

論文 製鋼スラグ骨材と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}・鳥羽 功^{*3}・松原 雄平^{*4}

要旨: 本研究は、産業副産物である製鋼スラグと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。これらは鉄分を含むことからこれらを骨材として用いたコンクリート漁礁は藻場造成機能である海藻付着が増加する可能性がある。研究の結果、粗骨材に製鋼スラグ、細骨材に製鋼スラグと鋳物廃砂を容積比で5:5に混合したものをを用いた場合に、普通のコンクリートと同程度の単位水量でコンクリートが製造可能であり、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: 製鋼スラグ, 鋳物廃砂, 漁礁, 生物付着性

1. はじめに

製鋼スラグは、鉄鋼スラグの一種であり、有効利用が要望されている産業副産物である。製鋼スラグは転炉スラグと電気炉スラグに分類され、さらに、電気炉スラグは酸化スラグと還元スラグに分類される。転炉スラグは粗鋼1トンあたり110kg、酸化スラグは70kg、還元スラグは40kg発生する。製鋼スラグの発生量は2010年度において約1300万トンである¹⁾。

製鋼スラグ骨材は水酸化カルシウムを溶出し、それに刺激され高炉スラグ微粉末が水和反応をすることから、製鋼スラグ骨材と高炉スラグ微粉末を主材料とした、セメントを使用しないあるいはセメント量が極めて少ない固化体(鉄鋼スラグ水和固化体)を製造できる。製鋼スラグ骨材と高炉スラグ微粉末はいずれも産業副産物であることから、鉄鋼スラグ水和固化体は、平成20年度にグリーン購入法(国等の環境物品等の調達の推進等に関する法律)品目に指定されている。グリーン購入法品目となる判断基準は、「骨材のうち、製鋼スラグを重量比で50%以上使用していること。かつ、結合材に高炉スラグ微粉末を使用していること。」とされている。

さらに、製鋼スラグを海水に浸せきすると、鉄、リン等が徐々に溶解し、植物プランクトンの増殖が盛んになることから、鉄鋼スラグ水和固化体は、普通コンクリートよりも生物付着性が優れているとの報告がある²⁾。

一方、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。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づらいが、鉄分を含有しており、製鋼スラグと同様に、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ている³⁾。

本研究では、製鋼スラグ骨材と鋳物廃砂をコンクリート用骨材として用いた場合の配合、フレッシュ性状および強度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。

2. コンクリートの配合と諸性質

2.1 使用材料

本研究で用いる製鋼スラグは電気炉の酸化スラグである。また、工場から排出される時点では、30mmふるいで大きな粒径を除いた粗細骨材が一体の状態であるが、これを粗骨材と細骨材にふるい分けて使用することとした。比較用の普通コンクリートに用いる骨材は、粗骨材に碎石、細骨材に砕砂と細砂(河口砂)を用いた。

表-1に粗骨材の物理的性質を示す。製鋼スラグ粗骨材においては、密度、吸水率、粒形判定実積率、のすべてにおいて碎石のJIS規格を満たしていることがわかる。ただし、密度は碎石に比べ製鋼スラグの方が大きく、吸水率は碎石よりも大きい。粒径判定実積率は碎石とほぼ同じ値であり、粒形は同程度であるといえる。なお、粗骨材は、5mmふるいをういて水洗いしているため、5mm

表-1 細骨材の物理的性質

骨材の種類	最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	F.M.	粒形判定実積率 (%)
普通碎石	20	2.67	2.65	0.82	6.33	59.3
製鋼スラグ	25	3.34	3.28	1.80	7.17	59.2
碎石のJIS規格	—	—	>2.50	<3.00	—	>56.0

*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 教授 工博 (正会員)

*3 ティーアイ環境開発

*4 鳥取大学大学院 工学研究科 教授 工博

表-2 細骨材の物理的性質

骨材の種類	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	F.M.	粒形判定実積率 (%)	<0.075mm (%)
砕砂	2.65	2.62	1.52	3.14	55.8	3.4
陸砂	2.63	2.60	1.30	1.44	—	1.4
製鋼スラグ	3.22	2.99	4.03	2.82	55.6	9.5
鋳物廃砂	2.74	2.69	1.83	1.66	—	3.5
砕砂の JIS 規格	—	>2.50	<3.00	—	>54.0	<9.0

