論文　鋳物廃砂を用いたコンクリート漁礁に関する研究

吉野　公[*1]・黒田　保[*2]・吉岡　真一郎[*3]・松原　雄平[*4]

要旨：本研究は，鋳型に用いられた後に廃棄される鋳物廃砂の有効利用を目的として行ったものである。鋳物廃砂は，粒径はほとんどが 0.6mm 以下であること，粘結剤に水ガラスが含まれる場合には，それが原因と思われるアルカリシリカ反応性を示すことが問題点であるが，鉄分を含むことから藻場造成機能である海藻付着が増加する可能性があることが利点である。研究の結果，粗い砂と混合し，高炉セメントＢ種を用いた場合，強度やフレッシュ性状に問題はなく，漁礁コンクリートに求められる強度の配合では，アルカリシリカ反応による膨張も認められないことが明らかになった。また，普通のコンクリートに比べ，海藻の付着性状が良好なことが確認された。

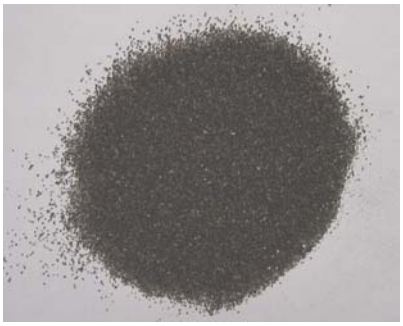
キーワード：鋳物廃砂，漁礁，生物付着性，アルカリシリカ反応

1. はじめに

近年，藻場が季節的消長や多少の経年変化の範囲を越えて著しく衰退または消失する磯焼けという現象が全国各地で発生し，我が国の水産業に多大な影響を及ぼしている[1)]。磯焼け対策の一つとして，漁礁効果を兼ねた磯焼け対策礁の材料にポーラスコンクリートを用いた研究[2), 3)]や製鋼スラグ骨材を使用したコンクリートを用いた研究が行われている。このうち，製鋼スラグ骨材を用いたコンクリートは，通常の材料を用いたコンクリートよりも生物付着性が優れており，これは生物が育成するために必要な鉄や珪素が製鋼スラグに含まれており，海水中に鉄イオン等を溶出させることによると考えられると報告されている[4)]。本研究で取り扱う鋳物廃砂も鋳型として用いられたことにより鋳型に付着した鉄分を含む細骨材であり，製鋼スラグと同様に生物付着性のよいコンクリートを製造できる可能性がある。

鋳物廃砂は，鋳型に用いられた後に廃棄される産業廃棄物である。**写真－1** に鋳物廃砂を示す。鋳物廃砂は黒っぽい色をしており，風で飛散した場合，地域に対し環境衛生面での問題を発生させる。鋳物廃砂の処理は鋳物産業界にとって，先に述べた環境衛生，処理費用および社会的リサイクルへの取組み姿勢の問題から緊急に解決しなくてはならない重要課題である。

鋳型に用いられる鋳物砂は粘土分をほとんど含まない天然または人工のケイ砂などが用いられ，これに粘結剤および各種添加物を混ぜ固めることにより鋳型となる。鋳型に鉄を流し込み製品が製造され，その後鋳型は破砕され，一部は鋳物砂として再利用し，そのほかは廃棄される。粘結剤には，一般に粘土，水ガラス，セメント，フラン樹脂，その他の樹脂などが用いられるが，粘結剤に水ガラスが含まれる場合には，それが原因と思われるアルカリシリカ反応性[5)]を示す鋳物廃砂となる。また，粒径はそのほとんどが 0.6mm 以下で，非常に細かい砂であることから，単独でコンクリート用細骨材として用いる場合には粒度分布の面で問題となる。しかしながら，これらの懸念が解消されれば，鋳物廃砂に含まれる鉄分によって，藻場造成機能である海藻付着が増加する可能性がある。



写真－1　鋳物廃砂

本研究では，鋳物廃砂の諸性質を明らかにし，コンクリート用細骨材として用いた場合の配合，強度さらにはアルカリ骨材反応性とその防止策についての検討を行った。その後，海中にコンクリートを設置し，海藻の付着状態の観察を行った。なお，本研究で用いる鋳物廃砂には水ガラス，珪素含有物，クロマイトなどが混入されている。

