

薄膜同士の接着における構造解析

宮崎研究室

高草 宏道

1. 序論

1.1. ゴッサマー構造物

現在、宇宙構造物は大型化が進んでいるが、宇宙構造物を軌道上に投入するにはロケットの打ち上げ能力によって大きさや重量等が制限される。そして将来的な宇宙環境の利用法としてははるかに大型の構造物の打ち上げそして運用が構想されており、今後における宇宙開発における構造物の大型化は必然であり、そのような構造物の打ち上げは非常に困難なものとなるであろうと予想される。そこで、従来のような剛体による構造物と異なり、薄膜やケーブルといった軽量かつ柔軟性の高い材質を主に用いる膜面構造を主体としたゴッサマー構造物というものが提案されている。

ゴッサマー構造物の利点としては構造物自体が軽量かつ柔軟性が高いことから折りたたむ等の方法によって大幅に収納効率を上げることが可能となることが挙げられる。これにより、大型構造物の打ち上げを大幅に効率化できると考えられている。

1.2. 薄膜同士の接着

大型のゴッサマー構造物の構成には大型の薄膜が必要となるが、一度に大型の薄膜の製造を行う場合を考えた場合、従来のものと比較するとはるかに大型の製造装置が必要となるばかりでなく品質維持においても困難なものになると考えられるので、大型の薄膜の構成には目的とする構造物より小さい大きさの薄膜を接合することで構成することが現実的ではないかといえる。しかし、ゴッサマー構造物において使用される薄膜は厚さが数 μm 程度しかないため、従来の剛体構造物のような加工を行うと加工部分を起点とする亀裂が生じたり、薄膜の強度に関

しても大幅な低下したりすることが考えられる。

このため薄膜の接合方法として最も実用的な方法として接着剤を用いた方法が考えられる。しかし薄膜同士を接着剤で接合する場合、接着によって生じる接着層の厚さは薄膜の厚さが非常に薄いことから無視できるほどの厚さとはみなせないと考えられるため、この接着層の変形を無視することはできないと考えられる。しかし、従来の研究では接着層の変形を考慮しないものがほとんどで、薄膜同士の接着時の解析についての研究は見当たらない。

この研究は、接着工学や過去に行われた薄膜同士の単純重ね合わせ継ぎ手という接着方法に関する実験を元に、ゴッサマー構造物を構造解析ソフト ANSYS と併せて解析を行い、実験とコンピュータ上における解析の妥当性を比較する。

1.3. 薄膜同士の接着に関する解析の意味

薄膜同士の接着解析が可能となることで、ゴッサマー構造物の設計の効率化が可能となることで、寄り効率的な宇宙開発が可能となるといえる。

1.4. 本研究について

本研究の目的は接着継ぎ手における最も基本的な接着継ぎ手とされている単純重ね合わせ継ぎ手に対して、構造解析ソフト ANSYS による解析結果と、過去に行われた単純重ね合わせ継ぎ手に対して行われた実験を比較して、コンピュータによるシミュレーション結果の妥当性を調べ、その際における問題点及び留意点について調べる。

2. 理論

単純重ね合わせ継ぎ手は接着層にせん断応力の加

わる接着継ぎ手の基本形式とされており、接着面積を調整することで接着層に作用する負荷応力を操作できる、最も基本的かつ実用性が高いとされる接着継ぎ手である。

下の Fig.2.1 は単純重ね合わせ継ぎ手における解析モデルを示したもので、接着部分の長さを $2c$ 、そして接着層の厚さを η とおき、被接着体の非接着部の長さを l 、そして膜自体の厚さを t とする。また、被接着体の幅 $l+2c$ は被接着体自体の厚さ t と比べて非常に長いものとして扱うことができる。

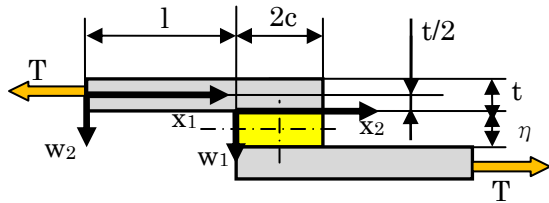


Fig.2. 1. 単純重ね合わせ継ぎ手の解析モデル

ここで、継ぎ手の両端に引張荷重 T を作用させた場合を考える。このとき、接着部には長手方向に引張変形と曲げ変形が同時に生じており、被接着体には板における曲げの理論が適用できる。

ここで、被接着剤の荷重作用点に原点 O_1 を、接着面の根元側に原点 O_2 を Fig.2.1 のように定義し、接着層内に作用する曲げモーメント M 、せん断力 V の正方向をそれぞれ Fig.2.3 のように定義する。

