

論文 安心院産黒曜石発泡パーライトの諸特性とそれを用いた軽量モルタルの強度性状

山田 高慶^{*1}・佐藤 嘉昭^{*2}・大谷 俊浩^{*3}・榎 孝典^{*4}

要旨：本研究では大分県安心院産の黒曜石を発泡させたパーライトを用いた軽量モルタルの諸特性を明らかにすることを目的に、黒曜石の発泡性状やパーライトの各種物性試験、パーライトを用いたモルタルの流動性および圧縮強度試験を実施した。その結果、黒曜石の発泡率は精石の粒度および構造水率が大きいほど高くなること、パーライトの体積減少率は単位容積質量が大きいほど小さくなること、モルタルの圧縮強度は単位容積質量の増加とともに直線的に増加することが分かった。また、安心院産パーライトは市販品よりも単位容積質量が大きいため硬く、同一 S/C 嵩比で比較したモルタルでも高い圧縮強度を示すことが分かった。

キーワード：黒曜石発泡パーライト、改質フライアッシュ、軽量モルタル、圧縮強度、発泡率

1. はじめに

黒曜石や真珠岩を粉砕・焼成・発泡させて得られる材料はパーライトと呼ばれ、断熱性、保温性および耐火性に優れた多孔質の軽量素材であり、建築資材や土木・緑化資材として多用されている¹⁾。しかし、その多孔質である特性のためパーライト自体は強度が低く、練混ぜた際に互いに擦れあって元の骨材としての形状や大きさを保つことができず、混合・混練・成形などの工程において容易に潰れてしまうことが指摘されている^{2, 3, 4)}。しかし、近年、大分県安心院（あじむ）地区から採取される黒曜石を用いて、市販のパーライトよりも硬い特徴を有する発泡パーライトについての開発が進められている。これにより、骨材の脆さを克服できれば、従来よりも高い強度の軽量モルタルを製造できる可能性があり、また、貴重な地域資源の用途拡大にも貢献することができる。

そこで、本研究では大分県安心院産の黒曜石から製造されたパーライトを用いた軽量モルタルを開発することを目的に実験を行った。本報では、まず黒曜石の発泡性状について把握するため、安心院産の黒曜石を用いて粒径の違いや加熱温度が発泡率に及ぼす影響について検討を行った。次に、黒曜石発泡パーライトの物性を把握するため、市販品も含めた 3 種類のパーライトに対して単位容積質量試験および圧縮載荷による体積減少率試験等の各種骨材試験を実施した。さらに、それらのパーライトを用いた軽量モルタルについてパーライト混入量を変化させた試験練りを行い、フロー値および練り上がり時の単位容積質量を測定し、また材齢 28 日において圧縮強度試験を実施した。

2. 黒曜石の発泡性状

2.1 使用材料および実験方法

安心院産黒曜石の発泡性状を把握することを目的に、精石を用いてマッフル炉による簡易的な発泡試験を実施した。なお、精石とは原石をクラッシャーにより破碎し水で洗浄することで生成されたものである。発泡試験には全て安心院産の黒曜石を使用した。その採掘する場所によっては、例えば地表に露出している層などでは風化などの影響により含水量などに差が生じていることがある。そこで、実験には同じ安心院産でも岩盤や採掘深さが異なる A₁, A₂, A₃ の 3 種類の黒曜石精石を使用した。また、精石の粒度は 1mm 以下、2.5～4mm および 2.5～4mm の 3 種類を使用した。

