

I-19 ラップ接着された円筒体の動的挙動

北海道大学 学生員 李 海濱
 北海道大学 正 員 三上 隆
 北海道大学 正 員 佐々木康彦
 北海道大学 正 員 荻澤 憲吉

1. はじめに

接着剤のめざましい進歩および接着技術の向上に伴い、接着継手は構造の高強度・高性能・軽量化の要求に応える手段の一つとして、その使用は飛躍的に拡大するものと予想される。しかし、過酷な条件下での応力挙動は、十分に検討されているとは言い難い。そのため、本論文では図-1 に示すラップ接着された円筒体を解析対象にし、衝撃引張荷重下における接着剤層内部の応力挙動の検討を行う。

2. 解析手法

動的問題において、考察している構造全体の運動方程式は減衰の影響を無視すれば次式で与えられる。

$$[M]\left\{\frac{\partial^2 U(t)}{\partial t^2}\right\} + [K]\{U(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

ここで、 $\{U(t)\}$ は変位ベクトル、 $[M]$ は質量マトリックス、 $[K]$ は剛性マトリックス、 $\{F(t)\}$ は荷重ベクトル、 t は時間である。

本論文では、運動方程式(1)の時間変数に関する積分には、高周波数の振動成分の減衰特性がよい HHT (Hilber-Hughes-Taylor) 法¹⁾を用いる。すなわち、数値的減衰の程度を示す α というパラメータを加え、運動方程式(1)が次のように変形される。

$$[M]\left\{\frac{\partial^2 U(t+\Delta t)}{\partial t^2}\right\} + (1+\alpha)[K]\{U(t+\Delta t)\} - \alpha[K]\{U(t)\} = \{F(t+\Delta t)\} \quad (2)$$

ここで、 Δt は時間刻みである。

なお、本論文で、パラメータ α は0.1とする。

空間の離散化手法には有限要素法を用いる。すなわち、被着体に対しては8節点アイソパラメトリック要素の剛性マトリックス²⁾と集中質量マトリックス³⁾を、接着層に対しては十分な精度を有する6節点接着要素の剛性マトリックス⁴⁾と集中質量マトリックス⁵⁾を用いる。

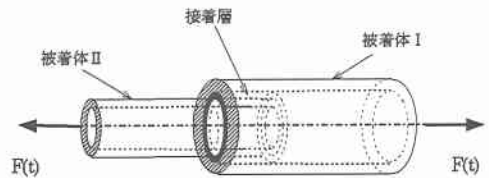


図-1 ラップ接着された円筒体

3. 数値計算例

3.1 解析モデル

図-1 に示している接着円筒体の衝撃解析を行うため、図-2 に示すようにモデル化した。衝撃荷重は、強度 P のステップ状衝撃引張り荷重 $F(t)$ が内側の被着体IIの軸方向に加わるものとする。本計算では、被着体Iの固

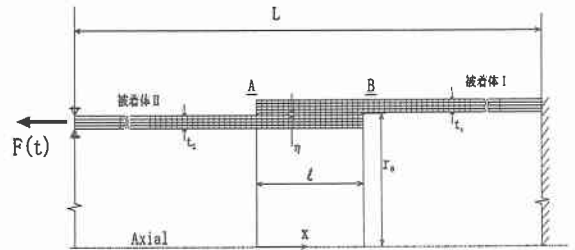


図-2 解析モデルと要素分割

The Dynamic Behavior of Adhesive-bonded Cylindrical Lap Joints
 by LI Haibin, Takashi MIKAMI, Yasuhiko SASAKI and Noriyoshi NIRASAWA

定端で発生する反射波の影響を受けない時間範囲で解析を行うため、比較的長い両被着体を対象とし、解析領域 $L=59l$ を採用し、また、接着層部分および接着層端部付近の両被着体を細かい要素分割を行い、接着層に対しては 20 要素、被着体に対しては 880 要素の合計 900 要素を用いた。

解析諸元 $t_2/t_1=1$, $l/t_1=10$, $\eta/t_1=0.2$, $t_1=1.0\text{mm}$ とし、円筒体厚さ $R=t_1/2r_0$ は 0.01 (薄い円筒体に相当するもの) と 0.1 (厚い円筒体に相当するもの) とした。また、有限要素法を用いて衝撃問題を解析する場合、要素寸法と時間刻み Δt の兼ね合いが問題になるが、結果の精度を保証するためには、最小要素長内を応力波が通過する時間 ($t_{\min} = l_{\min}/c$; $l_{\min}$: 最小要素の寸法; c : 縦波の伝播速度) よりも、計算の時間刻みを小さくする必要があり、本計算では $\Delta t < t_{\min}$ になるように $\Delta t = 0.2375 \times 10^{-7} \text{sec.}$ と設定した。