以下はない。

表-2 に細骨材の物理的性質を示す。製鋼スラグ細骨材については、粗骨材と同様に密度は砕砂に比べ製鋼スラグの方が大きくなっている。吸水率においても JIS 規格を満たしておらず、非常に高い。製鋼スラグ細骨材は内部に空隙が多いことがわかる。また、製鋼スラグの微粒分量は JIS 規格を満たしておらず非常に多い。粒形判定実積率試験においては製鋼スラグ細骨材は砕砂と同程度で JIS 規格を満たしている。製鋼スラグ細骨材は粒形に関しては問題ないと言える。

鋳物廃砂の密度は、製鋼スラグよりも小さいが砕砂や細砂に比べ、大きな値を示している。鋳物廃砂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。

細骨材のふるい分け試験の結果を粒度分布として、図-1 に示す。なお、図中には、参考のために土木学会に規定されているコンクリート用細骨材としての上限と下限粒度の範囲も併記している。細砂と鋳物廃砂はほぼ同様な粒度分布を持っている。製鋼スラグ細骨材の粒度分布は、粗粒と細粒の部分が多く、中間の大きさの粒が少ないのが特徴である。

2.2 実験計画

コンクリートにおける試験要因と水準を表-3 に、骨材の組合せと記号を表-4 に示す。

水セメント比を 0.45, 0.55, 0.65 の3水準に設定し、配合条件として、漁礁以外に人工リーフや消波ブロックへの使用も視野に入れ、スランブ 8±1.5cm, 空気量 4.5±1.5%とした。

コンクリートの種類は、細骨材に砕砂と細砂を混合し、土木学会の標準粒度の中央値に近い粒度とした普通砂、粗骨材として普通砕石を用いた比較用の普通コンクリート (N)、細骨材として製鋼スラグと細砂を容積で 50%ずつ混合したもの、粗骨材として製鋼スラグを用いた S50N コンクリート、細骨材として製鋼スラグと鋳物廃砂を混合したもの、粗骨材として製鋼スラグを用いた SF コンクリートである。なお、SF コンクリートは製鋼スラグ細骨材の容積混合比率を 50%, 75%, 100%とし、記号とし

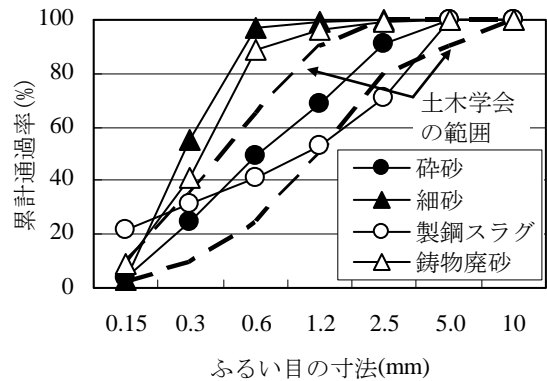


図-1 細骨材の粒度分布

表-3 試験要因と水準

試験要因	水準
製鋼スラグ細骨材混合比率	50, 75, 100%
水セメント比	0.45, 0.55, 0.65
スランブ (cm)	8±1.5
空気量 (%)	4.5±1.5

表-4 骨材の組合せと記号

記号	コンクリートの種類		
	N	SN	SF
細骨材	普通砂	製鋼スラグおよび細砂	製鋼スラグおよび鋳物廃砂
粗骨材	普通砕石	製鋼スラグ	製鋼スラグ

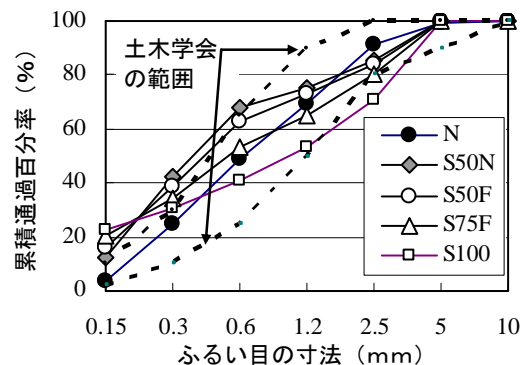


図-2 混合細骨材の粒度分布

表-5 示方配合表

	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AE 減水剤 (C×%)	AE 助剤 (C×%)
			W	C	細砂	砕砂	碎石		
N	45	40	160	355	144	575	1086	0.25	1.2
	55	42	158	287	156	626	1084	0.25	0.8
	65	44	160	246	167	666	1068	0.25	0.8