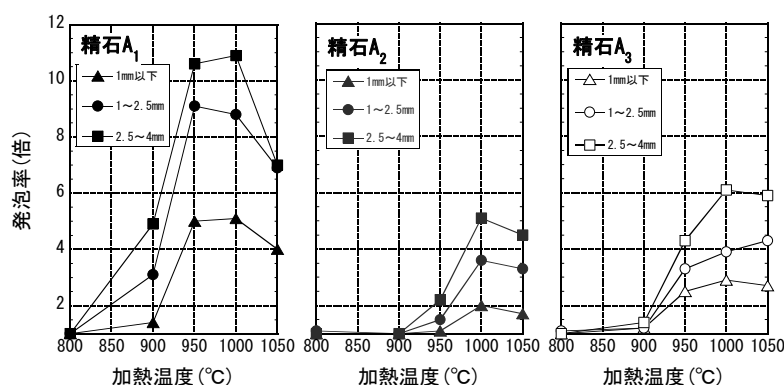
黒曜石の発泡率には、加熱温度や内部に含有する水分量（以下、構造水率）が影響している⁵⁾。構造水率とは黒曜石が含有する水分のうち発泡に寄与する水分量のことである。黒曜石は粘性の高いマグマが結晶化される前に急冷・固結することで生成される火山岩の一種であるが、その急速な生成により内部に水分を含んだ状態にある。黒曜石は高熱を加えられると、この構造水が気化・膨張することで多孔質の発泡体を形成する。黒曜石が含有する水分には、この構造水の他に表面部分に付着し発泡には寄与しない水分がある。このため、構造水率は全水分率から発泡に寄与しない水分率（以下、含水率）を差し引くことによって算出される。全水分率は加熱試験前後の質量差から算出し、含水率は電気乾燥炉にて 105℃・24 時間乾燥前後の質量差から算出した。加熱試験にはマッフル炉を用い、加熱温度を 800, 900, 950, 1000, 1050℃の 5 水準とし、設定温度の維持時間は 15

*1 大分大学 大学院工学研究科博士後期課程 修士（工学）（(株)ゼロテクノ）（正会員）

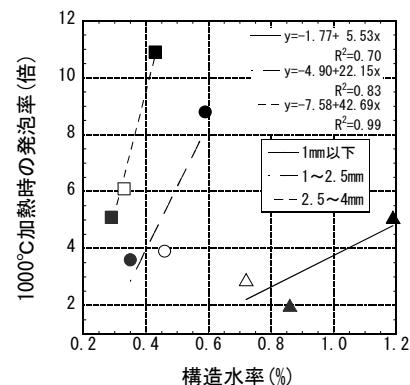
*2 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース教授 工博（正会員）

*3 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース准教授 博士（工学）（正会員）

*4 安心院パーライト工業（株） 取締役専務



図－１ 加熱温度と発泡率の関係



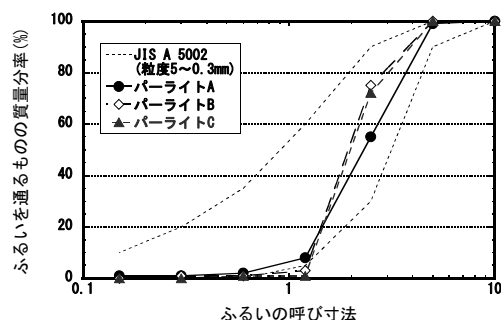
図－２ 構造水率と発泡率の関係

分とした。試料量は各 10g とし、平型蒸発皿に入れ炉内に静置し加熱した。発泡率は、試料の加熱後の嵩容積を加熱前の嵩容積で除して算出した。嵩容積の測定は容量 50ml のメスシリンダーを用い、発泡により粒径が大きくなった試料（精石粒度 2.5～4mm）については容量 250ml のものを使用した。

2.2 実験結果および考察

図－１に加熱温度と発泡率の関係を示す。図より、精石の種類および粒度によって発泡率が大きく異なり、全体的にいずれの精石においても粒度が大きく、また加熱温度が高くなるに従い発泡率も大きくなる傾向を示した。しかし、その多くが 950℃あるいは 1000℃をピークに、1050℃では低下したことから、必ずしも高温であれば発泡率も高くなるということではなく、精石の種類によって各々適切な加熱温度が存在することが分かる。

図－２に構造水率と 1000℃加熱時の発泡率との関係を示す。1000℃加熱時の発泡率を用いたのは、ほとんどの試料が最大値を示していることによる。図に示すように、同一粒度で比較すると構造水率が多いほど発泡率も高いことが分かる。これらのことから、黒曜石発泡パーライトの製造においては、その構造水率を把握し適切な加熱温度で焼成することが重要であることが分かる。



