論文

シラスを原料とする人工軽量骨材について*

福島 正人** 二村 誠 二***

On Artificial Lightweight Aggregate Made from Shirasu

by

Masato FUKUSHIMA and Seiji NIMURA

(Osaka Institute of Technology, Osaka)

Shirasu is a kind of volcanic ashes, and is widely distributed in South Kyushu. It has a little lower melting and frothing temperature in comparison with other materials of artificial lightweight aggregate, and in homogeneous nature it can be mined at once abundantly and easily. The author has hit upon an idea that he will be able on that account to get a low-priced artificial lightweight aggregate made from Shirasu, and has manufactured for trial artificial lightweight sand and gravels (a tentative name; Calderite).

Then, the author made an experiment on the basic data of the properties for aggregate, statical properties and elastic properties, and ascertained its practicability. Calderite sand belongs to 2 sort, C class on classification of JIS A 5002. But, Calderite sand seems to come a little short of the requisite strength of aggregate for fine aggregate of structural concrete, so it is necessary to make further studies of the formula of manufacturing. Calderite gravel belongs to 2 sort, C class or 3 sort, C class on classification of JIS A 5002. The author has proved that Calderite aggregate concrete can adequately be put to use, upon comparison with every standard from the results of the experiment on statical properties and elastic properties of Calderite aggregate concrete.

But, Calderite manufactured for trial in generally felt a little soft and brittle. Then, it is necessary to study further as to the temperature in kiln and formula of manufacturing etc., and if so, it is hoped that the improvement of its quality will be made accordingly.

(Received June 15, 1966)

1 はじめに

南九州一円に、きわめて広大な火山噴出物の堆積層がある。南西諸島を除いた鹿児島県の面積の約49%、宮崎県の南部に宮崎県全面積の約16%をおおい、わずかながら熊本県の水俣地方にも分布し、その全面積はおおよそ4700km²といわれる。その成因には諸説があり、海底噴火による噴出物が水中で堆積し、地殻変動で隆起したとするもの¹⁾、間氷期の末期ないし氷期の初期²⁾、鹿児島湾の形成に伴う火山灰の水成層とするものなどがある。この噴出物の堆積層を南九州では俗に「シラス層」といい、一般には層厚100m以上で、火山灰と軽石を混ぜたものから成り、また局部的に軽石のみの層から成る部分もある。この軽石層の厚いものが天然産の軽量骨材として使用され、古江産軽砂利はその代表的な例である。シラス層は、この古江産軽砂利以外ほとんど利用されていない。

シラスは溶融および発泡温度が比較的低く、焼成時間が短くてすむこと、均質の原料が容易にかつ豊富に得られることから、安価な人工軽量骨材が得られると考え試作した（以下この人工軽量骨材を、原料の成因にちなみ、「カルデライト」と仮称する）。

カルデライトは必ずしも充分満足すべきものではなく、製法についてさらに研究を要すると思われる。しかし、火山灰を原料とする人工軽量骨材は、ほとんどその例を見ないので、ここにカルデライトの実用性を確かめるために行なった基礎実験結果を報告する。

2 シラスの性状の概要

カルデライトの原料となるシラスの鉱物組成は、火山ガラスを主成分とし、長石類、輝石類、角閃石類、石英および少量の磁鉄鉱を含んでいる³⁾。本研究におけるカルデライトの原料として用いたシラス、および軽石層中の5mm以下の部分（以下軽砂と記す）の化学分析は Table I のようであった。

粒径2~0.05mmのものが最も多く、70~80%を占め、主として火山ガラスで、少量の結晶質を伴ってい

* 原稿受理 昭和41年6月15日

** 正会員 大阪工業大学 大阪市旭区大宮北ノ町1丁目

*** 大阪工業大学 大阪市旭区大宮北ノ町1丁目

Table I. Chemical compositions of Shirasu-sand and lightweight volcanic sand as the law materials (%wt).

Law materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	(Na, K)O	TiO ₂
Shirasu-sand	71.44	13.42	3.15	1.60	0.40	5.60	0.21
Volcanic sand	69.72	15.05	2.09	3.70	1.22	5.04	0.56

る。2 mm以上は主として軽石粒、0.05 mm以下は火山ガラスを主とし、微量の粘土質が混ざっている。

原料のシラスは、カルデライト砂の製造には5 mm以下、カルデライト砂利の製造には2.5 mm以下のものを使用した。

3 カルデライト砂

シラスは0.15 mm以下が 30%wt 以上もあり、陵角

Table II. Results of sieve analysis an Calderite sand and its' law materials.