	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AE 減水剤 (C×%)	AE 助剤 (C×%)
			W	C	陸砂 鋳物廃砂	製鋼スラグ砂	製鋼スラグ 碎石		
S50N	45	35	167	371	307	375	1446	0.25	1.6
	55	37	165	300	327	399	1455	0.25	1.6
	65	39	165	254	362	443	1438	0.25	1.6
S50F	45	35	167	371	319	375	1446	0.25	1.6
	55	37	165	300	350	399	1455	0.25	1.6
	65	39	165	254	377	443	1438	0.25	1.6
S75F	45	38	179	398	168	592	1336	0.25	2.0
	55	40	177	322	184	649	1347	0.25	2.0
	65	42	177	272	198	698	1334	0.25	2.0
S100	45	38	190	422	0	766	1293	0.25	2.5
	55	40	190	345	0	840	1307	0.25	2.5
	65	42	190	292	0	905	1296	0.25	2.5

て S50F, S75F, S100 と表示した。混合した細骨材の粒度分布を図-2 に示す。

2.3 コンクリートの配合

まず、骨材の組合せの異なる各コンクリートに対して、水セメント比を 55% と一定とした場合における最適細骨材率を実験的に求めた。結果を図-3 に示す。W/C=55% 以外の任意の W/C におけるコンクリートでの最適 s/a は、最適 s/a を決定する試験を行わずに、土木学会コンクリート標準示方書の考え方にに基づき決定している。すなわち、土木学会コンクリート標準示方書における配合修正に従えば、W/C が 5% の増減に対して s/a を 1% 増減させるという補正に従って求めた値を採用することにした。

配合で用いる細骨材率を決定したのにつき、スランブ 8±1.5cm、空気量 4.5±1.5% の条件に入るように、試練りによって単位水量および AE 助剤量を決定した。試練りに基づいて決定された示方配合を表-5 に示す。

単位水量と製鋼スラグ細骨材の混合率との関係を図-4 に示す。なお、参考のため混合率 0% のところに N のデータもプロットしている。図より、製鋼スラグ細骨材が増加すると単位水量が増加し、S50F で 165 kg/m³ であったものが、S75F で 177 kg/m³、S100S で 190kg/m³ となり、S100 では普通骨材コンクリートに比べてかなり大きな単位水量となった。これは製鋼スラグ細骨材に含まれる微粒分の影響が大きいと考えられる。砕砂・碎石に含まれる砕石粉はある値を超えて極端に微粒分を多く

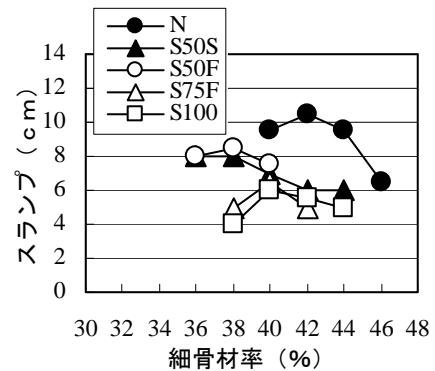


図-3 細骨材率とスランブの関係

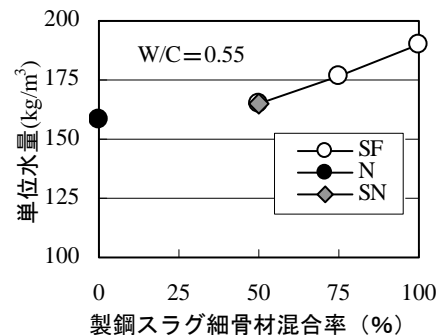


図-4 単位水量

しない限りは、細骨材で混入率 9% 程度まではフレッシュコンクリートの性状や硬化コンクリートに悪影響をあたえないとされており⁴⁾、2008 年の砕砂の JIS 改訂で細

