) 凍結融解試験

凍結融解試験は、JSCE-G501「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠して行った。すなわち、試験は供試体10×10×40cmを材齢14日まで標準水中養生し、その後1日6～8サイクルの凍結融解を300サイクルもしくは相対動弾性係数が60%以下となるまで実施した。

d) 促進中性化試験

試験に用いた供試体はφ10×20cmの円柱供試体であり、材齢28日まで標準水中養生し、その後28日間20℃、

60%RHの気中養生を行った。この供試体の中性化を促進させるため、20℃、60%RH、CO<sub>2</sub>濃度5%の促進中性化試験器中に暴露した。供試体は促進28、91日において供試体を割裂し、中性化深さはフェノールフタレイン1%エタノール溶液を噴霧し、赤く変色しない部分を中性化領域として平均中性化深さを求めた。

(4) 海洋環境下での耐久性に関する試験

a) すり減り試験

高波浪海域に位置するコンクリート構造物では、波浪や漂砂等による摩擦を受ける。本研究では、耐摩耗性を評価するために標準水中養生した材齢182日の20×20×5cmの供試体に対して、サンドブラストによるすり減り試験<sup>6)</sup>を行った。砂の噴射を与える試験体表面には、すり減りを受ける面積を一定にするために、規定の大きさの孔(直径6.35mm)が空いている保護板を取付け、この孔の中心に噴射口の中心がくるようにセットした。そして、コンクリート表面へ1分間の砂の噴射を行った。試験の評価は、(1)によって与えられるすり減り係数によって行った。

$$A_c = \frac{V}{A} \quad (1)$$

ここに、 $A_c$ : すり減り係数 (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>)

$V$ : すり減り減量の容積 (cm<sup>3</sup>)

$A$ : すり減りを受けた面積 (cm<sup>2</sup>)

b) 塩化物イオン拡散性状に関する評価試験

塩化物イオン拡散性状の評価は、標準水中養生した材齢182日の供試体に対して、急速塩化物イオン透過性試験、およびこれと類似した装置を用いて電気泳動による拡散係数の評価試験を実施した。

① 急速塩化物イオン透過性試験

急速塩化物イオン透過性試験<sup>7)</sup>は、コンクリートの電気抵抗に支配される通過電流量と塩化物イオン透過性に相関があることを利用し、コンクリートの通過電流量により塩化物イオン透過性を評価する試験方法である。この試験は、短時間で塩化物イオン透過性を評価できることに利点がある。

試験は、AASHTO T 277 に準拠して行った。試料は、φ10×20cmの円柱供試体の中心部分からφ10×5cmの試験体を切り出した。この試験体は、デシケータに投入し、1mmHg以下で3時間減圧した後、水道水を注水して1時間減圧状態を保持した。その後、復圧した状態で18±1時間放置したものを試験に供した。

図-5に試験装置の概要を示す。上述の前処理を施した試験体を試験装置に設置し、溶液が漏れないように止水処理を行った。そして+側溶液にNaOHの0.3N水溶液を、-極にNaClの3.0%溶液を満し、定電圧発生装置によって60Vの直流電圧を与え、このときの通過電流量をデータロガーによって経時に測定した。試験の評価は、6時間の通電時間中に流れた積算電流量(クーロン)によって行った。AASHTOの基準によると電流量が大きいほど塩化物イオン透過性が大きく、判定基準は表-8に示す5段階で評価することができる。

② 電気泳動による塩化物イオンの拡散係数の評価試験

コンクリート内部への塩化物イオンの移動は拡散によるものが一般的である。しかし濃度勾配を駆動力とする拡散現象は長期間にわたって起こるため、試験評価に長時間を必要とする。このため、近年比較的短期間で拡散係数を推計できる方法として、電気泳動を駆動力とする塩化物イオンの移動現象から拡散係数を求める試験方法が提案されている<sup>8)</sup>。そこで本研究では塩化物イオンの拡散係数の評価試験として、この電気泳動による試験を実施した。

図-6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、アノード側にコンクリート中の細孔溶液を模したCa(OH)<sub>2</sub>飽和水溶液、カソード側に海水を模したNaCl 5%水溶液を満し、両セル間に15Vの直流定電圧を与えた。そして、電気泳動によってカソード側からアノード側水溶液へ移動した塩化物イオンの濃度変化を電位差滴定法により経時に測定した。その際、

アノード側溶液中の塩化物イオンの濃度変化は、図-7に示すようになる。すなわち、塩化物イオンはアノード側溶液中からコンクリート内を移動し、カソード側溶液に

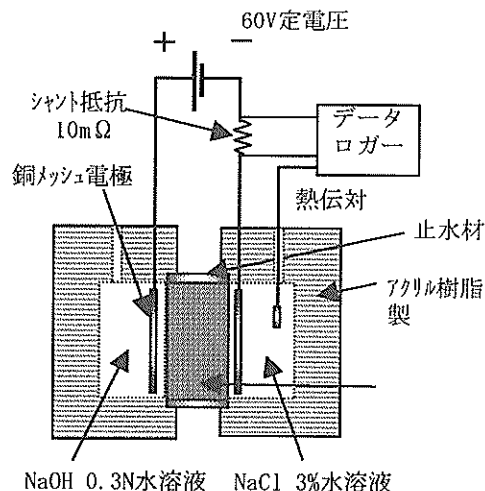


図-5 急速塩化物イオン透過性試験概要図

表-8 塩化物イオン透過性の判定基準

電流量 (クーロン)	塩化物イオン透過性	備考
4000~	High	(高)水セメント比(>0.6) 普通セメント使用
2000~4000	Moderate	(中)水セメント比(0.4~0.5) 普通セメント使用
1000~2000	Low	(低)水セメント比(<0.4) 普通セメント使用
100~1000	Very Low	ラテックス混入コンクリート
~100	Negligible	ポリマー含浸コンクリート ポリマーコンクリート

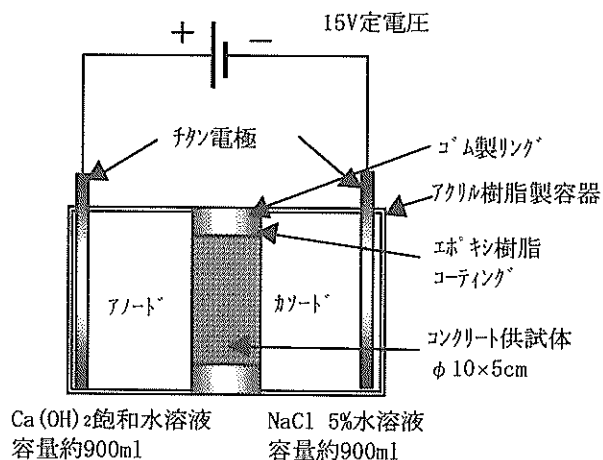


図-6 電気泳動試験概要図

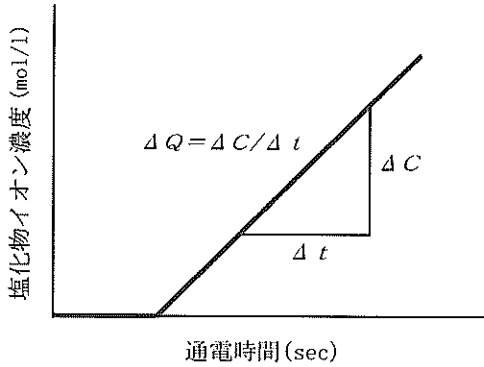


図-7 塩化物イオンの濃度変化

達した後、濃度変化が定常状態となる。

拡散係数  $D_{Cl}$  は、(2)～(4)より求めた。すなわち、まず濃度変化が定常になったときの傾きである透過速度  $\Delta Q$  (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/cm<sup>2</sup>·sec) を求めた。

$$J_{Cl} = \Delta Q_{Cl} \frac{V}{A} \quad (2)$$

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 (78.54cm<sup>2</sup>)

次に溶液の濃度勾配  $C_{Cl}$  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  $D_{Cl}$  (cm<sup>2</sup>/sec) に変換した。

$$u_{Cl} = \frac{J_{Cl}}{C_{Cl} \cdot d\phi/dx} \quad (3)$$

$$D_{Cl} = \frac{k \cdot T}{e \cdot Z_{Cl}} u_{Cl} \quad (4)$$

ここに、 $k$ ：ボルツマン定数 ( $1.38 \times 10^{-23}$ )

$T$ ：絶対温度 (k)

$e$ ：電気素量 ( $1.60 \times 10^{-19}$ C)

$Z_{Cl}$ ：塩化物イオンの価数

#### (5) コンクリート中の鉄筋腐食に関する試験

一般に海洋環境下に位置するコンクリート中の鉄筋は、高アルカリ環境下において不動態で覆われているが、外部から浸透した塩化物イオンによって不動態被膜が破壊されると、その後の腐食は酸素の供給量に律速されて腐食が進行する。そこで本研究では、コンクリート内部の塩化物イオン量の測定、および電気化学的測定によって再生コンクリート中の鉄筋腐食の潜在性評価を行った。すなわち、材齢 182 日まで海水中および飛沫帯に暴露した供試体に対し、交流インピーダンス法<sup>9)</sup>および動電位分極曲線<sup>10)</sup>によって鉄筋表面状態を判定し、また定電位

ステップ法<sup>10)</sup>によって鉄筋表面への酸素拡散性状を判定した。

#### a) 塩化物イオン量

コンクリート中の塩化物イオンの測定は、JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準拠して、材齢 182 日で実施した。図-8 に示すように、試料の採取位置はコンクリート表面から内部方向に 5 点である。

