

島尻泥岩（クチャ）を原料とする人工軽量骨材の製造

—— 試験用小型ロータリーキルンによる焼成試験 ——

窯業室 照屋輝一
宜野座俊夫
仲村三雄*
照屋善義

1. 緒言

エネルギー問題は、昭和48年の石油ショックを契機に、緊急課題として積極的に論じられ、多くの提言がなされ、数多くのいろいろな研究プロジェクトも発足・推進されてきている。その緊迫感は今日ますます増大の一途にある。

エネルギー問題対応の大きな柱として省エネルギー化がある。建造物における省エネルギーの問題も緊急を要するきわめて重要な課題である。たとえば、昭和60年には一戸当りの家庭用エネルギーの年間使用量は1,330万kcal、そのうち50%が冷暖房用との予測が出されている¹⁾。したがって、断熱構造のより熱損失の少ない建造物の開発・移行が肝要である。コンクリート構造が鉄鋼構造に比べ著しく省エネルギー型であることは議論の余地がないが、在来の普通コンクリートよりも軽量コンクリートが更に省エネルギー上有利である。

軽量コンクリートの代表的なものは人工軽量骨材を用いたものである。人工軽量骨材の製造には多量の焼成エネルギーを要するところからエネルギー多消費材料と考えられがちであるが、軽量コンクリートが普通コンクリートに比べ、熱伝導率が低いため断熱効果が大きく冷暖房時のエネルギーが節減でき、また軽量であるところから建物の固定荷重の軽減とそれによる部材応力の低減、部材断面の減少および下部構造の簡素化が可能であるなど種々の利点があり、最終製品のトータルエネルギーを総合的に考えれば省エネルギー上極めて有効な材料と認められている²⁾。

本県は、他府県に比べ、建造物のほとんどがコンクリート構造であり、また高温・多湿の期間が長く、冷房用エネルギーの使用比率は高く、しかも年々増大の一途をたどっている。したがって、建造物の軽量コンクリート化は時代的要請であり、県産の人工軽量骨材の開発も重要な課題として位置づけられる。

著者らは、先に、沖縄本島中南部に大量に賦存する島尻泥岩（クチャ）、特にその大部分を占める与那原層の泥岩が、層序、地域によらず、基礎性状試験および電気炉による発泡・膨化試験などの結果から、人工軽量骨材の原料として極めて有望であることを報告した³⁾。

そこで、本報では、試験用小型ロータリーキルンを用いて、島尻泥岩からの人工軽量骨材の製造試験とコンクリート化試験を行った結果について報告する。

2. 実験方法

2・1 試料

試料には、すでに基礎性状試験等で検討した試料³⁾の中から、代表試料として、与那原層上部層

のNo.2（佐敷村馬天）とNo.4（大里村稻嶺）、中部層のNo.6（西原町上原）とNo.8（大里村古堅）下部層のNo.12（浦添市前田）とNo.14（豊見城村宜保）の6試料を用いた。

採取試料は、風乾後ジョークラッシャーで粗砕、5～15mm粒分を篩分して破砕型試料とし、5mm以下はさらにロールミルで粉碎、48メッシュ以下とし、さら型造粒機を用いて5～15mmの造粒型試料として用いた。

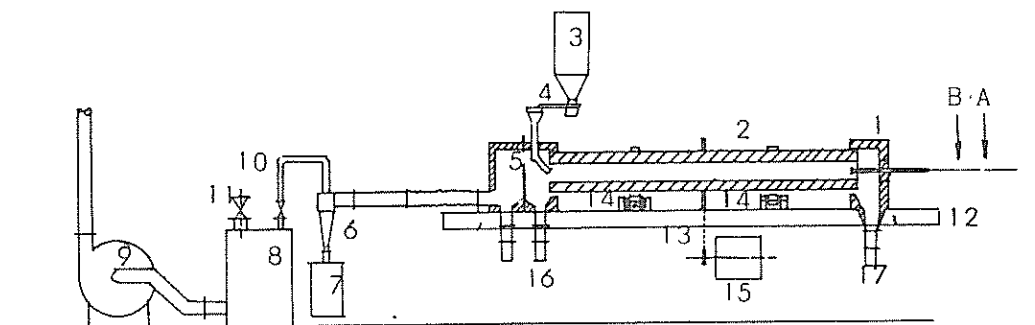
2・2 ロータリーキルン焼成試験

2・2・1 装置の概要

本研究で用いた試験用小型ロータリーキルンの概要を図1に示す。炉体の長さ2700mm、有効内径165mmで、炉体の傾きは最大 $\pm 4/100$ まで変えられ、炉体の回転数は無段変速機構で3.3～163rpmの範囲で操作でき、その最高使用温度は1400℃である。

