

## シラスコンクリートを用いた焼成体に関する研究

桑原田聡\*, 中村俊一\*

## The Study on Fired Body of Shirasu Concrete

Satoru KUWAHARADA and Shun'ichi NAKAMURA

シラスコンクリート製品の用途拡大を目的にシラス - セメント - 添加剤等の配合比や焼成温度の影響について検討した。100 μm以下のシラスを原料として用いたシラスコンクリートおよび添加剤として珪灰石を用いた試料では、焼成温度が高くなるにしたがって曲げ強度も高くなり、未焼成品と比較して最大で約14倍の強度であった。特にシラスの配合量が多い場合では、焼成温度が高くなると焼結が促進され強度も増すが、1150 以上では内部での発泡による空隙が発生するために逆に強度が低下することがわかった。

**Keyword** : シラス, コンクリート, 焼成, 曲げ強度, かさ比重

## 1. 緒言

南九州に広く分布するシラスは、地質年代の第四紀に錦江湾奥部の始良火山や湾口部の阿多火山などから噴出した火砕流堆積物である<sup>1)2)</sup>。このシラスの工業的利用の歴史は古く、各方面・各分野で研究され、軽量骨材やシラスバルーン、研削材、園芸用材料など多数商品化されている<sup>1)3)</sup>。近年、当センターではシラスに含まれる水分を利用した加圧成型法によるシラスコンクリート製品の開発を行い、セメント瓦やブロック製品等の実用化に至っている<sup>4)5)</sup>。

一般的にコンクリート製品の用途を広範囲にするためには、外装や仕上げを様々に変化したり、改善しなければならない。通常、顔料を用いて着色することや塗装仕上げをすること等が挙げられるが、塗装の場合では耐候性や耐摩耗性等に問題がある。この解決の1つとして、コンクリート表面に釉薬等のガラスコーティングを施すことが考えられる。しかし、ガラスが溶融するためには高温による焼成が必要であり、この場合、コンクリート自体の大きな強度低下をきたす<sup>6)</sup>。これは、コンクリート中のセメント成分が水和反応によって強度を発現しているため<sup>7)</sup>、焼成によりこの水分が失われることが強度低下の原因として考えられる。

一方、加圧成型法によるシラスコンクリートは、主な骨材が軽石を含むシラス成分である。ガラス質であるシラスは釉薬が溶融する温度で同様に軟化・溶融するため、焼成でセメントの水分が失われても、新たに強度が発現する。しかしながら、焼成温度が高い場合ではシラスの軟化・溶融による変形が大きくなる。そこで、シラスコンクリートの焼成温度と強度について、使用するシラスの原料や消石灰 (Ca(OH)<sub>2</sub>)、珪灰石 (CaSiO<sub>3</sub>) 等の添加剤の影響につ

いて検討した。

## 2. 実験

## 2.1 シラスコンクリート製品の焼成および評価

シラスコンクリート製品として、シラスコンクリートブロックを製造している企業から提供された試料を850, 1050, 1150 の各温度で焼成した。焼成には超高速昇温電気炉 (アドバンテック東洋(株)製 KSH-2) を用いて90 /min の昇温速度で所定の温度まで加熱し、その温度で30分間保持した後、炉内で自然冷却した。

未焼成および焼成後の試料は、精密万能試験機 (株島津製作所製オークグラフ AG10TA) を用いて、曲げ強度および圧縮強度を測定した。曲げ強度は、支点間距離100mm、クロスヘッド速度1mm/min の3点曲げ法で測定を行い、最大荷重から (1) 式により算出した。

$$a = 3LF / 2WT^2 \quad (1)$$

ここで、a: 曲げ強さ (MPa), L: 支点間距離 (mm), F: 荷重 (N), W: 試料片幅 (mm), T: 試料片厚さ (mm) である。

圧縮強度は、曲げ試験の直後に行い、荷重用加圧板 (加圧面40mm × 40mm) を用いて、クロスヘッド速度1mm/min で載けて最大荷重を求め (2) 式により算出した。

$$b = F / 1600 \quad (2)$$

ここで、b: 圧縮強さ (MPa), F: 荷重 (N) である。

曲げ試験後の破断面についてデジタルマイクロSCOPE (株)キーエンス製 VH - 8000C) を用いて観察した。

また焼結体の鉱物組成を粉末 X 線回折法で測定した。装置は(株)リガク製 Geigerflex を用いて、0.05° ステップ、スキャンスピード 2° /min, 電圧40kV、電流30mA の条件で測定した。