試験に用いた供試体の暴露条件は 20°C 海水、および飛沫帯である。試験結果からは、前述の電気泳動による拡散係数の評価試験の妥当性を検証することも含め、Fick の第 2 法則である拡散方程式 (5) の解である (6) (20°C 海水暴露の場合) および (7) (飛沫帯暴露の場合) により逆算して拡散係数を算出<sup>12)</sup>した。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{Cl} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (5)$$

$$C = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{Cl} \cdot t}} \right) \right\} \quad (6)$$

$$C = W \left[ 2\sqrt{\frac{t}{\pi D}} \exp \left( -\frac{x^2}{4Dt} \right) - \frac{x}{D} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{Cl} \cdot t}} \right) \right\} \right] \quad (7)$$

ここに、 $C$ ： $x$ 位置での塩化物イオン濃度 (%)

$C_0$ ： $x=0$  (コンクリート表面) の塩化物イオン濃度 (%)

$x$ ：表面からの距離 (cm)

$D_{Cl}$ ：塩化物イオンの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/sec)

$t$ ：経過時間 (sec)

$W$ ：単位時間・単位面積あたりの塩分付着量 (一定)

erf：誤差関数

#### b) 埋設鉄筋の交流インピーダンス特性

鉄筋腐食のパラメータとなる腐食速度についての検討を行うためには、鉄筋の分極抵抗を測定する必要がある。そこで本研究では交流インピーダンス特性から分極抵抗を求める試験を実施した。

図-9 に試験の概要を示す。試験は、照合電極に海水塩化銀電極を、対極にステンレス鋼板を用いて行った。まず、鉄筋の自然電位を測定し、その自然電位を基準に周波数の異なる代表的な高、低 2 周波 (今回は予備試験の結果、10Hz および 20mHz とした。) の交流電圧 ( $\pm 5$ mV) を印加する。そして、測定したインピーダンスを複素平面上で整理し、10Hz と 1mHz を通る半円の直径を見かけ

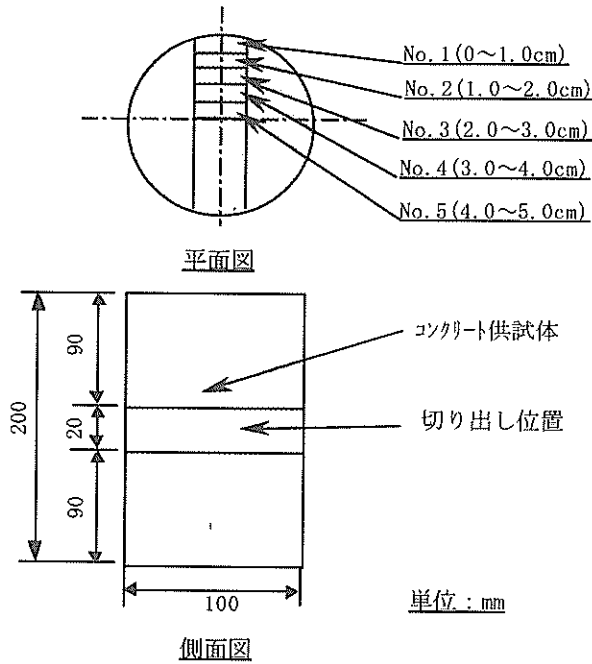


図-8 塩化物イオン測定用試料の採取位置

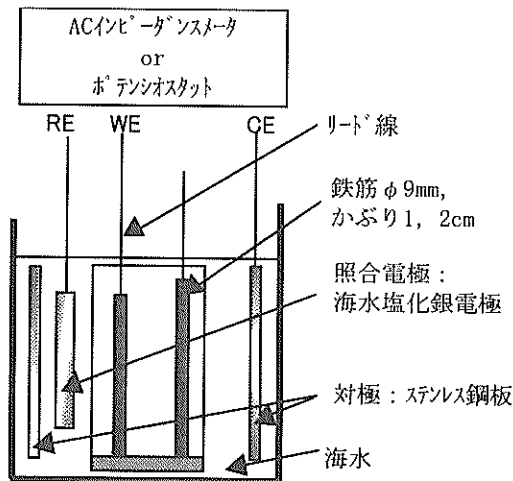


図-9 電気化学的な鉄筋腐食評価試験概要図

の分極抵抗, 10Hz 時のインピーダンスの実数値をコンクリート抵抗とした。

c) 動電位分極曲線による不動態のグレードの判定方法

動電位分極曲線の測定概要は, 交流インピーダンスとほぼ同様であり, 交流インピーダンスメータの代わりにポテンシオスタットにより電位を制御した。分極は, 自然電位を起点に, 照合電極に対し+1000mV と-1000mV の間を掃引速度 1mV/sec で掃引した。図-10 に本計測によって得られる分極曲線の一例を示す。図-11 に示すように, この分極曲線の位置関係によって鉄筋表面の不動態の

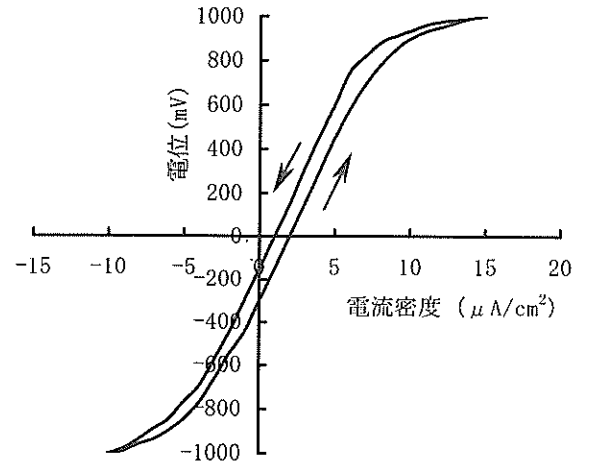


図-10 動電位分極曲線の測定例

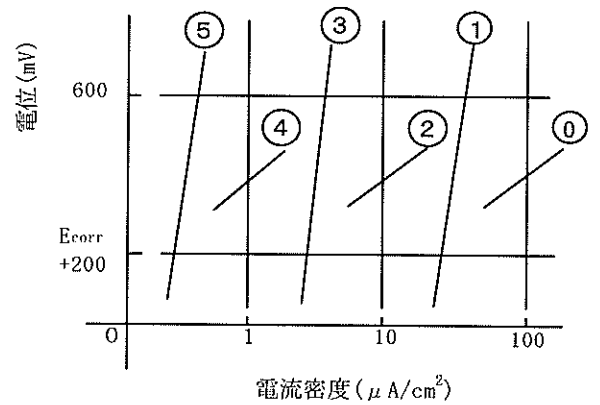


図-11 不動態のグレードの判定基準

状態を判定したものが不動態のグレードである。不動態のグレードは0~5の6段階で評価でき, 5が最も不動態の状態がよく, 0ではほとんど不動態がないと判断できる。

d) 定電位ステップ法による酸素拡散性状の評価方法

定電位ステップ法の測定システムは, 動電位分極曲線と同様である。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。図-12 に定電位ステップ法の測定結果である経過時間と電流曲線の一例を示す。電流は時間の経過とともに減少していき一定値に収束していく。この電流値は, 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。

e) 鉄筋表面の観察

鉄筋表面の観察は, 材齢 182 日まで飛沫帯に暴露した供試体を割裂し, 内部鉄筋を取り出して行った。

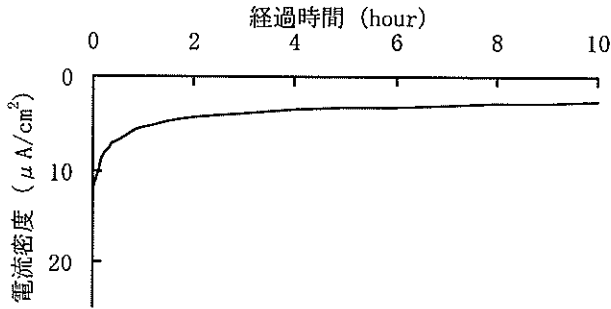


図-12 定電位ステップ法の測定例

(6) 微細構造観察

微細構造に関する試験は、塩化物イオンの拡散性状や耐海水性の考察を行うために実施した。

a) 細孔径分布の測定

細孔径分布の測定は、水銀圧入式ポロシメータ (micromeritics 社製 AUTOPORE II 9220) 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 φ10×20cm の供試体を用いた。試料の採取位置は、供試体の表面部および中心部であり、この位置より切り出した試料に前処理を施した。前処理は、アセトンに 1 時間浸漬して水和を停止させた後、24 時間室内乾燥したものより 5mm 角に砕いたモルタル部分を採取し凍結乾燥機にて 6 日間乾燥させた。

b) 電子顕微鏡観察

電子顕微鏡観察は、日立製作所製電界放射形走査電子顕微鏡 S-4100 により観察し、写真撮影を行った。試料は、骨材とペーストの界面を含む部分を割裂により取り出し、1 昼夜以上真空乾燥して Pt-Pd 蒸着を行ったものを用いた。

c) EPMA 面分析

EPMA 面分析は日本電子社製線マイクロアナライザー JXA-8621M により行った。試料は、φ10×20cm の円柱供試体の中央部分から円周を含む約 40mm 角に切り出した。これをメタクリル樹脂により補強し、研磨処理した後、研磨面に炭素を蒸着させた。測定は、40mm 角の試料に対して Si, Ca, S, Cl の面分析を行った後、骨材とペーストの界面付近を選択し、0.2mm 角の範囲を面分析した。

