

# 平板形瓦の形状開発研究

伊藤 征幸 大野 昌彦 服部 金司

Study on Design of Flat-type Roofing Tiles by 3D-CAD and Finite Element Method  
by

Tatsuyuki ITO, Masahiko ONO and Kinji HATTORI

住宅様式の多様化、住宅の高級化志向に伴い、デザイン面を重視した平板形瓦の開発が盛んである。一方、屋根葺き職人の不足する現状では、熟練を要せず容易に施工できる粘土瓦の開発が望まれている。そこで、3次元CADと有限要素法を活用して、従来の機械的強度等の性能を維持しつつ軽量化し、輸送コストの低減が図れ、施工が容易な形状の尺間モジュールの平板形瓦の開発・設計手法を検討した。その結果、①尺間モジュール用の標準的な4.0/10及び4.5/10勾配兼用で伸び率を考慮した40形と36形の4種類のモデル平板形瓦が設計できた。②台形状リブの寸法を既存の平板形瓦より長辺を2mm、短辺を1mm及び高さを2.5mm大きくすることにより、リブの引張応力を損なわず瓦の厚さを1.5~2mm薄くすることができ、重量で約10%の軽量化が可能となった。③モジュール化により施工性の向上が期待できる等の特徴を持った尺間モジュールの平板形瓦を開発・設計することができた。

## 1. まえがき

三州瓦で有名な愛知県高浜・碧南市を中心とする西三河地区で生産される粘土瓦は、年間約6億枚を超える生産量を誇り、全国シェアの約40%を占め、増加の傾向にある。

日本の屋根に整然と並べられた瓦は家屋の美しさを引き立てさせている。しかし、瓦本来の使命は外界の厳しい自然環境から家屋を守ることであり、日本各地の気候風土に合せた現在の形状が生まれた。ところが最近になり、住宅様式の多様化、住宅の高級化志向に伴い、デザイン面を重視した和洋折衷住宅向きの平板形瓦の開発が盛んになり、その生産量は増大の一途である。

一方、屋根葺き職人の不足する現状では、熟練を要せず、容易に施工できる粘土瓦の開発が望まれている。

このような状況のなかで、機械設計等で活用されている3次元CAD及び有限要素法を活用して平板形瓦の屋根葺き姿をシミュレーションし、形状細部を見直しし、施工が容易で、従来の機械的強度等を損なうことなく、軽量化することにより輸送コスト低減が図れる形状の平板形のモデル瓦を設計・開発した。

## 2. 実験方法

### 2.1 3次元CAD及び有限要素法ソフトウェア

本研究において使用した3次元CADソフトウェアは、

米国CADKEY製のCADKEY V5.0である。また、有限要素法ソフトウェアは米国S. R. A. C製COSMOS/M Ver. 1.70(32000節点仕様)である。使用したパーソナルコンピュータは日本電気製PC-9821Ap/U2である。

### 2.2 瓦の形状調査

現在、三河地区で生産されている平板形瓦を選定し、形状寸法と建築されている戸建て住宅の基本設計モジュールを調査し、形状の問題点を検討した。

### 2.3 図形解析及び形状の検討

前項で調査・検討した結果に基づき基本となる平板形のモデル瓦について、瓦形状を3次元座標数値化して、3次元CADによる形状の図形シミュレーションを行った。操作手順は以下のとおりである。

- 1) 瓦形状をX・Y・Zの3次元座標値化する。
- 2) 座標値をテキストデータとして入力する。テキストデータはそれぞれの要素別に定義し、入力する。
- 3) 各要素を図形化し、形状をシミュレーションする。

この図形シミュレーションにより得られたモデルについて、より軽量で、強度が発現する施工性の良好な形状を設計・開発する。

ただし、瓦形状の3次元座標値は、幅方向がX、長さ方向がY、厚さ方向がZと定義されている。次項の有限要素法(Finite Element Method)も同様である。