燃料はプロパンガスを、一次空気に圧縮空気を用いる。これらは燃焼室で燃焼し、炉本体で試料を焼成したのち、集塵室およびサイクロンで脱塵され、チャンバーで冷気混合され40℃以下に冷却され排気される。一方、試料はホッパーより電磁フィーダで炉内に供給され、焼成されて焼成体取出シュートより出る。

なお、図中に表示はないが、主要部分には熱電対挿入口、ガス採取口、差圧および流速測定口を有する。



- A: プロパン B: 空気 1: 燃焼室 2: キルン本体 3: ホッパー
 4: 電磁フィーダ 5: 集じん室 6: サイクロン 7: ダストタンク
 8: チャンバ 9: ターボブロワ 10: 調整弁 11: 仕切弁 12: 架台
 13: スプロケット 14: ローラ 15: 駆動用モータ 16: ダスト取出シュート
 17: 焼成体取出シュート

主仕様: 炉体長さ2700mm、炉有効内径165mm、炉体最大 $\pm 4/100$
 炉体回転数3.3～16.3rpm、最高使用温度1400℃

図1 試験用小型ロータリーキルン

2・2・2 焼成操作

人工軽量骨材の原料は概して鉄分やカルシウム分を多量に含む。このような原料は焼成雰囲気敏感なことが多い。本研究では、図2に示すように、任意のプロパンガス流量で最高温度を与える空気量との関係を把握し、これを焼成操作線として焼成雰囲気の再現性を図った。この操作条件下では燃焼排ガス中にほとんどCOガスは検出されない。

2・2・3 焼成試験

島尻泥岩を原料として、これをロータリーキルンで焼成して人工軽量骨材を製造するための焼成条件を把握するために、焼成物の再現性の問題、試料の乾燥温度、試料径の影響、焼成時間、すなわち試料の平均滞留時間(炉回転数)の効果、焼成温度等について検討した。なお、炉の勾配は4/100と固定して、試料の滞留時間は回転数のみで調整し、炉内平均滞留時間 T_0 (min)は次式⁴⁾で求めた。

$$T_0 = 0.19L / (N \cdot Sd \cdot D) \dots (1)$$

ここで、Lは炉の長さ(cm)、Sdは炉の勾配、Dは炉の内径(cm)、Nは炉の回転数(rpm)である。

焼成試験では、一条件について、原料供給量を2.5kg前後とし、供給速度を約10kg/hrとした。各条件下で得られた焼成物について、下記の性状を検討し、焼成条件を把握するための資料とした。

絶乾比重および吸水率：JIS A 1135に準拠して求めた。

比重分布：試料を24時間吸水させ、表乾状態とし、水と比重1.2および1.4の塩化カルシューム水溶液、比重1.6および1.8の塩化亜鉛水溶液により、1.0以下、1.0~1.2、1.2~1.4、1.4~1.6、1.6~1.8および1.8以上の比重範囲に分級し、十分に水洗したのち110℃、24時間乾燥後の重量より比重分布を求めた。

10%破砕値：焼成物の骨材としての強度をBS-812に準拠した破砕試験により検討した。すなわち、規定されたシリンダーに焼成物を所定の方法で詰めて圧縮破砕して生じる2.5mm以下の微細物の重量が供試全試料の10%となるとききの荷重をもって骨材の破砕強度の尺度とする方法である。試験は試料の破砕量が7.5~12.5%の範囲になるように荷重をかけ、次式により補正して10%破砕値(ton)とする。

$$10\% \text{破砕値} = 14P / (100A/B + 4) \dots (2)$$

ここで、Pは荷重(ton)、Aは供試料全重量(kg)、Bは2.5mm以下に破砕された微細物の重量(kg)である。

2・3 製品化試験

製品化試験として焼成試験の結果にもとづいて焼成条件を定め200kg前後の試料の連続焼成試験を行い、得られた焼成物についてその諸性状がJIS A 5002に定められた「構造用軽量コンクリート骨材」に関する規格を満足するものであるかの諸試験を行った。