なお、材料の材質については、被着体はアルミニウム (弾性係数: $70,600\text{MNm}^{-2}$, ポアソン比: 0.33, 密度: $0.00269\text{MNsec}^2\text{m}^{-4}$) とスチール (弾性係数: $206,000\text{MNm}^{-2}$, ポアソン比: 0.3, 密度: $0.00786\text{MNsec}^2\text{m}^{-4}$) とし、接着層はエポキシ系の材料 (弾性係数: 4090MNm^{-2} , ポアソン比: 0.3636, 密度: $0.001\text{MNsec}^2\text{m}^{-4}$) とした。

3.2 解析結果

以下に示す応力時刻歴応答の全ては、接着層端部に生じた応力のうち、垂直応力 σ_r およびせん断応力 τ_{rz} を静的な平均せん断応力 ($\tau_m = P/2\pi r_0 l$) で無次元化して、それぞれ $N=(\sigma_r/\tau_m)$ 及び $T=(\tau_{rz}/\tau_m)$ で表示する。

3.2.1 被着体が同種材料から成る場合の接着層の応力応答

両被着体にアルミニウムを用いた同種結合 (AL-AL) の解析結果を図-3 と図-4 に示す。図-3 は $R=0.01$ の場合の接着層の変形を示しており、 $t=0.103T_1$ (T_1 : 基本固有周期) は縦波がまだ接着層に到達していない、その後の変形図のすべては固定端に生じた反射波がまだ接着層に到達していないものである。これらの変形を見ると、接着層中を応力波が伝播していく様子がおよそ理解できる。すなわち、応力波が継手部に到着し、被着体を伝播することにより、変形が生じている。これは、両被着体の中心線のずれに起因する曲げモーメントの影響と考えられる。

図-4 は薄肉円筒体と厚肉円筒体について、接着層の A 端 (衝撃荷重を受ける側) および B 端 (固定端側) における垂直応力 N とせん断応力 T の時間に対する変化を示したものである。これらの図より、①接着層両端の応力は、縦波が着目点 (A 端, B 端) に到着すると同時に立ち上がるとともに、強い応力集中が発生しており、ほぼ波動伝播の現象を忠実に再現していると考えられる。②応答が立ち上がった後では、 $R=0.01$ の薄い円筒体は長い周期で応答が繰り返され、 $R=0.1$ の厚い円筒体は短い周期で応答が繰り返されているが、応答の山と谷の平均で評価すれば、薄い円筒体の応力はほぼ静的な解の結果に等しく、厚い円筒体では静的な解よりやや大きめ (静的解の 1.0~1.2 倍) の結果を与えているものの、ほぼ静的解に等しい。③接着層の A 端での応力が、B 端のそれより大きい。

3.2.2 被着体が異種材料から成る場合の接着層の応力応答

まず、異種結合の結果として、内側被着体はアルミニウム、外側被着体はスチールとした場合 (AL-ST) の接着層両端 (A 端, B 端) の応力 (N, T) の時刻歴応答を図-5 に示す。これらの図により、①接着層両端の応力の挙動は、同種結合の結果と同じで、応答の急な立ち上がりの後に、薄い円筒体は長い周期で、厚肉円筒体は短い周期で応答が繰り返されている。② R の値によらず、A 端の応力が B 端のそれより大きく、また静的な解に比べてかなり大きな応力値を示している。ここで、衝撃応答の結果を、応答の山と谷の平均で求めて、静的解と比較すれば以下となる。

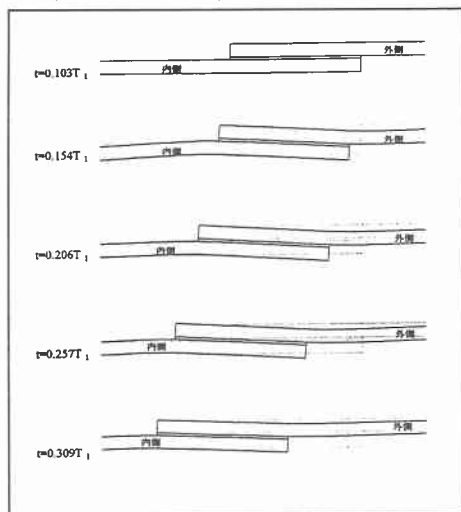


図-3 接着層の変形図 [AL-AL, $R=0.01$]

