

高強度形状瓦の設計技術

倉地 辰幸 伊藤 征幸 長谷川龍三

Strengthening of Roofing Tiles by Finite Element Method

by

Tatsuyuki KURACHI, Tatsuyuki ITO and Ryuzo HASEGAWA

粘土瓦の形状を改良することで製品強度を向上させることを検討した。本研究では有限要素法を用い、瓦の形状モデルへ荷重を負荷するシミュレーションを行い、生じた集中応力を、形状改善によって分散させることで強度向上を図った。

JIS規格の53A型和形棧瓦に対してJIS曲げ破壊試験法に則った荷重負荷シミュレーションと、施工時の踏み割れを考慮したシミュレーションを行い、引掛け剣と水返しが、応力集中を招いていることが明らかになった。引掛け剣の移動と、水返しの形状を改良することで応力集中を分散させ、現在より高強度な瓦形状モデルを作成した。さらに現在の焼成方法を考慮して、製品歩留まりが大幅悪化しない最低厚みである12mm厚の53A棧瓦改良形状軽量化モデルを作成して、JIS曲げ破壊荷重シミュレーション及び踏み割れシミュレーションを行い、良好な結果を得た。

1. まえがき

粘土瓦の製品強度はJIS規格値を十分満足しているが、薄型化・大型化に向けて一層の強度向上が望まれている。これまでは材料開発によって、素材面から強度向上を図ってきたが、本研究では瓦形状と応力分布との関係を有限要素法により数値的に解析し、集中応力のかかる部分をシミュレーションにより明確にし、形状面から瓦の強度向上を検討した。

2. 実験方法

2.1 有限要素法

変形に対して無限の自由度を持つ物体を有限の自由度を持つ要素（有限要素）の集合体として近似し、この集合体に対して成立する方程式（連立一次方程式）を解く数値解析法。本研究においては、有限要素法パッケージCOSMOS/M 1.52Aバージョンを使用した。

2.2 解析モデルの基本設定

全てのシミュレーションにおいて、瓦は弾性体であると仮定し、全て線形静解析で行った。

材料特性値は以下の値を入力した。

ヤング率：31.36GPa

材料密度： $2.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

シミュレーションは以下の2つの状況を想定した。

①JIS A 5208に規定される瓦の曲げ破壊試験

②施工時の踏み割れ

2.3 J-model

J-modelはJIS曲げ破壊荷重シミュレーションを行う目的で作成した。図1はJ-modelを瓦の尻部から見たものである。荷重は、常にこの図のY軸方向に負荷される。図2は瓦の表にある水返し構造を示している。図3は瓦の裏にある引掛け剣と安定駒、そして棧側の水切りの位置関係を示す。

図4はJIS試験荷重の荷重負荷ラインであり、図5はその拘束である。荷重は現在の平均破壊荷重を考慮して2582.6Nを負荷した。この解析は線形解析であるから荷重値と応力値は比例する。

屋根に施工された瓦を踏みつけるという状況を想定すると、瓦の棧部に足が乗った場合、棧側の水切りが隣の瓦に接して止まる。すなわち棧部への踏みつけをシミュレートする場合は、J-modelをそのまま使用することができる。図6は棧部への踏みつけ荷重A及びBを示す。図7はその拘束である。体重は68kgを想定したので荷重は666.4Nとなる。これも同じように荷重値と応力値は比例する。

次に、踏みつけることで最も瓦を破壊しやすいと思われる荷重が図8である。上に被さる瓦を踏まない限界まで尻部に近づけた2点荷重である。以下これをW荷重という。棧側の水切りが隣の瓦に触れ、拘束状況が発生する直前でバランスするように荷重を2点に振り分けている。その拘束は図9に示す。