2. 鋳物廃砂の性質

2.1 測定項目

本研究では，3種類の細骨材を用いた。鋳物廃砂は，粒径が小さいため，単独では細骨材として用いることができない。そのため，混合用の粗砂を用意した。また，鋳物廃砂の比較

*1 鳥取大学大学院　工学研究科　准教授　工博　(正会員)
*2 鳥取大学大学院　工学研究科　准教授　工博　(正会員)
*3 米子製鋼（株）　鋳鋼技術部
*4 鳥取大学大学院　工学研究科　教授　工博

表－1　細骨材の物理的性質

種類	表乾密度 (g/cm^3)	絶乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	F.M.	＜0.075mm (%)
粗砂（砕砂）	2.55	2.50	2.09	3.31	1.8
鋳物廃砂	2.74	2.69	1.83	1.66	3.5
細砂	2.63	2.60	1.30	1.44	1.4

用として鋳物廃砂と同様な粒度をもった細砂(河口砂)も用意した。まずは，それぞれの細骨材の物理的性質(密度，吸水率，粒度分布，微粒分量)を明らかにした。また，鋳物廃砂に関しては，土壌環境基準に基づく有害物質含有量および溶出試験，さらに，アルカリシリカ反応性試験を行った。

2.2 物理的性質

本研究で用いた 3 種類の細骨材の物理的性質を**表－1** に示す。鋳物廃砂の密度は，他の細骨材に比べ，大きな値を示している。鋳物廃砂の元の砂の絶乾密度は 2.59 g/cm^3 であり，これに鉄が含まれることにより，密度が大きくなったと考えられる。F.M.が小さく，粒径が細かいことを除けば，吸水率，0.075mm 以下の微粒分量も少なく鋳物廃砂は良質な細骨材といえる。

図－1 は，各細骨材の粒度分布を示したものである。図中の破線は，土木学会の標準粒度の範囲を示したもので，破線の間にある細骨材を用いることが標準的である。**図－1** より，鋳物廃砂および細砂は，粒径の細かいものが多く，土木学会の標準粒度の範囲から外れている。また，粗砂は，鋳物廃砂および細砂と混合して用いるために粗めの砂を用意した。

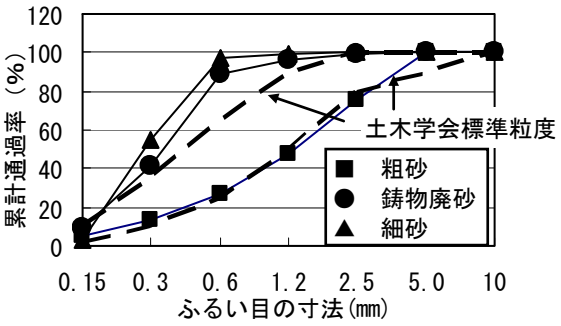
2.3 有害物質含有量および溶出量

鋳物廃砂は，鋳物砂のほかに水ガラスおよび各種添加物が混入されている。そこで，土壌汚染対策法に規定された試験方法に従って，有害物質含有量および溶出量試験を行った。試験結果を**表－2，3** に示す。

表－2，3 より，すべての項目で，有害物質含有量および溶出量は小さく，すべて土壌環境基準値を満たすものであった。

2.4 アルカリシリカ反応性

鋳物廃砂の化学法による試験結果を**図－2** に示す。アルカリ濃度の減少量に対する溶解シリカ量が大きく，アルカリシリカ反応は「無害でない」と判定された。そこで，鋳物廃砂を用いたモルタルバーによるアルカリシリカ反応試験を行った。その結果を**図－3** に示す。モルタルバーによる骨材のアルカリシリカ反応性試験は，供試体の平均膨張率が 3 か月で 0.05%以上，あるいは 6 ヶ月で 0.10%以上となった場合には，無害でないと判定される。**図－3** より，鋳物廃砂は，平均膨張率が 3 か月で 0.05%以上となっており，「無害でない」と判定された。アルカリシリカ反応性は，粘結剤に含まれる水ガラスが原因と思われる。なお，鋳物廃砂は実際には無害の砂と混合されることから，鋳物廃砂と粗砂を半々用いたモルタルおよび膨張を抑制する高炉セメント B 種を用いたモルタルも同様の促進条件におき，その膨張を測定した。いずれの場合も 3 か月で 0.05%以上の膨張となっているが，混合砂で高炉セメントを用いた場合には，かなり膨張が抑制されることがわかる。