図－３ 粒度分布

モルタルを作製する際のパーライトの粒度として「JIS A 5002 構造用軽量コンクリート骨材」の軽量細骨材の粒度規定（粒の大きさの範囲 5～0.3mm）を参考としたためである。安心院産（A）が適合する混合比率が 7：3 であったことから B および C も同様に 7：3 で混合した。図－３に混合したパーライトの粒度分布を示す。図より、A は規定に収まり、B および C は篩の呼び寸法 1.2mm において僅かに外れた。

図－４に使用した各パーライトのデジタル顕微鏡画像を示す。A および B は表面に少し凹凸がみられ、指先で触れるとややざらついた感触がある。C は凹凸が少なく、触感も滑らかである。

（１）単位容積質量および浮粒率

単位容積質量は「JIS A 5007 パーライト」に、浮粒率は「JIS A 1143 軽量粗骨材の浮粒率の試験方法」に準じて行った。

（２）気孔率

気孔率とは粒子の全体積に対する内部空隙体積の割合である。図－５にマイクロフォーカス X 線 CT 装置によるパーライト断面の一例を示す。図に示すように、黒曜石発泡パーライトは内部に独立した気泡を有していることが分かる。本測定ではこの X 線 CT 画像を用いて粒子全体の体積および隔壁体積が占める割合を求め算出した。

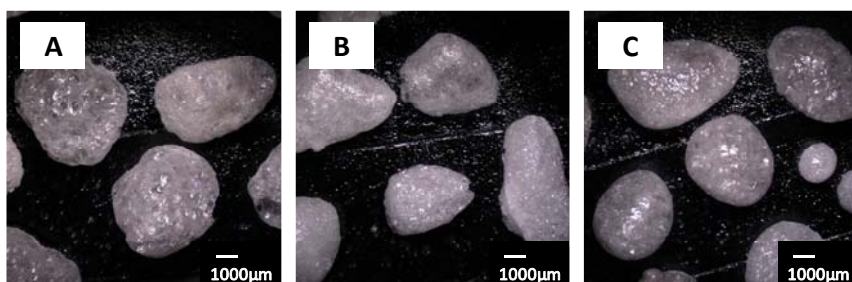
（３）BET 比表面積

BET 比表面積は、比表面積・細孔分布測定装置を用い、

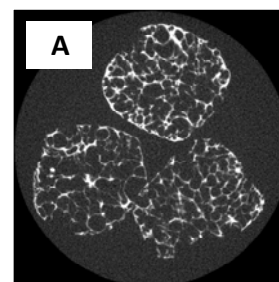
3. 黒曜石発泡パーライトの物性

3.1 測定方法

異なる産地で製造された A、B および C の 3 種類の黒曜石発泡パーライト（A が安心院産、B および C がそれぞれ別々の産地で製造された市販品）について各種物性試験を行った。なお、パーライトの粒度は製造元によって異なることから、安心院産パーライトの分類（1～3mm、3～5mm）を参考に市販品もできるだけこれに合わせ調整した。ただし、パーライト C については市販品の粒度が安心院産の分類に近い 1.2～2.5mm および 2.5～5mm であったためそのまま使用した。また、1～3mm と 3～5mm を質量比 7：3 で混合した試料も作製し測定した。これは、



図－４ パーライトの電子顕微鏡画像の一例



図－５ X線 CT 装置による
パーライト断面の一例

窒素吸着法により測定した。

(4) 体積減少率

体積減少率試験は、図－６に示すように鋼鉄製の円筒（内径 41.8mm、深さ 96mm）にパーライトを 80mm 程度まで入れ、その上部に加圧板（直径 41.2mm）および加圧棒を載せ荷重を加え実施した。体積減少率の測定は、パーライトに 6N/mm² の圧力を加えたときの体積の減少量を載荷前体積に対する百分率で求めた³⁾。なお、6N/mm² 時の荷重は 8kN である。

(5) 熱伝導率

熱伝導率は内部空隙を含む試料を粒子状のまま測定できる定常法熱伝導率測定装置を用い、専用フレーム（内寸 254×254×25mm）に試料を敷き詰めて測定した。

3.2 測定結果および考察

表－１に測定結果の一覧を示す。

図－７に粒度と単位容積質量の関係を示す。図より、単位容積質量はパーライト B を除き粒度が大きいほど小さくなり、混合試料の値は混合前試料の範囲内を示した。また、B および C に比べ A は高い単位容積質量を示した。