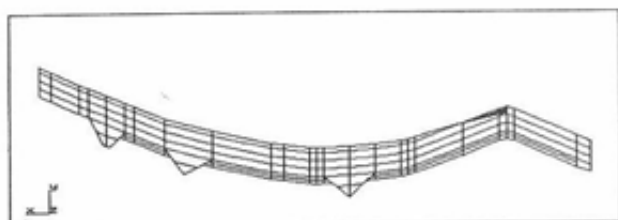


図1 尻から見た既存形状瓦J-model

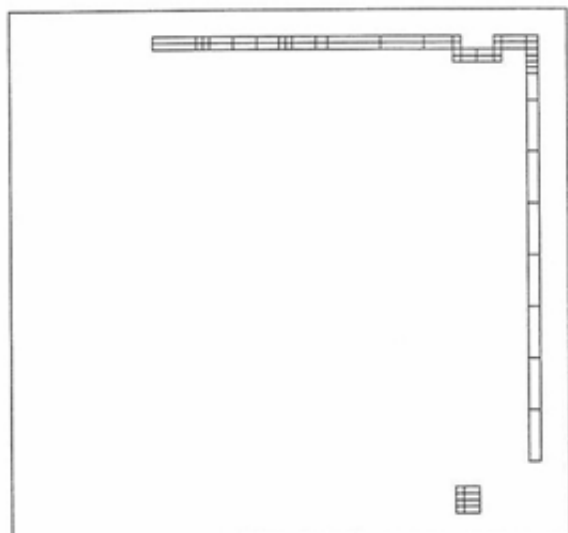


図2 既存形状瓦J-modelの水返し部分

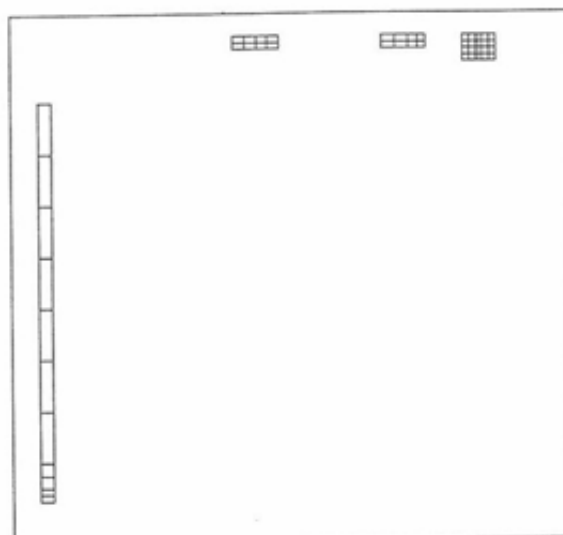


図3 既存形状瓦J-modelの水切り、引っ掛け剣、安定駒の位置関係

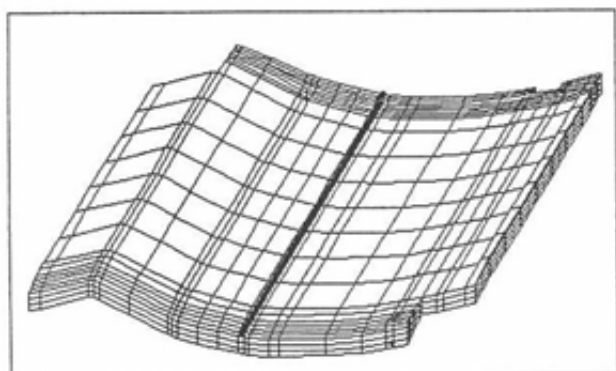


図4 JIS曲げ破壊荷重

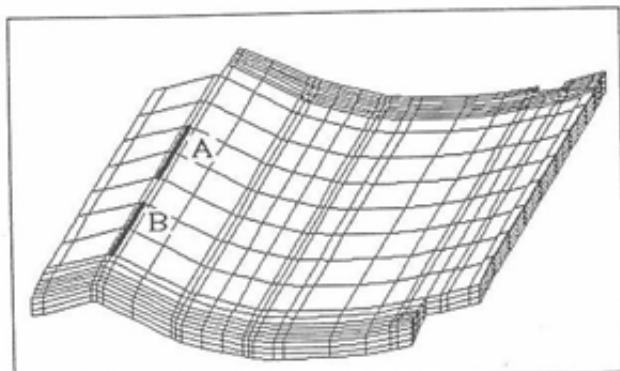


図6 A荷重及びB荷重

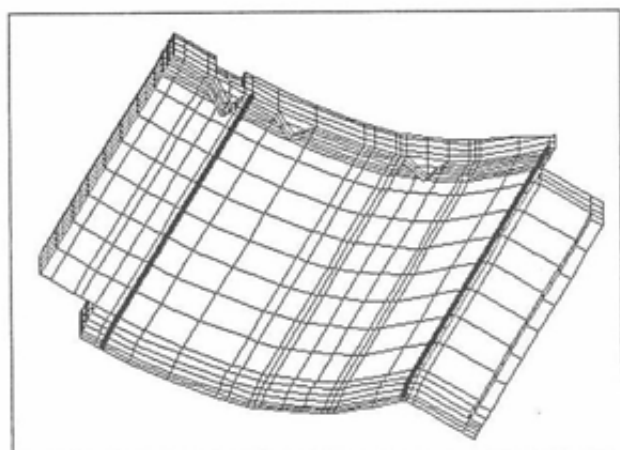


図5 JIS曲げ破壊荷重に対する拘束

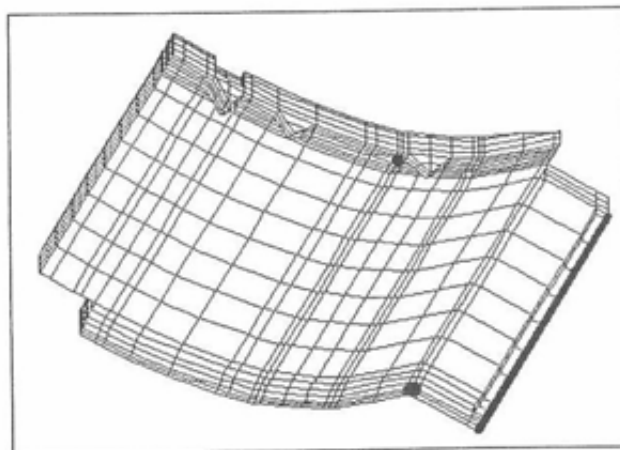


図7 A、Bに対する拘束

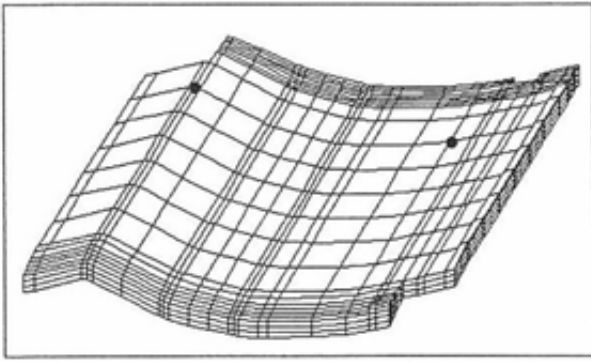


図8 W荷重

