

# 転炉スラグ・石膏・セメント・海水混合系で製造した ポーラスコンクリートの性質

PROPERTIES OF POROUS CONCRETE USED BY CONVERTER SLAG-GYPSUM-CEMENT-SEA WATER SYSTEM

玉井元治\*・小西弘章\*\*・吉田宗久\*\*\*

by Motoharu TAMAI, Hiroaki KONISHI and Munehisa YOSHIDA

## 1. はじめに

### 1. 1 研究背景

近年、我が国の沿岸海域において磯焼けや乱獲により魚介類の水揚げが急減している。これは、経済の高度成長期に、山岳域の広葉樹の伐採や多目的ダムの建設により、河川を通じて栄養分が海に流入しなくなった点、および干潟や浅瀬の埋め立てが急速に増加したことに起因していると考えられている。これらは藻場の消失のみならず、海生生物の環境や生態系を破壊し、生物多様性への影響が懸念されている。これらの状況から、過去に見られたような生物多様性の回復を目指し、周辺海域の環境保全と整備を推進することが重要である。

ポーラスコンクリート (PoC: Porous Concrete) は、内部に連続空隙を有することから生物の生息空間を確保することができる生物共生型の建設材料である。既に、陸上や河川護岸への適用が積極的に進められ実用化されている<sup>1)</sup>。また、PoCを沿岸域に適用すると、海生生物の生育環境を新たに保全・創造するための基質材料として有効であるとの研究報告がなされている<sup>2~3)</sup>。さらに、肥料成分によって栄養強化したPoCを海中に設置すると、早期に藻場の育成が可能となることが報告されている<sup>4)</sup>。我が国の沿岸環境を取り巻く状況を考えると、海岸域の環境創造への利用が期待される。

### 1. 2 研究目的

本研究のコンセプトは資源循環型社会の構築と海洋の多様性生物を修復・創造することである。リサイクル材料を活用して、海域における生態系の基礎となる藻場の修復と生息領域を拡張させることを目

的としている。

本研究では潜在水硬性を有する転炉スラグと、その刺激剤となるセメント・石膏および海水(練り混ぜ水)の混合系<sup>5)</sup>で製造したPoCの藻場造成基質としての性質について検討した。

## 2. 実験概要と使用材料

転炉スラグ・石膏・セメント・海水混合系で製造したPoCの藻場造成材料としての有効性を検討するため、3つの試験を実施した。試験に使用した材料を表1に示す。また、転炉スラグの潜在水硬性を發揮させるための刺激剤として練り混ぜ水に人工海水を使用する。使用した人工海水の組成を表2に示す。

①圧縮強度試験：転炉スラグ・石膏・セメント・海水混合系の強度特性を耐久性も含め明らかにするため、長期間海中に沈漬した供試体の一軸圧縮強度を測定した。

②溶出試験：藻類の生育に必要な各種栄養素のうち転炉スラグに含有する鉄成分について、長期間海中に沈漬した供試体からの溶出量を測定した。また、PoCから遊離石灰が溶出するとされているため、周辺環境への影響を調査する目的で、水素イ

表1 使用材料

種類	記号	詳細	密度(g/cm <sup>3</sup> )
結合材	CB	高炉セメントB種	3.04
	Gy	二水石膏	2.32
	G-5	5号(13~20mm) 碎石	2.68
粗骨材	G-6	6号(5~13mm) 碎石	2.68
	Ir-6	6号鉄鉱石	4.79
	BS-5	5号転炉スラグ	3.58
細骨材	SS	7号珪砂	2.70
混和材	SF	シリカフューム	2.30
混和剤	SP	高性能AE減水剤	1.00
練混ぜ水	SW	人工海水	1.00
肥料	F	粒状肥料*	1.40

\*近畿大学教授 理工学部社会環境工学科

(〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)、

\*\*近畿大学大学院総合理工学研究科博士前期課程、

\*\*\*奥村組土木興業(株)技術部技術開発課

表2 人工海水の組成

イオン	含有率(g/l)	溶存率(%)
Cl	15.17	55.02
Na	8.54	30.98
SO <sub>4</sub>	2.09	7.58
Mg	0.99	3.59
K	0.3	1.09
Ca	0.25	0.91
HCO <sub>3</sub>	0.12	0.44
Br	0.05	0.18
BO <sub>3</sub>	0.05	0.18
Sr	0.01	0.04
計	27.57	