図－８に単位容積質量と気孔率の関係を示す。図より、単位容積質量が大きいほど気孔率も大きくなることから分かる。また、A は単位容積質量が大きいこともあり、B および C よりも低い気孔率を示した。

図－９に BET 比表面積を示す。パーライト種類による差はあるものの、いずれのパーライトにおいても粒度が大きい方が BET 比表面積も大きな値を示した。これは、パーライトは精石の粒度が大きいほど発泡率も大きくなる傾向にあることから、パーライトの粒度が大きいほど内部空隙も多くなり、その内部空隙も測定されたため表面積が大きくなったものと考えられる。

図－１０にパーライトの体積減少率試験における荷重－変位曲線の一例を示す。いずれも荷重が 1～2kN 付近で曲線の傾きが急に増加した。これは、載荷初期は骨材内部の空隙から潰れていくが、載荷がある程度進行すると骨材が円筒容器内で圧密された状態となるため荷重が急に増加したものと思われる。この初期勾配および載荷終了時（8kN）における変位とともに、パーライトの種類による違いが認められた。

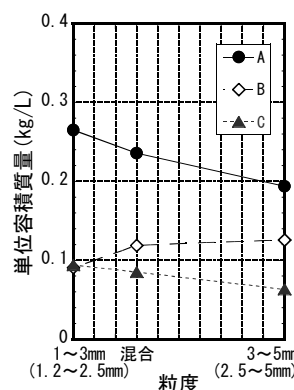


図－６ 体積減少率試験

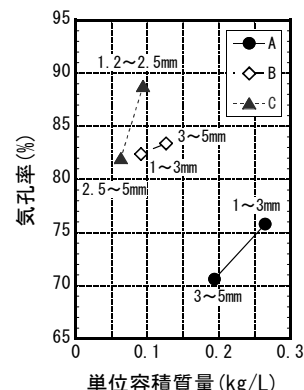
表－１ 黒曜石発泡パーライトの物性

種類	粒度 (mm)	単位 容積 質量 (kg/L)	浮粒 率 (%)	気孔 率 (%)	BET 比表面積 (m ² /g)	体積減少率		熱伝 導率 (W/mK)
						減少 率 (%)	初期 勾配 (kN/mm)	
A	1～3	0.265	－	75.8	6.19	72.2	0.0233	0.075
	3～5	0.194	－	70.6	10.34	80.2	0.0121	0.068
	混合	0.236	89.6	－	－	76.1	0.0214	0.075
B	1～3	0.091	－	82.4	5.93	86.0	0.0051	0.059
	3～5	0.126	－	83.4	6.52	83.5	0.0084	0.060
	混合	0.119	87.2	－	－	84.1	0.0059	0.058
C	1.2～2.5	0.094	－	88.8	9.45	89.5	0.0034	0.052
	2.5～5	0.063	－	82.0	12.97	93.4	0.0029	0.052
	混合	0.085	99.0	－	－	91.0	0.0033	0.054

A：安心院産パーライト B、C：市販のパーライト



図－７ 粒度と
単位容積質量の関係



図－８ 単位容積質量と
気孔率の関係

図－１１にパーライトの単位容積質量と体積減少率の関係を示す。単位容積質量が大きくなるに従い体積減少率は小さくなり、またその関係は直線関係となった。このことから、パーライト粒子の圧縮強度は内部空隙の量