3. 結果および考察

3.1 再生コンクリートの一般的性質

(1) 配合の特徴

一般に再生コンクリートは、普通コンクリートと同等

のスランブを得るために単位水量を大きくする必要があり、本実験の再生コンクリートも単位水量を 8~11kg 程度大きくする必要があった(表-6 参照)。普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較すると、高炉セメントを用いることにより、普通コンクリートで 6kg、再生コンクリートで 3kg、単位水量を小さくすることができた。

図-13 に材齢 28 日におけるコンクリートの単位容積質量を示す。再生コンクリートは普通骨材と比較して密度の小さい再生骨材の影響により、単位容積質量は小さくなった。また、高炉セメント B 種の密度は 3.04g/cm³ であり普通ポルトランドセメント 3.15g/cm³ より小さいため、若干ではあるが単位容積質量は小さくなる。

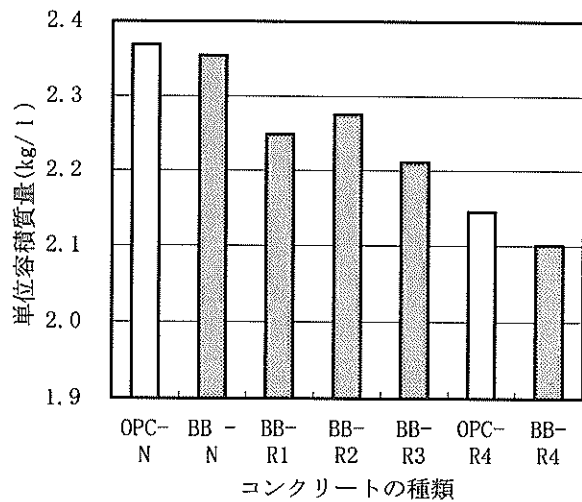


図-13 コンクリートの単位容積質量

(2) 圧縮強度

図-14 に材齢 28 日における圧縮強度を示す。高炉セメントを使用した普通・再生コンクリートの圧縮強度は、普通ポルトランドセメントを使用した場合より 6%程度小さくなった。また、再生コンクリートの圧縮強度は、使用骨材の品質の低下に伴って概ね減少する傾向にあり、W/C が 5%大きい普通コンクリートと比較して、90~100%程度であった。

図-15 に材齢 182 日まで標準水中養生した場合の材齢と圧縮強度の関係を示す。高炉セメントを用いた材齢 28 日の再生コンクリートの圧縮強度は、普通ポルトランドセメントを用いた場合より若干小さかったが、材齢 91 日以降ではほぼ同等となった。このような強度発現特性は、高炉セメントを用いたコンクリートの特徴であり、再生コンクリートの場合においても同様であることが確認された。また、再生コンクリート BB-R1, BB-R2, BB-

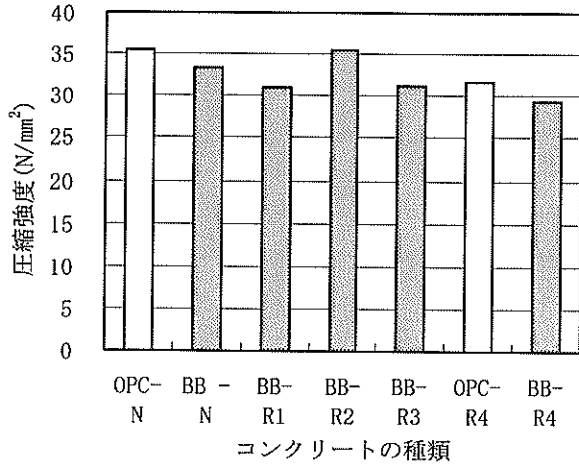


図-14 材齢 28 日における圧縮強度 (標準水中養生)

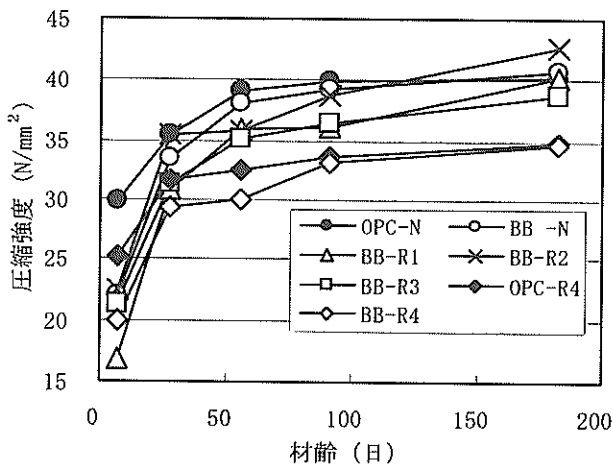


図-15 材齢と圧縮強度の関係 (標準水中養生)

用いた BB-R1, BB-R2, BB-R3 では普通コンクリートの 86~98%, 再生粗骨材 RG2 を用いた OPC-R4, BB-R4 では 70% 程度であった。

図-17 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。同一強度の再生コンクリートの静弾性係数は、普通コンクリートより小さくなる。これは再生骨材の旧コンクリートの付着モルタルの影響により骨材自体の静弾性係数が小さいためであり、再生コンクリートの静弾性係数は、旧付着モルタルの量およびその性質の影響を受けるものと考えられる。また、図中に示した曲線は、骨材の単位容積質量を考慮できる建築学会式であり、再生コンクリートの単位容積質量の低下を考慮すれば、静弾性係数を概ね推定できることが分かる。

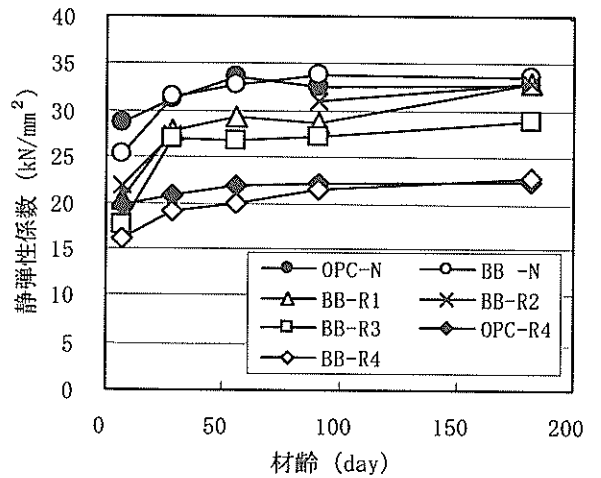


図-16 材齢と静弾性係数の関係 (標準水中養生)

R3 は材齢 182 において水セメント比の 5% 小さい普通コンクリートと概ね同等の強度が得られている。しかし、低品質な再生細・粗骨材を使用した OPC-R4, BB-R4 では、普通コンクリートの 83~85% 程度の強度であり、この再生コンクリートで普通コンクリートと同等の強度とするためには水セメント比をさらに小さく設定する必要がある。  
(3) 静弾性係数

図-16 に材齢と静弾性係数の関係を示す。材齢 91 日までの静弾性係数は、強度発現特性の影響を受け、高炉セメントを用いた場合に若干小さくなったが、材齢の進行に伴う強度の増加とともにセメントの種類の影響は小さくなった。静弾性係数に対する骨材品質の影響は、特に再生粗骨材の品質に大きく依存し、骨材品質の低下とともに小さくなり、材齢 182 日において再生粗骨材 RG1 を

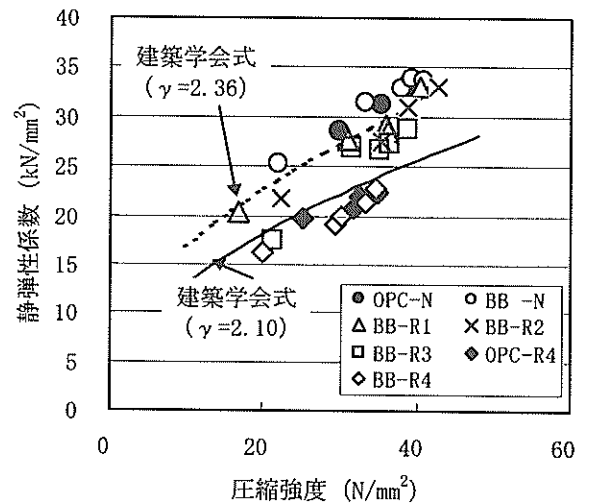


図-17 圧縮強度と静弾性係数の関係 (標準水中養生)



(4) 乾燥収縮

図-18 に乾燥日数と乾燥収縮ひずみの関係を示す。乾燥日数182日における普通コンクリートBB-Nの収縮ひずみが400 $\mu$ 程度であったのに対し、BB-R1, BB-R2, BB-R3で620~650 $\mu$ , R4で820 $\mu$ と再生コンクリートの収縮ひずみは大きくなった。収縮ひずみの大きさは概ね再生骨材の品質の高低順であるが、BB-R1, BB-R2, BB-R3の粗骨材は同じで細骨材の種類のみ異なることから、今回の試験結果は再生粗骨材の品質に大きく依存する結果となった。

