積層材の座屈モード遷移板厚簡易推定に関する研究

大阪支所　材料研究グループ　＊千秋貞仁、櫻井昭男

１．まえがき

近年 FRP 製船体の大型化に伴い、船底船型の改良、船殻材料の高品質化、建造法の改良などによって、波浪荷重等の外荷重増加への対応が施されている。また、過酷な海象での実海域テスト走行も繰り返され、航行の安全性についての検証も行われている。一方、基本計画の段階から FEM 計算が導入され、船体構造性能にこれまでの経験値にかわる数値による詳細な評価が行われている。このような現状の中、船殻材の限界強度確認はもっぱら材料強度試験によって行われており、積層材の材料強度を数値評価する手法の開発が望まれている。本研究では、積層材が圧縮荷重を受けた場合に全体座屈を生じないために必要とする最小板厚を予測することを目的に、計算モデルとして一方向繊維強化(ＵＤ)２層積層材を対象に、静圧縮荷重下の損傷モードが、板厚と繊維含有率の増大に伴い、全体座屈から部分座屈に遷移する領域について強度予測計算を行った。

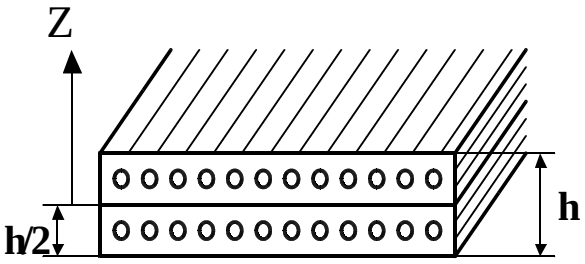
２．積層板の弾性座屈強度計算

本研究では、古典積層理論を用いて積層材の弾性座屈強度の近似計算を行った[1)]。同理論では直交異方性板の曲げ方程式は(１)式のように表わされる。

$$D_{11}\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+(2D_{12}+4D_{66})\frac{\partial w^4}{\partial x^2\partial y^2}+D_{22}\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}$$
$$+N_x\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+N_{xy}\frac{\partial w^2}{\partial x\partial y}+N_y\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=0 \qquad (1)$$

ここに D_{ij} は面外剛性マトリックス成分、N_x、N_y、N_{xy} はそれぞれ x、y 方向の軸荷重と x-y 面内せん断荷重を表す。境界条件は単純支持とし、x 方向一軸圧縮荷重が作用する場合を考えると、固有値は（２）式のように求められる。

$$N_x=(\frac{a}{m\pi})^2\{D_{11}(\frac{m\pi}{a})^4+(2D_{12}+4D_{66})$$
$$\times(\frac{m\pi}{a})^2(\frac{n\pi}{b})^2+D_{22}(\frac{n\pi}{b})^4\} \qquad (2)$$

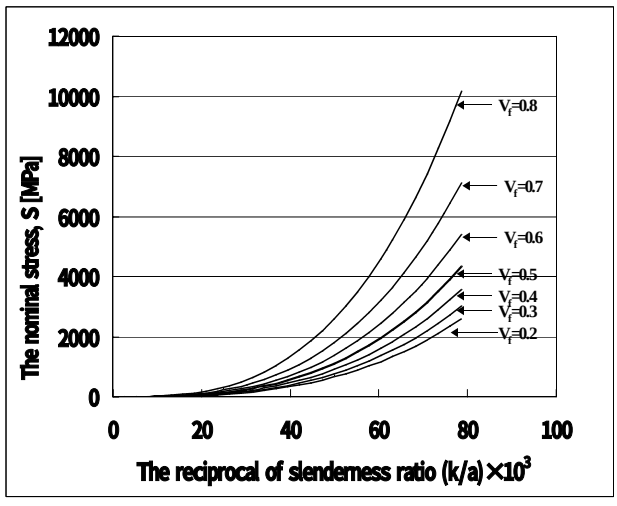


図－１ UD ２層積層材計算モデル

計算モデルは図－１に示すＵＤ板の２層積層構成を有する。(２)式中の D_{ij} の値は(3)式を用いて計算した[2)]。

$$D_{ij}=\frac{1}{3}\sum_{k=1}^{n}(\bar{Q}_{ij})_k\,(z_k^3-z_{k-1}^3) \qquad (3)$$

また、計算に必要な弾性定数は複合則を用いて算出した。（２）式より計算される公称応力を図－２に



図－２ 計算モデルの弾性座屈強度の繊維含有率による変化

示す。横軸には断面回転半径 k を長さ a で無次元化した値を示しており、値の増大は相対的な板厚の増加に対応する。同図より繊維含有率と板厚の増加は弾性座屈強度を増大させることがわかる。

