

(5) 衝撃荷重を受ける接着構造要素の解析

北海道大学 工学部 ○三上 隆
 北海道大学 工学部 芳村 仁
 鹿島建設(株) 岩橋 雅幸

1. はじめに

高分子工業の発展による最近のめざましい接着剤の進歩は、あらゆる構造物に用いられるようになり、構造物の設計方式を変革しつつある。特に軽量化が望まれる分野では、採用されるようになって来ているが、どちらかと言えば構造物の二次的な場所での使用が多く、主要構造要素に適用するには、解決すべき問題も数多くある。接着(接合)構造要素は、同種あるいは異種の材料の被着体が、薄い接着剤により結合されたものである。従って、被着体と薄い接着層の厚さが大きな差があったり、被着体と接着層の間の力学的性質が異なる場合も多く、そのため、応力分布には特異性が生じやすい。このような同種・異種材料接合部の研究は、同種材料に対する解析的研究^{1,2)}や、最近では複雑な形状の接合構造のための有限要素法(FEM)による解析³⁻⁷⁾も数多くなされているが、粘弾性を考慮した報告^{8,7)}を除けば、ほとんどは静的問題が取り扱われている。そこで本報告では、単純重ね継手を対象にし、従来取り上げられることが少なかった衝撃荷重下の動的挙動の検討を行い、基本的な動的特性を明らかにする。そのため、接着要素(joint要素)に対しては接着層の長手方向応力の影響を考慮した剛性マトリックスを新たに提示し、運動方程式の時間積分には被着体と接着層の間の力学的性質が大きな差異がある場合にも効率的な計算が行えるように陰-陽解法(Implicit-explicit法)を採用した。

2. 動的解析

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。

$$[M]\{U\}_{,tt} + [K]\{U\} = \{R\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\{U\}$ =変位ベクトル、 $[M]$ =質量マトリックス、 $[K]$ =剛性マトリックス、 $\{R\}$ =荷重ベクトルであり、コンマの後の添字 t は時間に関する微分を表す。

空間の離散化には有限要素法を採用する。被着体に一般的な4節点アイソパラメトリック要素を用い、接着層は以下に概説する4節点のjoint要素を採用する。図-1に示すような長さ L および厚さ一定で h の要素を考える。joint要素の剛性マトリックスの誘導は従来のそれにほぼ同じであるが、大きな相違点は接着層の長手方向(x 軸方向)の応力 σ_x を考慮していることである。ひずみ $\{\epsilon\} = (\epsilon_{,x}, \epsilon_{,y}, \gamma_{,xy})^T$ を次のように表す。

$$\epsilon_{,x} = U_{,x} = d\{(u^{top}(\xi) + u^{bottom}(\xi))/2\}/dx \dots\dots\dots (2.a)$$

$$\epsilon_{,y} = V_{,y} = \Delta v/h = (v^{top}(\xi) - v^{bottom}(\xi))/h \dots\dots\dots (2.b)$$

$$\gamma_{,xy} = U_{,y} = \Delta u/h = \{u^{top}(\xi) - u^{bottom}(\xi)\}/h \dots\dots\dots (2.c)$$

ここで、 $\xi = 2x/L$ 、 $u^{top}(\xi)$ および $u^{bottom}(\xi)$ はそれぞれ上下面の x 方向変位であり、 $v^{top}(\xi)$ お

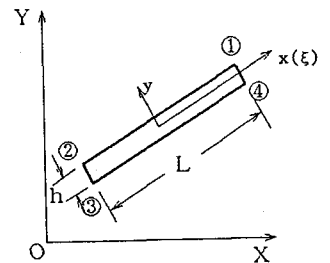


図-1 joint要素

よび $v^{b'c'c'om}(\xi)$ は同様に y 方向変位であり次のように表される。

$$u^{a'c'c'om}(\xi) = N_1 u_1 + N_2 u_2, \quad v^{a'c'c'om}(\xi) = N_1 v_1 + N_2 v_2 \quad \dots \dots \dots (3. a, b)$$

$$u^{b'c'c'om}(\xi) = N_1 u_3 + N_2 u_4, \quad v^{b'c'c'om}(\xi) = N_1 v_3 + N_2 v_4 \quad \dots \dots \dots (3. c, d)$$