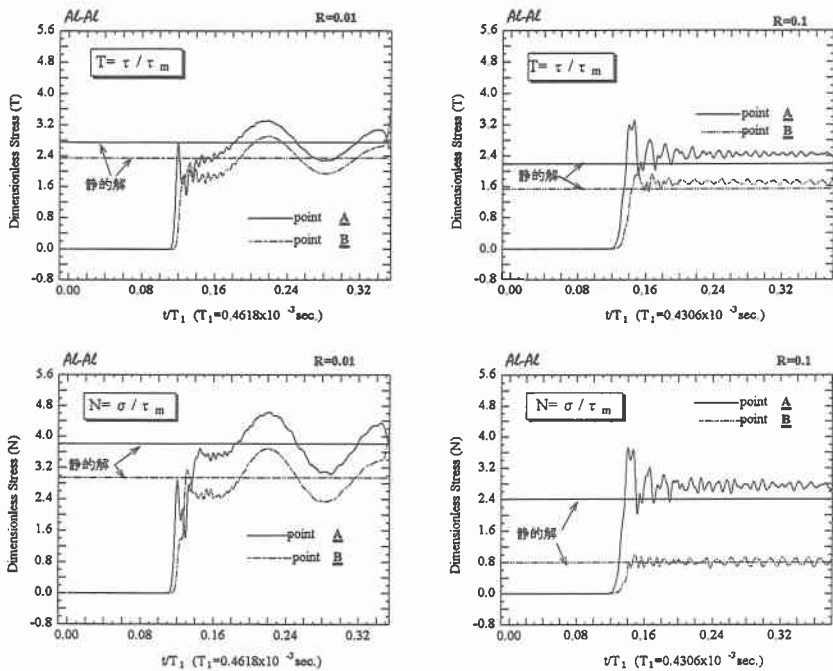


図-4 同種結合[AL-AL]の接着層端部の垂直応力とせん断応力の時間応答曲線

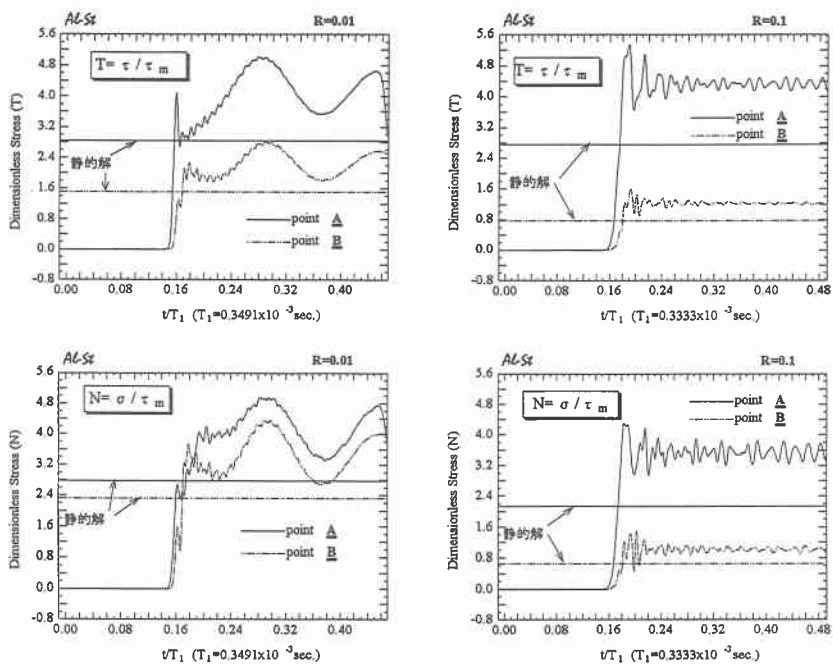


図-5 異種結合[AL-Si]の接着層端部の垂直応力とせん断応力の時間応答曲線

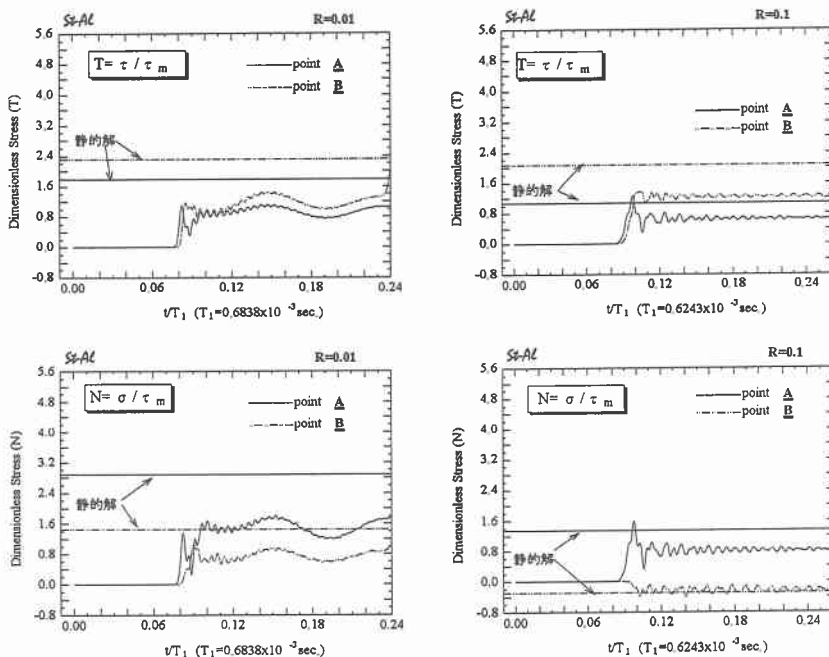


図-6 異種結合[*St-Al*]の接着層端部の垂直応力とせん断応力の時間応答曲線

$R=0.01$ の場合, A 端: $N_d/N_s=1.5$, $T_d/T_s=1.5$; B 端: $N_d/N_s=1.5$, $T_d/T_s=1.5$

$R=0.1$ の場合, A 端: $N_d/N_s=1.7$, $T_d/T_s=1.6$; B 端: $N_d/N_s=1.6$, $T_d/T_s=1.6$

ただし, 添字 d は衝撃応答の, 添字 s は静的な場合の結果を示す。

③②より動的応答倍率 $\alpha_N (=N_d/N_s)$ と $\alpha_T (=T_d/T_s)$ は $\alpha_N=1.5 \sim 1.7$, $\alpha_T=1.5 \sim 1.6$ となり, 荷重作用側の被着体 II に剛性の小さな材料を用いれば, 静的解より 50~70%程度大きな値をとっている。

図-6 に内側被着体はスチール, 外側被着体はアルミニウムの異種結合(*St-Al*)の結果を示しており, 動的応答倍率を整理すれば以下となる。

$R=0.01$ の場合, A 端: $\alpha_N=N_d/N_s=0.5$, $\alpha_T=T_d/T_s=0.5$; B 端: $\alpha_N=N_d/N_s=0.5$, $\alpha_T=T_d/T_s=0.5$