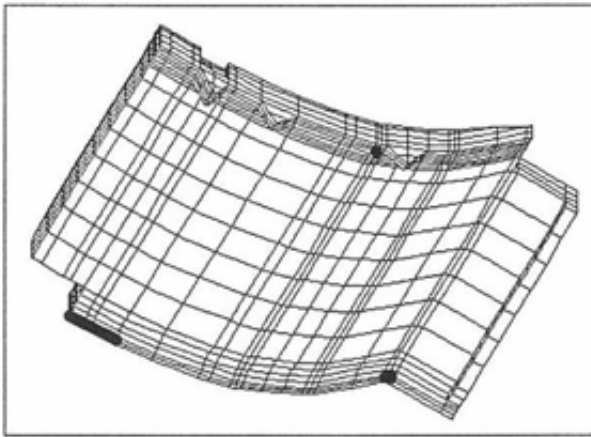


図9 W荷重に対する拘束

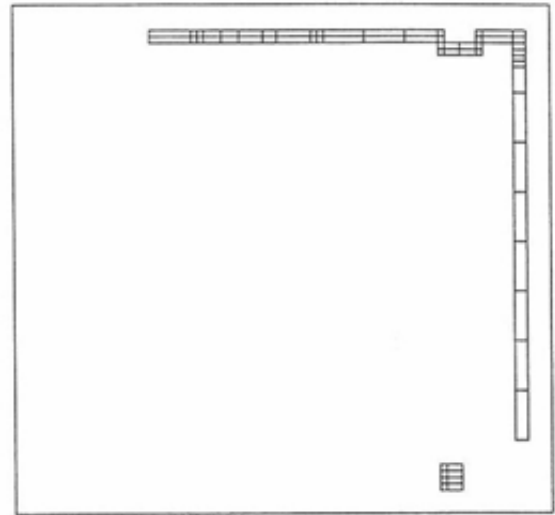


図11 既存形状瓦T-modelの水返し部分

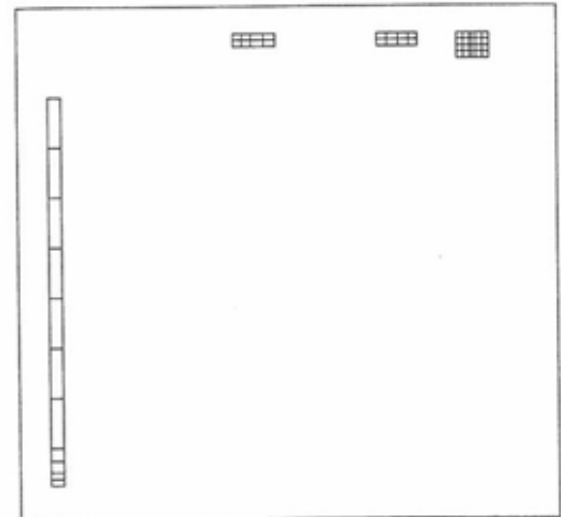


図12 既存形状瓦T-modelの水切り、
引っ掛け剣、安定駒の位置関係

2.4 T-model

T-modelは瓦の谷から差込み方面に荷重がかかった場合を想定し、棧木と安定駒の接触を考慮したシミュレーションを行うための解析モデルである。図10はT-modelを瓦の尻部から見たものである。荷重は、常にこの図のY軸方向に負荷される。図11は瓦の表にある水返し構造を示している。図12は瓦の裏にある引っ掛け剣と安定駒、そして棧側の水切りの位置関係を示す。

図13は谷部への踏みつけ荷重C、D及び荷重E、Fを示す。図14は瓦の頭に近づけた2点荷重パターンである。以下これをV荷重という。図15にC、D荷重の拘束を示し、図16にE、F、V荷重の拘束を示す。荷重は全て666.4Nとした。