オン濃度(pH)とカルシウムイオン(Caイオン)についても溶出量を測定した。

③附着動植物相観察試験：転炉スラグ・石膏・セメント・海水混合系で製造したPoC供試体を長期間海中に沈漬し、表面に附着した海藻類を主とした生物種とその量を確認した。

3. 圧縮強度試験

3.1 試験方法および配合

表3に示すように、粗骨材ならびに結合材への石膏混入率の異なる6種類の配合で、φ125×250mmのPoC円柱供試体を製作した。28日湿潤養生した後、大阪府泉南郡岬町にある大阪府立水産試験場に隣接した海中に沈漬した。沈漬期間0、30、60、120日ごとに供試体を引き上げ、一軸圧縮強度を測定した。

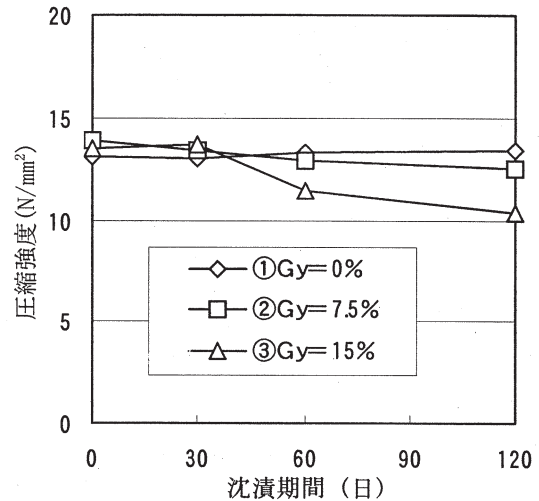
3.2 試験結果および考察

一軸圧縮強度と沈漬期間の関係を図1に示す。

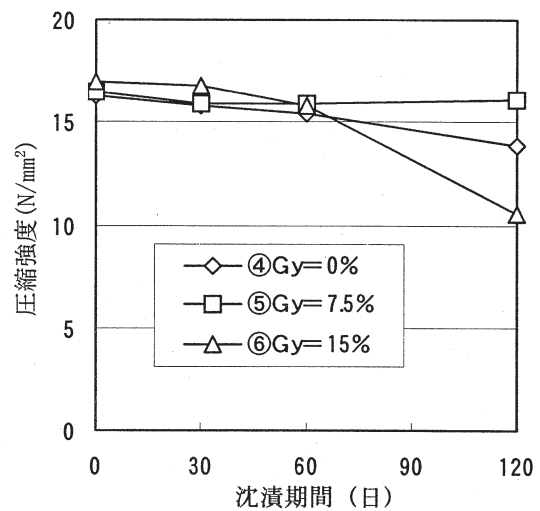
高炉セメントを使用したにも拘わらず、海中に沈漬後の強度に比べ沈漬前の強度(材令28日強度)は高くなった。これは、人工海水を練り混ぜ水に利用したため各種塩類(NaCl、MgCl<sub>2</sub>、MgSO<sub>4</sub>など)と結合材の反応によるものと考えられる。

粗骨材に碎石を使用したPoCと転炉スラグを使用したPoCを比較すると、転炉スラグを使用した配合が、沈漬期間120日のGy=15%の強度を除いて、碎

石を使用したものより強度が大きい傾向が見られた。これは、転炉スラグがGehlenite(2CaO・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・SiO<sub>2</sub>・8H<sub>2</sub>O)やMakelmannite(2CaO・MgO・2SiO<sub>2</sub>・8H<sub>2</sub>O)を含み、碎石より潜在水硬性があることや、骨材自体が強硬であるためと思われる。また、粗骨材に転炉スラグを用いた場合のGy=7.5%の配合では、Gy=0%の強度を上回ることから、転炉スラグはセメントおよび石膏の相互反応によって、潜



