

資料

石州軽量瓦の開発

江木俊雄*・中島 剛**・吉岡尚志*・芝尾敬司***・松田好史****・清水一郎****

1. 目 的

瓦屋根の被害は1995年の阪神淡路大震災で多数発生し、土葺き工法の耐震性や棟瓦の耐震性が指摘された¹⁾。そこで、建築物に関する構造安全性に対する社会のニーズに応えるべく、技術データに裏付けされた瓦の耐震性・耐風性を実現するための工法が、瓦屋根標準設計・施工ガイドラインにまとめられた¹⁾。この中には、平成12年建設省告示第1454号に拠る日本列島基準風速ガイドで示された地域ごとの基準風速に見合った工法が例示されている^{2), 3)}。さらに、平部の瓦、役瓦、棟部の瓦の試験方法も定められており、施工方法が基準風速や水平加速度1Galに対応した地震力に対する耐力を有するかを確認することができる⁴⁾。例示された工法や試験に合格した工法を屋根工事に適用することにより、災害による瓦の飛散・落下は防げると考えられる。

家屋を設計する際には屋根荷重を考慮する必要がある。屋根材に瓦を使用する場合と金属やスレートを使用する場合とでは屋根荷重が異なる。屋根材に瓦あるいは薄鉄板を使用した場合の単位面積 (m²) 当たりの荷重 (下地および垂木を含む) はそれぞれ640, 200Nと示され⁵⁾、屋根材に応じた躯体強度が求められている。すなわち、設計の上では家屋は屋根荷重に見合った躯体強度を持つことから、屋根材の違いによって地震に対する耐性は変わらないはずである。

全国陶器瓦工業組合連合会は、中川貴文氏 (国土交通省国土技術政策総合研究所, 現 京都大学生存圏研究所) が開発された木造住宅倒壊解析ソフトウェア[Wallstat]を使用して、耐震診断の評点が0.51 (兵庫県南部地震の震度で倒壊するレベル) の瓦屋根の2階建て住宅の屋根材をスレート、あるいは金属屋根に変更し、兵庫県南部地震で観測された地震波を与えた耐震シミュレーションを行った。その結果、屋根材を重い瓦から軽いスレートや金属に変更しただけでは耐震診断の評点は共に0.62までしか向上せず、変更前と同様に倒壊する結果となった⁶⁾。他方、耐震補強を施した場合は瓦屋根のままでも不倒との結果が得ら

れている⁵⁾。すなわち、屋根荷重に対して適切な躯体強度を持たない家屋の耐震診断の評価を1以上 (一応倒壊しない～倒壊しないレベル) にするためには、屋根の軽量化ではなく、躯体強度の増加が不可欠、かつ有効と判断できる。

上記のとおり、瓦を屋根材に使用する場合はその面積に応じた屋根荷重値が定められていることから、瓦の重量を仮に25%程度軽量化しても躯体に求められる強度は変わらない。すなわち、家屋に使用する部材の量や質、金具等は通常の瓦の場合と同じ仕様となることから、建築コストを下げることは出来ない。しかしながら、瓦の軽量化は、天然資源である粘土の使用量削減につながり、瓦工場内での瓦製造装置への負荷低減、焼成に必要な化石燃料の使用量削減に伴う二酸化炭素排出量の削減、需要地へのトラック搬送時の二酸化炭素排出量の削減等の効果がある。さらに、高齢化が進みつつある屋根工事業者の、特に足場が悪い屋根での瓦運搬時の作業を軽減できる。そこで、平成25年度から石州瓦工業組合、岡山大学 (H25～H26) または、岡山理科大学 (H27～H30)、島根県の3者は、人と環境に配慮した瓦の開発という観点から、石州瓦の軽量化に取り組んだ。開発する軽量瓦の重量は2200g以下、曲げ破壊荷重は2200N以上、吸水率は5%以下とした。その結果、重量が従来の瓦(重量:2850g程度) よりも22%程度軽量化された石州瓦の量産化に、石州瓦工業組合の一員の(株)シバオ社が成功した。