$R=0.1$ の場合, A 端: $\alpha_N=N_d/N_s=0.6$, $\alpha_T=T_d/T_s=0.6$; B 端: $\alpha_N=N_d/N_s=0.7$, $\alpha_T=T_d/T_s=0.6$

即ち, 内側の被着体 II に剛性の大きな材料を用いれば, 静的解より 30~50%程度小さな値をとっている。

4. まとめ

本論文では, 空間離散化には有限要素法を, 時間変数には HHT 法を用いて, 軸方向に衝撃負荷を受けるラップ接着された薄肉円筒体および厚肉円筒体の応力解析を実施し, 両被着体が同種材料から成る場合および異種材料から成る場合の接着層内の応力の応答特性を明らかにした。

【参考文献】

- 1) Hilber, H. M., Hughes, T. J. R. and Taylor, R. L. : Improved numerical dissipation for time integration algorithm in structural dynamics, Earthquake Eng. and Struct. Dyn., Vol. 5, pp. 283~292, 1977.
- 2) 鷲津久一郎他編者: 有限要素法ハンドブック (I 基礎編), 培風館, 1981.
- 3) O. C. Zienkiewicz : The finite element method, McGRAW-HILL, pp. 533~540.
- 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) 李海濱, 三上隆: 軸方向衝撃荷重を受けるラップ接着された円筒体の応力特性, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp. 45~48, 1996.