Kind of sand		Weight percentage passing each sieve size (%wt)						Fineness modulus
		5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	
Law materials	Shirasu-sand	100	93.6	85.4	70.4	57.7	34.4	1.59
	Lightweight volcanic sand	"	89.6	67.6	29.3	13.6	6.6	2.93
	Shirasu-lightweight sand mix (Mix proportion, 4 : 6 by volume)	"	91.4	75.7	48.0	33.7	19.3	2.32
Calderite sand		"	91.5	67.0	34.4	22.2	7.5	2.77

Table III. General properties of Calderite sand and its' law materials.

Kind of sand		Nominal specific gravity	24hr water absorption		Bulk density (kg/l)	Solid volume percentage (%/vol)	Mortar strength ratio by JIS A 5002	
			(%/wt)	(%/vol)			Bending (%)	Compressive (%)
Law materials	Shirasu-sand	2.12	5.09	10.79	0.985	46.4	97.8	86.0
	Lightweight volcanic sand	1.74	13.37	23.26	0.832	47.8	—	—
	Shirasu-lightweight sand mix (4 : 6 volume mix)	1.94	8.75	16.96	0.870	47.6	87.6	73.7
Calderite sand		1.86	7.18	13.35	1.046	56.2	94.8	87.0

があって、そのままでは細骨材として適当でない。そこで、粒度を整え、比重を小さくするために軽砂を混ぜ、さらに表面を溶かして陵角をつぶし、吸水を少なくするために加熱燃成した後、その熱風を利用して粒度を調整した。

原料および試作したカルデライト砂のふり分析結果を Table II に、細骨材としてのその他の一般の性

質を Table III に示す。吸水率、実積率ともに焼成による効果が明らかである。JIS A 5002 の2種、C級の軽量砂に相当するものと判定されるが、強度的には必ずしも予期したものとはならなかった。これは、原料の軽砂のうち、1.2 mm以上の粒径のものは、高温焼成によってもろくなる性質があるためと思われる、焼成工程および焼成温度をさらに研究する必要がある。なお、Fig. 1 に試作カルデライト砂を示す。

4 カルデライト砂利

カルデライト砂利は、シラスに粘結および発泡補助材としてモンモリロナイトを混ぜ、造粒の後焼成した。試作したカルデライト砂利は、川砂を使用したコンクリートの気乾比重で1.90~1.70を予定し、見掛け比重の上限および下限をほぼ1.5、1.2となるようにした(以下 $G_{1.5}$ 、 $G_{1.2}$ と記す)。 $G_{1.2}$ はコンクリートの分離を避けるため、表面にケイ石を付着させたが、必ずしも安定した付着ではなかった。Fig. 2 に上記2種の砂利を示す。

カルデライト砂利の粒度別見掛け比重、粒度別24時間吸水率、人工軽量骨材を使用する鉄筋軽量コンクリ

Fig. 1. Calderite sand.

(a) $C_{1.5}$ (Nominal specific gravity : 1.5)

(b) $C_{1.2}$ (Nominal specific gravity : 1.2, Fine silica-sand coating)

Fig. 2. Calderite gravel $C_{1.5}$ and $C_{1.2}$.

Table IV. Properties of Calderite gravels $C_{1.2}$ and $C_{1.5}$ in each grade.

Items		Aggregate	Grade (mm)		
			5~10	10~15	15~20
Nominal specific gravity		$C_{1.2}$	1.28	1.18	1.12
		$C_{1.5}$	1.58	1.45	1.33
24hr water absorption	($^{\circ}$ /wt)	$C_{1.2}$	2.40	2.20	2.40
	($^{\circ}$ /vol)		3.10	2.60	2.68
	($^{\circ}$ /wt)	$C_{1.5}$	1.96	2.28	2.61
	($^{\circ}$ /vol)		3.10	3.16	3.47
Percentage of pumic-stone	($^{\circ}$ /wt)	$C_{1.2}$	2.6	5.7	7.7
		$C_{1.5}$	1.0	4.6	9.8
Loss with NaSO ₄ solution by JIS A 5002	($^{\circ}$ /wt)	$C_{1.2}$	3.86	6.58	9.36
		$C_{1.5}$	2.31	5.43	7.96

ート構造基準による浮粒量, JIS A 5002 による安定性試験減量を Table IV に示す.

造粒および焼成の便宜上20~10, 10~5 mmの粒径に分けたほうがよいので, これによって得られたもの

Fig. 3. Uniform solid volume percentage curves.