(a)粗骨材に碎石を用いた場合



(b)粗骨材に転炉スラグを用いた場合

図1 圧縮強度と沈漬期間の関係

表3 PoCの圧縮強度試験の配合表

配合	Gy/X (%)	粗骨材	実積率 (%)	充填率 (%)	SW/X (%)	SS/X (%)	F/X (%)	1m <sup>3</sup> 当りの構成重量					
								CB(kg)	Gy(kg)	SS(kg)	SW(kg)	G(kg)	BS(kg)
①	0							183	0.0	183	64.2	1648	0
②	7.5	G-5	61.47					168	13.7	182	63.7	1648	0
③	15			50	35	100	0	154	27.1	181	63.3	1648	0
④	0							211	0.0	211	73.9	0	1991
⑤	7.5	BS-5	55.63					194	15.7	210	73.4	0	1991
⑥	15							177	31.2	208	72.9	0	1991

※実積率・充填率は体積の割合、X=CB+Gy

在水硬性を発揮し、高強度化したと推測される。また、粗骨材に転炉スラグを使用した配合のうち Gy=15%では、石膏と置換されたセメントの減量と Etringite( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ )の生成による結合材の膨張量の増加が強度低下に繋がったと考えられる<sup>5)</sup>。

骨材に碎石を用いた場合、沈漬期間 120 日では石膏を多く混入した配合ほど低強度となった。この要因としては、石膏は Ca 成分を含む物質であるため、余剰な石膏が多い配合ほど石膏は水中で溶解度は低い、 $Ca(OH)_2$  (水酸化カルシウム) と  $H_2SO_4$  (硫酸) に分離し、徐々に結合材の部分が多孔化し、強度低下を起こしたと思われる。さらに海水中では、各種塩類が存在するため、セメントの水和によって生成される  $Ca(OH)_2$  の溶出を速め、強度低下を助長したと考えられる。

以上の観点から、リサイクル材料である転炉スラグを粗骨材として、脱硫石膏と海水を潜在水硬性材の刺激剤とし、これらを用いた複合材は強度と耐久性の点から、有効利用できることを示した。その際、石膏の配合量は適量が存在し、配合量が多すぎる場合、強度低下することを明らかにした。

#### 4. 溶出試験

##### 4.1 試験方法および配合

表 4 に示す 3 種類の配合で  $\phi 125 \times 250$ mm の PoC 円柱供試体を製作した。28 日湿潤養生した後、圧縮強度試験と同様に、大阪府立水産試験場に隣接した海中に沈漬した。沈漬期間 0、30、60、120 日ごとに所定の供試体を引き上げ、一定温度 (20℃) の蒸留水 (100) に 7 日間浸した。供試体を浸した水の pH 値、T-Fe 値、Ca イオン値を測定した。pH 値は堀場製作所製の pH 測定器を用いて測定し、T-Fe 値、Ca イオン値の測定には HACH 社製多項目迅速水質分析計 (ODYSSEY DR/2500) を用いた。

##### 4.2 試験結果および考察

pH 値の試験結果を図 2 に示す。試験結果より、各配合における pH 値は、30 日程度までで急激に減少し、沈漬期間 120 日では 9.2~9.4 となった。また

供試体を沈めた海の pH 値は 8.3 前後であった。このことから、転炉スラグ・石膏・セメント・海水混合系で製造した PoC を海域に適用する場合、pH 値については環境への影響は少ないと考えられる。

次に、T-Fe 値の試験結果を図 3 に示す。各配合とも沈漬期間 120 日を経過しても、一定量の Fe の溶出が確認できた。このことから、転炉スラグを配合することで、藻類の必須ミネラルである鉄イオンの供給源として利用できると考える。

