

I-65

軸方向荷重を受けるラップ接着円筒体の粘弾性応力特性

北海道大学 工学部 学生員 李 海濱
 北海道大学 工学部 正員 三上 隆
 釧路工業高等専門学校 正員 芳村 仁

1. はじめに

接着継手は、接着剤の進歩および接着技術の向上に伴い、多くの分野での利用が拡大している。円筒接着継手に関する基本的な研究はますます重要な課題となることを予想される。そこで、本論文では、被着体を弾性体に、接着剤層を線形粘弾性体と仮定し、有限要素法によって、接着剤層内部の基本的な応力特性についての解析を試みる。

2. 問題の定式化と離散化

ラップ接着された円筒体を図-1に示し、外側の被着体を被着体Iと名付け、内側の被着体を被着体IIと名付ける。両被着体の離散化には、軸対称荷重を受ける三次元弾性体の応力-ひずみ関係式に基づいた8節点アイソパラメトリック要素¹⁾を採用する。

有限要素法による粘弾性構造解析は、多くの解析手法²⁾が提案されている。その中で、本論文で用いた解法は、山田・岩田³⁾による増分形の解法であり、一般化Voigtモデルに適用されるクリープ・コンプライアンスを用いてクリープ積分法則から、増分形の応力-ひずみマトリックスを導くものである。

接着層の離散化にあたっては、既に著者ら⁴⁾が提案した、厚さ方向には分割をしないが、軸対称体のひずみ-変位関係式に合理的な近似を導入して、

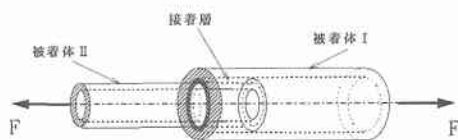


図-1 ラップ接着された円筒体

接着層の厚さを考慮した図-2に示す6節点有限要素に粘弾性的性質を加えて行う。

山田・岩田³⁾の解法によれば、要素内のひずみ増分 $\{\Delta\varepsilon\}$ と節点変位増分 $\{\Delta\delta\}$ の関係が成立する。

$$\{\Delta\varepsilon\} = [B]\{\Delta\delta\} \quad \text{----- (1)}$$

ここで、

$$\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon_r \quad \Delta\varepsilon_\theta \quad \Delta\varepsilon_z \quad \Delta\gamma_{rz}\}^T$$

$$= \left\{ \Delta \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad \Delta \left(\frac{u}{r} \right) \quad \Delta \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad \Delta \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right\}^T \quad \text{--- (2)}$$

$$\{\Delta\delta\} = \{\Delta u_1 \quad \Delta w_1 \quad \Delta u_2 \quad \Delta w_2 \dots \Delta u_6 \quad \Delta w_6\}^T \quad \text{---- (3)}$$

ただし、 u は半径方向(ξ 方向)変位、 w は軸方向変位(z 方向)を表す。なお、ひずみ-変位マトリックス $[B]$ の導出過程は、文献4)を参照されたい。

応力が微小時間の間で直線変化するものとすれば、偏差応力増分と偏差ひずみ増分、体積応力増分と体積ひずみ増分の関係式を求め、マトリックス表示すれば、次式となる(ただし、時刻 t の関数を示す添字 t は省略して示す)。

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} - \{\Delta\sigma_v\} \quad \text{---- (4)}$$

ここで、

$$\{\Delta\sigma\} = \{\Delta\sigma_r \quad \Delta\sigma_\theta \quad \Delta\sigma_z \quad \Delta\tau_{rz}\}^T \quad \text{---- (5)}$$

であり、応力-ひずみマトリックス $[D]$ は次式となる。

$$[D] = \begin{bmatrix} K_c + \frac{4}{3}G_c & & & SYM. \\ K_c - \frac{2}{3}G_c & K_c + \frac{4}{3}G_c & & \\ K_c - \frac{2}{3}G_c & K_c - \frac{2}{3}G_c & K_c + \frac{4}{3}G_c & \\ 0 & 0 & 0 & G_c \end{bmatrix} \quad \text{--- (6)}$$

ただし、 G_c と K_c はそれぞれ、偏差成分と体積成分のクリープ・コンプライアンス特性によって表される係数である。さらに $\{\Delta\sigma_v\}$ は粘弾性変形による見かけの応力ベクトルを表し、次式で与えられる。