## 2.4 モデル瓦の応力解析

モデル瓦の応力解析は有限要素法により解析した。有限要素法は、構造物の応力解析等を数学的手法により、問題とする構造物を三角柱や直方体などの簡単な形状要素に分割し、各要素の荷重と変位の特性を簡単な近似式(連立方程式)で表し、その個々の荷重と変位の連立方程式から構造物全体の連立方程式を作成し、構造物に発生する応力や歪みを工学的近似解として求め、構造設計する手法である。<sup>1)~3)</sup>

本研究で設計したモデル瓦の機械的強度を有限要素法の線形静解析により求めて、より軽量で踏み割れ等の欠点を生じない高強度で施工性の良好な形状を開発する。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 瓦形状の調査

主として洋風住宅向けに生産されている平板形瓦には、現在JIS規格はなく、軽量化・大形化等を重視した40枚/坪の平板形瓦が多く生産されている。住宅の設計モジュールは、尺間モジュールが大部分であり、メートルモジュールは大手ハウスメーカーの一部が採用しているに過ぎないのが現状である。

形状の異なるA、Bの2種類の40枚判(以下40形とする)の平板形瓦の形状寸法及び重量を表1に示す。表から働き寸法を考慮すると厳密には坪当り約39.4枚程度となり、整数枚ではないことが分った。瓦一枚当りの重量は3.3~3.8kgの範囲で設計されている。軽量化を図っている平板形瓦は、瓦本体の厚さが平均して12~14mm程度であり、ハニカムやリブで補強されている。リブにより補強されている平板形瓦は4~5本のリブが付加されており、曲げ破壊強度を向上させ、瓦本体の厚さを薄くして軽量化を図る工夫がなされている。また、住宅の洋風化

表1 既存平板形瓦の一例

(mm)

| 寸法呼称     | 40形A      | 40形B |
|----------|-----------|------|
| 長さ       | 350       | 330  |
| 幅        | 345       | 350  |
| 働き長さ     | 280~283   | 275  |
| 働き幅      | 303~306   | 303  |
| アンダーラップ幅 | 42        | 47*  |
| 厚さ       | 11.7~13.9 | 14.1 |
| (厚さ平均)   | 12.5      | —    |
| 重量(g/枚)  | 3540      | 3600 |

\* 和形及びS形棧瓦と同様な重なり方式

を考慮して外観的なデザインを重視した傾向であることが分った。

一方、和形棧瓦やS形棧瓦はJIS規格を満足しているものの、尺間、メートルモジュールのいずれにも該当しない形状寸法である。また、粘土瓦を施工する際には、屋根勾配を考慮した形状寸法が望ましいが、現在の形状寸法は住宅の柱間隔を基本としており、これを基準とした平坪を計算基礎とした三角形の底辺に相当する形状寸法で、屋根勾配を考慮していないことが分った。このために瓦の地割りなどの複雑な前作業が多くあり、瓦屋根施工に熟練を要する原因であるとも考えられる。

### 3.2 平板形瓦の形状検討

表2に示す4.0/10及び4.5/10の屋根勾配に兼用できる尺間モジュールの40形及び36形平板形瓦2種類の基本モデル瓦を図形化した。40形基本モデル平板形瓦の投影図を図1に示す。更に、CADのコピー機能を利用した屋根葺き姿の再現図を図2に示す。

図から、基本モデル瓦の水返し部の重なり部分の座標値を確認し、座標値が重なっている水返し部の座標値を修正して最終形状を決定した。このような重なり現象は瓦葺き職人の経験により、形状を手作業で修正する必要がある。CADソフト上ではこのような座標値の重なり現象を確認することができるが、施工時は水返し部が上部に位置する瓦を持ち上げる状態となり、見付け部に隙間を生じ、防水性能が悪くなる可能性がある。

有限要素法による応力解析を行うモデル瓦の形状寸法を表3に示す。

### 3.3 応力解析モデルの作成及び解析結果

前項の基本モデル瓦を基礎として、問題となる部分の形状細部の座標値を変更し、有限要素法による強度計算のシミュレーションを繰返し、モデル瓦の形状を決定した。

各形状のモデル瓦について瓦の踏割れを想定して、線形静解析による応力解析シミュレーションを行った。瓦素地の弾性率は30.0~32.9GPaの範囲であり、この応力解析では弾性率を31.4GPaに統一した。また、ポアソン