3．繊維のマイクロ座屈を伴う圧縮強度計算

積層材の内部で繊維がミクロ座屈を生じる場合の樹脂の圧縮損傷応力値の計算式が A. BALACO DE MORAIS により導かれた[3]。（4）式にその簡略形の表現を示す。

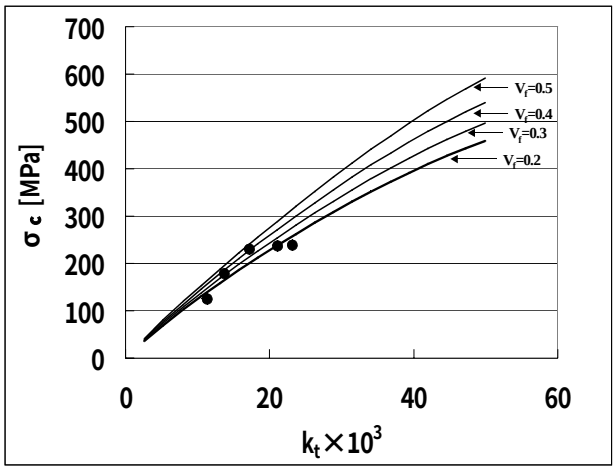
$$\sigma_{uc} = \frac{\tau_{um}}{\theta_0 + \dfrac{1-V_f}{1+V_f}\dfrac{\tau_{um}}{G_m^e}} \qquad (4)$$

ここに、σ_{uc} は樹脂の部分降伏に基づく Ducker-Prager の破損クライテリアによる臨界圧縮応力、τ_{um} は母材樹脂のせん断降伏応力、θ_0 は繊維の初期偏角、V_f は繊維含有率、G_m^e は母材樹脂の等価せん断係数で、せん断応力－歪曲線より定義される。（4）式を熟考すると、繊維含有率が一定であれば、積層材の板厚が変化しても圧縮強度の計算結果は一定値となることがわかる。

次に座屈モード遷移領域の強度推定計算について、（1）式で計算される弾性座屈応力と（4）式で計算される内部損傷応力とを指数関数で比例配分接続すると（5）式が得られる。

$$\sigma_c = EXP(-\frac{k_t}{k_{ta}})N_x + (1-EXP(-\frac{k_t}{k_{ta}}))\sigma_{uc} \qquad (5)$$

ここにσ_cは臨界圧縮応力、$k_t \equiv k/a$ は細長比の逆数、k_{ta} は k_t の遷移値をそれぞれ表す。（5）式による計算結果とマット・ロービング積層材の圧縮強度試験結果との比較を図－3に示す。今回の実験値の繊維含有率が 28 ～ 36 [%]の範囲であったことを考慮して観察すると、ドットで記入した実験値と計算値に定性的な傾向の一致が見られる。しかし、計算値の傾向は k_{ta} の定義により変化する。よって、今後はさらに実験結果との比較検討を進める必要があると考える。



図－3 臨界圧縮応力計算値と積層材の圧縮強度試験値との比較

4．結　言

本研究では、船用積層材の座屈モードが板厚の増加とともに全体座屈から繊維の部分座屈に遷移することを考慮して圧縮応力強度の変化を予測計算することを目的とし、ＵＤ板の２層積層簡易モデルについて、繊維含有率と板厚をパラメータとして圧縮強度予測計算を行った。計算結果と試験結果の傾向を比較したところ以下の知見が得られた。

1）ＵＤ板の２層積層板の臨界圧縮応力強度を、全体弾性座屈応力計算式と部分繊維座屈を伴う圧縮強度予測計算式とを指数関数接続して予測したところ、計算の全板厚範囲においてなめらかに一定値に収束する強度曲線が得られた。

2）計算結果と試験結果の傾向を比較したところ、定性的な一致が見られた。

参　考　文　献

1）末益博志：複合材料力学入門 第 4 章 複合材料の座屈と振動の基礎, 日本複合材料学会誌, 第 22 号 4 巻, pp. 148-154, 1996.

2）福永久雄：複合材料力学入門 第 3 章 積層板の理論と最適設計の基礎, 日本複合材料学会誌, 第 22 号 3 巻, pp.114-119, 1996.

3）A. BALACO DE MORAIS：Prediction of the Layer Longitudinal Compression Strength, J. of Compos. Mat.,Vol. 34, No.21(2000), pp.1808-1820.