表面波による重ね合せ接着継手のき裂進展評価*

水口 義久^{*1}, 山野 孝寛^{*2}, 斎藤 修^{*3}Crack Growth Evaluation on Lap Adhesive Joints
Using Surface Wave

Yoshihisa MINAKUCHI, Takahiro YAMANO and Osamu SAITOH

The crack growth behavior on the lap joints with various adhesive thicknesses was investigated by the echo characteristics of surface wave emitted toward the adhesive layer under shearing forces. The echo height reflected from the edge of adhesive layer and the round-trip propagation time from the surface wave probe to the adhesive layer were measured for evaluating the crack growth behavior. The crack was generated along the adhesive interface when the ratio of the round-trip propagation time suddenly increased. After that, the crack rapidly grew. In the case where the distance between the surface wave probe and the adhesive layer was 10 mm, the crack of the adhesive layer was able to detect when the ratio of the round-trip propagation time became about 1% and the ratio of echo height reflected from the edge of adhesive layer became about 60%. Moreover, the shearing stress of crack generation was about 52% of the shearing strength.

Key Words: Ultrasonic Inspection, Surface Wave, Lap Adhesive Joint, Crack Growth, Adhesive Layer, Fracture Mechanics, Echo Height, Shearing Strength

1. 結 言

接着結合法は、高機能接着剤の出現と接着技術の進歩により、様々な産業分野で広く適用されるようになってきている。しかし接着結合法の接着強度、信頼性および耐久性は必ずしも正確に評価されておらず、ボルトやリベット等の機械的結合法に比べて信頼性や耐久性に欠けるなどの問題もある。接着結合法は異種材料間の結合が容易で、軽量化がはかれるなど多くの利点があるため、接着層や接着界面の状態が接着強度に及ぼす影響を非破壊的に評価できるようになれば、さらに接着結合の信頼性向上につながる。

接着継手の接着強度に関する応力解析は、これまでに接着継手の強度評価⁽¹⁾、き裂の弾塑性解析⁽²⁾および界面き裂の応力拡大係数の解析⁽³⁾など、種々の研究が行

われている。一方、接着継手の非破壊評価法として、超音波による接着不良の検出⁽⁴⁾、インパルス応答手法による接着結合の欠陥や強度の評価⁽⁵⁾、超音波による接着・はく離の評価⁽⁶⁾⁽⁷⁾などがある。しかし、接着継手に引張せん断荷重が作用したとき、接着界面にき裂が発生し、進展していく過程は実験的に明らかにされていないようである。

そこで本研究では、上述の問題を解明するため、接着層厚さが異なる重ね合せ接着継手を用い、まずこれらの接着部の健全性を超音波探査映像装置を用いて確認した。次に、これらの接着継手が破壊するまで引張せん断荷重を作用させながら、同時に継手上に取り付けられた表面波探触子から接着層に向けて表面波を入射させた。このとき得られた接着層前部からのエコー特性を利用し、探触子先端から接着層前部までの往復伝搬時間、および接着層前部からのエコー高さを測定した。これらの測定結果より、接着界面に発生するき裂発生時のせん断応力の大きさ、き裂の進展挙動および接着継手のせん断強さを調べた。さらに、接着層厚さがき裂発生時のせん断応力およびせん断強さに及ぼす影響についても調べた。

* 1996 年 9 月 21 日 第 74 期全国大会講演会において講演、原稿受付 1997 年 3 月 17 日。

*¹ 正員、山梨大学工学部(☎400 8511 甲府市武田 4-3-11)。

*² 山梨大学大学院。

*³ 正員、山梨県工業技術センター(☎400 0055 甲府市大津町 2094)。

2. 実験方法

2・1 重ね合せ接着継手の形状及び製作法 本実験で用いた重ね合せ接着継手は、図1に示すように、長さ110mm、幅19mm、厚さ8mmの平板（SS41材）の全面に研削加工を施したものを被着体とした。なお、接着面の表面粗さは約 $0.6 \sim 2.5 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ の精度に加工した。接着には一液中温硬化型エポキシ樹脂系接着剤（セメダイン（株）、EP-108型）を用いた。接着面積は $19 \times 20\text{mm}^2$ とし、接着層の厚さが一定となるように被着体を固定し、加熱装置により 60°C で6時間加熱後、 110°C で2時間かけ硬化させた。接着部からはみ出した接着剤は、接着端面が直角になるようにカッターを用いて取り除いた。なお、接着継手は接着層厚さ t が $40 \sim 154 \mu\text{m}$ の範囲で数十個製作した。

2・2 接着層の健全性評価 接着層内が不健全（空孔や介在物が含まれている）な場合、重ね合せ接着継手に発生するき裂の進展挙動や接着強度を正確に評価することができなくなる。そこで、超音波探査映像装置（日立建機（株）、AT7000型）を用い、あらかじめ重ね合せ接着継手の接着層の健全性を水浸法を用いて調べた。

具体的には、図1に示した接着継手を水槽内に設置し、振動周波数が15MHzで焦点距離が25mmの焦点形探触子を用い、接着界面に焦点を合わせて超音波を入射

Fig.1 Shape of adhesive lap joint.

Fig.2 Echo behavior reflected from an adhesive interface by ultrasonic scanning image device.