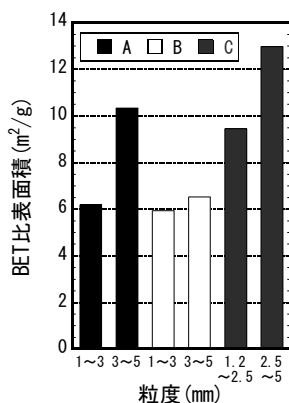


図-9 BET比表面積

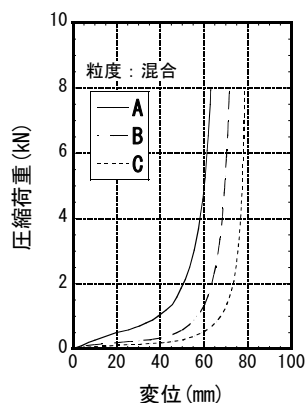


図-10 体積減少率試験の荷重-変位曲線

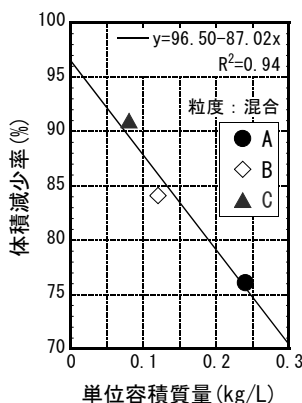


図-11 単位容積質量と体積減少率の関係

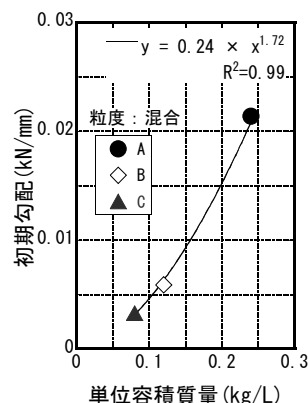


図-12 単位容積質量と荷重-変位曲線の初期勾配の関係

に依存していることが分かる。また、図-10の荷重-変位曲線における初期勾配はパーライト粒子の硬さを表していると考えられることから、この勾配がほぼ直線となる区間(変位 10~30mm)における傾きを求めた。図-12に初期勾配と単位容積質量の関係について示す。図より、単位容積質量が大きくなるほど初期勾配も大きくなることが分かる。

図-13に単位容積質量と熱伝導率の関係を示す。図より、パーライトの種類に関わらず、単位容積質量が増加するに従い熱伝導率は直線的に増加することが分かる。

これらのことから、安心院産パーライトは内部空隙が少なく単位容積質量が大きいことにより、市販品に比べて硬く、熱伝導率が高い特徴があることが分かった。

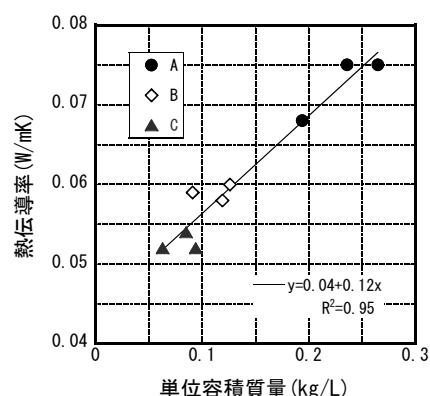


図-13 単位容積質量と熱伝導率の関係

4. 軽量モルタルの強度性状

4.1 使用材料および調査

表-2に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを、混和材は改質フライアッシュ(Carbon-free Fly Ash, 以下 CfFA)を使用した。CfFAとは、筆者らによって開発された処理システム⁶⁾により強熱減量を1%以下に削減したフライアッシュである。フライアッシュはガラス質であることから断熱性を有する建築用内外装材として既に利用されており⁷⁾、本研究における軽量モルタルも断熱材としての用途を視野に入れていることから CfFA を使用した。細骨材には3節で用いたものと同じ、A、B および C の3種類のパーライトを用い、粒度は混合したものを、気乾状態で使用した。

表-3に調査を示す。水結合材比は55%の1水準とし、パーライトの混入量はセメントの嵩容積に対するパーライトの嵩容積(以下、S/C嵩比)を1, 2, 2.5, 3の4水準とした。また CfFA 混入率も嵩比を用い、粉体量の25%とした。練り量はペースト量を1Lで固定とし、S/C嵩比にしたがいパーライト量を変化させた。なお、パーライトを気乾状態で使用し、調査に嵩比を用いた理由は、実際にパーライトを使用する場合の多くが気乾状態である

表-2 使用材料

種類	記号	材料および物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント 嵩密度*1.67g/cm³ 密度 3.16g/cm³
混和材	CfFA	改質フライアッシュ(JIS II種) 嵩密度*1.22g/cm³ 密度 2.21g/cm³ 強熱減量 0.68%
細骨材	S	黒曜石発泡パーライト(混合) A, B, C ※物性は表-1に記載
水	W	上水道水

*1: 嵩密度はタッピング式密充填嵩密度試験器で測定(1000打)