Ca イオン値の試験結果を図 4 に示す。試験結果より、Gy=15%の配合では、海中に沈漬した後の Ca イオンの溶出量が他の配合に比べ大きくなっている。

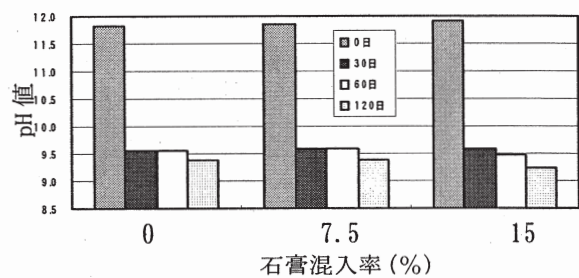


図 2 pH 値と石膏混入率の関係

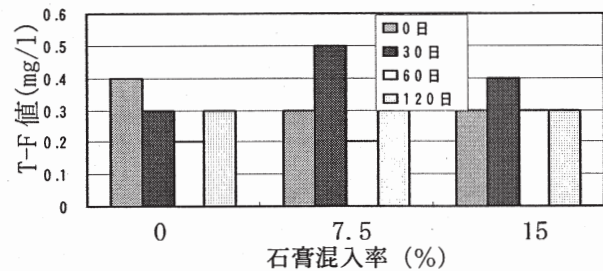


図 3 T-Fe 値と石膏混入率の関係

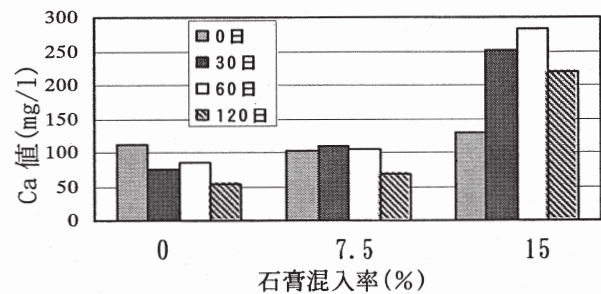


図 4 Ca イオン値と石膏混入率の関係

表 4 溶出試験の配合表

配合	Gy/X (%)	粗骨材	実積率 (%)	充填率 (%)	SW/X (%)	SS/X (%)	F/X (%)	1m <sup>3</sup> 当りの構成重量						
								CB(kg)	Gy(kg)	SS(kg)	SW(kg)	G(kg)	BS(kg)	F(kg)
⑦	0							186	0.0	186	65.1	0	1991	37.2
⑧	7.5	BS-5	55.63	50	35	100	20	171	13.9	185	64.7	0	1991	37.0
⑨	15							156	27.5	184	64.3	0	1991	36.7

※実積率・充填率は体積の割合、X=CB+Gy

圧縮強度の結果と合わせて遊離石灰の溶出について検討すると、次のようである。Ettringite は、CaOの濃度が低くなると、溶解度が低くなり、次第にMonosulfate( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ )に移行

するとされており、余分な石膏が生成される可能性がある<sup>5)</sup> Ettringite に取り込まれたものやスラグと反応しきれなくなった石膏のCa成分がCaイオンとして溶出したものと推測される。

表5 平板供試体の配合表

配合	Gy/X (%)	粗骨材比	実績率 (%)	充填率 (%)	SW/X (%)	SF/X (%)	F/X (%)	1 m <sup>2</sup> 当りの構成重量								
								CB(kg)	SF(kg)	Gy(kg)	SS(kg)	SW(kg)	G(kg)	BS(kg)	Ir(kg)	F(kg)
A		G-5	61.47	50	35	0		168	0	13.7	182	63.7	1648	0	0	0
B	7.5	G-6	60.28	55	30	5	0	190	10.0	15.4	215	64.6	1616	0	0	0
C		BS-5	55.63	50	35	0		194	0	15.7	210	73.4	0	1991	0	0
D		G-6 Jr-6=3:1	61.56	55	30	5	20	189	9.9	15.3	214	64.3	1216	0	724	42.8