ここで、形状関数 N_1 および N_2 は次式で表される。

$$N_1 = (1 + \xi) / 2, \quad N_2 = (1 - \xi) / 2 \quad \dots \dots \dots (4)$$

以上の関係式より、joint要素の剛性マトリックス $[k]$ は次のように求められる。

式(2)と式(3)より定まるひずみと変位の関係は次式となる。

$$\{\varepsilon\} = [B(\xi)] \{\delta\} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、要素変位ベクトルは $\{\delta\} = (u_1, v_1, u_2, v_2, u_3, v_3, u_4, v_4)^T$ $\dots \dots \dots (6)$

であり、 $[B(\xi)]$ はひずみ-変位マトリックスである。

応力 $\{\sigma\}$ とひずみ $\{\varepsilon\}$ の関係式は次式となる。

$$\{\sigma\} = (\sigma_x, \sigma_y, \tau, \dots)^T = [D] \{\varepsilon\} = \{E / (1 - \nu^2)\} [d] \{\varepsilon\} \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 $[D]$ は応力マトリックスであり、接着層の長手方向応力 σ_x の考慮および無視する場合にも適用できるような形でマトリックス $[d]$ の非零成分をせば以下となる。

$$d_{11} = \alpha_1, \quad d_{12} = d_{21} = \alpha_1 \nu, \quad d_{22} = \alpha_2, \quad d_{33} = (1 - \nu) / 2 \quad \dots \dots \dots (8)$$

なお、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ とおけば応力 σ_x を考慮することになり、 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1 - \nu^2$ とおけば σ_x を無視することに相当する。

joint要素の剛性マトリックス $[k]$ は次のように表される。

$$[k] = (hL/2) \int_{-1}^1 [B(\xi)]^T [D] [B(\xi)] d\xi \quad \dots \dots \dots (9)$$

joint要素の質量マトリックス $[m]$ には以下の集中質量マトリックスを用いた。

$$[m] = (\rho hL/4) \text{diag} [1, 1, \dots, 1] \quad \dots \dots \dots (10)$$

運動方程式(1)の積分には直接積分法を採用する。動的応答問題では、一般的な時間積分に関する対処法として、構造振動問題では無条件安定なスキーム(陰解法)が、衝撃問題等の応力波伝播問題では条件安定なスキーム(陽解法)が用いられるが、ここでは被着体と接着層の間の力学的性質が大きな差異がある場合にも効率的な計算が行えるように、被着体と接着層に異なる時間積分を用いる要素を配置する陰-陽解法^{8,9)}(Implicit-explicit法)を採用する。すなわち被着体のように剛性の高い領域には陰解法のNewmark- β 法($\beta=1/4, \gamma=0.6$)を、接着層のように剛性の低い領域には陽解法の予測子・修正子法を用いる。

3. 数値計算例

図-2のような被着体AおよびBから成る単純重ね継手について解析を行った。衝撃荷重は被着体Aの左端に時間に対して長

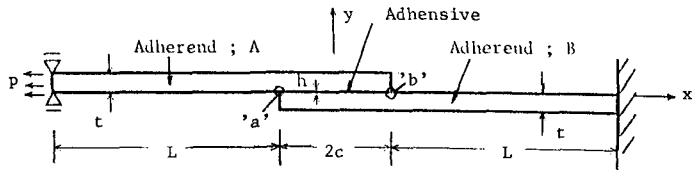


図-2 解析モデル

方形分布の引張荷重(強度 $p=1\text{kgf/mm}^2$)が作用するものとし、後の説明のために接着層の両端を図-2に示すように 'a' 端および 'b' 端と名付ける。また、被着体はアルミニウムあるいは鉄とし、接着層の材質にはエポキシを仮定する。解析諸言は以下のとおりである。



図-3 要素分割図

$L = 100\text{mm}$, $c = 25\text{mm}$, $t = 6\text{mm}$, $h = 0.5\text{mm}$

アルミニウム: $E = 7.2 \times 10^3 \text{kgf/mm}^2$, $\nu = 0.33$, $\gamma = 2.69 \times 10^{-6} \text{kgf/mm}^3$

チール: $E = 2.1 \times 10^4 \text{kgf/mm}^2$, $\nu = 0.3$, $\gamma = 7.86 \times 10^{-6} \text{kgf/mm}^3$

エポキシ: $E = 3.0 \times 10^2 \text{kgf/mm}^2$, $\nu = 0.35$, $\gamma = 1.00 \times 10^{-6} \text{kgf/mm}^3$

ここで、 E は弾性係数、 ν はポアソン比、 γ は単位体積重量である。

衝撃荷重の継続時間 t_0 は応力の動的増幅率を求める場合を除いて、 $t_0 = 0.5T_1$ とした(T_1 =基本固有周期)。図-3に解析に用いた要素分割図(230要素)を示す。