図－1　細骨材の粒度分布

表－2　重金属含有量試験結果

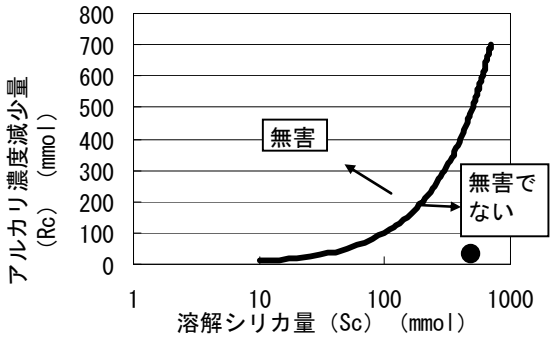
試験項目	測定値	土壌環境基準
カドミウム	0.04	≦150
鉛	1.7	≦150
砒素	0.62	≦150
総水銀	<0.02	≦15
セレン	0.88	≦150
フッ素	62	≦4000
ホウ素	40	≦4000

単位:mg/L，＜：報告下限値以下を示す

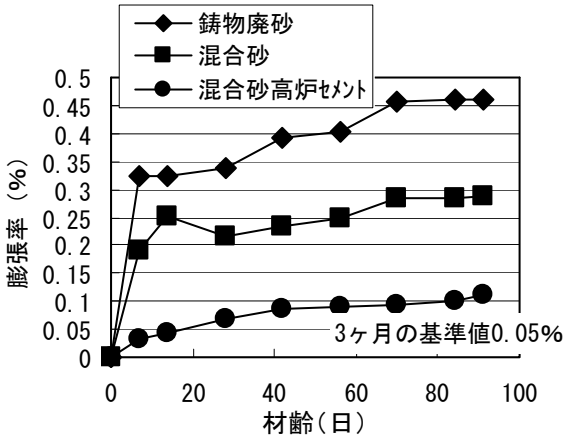
表－3　溶出試験結果

試験項目	測定値	土壌環境基準
カドミウム	<0.001	≦0.01
鉛	0.001	≦0.01
六価クロム	<0.005	≦0.05
砒素	0.008	≦0.01
総水銀	<0.0005	≦0.005
セレン	<0.001	≦0.01
フッ素	<0.8	≦0.8
ホウ素	<1	≦1

単位:mg/L，＜：報告下限値以下を示す



図－2　鋳物廃砂の化学法結果



図－3　アルカリシリカ反応性試験（モルタルバー法）結果

3. コンクリートの配合と諸性質

3.1 使用材料及び試験要因

粗骨材は最大寸法 20mm の砕石（表乾密度：2.72 g/cm^3，吸水率：0.61%，FM：6.79）を用いた。比較用の普通砂は細砂の混合質量率を 30%とし，土木学会の標準粒度範囲の中央値に近いものを用いた。セメントはアルカリシリカ反応抑制を考慮して高炉セメント B 種を用いた。また，化学混和剤は AE 減水剤と空気量調整用の AE 助剤を用いた。配合条件は，スランプ 8.0±1.5cm，空気量 4.5±1.5%とした。

コンクリートにおける試験要因と水準を**表－4** に示す。水産土木建設技術センターなどによると漁礁用コンクリートに求められる強度は呼び強度で 18 あるいは 21N/mm^2 が多いことから，強度と水セメント比を求める水セメント比の範囲は，50～65%とした。また，鋳物廃砂の混合比率は粗砂に対して，質量比率で 30，40，50%とした。これは，鋳物廃砂が細砂に近い粒度分布であることから混合比率 30%を最低値とし，土木学会標準粒度範囲内でなるべく鋳物廃砂を用いることを意図し，最大比率を 50%とした。**表－5** および**図－4** は混合砂の FM と粒度分布を示したものである。いずれの混合砂も土木学会の標準粒度範囲にあることがわかる。また，混合率 30%が標準粒度範囲のほぼ中央に位置している。

