

薄板構造体の有限要素法による強度解析

Strength Analysis of Thin Sheet Panel Structure Using Finite Element Method

鳥水美芽*
Mime Torimizu

細川俊之*
Toshiyuki Hosokawa

概要 薄板構造体(たとえば橋梁等に使用される桁カバーパネル)の設計について、従来の理論計算や強度試験を補完する目的で、汎用FEM(有限要素法)ソフトの適用を試み、理論計算および実際の強度試験との比較を行った。

その結果、汎用FEMソフトにより、実際の応力や変形のシミュレーションを可能とし、薄板構造体の開発において、コストを要する強度試験を必要最小限にして、最適設計を行える目処をつけた。

1. はじめに

1.1 薄板構造体とは

近年、建築物・建設物の景観美化・周囲環境との調和に対する意識の高まりに伴って、従来の鉄骨構造がむき出しになっていたものに、外観美化のためのアルミ合金板製の化粧パネルを施す例が多く見られるようになってきた。例えば、橋梁の橋桁に取り付けられる桁カバーパネルなどがこの例に当たる(写真1)。これら化粧パネルのほとんどは、アルミ合金製の薄板を成形して製造したものである。

ここでは、この化粧パネル(薄板)と、これを取り付けた下地材からなる構造を、薄板構造体と呼ぶことにする。

1.2 現状

薄板構造体に要求される性能としては、

- (1) 軽量であること(建築・建設物の死荷重増加防止)
 - (2) たわみにくいこと(たわみすぎると景観上問題)
- の2点が上げられる。

一方、パネル設計の指針となる理論計算方法として、各種計算方法があげられるが、これらの計算式は、ある仮定条件の上で成り立っており、しかもパネル部のみに対する結果しか得られない。しかし、実際のパネルは、ボルトやリベット等の点接合で成り立ち、下地材のたわみの影響も無視できない。このため、理論計算式からでは、パネルや下地材及びその接合部まで含めた構造体としての総合的な強度評価は困難であり、従って、設計時の安全率を高くとらざるを得なくなっている。

また、計算式の精度を検証し、補完するためには、強度試験が必要不可欠であり、パネル形状が異なるごとに試験を行うことが理想的である。しかし、化粧パネルはそのほとんどが大型であり、これにかかる風荷重の表現方法が難しく、また試験装置も大がかりになるといった問題がある。そのため、全てのパネル形状について強度試験を行うことは事実上不可能である。

現状では以上のような事情により、薄板構造体は、安全率を過大にしがちになり、重量増を招くことから、要求性能に反することになる。

従って、現状の開発方法は、精度が十分でない計算式と、困難な強度試験の組合せで行うことしかなく、事実上は、実績重視の経験に頼った設計にならざるを得ない状況にある。

今回は薄板構造体の設計を最適化する補完的手段として、FEMによる構造解析の適用性について検討し、一定の目処があったので、その結果を報告する。

2. 従来の評価方法

2.1 計算方法

薄板の計算方法のひとつとして、大たわみの式がある(文末に計算内容を掲載する)。これは、4辺を支持した薄板について、最大変位量及び最大応力を算出するための計算式である。

この計算方法では、辺を支持するという仮定条件で成り立っているため、実際には点支持であるパネルを計算するには適切でない。また、パネルだけについて計算するので、下地材も含めた薄板構造体としての計算ができないという問題がある。

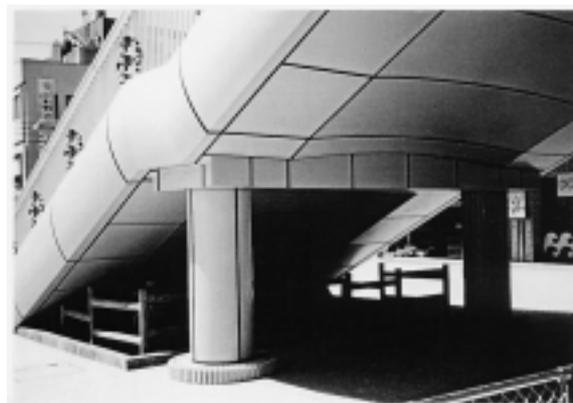


写真1 薄板構造体施工例
Example of construction

* メタル総合研究所 第2小山製品開発室

2.2 強度試験

景観材として設置される薄板パネルにかかる負荷は、主として風荷重である。風荷重は一般的に等分布荷重で表現されるが、大型パネル上でこれを忠実に再現するのは困難である。そこで本研究では、擬似的に風荷重を再現する方法として、次のような手法を用いて強度試験を行った。