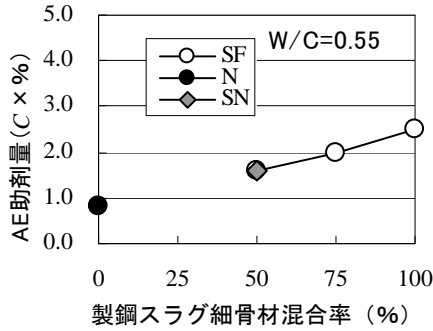


図-5 AE 助剤量

骨材に含まれる微粒分量は 9.0%までは許容されるようになった。しかし、今回使用した製鋼スラグ細骨材の微粒分量は 9.5%であるが、単位水量が大幅に増加したことを考えると、碎石粉と同様な扱いはできないと考えられる。

AE 助剤量と製鋼スラグ細骨材の混合率との関係を図-5 に示す。図より、AE 助剤量においても混合率が高くなるに伴い AE 助剤量が多くなることがわかる。一般的には、微粒分量が多くなるにともない、AE 助剤量も増加するとされており、今回の実験においても、混合率を上げるに伴い AE 助剤の量も多くなった。製鋼スラグ細骨材の混合率を 50%、75%、100% と上げていくに伴い、AE 助剤量は 0.4% ずつ上がる傾向にあることがわかる。

2.4 ブリーディングおよび凝結時間

使用材料が表面仕上げの時期に及ぼす影響を把握するために、ブリーディング試験と凝結試験を行った。

ブリーディング試験結果の一例 (W/C=0.55) を図-6 に示す。また、最終ブリーディング量を表-6 に示す。製鋼スラグを用いたコンクリートは普通骨材を用いたコンクリート N よりブリーディング量が少なくなる結果となった。一般に微粒分量が増加するとブリーディング量は減少する傾向にあるが、最もブリーディング量が少ないのは S75F であり、S100 は S50F と同じであった。これは、S100 は単位水量が大幅に増加していることが原因と考えられる。また、ブリーディング終了時間も製鋼スラグを用いたコンクリートは普通骨材を用いたコンクリートより短くなる結果となった。

凝結試験結果の一例 (W/C=0.55) を図-7 に示す。また、各コンクリートの始発および終結時間を表-7 に示す。始発時間、終結時間もともに製鋼スラグを骨材に用いると凝結時間が早くなるといえる。しかし、製鋼スラグ細骨材の置換率が変化しても凝結時間に変化がほとんどなかったため、製鋼スラグ細骨材の置換率に関してはほとんど影響しないと考えられる。

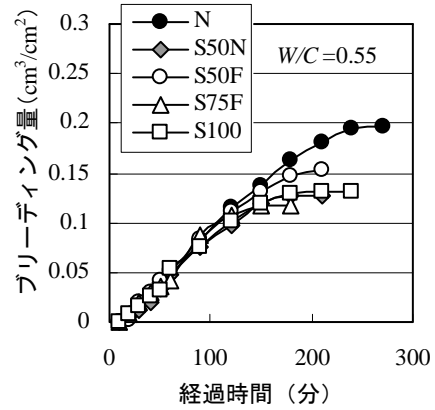


図-6 ブリーディング試験結果

表-6 最終ブリーディング量

W/C (%)	種類	最終ブリーディング量 (cm³/cm²)
55	N	0.196
	S50N	0.126
	S50F	0.152
	S75F	0.118
	S100	0.130
65	N	0.246
	S50N	0.147
	S50F	0.179

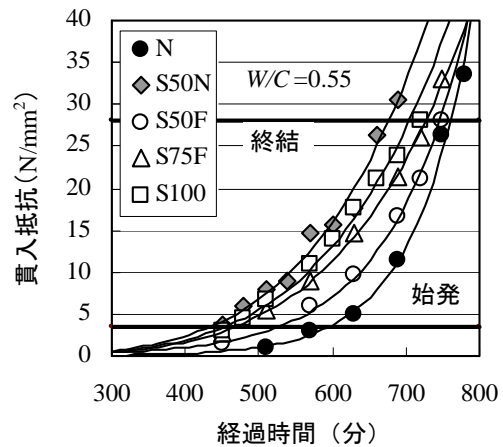


図-7 凝結試験結果

表 10 始発及び終結時間

W/C (%)	種類	始発時間 (分)	終結時間 (分)
55	N	510	750
	S50N	420	700
	S50F	530	735
	S75F	420	660
	S100	450	720
65	N	570	780
	S50N	540	780
	S50F	450	660