の混合割合を決めるために, 20~15, 15~10, 10~5 mmの混合による実積率の変化を測定し, 三角座標で等実積率曲線を求めた. $C_{1.5}$ の場合を Fig. 3 に示す. 最も実積率のよいのは, 20~15, 15~10, 10~5 mmの粒径のものがそれぞれ 20, 30, 50°/wt の混合である. しかし, 20~15mmの粒径のものは分離しがちであるし, 材質がもろいので, 可及的に少ないのが望ましいともいえる. そこで, 20~10, 10~5 mmと分けて焼成して得られたものを, 重量で等量混ぜたものについて調べてみると, 20~15mmのものが 10°/wt 程度で, もろい材質のものが少ない点では良好である. しかし 10~5 mmのものが 50°/wt 以下になるので, これを 50°/wt 以上含まれるようにするために, 重量で 4 : 6の混合とした.

このようにして得られたカルデライト砂利のふりい分析, およびその他の一般の性質を Table V および VIに示す. $C_{1.2}$, $C_{1.5}$ ともに JASS 5 に規定する粒度範囲内であり, $C_{1.2}$ は JIS A 5002 の 2 種, C級, 甲に属し, $C_{1.5}$ は 3 種, C級, 甲に属する.

Table V. Results of sieve analysis of Calderite gravels $C_{1.2}$ and $C_{1.5}$.

Aggregate	Weight percentage passing each sieve size (^°/wt)				Fineness modulus
	20mm	15mm	10mm	5mm	
$C_{1.2}$	100	91.1	56.1	3.9	6.4
$C_{1.5}$	"	98.3	58.6	1.0	6.4

5 川砂, カルデライト砂利コンクリートの力学的性質

5・1 調 合

JASS 5 の標準調合 (表面活性剤を使用する場合) を次のように修正した調合を用いて, 川砂, カルデライト砂利コンクリートを製作し, 強度, 弾性係数など

Table VI. General properties of Calderite gravels $C_{1.2}$ and $C_{1.5}$.

Aggregate	Nominal specific gravity	24hr water absorption		Bulk density (kg/l)	Solid volume percentage (%/vol)	Percentage of pumic-stone (%/wt)	By JIS A 5002	
		(%/wt)	(%/vol)				Loss with Na ₂ SO ₄ solution (%/wt)	Concrete strength ratio (%)
$C_{1.2}$	1.24	2.14	2.66	0.748	60.3	4.92	5.28	82.8
$C_{1.5}$	1.53	2.47	3.78	0.953	62.3	4.07	3.65	84.5

の諸性質を調べた。すなわち、標準調合の絶対容積調合を、セメント：砂：砂利：水= $V_c:V_s:V_g:W$ とすれば、修正調合は、

$$\text{セメント：砂：砂利：水} = \tilde{\gamma}_g V_c : \tilde{\gamma}_g V_s : \{V_g - (\tilde{\gamma}_g - 1)(V_c + V_s + W)\} : \tilde{\gamma}_g W$$

$$\text{ただし、} \tilde{\gamma}_g = 1 + (\gamma_g - 1) V_g / (100 - W)$$

$$\gamma_g = (\text{標準の川砂利の実積率}) / (\text{使用する軽砂利の実積率})$$

である。本研究のカルデライト砂利 $C_{1.5}$ はほとんど無修正でよく、 $C_{1.2}$ は $\gamma_g = 1.033$ となる。

川砂は見掛け比重2.63、吸水率1.64、粒大2.5mm以下、AE剤はビンゾールを使用し、強度上の水セメント比 45~75/wt、予定スランプ15, 18, 21cmの調合試験を行なった。 $C_{1.5}$, $C_{1.2}$ ともに 75/wtの水セメント比のコンクリートは分離きみであったが、他は予定スランプの $\pm 2 \sim \pm 1.5$ cm以内のスランプで、フロー値はスランプ値の1.7~1.8倍程度であり、ほぼ所期のワーカビリティが得られたものと思われた。

5.2 強度

調合試験のコンクリートを用い、供試体は標準供試体、養生はすべて水中養生とした。

5.2.1 1週強度と4週強度 1週圧縮強度と4週圧縮強度との関係を Fig. 4 に示す。関係式を求めると、

$$C_{1.5} \text{ 骨材使用時: } F_4 = 0.99F_1 + 50 \quad (1)$$

$$C_{1.2} \text{ 骨材使用時: } F_4 = 0.85F_1 + 59 \quad (1')$$

Fig. 4. Relations between compressive strengths of concrete at the ages of 1 week, F_1 and 4 weeks, F_4 .