3.2 コンクリートの配合

まず，水セメント比 0.55 の普通砂および鋳物廃砂 30%のコンクリートにおいて，単位水量 150kg/m^3 および空気量 4.5±1.5%の条件で細骨材率を変化させ，スランプが最大となる細骨材率（最適細骨材率）を決定する試験を行った。**図－5** に結果を示す。試験結果より，普通砂，鋳物廃砂 30%とも細骨材率 45%が最適細骨材率となった。その他の水セメント比および鋳物廃砂混合率のコンクリートに関しては，2007 年コンクリート標準示方書の修正表に基づき水セメント比および細骨材の粗粒率の変化に従って細骨材率を決定した。

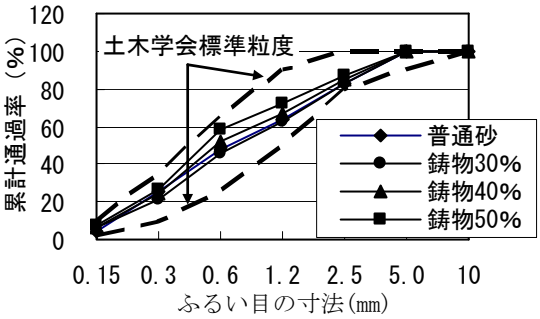
各配合で細骨材率を決定した後，試し練りによって，

表－4　試験要因と水準

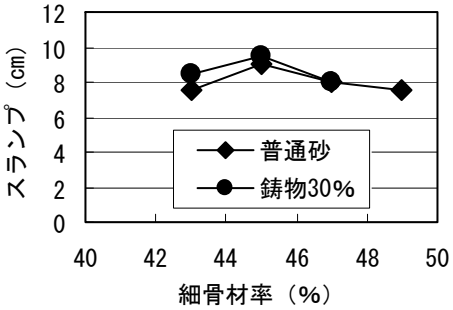
試験要因	水準
水セメント比	0.50，0.55，(0.60)，0.65
鋳物廃砂混合比率	30，40，50%

表－5　混合砂の FM

種類	細砂 30%	鋳物廃砂 30%	鋳物廃砂 40%	鋳物廃砂 50%
FM	2.75	2.82	2.65	2.49



図－4　混合砂の粒度分布



図－5　最適細骨材率の検討

表－6　配合設計表

種類	*W/C* (%)	*s/a* (%)	単位量 (kg/m³)					AE 減水剤 (*C*×%)	AE 助剤 (*C*×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	*C*	*S1*	*S2*	*G*				
普通砂	50	44	148	296	562	241	1081	0.25	1.2	8.5	4.8
	55	45	148	269	581	249	1074	0.25	1.2	7.0	4.4
	60	46	148	247	601	257	1066	0.25	1.2	8.5	4.5
	65	47	148	228	619	265	1055	0.25	1.4	7.0	5.5
鋳物廃砂 30%	50	44	148	296	590	253	1081	0.25	1.2	8.5	4.4
	55	45	148	269	571	245	1074	0.25	1.2	7.5	4.4
	60	46	148	247	610	262	1066	0.25	1.2	8.5	4.5
	65	47	148	228	629	270	1055	0.25	1.4	7.5	4.4
鋳物廃砂 40%	50	43	148	296	482	321	1101	0.25	1.2	9.0	4.5
	55	44	148	269	499	332	1094	0.25	1.2	9.0	3.9
	65	46	148	228	532	354	1075	0.25	1.4	9.0	5.2
鋳物廃砂 50%	50	42	148	296	395	395	1120	0.25	1.2	8.5	3.5
	55	43	148	269	409	409	1113	0.25	1.2	7.5	3.8
	60	44	148	247	423	423	1106	0.25	1.2	8.0	4.0
	65	45	148	228	436	436	1095	0.25	1.4	7.5	4.2