※実績率・充填率は体積の割合、X=CB+Gy

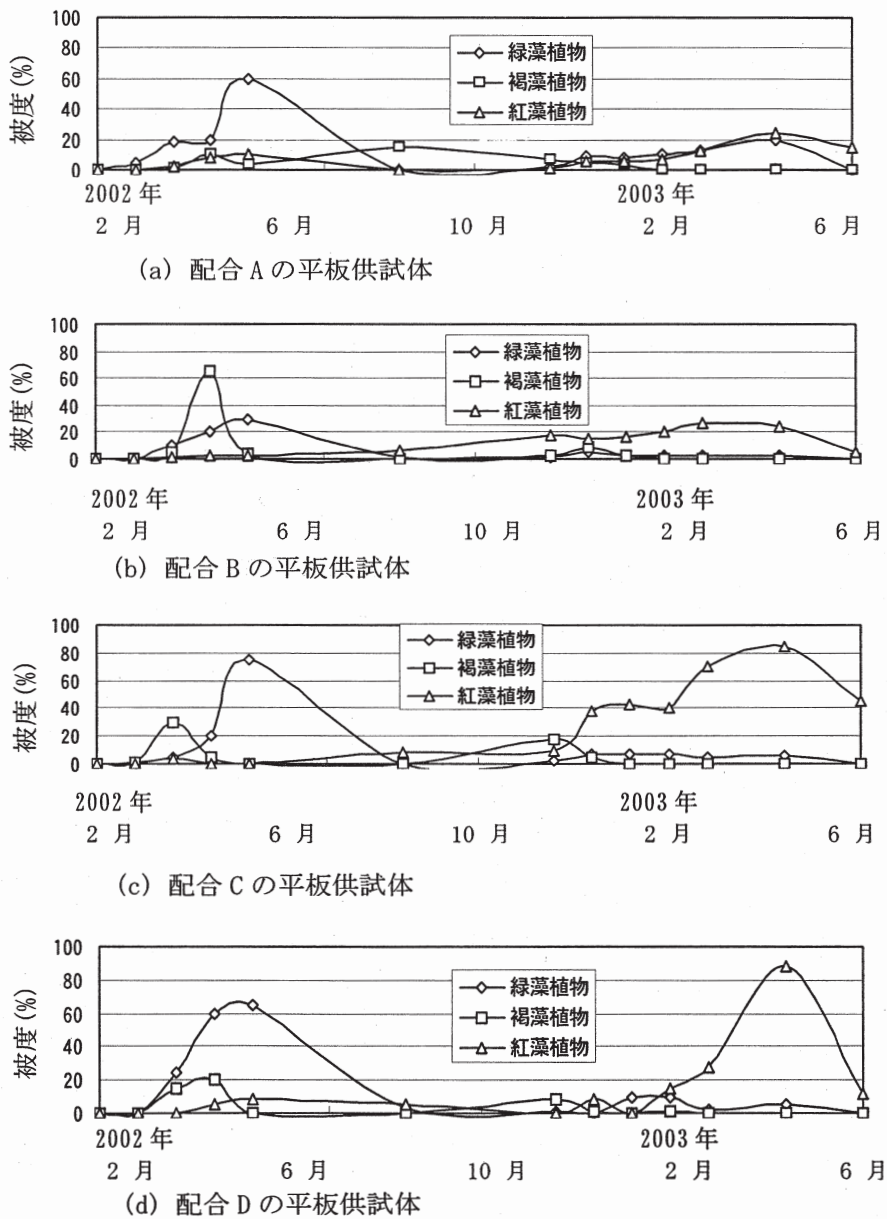


図5 平板供試体上面での海藻遷移

5. 付着動植物相観察試験<sup>7, 8)</sup>

## 5.1 試験方法および配合

表5に示す4種類の配合で500×500×100mmのPoC平板供試体を製作し、28日間湿潤養生した後、大阪府立水産試験場に隣接した水深2mの海中に沈漬した。粗骨材として碎石と転炉スラグのほかに鉄鉱石を用いた配合ケースを設けた。平板供試体の沈漬は2002年2月で、それ以後、2003年10月まで平板供試体を定期的に引き上げ、供試体表面への動植物の付着状況を目視で観察した。観測後は平板供試体を元の位置に沈漬した。