2.5 圧縮強度

コンクリートにおけるセメント水比 C/W と材齢 28 日の圧縮強度との関係を図-8 に示す。 C/W が小さい領域においては製鋼スラグ骨材を用いたコンクリートは普通コンクリートと同じ圧縮強度が得られるが、 C/W が大きい領域では、製鋼スラグ骨材を用いたコンクリートは普通コンクリートほど強度が得られないことがわかる。これは製鋼スラグの強度が砕石より小さいことによると考えられる。しかし、漁礁に用いられるコンクリートの呼び強度は、水産土木建設技術センターなどによると 18、あるいは 21N/mm^2 であることから、この程度の強度は普通コンクリートと同様の C/W で所定の強度が得られる。

図-9 に材齢と圧縮強度の関係の一例 ($W/C=0.55$) を示す。図より、材齢と圧縮強度の関係に関しては、製鋼スラグ骨材だけを用いたコンクリート (S100) は他のコンクリートより初期強度から材齢 28 日までやや低い値が出ている。しかし、その他の製鋼スラグ骨材を用いたコンクリートは普通コンクリートと比較して強度発現においてはほとんど差が見られなかった。

3. 海中沈設実験

3.1 コンクリートブロックの作製

上述の実験結果より、S50F は単位水量が比較的小さく、フレッシュ性状に問題なく、漁礁コンクリートに求められる強度は普通骨材コンクリートと同様な水セメント比で得られることが明らかになった。そこで、水セメント比 60% の配合で、N および S50F コンクリートで $700 \times 700 \times 400\text{mm}$ の試験体を 1 体ずつ作成し、鳥取県沿岸に沈設した。また、鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアルの配合を参考にして鉄鋼スラグ水和固化体のコンクリートブロックも作製した。水和固化体のセメントは普通セメントであり、高炉スラグ微粉末は粉末度 4540g/cm^2 のものを用いた。これらの配合を表-8 に示す。これらコンクリートブロック試験体は 12 月の初旬に沈設し、その後 2 ヶ月ごとに水中写真で観察を行った。

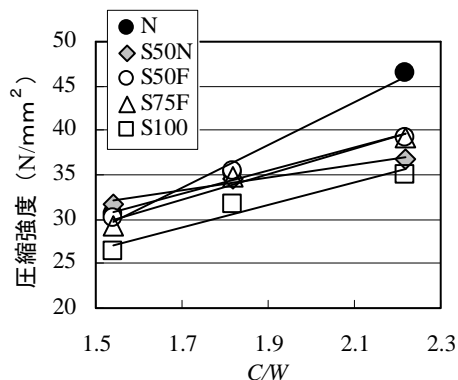


図-8 セメント水比 C/W と圧縮強度との関係

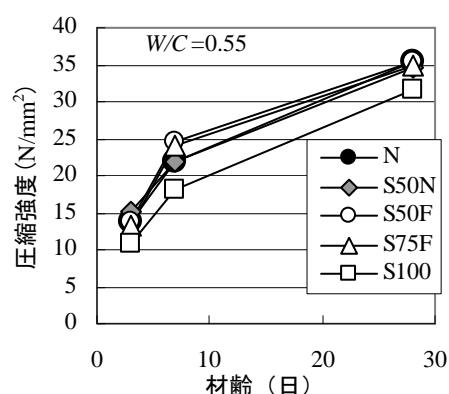


図-9 材齢と圧縮強度の関係

3.1 海藻の生育状況

海藻の付着状況を水中写真から評価する方法として、得られた水中写真 (写真-1) に写真-2 のようにグリッドを当てはめ、コンクリートブロックがしめる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算出する方法をとった。これを上面および 4 側面で数値化しその平均で付着評価を行った図が図-10 である。図より、沈設初期から製鋼スラグと鋳物廃砂を用いた S50F が最も海藻が付着し、水和固化体、普通コンクリートの順となった。

表-8 漁礁ブロックの配合

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	S		G				
					陸砂 鋳物砂	砕砂 製鋼スラグ	普通砕石 製鋼スラグ				
N	60	43	162	267	161	642	1068	0.25	0.8	8.5	4.2
S50F	60	39	165	275	374	405	1426	0.25	1.6	8.0	3.8