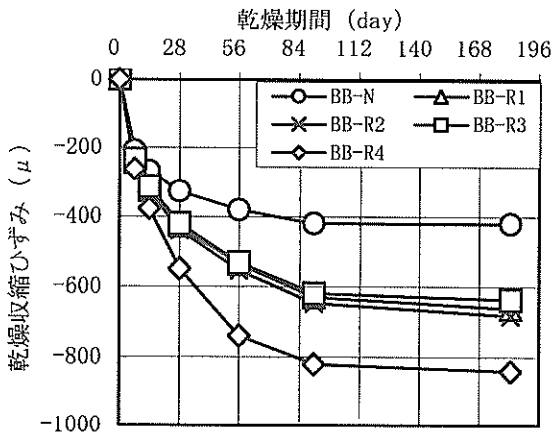


図-18 乾燥収縮試験結果

(5) 耐凍害性

図-19 に凍結融解のサイクル数と相対動弾性係数の関係を、図-20 に凍結融解のサイクル数と質量減少量の関係を示す。普通コンクリートBB-Nの耐久性指数は、68であり、普通コンクリートとしてはかなり小さくなった。これは空気量が3.2%と小さめであったことが影響しているものと考えられる。BB-R1, BB-R2は4.5%前後の空気量を連行することにより、耐久性指数は60を上回り、一応の耐凍害性を示した。しかし、BB-R4は30サイクルにおける最初の測定時点での耐久性指数が60を下回り、耐凍害性に劣る結果となった。再生コンクリートの耐凍害性については、原コンクリートの空気量が少ない、すなわち再生骨材の付着モルタル分に適当な空気量が混入されていない場合には、新たに練り混ぜられるモルタルの水セメント比や空気量によって耐凍害性を大きく改善できないという報告<sup>13)</sup>もあり、BB-R4が耐凍害性に劣る結果となったのは、吸水率の大きい再生細・粗骨材の付着モルタルの量およびその性質によるものと考えられる。

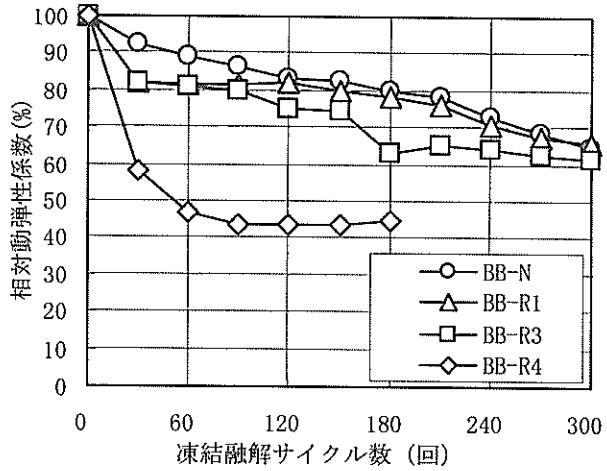


図-19 凍結融解試験結果

(サイクル数と相対動弾性係数の関係)

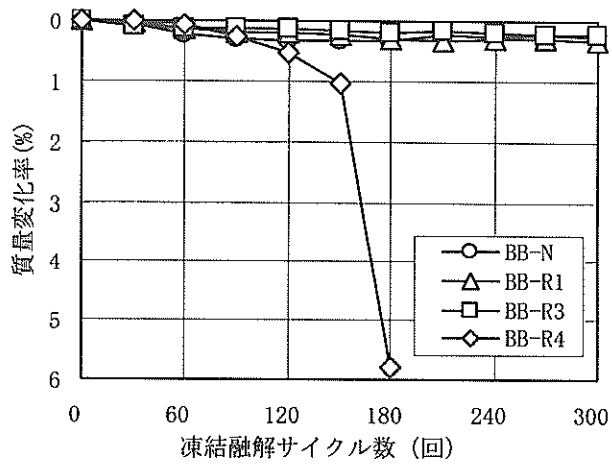


図-20 凍結融解試験結果

(サイクル数と質量減少率の関係)

(6) 中性化

図-21 に暴露28および91日における各コンクリートの中性化深さを示す。BB-R1, BB-R2は普通コンクリートとほぼ同等の中性化深さであったが、BB-R3, BB-R4は中性化の進行が早い結果となった。ここで、BB-R1, BB-R2とBB-R3は、粗骨材の種類が同じで細骨材の種類のみ変化したものであるから、圧縮強度や静弾性係数には大きな影響を与えなかった細骨材の品質の影響が大きい結果となった。また再生細骨材のうち全量または50%を普通細骨材と置換したコンクリートBB-R1, BB-R2については、普通コンクリートと同等であり、再生細骨材を使用する場合であっても、普通細骨材を適度に混合することにより中性化に対する抵抗性を改善できることが示された。

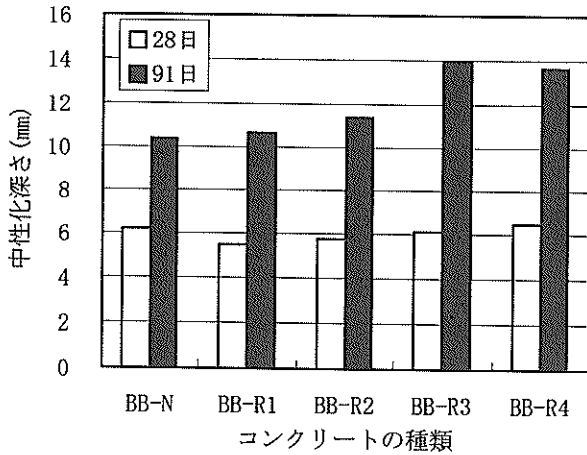


図-21 各コンクリートの中性化深さ

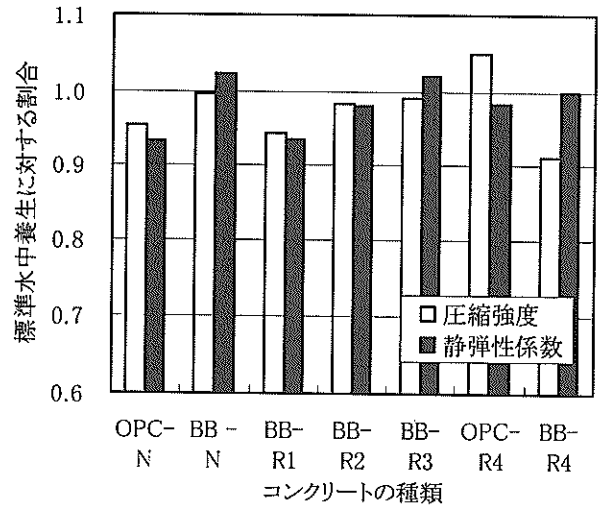


図-22 強度特性に及ぼす 20°C海水暴露の影響

### 3.2 海洋環境下での再生コンクリートの耐久性

#### (1) 強度特性に対する海水の影響

図-22、図-23 は、20°C海水、飛沫帯に材齢 182 日までそれぞれ暴露した場合の圧縮強度および静弾性係数を標準水中養生した場合の圧縮強度および静弾性係数に対する比率で示したものである。

20°C海水暴露した場合の圧縮強度比および静弾性係数比は 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および静弾性係数比は 1.0 前後であり、20°C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や静弾性係数に影響を及ぼすまでには至っていないものと考えられる。このため実際の海洋環境下における強度特性に関しては、今後も引き続き暴露試験を実施してデータを蓄積していく必要がある。

図-24 に劣化促進を目的として実施した 60°C海水に暴露した場合の圧縮強度および静弾性係数について示す。60°C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 (OPC-N, OPC-R4) の圧縮強度比は 0.7 前後であり、標準水中に対して大きく強度低下していた。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 (OPC-N, BB-N) の圧縮強度比は 0.73~0.92 であり、いずれも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。ただし、再生コンクリートの中では、吸水率の大きい再生細・粗骨材