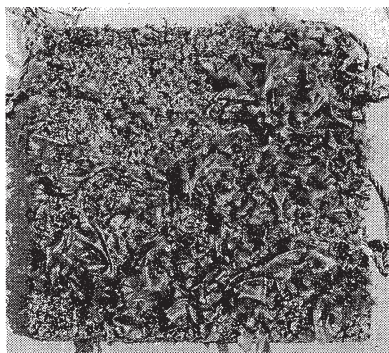
## 5.2 試験結果および考察

2年間の観察結果から平板供試体に着生した海藻の遷移を図5に示した。今回の試験では単年生の海藻の着生が観察され、着生海藻の遷移はいずれの配合でもほぼ同様の傾向が見られた。

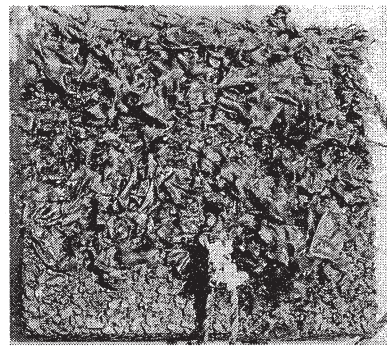
緑藻植物は2年間を通してアナアオサ(*Ulva pertusa*)が6月~8月にかけて成熟し、褐藻植物は1年目にはフクロノリ(*Colpomenia sinuosa*)が、2年目にはワカメ(*Undaria pinnatifida*)の着生が3月~6月にかけて確認できた。紅藻植物は1年目にカバノリ(*Cracilaria textorii*)がごくわ

表6 平板供試体上面で観測された付着動植物相<sup>7, 8)</sup>

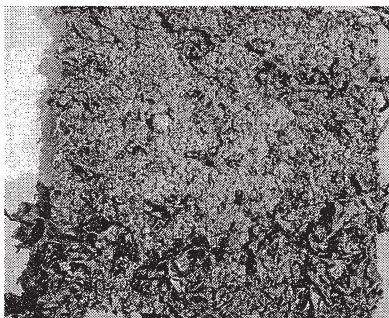
配合	植物相			動物相	
	個体名	全長(cm)	被度(%)	個体名	個体数
A	アナアオサ( <i>Ulva pertusa</i> )	10~20	60	イソヨコバサミ( <i>Clibanarius virscis</i> )	3
	カバノリ( <i>Cracilaria textorii</i> )	3~5	10	ニッポンモバヨコエビ( <i>Ampothoe lacertosa</i> )	3
	フクロノリ( <i>Colpomenia sinuosa</i> )	5	5未満		
B	アナアオサ( <i>Ulva pertusa</i> )	10~20	30	イソヨコバサミ( <i>Clibanarius virscis</i> )	7
	フクロノリ( <i>Colpomenia sinuosa</i> )	3	5未満	ワタズガニ( <i>Micippa thalia</i> )	3
	カバノリ( <i>Cracilaria textorii</i> )	3	5未満		
	ネバリモ( <i>Linnaeus</i> )	5	5未満		
C	アナアオサ( <i>Ulva pertusa</i> )	10~20	75	ヒザラガイ( <i>Acanthopleura japonica</i> )	30
	フクロノリ( <i>Colpomenia sinuosa</i> )	4	5未満	イソヨコバサミ( <i>Clibanarius virscis</i> )	2
	カバノリ( <i>Cracilaria textorii</i> )	2	5未満	ニッポンモバヨコエビ( <i>Ampothoe lacertosa</i> )	1
D	アナアオサ( <i>Ulva pertusa</i> )	10~20	65	ヒザラガイ( <i>Acanthopleura japonica</i> )	30
	カバノリ( <i>Cracilaria textorii</i> )	2	10	ワタズガニ( <i>Micippa thalia</i> )	5
	フクロノリ( <i>Colpomenia sinuosa</i> )	1	5未満		



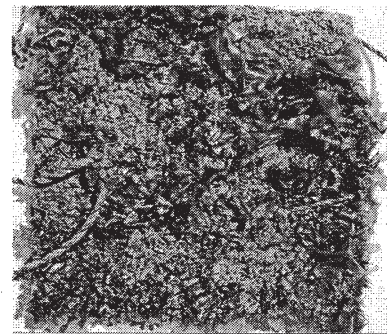
(a) 配合Aの平板供試体



(c) 配合Cの平板供試体



(b) 配合Bの平板供試体



(d) 配合Dの平板供試体

写真1 平板供試体上面での海藻着生状況(2002年6月)