\*素材開発部

## 2.2 シラスコンクリートの配合焼成試験

### 2.2.1 シラス - セメント比の検討

原料として、シラスは清新産業(株)製 AS100, セメントは太平洋セメント(株)製普通ポルトランドセメントを用いた。シラス:セメント比を10:0, 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5の重量比で配合した。これらの配合原料に対し20wt%の水を加えて、攪拌らいかい機で攪拌混合した後、50×50×30mmの金型に充填し、プレス圧100kNで成形した。成形体は1000~1200℃まで50℃刻みの温度で焼成した。このときの昇温速度、設定温度での保持時間等は、シラスコンクリート製品の焼成試験と同様の条件で行った。また比較用に湿潤状態で1ヶ月間養生したシラスコンクリートを未焼成試料とした。これらの試料について、6×8×50mmの直方体に研削し、支点間距離30mm、クロスヘッド速度0.5mm/minで曲げ試験を行った。

焼結体の鉱物組成は粉末X線回折法で測定し、焼成体の吸水率およびかさ比重はJIS R 2205「耐火レンガの見掛気孔率・吸水率・比重の測定方法」に準拠して測定した。

### 2.2.2 シラス - セメント - 添加剤の検討

シラスとセメントの重量比を8:2と固定して、シラス - セメント配合原料に対して、消石灰および珪灰石を5, 10, 20, 30wt%と20wt%の水を添加して攪拌混合した後、50×50×30mmの金型に充填し、100kNのプレス圧で成形を行った。成形体の焼成温度は1100, 1150, 1200℃で焼成条件や焼成体の評価については、シラス - セメント比の検討と同様に行った。

## 3. 結果と考察

### 3.1 シラスコンクリート製品の焼成および評価

図1に曲げ試験および圧縮試験の結果を示す。この結果

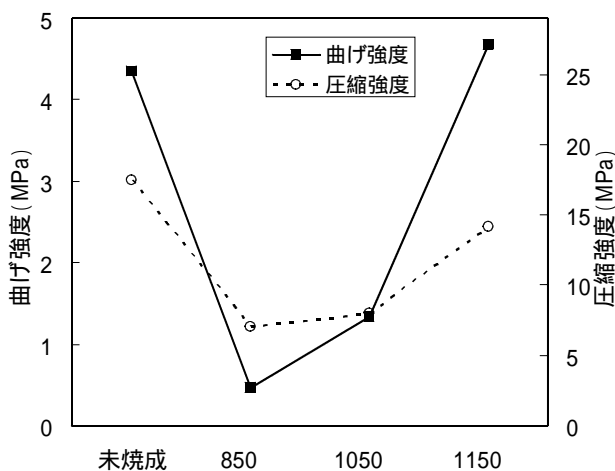


図1 シラスコンクリート製品の曲げ試験および圧縮試験結果

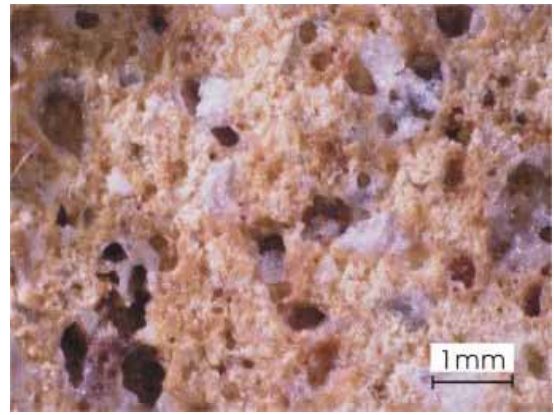


図2 曲げ試験後の試料断面写真(焼成温度1150℃)

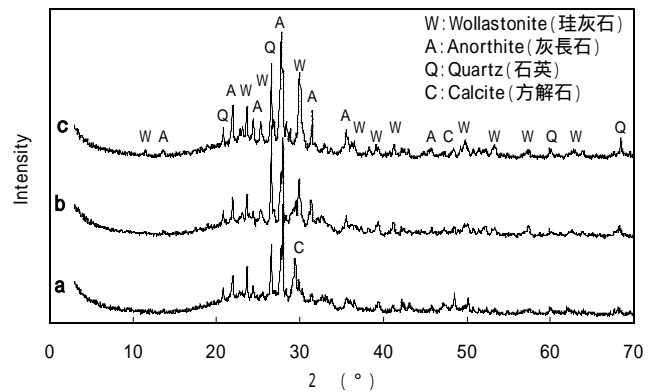


図3 各焼成温度におけるシラスコンクリートのX線回折パターン(a: 850℃, b: 1000℃, c: 1150℃ 焼成)