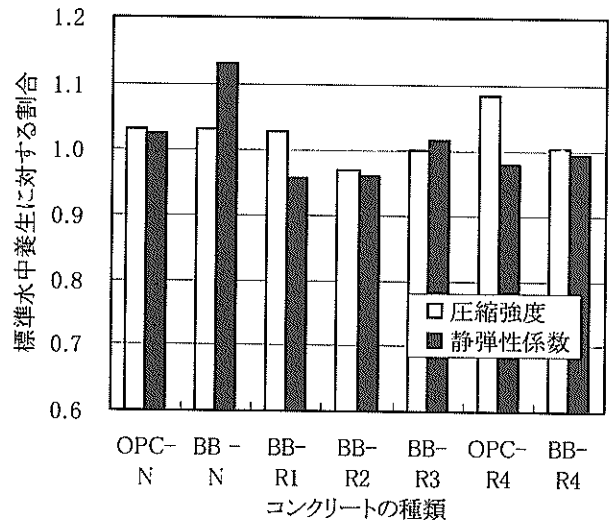


図-23 強度特性に及ぼす飛沫暴露の影響

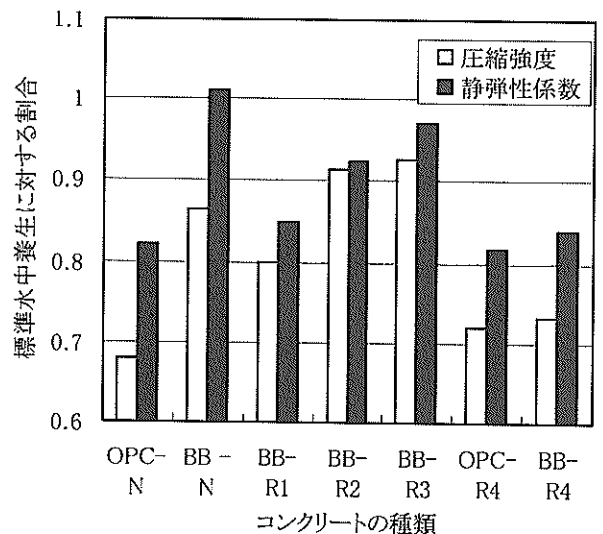


図-24 強度特性に及ぼす 60°C海水暴露の影響

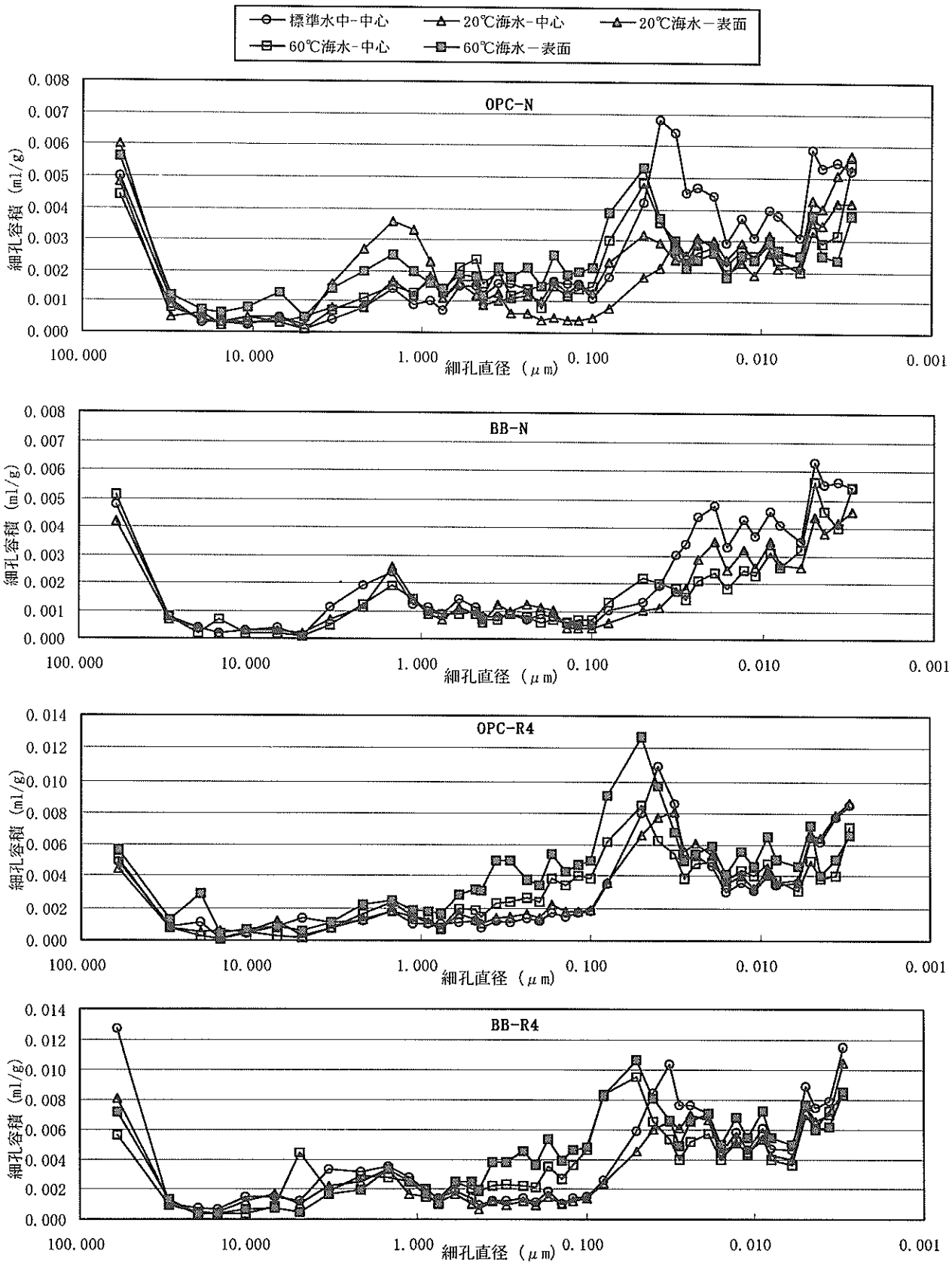


図-25 各条件に暴露した供試体の中心部および表面部の細孔径分布

を用いた BB-R4 の低下率が普通ポルトランドセメントを用いた場合と同程度であった。また各コンクリートの静弾性係数の低下傾向は、圧縮強度の場合とほぼ同様であったが、低下率は 0.82~1.1 程度であり圧縮強度の低下率より小さくなった。

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。図-25 に圧縮強度試験終了後の各コンクリート供試体 (OPC-N, BB-N, OPC-R4, BB-R4) の中央部および表面部から採取した試料の細孔径分布を示す。内川らによると、モルタルの強度は  $0.05 \sim 2 \mu\text{m}$  および  $30 \mu\text{m}$  以上の比較的大きな細孔容積と強い相関があるとしている。表-9, 表-10 に各条件に暴露した供試体の全細孔容積および  $0.04 \mu\text{m}$  以上の細孔容積をそれぞれ示す。強度低下率の大きい  $60^\circ\text{C}$  海水養生に暴露した OPC-N, OPC-R4 および BB-R4 の  $0.04 \mu\text{m}$  以上の細孔容積が標準水中養生した場合より大きくなっている。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くなっている。これは海水より供給される NaCl や  $\text{MgCl}_2$  とセメント水和物である  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  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ことによると考えられる。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ものと考えられる。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は、骨材の影響が卓越することにより、高炉セメントを使用した場合の耐海水性の改善効果が小さかったものと考えられる。

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、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コンクリートを適用することは、再生コンクリートにおいても十分効果的であることが示された。

表-9 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-10  $0.04 \mu\text{m}$  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

## (2) 塩化物イオン拡散性状

図-26 に急速塩化物透過性試験結果である通電時間と積算電流量の関係および AASHTO の判定基準による判定結果を示す。OPC-R4 は、通過電流量が大きくジュール熱の発生によって溶液の温度が上昇し、試験開始後約 3 時間で溶液温度が  $80^\circ\text{C}$  を超えたため、この時点で試験を終了した。高炉セメントの使用によって、普通・再生コンクリートとも 6 時間通過電流量は大きく減少した。OPC-R4, BB-R4 を除いて、再生コンクリートの 6 時間通過電流量は 1500~2000 クーロン程度で判定結果「Low」であり、OPC-N の判定結果である「Moderate」より塩化物イオン透過抵抗性に優れているという結果となった。

急速塩化物イオン透過性試験は、コンクリート中への塩化物イオンの拡散係数を直接評価する試験でないため、電気泳動による拡散係数の評価試験も実施した。この試験により得られたコンクリートの見かけの拡散係数を図-27 に示す。また、一部の供試体については、 $20^\circ\text{C}$  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 種の使用によって塩化物イオンの拡散性状を大幅に改善できることが示された。

電気泳動による試験結果と急速塩化物イオン透過性試験結果との関係は概ね良好であった。しかし、普通コンクリート OPC-N, BB-N と再生コンクリート OPC-R4, BB-R4 の 6 時間通過電流量の関係は、電気泳動によって求めた見かけの拡散係数の大小関係と異なる結果になった。急速塩化物イオン透過性試験はコンクリートの電氣的抵抗に支配される通過電流量によって評価する試験である。このため吸水率の大きい再生細・粗骨材を使用したような電氣的抵抗の小さい再生コンクリートの塩化物イオン

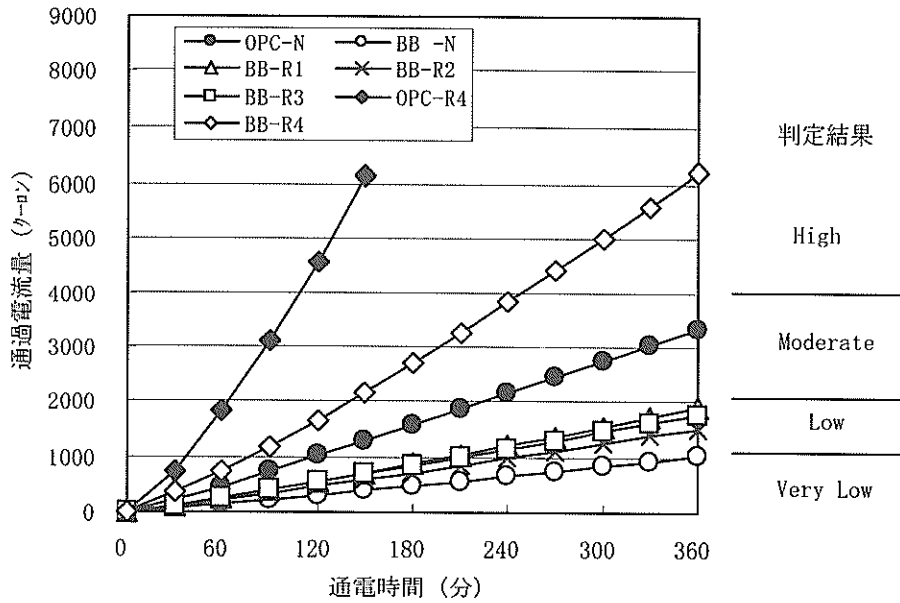


図-26 急速塩化物イオン透過性試験結果

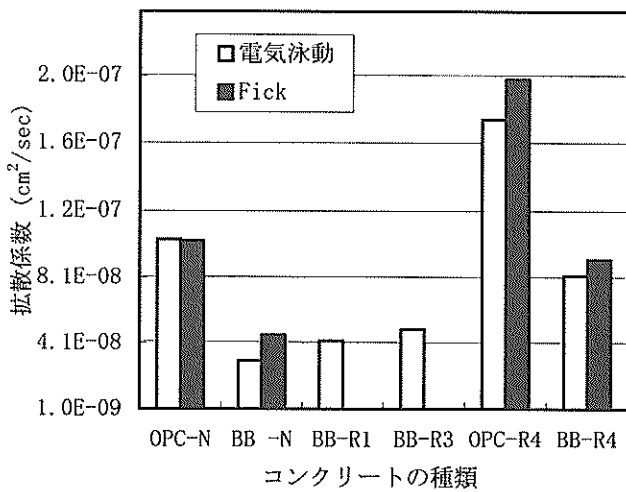


図-27 塩化物イオンの拡散係数

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 μm 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<sup>1)</sup>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