表2 基本モデル瓦の基本寸法

(mm)

| 寸法呼称     | 40形     | 36形     |
|----------|---------|---------|
| 長さ       | 305     | 363     |
| 幅        | 414     | 353     |
| 働き長さ     | 245~249 | 326~332 |
| 働き幅      | 364     | 303     |
| アンダーラップ幅 | 50      | 50      |
| 水返し高さ    | 4.5     | 4.5     |

表3 モデル瓦の形状寸法

(mm)

| 寸法呼称  | 40形 ㊦A  | 40形 ㊦B  | 36形 ㊦A  | 36形 ㊦B  |
|-------|---------|---------|---------|---------|
| 長さ    | 305     | 305     | 363     | 363     |
| 幅     | 414     | 414     | 353     | 353     |
| 働き長さ  | 245~249 | 245~249 | 326~332 | 326~332 |
| 働き幅   | 364     | 364     | 303     | 303     |
| フチ幅   | 50      | 50      | 50      | 50      |
| 水返し高さ | 4.5     | 4.5     | 4.5     | 4.5     |
| 瓦本体厚さ | 11      | 11      | 11      | 11      |
| リブ長さ  | 160     | 180     | 215     | 235     |

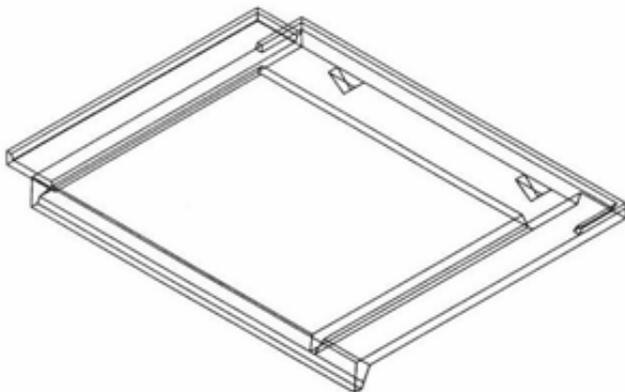


図1 40形基本モデル平板形瓦投影図



図2 屋根葺き姿シミュレーション図

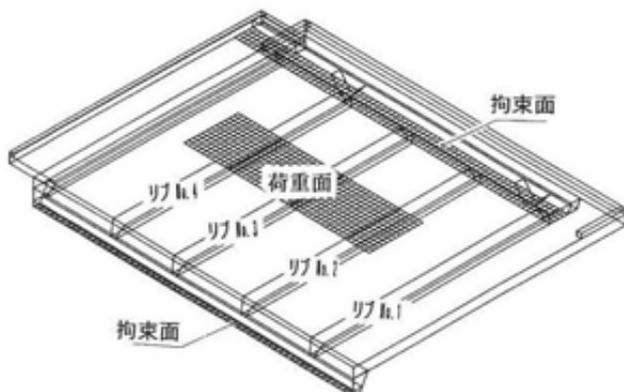


図3 有限要素法による応力シミュレーション図

比は0.16、材料密度は2.10g/cm<sup>3</sup>にした。また、瓦素地の曲げ破壊応力値は約19.5MPaである。

踏割れを想定し、足相当の面積を126cm<sup>2</sup>(210×60mm)の面荷重を、瓦の働き寸法の上中央部付近に荷重を加えた。拘束条件は瓦の水垂れ部の下部と瓦棧木に接触する部分とした。

荷重は既存の40形平板形瓦(リブ4本)の曲げ試験を行った値(40形4700N、36形3630N)とした。下部の拘束部分の変位は0とした。この応力解析シミュレーションの荷重面と拘束面について40形モデル瓦Bの投影図を図3に示す。メッシュ部分の上面が荷重面で、下面が拘束面である。

面荷重による応力解析を行った36形モデルAの瓦裏面の応力発生イメージ図を図4及び図5に示す。

瓦表面には主として圧縮応力が発生するが、リブの両端上面付近に引張応力がY軸方向に発生する。瓦裏面のリブに引張応力がY軸方向に集中して発生する。また、瓦表面のリブの両端上面付近の引張応力がY軸方向に発生する部位は圧縮応力が発生している。