S1：粗砂，*S2*：細砂あるいは鋳物廃砂

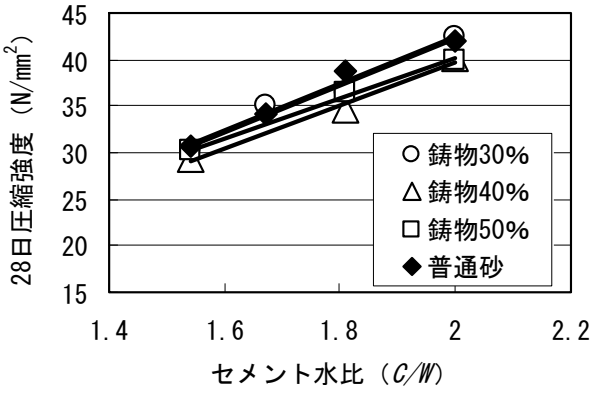
スランプ 8.0±1.5cm，空気量 4.5±1.5%となるように，単位水量および AE 助剤量を決定した。試し練りに基づいて決定した配合とスランプおよび空気量の測定結果を**表－6** に示す。

3.3 コンクリートの諸性質

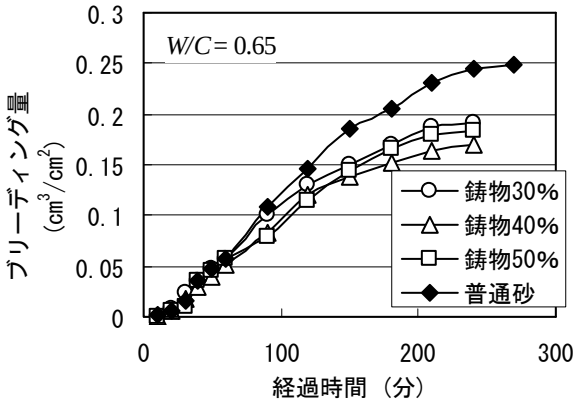
図－6 は 28 日圧縮強度とセメント水比（*C/W*）との関係を示したものである。図より，普通砂と鋳物廃砂 30%は同じセメント水比に対して同様な強度となっている。また，鋳物廃砂 40%，50%もやや強度は低くなっているが，鋳物廃砂による問題となる強度低下は見られない。

本研究で対象としている漁礁に用いられるコンクリートの呼び強度は 18 あるいは 21N/mm² である。実際に配合設計に用いる配合強度は呼び強度を下回らないように割り増し係数（通常強度のばらつきにより 1.2～1.4）を掛けて求める。呼び強度 18N/mm² の場合には，配合強度は 21.6～25.2N/mm²，呼び強度 21N/mm² の場合には，25.2～29.4N/mm² となる。この強度を満たすには，本研究で設定した最も大きい水セメント比 65%で十分となる。この結果を考慮し，凝結試験，ブリーディング試験およびコンクリートにおけるアルカリシリカ反応性試験は，水セメント比 65%を中心に行うこととした。

鋳物廃砂には，水ガラス，珪素含有物，クロマイトなどが混入されていることから，これら添加物がコンクリートの凝結に影響するかどうかおよび鋳物廃砂の混合比率によってブリーディング量がどう変化するかを水セメント比 65%のコンクリートで試験した。**図－7** にブリーディング試験結果を，**表－6** に凝結試験結果を示す。



図－6　セメント水比と圧縮強度の関係



図－7　ブリーディング試験結果

図－7 より，普通砂を用いたコンクリートよりも，鋳物廃砂を用いたコンクリートのブリーディング量がやや少なくなる結果となった。これは，細砂に比べ鋳物廃砂が 0.075mm 以下がやや多いことによると考えられる。また，鋳物廃砂の混合比率はブリーディング量にほとんど影響を及ぼさないといえる。