まず、パネル面が水平になるように薄板構造体を設置し、パネルに接しない寸法の枠組みを被せる。この枠組みの中に設置したシートを受皿にして、風荷重に相当する重量の水で満たすことで、等分布荷重を表現した。(図1参照)

試験体は、1m角の平板パネル(t=3)を、2m長さの下地材2本で支持したものをを用いた。(図2)

試験は風荷重に見立てた水の重量を変えながら、パネル及び下地材について、ダイヤルゲージでたわみ量を、ひずみゲージでひずみ量を測定、記録した。

3.FEM 解析

薄板構造体のFEM構造解析として、汎用有限要素法解析ソフトを用いた。FEM解析対象は、薄板パネルとそれを支持する棧から構成された薄板構造体の1/4モデルとして、種々の解析条件の最適化を図った。条件最適化の1例として、要素サイズの検討結果について述べる。

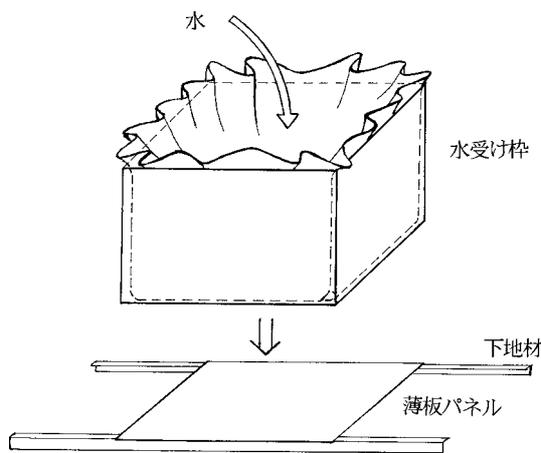


図1 試験装置
Schematic diagram of load test

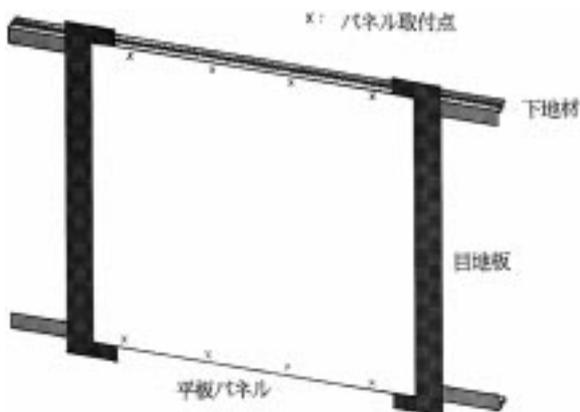


図2 薄板構造体の解析モデル
Analysis model of the panel consisted of thin sheet

3.1 要素サイズの検討

FEM解析において、より正確な解を求めるためには、小さなサイズの要素を用いることが望ましい。しかし、小さな要素を用いると、全体としては要素数が増加するため、解析には膨大な演算時間が必要になる。

また、要素サイズをある程度以上小さくすれば、解のばらつきは収束に向かい、要素サイズがそれ以上小さくなくても、得られる解にはほとんど差が見られなくなる。そこで、要素サイズの最適化を図ることで、適当な演算時間で妥当な解が得られることになる。

パネルの仮モデルとして、1m角薄板(t=3)を4辺固定したモデルを作成・FEM解析した。このモデルの要素サイズとFEM解析時間の関係を図3に示す。また、図3の要素数に対応した応力分布を図4に示す。

その結果、FEM解析の所用時間と結果精度の釣合いから、今回は1辺(1m)を約20分割したモデルが適当であると判断し、FEM解析に用いる基本寸法にした。

3.2 薄板構造体のFEM構造解析

図2に示したモデルについて、以下の条件で解析を行った。
荷重条件:パネル面に垂直な圧力(最大 $9.82 \times 10^2 \text{N/mm}^2$)
拘束条件:パネルを取り付けた棧の両端部を完全拘束。
パネルは取付け点にて棧に取付け。
非線形機能:幾何学的非線形オプションを使用する。