透過性を評価する際は、過小評価する場合があることが示された。

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、塩化物イオンの拡散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-28、図-29 に上述の試験に用いたコンクリートと同様に材齢 182 日まで標準水中養生した供試体の中心部より採取した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

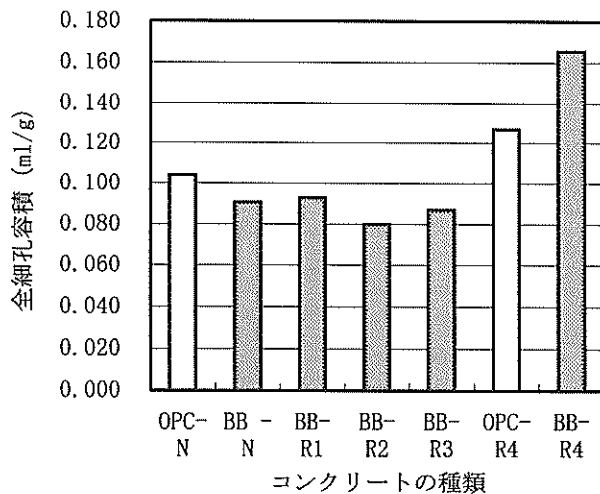


図-28 コンクリート中の細孔容積

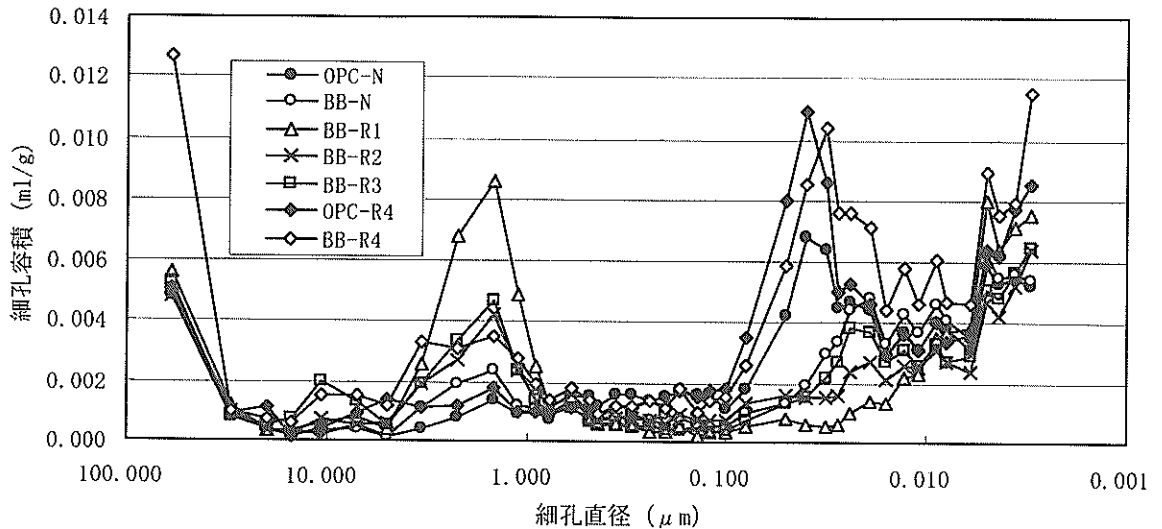


図-29 細孔径分布 (標準水中養生, 材齢182日)

一致している。したがって、高炉セメントを用いた再生コンクリートの細孔径分布は、塩化物イオン拡散係数を小さくする一要因であるものと考えられる。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であると考えられる。

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  $10\mu\text{m}$  程度の水酸化カルシウムの脆弱層があることが知られている<sup>15)</sup>。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<sup>16)</sup>。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、骨材とペースト間の遷移帯、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 について電子顕微鏡観察および EPMA による面分析を実施した。写真-1 に電子顕微鏡観察結果を、写真-2 に EPMA の面分析による Ca の同定結果を示す。EPMA の測定結果は、酸化物の形で元素を同定するため CaO 表示となっているが、骨材界面にある高濃度の Ca は  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  であると考えられ、遷移帯であるものと推察される。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る。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  $5\text{mm}$  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る。このため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) 耐摩耗性

図-30 に各コンクリートのすり減り係数を示す。すり減り係数はその値が小さいほど耐摩耗性に優れていることになる。再生コンクリートのすり減り係数は、OPC-R4, BB-R4 を除いて概ね普通コンクリートと同等であった。また、OPC-R4 と BB-R4 は同等な値を示し、セメントの種類による影響は認められなかった。

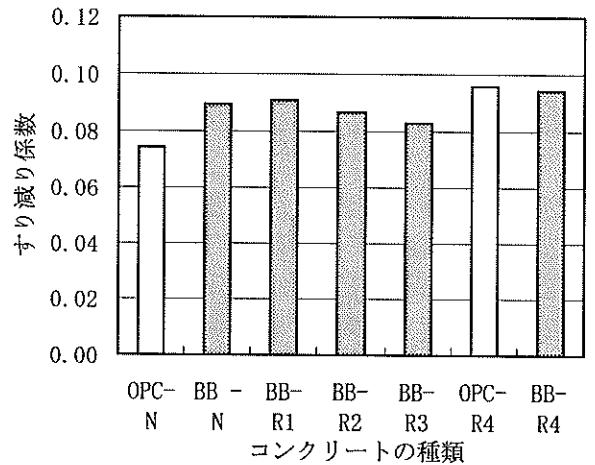


図-30 各コンクリートのすり減り係数

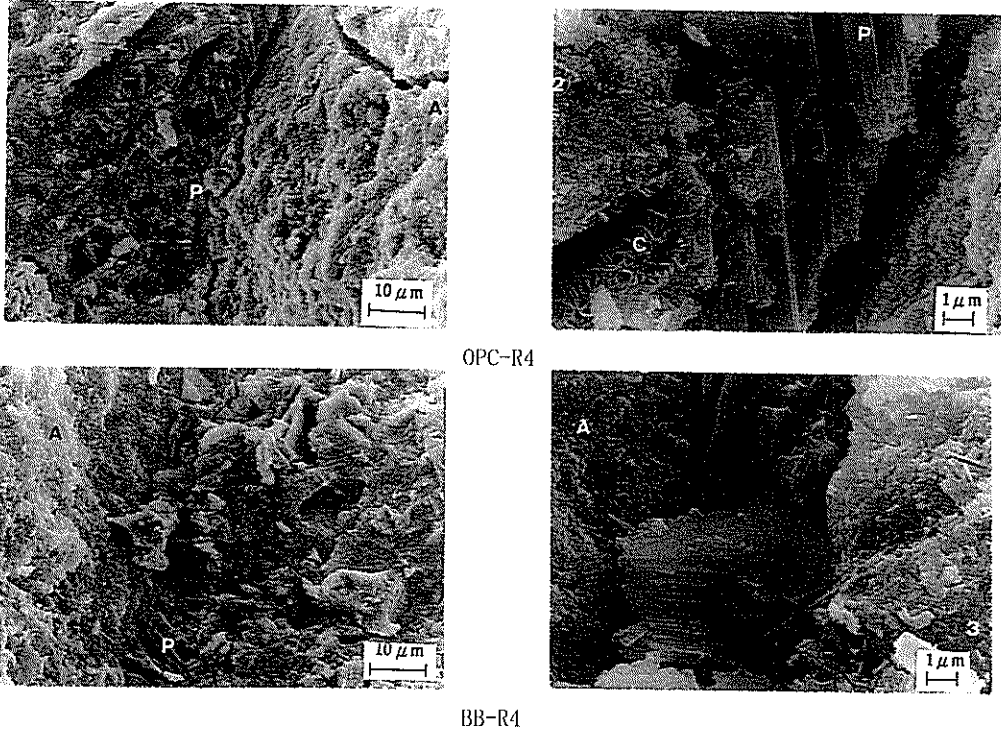


写真-1 電子顕微鏡観察結果

(P: 水酸化カルシウム (遷移体), 2: C-S-H Type II, C: カルシウムアルミネート水和物, A: 骨材)