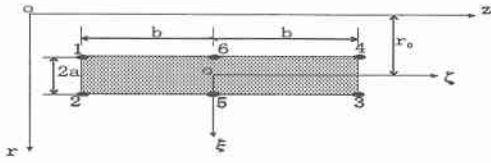


図-2 接着要素

$$\{\Delta\sigma_v\} = [H]\{\Delta I\} \quad \text{----- (7)}$$

ただし

$$[H] = \begin{bmatrix} G_c & 0 & 0 & 0 & K_c/3 \\ 0 & G_c & 0 & 0 & K_c/3 \\ 0 & 0 & G_c & 0 & K_c/3 \\ 0 & 0 & 0 & G_c & 0 \end{bmatrix} \quad \text{----- (8)}$$

$$\{\Delta I\} = \{\Delta I_r, \Delta I_\theta, \Delta I_z, \Delta I_{rz}, \Delta I_B\}^T \quad \text{--- (9)}$$

であり、 $\{\Delta I\}$ の各成分は、偏差・体積応力増分と偏差・体積ひずみ成分の関係から得られるもので、文献3)を参照されたい。

剛性マトリックスは、式(1)を用いて、節点変位増分と節点反力増分 $\{\Delta f\}$ との間には次の関係が成立する。

$$\{\Delta f\} = [k]\{\Delta\delta\} - \{\Delta f_v\} \quad \text{----- (10)}$$

ここで、剛性マトリックス $[k]$ および粘弾性変形による見かける荷重(等価節点力) $\{\Delta f_v\}$ は次式で与えられる。

$$[k] = 4\pi ab r_0 \int_{-1}^{+1} [B]^T [D] [B] d\zeta \quad \text{----- (11)}$$

$$\{\Delta f_v\} = 4\pi ab r_0 \int_{-1}^{+1} [B]^T [H] \{\Delta I\} d\zeta \quad \text{----- (12)}$$

最終的には、被着体の要素と接着層の要素の各方程式重ね合わせて全体の方程式を作成し解けばよい。なお、式(11)と式(12)の積分は、Gaussの求積法を用いた。

3. 数値計算例

3.1 解析モデルと諸元

解析モデルは図-3に示すような軸方向引張力F

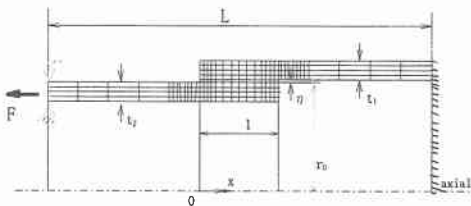


図-3 解析モデルと要素分割

が内側の被着体IIに作用する場合である。図で、 x , η , l および r_0 は接着剤層部分の座標系, 接着剤層の厚さ, 接着剤層の長さおよび接着剤層の半径であり、 t_1 , t_2 は被着体Iと被着体IIの厚さである。また、被着体Iの弾性係数, ポアソン比を E_1 , ν_1 と表し、被着体IIのそれらを E_2 , ν_2 と表す。弾性解析の結果⁴⁾を基にして、解析領域は $L/l=5$ を用いることにする。その要素分割は接着剤層に対しては14要素, 被着体に対しては192要素の合計206要素である(図-3がこの場合に対応する)。

解析諸元は、継手寸法に関しては、 $t_1/t_2=1$, $l/t_1=10$, $\eta/t_1=0.2$ とし、本計算で具体的に $t_1=1\text{mm}$ を用いた。

材料の性質については、接着剤層はエポキシ系の材料とし、粘弾性材料特性を示すせん断クリープ・コンプライアンス $[D(t)]$ と体積クリープ・コンプライアンス $[B(t)]$ ⁵⁾には次のような関係式を用いた。

図-4はこの関係式に対応する。

$$D(t) = D_0 + \frac{t}{\eta_D} + D_1 \left(1 - e^{-t/T_D}\right)$$

$$B(t) = B_0 + \frac{t}{\eta_B} + B_1 \left(1 - e^{-t/T_B}\right)$$

ただし、

$$D_0 = 7.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{MN}, \quad D_1 = 1.33 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{MN},$$

$$\eta_D = 1.0 \times 10^6 \text{ MN} \cdot \text{sec.}/\text{m}^2, \quad T_D = 13.3 \text{ sec.},$$

$$\eta_{D1} = 1.0 \times 10^5 \text{ MN} \cdot \text{sec.}/\text{m}^2.$$

$$B_0 = 2.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{MN}, \quad B_1 = 2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{MN},$$

$$\eta_B = 1.0 \times 10^7 \text{ MN} \cdot \text{sec.}/\text{m}^2, \quad T_B = 10.0 \text{ sec.},$$

$$\eta_{B1} = 4.0 \times 10^5 \text{ MN} \cdot \text{sec.}/\text{m}^2 \text{ である。}$$

両被着体はアルミニウム[Al] (弾性係数:

70600 MNm^{-2} , ポアソン比: 0.3) と鉄[St] (弾性係数: 206000 MNm^{-2} , ポアソン比: 0.3) とし、種々の組み合わせに対して数値解析を行った。また、円筒体の相対厚さを $R(=t_1/2r_0)$ で表し、 $R=0.01$ と 0.1 の2つの場合について解析した。

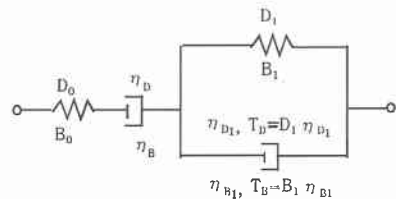


図-4 4要素粘弾性体モデル

3.2 解析結果

以下に示す結果の全ては、接着剤層内部の応力のうち、垂直応力 σ_r およびせん断応力 τ_{zr} を平均せん断応力 $\tau_m = F / (2\pi r_0 l)$ で無次元化して、それぞれ $N (= \sigma_r / \tau_m)$ および $T (= \tau_{zr} / \tau_m)$ で表示する。また、本論文では時間刻み幅 $\Delta t = 120 \text{sec.}$ のステップでそれぞれの解析を行い、時刻 $t = 0 \text{min.}$ (弾性状態)、 30min. 、 180min. について応力 T と応力 N の分布を示す。

図-5 および図-6 は被着体が同種材料 [アルミニウム (Al)] (Al-Al) 接着の場合の $R = 0.01$ 、 $R = 0.1$ の場合の接着剤層内部の応力 (T と N) を示す。図の横軸は無次元化された接着剤層の座標であり、 $x/l = 0.0$ は荷重作用側、 $x/l = 1.0$ は固定端側である

(図-3に参照)。これらの図によれば、①応力 N は R によらず、接着剤層両端で大きな値をとり、時間とともに減衰し、粘弾性の影響を相当受ける。しかし接着剤層中央部では時間変化をあまり受けない。②応力 T は応力 N と同様、 R によらず接着剤層両端で最大値をとるが、粘弾性の影響は接着剤層の全領域に及ぶ。なお、時間の経過とともに ' $T=1$ ' に近づいている。

図-7~図-9 は被着体には同種材料 (Al-Al および St-St) と異種材料 (Al-St) の接着の場合について、 $x/l = 0.0$ に現れた最大垂直応力と最大せん断応力の時間履歴を $t = 180 \text{min.}$ まで示したものである。①これらの図によると、被着体の材料によらず、応力 N と T は時間の経過とともに減衰し、その程度は応

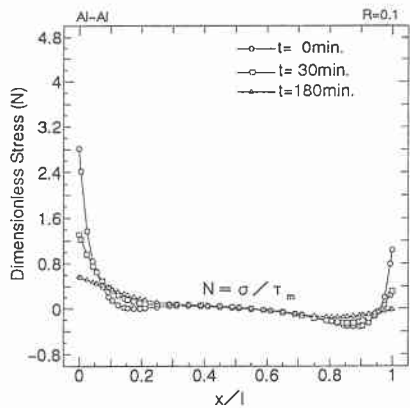
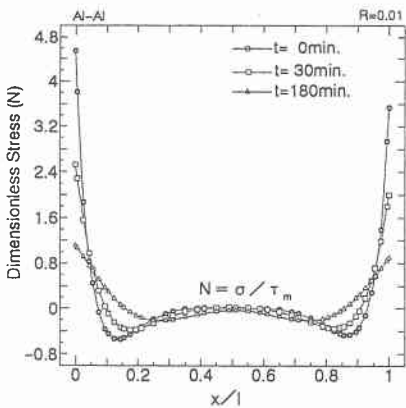
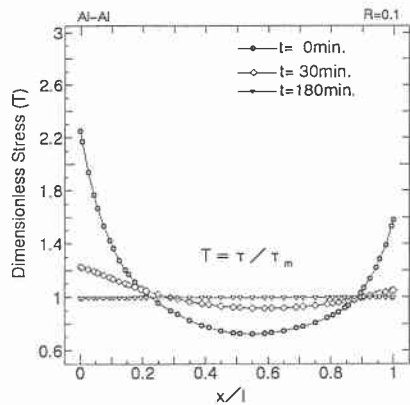
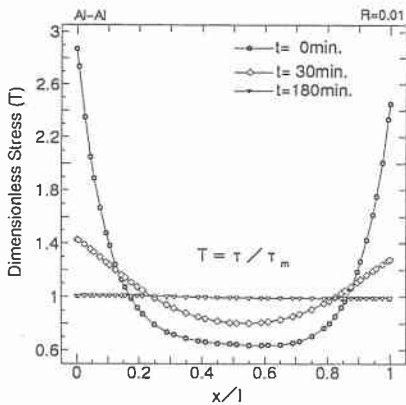