から通常のシラスコンクリート製品を焼成した場合では、曲げ強度、圧縮試験ともに850~1050℃程度までは大きく強度が低下し、1150℃で曲げ強度については同等程度、圧縮強度については未焼成品の8割程度の値であった。

次に1150℃で焼成した試料の曲げ強度測定後の破断面観察結果を図2に示す。図2では、最大で0.6mm程度の空隙が焼成体内部に数多く観察される。これは比較的大きなシラスや軽石が溶融したためにできたものであると推察されるが、この大きな空隙が強度低下の主要因として考えられる。

図3に各焼成温度におけるシラスコンクリートのX線回折測定結果を示す。この結果からシラスコンクリート焼成体に含まれる主な結晶化合物は、灰長石( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )と石英( $\text{SiO}_2$ )であった。灰長石はシラス - セメントの反応によって新たに生成された結晶相であり、石英は、コンクリート製品に含まれる砂利成分である。また850℃で焼成した試料(図3a)のみで方解石( $\text{CaCO}_3$ )が認められたのは、コンクリート製品中に含まれる方解石が未反応のまま残存していると思われる。しかし焼成温度が高くなると $\text{CaO-SiO}_2$ ,  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ の反応が進行し、灰長石以外に珪灰石の結晶相が確認できた(図3c)。

3.2 シラスコンクリートの配合焼成試験

3.2.1 シラス - セメント比の検討

図4に各焼成温度におけるシラスコンクリートの配合量と曲げ強度との関係を示す。また図5に吸水率を、図6にかさ比重の測定結果を示す。実験に使用したシラスは、100 $\mu$ m以下の比較的細かい粒子であるためにシラスコン

クリート製品を焼成した場合にみられた大きな強度低下はなく、1150 まで焼成温度が高くなるにしたがって曲げ強度も高くなり、未焼成試料より最大7倍程度（未焼成：6 MPa，シラス：セメント=8：2，1150 焼成：45MPa）の強度向上がみられた。これは焼成温度が高くなることで吸水率が低下し、焼成体の焼結が促進されることが理由として考えられる。しかしながら1200 では、シラスの配合量が多い試料で逆に強度の低下が認められた。この原因として、図6の結果から曲げ強度が低下した試料でかさ比重が低下しているため、過度の焼成で焼成体内部でシラス成分が発泡したのではないかと仮定した。この確認のため、1150 ，1200 焼成体（シラス：セメント=10：0）の破断面を電子顕微鏡（日本電子製 JSM-6330F）により観察した。観察結果を図7，図8に示す。これらの結果から焼成体内部に空隙が観察され、焼成温度が高い1200 では、数十 $\mu$ m程度に大きく成長して、数多く存在していることがわかる。このことから焼成温度が高い場合では、焼成体内部で発泡し強度低下の原因となることが示唆された。