本資料では、3者が行った研究の一部と量産化に成功した軽量瓦の品質および耐風試験結果について紹介する。

表1 耐風試験条件

項目	条件
試験の種類	繰り返し引き上げ加力試験 (150サイクル)
繰り返し引き上げ加力(N/9枚)	2386(2732N/m ²)
基準風速(m/s)	38
屋根平均高さ(m)	10
ピーク風力係数(棟端部)	-5.0
登り働き長さ(mm)	226
屋根勾配(寸)	4.0
地表面粗度区分	Ⅲ
有効瓦枚数(枚)	14(防災瓦)
働き幅(mm)	276

*無機材料・資源科, **無機材料・資源科 (現:無機材料技術科), ***(株)シバオ, ****岡山理科大学

表2 耐風試験における施工条件

項目	条件
施工方法	全数1箇所緊結工法
供試瓦	市販瓦, 軽量瓦(裏面帯状施釉)
棧瓦用棧木	材質:杉(高さ×幅:15×42mm), 登り働き寸法:226mm, 留付けピッチ:450mm(野地板貫通垂木留)
野地板	材質:構造用合板(厚さ:12mm)
垂木	材質:松材(高さ×幅:60×45mm), ピッチ:450mm
緊結材種類	瓦緊結用:コーススレッド(径×長さ:φ3.8×41mm)
	棧木緊結用:コーススレッド(径×長さ:φ3.8×50mm)
	野地板緊結用:コーススレッド(径×長さ:φ3.8×51mm)
	垂木緊結用:コーススレッドW90半ネジ(径×長さ:φ4.3×90mm, 加工部:先端~57mm)

2. 方法

2.1 粘土試験体の作製

実験には、石州瓦工業組合所属の2社(A, B社とする)と(株)シバオから提供を受けた瓦製造用の粘土を使用した。提供を受けたそれぞれの粘土の含水率を約17%に調整した後、真空土練機(高浜工業,MPM120N)を用いて、幅100mm, 厚さ15mm, 長さ250mmの試験体を作製した。

これらの試験体は室温で乾燥を行った。乾燥後の試験体に対し、各社から提供を受けた銀黒色の釉薬を1)表面のみ全面, 2)両面とも全面, 3)表面の全面とその裏面に試験体短手方向対称軸を中心とし、幅が10cmの帯状に施釉した。また、(株)シバオの粘土を使用した試験体については、1)表面のみ全面と2)表面全面とその裏面に試験体短手方向対称軸を中心とし、異なる幅の帯状に施釉を行った。試験体の焼成は、電気炉を用いて大気中1180℃から1220℃の温度範囲で20分間行った。さらに、(株)シバオから既存の瓦の白地(乾燥が終了した瓦の形状をした粘土成形体)と銀黒色の釉薬の提供を受け、白地の1)表面だけ, 2)表面と裏面の谷線を中心線としその両側にそれぞれ6, 7, 8cmの施釉を行い、異なる幅の帯状釉薬層を形成した。焼成は、電気炉を用いて大気中1180℃の温度で20分間行った。

2.2 3点曲げ試験

試験体に対する3点曲げ破壊試験は、オートグラフ(Shimadzu, AG-2000C)を用いて行った。支持棒のスパンは200mmで、押し棒による荷重速度は50N/secとした。

2.3 軽量瓦のJIS A 5208試験と重量測定

JIS A5208(1996)に準拠し、吸水試験、曲げ試験、凍害試験の3項目を作製した軽量瓦について実施した。曲げ試験は2.2に示した装置を使用した。凍害試験は、石州瓦に対しては凍結融解を25回実施した後にひび割れ、剥離が瓦に生じていないかを目視で確認し、凍害試験の可否を判定している。本試験では、軽量瓦にひび割れや剥離が生じるまで凍結融解を繰り返して行い、凍害が生じた時点での繰り返し回数を示すこととした。

2.4 細孔分布測定

瓦素地の細孔分布測定は、水銀圧入式ポロシメーター(Quantachrome Instruments, Pore Master33P)を使用して行った。測定用試験体は瓦の中央付近からダイヤモンドカッターを用いて切り出し、精密ダイヤモンドカッターにより、縦横が5mm, 長さが20mmの四角柱を切り出し、110℃で十分に乾燥した後、測定に使用した。

