

論文 コンクリート用細骨材への破碎した牡蠣殻の適用性

堀口 至^{*1}・目片 雄士^{*2}・三村 陽一^{*3}

要旨：本研究では、細骨材の一部を破碎した牡蠣殻で置換した牡蠣殻コンクリートについて試験を行い、フレッシュ性状や強度特性に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響を調べた。試験結果より、牡蠣殻を細かく破碎することで品質の高い牡蠣殻細骨材を作製できることが分かった。試料の練上がり状態やスランプ試験より、高い置換率では粗めに破碎された牡蠣殻細骨材を用いた場合に材料分離の傾向が見られたが、空気量は牡蠣殻細骨材の種類により傾向は異なるが置換率の増加に伴い増大する傾向を示した。また、牡蠣殻コンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、牡蠣殻細骨材の種類に関わらず置換率の増加に伴い低下する傾向を示した。

キーワード：牡蠣殻, 細骨材, スランプ, 空気量, 圧縮強度, 静弾性係数

1. はじめに

牡蠣は「海のミルク」と呼ばれ、アミノ酸やビタミン、ミネラルなどを含んだ非常に栄養価が高い食材である。牡蠣の生産は日本各地で行われているが、特に広島県は全国有数の牡蠣の産地として知られている。広島県では年間の生産目標をむき身で 20,000t としている。広島県がまとめた「平成 23 年度広島かき生産出荷指針」によると、広島県の 2009 年の牡蠣生産量は、全国生産量 33,830t に対して 19,147t と国内生産量の約 6 割を占めている。しかし、その一方では副産物として牡蠣殻が大量に産出され、広島県では牡蠣殻が約 100,000t 発生しており、牡蠣殻堆積場からの悪臭やカラスによる牡蠣殻の散乱といった問題が起こっている。現時点の牡蠣殻の再生利用方法には、牡蠣殻より製造した飼料や肥料の販売があるが、まだその絶対量は少ない。

産業副産物である牡蠣殻の大量消費方法の一つに、コンクリート用細骨材としての利用が挙げられる。しかしながら、一般にコンクリート中に貝殻が混入する場合、少量であれば問題無いと言われているが、混入量が増加するにつれてコンクリートの流動性低下や強度低下などが生じると予想される。牡蠣殻の細骨材としての利用に関する研究は数が非常に少ないが、日本と同じく牡蠣の生産量が多い韓国においていくつかの研究例がみられる。例えば、破碎した牡蠣殻を、G.-L. Yoon ら¹⁾や H. Yoon ら²⁾はソイルモルタル用細骨材として、E.-I. Yang ら^{3),4)}はコンクリート用細骨材としての利用について研究を行っている。E.-I. Yang らによると、細骨材を牡蠣殻で置換することでワーカビリティは低下するが、置換率 20% までであれば材齢 28 日の圧縮強度は無混入の場合と比較して同等以上と報告している³⁾。しかし、材齢 28 日を超える長期強度になると牡蠣殻の混入により強度は低

下し、置換率の増加に伴い強度の低下割合は大きくなる傾向を示す⁴⁾。

日本や韓国で養殖されているのは真牡蠣が一般的であるが、牡蠣の生育状況は地域によって異なり、同じ真牡蠣でも北方系のもほど成長が早く大型に達すると言われる。例えば、北海道サロマ湖や厚岸などに生息する真牡蠣は殻高 30cm 以上にもなるが、九州有明海の真牡蠣は殻高 7~8cm 程度にしか達しない⁵⁾。したがって、例え同一の種類であっても牡蠣殻の品質は地域によって差が出ると考えた方がよい。これまで著者らは、牡蠣殻のポーラスコンクリート用骨材としての利用について研究を行ってきている。表-1 に 2010 年に取得した破碎した牡蠣殻の密度と吸水率⁶⁾と参考文献 1)~4)に記載されたデータとを比較した結果を示す。表より、破碎した牡蠣殻の粒径範囲は異なるが、著者らが使用した牡蠣殻は既往の研究で使用された牡蠣殻と比較してかなり品質が悪いことが分かる。