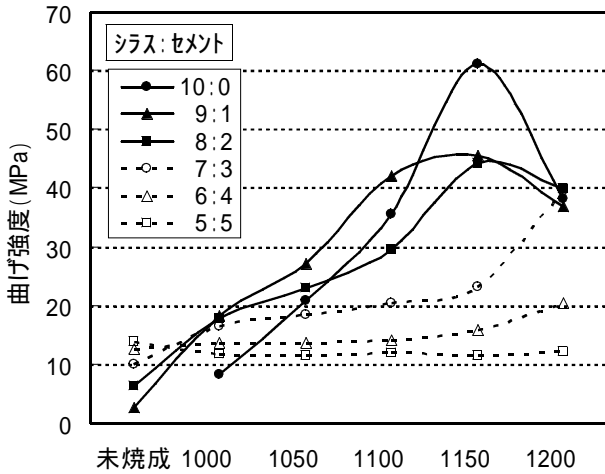


図4 各焼成温度におけるシラスコンクリートの配合量と曲げ試験結果

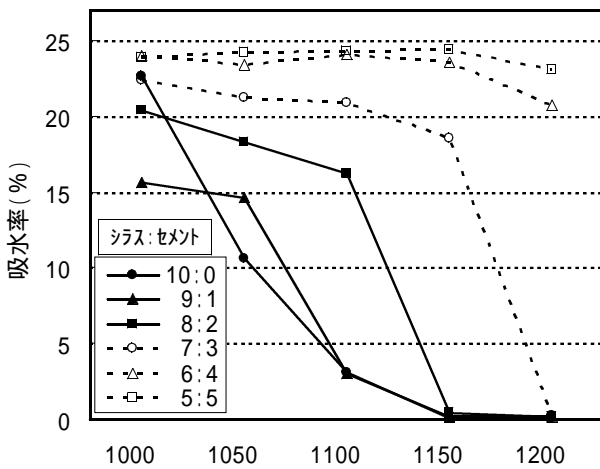


図5 シラスコンクリート焼成体の吸水率測定結果

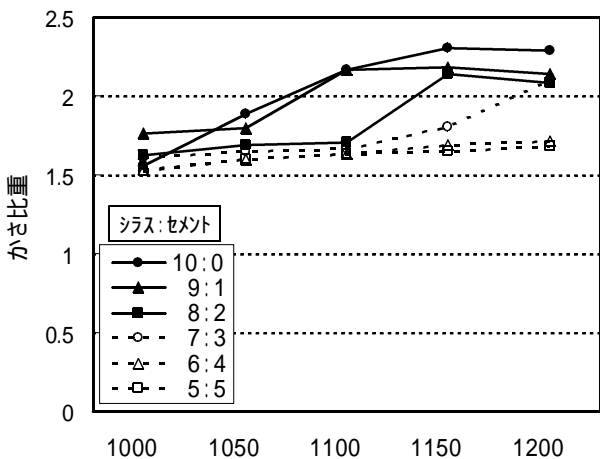


図6 シラスコンクリート焼成体のかさ比重測定結果

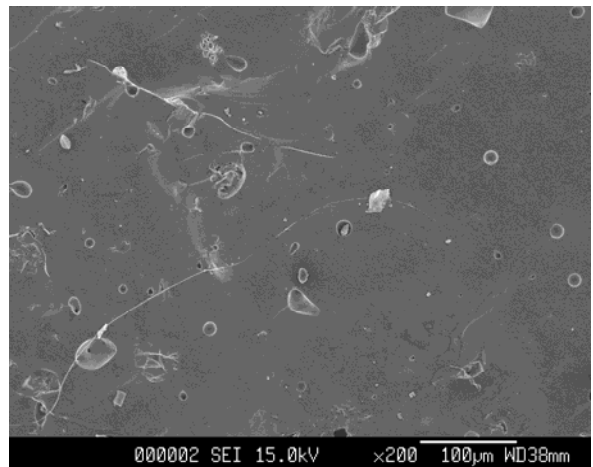


図7 1150 焼成体破断面の電子顕微鏡写真 (シラス：セメント=10：0)

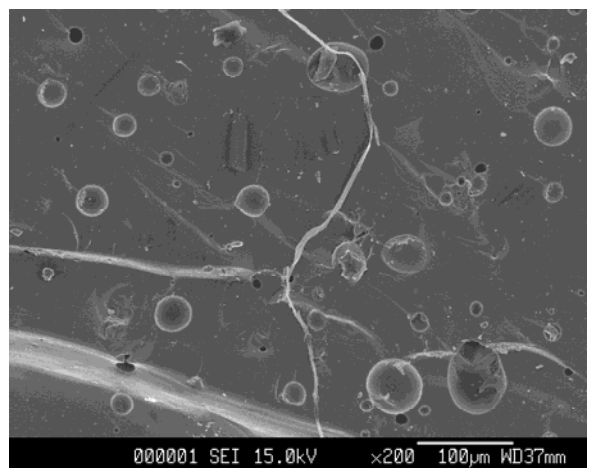


図8 1200 焼成体破断面の電子顕微鏡写真 (シラス：セメント=10：0)