4. 結果検討及び考察

4.1 FEM解析結果と従来評価方法の比較

FEM解析結果と試験結果及び計算結果の最大たわみ、最大応力を比較したグラフを図5及び図6に示す。また、応力分布コンター図を図7に示す。

FEM解析結果と試験結果の間の差異は、拘束条件や荷重条件などが微妙に異なることにより生じた誤差であると考えられ、十分整合性がとれていると判断できる。

それに対して、計算結果では、薄板を4辺支持するという条件で成り立っている計算式であり、パネルと下地材が点接合されている支持条件を表現することができないため、変位、応力とも整合性が見られない。

また、FEM解析結果による応力分布図をみると、最大応力はパネルを棧に取り付けている点に集中していることが明確となっており、これは計算式では表現し得ない結果である。

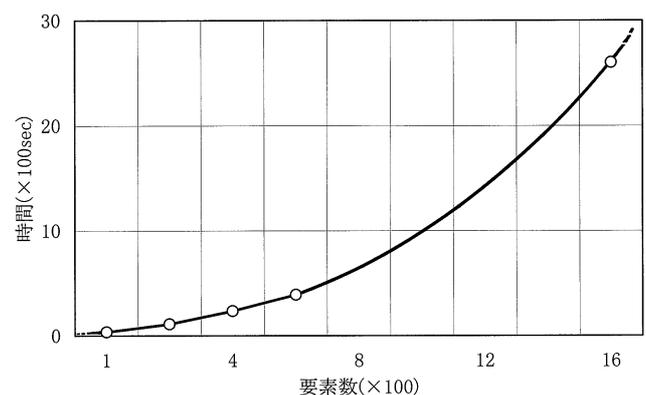


図3 解析所要時間に及ぼす要素サイズの影響
Effect of element size on analysis time

以上より、景観材料として用いられる薄板構造体の強度評価について、FEMによる構造解析結果は、実際の強度試験結果をよく反映することを確認した。

4.2 応用モデルとその結果

平板形状パネルを用いた薄板構造体に対するFEM解析条件が、パネル形状を変更した場合にも適用可能であることを確認する。より実用的な形状として、平板を折り曲げて作製したパネル(図8、以下ボックス形状パネルと称する)を用いて、平板パ

ネルと同様に、FEM解析及び強度試験を行い、その結果を比較した。

図9にFEM解析結果による応力分布のコンター図を示す。また、FEM解析結果と試験結果及び計算結果の最大たわみ、最大応力を比較したグラフを図10及び図11に示す。

前述の形状と同様に、解析結果は試験結果に対して整合性良好になっているが、計算結果は両者と差を生じた。

これは、計算式の場合には、パネル形状や支持条件などを実条

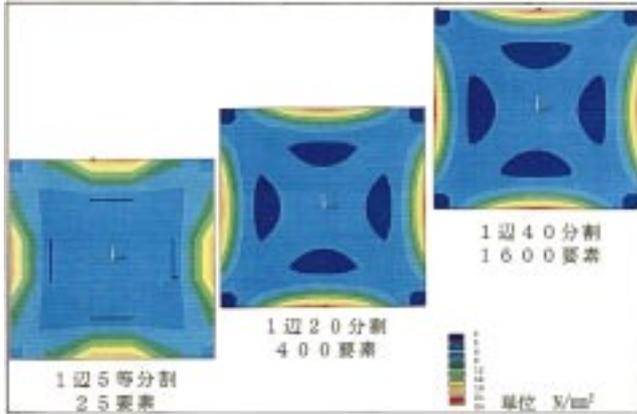


図4 応力分布に及ぼす要素サイズの影響
Effect of element size on stress distribution

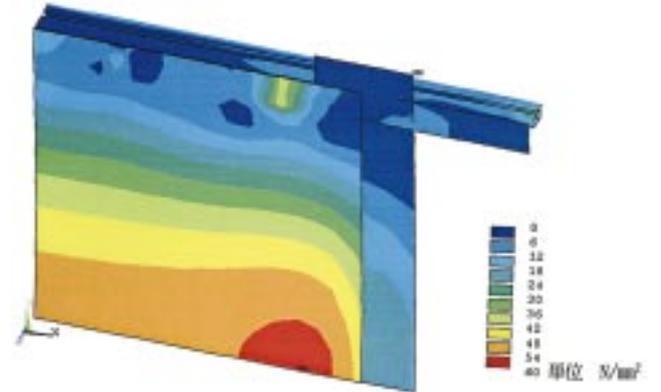


図7 薄板構造体の解析結果(応力分布)
Result of analysis (Stress contour)