以上を踏まえて、本研究ではコンクリート用細骨材へ

表-1 破碎した牡蠣殻の品質比較

	粒径範囲 (mm)	密度** (g/cm ³)	吸水率 (%)
G.-L. Yoon ¹⁾	1.65*	2.56	—
H. Yoon ²⁾	4.75~2.0	2.38	—
	2.0~0.074	2.41	—
E.-I. Yang ³⁾	5~	2.39	4.4
E.-I. Yang ⁴⁾	5~	2.48	2.9
堀口 ⁶⁾	20~5	1.78(1.48)	20.1
	25~5	1.78(1.47)	20.4
	30~5	1.73(1.43)	21.1

*平均粒径

**文献1)~4)の密度は表乾密度か絶乾密度か不明
文献6)の密度は表乾密度でカッコ内が絶乾密度

*1 呉工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

*2 呉工業高等専門学校 専攻科建設工学専攻

*3 呉工業高等専門学校 環境都市工学科助教 博(工) (正会員)

の破碎した牡蠣殻の適用性について検討を行う。細骨材の一部を破碎した牡蠣殻で置換した牡蠣殻コンクリートについて試験を行い、コンクリートのフレッシュ性状や強度特性に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響を調べた。なお、牡蠣殻コンクリートの適用範囲としては、路面排水側溝や道路境界ブロックといったプレキャストコンクリート(PCa)製品を想定している。PCa製品は現場打ちコンクリートとは異なり、製品自体が所要の品質を有していれば使用される原料やプロセスは重要でないことからリサイクル材を利用しやすい。また、比較的小型の製品が多く、製造量が少ないため機械設備も小さいため、不具合が生じたときの対処が容易である⁷⁾。本研究は、牡蠣殻コンクリートのPCa製品への適用を目指す前段階として行われたものである。

2. 試験概要

2.1 牡蠣殻細骨材の作製

試験に使用した牡蠣殻は、広島県呉市にある牡蠣殻堆積場(写真-1)より採取して、塩分などの不純物を取り除くためにまず水洗いを行った。天日干しにより乾燥させた牡蠣殻は、写真-2に示す貝殻破碎機を利用して破碎した。貝殻破碎機は投入された牡蠣殻を打撃板により破碎し、破碎された牡蠣殻は排出口に配置されている一定直径の穴が開いたふるいを通過して排出される。すなわち、ふるい目の大きさにより破碎程度を変えることができ、粒度の異なる牡蠣殻細骨材を作製できる。本研究では穴の直径が25、15、6mmの3種類のふるいを使用した。最後に5mmふるいを用い、破碎した牡蠣殻から粒径5mm以上のものを取り除いて牡蠣殻細骨材とした。

牡蠣殻細骨材の基礎特性は、粒度、密度、吸水率、単位容積質量、実積率、微粒分量を求めた。ただし、牡蠣

殻細骨材の密度は一般のコンクリート用細骨材よりもかなり小さいと予想されたため、構造用軽量骨材が対象の試験規格に準拠して試験を行った。すなわち、粒度、微粒分量は通常骨材の試験に必要な1/2の試料の量で試験を行い(JIS A 1102, 1103)、単位容積質量および実積率は試料をジギングにより詰め(JIS A 1104)、密度および吸水率は構造用軽量細骨材の試験規格 JIS A 1134 に準拠して試験を行った。



写真-1 牡蠣殻堆積場

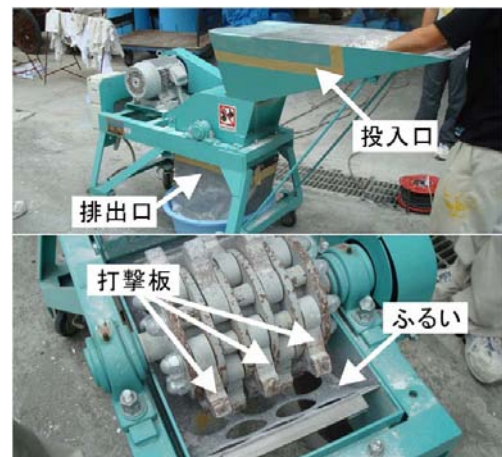


写真-2 貝殻破碎機

表-2 配合表

	牡蠣殻細骨材	oy/s (vol.%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	S	Oy	G	AEWR	AE
PC	-	0	50	45	175	350	795	0	975	3.50	1.05
Oy25-25	Oy25	25					596	143			
Oy25-50		50					398	286			
Oy25-75		75					199	429			
Oy25-100		100					0	572			
Oy15-25	Oy15	25					596	144			
Oy15-50		50					398	288			
Oy15-75		75					199	431			
Oy15-100		100					0	575			
Oy6-25	Oy6	25					596	159			
Oy6-50		50					398	318			
Oy6-75		75					199	477			
Oy6-100		100					0	635			