表-3 調査

種類	W/B (%)	CfFA/B (嵩.%)	S/C 嵩比	嵩比率*1		
				W	C	CfFA
-			0			
A	55.0	25.0	1.0	1.14	1.00	0.33
B			2.0			
			2.5			
C			3.0			

*1: セメントの嵩容積を1として表記、W/B: 水結合材比
B: 結合材(C+CfFA)、S/C嵩比: 細骨材とセメントの嵩容積比

こと、またパーライトの表乾状態の判定が難しいため正確な密度および吸水率の測定ができず、容積調査が困難であることによる。そこで、寺田らの研究⁸⁾を参考に気乾状態での使用および嵩容積比による調査とした。

4.2 実験方法

練混ぜは恒温恒湿室内(20±1℃, 60±5%R.H.)にて容量5Lのモルタルミキサを用いて行った。練混ぜ方法は、

練り鉢にセメント、CfFA、パーライトの順に入れ、数秒の攪拌を行ったのち注水し、低速で 120 秒練り混ぜた。試験は流動性として 0 打および 15 打のフロー値を測定し、また、練り上がった試料の容積および質量を求め単位容積質量を算出した。試料容積の測定は骨材試験用容器(容量 2L)に練り上がった試料の全量を入れて上面を均し、ノギスを用いて容器の淵から試料上面までの深さを 6 点測定し算出した。圧縮強度試験用供試体は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ のプラスチック製型枠を用いて各調合 4 体作製し、材齢 1 日で脱型後、試験材齢 28 日まで恒温恒湿室内にて気中養生とした。圧縮強度試験は上面に硫黄キャッピング処理を行い、ひずみを測定しヤング係数を算出した。

4.3 実験結果および考察

表-4 に実験結果の一覧を示す。練り上がりの単位容積質量の算出には試料の質量および容積が必要であるが、試料はミキサのパドルや練り鉢などに付着するため、その全量を正確に採取することはできない。そこで、採取の精度を確認するため、試料の減少率を算出した。表に示すように減少率は全体として 2~4% 程度の範囲に収まっていることから、試料の採取は概ね等しく出来ていると思われる。

図-14 に S/C 嵩比と 0 打および 15 打フロー値との関係を示す。図より、S/C 嵩比が増加するに従いフロー値は低下した。また、パーライト A および C はほぼ同程度の値で推移したが、B は S/C 嵩比が 2.5 において著しく低下した。

図-15 に S/C 嵩比と試料容積の関係を示し、図-16 に S/C 嵩比と単位容積質量の関係を示す。図-15 より、パーライト A および C は S/C 嵩比の増加に伴いほぼ直線的かつ同程度の増加量で推移したが、B は S/C 嵩比 2 以上において容積の増加が止まり、横ばいとなった。また、図-16 より、パーライト A および C の単位容積質量は S/C 嵩比の増加に伴い低下したが、B は S/C 嵩比 2 以上において単位容積質量が増加に転じた。これらのことから、パーライト B の S/C 嵩比 2 以上の調査では、パーライトの摩耗あるいは破砕等による骨材容積の減少が生じ、それに伴いモルタル容積が減少していることが考えられる。

パーライト B に、摩耗によると思われるモルタル容積の減少が認められたことから、パーライト B と、比較として A について骨材の破砕率試験を実施した。破砕率試験は JHS-109 (Nexco 規格)における室内破砕試験に準拠し実施した。破砕率は、圧縮試験後の試料に篩分け試験を行い、試験前の粒度範囲よりも小さくなった分の試料質量を圧縮試験前の試料質量で除した値の百分率で求めた。図-17 に積載荷重と破砕率の関係を示す。図より、終局的な破砕率を見ると、パーライト B の方が A に