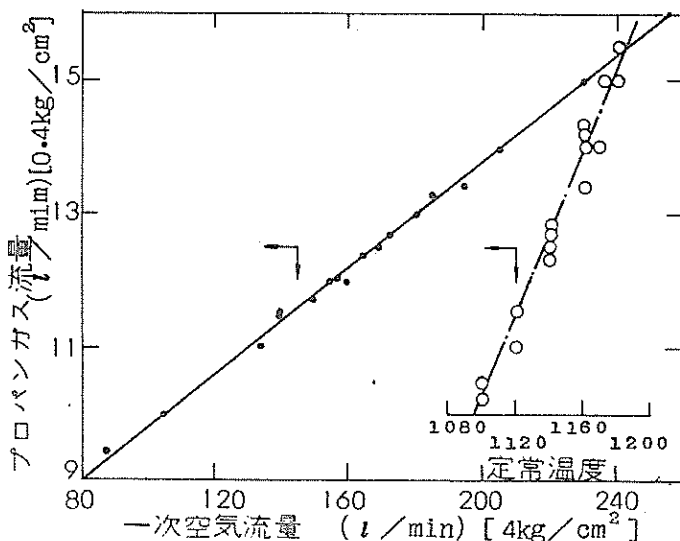


図2 最適焼成のためのプロパンガス流量と一次空気量との関係 —焼成操作線—

3 結果と考察

3・1 焼成操作と焼成物の再現性

図2に示した焼成操作線により管理された炉内および炉外壁の温度分布の1例を図3に示す。焼点域はバーナーより33.5~42.5cmの位置の約10cmで炉全体の1/27程度である。窯尻温度は、焼点温度が1100℃から1200℃に上昇するとき、400℃前後から500℃前後に達する。図3に例示する条件では、排ガス中にCO₂が7%前後、O₂が9%前後含まれるが、COはほとんど検出されない。プロパンガス流量を15.0 l/minに維持し、一次空気量を図2の左側の値例えば180 l/minに減らすと、CO₂が5%前後に減じ、COが逆に1%前後検出され、焼点温度は1180℃から1150℃前後に低下するにもかかわらず、融着現象をひき起すことが観察された。これは島尻泥岩が鉄分(Fe₂O₃)を6.6~7.7%、カルシウム分(CaO)を3.3~8.3%と多量含有し³⁾、焼成雰囲気敏感であるためと解釈される。

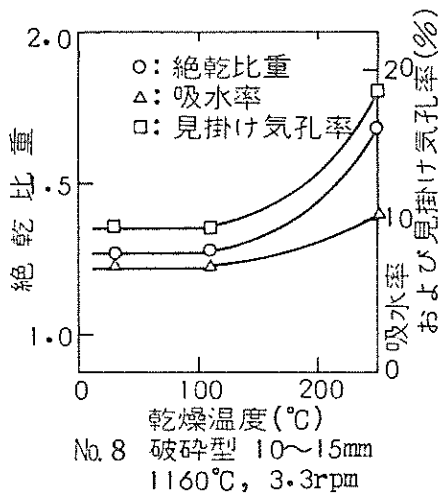


図5 ロータリーキルン焼成における焼成前乾燥温度と焼成性状の関係

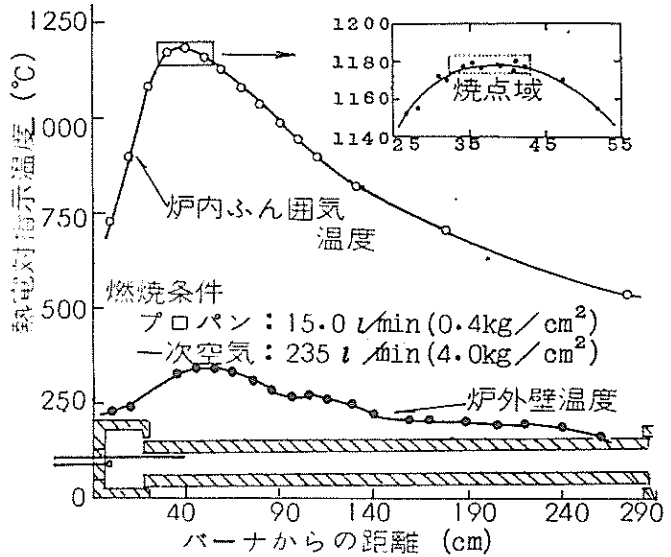


図3 バーナーからの距離と炉内雰囲気温度および炉外壁温度との関係の一例

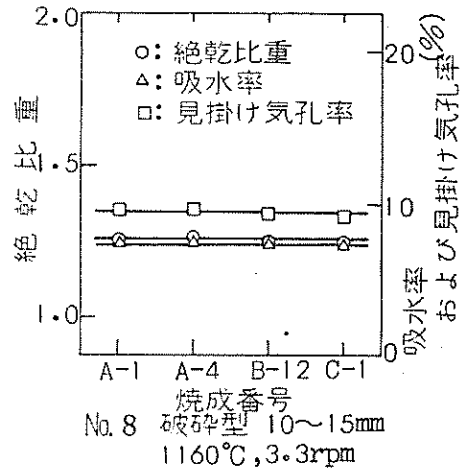


図4 ロータリーキルン焼成における焼成性状の再現性

そこで本研究では、図2の焼成操作線に従って焼成管理を行い焼成雰囲気の再現性を図った。図4は焼成物の再現性について検討した結果で、焼成操作線に従って焼成するとき再現性の良い焼成物の得られることを示している。