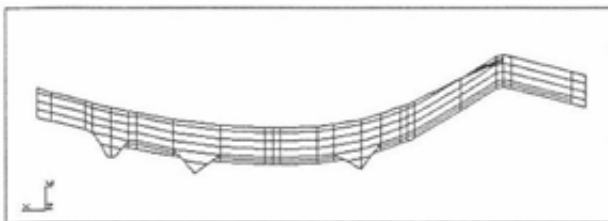


図10 尻から見た既存形状瓦T-model

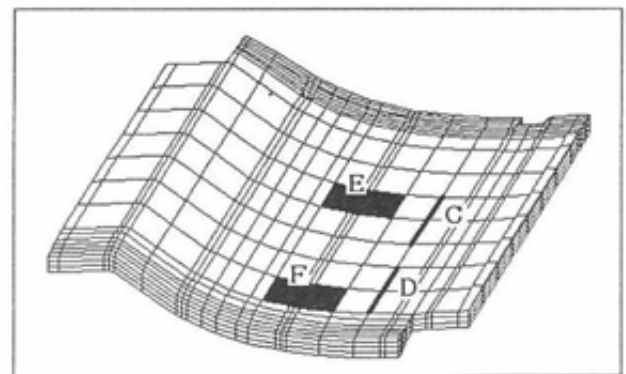


図13 C、D、E、F荷重

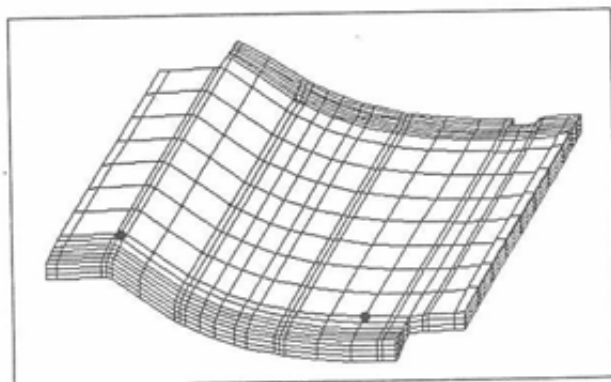


図14 V荷重

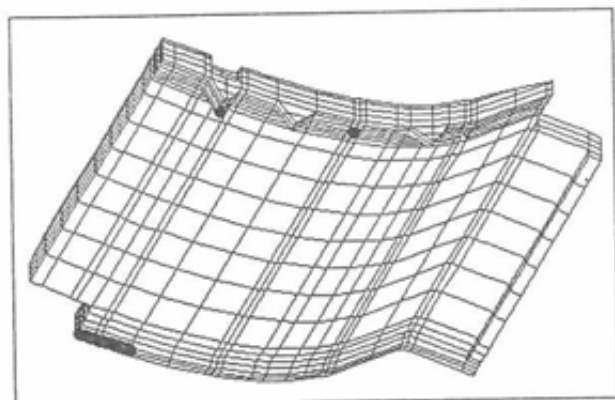


図15 C、D荷重に対する拘束

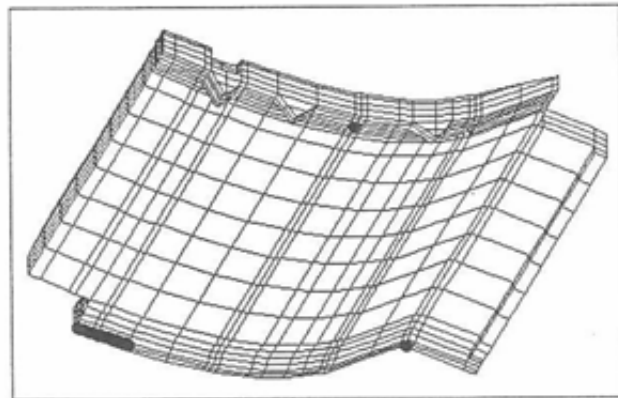


図16 E、F、V荷重に対する拘束

3. 実験結果及び考察

3.1 JIS曲げ破壊荷重シミュレーション

JIS規格の53A和形棧瓦の現在形状(厚みは13.5mmを仮定)をモデル化し、JIS A 5208に規定される瓦の曲げ破壊試験をシミュレートした(J-modelにおけるJIS試験荷重パターン)。その結果、最大の引っ張り応力が生ずるのは、尻部水返しの裏面、棧側の引っ掛け剣の裾野部分であった。図17に示す、濃くなっているところが最大応力発生点である。また表1の既存形状13.5mm厚、JIS試験荷重の項に示すように16.24MPaが最大応力値

である。この応力値は表2に示すように、引っ掛け剣を除去すると80.1%に低減する。また水返しを除去すると89.4%に低減する。そして引っ掛け剣と水返しの両方を除去すると71.4%に低減する。これは、JIS曲げ破壊試験において、引っ掛け剣と水返しが大きな強度低下要因となっていることを示している。