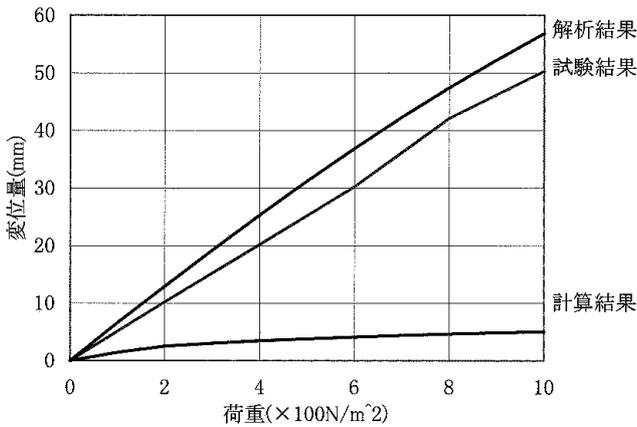


図5 薄板構造体の解析結果(荷重 - 変位)
Result of analysis (Load-Displacement)

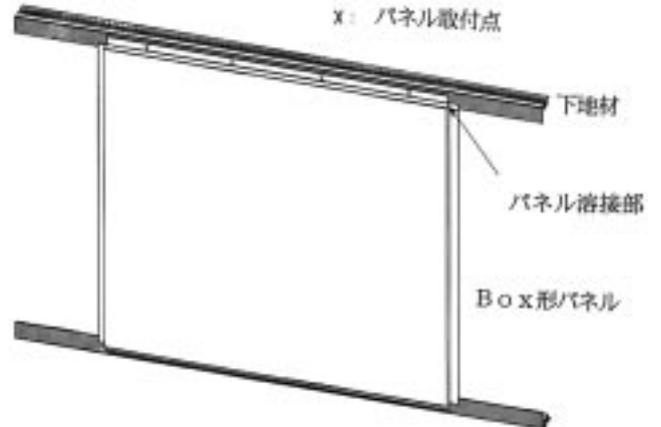


図8 応用モデル形状
Shape of box type model

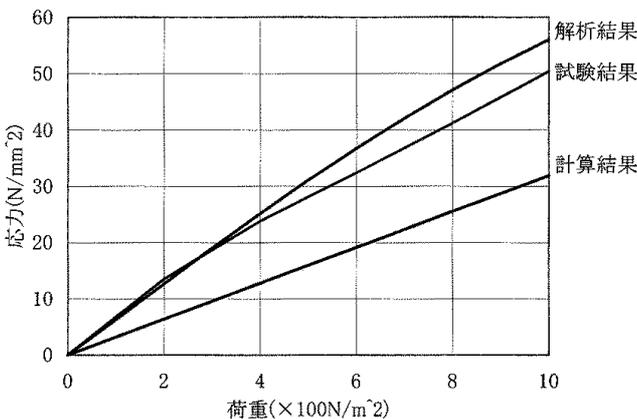


図6 薄板構造体の解析結果(荷重 - 応力)
Result of analysis (Load-Stress)

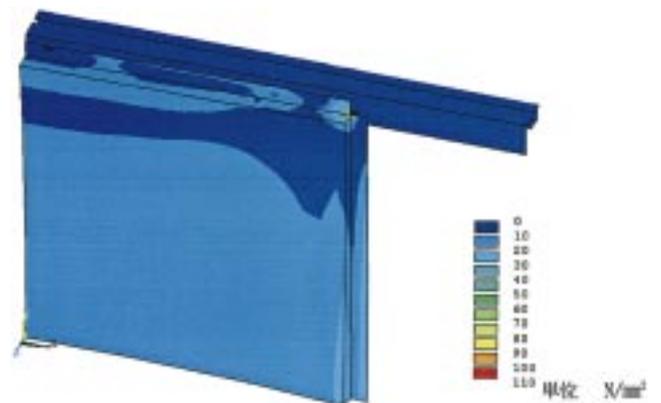


図9 応用モデルの解析結果(応力分布)
Result of analysis (Stress Contour)