2.2 牡蠣殻コンクリートの作製

本研究では、コンクリート用細骨材への破碎した牡蠣殻の適用性について検討を行うため、牡蠣殻コンクリート(Oy-Con)を作製して試験を行った。なお、Oy-Conとは、牡蠣殻無混入のベースコンクリート(PC)の細骨材の一部を牡蠣殻細骨材で置換したコンクリートのことを言う。表-2に本研究で作製したPCおよびOy-Conの配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には表乾密度 2.64g/cm^3 の砕砂、粗骨材には表乾密度 2.65g/cm^3 の碎石を用いた。牡蠣殻細骨材は、穴の直径が25, 15, 6mmのふるいを用いた貝殻破碎機で破碎して作製したOy25, Oy15, Oy6の3種類を用いた。砕砂に対する牡蠣殻細骨材の置換率(oys)は容積置換として、0~100%の範囲で置換率を変化させた。また、PCのスランプおよび空気量の目標をそれぞれ $8\pm 2.5\text{cm}$, $4.5\pm 1.5\%$ に設定したため、混和剤としてAE減水剤(AEWR)を単位セメント量の1.0%, 100倍に希釈したAE剤(AE)を0.3%添加した。

試料の練混ぜには公称容量10Lのオムニミキサを用いた。まず、骨材とセメントを30秒間空練りしてから、混和剤を入れた水をミキサ内に投入して90秒間練り混ぜた。なお、粗骨材、砕砂、牡蠣殻細骨材の含水状態は、いずれも表乾状態とした。練り混ぜた試料についてスランプおよび空気量試験を行い、圧縮強度および静弾性係数を求めるために $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を5本作製した。なお、スランプ、圧縮強度、静弾性係数はそれぞれJIS A 1101, 1108, 1149に準拠して試験を行い、本研究の空気量は空気室圧力方法で求めた見掛けの空気量(JIS A 1128)である。試験材齢は28日として、供試体が試験材齢を迎えるまで水温 20°C の水中養生を行った。

3. 試験結果及び考察

3.1 牡蠣殻細骨材の基礎特性

写真-3に本研究で作製した3種類の牡蠣殻細骨材および砕砂(CS)を示す。なお、写真の牡蠣殻細骨材は、破碎した牡蠣殻から既に粒径5mm以上のものを取り除いてある。牡蠣殻細骨材の外観を観察すると、Oy25とOy15とはあまり違いは見られなかった。しかし、Oy6はOy25, Oy15に比べて細かく、Oy25, Oy15に含まれている大きめの扁平な牡蠣殻片の量が明らかに少なかった。

図-1にふるい分け試験により得られた牡蠣殻細骨材の粒度曲線を示す。ただし、図中にはCSの粒度曲線と、2007年制定のコンクリート標準示方書(施工編)に記された細骨材の粒度標準を併記している。図より、Oy25, Oy15, Oy6の順に貝殻破碎機のふるい目が小さくなると牡蠣殻を細かく破碎することができ、牡蠣殻細骨材の粒度が細かい方にシフトすることが分かる。粒度標準およびCSの粒度と比較すると、3種類の牡蠣殻細骨材の中で最も



写真-3 牡蠣殻細骨材および砕砂

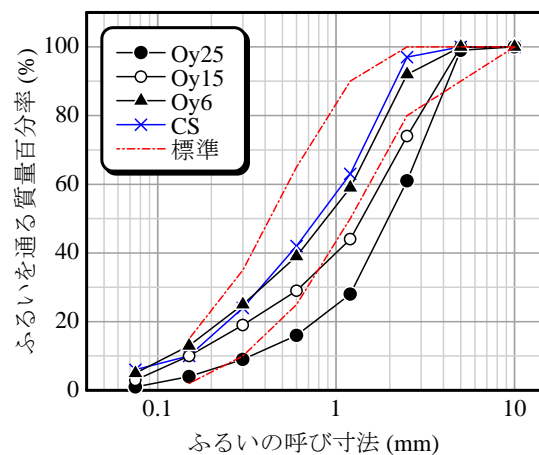


図-1 牡蠣殻細骨材の粒度曲線

表-3 牡蠣殻細骨材の基礎特性試験結果

		Oy25	Oy15	Oy6	CS
粗粒率	(-)	3.83	3.25	2.73	2.63
密度	表乾	1.90	1.91	2.11	2.64
	絶乾	1.54	1.56	1.83	2.58
吸水率	(%)	23.3	22.4	15.0	2.13
単位容積質量	(kg/L)	0.708	0.774	0.937	1.747
実積率	(%)	46.1	50.3	60.9	67.7
微粒分量	(%)	9.2	9.0	12.7	9.3