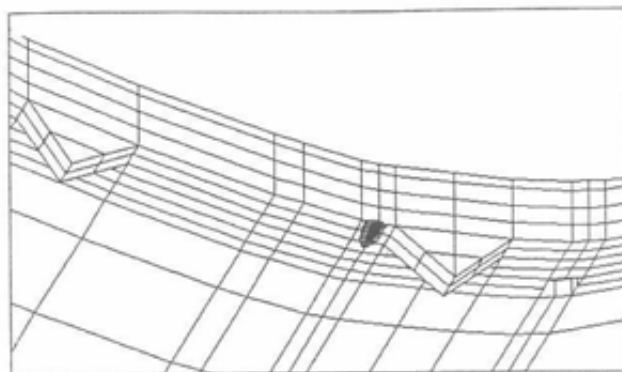


図17 既存形状J-modelにJIS曲げ破壊荷重をかけた場合の最大応力位置

3.2 踏み割れシミュレーション

体重負荷シミュレーションについてはJ-modelとT-modelの両方を使用した。表1に示したように、瓦を踏みつけるパターンの中では、W荷重の集中応力値が9.369MPaで最も大きい。この応力集中は尻部水返し部分に生ずる。図18にその様子を示す。表2に示したように、この応力値は水返しを除去すると91.6%に低減する。また引っ掛け剣を除去した場合98.3%に低減し、水返しと引っ掛け剣の両方を除去した場合90.3%に低減する。このことから、踏み割れについては、第一に水返しに強度低下要因があることがわかった。

さて、表1の既存形状13.5mm厚の最大応力値の中で、D荷重の値は9.225MPaである。図19にその最大応力位置を示す。この値はW荷重による応力値とそれほど変わらない。しかしこれは、差込み部の端に拘束を加えることによって大きく低減する。拘束状況は荷重C、D、E、Fについては図20、荷重Vについては図21に示す。結果は表1のT-model(差し込み部の拘束あり)に示す。このシミュレーションを加えた理由は、現在製品化されている53A和形棧瓦の中に、差込み部の端の裏と下に施工される瓦の水返しが触れ合って傷つくことを避けるため、差込み部の端の裏を薄くしているものが存在するからである。集中応力を避けるという観点からは、この構造は望ましくない。