3・2 焼成条件と焼成性状

3・2・1 焼成前の乾燥温度の影響

風乾試料および110℃、250℃での24時間乾燥物を同一条件下で焼成し、その焼成性状と焼成前

の乾燥温度との関係を示したのが図5である。この結果は、110℃乾燥までは焼成性状に差はないが、乾燥温度が250℃になると発泡・膨化性が妨げられることを示しており、高温での乾燥で発泡・膨化に寄与する成分の離脱あるいは変性が生じることを示唆しており、風乾試料で十分であり、かつ有利であると結論される。

3・2・2 試料径の影響

図6に試料径と焼成性状との関係を示す。電気炉による発泡・膨化試験では試料径の影響は認められなかったが³⁾、ロータリーキルンによる焼成では試料径の影響があり、径の増大とともに発泡・膨化することを示している。これは、ロータリーキルンでの焼成では焼点域での試料の滞留時間が1分前後と短いため、試料径の大きいほど中心と表面との温度差を生じやすく、また発泡に寄与するガス源の残留度の高いことなどが発泡・膨化に効果的に作用するためではないかと考えられる。

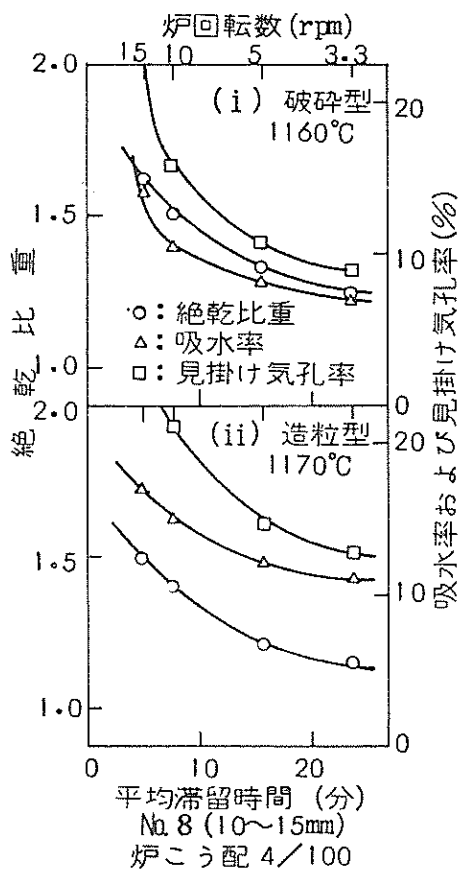


図7 ロータリーキルン焼成における試料の炉内平均滞留時間と焼成性状の関係

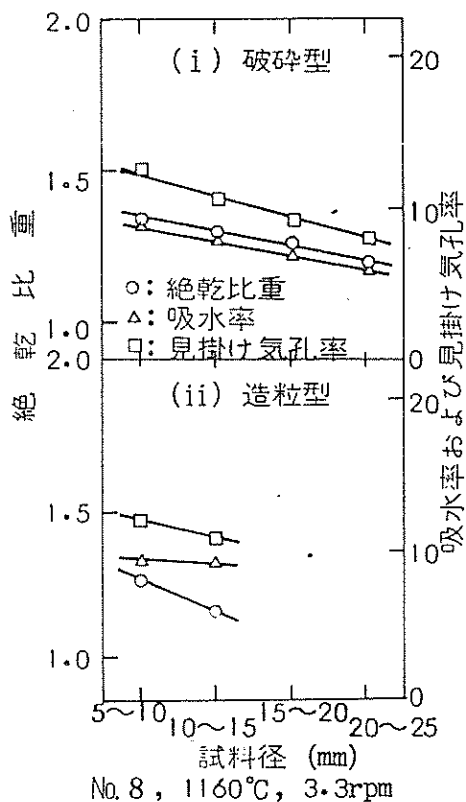


図6 ロータリーキルン焼成における試料径と焼成性状の関係

3・2・3 試料の滞留時間の効果

ロータリーキルンの場合、試料の焼成時間は、(1)式で求められる試料の炉内平均滞留時間が尺度となる。本研究では、炉の勾配が4/100と一定に保たれているので、平均滞留時間は炉の回転数に逆比例する。

試料の炉内平均滞留時間(炉回転数)と焼成性状との関係を図7に示す。図7は、回転数の低い程、すなわち試料の炉内滞留時間が長い程より軽量化した焼成物が得られることを示しており、炉の勾配を2/100ないしは1/100で操作することによって

滞留時間をのばし、同温度で一層の軽量化がはかれることを示唆している。

3・2・4 焼成温度と焼成性状の関係

与那原層上部層の試料No.2 およびNo.4、中部層の試料No.6 およびNo.8、下部層の試料No.12 および14について焼成温度の効果を検討した結果を図8に示す。