2.5 耐風試験

耐風試験は、瓦用耐風耐震試験機(碧南特殊機械(株), HTK・RTC-1310A)を用い、試験方法は瓦屋根標準設計・施工ガイドラインの第2章 標準試験方法 2-1 平部の瓦の試験方法に準拠した。なお、試験体は4段×4列、引き上げ瓦は3段×3列の9枚とし、浮き上がりを抑える役目をするダミー瓦は7枚とした。試験条件と施工条件はそれぞれ表1, 2に示す。

3. 結果

3.1 施釉した試験体の3点曲げ試験結果

図1にA, Bの2社の焼成後の試験体の3点曲げ破壊荷重を示す。両試料ともに、表側の面だけに施釉した場合よりも両面に施釉した方が曲げ破壊荷重が大きく、試験体の両面を施釉する場合よりも、3点曲げ試験時に押し棒が接触する面の反対側の面に、幅が約10cmの帯状の施釉を行った場合の方が曲げ破壊荷重が高くなった。

図2に(株)シバオの粘土を用いた試験体の帯状施釉の施釉幅と曲げ破壊荷重との関係を示す。表側の面だけの施釉よりも、その裏側の面に帯状の施釉する方が曲げ破壊荷重が高くなり、その値は施釉幅が14cmまでは増加し、その後は低下した。これらの測定結果から、3点曲げ試験において押し棒が接触する面の反対側に、押し棒と平行になる帯状の施釉を行うと、施釉幅の増加とともに曲げ破壊荷重が大きくなり、その幅が支持棒のスパン長の8割程度を超えると両面施釉の曲げ破壊荷重に近づくことが分かった。

図3に瓦の表面(裏面施釉幅0cm)だけと、表面と裏面に幅がそれぞれ12, 14, 16cmの帯状釉薬層を形成した瓦

について、裏面釉薬層の幅と3点曲げ破壊強度値の関係を示す。裏面の施釉により曲げ破壊荷重が高まり、幅が14cmの場合に最も高い値となり、図2の試験体による結果と全く同様の傾向を示した。この時、表面のみ施釉した瓦よりも48%程度曲げ破壊荷重が高まった。

裏面の施釉により曲げ破壊荷重が施釉の幅に対して極大値を示す傾向について、松田ら⁷⁾は有限要素法解析を用いて、1) 裏面釉薬層の中央部表面における最大主応力が釉薬層の破壊強度に達した場合、2) 裏面釉薬層と素地との界面での素地側で最大主応力が素地の破壊強度に達した場

合、の2とおりについて解析を行い、1) の場合は、裏面の施釉により曲げ破壊荷重が小さくなる、2) の場合では図2と同様の裏面施釉幅に対して曲げ破壊荷重が極大値を示す結果を得た。このことから、裏面の全面に釉薬層を形成するよりも、最大主応力が生じる周辺部のみに釉薬層を形成する方が強度向上に対して有効であることが有限要素法による解析でも明らかになった。

3.2 裏面施釉装置および製造した軽量瓦の外観

図4に(株)シバオが開発した裏面施釉装置の外観を示す。この装置は、乾燥が終了した粘土成形体（白地）の表面にスラリー状の釉薬を施釉する前段に設置され、白地の裏面にスラリー状の釉薬を塗布する。施釉幅は14cm程度とし、施釉位置はスラリーの吐出量とノズル位置と角度の調整により定めている。

図5に軽量瓦の外観写真を示す。瓦裏面の縦向きに幅が14cmの釉薬層が認められる。乾燥が終了した白地は、ハンガーに吊るされ搬送される。搬送には金属製のハンガーを用い、これを瓦の尻部の水返しに引掛け、瓦をハンガーに吊るした状態で移動させる。そのため、表面、裏面共に尻部の端から4cm程度は施釉が行えず、無施釉部分が生じている。