図-5 同種材料の接着層の応力分布特性
[Al-Al, $R = 0.01$]

図-6 同種材料の接着層の応力分布特性
[Al-Al, $R = 0.1$]

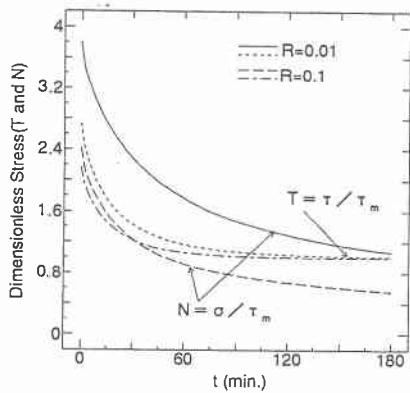


図-7 最大せん断応力と垂直応力の経時変化 (Al-Al)

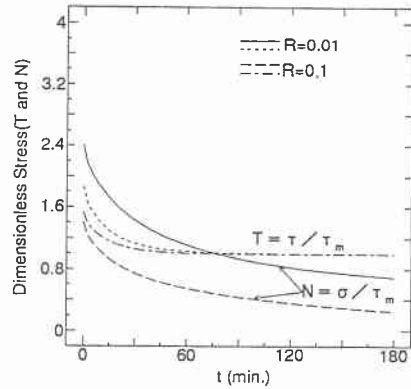


図-8 最大せん断応力と垂直応力の経時変化 (St-St)

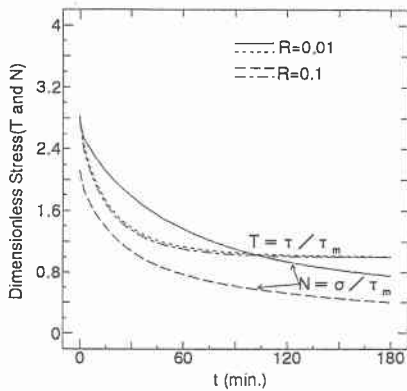


図-9 最大せん断応力と垂直応力の経時変化 (Al-St)

力 T よりも応力 N の方が大きい。また、応力 N は弾性状態と同じく R が小さいほど大きな値となり、応力 T は時間がたつと R によらずほぼ同一値に収束する。②図-7と図-8を比較すると、鉄による同種材料接着の結果は、アルミニウムによる同種材料接着の結果より、端部での応力(N と T)最大値は小さい、応力の減衰も緩やかであり、応力 T の収束は鉄の方が速い。③図-9は被着体Iには鉄、被着体IIにはアルミニウムを用いた異種材料(Al-St)接着の場合を示す。この図により、応力 T は R によらずほぼ同じ値で時間とともに減衰する。

4. まとめ

本論文は、接着剤層の粘弾性を考慮したラップ接着された円筒体の接着剤層の応力分布について、4要素粘弾性体モデルを採用して数値解析を行い、接

着剤層の応力分布の時間に対する変化および応力の減衰傾向を明らかにした。本解析を要約すると、以下となる。

- (1) エポキシ系の接着剤材料を一例として、8節点アイソパラメトリック要素と6節点接着要素を用いた有限要素法により、接着剤層の応力分布を明確した。
- (2) 応力の減衰は、被着体の剛性の大きさに大きく依存し、それは被着体の剛性が大きいほど小さい。
- (3) 垂直応力 N の減衰は、せん断応力 T のそれより大きい。

本論文では静的な荷重で接着剤層の応力分布を解析したが、今後は、材料の粘弾性を考慮した動的な解析を実施する予定です。

【参考文献】

- 1) 鷲津久一郎他共編：有限要素法ハンドブック、基礎編、培風館、1981。
- 2) 成岡昌夫、中村恒善共編：骨組構造解析法要覧。
- 3) 山田嘉昭、岩田耕司：Finite element analysis of thermo-viscoelastic problems, 生産研究, Vol. 24, No. 4 pp. 165-170, 1972。
- 4) 三上隆、李海濱、佐伯昇、芳村仁：有限要素法による接着円筒体の接着層の応力解析、構造工学論文集, Vol. 41A, pp. 73-78, 1995。
- 5) 能野謙介、永弘太郎：接着剤のクリープが単純重ね継手の応力分布に与える影響、日本接着協会誌, Vol. 16, No. 2 pp. 49-59, 1980。