曲げ破壊の発生に寄与する応力は引張応力であり、主として瓦裏面の長さ方向のY軸に集中して発生している。X軸及びZ軸方向には破壊に寄与率の低い圧縮応力が発生している。また、Z軸方向のリブの両端部付近に1.7~2.9MPa程度の引張応力が発生するが、Y軸方向に発生する最大引張応力の約30%以下であり、破壊を誘引する引張り応力ではないと判断した。この瓦裏面リブのY軸方向に発生する引張応力により瓦の曲げ破壊が起ると思われる。そこでY軸方向に発生する引張応力について検討した。

解析精度を検討するため、台形状のリブ形状(LW11・SW4×H10mm:以下LWは長辺、SWは短辺とする)及び瓦本体の厚み12.5mmの既存40形平板形瓦を有限要素法により、瓦素地の曲げ破壊応力値19.9MPaに近似するまで分割数を微細分化し、1要素の分割間隔を5mmとした時の解析最大応力値を応力解析した結果、曲げ破壊時の最大引張応力値は18.5MPaとなり、瓦素地の引張応力値の約93%の解析精度であった。これ以上分割数を微細分化しても解析精度が向上する傾向にないため、引張応力が集中するリブと荷重部及び上面本体部の分割は5mm単位の直方体とした。<sup>4)</sup>

基本モデル瓦の設計に当たり、軽量化を目的としたため、瓦本体の厚さを11mmと設定してリブの形状寸法を検討した。そのために、既存の40形平板形瓦と同様にリブを4本に固定してリブの形状寸法について検討した。

その結果、リブの形状寸法をLW13・SW5×H12.5

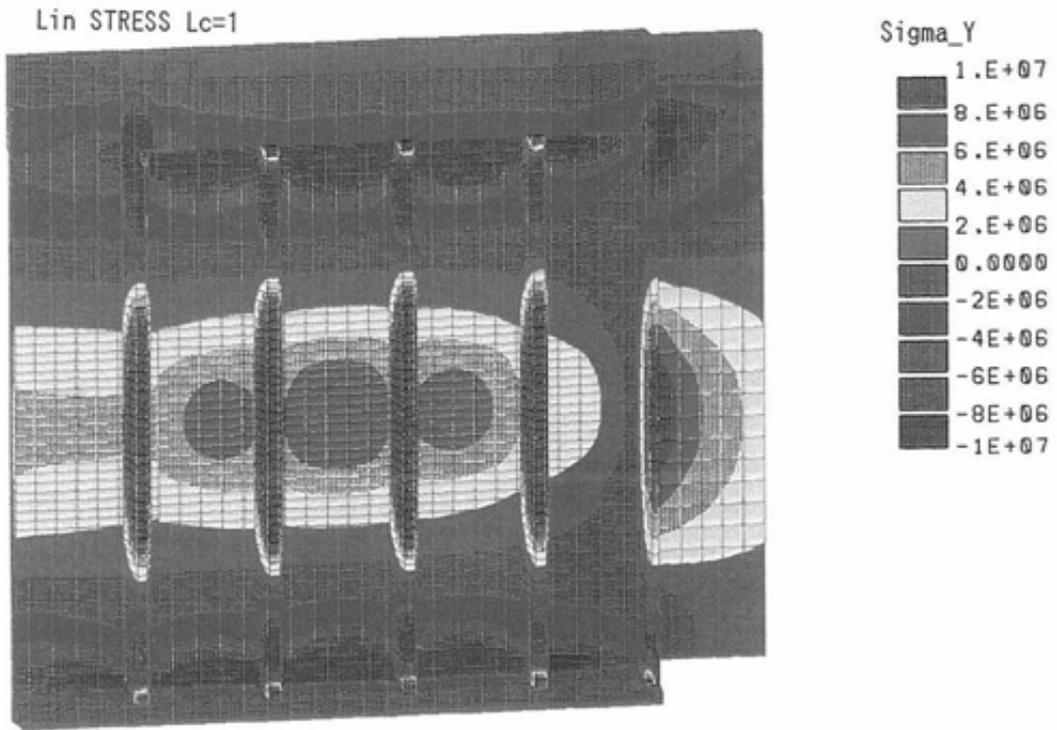


図4 瓦裏面Y軸方向応力分布イメージ (36形モデルA)