表-4 実験結果

種類	S/C 嵩比	フレッシュ性状				硬化性状		
		フロー値 (mm)		減少 率 (%)	試料 容積 (ml)	γ_1 (kg/L)	圧縮 強度 (N/mm ²)	ヤング 係数 (kN/mm ²)
		0 打	15 打					
-	0	252	288	3.91	977.2	1.71	15.5	6.06
A	1.0	229	288	3.85	1242.6	1.44	10.4	4.85
	2.0	177	248	2.86	1536.4	1.26	8.73	4.60
	2.5	152	233	2.15	1639.8	1.23	8.63	4.44
	3.0	111	187	2.74	1744.8	1.18	8.73	4.47
B	1.0	204	264	3.44	1238.8	1.40	9.57	4.66
	2.0	168	238	2.40	1461.0	1.25	8.50	3.87
	2.5	114	201	2.13	1473.8	1.26	9.84	4.50
	3.0	110	190	2.11	1452.6	1.30	10.7	4.81
C	1.0	222	278	3.44	1222.9	1.41	8.43	4.43
	2.0	186	249	2.76	1497.8	1.19	7.43	3.46
	2.5	162	233	2.84	1598.7	1.12	6.81	3.11
	3.0	110	190	2.28	1700.6	1.08	5.61	2.73

*1: 300mm 以上

減少率: (計量質量-練り上がり質量)/計量質量 $\times 100$

γ_1 : 単位容積質量 (練り上がり質量を試料容積で除した値)

γ_2 : 単位容積質量 (材齢 28 日の圧縮供試体の値)

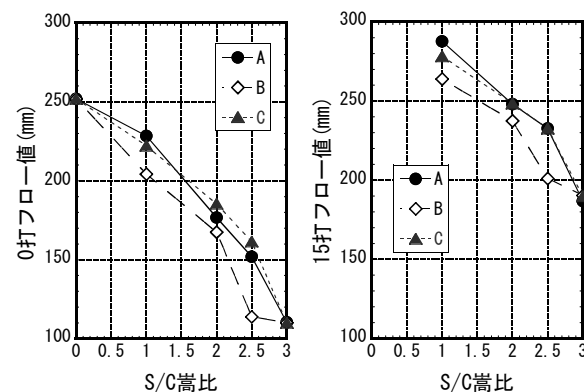


図-14 S/C 嵩比とフロー値の関係

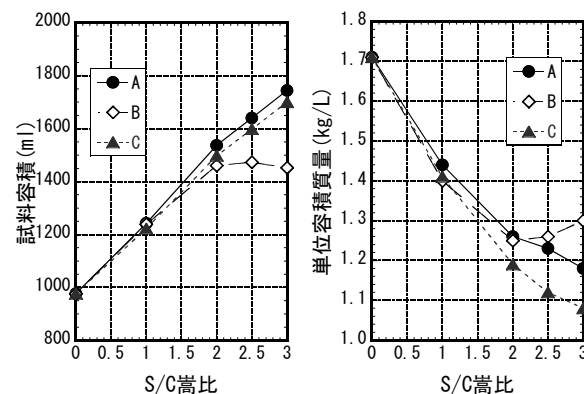


図-15 S/C 嵩比と
試料容積の関係

図-16 S/C 嵩比と
単位容積質量の関係

比べて非常に大きな値を示した。このことから、パーライト B は比較的脆い性質であると言え、これが練混ぜ時における容積減少に繋がったものと考えられる。

図-18 に S/C 嵩比と圧縮強度の関係を示す。図より、S/C 嵩比の増加に伴い圧縮強度は低下した。パーライト B の S/C 嵩比 2.5 以上において圧縮強度が増加しているが、これは図-15 および図-16 において示したように、パーライト B は練混ぜにより摩耗・破砕が生じてお