1150℃以下の温度域では、試料の相違により焼成性状に若干の差が認められるが、1150℃以上の温度域の傾向および絶乾比重1.1~1.4を与える温度には試料の違いによる差はほとんど認められない。また、破碎型と造粒型との間にもほとんど差はない。

しかしながら、電気炉試験の結果³⁾とは特性値に差がみられる。すなわち絶乾比重1.1~1.4を与える温度は、電気炉試験では1200±25℃であるが、ロータリーキルン焼成では1165±15℃であって、電気炉試験での焼成時間(10分)よりも焼点での平均滞留時間が1分前後と短いにもかかわらず、焼点温度として35℃前後低く、温度域が25℃前後狭くなっている。これは焼成雰囲気の違いによるものと考えられる。

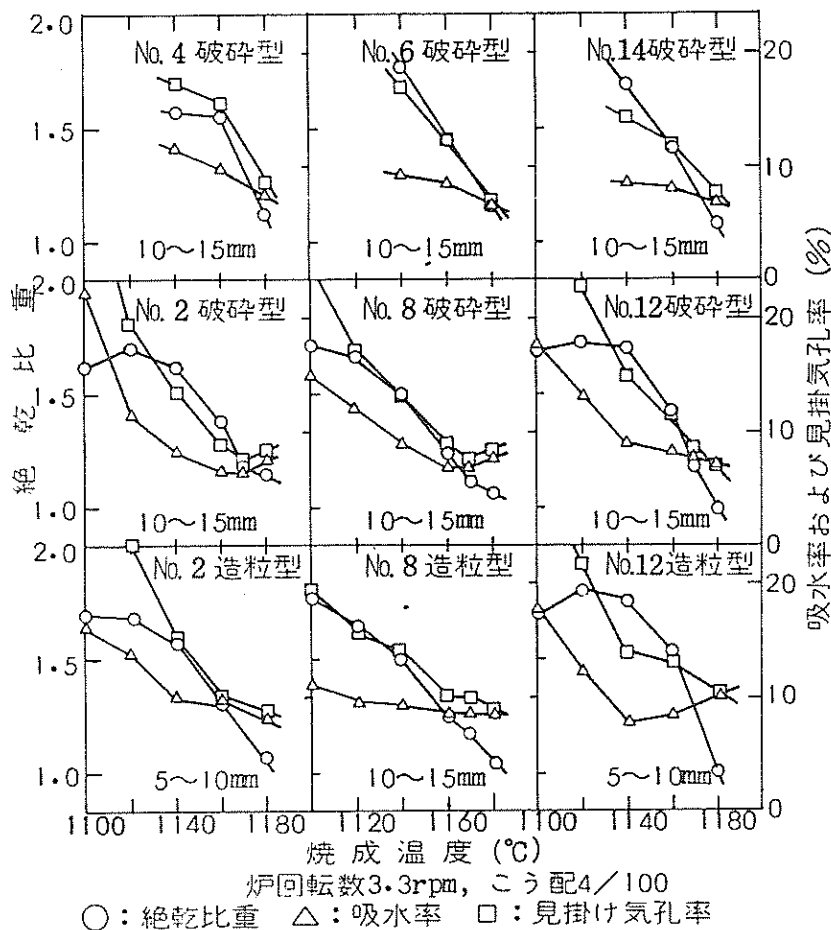


図8 ロータリーキルン焼成における焼成温度と焼成性状の関係

3・2・5 焼成物の比重分布

焼成物を比重液により分級し求めた破砕型試料の比重分布を図9に示す。造粒型についてもほぼ同様の結果が得られた。また写真1に、比重液により±0.001の精度で分級した破砕型および造粒型の焼成物の気泡分布の状態を断面写真として示す。

ロータリーキルンで人工軽量骨材を焼成するとき、原料径の相違による発泡・膨化度の差や形状の違いから生じる炉内滞留時間の差異によって軽量化の程度が異ってくる。実際の製品としては発泡・膨化の程度がより均一で、比重のばらつきの小さいことが望まれ、またJISでは浮遊率10%以下と規定されている。

図9から明らかなように、比重のばらつきはかなり大きい。これは、前述の要因に加えて、各焼成試験における原料供給量が2.5kg前後と少いため、炉内での試料の流れが不均一で、前端部および後端部で粗に、中央部で密になって受熱量に不均衡を生じるためと考えられる。

比重分布についての検討の結果から大略次のことがわかった。

- i) 破砕型と造粒型で顕著な差はない。
- ii) 試料径の大きいほど比重のばらつきがわずかながら小さくなる。
- iii) 炉の回転数が大きい程比重のばらつきが小さくなる。
- iv) 焼成温度が低いほど比重のばらつきが小さくなる。

これらのことは試料の軽量化への温度効果のあらわれを示すものと考えられる。なお、図中にはこれらの測定結果から計算した平均比重を示しているが、その値は1.8以上のフラクションが10%