水和固化体	W/F	W	C	高炉スラグ微粉末	製鋼スラグ (骨材)	高性能 AE 減水剤 (F×%)	AE 助剤 (F×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
		40	190	119	356	2017	0.80	2.0	9.0

なお、 $F=C+$ 高炉スラグ微粉末



写真-1 海藻付着状況例 (S50F4月)

8月の調査最終日に海藻の生育状態を調査するためコンクリートブロックの海藻を採取し、その乾燥質量を測定した。図-11はその結果である。海藻質量はS50Fが最も多く、水和固化体、普通コンクリートの順となった。したがって、S50Fはそのほかに比べて、海藻がよく付着し、その後の成長もよいことがわかる。

以上の結果より、製鋼スラグと鋳物廃砂を用いたコンクリートは海藻が優先的に付着し、その生育状況も良好であることが明らかになった。

4. まとめ

本研究は、産業副産物である製鋼スラグと鋳物廃砂を漁礁用コンクリートの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、まとめる。

- (1) 細骨材にしめる製鋼スラグが増加すると単位水量およびAE助剤量の増加をもたらす。製鋼スラグ50%、鋳物廃砂50%とした細骨材を用いたコンクリートは、単位水量 165 kg/m^3 でスランプ $8 \pm 1.5 \text{ cm}$ が得られた。
- (2) 漁礁に用いられるコンクリートの呼び強度18あるいは 21 N/mm^2 の範囲では、製鋼スラグ骨材および鋳物廃砂を用いたコンクリートの圧縮強度は同じ水セメント比で比較の普通コンクリートと同等である。また、製鋼スラグ骨材を用いたコンクリートの凝結時間は普通コンクリートに比較して多少短くなり、ブリーディングは減少する。
- (3) 海中沈設したコンクリートブロック試験体の観察結果から、製鋼スラグ骨材と鋳物廃砂を用いたコンクリートは海藻が付着しやすく、生育状況も良好であることが明らかになった。製鋼スラグ骨材と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) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用, pp.45-46, 2013

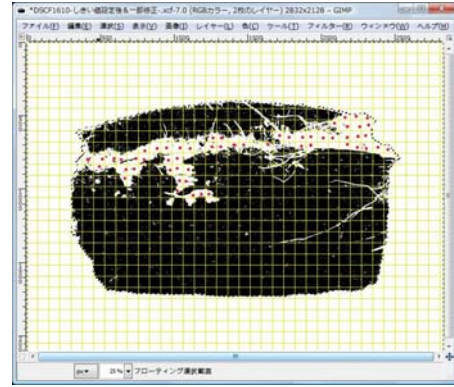


写真-2 海藻付着評価法

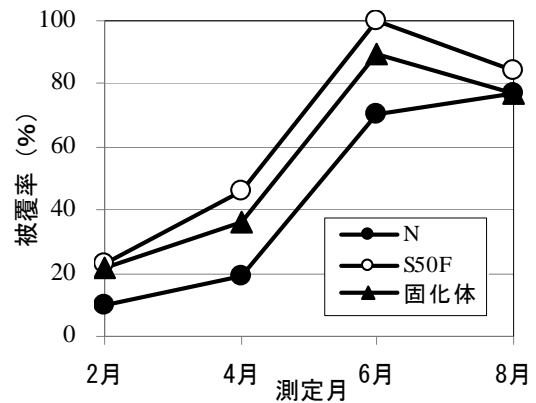


図-10 海藻の付着率

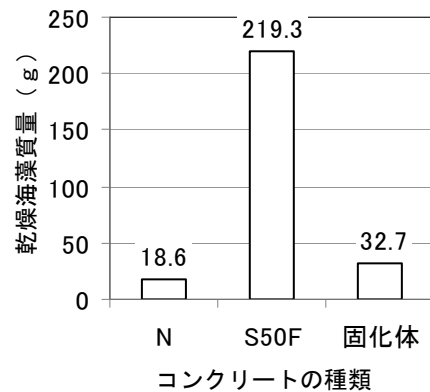


図-11 付着海藻質量

- 2) 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
- 3) 吉野 公, 黒田 保, 吉岡 真一郎, 松原 雄平：鋳物廃砂を用いたコンクリート漁礁に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1555-1560, 2013
- 4) 河野広隆：骨材の微粉末の有効利用, コンクリート工学, Vol.46, No.5, pp.34-41, 2008.