3.1) 静的問題

接着層の長手方向(x 軸方向)の応力 σ_x の考慮の影響を調べために静的荷重下の場合を解析し、応力 σ_x を無視したときのGolandおよびReissnerの解析解¹⁾と比較検討を行った。

図-4に被着体AおよびBがスチールの同種材料から成る場合の接着層内の応力分布(σ_y , τ , σ_x)を示す。計算に用いた材料定数および寸法は前述のものである。図で実線がGoland-Reissner

の理論解、○印および△印が本解析法の結果で、それぞれ長手方向応力を考慮($\sigma_x \neq 0$)および長手方向応力を無視($\sigma_x = 0$)により得られた解である。図から理解できるように本結果はGoland-Reissnerの理論解と良い一致をみており、本解析法の妥当性が確認できる。長手方向応力を考慮の有無の影響は、せん断応力 τ , σ_y には無く、垂直引張応力 σ_y では接着層中央部では無く、接着層両端近傍に現れており、 $\sigma_x \neq 0$ の結果が $\sigma_x = 0$ のそれより幾分大きな値を与えている。

図-5に被着体Aにスチール、被着体Bにアルミニウムの異種材料を用いた場合の本解析結果を示す。長手方向応力の考慮の有無の影響は同種材料のときと同様である。なお、図-4および図-5より同一の荷重のもとでは、最大となる応力の値は被着体の剛性が大きい場合であることがわかる。

3.2) 動的問題

以下に自由振動問題および動的応答問題の結果を示す。なお、接着層の剛性マトリックスには長手方向の応力 σ_x を考慮したマトリックスを用いた。

(1)自由振動問題

図-6は被着体AおよびBにスチールの同種材料を用いた場合、および被着体Aにスチール、被着体Bにアルミニウムの異種材料を用いた場合の1,2次固有周期(T_1, T_2)とそれに対応する固有モード図を示す。同種・異種接合のどちらも1次モードは曲げが支配的、2次モードは曲げと伸びが

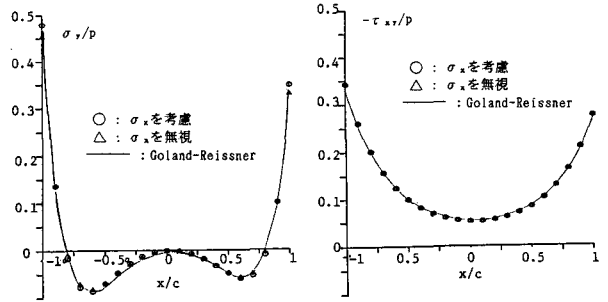


図-4 同種材料から成る場合の応力分布(静的問題)

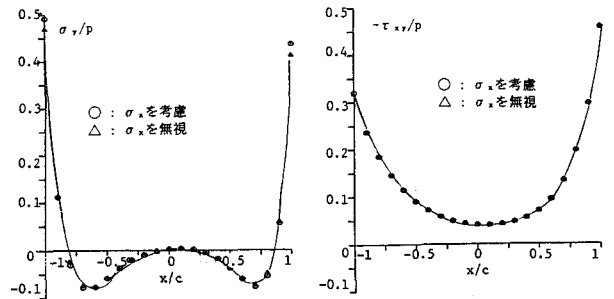


図-5 異種材料から成る場合の応力分布(静的問題)

連成した変形となっている。

(2) 動的応答問題

図-7 および図-8 はそれぞれ、被着体AおよびBにスチールを用いた場合および被着体Aにスチール、Bにアルミニウムを用いた場合について、接着層の両端'a'(荷重端側)と'b'(固定端側)における垂直応力 σ_y とせん断応力 τ_{xy} の時間応答曲線を示したものである。各図とも、縦軸は図-4と図-5に示した静的解析の結果で基準化し、基本固有周期(T_1)の0.6倍の時間帯について示した。これによれば各応力の応答曲線はほぼ類似なものであるが、静的問題との大きな違いはピーク値を示す位置が逆になり、動的問題では着目点'b'(固定端側)となる。これは、固定端における反射波の影響と考えられる。

図-9 および図-10 はそれぞれ、被着体が同種材料からなる成る場合および異種材料からなる成る場合について、各応力が最大になったときの接着層内の応力分布を示したものである。これによれば、分布の形状は静的問題のそれに類似であり、接着層両端に著しい応力集中が認められる。

