

CFRP サンドイッチ版の局部座屈に関する理論解と FEM 解析の対応

清水建設(株)技術研究所 正会員 ○立石 寧俊*
 豊橋技術科学大学建設工学系 正会員 山田 聖志**

1. 序論

近年、海外の歩道橋や道路橋の床版に、FRP 製のサンドイッチ床版が使用され、軽量化や塩害対策などに効果を挙げつつある。土木建築分野で使用される大型サンドイッチ版は、使用材料や構成要素が航空機や車両を対象としたものとは異なるため、基礎実験や理論研究も十分とはいえない。著者らは格子状リブを有する CFRP サンドイッチ版の基本特性として、面内圧縮や面外曲げ荷重が作用したときに発生する局部座屈を対象とした実験的・理論的研究を行ってきた^{1), 2)}。本稿では、文献 2) の局部座屈に関する理論解を用いて、縦リブの座屈補剛効果を整理するとともに、FEM 解析を行い、理論解と FEM 解析の結果を比較検討する。

2. 局部座屈理論式

面内圧縮荷重を受けるサンドイッチ版の局部座屈では、図 1 のような座屈モードを考えることが出来る。図 1(a) はコア厚が十分に厚いときなどで、表面材の座屈変形が、コア中心部では影響を及ぼさない状態を表わしている。文献 2) では各座屈モードの局部座屈応力を、リッツ法によるポテンシャルエネルギーの停留問題として解いている。局部座屈応力は、四辺単純支持の矩形板の座屈応力と縦リブとコア材による座屈補剛応力成分の和として次式のように表わされる。

$$\sigma_c = \frac{D\pi^2}{t b^2} \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right)^2 + \frac{a^2}{t \pi^2} \cdot C(a, b) \quad [\text{N/mm}^2]$$

ここに、 D は矩形板の曲げ剛性 $[\text{N} \cdot \text{mm}]$ 、 a は荷重方向の座屈半波長 $[\text{mm}]$ 、 b は荷重直交方向の座屈半波長 $[\text{mm}]$ である。 $C(a, b)$ は表面材を垂直方向に支持するコア材の等価ばね剛性 $[\text{N/mm}^3]$ であり、 a, b の関数として座屈モードごとに異なった形をとる。

3. 局部座屈応力曲線の特徴

格子状リブを有するサンドイッチ版の局部座屈の性質を調べるため、表面材を板厚 4mm、縦弾性係数 30300 N/mm^2 、せん断弾性係数 5390 N/mm^2 の等方性材料とし、コア材を縦弾性係数 6.6 N/mm^2 、せん断弾性係数 3.3 N/mm^2 の等方性材料として設定する。図 2、図 3 は、コア厚を 100mm とした時の座屈応力と座屈半波長の関係を表わした曲線である。サンドイッチ版ではコア材の座屈補剛効果によって、座屈半波長が極小点を越えると座屈耐力が上昇することが大きな特徴である。グラフから、縦リブの間隔が小さいほど座屈耐力が上昇することがわかる。

4. 理論と FEM 解析の比較

FEM による線形座屈固有値解析を実施した。図 4 に FEM 解析モデルを示す。表面材の端部節点に集中荷重を負荷した。表面材の四辺は、荷重方向の並進自由度を除き単純支持状態とした。モデルの側面は、リブを表現するものとして全ての節点を単純支持とした。使用した要素は、表面材を曲げ剛性を考慮した Shell 要素、コア材を 8 節点 Solid 要素とした。表面材とコア材の境界節点は全てを共有させた。メッシュ分割は、全ての解

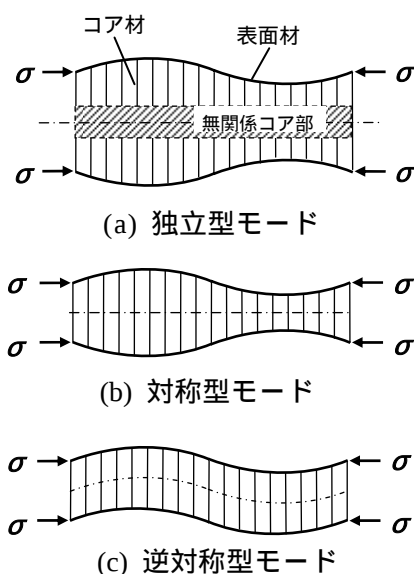


図 1 サンドイッチ版の局部座屈モード

キーワード CFRP サンドイッチ版，局部座屈理論，有限要素解析，線形座屈固有値解析

連絡先 * 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL 03-3820-6644

** 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1 TEL 0532-44-6849

析ケースで1要素のサイズを10mm×10mm×10mmとした。なお、解析モデルの荷重方向の長さAは、理論曲線が極小点をとる場合の座屈半波長を基準として、その整数倍を用いた。

表1に局部座屈理論とFEM解析の比較を示す。FEM解析の結果は対象とした座屈モードについて、最初に現れるモード次数についてのみを示した。コア厚400mm、縦リブ間隔110mmとして固定し、横リブの間隔を90mm～360mmまで変化させたCase1～Case4では、座屈応力と座屈半波長に関してFEM解析の結果に差は見られなかった。また、理論解とFEM解析を比較した場合には、コア厚／縦リブ間隔(C/B)の値が小さいほど両者はよく合うことがわかる。C/Bの値が大きい場合に両者の差は大きくなるのは、FEMによるコア部の座屈変形は理論仮定より複雑であるためと考えられる。また、逆対称モードの場合でも両者の差は大きくなるが、これは文献2)の理論展開において、コアの垂直ひずみを無視した仮定が原因であると考えられる。図2、図3に、Case9のFEM解析の結果をプロットした。対象とした座屈モードが現れる2番目の結果までを示した。理論曲線とFEM解析の結果はよく一致していると言える。