表－7 より，鋳物廃砂を用いたことによる凝結時間の変化は見られず，鋳物廃砂は凝結時間に影響しないといえる。

3.4 アルカリ骨材反応試験結果

コンクリートバーによるアルカリ骨材反応試験方法（JCI AAR-3）は，コンクリート工学協会が定めた方法であり，実配合のコンクリートがアルカリ骨材反応を起こすか否かを判定することを目的として提案された試験方法である。判定基準は添加アルカリに試薬1級の NaOH を用い，添加アルカリ量 2.4kg/m^3 の配合のコンクリートを 40℃，R.H.100%の条件下で保存し，材齢 6 ヶ月における膨張率が 0.10%未満の場合「反応性なし」，0.10%以上の場合「反応性あり」と判定する。

漁礁材料としてのコンクリートは，先に述べたように，水セメント比 65%程度が用いられるものと考えられる。そこで，水セメント比 65%で，鋳物廃砂の混合比率を変化させたコンクリートのアルカリ骨材反応性を検討した。**図－8** はコンクリートバーによるアルカリ骨材反応試験の結果を示したものである。図より，各コンクリートとも材齢 6 ヶ月における膨張率は 0.02%程度であり，これらのコンクリートは「反応性なし」と判定された。

図－9 は，鋳物廃砂の混合比率を 50%とし，水セメント比を変化させた結果である。水セメント比 60 および 65%では，最終膨張率に差はなかったが，55%では，最終膨張率が大きくなった。しかし，55%でも最終膨張率は 0.04%であり，コンクリートは「反応性なし」と判定される。したがって，漁礁よりも強度が必要な消波ブロックへの適用も可能であると考えられる。

4. 海中沈設実験

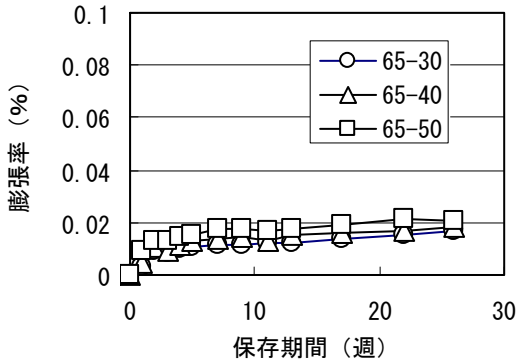
4.1 平板試験体による実験

普通砂あるいは鋳物廃砂 50%の砂，水セメント比 65%の配合で，300×300×100mm の試験体をそれぞれ 3 体作成し，鳥取県沿岸に沈設した。試験体は材齢 28 日まで，標準養生し，その後沈設するまで，約 2 ヶ月間室内で気中保存した。

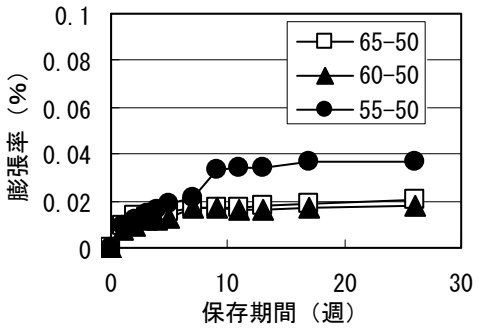
海藻の付着状況の評価は，武田らの研究[3)]を参考にし，300×300mm の面を 16 グリッドに分割し，全グリッドに対する海藻が付着しているグリッドの割合を用いた。試験体は 2 月中旬に沈設し，6 月末まで調査した。結果を**図－10** に，また 6 月末の海藻付着状態の一例を**写真－2**，**写真－3** に示す。

表－7　凝結試験結果

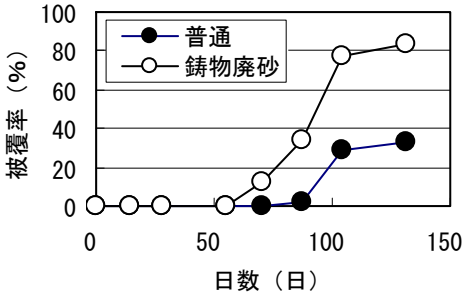
種類	始発	終結
鋳物廃砂 30%	7 時間 40 分	11 時間 30 分
鋳物廃砂 40%	7 時間 30 分	11 時間 05 分
鋳物廃砂 50%	7 時間 40 分	11 時間 30 分
普通砂	8 時間 10 分	11 時間 45 分