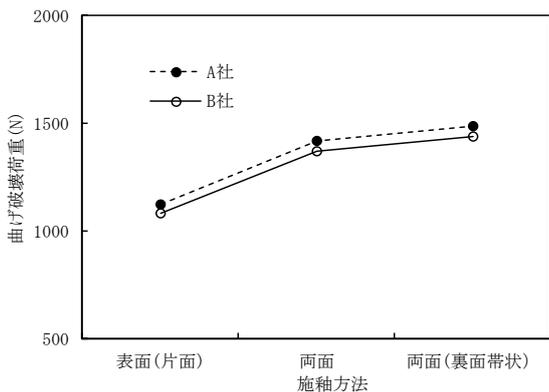


図1 施釉方法が異なる試験体の曲げ破壊荷重

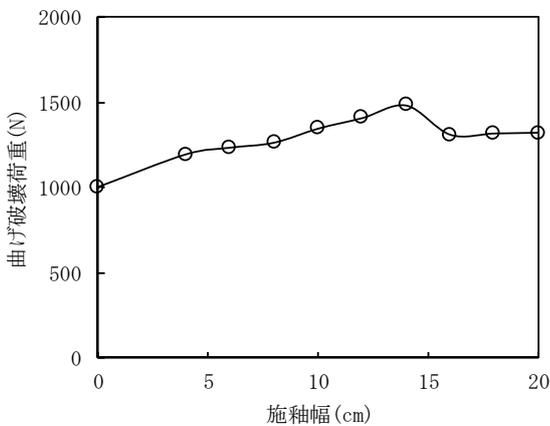


図2 施釉幅が異なる試験体の曲げ破壊荷重

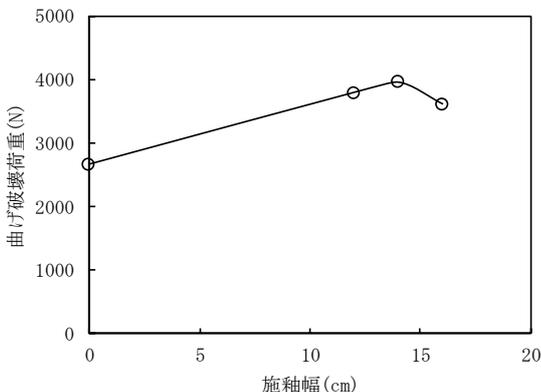


図3 表面に施釉した白地の裏面に異なる幅の帯状施釉を施した後に焼成した瓦の曲げ破壊荷重



図4 裏面施釉装置の外観
①裏面施釉前の白地、②裏面施釉後の白地



図5 裏面施釉を施した瓦の外観

表3 (株)シバオで製造した軽量瓦の平均重量, 平均吸水率, 平均曲げ破壊荷重

重量(g)	吸水率(%)	曲げ破壊荷重(N)
2225	4.5	2337

3.3 軽量瓦のJIS A 5208試験と重量測定結果

(株)シバオで製造した軽量瓦から無作為でサンプリングした瓦3枚について、重量測定、吸水試験、曲げ試験を行った。それぞれの測定値の平均値を表3に示す。軽量瓦の平均吸水率は4.5%で、曲げ破壊荷重は2330Nを示し、JIS規格値の吸水率12%以下、曲げ破壊荷重1500N以上を満たすとともに、曲げ破壊荷重は開発の目標値であった2200N以上となった。軽量瓦の重量は目標値の2200gをわずかに上回ったが、ほぼ目標通りの重量となった。凍結融解試験は90サイクルを超え、試験を継続している。

3.4 細孔分布測定結果

図6に(株)シバオの市販瓦(吸水率:4.2%)と軽量瓦の細孔量測定結果を示す。それぞれの累積細孔量曲線はほぼ一致していることから、軽量瓦は通常の製品と同等の耐凍害・塩害の性質を持つと判断できる。

3.5 耐風試験

耐風試験は、(株)シバオの市販瓦と軽量瓦に対してそれぞれ行った。その結果、瓦1枚当たり265Nの引き上げ加力と除荷を9枚の瓦に対して150回の繰り返し、その間に1) 所定の加力が行えた、2) 引き上げによる変位が50mm以下、の判定条件を満たしたことから、表1に示す試験条件での耐風試験にそれぞれが合格した。なお、本試験条件では基準風速38m/s、ピーク風力係数を-50(棟端部)としており、仮にピー