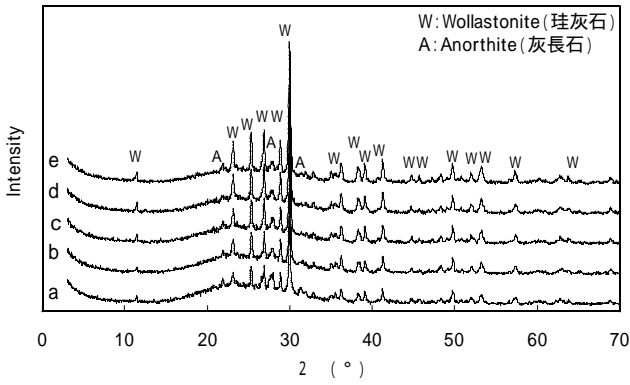


図9 各焼成温度におけるシラスコンクリートのX線回折パターン(シラス:セメント=8:2, a:1000, b:1050, c:1100, d:1150, e:1200 焼成)

図9にシラスコンクリート焼成体(シラス:セメント=8:2)のX線回折測定結果を示す。この結果から、シラスコンクリート焼成体に含まれる結晶化合物は、珪灰石と灰長石のみであった。

3.2.2 シラス-セメント-添加剤の検討

図10に消石灰を添加剤としたシラスコンクリートの各焼成温度における曲げ強度の測定結果を示す。また図11に吸水率を、図12にかさ比重の測定結果を示す。図10から全体的に焼成温度が高くなるにしたがって曲げ強度も高くなる。しかし消石灰の添加量が0の場合に高い強度が得られる結果となった。これは図11, 12から消石灰の添加量が多いと吸水率が高く、かさ比重も低くなったことから、焼結が抑制されたことが原因ではないかと考えられる。

図13に消石灰を添加したシラスコンクリート焼成体のX線回折測定結果を示す。消石灰を添加剤として加えた場合の焼成体に含まれる結晶化合物は、主に珪灰石と灰長石であった。添加量が多い場合に消石灰が脱水した消石灰

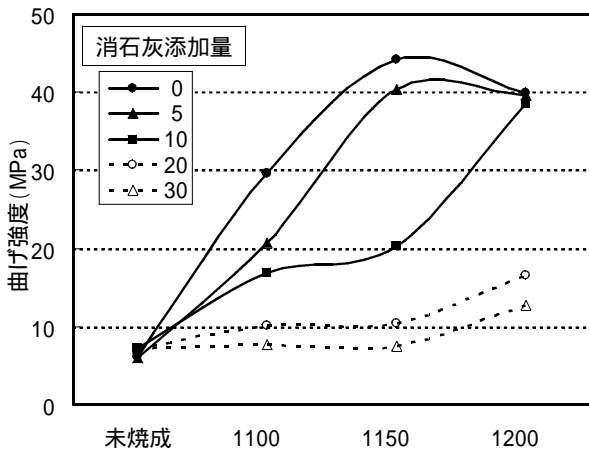


図10 消石灰を添加剤としたシラスコンクリートの添加量と曲げ試験結果

( $\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ )とセメントに含まれる水硬性化合物(ピーライト: $\text{C}_2\text{S}$ )が確認された。

同様に珪灰石を添加剤としたシラスコンクリートの各焼成温度における曲げ強度の測定結果を図14に示す。また図15に吸水率を、図16にかさ比重の測定結果を示す。珪灰石を添加剤として用いた場合、添加量が増加するにしたがって焼成体の強度が増し、未焼成試料と比較して最大約14倍(未焼成:6 MPa, 30%添加1150 焼成:85MPa)の強度向上がみられた。図15, 16から焼成温度が高くなることで吸水率が低下し、焼成体の焼結が促進されることや1200°Cでは、かさ比重が低下することで逆に強度の低下が認められること等については、シラス-セメント系の結果と一致するため同様の原因が考えられる。