細かく破碎したOy6だけが粒度標準内に収まり、CSの粒度に近い傾向を示した。

表-3に牡蠣殻細骨材の基礎特性試験結果を示す。表より、Oy25, Oy15, Oy6の順に牡蠣殻細骨材が細くなると、牡蠣殻細骨材の粗粒率、吸水率は小さくなり、密度、単位容積質量、実積率は大きくなり、微粒分量は多くなることが分かる。言い換えれば、粗な内部構造で細長く湾曲した形状を持った牡蠣殻を細かく破碎することで、細骨材としての粒度、形状は改善され、比較的密な内部

構造を有する品質の高い牡蠣殻細骨材を作製することが出来ると言える。ただし、最も品質の高い Oy6 でも CS と比較すると密度、実績率は小さく、吸水率、微粒分量は高いことから、CS よりは品質が低いことは否めない。

牡蠣殻の大部分は、チョーク層と呼ばれる薄い板状の方解石の結晶が組み合わされた空隙の多い構造で占められていることから、牡蠣殻自体は軽くて脆い⁸⁾。牡蠣殻を貝殻破砕機に投入すると牡蠣殻の弱い部分、すなわち空隙から破砕されると予想され、その結果、細かく破砕された牡蠣殻細骨材ほど密度が高く、吸水率が低くなり、骨材の内部構造が改善される。また、牡蠣殻は細長く湾曲した形状であるが、破砕することで扁平な形状になり、さらに細かく破砕することで粉末状になっていく。ふるい分け試験の際に粒径範囲毎の牡蠣殻細骨材のサンプルを採取し観察したところ、肉眼では粒径 0.6mm の牡蠣殻細骨材までが扁平な形状をしていることが確認された。扁平な形状をした骨材はコンクリートの流動性や強度、耐久性に悪影響を及ぼすため、牡蠣殻を細かく破砕することで、牡蠣殻細骨材の内部構造だけでなく、形状まで改善されると言える。

3.2 フレッシュ性状に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響

図-2 にコンクリートのスランブに及ぼす牡蠣殻細骨材の影響を示す。数値だけをみれば、Oy25-100 以外はベースコンクリートの目標スランブ 8cm の ± 1.5 cm 以内に収まっている。しかし、試料の練り上がった状態を観察すると、牡蠣殻細骨材置換率 25, 50% の Oy-Con では PC の練上がり状態と何ら変わりはないが、置換率 75, 100% になると Oy25, Oy15 を用いた Oy-Con は若干水っぽくなり材料分離の傾向が見られた。また、スランブ試験終了後のスランブ形状を観察すると、Oy25, Oy15 を用いた Oy-Con では、スランブが部分的に崩れる傾向を示した。Oy6 を用いた Oy-Con については、置換率が高くなって材料分離の傾向は見られなかった。写真-4 に置換率 100% の Oy-Con のスランブ形状を示す。なお、試料からの臭いは、個人的な差はあると思われるが、置換率 75, 100% の Oy-Con では海産物特有の生臭い臭いが強いと感じられた。

図-3 にコンクリートの空気量に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響を示す。図より、Oy-Con に用いた牡蠣殻細骨材の種類により、空気量の変化の傾向は異なることが分かる。Oy25, Oy6 を用いた Oy-Con 両者とも牡蠣殻細骨材置換率の増加に伴い空気量は増大する傾向を示すが、Oy25 の場合は置換率 50% までは空気量が一定であるのに対して Oy6 は比例的に増大していく。Oy15 を用いた Oy-Con の場合は、置換率の増加に伴い空気量は増減して一定の傾向を示さないが、置換率 100% では Oy25, Oy6 と同様に 8% 近くの高い値を示した。