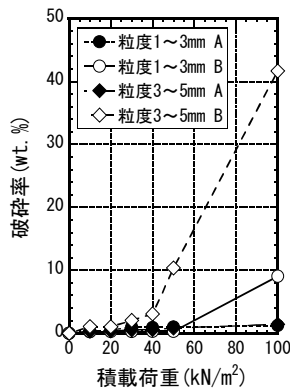


図-17 積載荷重と破砕率の関係

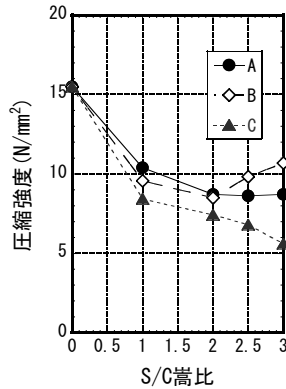


図-18 S/C 嵩比と圧縮強度の関係

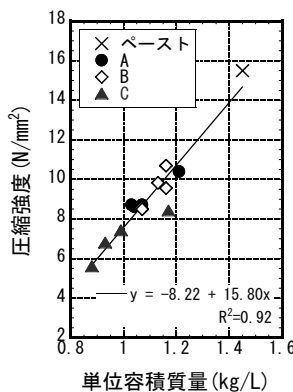


図-19 単位容積質量と圧縮強度の関係

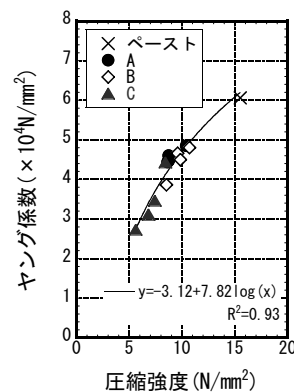


図-20 圧縮強度とヤング係数の関係

り、それに伴い単位容積質量が増加していることが原因と考えられる。その点を除くと、全体的にパーライト A が高い強度を示したことが分かる。

図-19 に単位容積質量と圧縮強度の関係を示す。図より、パーライトモルタルの圧縮強度は、パーライト種類の違いに関わらず単位容積質量と直線関係にあることが分かる。

図-20 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図より、圧縮強度の増加に伴いヤング係数も増加した。また、その関係は、パーライト種類が異なっても一つの近似曲線で表せることが分かった。

これらのことから、安心院産パーライトを用いたモルタルは、同一 S/C 嵩比で市販品と比較した場合、流動性は同等、圧縮強度は高い値を示すことが分かった。

5. まとめ

大分県安心院産の黒曜石発泡パーライトおよび市販のパーライトを用いた骨材実験およびモルタル実験を行った結果、本実験の範囲内において以下の知見が得られた。

1) 黒曜石の発泡率は精石の粒度が大きいほど、また同一粒度で比較した場合は構造水率が大きいほど大きくなる。

- 2) 圧縮荷重によるパーライトの体積減少率は単位容積質量が大きいほど小さくなる。また、荷重-変位曲線における初期勾配は単位容積質量が大きいほど大きくなる。
- 3) 安心院産パーライトは内部空隙が少なく単位容積質量が大きいことにより、市販品に比べて硬く、熱伝導率が高いといった特徴を有する。
- 4) パーライトの種類によっては練混ぜによる骨材の摩耗および破砕が生じている可能性があり、骨材容積が減少することによりモルタル全体の容積が減少する恐れがある。
- 5) パーライトモルタルの圧縮強度は S/C 嵩比の増加に伴い低下する。また、圧縮強度は単位容積質量と直線関係を示す。
- 6) 安心院産パーライトを用いたモルタルは、同一 S/C 嵩比で市販品と比較した場合、流動性は同等、圧縮強度は高い値を示す。

謝辞

本研究は H25 年度研究成果最適展開支援プログラム (A-STEP) フィージビリティスタディ【FS】ステージ探索タイプ (課題番号: AS251Z01843M) の助成により実施したものである。また研究を実施するにあたり、デジタル顕微鏡による粒子像観察では (株) キーエンスの協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 太平洋パーライトカタログ: <http://www.taiheiyo-m.co.jp/archives/001/201105/4dd464b1a1442.pdf>
- 2) 野口雅朗, 和知秀樹: 「パーライト」の品質向上技術に関する考察, 太平洋セメント研究報告, 第 162 号, pp.50-59, 2012
- 3) 宇部興産 (株): 建材用パーライト, 建材用パーライトモルタル組成物及び建材用パーライトの製造方法, 特開 2008-50185, 2008
- 4) 太平洋マテリアル (株): 高強度パーライトの製造方法, 特開 2012-136402, 2012
- 5) 塙健三: パーライトの発泡機構の解明, http://www.asahi-net.or.jp/~NG3H-YSD/HANAWA_4.html
- 6) 李相培, 佐藤嘉昭, 岡田秀敏, 清原千鶴: 焼成工程を備えた風力微粉碎処理システムによる石炭灰の改質, コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.1, pp.183-188, 2007.7
- 7) 日本フライアッシュ協会資料: <http://www.japan-flyash.com/pdf/fcuse06.pdf>
- 8) 寺田了司, 澤田英二, 石川雄康: 改良パーライトを用いたモルタルの防水性, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.421-422, 1989.10