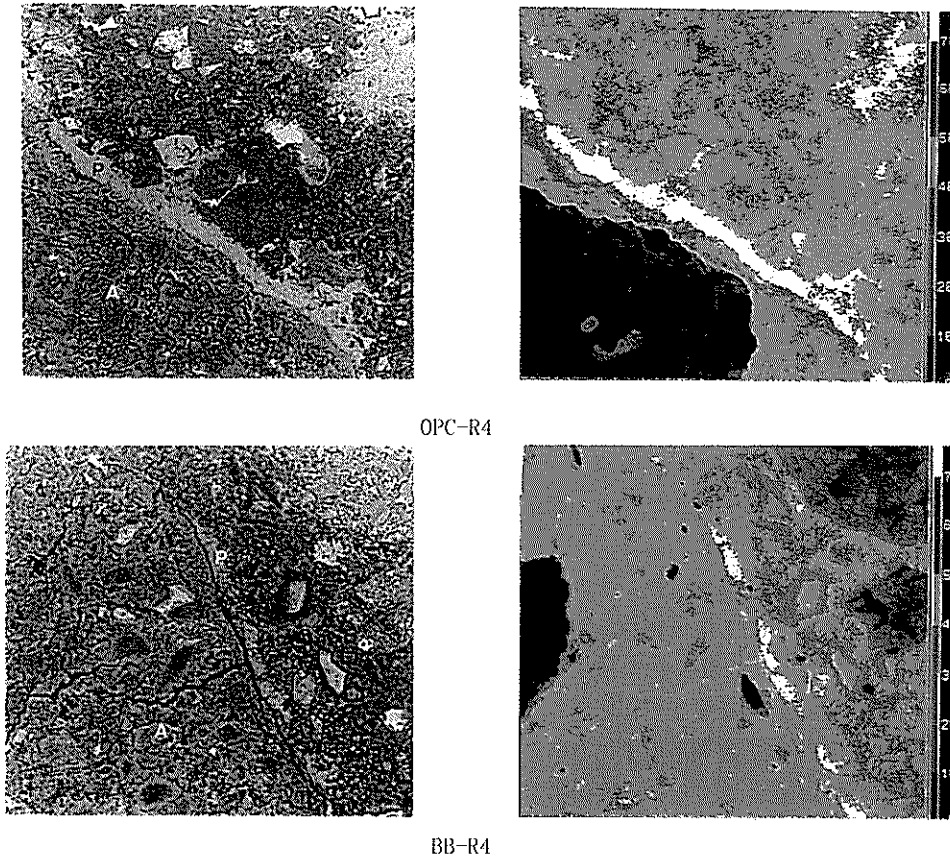


写真-2 EPMMA面分析結果

(P: 水酸化カルシウム (遷移体), A: 骨材)



図-31 に圧縮強度とすり減り係数の関係を示す。図中には既往の研究によるデータ<sup>2)</sup>(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)もあわせて示している。今回得られたデータは若干ばらついているものの、すり減り係数は概ね圧縮強度と相関関係にある。したがって、一般に言われているように、耐摩耗性は強度に依存し、またセメントの種類をほとんど受けないという知見<sup>3)</sup>は、高炉セメントを用いた再生コンクリートの場合にも同様であることが確認された。

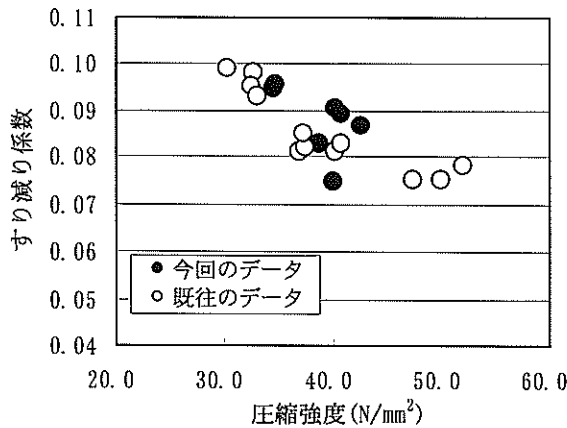


図-31 圧縮強度とすり減り係数の関係

### 3.3 コンクリート中の鉄筋の防食性

#### (1) コンクリート中の塩化物イオン含有量および鉄筋の表面観察

図-32 に飛沫帯に暴露した場合のコンクリート中の塩化物イオン含有量を示す。この測定値により得られた拡散係数、および暴露開始前に測定した初期塩化物イオン含有量を表-11 に示す。再生コンクリート表面部の塩化物イオン含有量は、普通コンクリートより大きくなった。またこの大きさは、再生骨材の品質の低下に伴い大きくなっている。しかし、1.5cm より内部の再生コンクリートの塩化物イオン含有量は、BB-N よりは大きいものの、すべてのコンクリートにおいて OPC-N より概ね小さくなった。これらの測定値から計算した拡散係数は、概ね 3.2 で検討した拡散係数と同様の大小関係を示している。すなわち、乾湿の影響を受ける実際の海洋環境下においても、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の浸透性は、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同等かそれ以下であった。また、初期の塩化物イオン含有量はフレッシュコンクリート時の塩化物イオン量の規制値 0.013wt% (0.3kg/m<sup>3</sup>) 以下であ

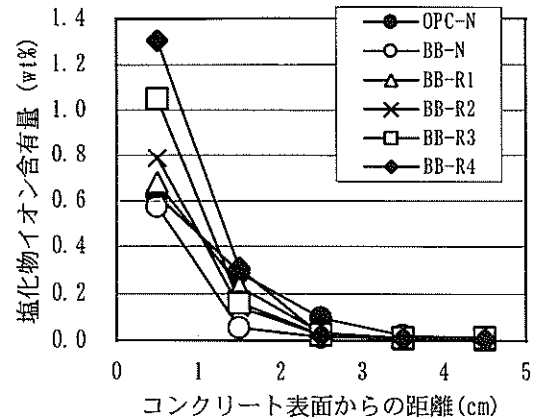


図-32 コンクリート内部の塩化物イオン含有量 (飛沫帯暴露)

表-11 初期塩分量および拡散係数

	初期塩分量 wt%	付着量 wt%/cm <sup>2</sup> sec	拡散係数 cm <sup>2</sup> /sec
OPC-N	0.0150	7.68E-08	1.28E-07
BB-N	0.0155	5.22E-08	2.35E-08
BB-R1	0.0070	7.41E-08	7.99E-08
BB-R2	0.0100	7.58E-08	4.25E-08
BB-R3	0.0110	1.00E-07	3.76E-08
BB-R4	0.0050	1.32E-07	5.46E-08

り、今回使用した再生骨材には問題となる塩化物イオンが混入していなかったものと考えられる。

埋設鉄筋位置であるコンクリート表面から 1 および 2cm の塩化物イオン含有量は、鉄筋の腐食発生濃度とされる 0.1wt% を上回っているものもあったが、実際に割裂して鉄筋を取り出し表面観察を行った結果、すべての試験体で腐食は認められなかった。コンクリート内部の鉄筋の腐食は、塩化物イオンが腐食発生濃度に達した後、鉄筋表面への酸素供給量に支配されて進行するが、本実験においては、この腐食進行期間が短かったため腐食が観察されなかったものと考えられる。このため、実際の鉄筋の腐食に関しては今後も引き続き暴露実験を実施していく必要がある。

#### (2) 鉄筋の表面状態の判定

図-33 に交流インピーダンス法によって測定した見かけの分極抵抗を示す。図中に動電位分極曲線により判定した鉄筋表面の不動態のゲレド<sup>4)</sup>もあわせて記す。ここで鉄筋の腐食速度は分極抵抗の逆数に比例するので、見かけの分極抵抗が大きいほど鉄筋の腐食速度は小さいこと

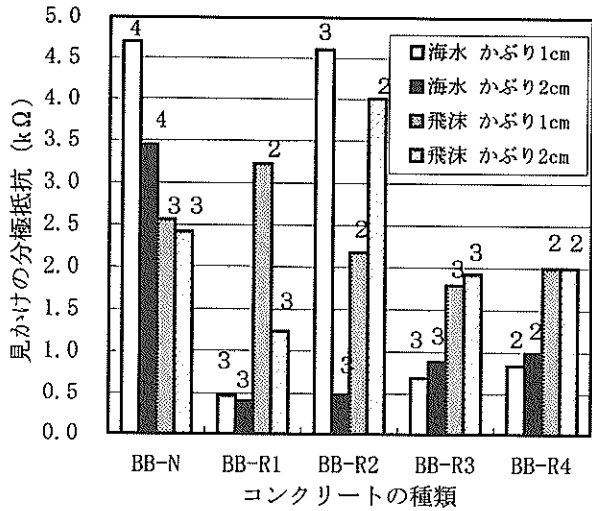


図-33 各コンクリートの見かけの分極抵抗および不動態のグレード

になる。見かけの分極抵抗は、再生コンクリートで小さいという大まかな傾向であるが、データのばらつきが大きく顕著な差異は認められなかった。また見かけの分極抵抗から算出した鉄筋の腐食速度<sup>9)</sup>は  $2.0 \sim 6.6 \times 10^{-3} \text{ mm/year}$  と非常に小さい範囲にあった。したがって暴露開始より5ヶ月の時点では鉄筋の腐食速度はコンクリートの種類によらず同程度であると考えられる。しかし動電位分極曲線によって判定した不動態のグレードは BB-R4 で2となり、低品質な再生細・粗骨材を使用した場合には高炉セメントを用いた場合であっても鉄筋の防食性能が劣る結果であった。また、図-34 に示すように、不動態のグレードは鉄筋位置での塩化物イオン含有量の測定結果と対応しており、塩化物イオンによる不動態皮膜

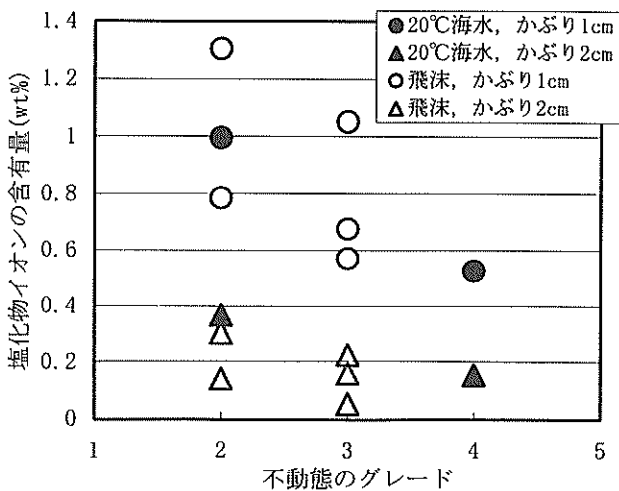


図-34 不動態のグレードと塩化物イオン含有量の関係

の破壊状態を判定できているものと思われる。

図-35 に交流インピーダンス法によって得られたコンクリート抵抗を示す。一般的には、コンクリートの電抵抗が大きいほどコンクリートは密実であり、鉄筋の防食上有利である。コンクリート抵抗は BB-N で最も大きく  $800 \Omega$  程度の値を示したのに対し、BB-R1, BB-R2, BB-R3 で  $400 \Omega$  程度、BB-R4 で  $250 \Omega$  程度と骨材品質の低下とともに小さくなった。また、交流インピーダンス法によって得られたコンクリート抵抗の大小関係は、急速塩化物イオン透過性試験の6時間通過電流量の関係と一致していた。