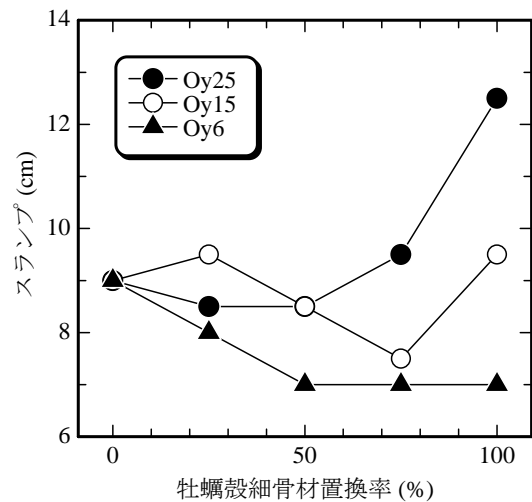


図-2 スランブに及ぼす牡蠣殻細骨材の影響

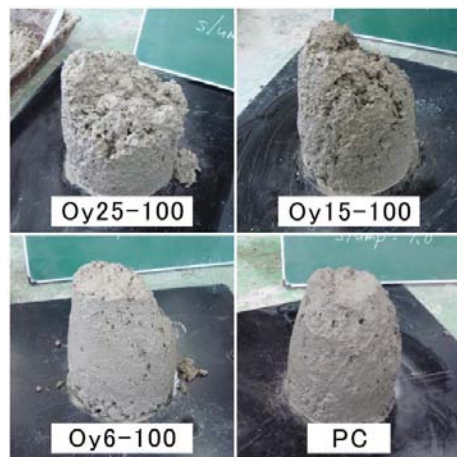


写真-4 置換率 100% のスランブ形状

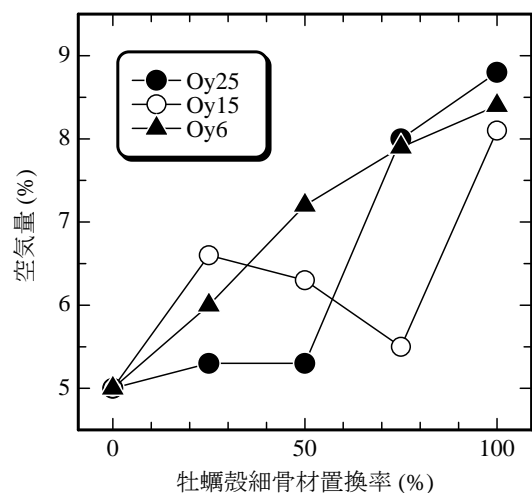


図-3 空気量に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響

細骨材がコンクリートのフレッシュ性状に影響を及ぼす要因として、粒度や形状寸法など様々な要因が挙げられる。スランブ、空気量試験の結果より、粗めに破砕された Oy25, Oy15 は扁平な形状の牡蠣殻片を多く含むために骨材による巻き込み空気量が増加し、細粒分が少ないために骨材自身の保水性が悪いものと推察される。細か

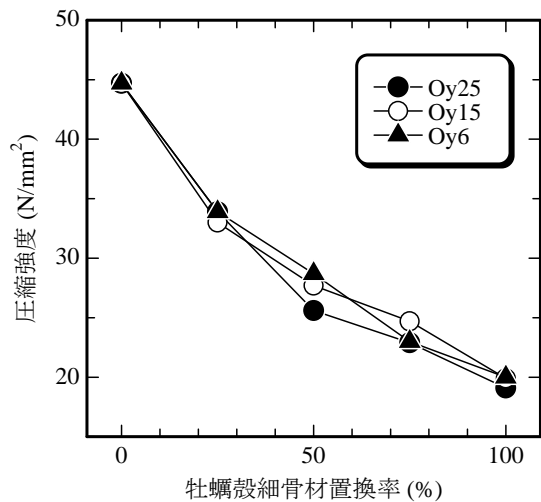


図-4 圧縮強度に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響

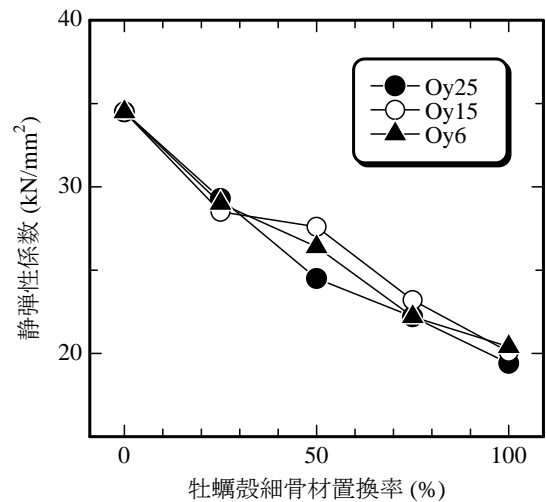


図-5 静弾性係数に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響



写真-5 牡蠣殻コンクリートの破壊状況 (Oy25-25)