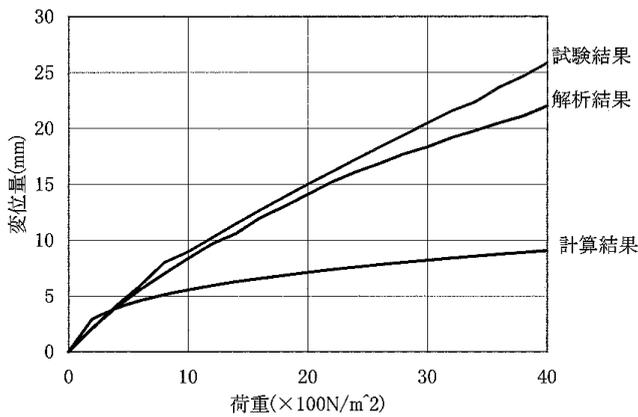


図 10 応用モデルの解析結果(荷重 - 変位)
Result of analysis (Load-Displacement)

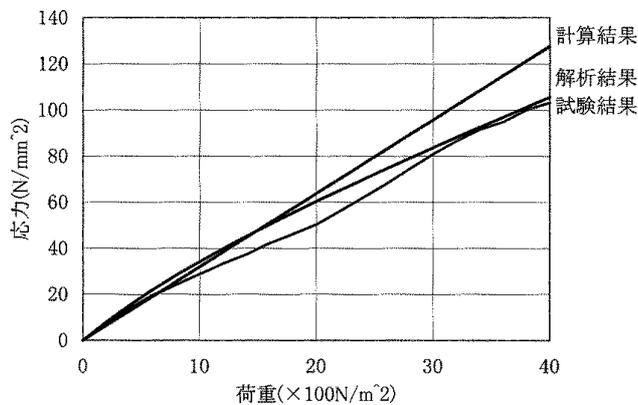


図 11 応用モデルの解析結果(荷重 - 応力)
Result of analysis (Load-Stress)

件に合わせて設定することができないため、実体の強度を表しきれないからである。さらに、計算式はパネル部のみについての評価であり、下地材の影響が考慮されないことも、結果の差異の一因と推測される。

それに対し、FEM解析結果の場合は、パネル形状や支持条件などを、実条件に合わせて設定することが可能なため、実体に近い強度評価ができたと判断する。

応力分布図(図9)を見ると、平板パネルの場合にはパネル取付け点に集中していた応力が、ボックス形状パネルでは、パネル角部の溶接部に集中していることがわかる。これにより、FEM解析を行うことで、形状効果による応力集中の確認などをすることがわかった。

以上により、種々の形状の薄板構造体に対するFEM解析の基本条件を設定できたと判断する。今後はより実用に即した複雑条件(材質、形状)での解析を行う予定である。

5. まとめ

- (1) 薄板構造体の強度評価方法として、汎用FEM解析ソフトでの構造解析を適用する方法は、従来の理論計算式に比較して、より実体に近い解が得られることを確認した。
- (2) FEM解析では、変形・応力分布状況を図形表示できるため、応力集中箇所や構造上の脆弱部等を視覚的に把握可能となる。
- (3) 今後、本検討を進めることで、次のことが期待できる。
 - ・ FEM解析を用いることで、強度と安全率の釣合いのとれた適切な設計が可能になる。
 - ・ 試験数を必要最小限に抑えることによる、開発期間・コストの削減効果。

<大たわみの式 計算方法>

・たわみ量 W_{\max}

$$\{(4/a^2b^2)+(3-2)(1/a^4+1/b^4)\}(W_{\max}/h)^3 + 4/3(1/a^2+1/b^2)^2(W_{\max}/h)-256(1-2)P/(6Eh^4)=0$$

・曲げ応力度 σ_{\max}

$$\sigma_{\max} = 2EW_{\max}/\{8(1-2)\} \times \{(2-2)W_{\max}+4h\}/a^2 + \{(W_{\max}+4h)\}/b^2\}$$

ただし、 ν : ポアソン比 P: 分布荷重

E: ヤング率 t: 板厚

a: 短辺の長さ b: 長辺の長さ

参考文献

- 「アルミニウム合金製橋梁用外装板設計製作要領」(H7.3)
編集 土木製品開発委員会
発行 社団法人 軽金属協会