5. 結論

格子状リブを有するサンドイッチ版の局部座屈現象について、文献2)の理論式とFEM解析を比較した。座屈モード及び座屈応力と座屈半波長の関係において、理論式はFEM解析の結果とほぼ一致し、理論式は局部座屈現象をよく表現していると言える。ただし、コア厚／縦リブ間隔の値が大きい場合及び逆対称座屈モードの場合には、FEMの結果との差が大きくなる傾向が見られた。

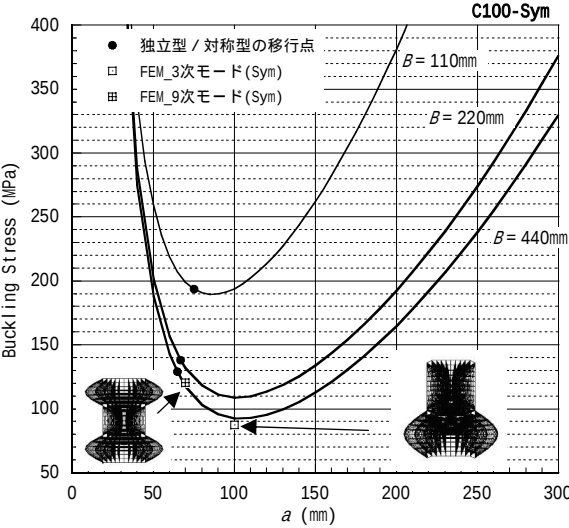


図2 座屈曲線（対称座屈モード）

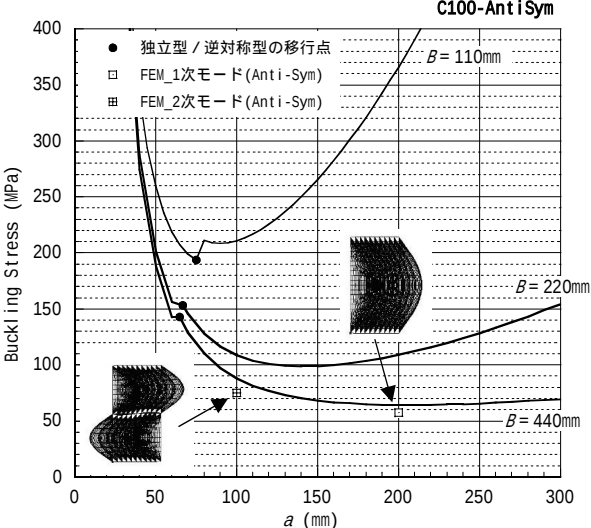


図3 座屈曲線（逆対称座屈モード）

表1 局部座屈理論とFEM解析の比較

ケースID	C	B	A	C/B	理論	FEM	誤差	座屈モード	モード次数
	mm	mm	mm		N/mm ²	N/mm ²			
Case1	400	110	90	3.64	189.4	156.2	-17.5	独立	1
Case2	400	110	180	3.64	189.4	158.1	-16.6	独立	1
Case3	400	110	270	3.64	189.4	158.5	-16.3	独立	1
Case4	400	110	360	3.64	189.4	158.4	-16.4	独立	1
Case5	400	220	220	1.82	105.1	90.4	-14.0	独立	1
Case6	400	440	240	0.91	85.9	74.1	-13.6	独立	1
Case7	100	110	180	0.91	189.3	160.6	-15.2	対称	2
Case8	100	220	200	0.45	109.1	99.1	-9.1	対称	3
Case9	100	440	200	0.23	92.8	87.2	-6.0	対称	3
Case10	100	110	180	0.91	208.4	155.9	-25.2	逆対称	1
Case11	100	220	280	0.45	98.8	80.3	-18.7	逆対称	1
Case12	100	440	420	0.23	64.5	57.1	-11.5	逆対称	1

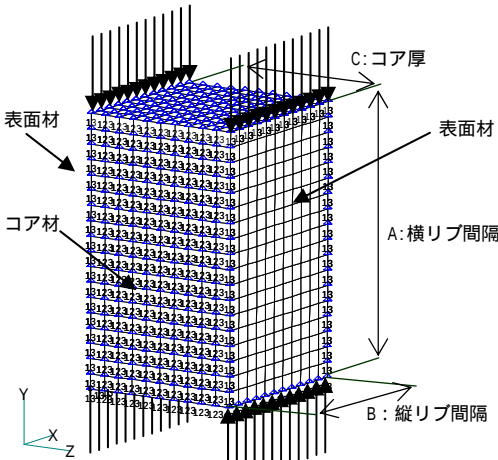


図4 FEM解析モデル

参考文献

1) 立石寧俊，山田聖志：格子状リブを有する CFRP サンドイッチ版の局部座屈に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第573号，pp.119-127，2003.11
2) 立石寧俊，山田聖志：格子状リブを有するサンドイッチ版の局部座屈理論と有限要素解析，土木学会，構造工学論文集 Vol.51A(2005年3月)，pp.161-169