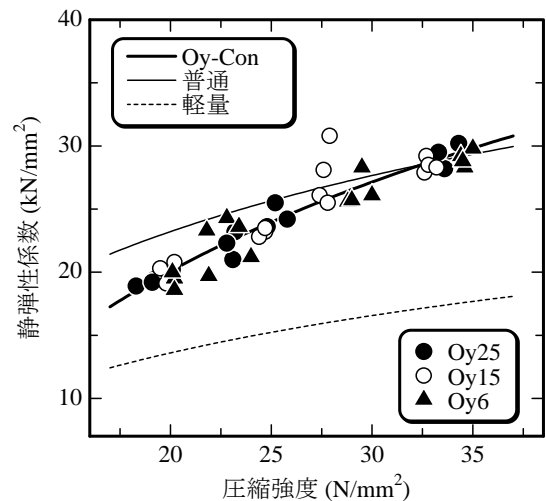


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

く破碎した Oy6 については、粒度が砕砂と近いためカスランプ自体には影響は見られないが、Oy25、Oy15 と同様に巻込み空気量の増加が見られる。Oy-Con のフレッシュ性状より総合的に評価すると、現段階では3種類の牡蠣殻細骨材のうち、高い牡蠣殻細骨材置換率でも材料分離が起きないOy6が最もコンクリート用細骨材として適しているが、AE 剤や消泡剤による空気量調整は必要である。Oy25、Oy15 については高い置換率では材料分離の傾向が見られたため、単位水量の減少や細骨材率の増加といった配合の検討や、Oy6 と同様に混和剤による空気量の調整が必要である。また、Oy25、Oy15 は骨材の細粒分が少ないため、粒度調整や石灰石微粉末、フライアッシュといった粉体の使用も効果的である。

3.3 強度特性に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響

図-4 にコンクリートの圧縮強度に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響を示す。ただし、図に示す試験値は供試体5本の平均である。図より、Oy-Con に用いた牡蠣殻細骨材の種類に関わらず、牡蠣殻細骨材置換率の増加に伴い圧縮強度は低下する傾向を示すことが分かる。最も粗く破碎されたOy25を用いたOy-Conの圧縮強度が他に比べて低

くなっているが、その差はわずかである。Oy-Con の圧縮強度を牡蠣殻無混入のPCと比較すると、置換率25%で約7割、置換率50%で約6割、置換率75%で約5割、置換率100%で約4割の強度を示す。写真-5に圧縮試験終了後の典型的なOy-Conの破壊状況を示す。写真より、一般的なコンクリートに見られるせん断型の破壊が、牡蠣殻を混入したOy-Conでも生じていることが分かる。なお、牡蠣殻特有の臭いは供試体自体からはあまり感じられないが、圧縮試験終了後の供試体の破壊面からは臭いが感じられ、牡蠣殻置換率が高いほどその臭いは強くなる傾向を示した。

図-5 にコンクリートの静弾性係数に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響を示す。ただし、図に示す試験値は供試体3~5本の平均である。図より、Oy-Con の静弾性係数は圧縮強度の試験結果と同様に、牡蠣殻細骨材の種類に関わらず牡蠣殻細骨材置換率の増加に伴い静弾性係数は低下する傾向を示すことが分かった。図-6 にOy-Con の圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。ただし、図中には2007

年制定のコンクリート標準示方書(設計編)に記載されている、普通骨材および軽量骨材を使用した普通コンクリート(普通)と軽量コンクリート(軽量)の静弾性係数値より求めた近似曲線を併記している。図より、Oy-Conの圧縮強度と静弾性係数との間には一般的なコンクリートと同様に相関関係が見られ、Oy-Conの静弾性係数は圧縮強度の増加とともに増大する傾向を示すことが分かる。ただし、Oy-Conに用いた牡蠣殻細骨材の影響は見られなかった。普通コンクリートの圧縮強度と弾性係数の関係と比較すると、圧縮強度が $32\sim 35\text{N/mm}^2$ の範囲ではOy-Conの剛性は普通コンクリートとほぼ同一であるが、強度が低くなる、すなわち牡蠣殻置換率が増加すると静弾性係数が低下する傾向を示す。また、軽量コンクリートとOy-Conとを比較するとOy-Conの方が剛性は高いが、示方書に記された軽量コンクリートの骨材は細骨材だけでなく粗骨材も軽量骨材を使用しているため、単純には評価できない。