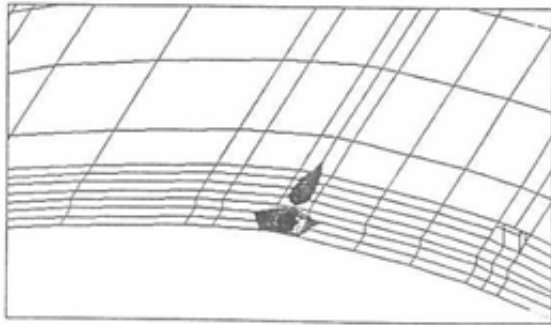


図18 既存形状J-modelにW荷重をかけた場合の最大応力位置

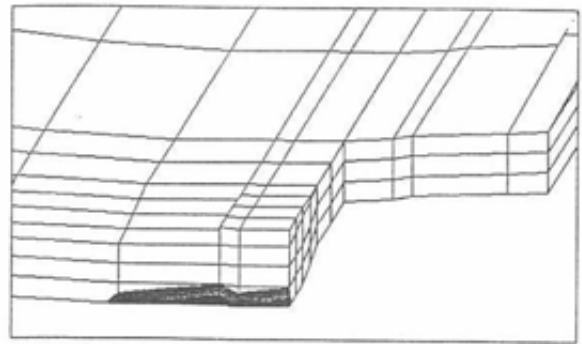


図19 既存形状T-modelにD荷重をかけた場合の最大応力位置

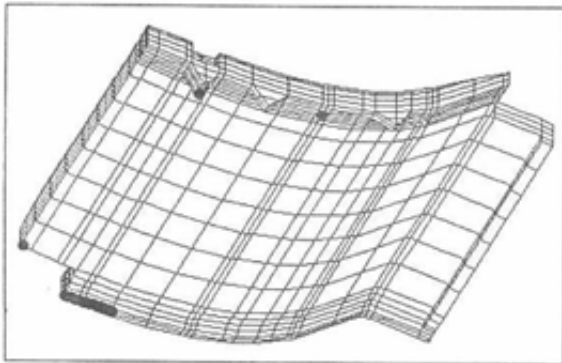


図20 C、D荷重に対する拘束（差し込み部の拘束あり）

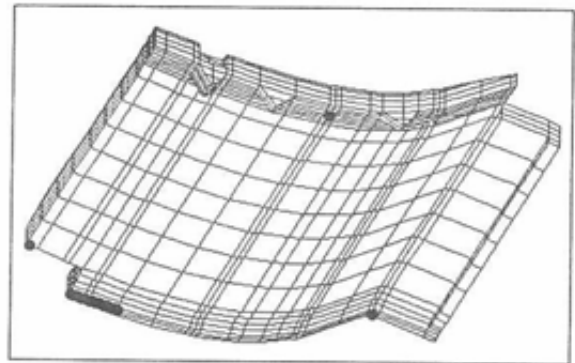


図21 E、F、V荷重に対する拘束（差し込み部の拘束あり）

表1 荷重シミュレーションで生ずる最大応力値

(MPa)

| | 既存形状 | | 改良形状 | |
|-----------|---------|---------|------------------|------------------|
| | 13.5mm厚 | 12.0mm厚 | 13.5mm厚 | 12.0mm厚 |
| (J-model) | | | | |
| JIS試験荷重 | 16.24 | 20.14 | 14.79 (12.30) | 18.59 (15.29) |
| A荷重 | 4.921 | — | — | — |
| B荷重 | 6.095 | — | — | — |
| W荷重 | 9.369 | 11.71 | 8.358 | 10.37 |
| (T-model) | | | | |
| C荷重 | 8.355 | — | — | — |
| D荷重 | 9.225 | 10.10 | 9.215 | 10.09 |
| E荷重 | 4.619 | — | — | — |
| F荷重 | 5.367 | — | — | — |
| V荷重 | 4.834 | — | — | — |

以下、差し込み部に拘束を加えてシミュレートした場合の最大応力値

| | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| C荷重 | 5.831 | — | — | — |
| D荷重 | 7.415 | 8.380 | 7.413 | 8.375 |
| E荷重 | 4.558 | — | — | — |
| F荷重 | 5.739 | — | — | — |
| V荷重 | 4.015 | — | — | — |

注) 改良形状の()値は、既存形状で最大応力が生じた部位の応力値。

表2 水返しと引っ掛け剣の影響

(MPa)

| | 既存形状 | 水返し削除 | 引っ掛け剣削除 | 両方削除 |
|----------|-------|-------|---------|-------|
| JIS 試験荷重 | 16.24 | 14.52 | 13.01 | 11.59 |
| W 荷重 | 9.369 | 8.586 | 9.212 | 8.462 |

注) 削除シミュレーションの各応力値は、既存形状で最大応力が生じた部位の応力値。
 JIS 試験荷重では、削除シミュレーションの最大応力値は全て 14.7MPa。
 W荷重では表の値は同時に最大応力値。

3.3 形状改良

JIS曲げ破壊荷重シミュレーション及び踏み割れシミュレーションによって明らかになった強度低下要因である尻部水返しと棧側の引っ掛け剣を変形、移動して、集中応力を分散させ、高強度な瓦を提案する。