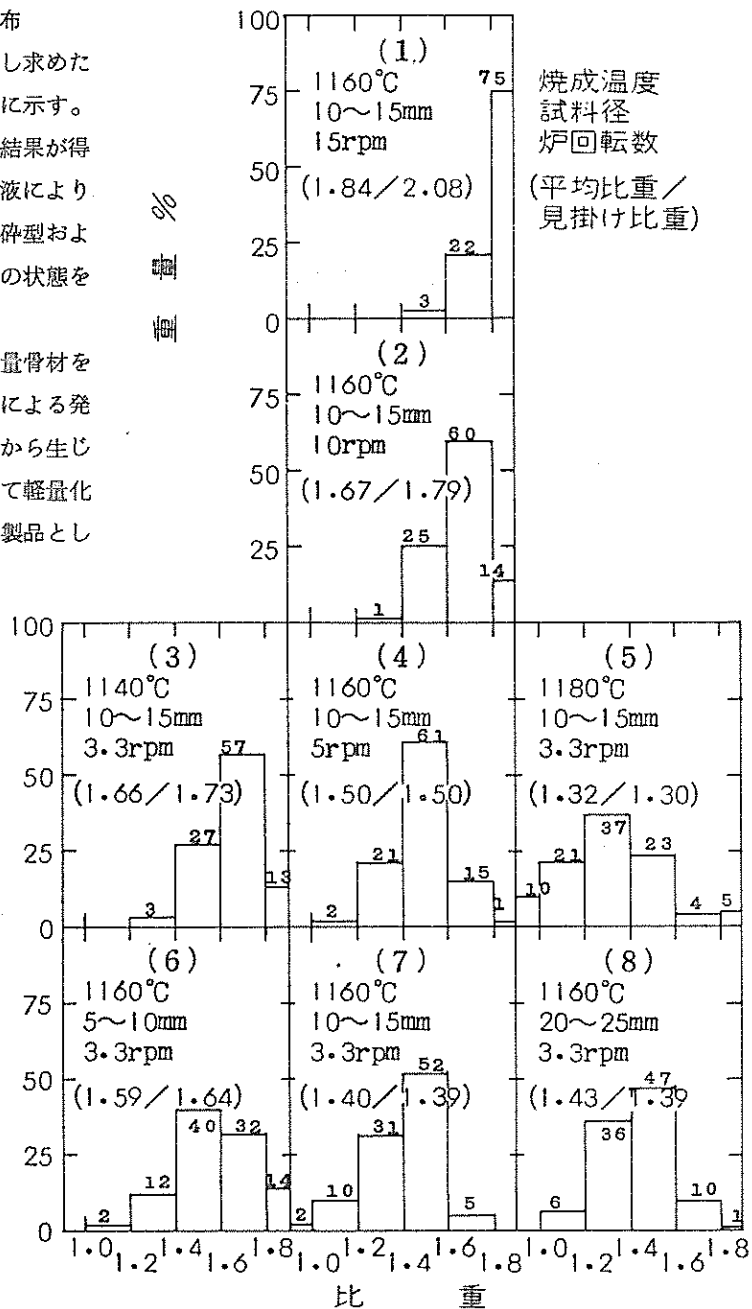


図9 ロータリーキルン焼成物の比重分布

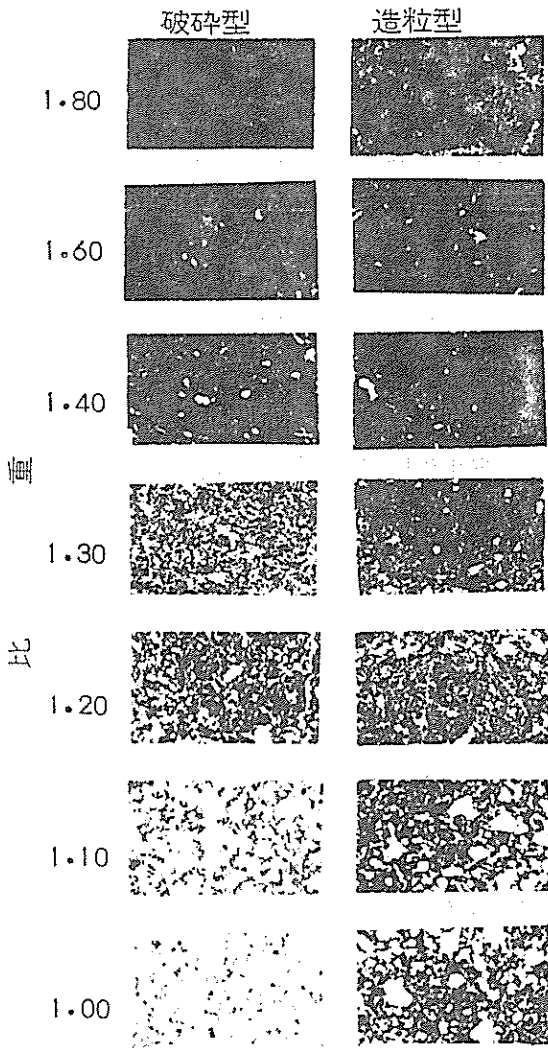


写真1 ロータリーキルン焼成物の気泡の分布 (2.5倍)