ただし、 F_4 : 4週圧縮強度 kg/cm^2

F_1 : 1週圧縮強度 kg/cm^2

となる。当然のことながら、普通コンクリートより強度の伸びが少ない。

5.2.2 4週強度と13週強度 4週圧縮強度と13週圧縮強度との関係を Fig. 5 に示す。 $C_{1.5}$, $C_{1.2}$ は統計的に差はなく、

$$F_{13} = 1.16F_4 - 18 \quad (2)$$

ただし、 F_{13} : 13週圧縮強度 kg/cm^2

で示される。

5.2.3 セメント水比と4週強度 セメント水比と4週圧縮強度との関係を Fig. 6 に示す。実験式は

Fig. 5. Relation between compressive strengths of concrete at the ages of 4 weeks, F_4 and 13 weeks, F_{13} .

Fig. 6. Relations between 4 week compressive strength F_4 and cement-water ratio X of concrete.

下記のとおりである。

$$C_{1.5} \text{ 骨材使用時: } F_t/K = 0.46X - 0.19 \quad (3)$$

$$C_{1.2} \text{ 骨材使用時: } F_t/K = 0.42X - 0.15 \quad (3')$$

ただし, K : セメント 4 週規格強度 kg/cm^2

X : セメント水比

普通コンクリートに対する JASS 5 規定式, $F_t/K = 0.61X - 0.34$ と比較して, 上記各式が,

$$F_t/K = \beta \times 0.61X - 0.34$$

で示されるとすれば, いわゆる軽量コンクリート調査設計のためのセメント水比補正係数 β は,

$$C_{1.5} \text{ 骨材使用時: } \beta = 0.9 \quad (4)$$

$$C_{1.2} \text{ 骨材使用時: } \beta = 0.87 \quad (4')$$

となり, 実用的な水セメント比の範囲 ($55 \sim 70\%$) では, $C_{1.5}$, $C_{1.2}$ ともに $\beta = 0.9$ としてよい。すなわち, JASS 5 に定める 1 種軽量コンクリートの強度式がそのまま適用できる。

5・2・4 圧縮強度と引張強度 圧縮強度と割裂引張強度との関係は Fig. 7 のとおりで, 骨材種別 $C_{1.5}$ および $C_{1.2}$ に関係なく狩野博士⁵⁾の式,

$$F_t = 2.66F_c^{1.44} \quad (6)$$

または,

$$F_t/F_c = 0.508F_c^{-1.305} \quad (6')$$

がほとんどそのまま適用できるようである。

5・2・5 付着強度 圧縮強度と付着強度との関係を普通コンクリートと比較するために, Fig. 8 に示す

Fig. 7. Relations between compressive strength F_c and tensile splitting strength F_t .

Fig. 8. Pull-out bond test specimen.

Table VII. Pull-out bond test results.

Kind of concrete	h_0 (cm)	h_u (cm)	Average bond strength, τ_a (kg/cm^2)	Comp. strength of concrete, F_c (kg/cm^2)	τ_a/F_c
Normal concrete	3	3	31.0	212	14.8
	10	3	32.5		15.3
	20	3	38.7		18.3
	3	30	19.5	212	9.2
	10	30	21.5		10.2
	20	30	25.3		11.9
$C_{1.5}$ aggregate concrete	3	3	26.7	170	15.7
	10	3	26.5		15.6
	20	3	33.6		19.8
	3	30	15.6	170	9.3
	10	30	17.3		10.2
	20	30	20.2		12.2
$C_{1.5}$ aggregate concrete	3	3	28.6	178	16.1
	10	3	30.2		17.0
	20	3	34.2		19.2
	3	30	17.3	178	9.7
	10	30	19.9		11.1
	20	30	22.9		12.9

供試体で引抜試験を行なった。供試体は, 水セメント比 65% , スランプ 21cm , 材令 4 週とし, 平均付着強度は鉄筋のすべりはじめの強度から求めた。

試験結果は Table VII に示すとおりである。コンクリート圧縮強度に対する平均付着強度の比は普通コンクリートとほぼ同じであり, 同等の付着性状を示すものと考えられる。

5・3 弾性的性質

5・3・1 応力度ひずみ度曲線式 応力度ひずみ度曲線は, 原点から最高荷重に至るまでの区間において, 浜田博士⁶⁾の式,

$$1 - \frac{\sigma}{\sigma_B} = \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_B}\right)^k \quad (7)$$