図-11 は、衝撃荷重の継続時間 t_0 と接合体の基本固有周期 T_1 との比 t_0/T_1 と動的増幅率D(動的最大応力/静的応力)の関係をプロットしたものである。動的増幅率は、 t_0/T_1 が0.5ないし1.5以上であればいずれの接合体に対してもほぼ一定値をとることがわかり、図中の実線で示すように、動的増幅率は、長方形インパルスを受ける非減衰1自由度構造物の応答スペクトルに類似なものとして近似的できる。

(a) Steel-Steelの場合



$$T_1 = 0.246 \times 10^{-3} \text{ sec}$$



$$T_1 = 0.725 \times 10^{-3} \text{ sec}$$

(b) Steel-Aluminumの場合



$$T_1 = 0.274 \times 10^{-3} \text{ sec}$$



$$T_1 = 0.765 \times 10^{-3} \text{ sec}$$

図-6 固有周期とモード

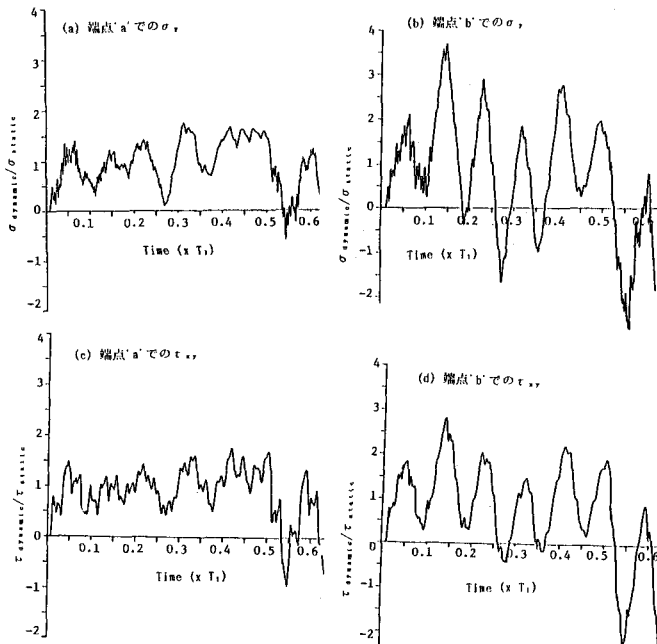


図-7 同種材料から成る場合の垂直応力 σ_y とせん断応力 τ_{xy} の時間応答曲線

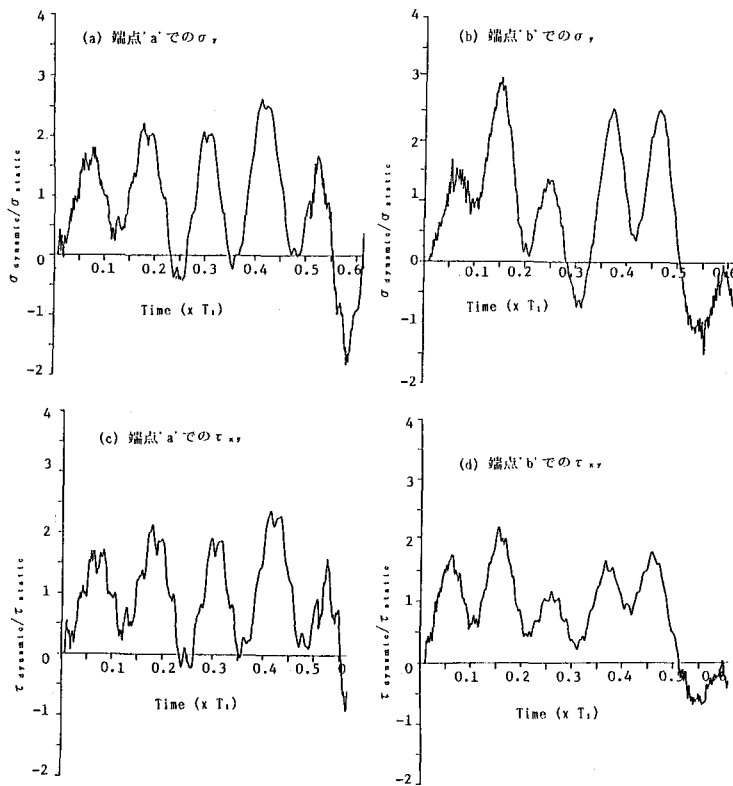


図-8 異種材料から成る場合の垂直応力 σ_y とせん断応力 τ_{xy} の時間応答曲線

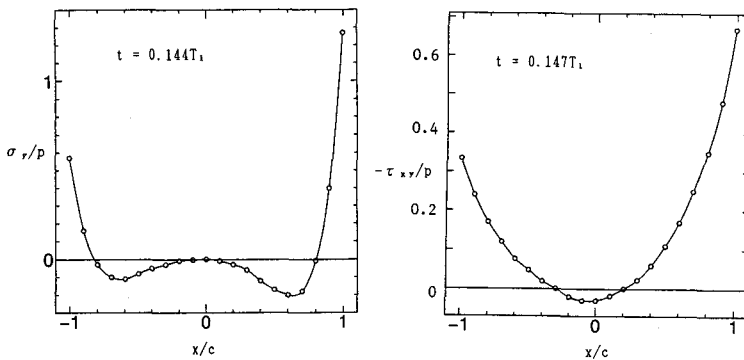


図-9 同種材料から成るときの接着層内の応力 (σ_y と τ_{xy}) 分布

4. まとめ

接着構造要素の解析手法として、接合要素と2次元有限要素法を用いた手法を提案し、衝撃荷重下の挙動の解明を目的に、その第一ステップとして弾性解析を単純重ね継手に対して行い、解析法の妥当性を確認するとともに、静的な場合に同様に継手の接着層端部で応力集中が生じることを示した。

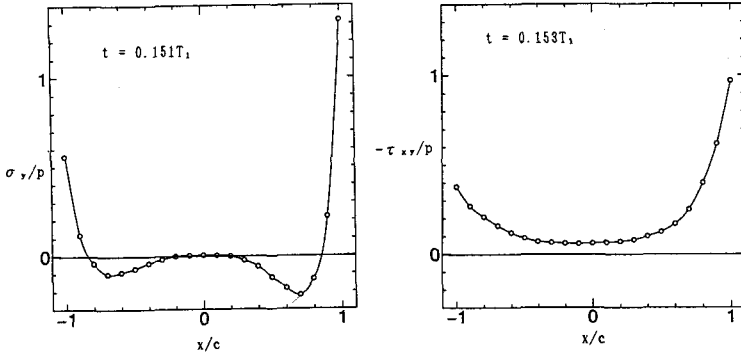


図-10 異種材料から成るときの接着層内の応力(σ_y と τ_{xy})分布

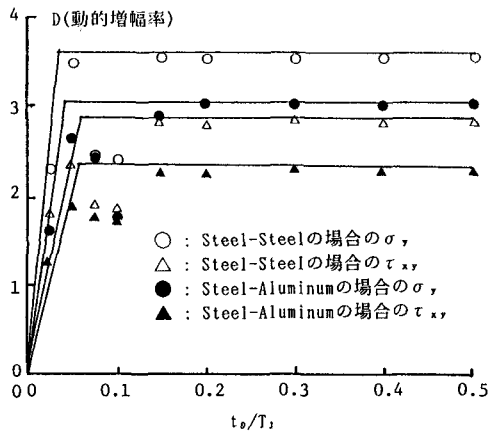


図-11 衝撃荷重の継続時間(t_0/T_1)と動的増幅率D(動的最大応力/静的応力)の関係

参考文献