3・3 製品化試験

以上の諸試験から得られた成果にもとづいて、製品化試験として、原料に与那原層中部層の試料No.8を用いて、人工軽量骨材を連続焼成し、得られた骨材による軽量コンクリートを試作した。

原料は5~15mm径に破碎および造粒し、原料供給速度10kg/hr、炉の勾配4/100、回転数3.3rpmの条件下で、焼成温度1160℃で200kg前後で連続焼成した。得られた骨材の主要な性状を表1に、その比重分布を図11に示す。

表1に示す特性値は、JIS A 5002に定められた「構造用軽量コンクリート骨材」に関する規格

以下の場合には、通常の方法で求めた見掛け比重とよく一致した。また浮遊率はほとんど10%以下である。

3・2・6 焼成物の10%破碎値

焼成物の骨材としての強度を破碎試験により検討した結果を図10に示す。試料の違いや焼成条件によらず、大略絶乾比重により定まる傾向がみられる。比重の等しい骨材では、形状の均一な造粒型が破碎型に比較して大きい強度を示している。

絶乾比重1.1~1.4の破碎型の10%破碎値も8~13トンを示しており、市販の構造用人工軽量骨材の破碎値が10トン前後と報告されていることから⁵⁾これは十分に実用に耐え得る強度を有する骨材となるものと判断してよい。

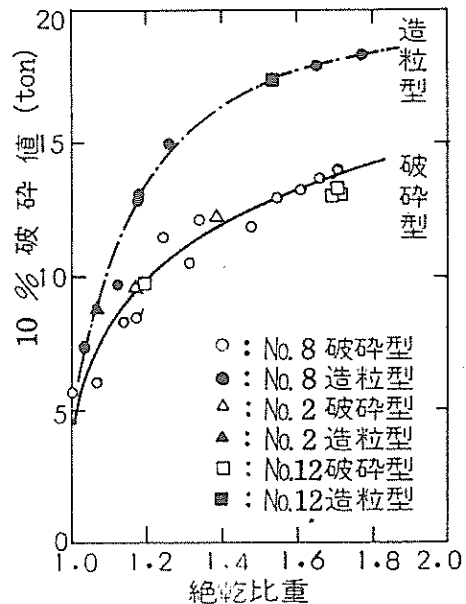


図10 ロータリーキルン焼成物の10%破碎値と絶乾比重の関係

表 1 試作人工軽量骨材の諸性状

種類	寸法(mm)	絶乾比重	表乾比重	見掛比重	吸水率(%)	見掛気孔率(%)	単位容積重量(kg/l)	実積率(%)
破碎型	5~15	1.32	1.44	1.50	9.2	12.2	0.839	63.6
造粒型	5~15	1.26	1.38	1.43	9.5	12.0	0.810	62.0

種類	10%破碎値(tom)	浮遊率(%)	強熱減量(%)	塩化物(%)	塩化カルシウム(%)	有機不純物	安定性(%)	粘土塊(%)
破碎型	10.2	1.4	0.11	0.0004	3.85	着色なし	1.6	0.24
造粒型	15.3	3.2	0.29	0.0003	4.44	着色なし	1.3	0.18

を満足するもので、破碎型、造粒型ともに同規格のMA型の人工軽量骨材に相当する。また、安定性の良さ(規格では12%以下)、有機不純物の試験で着色しないこと、10%破碎値が破碎型でも10トン前後であること、粘土塊(ここでは焼成骨材に付着した、あるいは試験中の摩耗により生じた微粉状物。規格では1%以下)が破碎型、造粒型ともに0.2%以下であることなどから軽量骨材として良質のものと考えてよい。

破碎型の焼成骨材を粗骨材に用いて、構造用軽量コンクリートをJIS A 5002に準拠して試作した。すなわち、水セメント比40%、スランプ値を8±1cmを条件とするコンクリート配合によった。なお細骨材には、別途に焼成骨材を破碎し、JIS A 5002の規格を満足する人工軽量細骨材を調製して用いた。この細骨材の表乾比重は1.68、吸水率は16.9%である。

上記の水セメント比、スランプ値を満足する単位セメント量500kg/m³前後、細骨材率40%前後の軽量コンクリートを試作し、その単位容積質量、強度、断熱性(熱伝導率)などについて検討した。