図－8　アルカリシリカ反応性試験（混合比率の影響）



図－9　アルカリシリカ反応性試験（*W/C* の影響）



図－10　被覆率の経時変化

図－10 からわかるように，鋳物廃砂を用いたコンクリートは海藻の被覆率が高いことがわかる。したがって，鋳物廃砂から鉄分が溶出し，それが海藻の付着に好影響を及ぼしたものと推察できる。しかしながら，鋳物廃砂を用いたコンクリートにおいても，大型の海藻の生育は

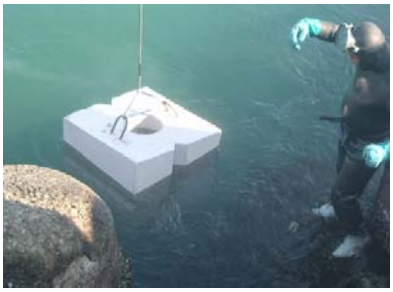
見られていない。一般に，藻場は季節的消長があり，6～7 月を過ぎると衰退し，秋から冬にかけて増加する。コンブ類などの大型藻体は秋から冬にかけて胞子や卵などを飛ばし，12 月～3 月にかけて幼体が発芽し，元からあった海藻の主枝の伸長とともに，藻場が増加する傾向にあるといわれている [1)]。今回の実験では，海中へ試験体を沈設した時期が少し遅かったことが，大型の海藻の生育が見られなかった原因と考えられる。また，試験体の寸法が小さいことも影響した可能性がある。

4.2 コンクリートブロックによる実験

写真－4 に示す一辺 700㎜ のコンクリートブロックを鋳物廃砂 50%，水セメント比 65%の配合で，3 体作成し，10 月下旬に沈設し，観察を行った。**写真－5** は 3 月中旬の海藻の付着状態の一例である。大型の海藻が繁茂していることがわかる。6 月下旬まで観察を行ったが，海藻の種類は変化していくものの一貫して海藻が繁茂していた。以上の結果より，鋳物廃砂を用いたコンクリートは海藻の付着性状が良好なことが確認された。

写真－2　海藻付着状態（普通）

写真－3　海藻付着状態（鋳物 50%）



写真－4　コンクリートブロック

写真－5　海藻の繁茂状態の一例

5. まとめ

本研究は，産業副産物である鋳物廃砂を漁礁用コンクリートの細骨材として用いた場合のコンクリートの諸性質を明らかにするとともに，海中にコンクリートを設置し，海藻の付着状態の観察を行った。以下に得られたおもな結果を列挙し，まとめとする。

(1) 本研究で用いた鋳物廃砂は，含まれる水ガラスが原因と思われるアルカリシリカ反応性を示すが，高炉セメントＢ種を用いると， 55%より大きな水セメント比のコンクリートでは有害な膨張は示さなかった。

(2) 単位水量，圧縮強度，凝結時間に関しては，比較の普通コンクリートと同等であり，鋳物廃砂の使用および 50%までの混合率はこれらの性質に影響を及ぼさない。

(3) 海中沈設した平板試験体の結果から，鋳物廃砂を用いたコンクリートは海藻が付着しやすいことが明らかとなった。また，沈設したブロックには大型の海藻が繁茂した。したがって，鋳物廃砂はコンクリート漁礁の材料として有効な材料といえる。

参考文献

1) 水産庁：磯焼け対策ガイドライン，2007

2) 大谷俊浩，山田高慶，佐藤嘉昭，清原千鶴：ポーラスコンクリートを用いた高機能大型人工漁礁の開発，日本建築学会九州支部研究報告，第 45 号，pp.117-120，2006.3

3) 武田浩二，村上　聖，金丸健太郎，浦野登志雄：小型漁礁に設置したポーラスコンクリートの藻場復元効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.1723-1728, 2009

4) 松永久宏，小菊史男，高木正人，谷敷多穂：鉄鋼スラグを利用した環境に優しい固化体の開発，コンクリート工学，Vol.41, No.4, pp47-54, 2003.4

5) 平林丈明，森野奎二，岩月栄治：化学物質の少量添加によるアルカリシリカ反応の抑制に関する研究，愛知工業大学研究報告，第 45 号，pp133-142，2010