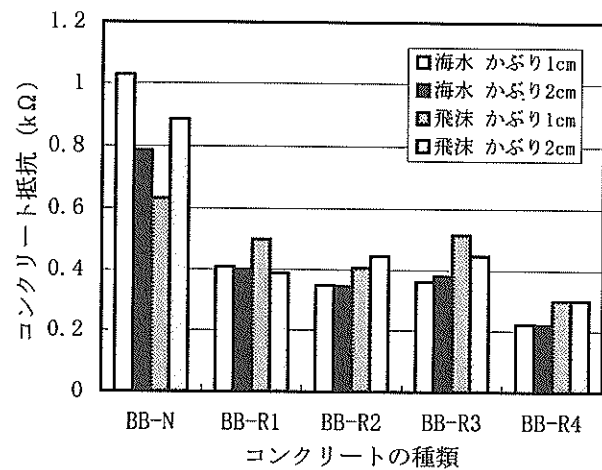


図-35 各コンクリートのコンクリート抵抗

### (3) 鉄筋表面への酸素の拡散性

図-36 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、 $0.09 \mu\text{A/cm}^2$  であったのに対し、再生コンクリートは  $0.18 \sim 0.25 \mu\text{A/cm}^2$  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

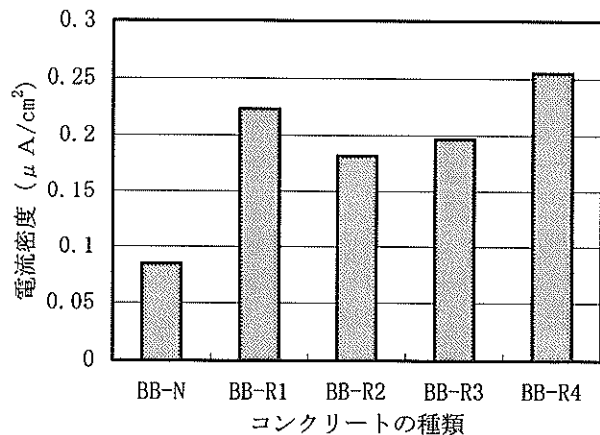


図-36 定電位ステップ法の測定結果

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腐食速度は再生コンクリートの場合、速く進行するものと考えられる。

#### (4) 鉄筋の防食性能に関する総合的考察

塩化物イオンの測定結果および電気化学的計測による鉄筋の表面状態の判定により、再生コンクリートの種類Ⅲに相当する OPC-R4, BB-R4 以外の再生コンクリートの塩化物イオン浸透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同程度であり、鉄筋腐食発生までに要する期間は普通ポルトランドセメントを使用した普通コンクリートと同等であると考えられる。しかし、その後の腐食進行速度は鉄筋表面への酸素供給量に律速されることから、再生コンクリートでは、普通コンクリートより早く腐食する可能性があることを示した。

しかし、これらの結果は電気化学的手法によってコンクリート中の鉄筋腐食の潜在性を評価したものであり、本実験の実環境への暴露期間は5ヶ月間と短く実際に鉄筋の腐食状況に有意な差を生じさせるには十分でなかった。したがって、再生コンクリート中の鉄筋の防食性状については、長期の暴露試験によるデータを蓄積していく必要があるものと考えられる。

## 4. 結論

耐海水性に優れる高炉セメント B 種を用いた再生コンクリートの各種耐久性評価を目的として行った一連の試験結果により、以下のことが明らかとなった。

- (1) 再生コンクリートは、普通コンクリートと同等のスランプを得るために単位水量を増加する必要があるが、高炉セメント B 種を用いることにより、単位水量を 3kg 小さくできた。
- (2) 高炉セメント B 種を用いた再生コンクリートの材齢 28 日の圧縮強度は、普通ポルトランドセメントを用いた再生コンクリートより 6%程度小さいものの、材齢 91 日以降では同等であった。
- (3) 再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは、骨材品質の低下とともに大きくなり、乾燥日数 182 日において、 $610\sim 820\mu$ であった。
- (4) 再生コンクリートの種類Ⅰ,Ⅱに相当する再生コンクリートの耐凍害性は、凍結融解試験の耐久性指数が 60 を上回り、ある程度確保することができた。しかし、再生コンクリートの種類Ⅲに相当する再生コンクリートでは耐凍害性を示さなかった。
- (5) 再生コンクリートの中性化は普通コンクリートより

大きくなる傾向にあるが、細骨材の一部もしくは全量を普通細骨材で置換することにより、中性化の進行を抑制することができた。

- (6) 耐海水性の検討のために行った 60℃海水による促進劣化試験の結果、高炉セメント B 種を用いた再生コンクリートの圧縮強度の低下率は、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートより小さかった。
- (7) 再生コンクリートの塩化物イオン拡散係数は、高炉セメント B 種を用いることにより  $3.0\times 10^{-8}\sim 8.0\times 10^{-8}$   $\text{cm}^2/\text{sec}$  となり、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリート ( $1.0\times 10^{-8}$   $\text{cm}^2/\text{sec}$ ) より小さくなった。
- (8) 再生コンクリートの電気抵抗は、骨材品質の影響を受け、普通コンクリートより小さくなり、200~400Ω程度であった。
- (9) 定電位ステップ法によって鉄筋表面への酸素供給量を評価した結果、再生コンクリートの酸素拡散性状は、普通コンクリートより大きくなった。

以上のように、再生コンクリートの耐久性は、使用する再生骨材の品質の影響を大きく受け、品質低下に伴い十分な耐久性が得られない場合がある。しかし高炉セメント B 種を用いた再生コンクリートの種類Ⅰに相当する再生コンクリートでは、塩化物イオン拡散性状の検討結果から鉄筋コンクリート構造物へ適用できる可能性がある。また再生コンクリートの種類Ⅲに相当する再生コンクリートでも耐海水性などのある程度の耐久性を確保できることから、凍害を受けない地域での無筋コンクリートへの使用などは十分可能であると思われる。このように骨材品質に応じて使用用途を限定すれば、その使用部位に応じた港湾構造物に要求される耐久性を十分確保することができるものと考えられる。

## 5. あとがき

本研究は、再生コンクリートを港湾構造物へ使用していく場合の基礎資料を得ることを目的に、海洋環境下における再生コンクリートの耐久性に関する検討を行ったものであり、本文は長期暴露試験のうち材齢 6ヶ月までの試験結果についてとりまとめたものである。耐海水性については劣化促進試験により、鉄筋の防食性については電気化学的手法による評価試験を行い、再生コンクリートの性質を明らかにした。今後は、実際の海洋環境下における長期暴露試験を引き続き実施してデータを蓄積していく予定である。

最後に、実験の実施にあたり庫本知香さん（九州工業

大学), 三栖幸彦君 (東京都立大学), 五十嵐麻子さんにご協力頂きました。また本報告のとりまとめに際して阿部正美主任研究官, 渡辺弘子氏 (運輸施設整備事業団) にご指導を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

(2000年3月31日受付)

#### 参考文献

- 1) 田中 順, 福手 勤ほか: 再生骨材を使用したコンクリートの材料特性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第36巻, 第3号, 1997. 9, pp. 37-60
- 2) 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, pp. 149-171
- 3) 丸安隆和, 小林一輔, 阪本好史: 高炉セメントコンクリートの研究, 土木学会コンクリートライブラリー第25号, 1970. 4
- 4) 小林孝一, 中村士郎, 服部篤史, 宮川豊章: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート中の鉄筋の腐食性状について, 日本材料学会, Vol. 48, No. 8, 1999. 8, pp. 882-888
- 5) (財) 先端建設技術センター: リサイクル材料の利用調査報告書, (財) 先端建設技術センター, 1994
- 6) 関 博, 大友忠典: コンクリート技術選書 (海洋コンクリート・水中コンクリート), 山海堂, 1982, pp. 27-28
- 7) AASHTO Designation T-277: Standard method of test for rapid determination of the chloride permeability of concrete, 1983
- 8) 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, pp. 97-105
- 9) 横田 優: 鉄筋腐食診断器の開発, 電力土木 No. 257, 1995. 5, pp. 1-8
- 10) 大即信明: コンクリート中の鉄筋に及ぼす塩素の影響に関する研究, 港湾研究所報告, 第24巻, 第3号, 1985. 9, pp. 183-283
- 11) 大即信明, 濱田秀則, 原茂雅光: 各種補修を施したコンクリート梁の促進海水養生試験, 港湾研究所資料, No. 631, 1988. 9,
- 12) 横田 優: 塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の診断法の開発, 研究期報, No. 48, 四国電力, 1986. 12, pp. 44-58
- 13) 佐伯達彦, 長瀧重義, 横山貴光: 再生骨材の品質がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響, 第43回日本学会材料研究連合講演会, 1999. 9, pp. 29-30
- 14) 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
- 15) 内川 浩, 羽原 俊祐, 沢木大介: 硬化モルタルおよびコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, 第4巻第2号, 1993. 7, pp. 1-8
- 16) 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