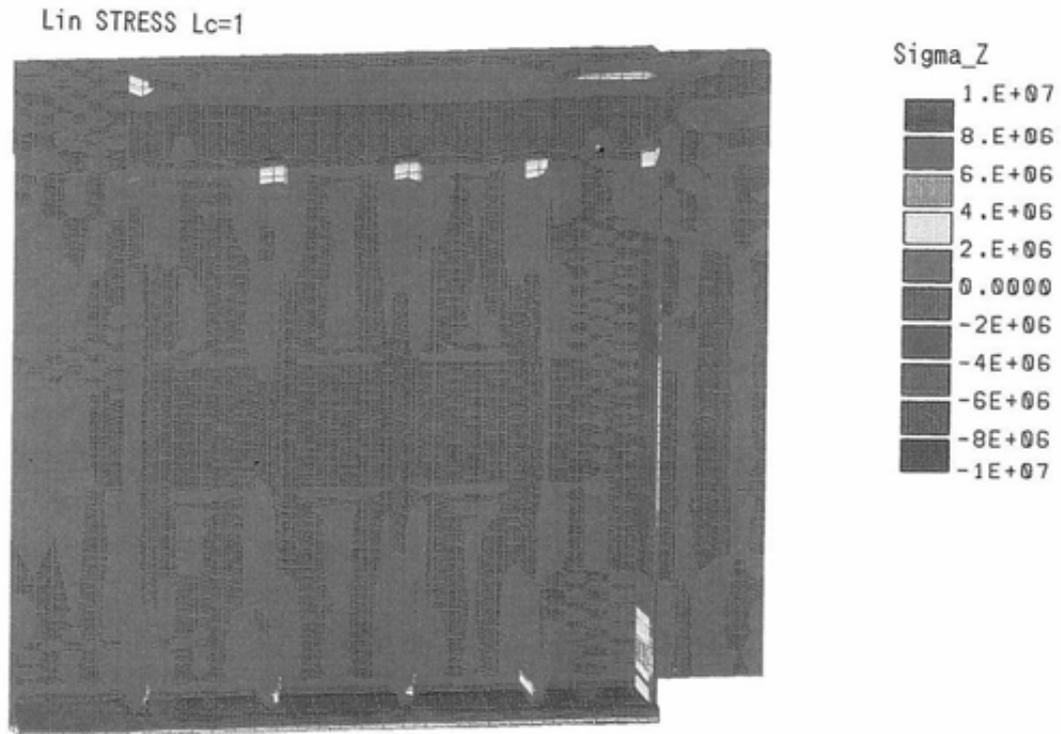


図5 瓦裏面Z軸方向応力分布イメージ (36形モデルA)