前述のように、牡蠣殻は空隙が多い内部構造を持つため非常に脆く、牡蠣殻細骨材を多く混入することで圧縮強度や弾性係数といった強度特性が低下することは容易に予想される。以前取得した骨材強度を示す10%破砕荷重は、砕石が349.1kNであるのに対して、牡蠣殻骨材(粒径 $5\sim 20\text{mm}$)は29.5kNと砕石の1/10以下の低い値を示した⁹⁾。牡蠣殻骨材の基礎特性試験より、牡蠣殻を細かく破砕して品質が改善されることから強度面での改善効果も期待されたが、強度特性に及ぼす牡蠣殻細骨材の種類による差異は見られなかった。ただし、本研究ではコンクリートのフレッシュ性状および強度特性に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響を検討するために、一定のワーカビリティを持つ試料で作製した供試体による試験を行っていない。そのため、Oy-Conの圧縮強度にはブリーディングや空気量の差異などが影響することが考えられ、今後はスランプおよび空気量の調整を行った供試体による強度試験が必要である。

4. まとめ

本研究では、細骨材の一部を破砕した牡蠣殻で置換した牡蠣殻コンクリート(Oy-Con)について試験を行い、フレッシュ性状や強度特性に及ぼす牡蠣殻細骨材の影響を調べた。以下に本研究により得られた知見を示す。

- (1) 牡蠣殻を細かく破砕することで、牡蠣殻細骨材の密度は高く、吸水率は低く、単位容積質量、実績率は大きくなることから、品質の高い牡蠣殻細骨材を作製することができる。
- (2) Oy-Conの練上がり状態やスランプ試験より、粗めに破砕されたOy25、Oy15を用いたOy-Conは置換率75%

以上になると材料分離の傾向が見られたが、Oy6の場合は材料分離の傾向は見られなかった。

- (3) Oy-Conの空気量試験より、牡蠣殻細骨材の種類により空気量の変化の傾向は異なるが、置換率の増加に伴い空気量は増大する傾向を示し、置換率100%で8~9%の高い値となった。
- (4) Oy-Conに用いた牡蠣殻細骨材の種類に関わらず、牡蠣殻細骨材置換率の増加に伴い圧縮強度および弾性係数は低下する傾向を示した。

謝辞: 本研究の一部は、平成23年度呉地域オープンカレッジネットワーク会議地域活性化研究重点助成を受けて行い、株式会社フローリックから混和剤を提供して頂きました。また、実験を行う際には、呉高専環境都市工学科の白井敦士君、村上隆則君から多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Yoon, G.-L. et al.: Chemical-mechanical characteristics of crushed oyster-shell, Waste Management, Vol.23, pp.825-834, 2003
- 2) Yoon, H. et al.: Oyster shell as substitute for aggregate in mortar, Waste Management and Research, Vol.22, pp.158-170, 2004
- 3) Yang, E.-I., Yi, S.-T. and Leem, Y.-M.: Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part I. Fundamental properties, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.2175-2182, 2005
- 4) Yang, E.-I. et al.: Effect of partial replacement of sand with dry oyster shell on the long-term performance of concrete, Construction and Building Materials, Vol. 24, pp.758-765, 2010
- 5) 森勝義編: 水産増養殖システム3 貝類・甲殻類・ウニ類・藻類, 恒星社厚生閣, pp.171-267, 2005
- 6) 堀口至, 三村陽一: 粒径の異なる骨材を使用した牡蠣殻ポーラスコンクリートの基礎特性, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.530-536, 2010
- 7) 日本コンクリート工学協会: プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会報告書, pp.235-264, 2009.8
- 8) 奥谷喬司編: 貝のミラクル 軟体動物の最新学, 東海大学出版会, pp.19-38, 1997
- 9) 堀口至, 竹村和夫: 牡蠣殻骨材を用いたポーラスコンクリートの基礎特性, セメント・コンクリート論文集, No.62, pp.538-543, 2008