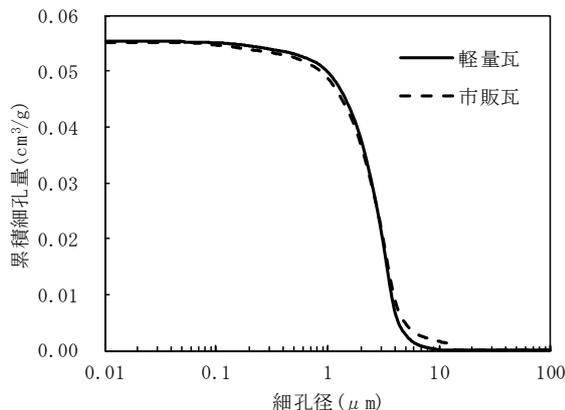


図6 軽量瓦と市販瓦の累積細孔量曲線

ク風速係数を同一屋根勾配平部の-2.5とすると、基準風速は46m/sの区分以上(計算上は38m/s×√2=54m/s)の風速に耐えられることとなる。

3.6 まとめ

石州瓦工業組合、岡山理科大学、島根県の3者による瓦の軽量化の共同研究により得られた結果を以下に示す。

- 1) 3点曲げ試験において、最大主応力が生じる周辺部に釉薬層を形成すると曲げ破壊荷重は増加し、曲げ破壊荷重は施釉幅に対して極大値を持つことが確認された。
- 2) 瓦の裏面に幅が約14cm帯状釉薬層を形成することにより、重量が2225g、3点曲げ破壊荷重が2300N程度、吸水率が4.5%の軽量瓦が試作できた。凍害試験結果および細孔分布測定結果から軽量瓦は従来の市販瓦と同等の耐久性を持つと考えられる。
- 3) 耐風試験結果から、軽量瓦は市販の瓦と同等の耐風性能を有していることが確認できた。

謝 辞

本報告は、平成25-29年度の石州瓦産業界経営基盤強化支援事業による研究成果の一部である。(株)シバオが開発した裏面施釉装置は、(公財)しまね産業振興財団の平成28年度の革新型研究開発補助金による研究成果の一部である。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) 岡田亘. 序. 瓦屋根標準設計・施工ガイドライン. 瓦屋根標準施工ガイドライン委員会. 社団法人 全日本瓦工事業連盟, 全国陶器瓦工業組合連合会, 全国厚形スレート組合連合会. 2013, p.iii-iv.
- 2) 第3章 工法の概要. 瓦屋根標準設計・施工ガイドライン. 瓦屋根標準施工ガイドライン委員会. 社団法人 全日本瓦工事業連盟, 全国陶器瓦工業組合連合会, 全国厚形スレート組合連合会. 2013, p.44-46.
- 3) (株)日本屋根経済新聞社編集部. 瓦屋根標準設計・施工ガイドライン(2001年度版)施工ハンドブック. 第1版, (株)日本屋根経済新聞社, 2002, p.41-128.
- 4) 第2章 標準試験. 瓦屋根標準設計・施工ガイドライン. 瓦屋根標準施工ガイドライン委員会. 社団法人 全日本瓦工事業連盟, 全国陶器瓦工業組合連合会, 全国厚形スレート組合連合会. 2013, p.32-42.
- 5) 建築基準法施行令第八十四条
- 6) 屋根の耐震性を知る. 全国陶器瓦工業組合連合会, 一般社団法人全日本瓦工事業連盟. 全国陶器瓦工業組合連合会事務局. 2017, p.3-5.
- 7) 松田好史, 清水一郎, 江木俊雄. “陶器瓦試験片の釉薬層が三点曲げ破壊荷重に及ぼす影響”. 日本実験力学学会2017年度年次講演会予稿集. 岡山. 2017-08-28/30. 日本実験力学学会, 2017, p.49-50.