それらの結果を表2に示す。この結果は、

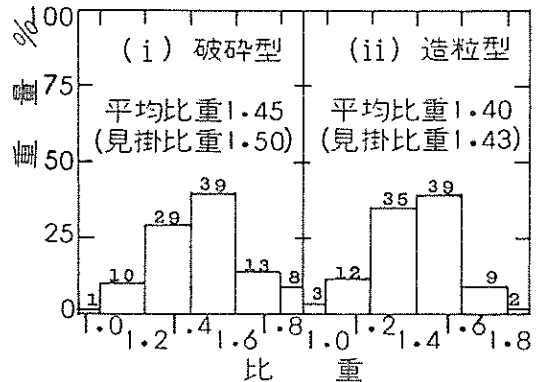


図11 ロータリーキルン連続焼成物の比重分布

表2 試作人工軽量骨材(破碎型)を用いた軽量コンクリートの諸性状[※]

単位容積質量 (kg/l)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	熱伝導率 (kcal/m, h, °C)	気乾比重
1.72	405	59.2	0.45	1.65

※水セメント比40(o/wt)、単位セメント量514(kg/m³)、細骨材率40(o/vol)による配合でスランプ値7.8(cm)、空気量1.3(o/vol)。圧縮および曲げ強度は4週水中養生、熱伝導率および気乾比重は1週水中⇒4週気乾の材料の測定値。

cf. 水セメント比40(o/wt)、単位セメント量455(kg/m³)、細骨材率4(o/vol)スランプ値8.5(cm)の粗骨材に石灰岩碎石、細骨材に砕砂・海砂を用いた普通コンクリートの圧縮強度は450(kgf/cm²)前後、熱伝導率は1.0(kcal/m, h, °C)前後。

ここで得られた骨材が、JIS A 5002 の規格から人工軽量粗骨材MA-417(人工軽量細骨材)の構造用軽量コンクリート骨材に相当し高強度の軽量コンクリートが期待できること、また熱伝導率も普通コンクリートの1/2以下であって相応の断熱効果があることを示している。

4 まとめ

沖縄本島中南部に大量に賦存する島尻泥岩(クチャ)の有効利用の一つとして、県産人工軽量骨材の開発を図るため、試験用小型ロータリーキルンによるその製造実験を行ったところつぎのことがわかった。

(1) 人工軽量骨材を製造する際の焼成条件を種々検討した結果以下のことがわかった。

① 任意のプロパンガス流量における最高温度を与える適量の空気量を用い、燃焼排ガス中にほとんどCOが検出されない条件で焼成することで再現性のある焼成物を容易に得ることができる。

② 試料の乾燥は110℃までは影響しないが、250℃になると発泡・膨化が妨げられる傾向がある。風乾状態が有利である。

③ 試料径の増大とともに軽量化する傾向がある。

④ 平均滞留時間が長いほどより軽量化した焼成物が得られる。

⑤ 与那原層の泥岩から絶乾比重1.1~1.4の焼成物の得られる温度域は1165±15℃で電気炉と比較して焼成温度が低く、焼成域が狭い。

⑥ 焼成物の比重のばらつきは、破碎型と造粒型で顕著な差はなく、試料径の大きいほど、平均滞留時間が短いほど、また焼成温度の低いほど小さくなる傾向がある。

⑦ 焼成物の破碎強度は、大略絶乾比重により定まり、絶乾比重1.1~1.4の破碎型の10%破碎値は8~13トン、造粒型で10~17トンである。

(2) 与那原層の泥岩から、焼成温度1160℃、炉回転数3.3rpm等の焼成条件による連続焼成で絶乾比重1.32(破碎型)および1.26(造粒型)、実積率63.6%(破碎型)および62.0%(造粒型)

の、またコンクリートとしての圧縮強化 405 kg/cm^2 (破砕型)、単位容積質量 1.72 kg/l (破砕型) の JIS A 5002 「構造用軽量コンクリート骨材」に定められる MA-417 型に相当する良質の人工軽量骨材の得られることがわかった。

なお、本研究の一部は昭和53年度中小企業技術開発研究費補助事業 (A、共同研究 窯業資源の有効利用に関する研究) として行われたものである。懇切なご指導とご助言をいただいた名古屋工業技術試験所第6部加藤悦三部長、中小企業庁技術課ならびに沖縄総合事務局商工課に対し感謝の意を表します。

文 献

- 1) 平尾玄雄、セラミックス、13、116 (1978)
- 2) 木村恵雄・飛内圭之、セラミックス、13、103 (1978)
- 3) 照屋輝一・宜野座俊夫・仲村三雄・照屋善義、沖縄県工試昭和53年度業務報告、84 (1979)
- 4) 松田応作・広末英晴・案納美代子、セラミックス、4、752 (1969)
- 5) 爾見軍治・島谷宏文、セメント技術年報、235、11 (1966)

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターに

ご連絡ください。