図17に珪灰石を添加した焼成体のX線回折測定結果を示す。この場合もシラス-セメント系と同様に焼成体に含まれる結晶化合物は、珪灰石、灰長石のみであった。

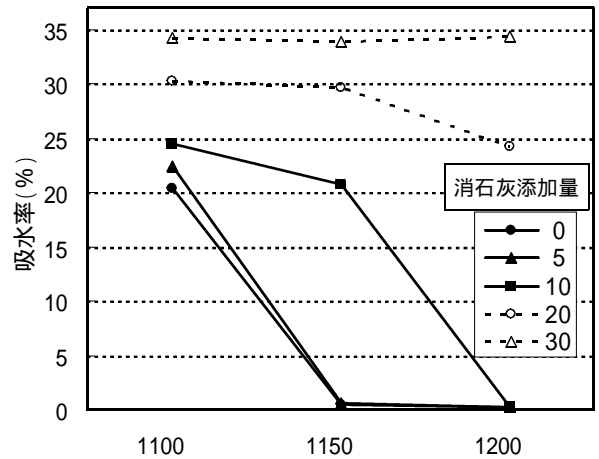


図11 消石灰を添加剤としたシラスコンクリート焼成体の吸水率測定結果

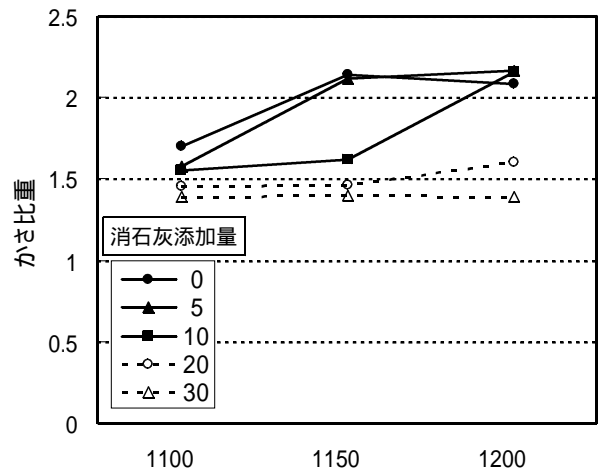


図12 消石灰を添加剤としたシラスコンクリート焼成体のかさ比重測定結果

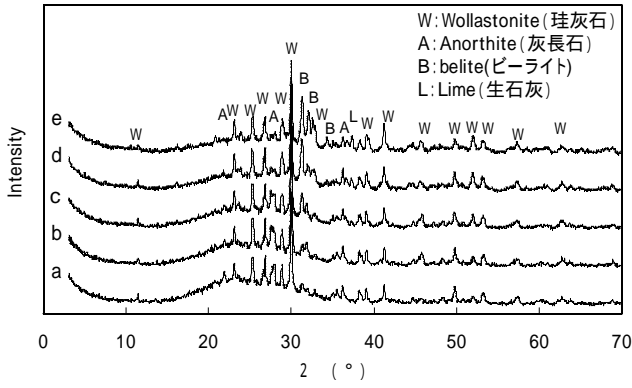


図13 消石灰を添加剤としたシラスコンクリート焼成体のX線回折パターン (シラス:セメント=8:2, a:0%, b:5%, c:10%, d:20%, e:30%添加)