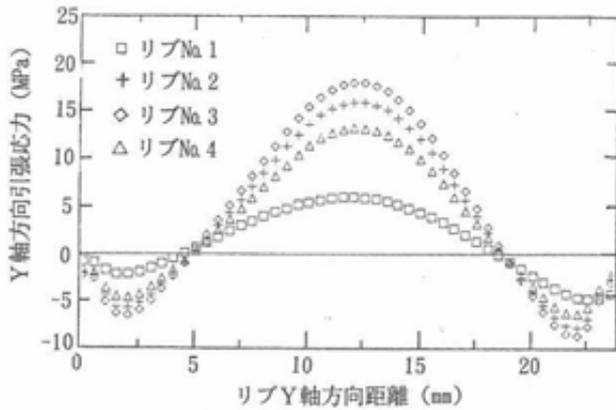


図6 破壊シミュレーション応力分布

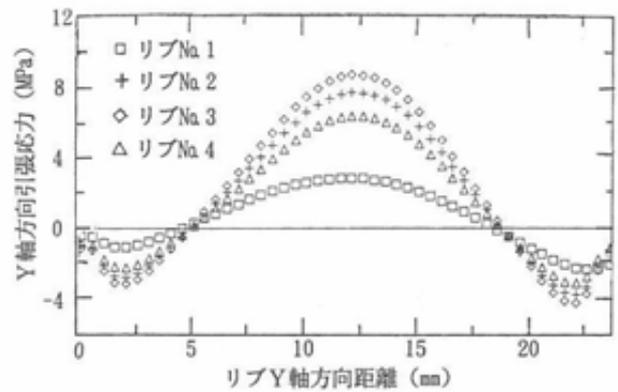


図7 踏割れシミュレーション応力分布

mmの台形状にした場合、40形モデルA平板形瓦のリブに発生する引張り応力は18.0MPaとなり、既存の40形平板形瓦の最大引張応力値の約97%の応力値が得られた。リブの形状を従来の形状寸法より太くすることにより、瓦本体の厚さを薄くする可能性が判明した。また、リブに発生する最大引張応力は荷重面の中心に近いことも分った。40形モデル瓦Aのリブに発生する引張応力値の分布を図6に示す。

40及び36形モデル瓦のリブNo.3に曲げ破壊が生じる最大引張応力値、歩行時に発生する最大引張応力値及びモデル瓦の推定重量を表4に示す。リブの寸法が長くなると引張応力値は大きくなり、曲げ強度が低下することが予測される。

一方、瓦を屋根に施工する場合を想定した踏割れシミュレーションを行った。人が歩行する時に足が地面に接地する際の荷重は体重の2~3倍と言われている。体重70kgの人が屋根に施工してある瓦面を歩行する場合を想定し、2070Nの荷重で踏割れシミュレーションを行った。この踏割れシミュレーションの40形モデル瓦Aのリブに発生する引張応力値の分布を図7に示す。

表4に示すように踏割れを想定した引張応力値は7.48~9.47MPaで曲げ破壊引張応力値の44~53%であり、既存の平板形瓦と同程度となる。また、既存の40形平板形瓦より約10%程度の重量減が期待できる。

この有限要素法による応力解析結果から、リブ形状を改良して、瓦本体の厚さを既存の平板形瓦より、1.5~2mm程度薄くすることができ、瓦の軽量化が可能となった。

#### 4. まとめ

- (1) 住宅設計の主流である尺間モジュール用の標準的な4.0/10及び4.5/10勾配兼用で伸び率を考慮した40形

と36形の4種類のモデル平板形瓦が設計できた。

- (2) 台形状リブの寸法を既存の平板形瓦より幅で長辺を2mm、短辺を1mm、高さを2.5mm大きくすることにより、リブの引張り応力を損なわず瓦の厚さを1.5~2mm程度薄くすることが可能となった。
- (3) 薄くすることにより、既存平板形瓦より重量で約10%の軽量化が可能となった。また、モジュール化することにより施工性の向上が期待できる。

表4 引張り応力解析結果と推定重量

| 瓦形状     | 最大引張り応力(MPa) | 歩行時最大引張り応力(MPa) | 推定重量(g) |
|---------|--------------|-----------------|---------|
| 既存40形瓦A | 18.5         | 9.04            | 3540*   |
| 40形モデルA | 18.0         | 8.74            | 3130    |
| 40形モデルB | 21.6         | 9.47            | 2990    |
| 36形モデルA | 16.9         | 9.60            | 3450    |
| 36形モデルB | 17.0         | 7.47            | 3320    |

\*実測概算重量

#### 文献

- 1) 戸川隼人,有限要素法へのガイド,サイエンス社,(1979)pp.1~17, pp.35~90
- 2) G. N. Smith, 瀬川富士訳, スミス有限要素法による応力解析入門,(1974)pp.148~196
- 3) 鷺津久一郎, 宮本博, 山田嘉昭, 山本嘉之, 川合忠彦共編,有限要素法ハンドブック, 培風館,(1981)pp.349~362
- 4) 戸川隼人,有限要素法へのガイド,サイエンス社,(1979)pp.144~145