- 1)Goland, M., Guffalo, N.Y. and Reissner, E.: The stresses in cemented joints, J. Appl. Mech., Vol. 66, p.A-17, 1944.
- 2)Cornell R.W.: Determination of stresses in cemented lap joints, J. Appl. Mech., Vol. 75, p. 355, 1953.
- 3)Richard, M.B. and Fritz, H.: Analysis of bonded joints in vehicular structures, AIAA J., Vol.11, p.1650, 1973.
- 4)尾田十八, 名雪哲夫: 接着構造解析の有限要素法とその応用, 日本機械学会論文集(A編), 第450号, p. 242, 昭和59年.
- 5)白鳥正樹, 森孝男: 金属-FRP接着継手の応力解析と設計への応用, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 第10巻, p. 313, 昭和61年.
- 6)Nagaraja, Y.R. and Alwar, R.S.: Viscoelastic analysis of an adhesive-bonded plane lap joint., Comput. Struct., Vol.11, P. 621, 1980.
- 7)ROY, S. and Reddy, J.N.: Finite-element models of viscoelasticity and diffusion in adhesively bonded joints., Int. J. Numr. Methods Eng., Vol.26, p.2531, 1988.
- 8)Hughes, T.J.R. and Liu, W.K.: Implicit-explicit finite elements in transient analysis, Stability theory, J. Appl. Mech., Vol. 45, p. 371, 1978.
- 9)Hughes, T.J.R. and Liu, W.K.: Implicit-explicit finite elements in transient analysis, Implimentation and numerical examples, J. Appl. Mech., Vol. 45, p. 375, 1978.