第一は尻部水返しを、特に谷部において瓦中央部へと幅を広げる。第二は棧側の引っ掛け剣をより棧側へと移動させる。

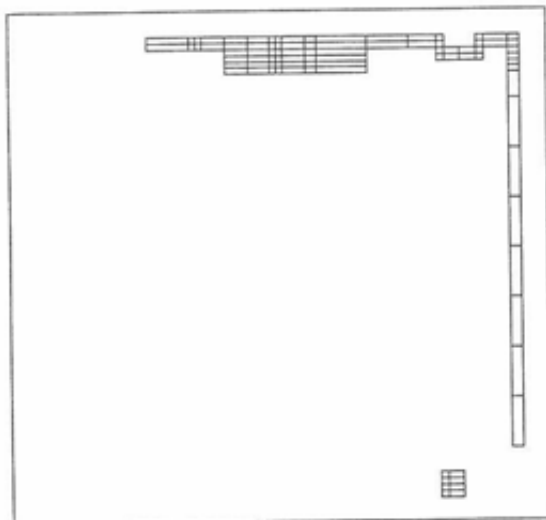


図22 形状改良後のJ-model水返し部分

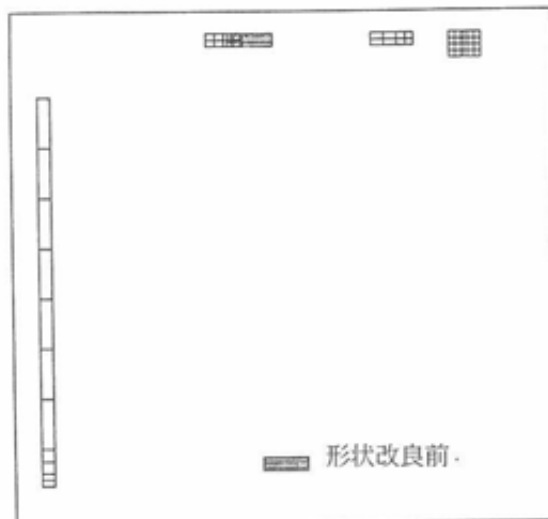


図23 形状改良後のJ-modelの水切り、引っ掛け剣、安定駒の位置関係

この新形状の瓦について、JIS曲げ破壊荷重シミュレーション及び踏み割れシミュレーションを行った。図22にJ-modelの水返しの改良形状図を、図23に引っ掛け剣の改良形状図を示す。

このことにより、改良形状の最大応力値は、表1に見られるように、既存形状の最大応力値に対して、JIS曲げ破壊荷重シミュレーション(JIS試験荷重)では91.1%に低減し、踏み割れシミュレーション(W荷重)では89.2%に低減した。図24が改良形状の瓦に対してJIS試験荷重を负荷した場合の最大応力図であり図25がその拡大図である。また図26と図27がW荷重を负荷した場合の最大応力図である。