また、接着層および被接着体に作用する曲げモーメント M 、せん断力 V の荷重系を Fig.2.2 の様に定義する。

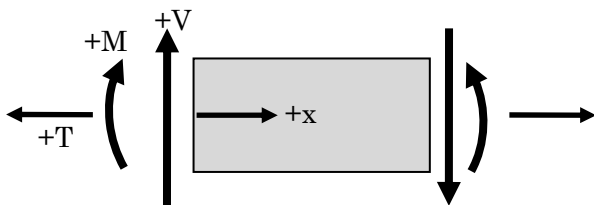


Fig.2. 2. 物体に作用する各荷重系と x 軸

ここで、この解析モデルは接着層中心に関して軸対象であることから次のようになる。

$$\alpha_n = \frac{t/2}{l+c} \quad (1)$$

そして各座標系における曲げモーメント M_1 , M_2 は

$$M_1 = T \cdot (\alpha_n \cdot x_1 - w_1) \quad (2)$$

$$M_2 = T \cdot \left\{ \alpha_n \cdot (l + x_2) - \left(w_1 + \frac{t}{2} \right) \right\} \quad (3)$$

と表すことができる。また、各座標系を基準とした平板におけるたわみは平板の曲げ剛性 D 、ヤング率 E 、ポアソン比 ν を用いると式(4)より式(5)、(6)の様に表すことができる。

$$D = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 w_1}{dx_1^2} = - \frac{T \cdot (\alpha_n \cdot x_1 - w_1)}{D_1} \quad (5)$$

$$\frac{d^2 w_1}{dx_1^2} = - \frac{T \cdot (\alpha_n \cdot x_1 - w_1 - t/2)}{D_1} \quad (6)$$

ただし(5)式は $0 \leq x_1 \leq l$ 、(6)式は $0 \leq x_2 \leq c$ におけるものとする。そして(5)、(6)式を解くと w_1 , w_2 に関して次の解を得られる。

$$w_1 = A_1 \cdot \cosh(u_1 \cdot x_1) + B_1 \cdot \sinh(u_1 \cdot x_1) + \alpha_n \cdot x_1 \quad (7)$$

$$w_2 = A_2 \cdot \cosh(u_2 \cdot x_2) + B_2 \cdot \sinh(u_2 \cdot x_2) + \alpha_n \cdot \left(l + x_2 - \frac{t}{2} \right) \quad (8)$$

ただし(5)、(6)式と同様に(7)式は $0 \leq x_1 \leq l$ 、(8)式は $0 \leq x_2 \leq c$ の範囲におけるものとする。

また、 A_1 , B_1 , A_2 , B_2 はそれぞれ積分定数であり、 u_1 , u_2 は次のとおりとする。

$$u_1 = \sqrt{\frac{T}{D_1}} \quad (9)$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{T}{D_2}} \quad (10)$$

またこの解析モデルの初期条件は

$$x_1 = 0 \quad \text{のとき} \quad w_1 = 0 \quad (11)$$

$$\begin{cases} x_1 = l \\ x_2 = 0 \end{cases} \text{ のとき } \begin{cases} w_1 = w_2 \\ \frac{d}{dx_1} w_1 = \frac{d}{dx_2} w_2 \end{cases} \quad (12)$$

$$x_2 = c \text{ のとき } w_2 = 0 \quad (13)$$

これらを用いて接着面左端における曲げモーメント M_0 およびせん断力 V_0 は

$$M_0 = -D_1 \cdot \left(\frac{d^2 w_1}{dx^2} \right)_{w_1=l} = \frac{Tt}{2} \cdot \left\{ \frac{\sinh(u_1 \cdot l) \cdot \cosh(u_2 \cdot c)}{\sinh(u_1 \cdot l) \cdot \cosh(u_2 \cdot c)} + \frac{u_1}{u_2} \cdot \cosh(u_1 \cdot l) \cdot \sinh(u_2 \cdot c) \right\} \quad (12)$$

$$V_0 = \left(\frac{dM_1}{dx_1} \right)_{x_1=l} = x_u \cdot \frac{Tt}{2} \cdot \left\{ \frac{\cosh(u_1 \cdot l) \cdot \cosh(u_2 \cdot c)}{\sinh(u_1 \cdot l) \cdot \cosh(u_2 \cdot c)} + (u_1/u_2) \cdot \cosh(u_1 \cdot l) \cdot \sinh(u_2 \cdot c) \right\} \quad (13)$$

この問題を無限帯板の二次元弾性問題として解くと、接着体表面である被接着体に生じる垂直応力 σ_x およびせん断応力 τ_{xy} は

$$\sigma_x = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n + B_n) \left[\frac{1}{2} \cdot e^{\alpha(y-c)} \cdot \{\alpha \cdot (y-c) - 1\} \right] \cdot \cos(\alpha x) \quad (14)$$

$$\tau_{xy} = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n + B_n) \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot e^{\alpha(y-c)} \cdot \alpha \cdot (y-c) \right\} \cdot \sin(\alpha x) \quad (15)$$

ただし、 α および $(A_n + B_n)$ はそれぞれ次のとおりとする。

$$\alpha = \frac{n\pi}{2t} \quad (16)$$

$$A_n + B_n = \frac{4p}{n\pi} \cdot \left[\frac{12k}{n\pi} \left\{ \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) - \cos(n\pi) \right\} - (3k+1) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right] \quad (17)$$