ただし, σ_B : 圧縮強度 kg/cm^2

σ : 圧縮応力度 kg/cm^2

ϵ_B : 圧縮強度時のひずみ度

ϵ : 圧縮応力度時のひずみ度

k : 曲率によって定まる定数

が適用できるものとし, 5・2項で述べたコンクリート試験時に実施した圧縮ひずみ測定結果から ϵ_B と σ_B との関係求めた。Fig. 9 はこれを図示したものである。 ϵ_B の測定は困難で, 不安定なためばらつきも多いが, 両者の関係をあえて実験式で表わせば次のようになる。

$$\epsilon_B = 8.05 \times 10^{-4} \sigma_B^{0.214} \quad (8)$$

Fig. 9. Relation between compressive strength and strain of concrete at the maximum load.

Fig. 10. Relation between compressive strength and strain of concrete at the stress half the strength.

また、圧縮強度の1/2の応力度時のひずみ度 $\varepsilon_{1/2}$ と σ_B との関係は、Fig. 10 のようになり、実験式としては、

$$\varepsilon_{1/2} = 0.166 \times 10^{-4} \sigma_B^{0.729} \quad (9)$$

を得た。一方、(7)式に $\sigma = 1/2 \sigma_B$ 、 $\varepsilon = \varepsilon_{1/2}$ を代入して k を求めると、

$$k = \frac{0.301}{\log \varepsilon_B / (\varepsilon_B - \varepsilon_{1/2})} \quad (10)$$

となる。これに(8)、(9)式を代入して k を求めると、

$$k = 47.4 \sigma_B^{-0.613} \quad (11)$$

となり、圧縮強度が大きくなるほど k が小さくなる。

Fig. 9 にはその様相も示してある。

5・3・2 ヤング係数 任意応力度を $\sigma = \alpha \sigma_B$ とすると、任意応力度時のセカントモジュラス $sE\alpha$ は、

$$sE\alpha = \frac{\alpha \sigma_B}{\varepsilon_\alpha} = \frac{\alpha \sigma_B / \varepsilon_B}{1 - (1 - \alpha)^{1/k}} \quad (12)$$

で求められる。圧縮強度の1/4、1/2、9/10の応力度時のセカントモジュラス $sE_{1/4}$ 、 $sE_{1/2}$ 、 $sE_{9/10}$ を(8)、(11)、(12)式から求めたものと、圧縮強度との関係を Fig. 11 に示す。他の人工軽量骨材を使用したコンクリートに比較して、圧縮強度が 300 kg/cm^2 に近づくとやや小さくなるようである。

5・3・3 ポアソン数 ポアソン数の測定例をFig. 12に示す。測定値は圧縮強度の20～80%の範囲で、5

Fig. 11. Relations between compressive strength and secant modulus $sE_{1/4}$, $sE_{1/2}$ or $sE_{9/10}$.

Fig. 12. Typical relations between compressive stress and poisson's number of concrete.

～7で、代表値として6を採用してよいと思われ、これは普通コンクリートの場合と大差はないようである。したがって、せん断弾性係数も普通コンクリートと同じく、

$$G = 0.43E \quad (13)$$

ただし、 G ：せん断弾性係数 kg/cm^2

E ：ヤング係数 kg/cm^2

としてよいであろう。

6 結 び

南九州に分布するシラスを原料とする人工軽量骨材の試作品カルデライトと、これを用いたコンクリートについて、その基礎的な実験の結果を報告した。カルデライトは諸規準、規定に照らして一応実用可能であることがわかった。カルデライト砂を細骨材とするコンクリートについては実験を行なわなかったが、これは構造用コンクリートの細骨材としては、強度の点でさらに研究を要すると思われたからである。カルデライトは、製法をさらに研究すれば品質の向上が期待できるものと思われる。

カルデライトの試作ならびに実験に協力し援助を賜った麻生産業、川崎重工業、鹿児島県、鹿児島工業

試験場, 日本ライトグラベル九州支社をはじめ, 多くの方々に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) たとえば矢野義男, “特殊土地帯の防災工法”, p.4 (1964) 山海堂
- 2) 湊 正男, 井尻正二, “日本列島”, p. 90 (1960) 岩波新書
- 3) 野元堅一郎, 鹿児島工業試験場報告, シラスの利用について, p. 1 (1966).
- 4) 福島正人, 日本建築学会九州支部, No.11, p. 9 (1962).
- 5) 狩野春一, 日本建築学会論文報告集, No.60, p. 90 (1958).
- 6) 浜田 稔, “軽量コンクリート構造”, p.366 (1956) 丸善