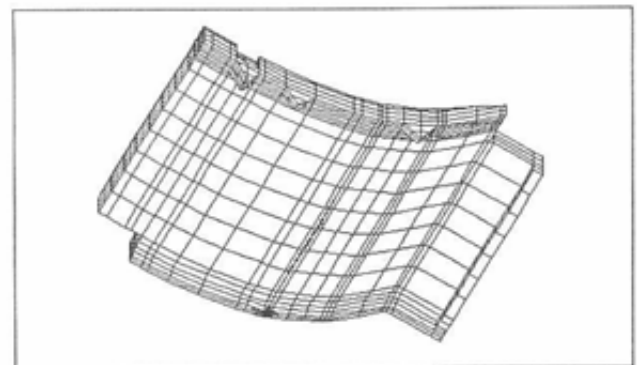


図24 改良形状J-modelにJIS曲げ破壊荷重をかけた場合の最大応力位置

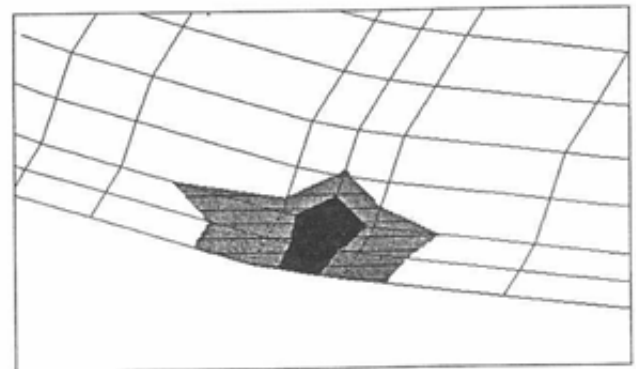


図25 改良形状J-modelにJIS曲げ破壊荷重をかけた場合の最大応力位置拡大図

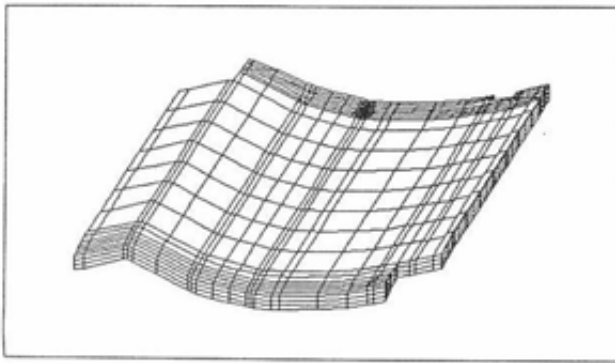


図26 改良形状J-modelにW荷重をかけた場合の最大応力位置

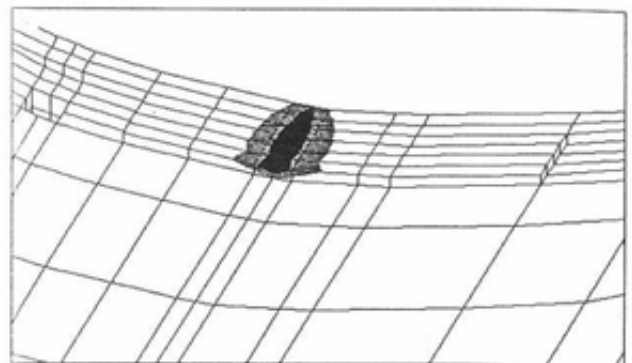


図27 改良形状J-modelにW荷重をかけた場合の最大応力位置拡大図

3.4 改良形状12mm厚モデル

現在の瓦の曲げ破壊荷重値は、JIS規格値を大きく上回っており、強度向上よりも軽量化を望む声が多い。そこで、現在の焼成技術を考慮して、製品歩留まりが大幅悪化しない限界厚みである12mm厚の53A 棧瓦改良形状モデルを作成し、JIS曲げ破壊荷重シミュレーション及び踏み割れシミュレーションを行った。その結果、JIS曲げ破壊荷重シミュレーションについては、既存形状13.5mm厚の瓦において2582.6Nの荷重で生じた最大応力値が、2256.7Nの荷重で生じる。JIS規格値は、1500N以上の曲げ破壊荷重を要求しているの、十分な値であると思われる。なお、形状改良をせず、単純に厚みだけを13.5mmから12mmに変更した場合は、2083.3Nの荷重でこの応力値が生ずる。さらに、踏み割れシミュレーションについては、既存形状13.5mm厚の瓦に対してJIS曲げ破壊荷重シミュレーション(2582.6N荷重)で生じた最大応力を、施工された既存形状13.5mm厚の瓦に体重をかけることによって発生させるためには、117.8kgの体重の人が片足で垂直に瓦を踏みつけなくてはならない。これが12mm厚の53A 棧瓦改良形状モデルでは106.4kgとなる。瓦の上で激しく動かなければ、12mm厚の瓦でも100kg以上の体重を支え得る。なお、形状改良をせず、単純に厚みだけを13.5mmから12mmに変更した場合は94.3kgとなる。

以上、どちらのシミュレーションにおいても改良形状12mm厚モデルは良好な結果を得た。

4. まとめ

- (1) 53A和形棧瓦のJIS曲げ破壊試験では、尻部水返しの裏面、棧側の引っ掛け剣の裾野部分に最大の集中応力が生ずる。この応力集中は、引っ掛け剣と水返しが要因となっている。
- (2) 屋根に施工された53A和形棧瓦に体重がかかった場合、水返しが最大の踏み割れ要因となっている。
- (3) 尻部水返しを、特に谷部において瓦中央部へと幅を広げること、棧側の引っ掛け剣をより棧側へと移動させることによって、53A和形棧瓦の応力集中を散らし、強度向上を図ることができる。
- (4) 上記(3)のように形状を改良すれば、瓦を現在の13.5mm厚から12mm厚へと薄型化して軽量化を図ることが十分に可能である。

文献

- 1) 三好俊郎, 有限要素法入門, 培風館 (1978)
- 2) 鷺津久一郎編, 有限要素法ハンドブック, 培風館 (1981)