また、式(17)における p , k は次のとおりとする。

$$p = \frac{T}{t} \quad (18)$$

$$k = \frac{\cosh(u_2 c)}{\cosh(u_2 c) + 2\sqrt{2} \cdot \sinh(u_2 c)} \quad (19)$$

ここで、接着層の厚さは非常に薄いことから接着層表面と接着層内における応力は等しいものとみなすと、接着面に対しての垂直応力およびせん断応力はそれぞれ σ_0 , τ_0 と表すことができるといえる。

このとき、接着層の上面である上部接着層、接着層の下面である下部接着層において作用する応力はそれぞれ Fig.2.3 を元に上部接着面は添え字 u 、下部接着面は添え字 l を付けて表す。

これらのことから接着層における平衡方程式は次のようになる。

$$\frac{dM_l}{dx} - V_l + \tau_0 \cdot \frac{t}{2} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{dM_u}{dx} - V_u + \tau_0 \cdot \frac{t}{2} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{dT_u}{dx} - \tau_0 = 0 \quad (22)$$

$$\frac{dV_u}{dx} - \sigma_0 = 0 \quad (23)$$

$$\frac{dT_l}{dx} + \tau_0 = 0 \quad (24)$$

$$\frac{dV_l}{dx} + \sigma_0 = 0 \quad (25)$$

そして、上部接着面における $x=c$ 、下部接着面 $x=-c$ である接着面中央における境界値は

$$x = c \text{ のとき } \begin{cases} M_u = T_u = V_u = 0 \\ M_l = M_0, V_l = V_0, T_l = T \end{cases} \quad (26)$$

$$x = -c \quad \text{のとき} \quad \begin{cases} M_l = T_l = V_l = 0 \\ M_u = M_0, V_u = V_0, T_u = T \end{cases} \quad (27)$$

となることより、以下の式が得られる。ただし R_1 , R_2 , Δ , β , γ はそれぞれ被接着体および接着剤の形状に依存するパラメータである。

$$\frac{\tau_0}{p} \cdot \frac{c}{t} = -\frac{1}{8} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{\beta \cdot c}{t} \cdot (1+3k) \cdot \frac{\cosh\left(\frac{\beta \cdot c}{t} \cdot \frac{x}{c}\right)}{\sinh\left(\frac{\beta \cdot c}{t}\right)} \\ + 3 \cdot (1-k) \end{array} \right\} \quad (28)$$

$$\frac{\sigma_0}{p} \cdot \left(\frac{c}{t}\right)^2 = \frac{1}{\Delta} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} R_2 \cdot \lambda^2 \cdot \frac{k}{2} \\ + \lambda \cdot k \cdot \cosh(\lambda) \cdot \cos(\lambda) \end{array} \right]' \\ \cdot \cosh\left(\lambda \cdot \frac{x}{c}\right) \cdot \cos\left(\lambda \cdot \frac{x}{c}\right) \\ + \left[\begin{array}{l} R_1 \cdot \lambda^2 \cdot \frac{k}{2} \\ + \lambda \cdot k' \cdot \cosh(\lambda) \cdot \cos(\lambda) \end{array} \right] \\ \cdot \sinh\left(\lambda \cdot \frac{x}{c}\right) \cdot \sin\left(\lambda \cdot \frac{x}{c}\right) \end{array} \right\} \quad (29)$$

また R_1 , R_2 , Δ , β , γ の各種パラメータは次のように表せる。ただし被接着体および接着剤におけるヤング率を E および E_c とする。

$$\lambda = \gamma \cdot \frac{c}{t} \quad (30)$$

$$\gamma^4 = 6 \cdot \frac{E_c}{E} \cdot \frac{t}{\eta} \quad (31)$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \cdot \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cdot \cos(\lambda) \quad (32)$$

$$R_2 = \sinh(\lambda) \cdot \cos(\lambda) - \cosh(\lambda) \cdot \sin(\lambda) \quad (33)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} \cdot \{\sinh(2\lambda) + \sin(2\lambda)\} \quad (34)$$

これによって接着層における応力の分布が求められることができる。

3. 解析結果

現在、解析モデルの作成まで行い、これより解

析を行い解析が終わり次第記入する。

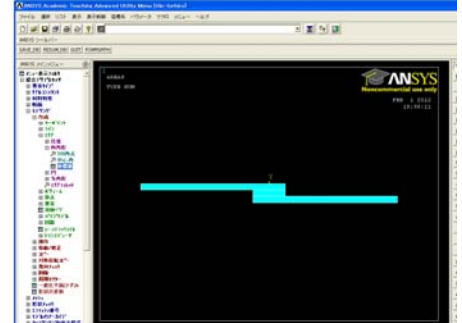


Fig.3. 1 解析モデル

4. 結論および今後の課題

解析が終わり次第記入する。

5. 参考文献

- [1]日本材料学会編, 先端材料シリーズ接着と材料
- [2]金丸競, 日本科学会編, 産業科学シリーズ接着と接着剤