ずかしか着生していなかったのに対し、2年目には5月をピークに繁茂していることを確認した。骨材に碎石を使用している配合A、Bでは、1年目は藻類の繁茂が著しかったのに対し、2年目になると着生量が減っていた。一方、骨材に転炉スラグや鉄鉱石を使用している配合C、Dでは、1年目と同様に2年目にも藻類の著しい繁茂が確認できた。

表6は、2002年6月（平板供試体を設置して240日）に平板供試体上面で観測された付着動植物相である。写真1は平板供試体上面での海藻着生状況を、写真2には動物の付着状況を示す。いずれの配合もほぼ同様の着生海藻が見られた。付着動物については、配合C、Dにおいて藻食性で潮間帯に生息するヒザラガイ (*Acanthopleura japonica*) が多数観察された。



写真2 動物の付着状況  
(配合D、2002年6月)

また、個体数に差はあるものの、イソヨコバサミ (*Clibanarius virscus*) 等の潮間帯岩礁域に生息する節足動物がすべての配合で観察された。このことから、転炉スラグ・石膏・セメント・海水混合系で製造したPoCへの生物付着状況は、配合Aのように従来からの碎石によるPoCとほぼ同程度であり、転炉スラグ・石膏・セメント・海水混合系で製造したPoCが藻場造成基質として活用できると考えられる。

## 6. まとめ

潜在水硬性を有する転炉スラグと、その刺激剤または相互反応材となる石膏および海水の混合系で製造したPoCの藻場造成基質としての性質について検討した結果、以下の知見を得た。

①骨材として転炉スラグを使用したPoCは碎石使用したものより強度が大きく、Gy=7.5%を混入した場合、圧縮強度は15N/mm<sup>2</sup>以上を示した。ただし、石膏の配合量には適量が存在した。セメントや、転炉スラグの種類にもよると考えられるが、本研

究の範囲では石膏の配合量は、結合材に対し、7.5%程度が適量となった。配合量が多すぎると強度が低下を起す傾向が見られた。

- ②転炉スラグ・石膏・セメント・海水混合系で製造したPoCを海域に適用した場合、30日までに溶出する遊離石灰起因のpH値は急激に低下し、120日後で海水のpH値と同程度となった。
- ③PoCからのFeイオンの溶出試験の結果、転炉スラグの配合で一定量の溶出が確認できた。このことから、藻類への鉄イオンの供給源としての利用が可能であると考えられる。
- ④転炉スラグ・石膏・セメント・海水混合系で製造したPoCへの生物付着状況は、碎石による従来型のPoCと比較すると、ほぼ同等以上の結果を示し、当混合系は、藻場造成基質として有効に活用できることを明らかにした。

## 謝辞

本研究の実施には、建設資源リサイクル研究会の研究資金の一部を使用している。また、PoCの骨材として使用した転炉スラグは、(株)神戸製鋼所から提供して頂いた。大阪府立水産試験場には海域での実験場所をご提供頂いた。ここに記して関係各位に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) (財)先端建設技術センター：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き、山海堂(2001)
- 2) 玉井元治・河合章：連続空隙を有するコンクリートに付着する海洋生物の遷移に関する研究、土木学会論文集、No.452/II-20, pp.81-90(1992)
- 3) 谷口和也、他：磯焼け域におけるポーラスコンクリート製海藻礁によるアラメ海中林の造成、日本水産学会誌、67, pp.858-865(2001)
- 4) 玉井元治、他：肥料を混入したポーラスコンクリートの性質、セメントコンクリート論文集、No.54, pp.550-555(2000)
- 5) 関慎吾：博士論文選集 建設の施工技術(SSクリートの開発と展望)(1982)
- 6) 山内俊吉：窯業ハンドブック、技報堂(1971)
- 7) 新崎盛敏：原色海藻検索図鑑、北隆館(1964)
- 8) 瀬川宗吉：原色日本海藻図鑑、保育者(1986)

(2005年8月3日受付 2005年9月6日受理)