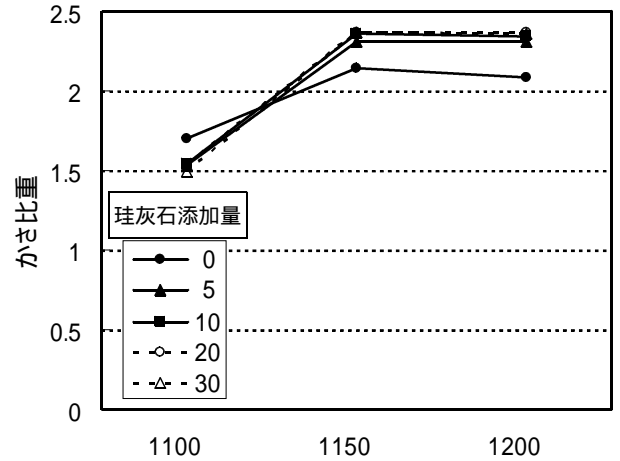


図16 珪灰石を添加剤としたシラスコンクリート焼成体のかさ比重測定結果

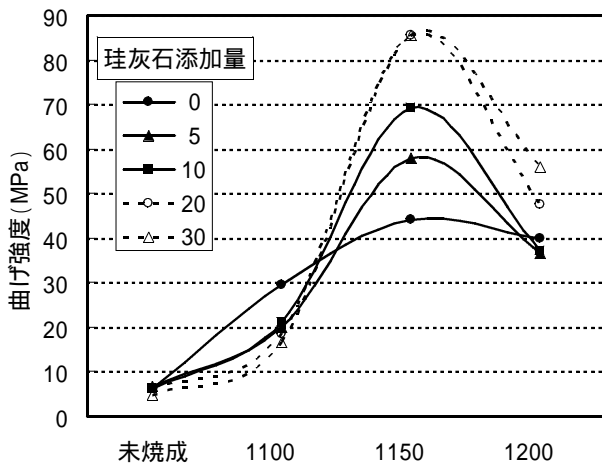


図14 珪灰石を添加剤としたシラスコンクリートの添加量と曲げ試験結果

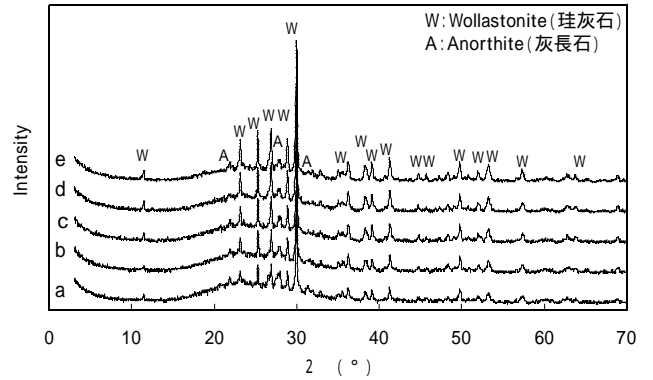


図17 珪灰石を添加剤としたシラスコンクリート焼成体のX線回折パターン (シラス:セメント=8:2, a:0%, b:5%, c:10%, d:20%, e:30%添加)

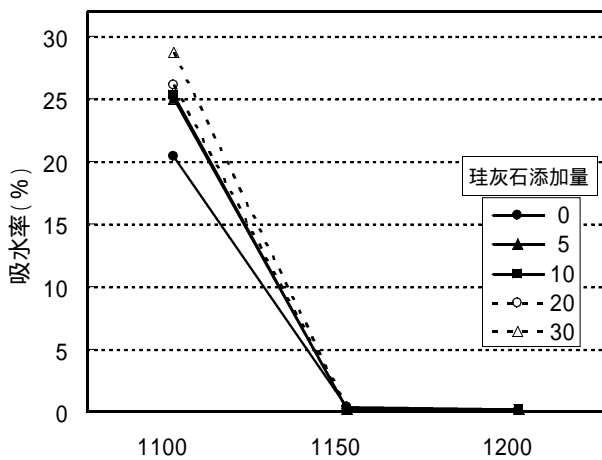


図15 珪灰石を添加剤としたシラスコンクリート焼成体の吸水率測定結果

4. 結言

シラスコンクリート製品の用途拡大を目的にシラス - セメント - 添加剤等の配合比や焼成温度の影響について、曲げ強度やかさ比重、生成される結晶化合物の評価検討を行ったところ以下の知見が得られた。

- (1) 比較的大きなシラスや軽石を含むシラスコンクリートは、焼成でシラスの溶融による空隙が生じるために焼成温度を高くしても未焼成品と同じ程度の強度であった。
- (2) 100 μm以下のシラスを原料として用いたシラスコンクリートでは1150 °Cまで焼成温度が高くなるにしたがって曲げ強度も高くなり、未焼成品と比較して最大7倍の強度があった。
- (3) シラスコンクリートに消石灰を添加した場合、添加量の増加に伴い、焼結が抑制されることで成形体の強度は低下する傾向にあった。
- (4) 珪灰石を添加剤とする場合では、添加量が増加するにしたがって焼成体の強度が増し、未焼成試料と比較

して最大約14倍の強度向上がみられた。

- (5)以上より、シラスの含有量の多いシラスコンクリートは、焼成温度が高くなると焼結が促進され強度も増すが、1150 以上では内部での発泡による空隙が発生するために逆に強度が低下することがわかった。

#### 参 考 文 献

- 1)中重朗，神野好孝，袖山研一，田畑一郎：鹿児島県工業技術センター研究報告，6，21-24（1992）
- 2)袖山研一：鹿児島県工業技術センター研究報告，12，65-70（1998）
- 3)VSI（火山珪酸塩工業）研究会編：“新時代を築く火山噴出物”，(株)リアライズ社（1995），p.31-192
- 4)袖山研一，吉村幸雄，瀬知啓久，濱石和人，瀬戸口和徳：特許第3787595号（2006）
- 5)袖山研一，吉村幸雄，瀬知啓久，濱石和人，上中誠：特許第3858079号（2006）
- 6)神尾典，守明子，谷地秀則，久保正親：九州工業技術試験場報告，36，101-107(1986)
- 7)無機マテリアル学会編：“セメント・セッコウ・石灰ハンドブック”，(株)技報堂出版(1995)，p.190-208