させた。その後、接着界面からのエコー波形にゲートをかけ接着層全体を走査した。図2は測定された各境界面からのエコー挙動の様子を示す。図中の①は焦点形探触子のインシヤルパルスを、②は鋼板IIの上面からのエコーを、③は接着界面からのエコーを示す。この場合、接着層が不健全（破線）であるときは、接着層が健全（実線）であるときに比べてエコー強度が大きくなりCRT上で白く表示される。

図3(a),(b)は接着層厚さ t が $78 \mu\text{m}$ 、 $127 \mu\text{m}$ の接着継手について、接着層全体を走査したときのエコー強度の例を示す。接着層端面付近のエコー強度は、すこし白く表示されているが、この部分を除いた接着層のエコー強度は、ほぼ同色で良好な接着が行われていることが分かる。接着層端面付近は接着層内側に比べて音波の入射状態が異なり接着層の健全性を正確に評価することはできない。しかし、本実験で用いた接着継手は、接着剤を接着層からはみ出すほど塗布し硬化させているため、接着層端面付近は接着層の中央部と同等な接着状態となっていると考えられる。従って、図3に示されたような接着層端部は健全な接着が行われていると見なし、これらの試験片を使用した。

2・3 往復伝搬時間の変化率によるき裂進展測定法 図4は、重ね合せ接着継手の引張装置とエコー波形取り込みの概略図を示す。重ね合せ接着継手は、平板両端にあいている直径8mmの穴にピンを通して滑節支持され、接着層を軸中心としてせん断荷重 W が加えられるように引張装置に取り付けられている。また、一方の平板上には表面波探触子（振動周波数5MHz、振動子寸法 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ）を探触子先端から接着層前部までの距離が10mmとなる位置に取り付けた。なお、表面波探触子はエコーが安定して得られるように、一定圧で圧着した。表面波探触子から表面波が幅10mmで接着層に向け入射されて得られた表面波エコーはパルサーレシーバーに送られた後、A/D変換されてパーソナ

Fig.3 Ultrasonic scanning images on the adhesive interface of different thicknesses.

ルコンピュータのディスプレイ上に表示される。なお、接着層前部からのエコー高さは接着層に幅 10mm で入射された表面波の平均反射波音圧として与えられる。

接着継手の引張実験では、まず平板の表面波音速である $V_1 = 2920\text{m/s}$ に設定後、10 秒間隔で 0 N から 490 N 毎、接着層が破壊するまで接着継手にせん断荷重 W を作用させながら、そのつど接着層前部からのエコー位

Fig.4 Schematic diagram of measuring equipment.

Fig.5 Echo conditions of surface wave.

置とエコー高さの測定を行った。このときのせん断荷重の大きさは、ロードセル（株）東京測器研究所、TCLU-5A 型）により測定した。一方、エコー位置は、エコー波形のピーク位置を用い、 $0.005 \mu\text{s}$ の分解能で測定した。

図 5 は、接着継手の平板上から表面波を入射したときの探触子先端、接着層前部からのエコー波形の様子を示す。図中の I.P. はイニシャルパルス、 h_0 , h_1 , h_1' はそれぞれ探触子先端、無負荷時の接着層前部、負荷時の接着層前部（き裂が進展したときはき裂先端）で反射したエコー高さを、 T_1 , T_1' はそれぞれ探触子先端から無負荷時の接着層前部、探触子先端から負荷時の接着層前部までの往復伝搬時間を示す。また、 l_1 , Δl_1 はそれぞれ探触子先端から接着層前部までの長さおよびき裂進展長さを示す。図より、 l_1 は鋼板の表面波音速を V_1 とすれば次式で与えられる。

$$l_1 = V_1 \times \frac{T_1}{2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

以上の測定より、接着層厚さが異なる接着継手について、往復伝搬時間の変化率 $\Delta T_1/T_1$ を算出し、 $\Delta T_1/T_1$ と接着界面に発生するき裂発生時のせん断応力 τ_g 、接着継手のせん断強さ τ_s 、 τ_g/τ_s との関係を検討した。なお往復伝搬時間の変化率 $\Delta T_1/T_1$ は、無負荷時の往復伝搬時間 T_1 と負荷時の往復伝搬時間 T_1' より次式で与えられる。

$$\frac{\Delta T_1}{T_1} = \frac{(T_1' - T_1)}{T_1} \times 100 \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (2)$$

2・4 エコー高さ比によるき裂進展測定法 接着継手にせん断荷重を加えていくと、接着層前部からのエコー高さが減少することに着目した。そこで、接着層厚さが異なる接着継手について、式(3)に示す接着層前部の負荷時のエコー高さ h_1' と無負荷時の接着層前部からのエコー高さ h_1 との比 h_1'/h_1 を測定した。そして、この値とき裂進展挙動との関係を調べた。

$$\frac{h_1'}{h_1} \times 100 \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (3)$$

3. 実験結果

3・1 往復伝搬時間の変化率によるき裂進展測定

図 6 は接着層厚さ t が $102 \mu\text{m}$ の接着継手において、せん断荷重 W が 0, 1960, 6370 N であったときの探触子先端と接着層前部からのエコー波形の様子を示す。図より、探触子先端からのエコー位置およびエコー高さ

h_0 は荷重が増加しても変化しないのに対し、接着継手が無負荷時の探触子先端から接着層前部までの距離 l_1 は 10mm であるが、負荷時の探触子先端から接着層前部のき裂先端までの距離 l_1' ($=l_1 + \Delta l_1$) はせん断荷重 W の増加とともに大きくなり、接着層前部におけるエコー高さ h_1' は小さくなることからわかる。

Fig. 6 Echo conditions reflected from probe and crack when the load W changed. (Adhesive layer thickness $t=102\text{ }\mu\text{m}$)

図 7~9 は、接着層厚さ t が 68, 75, 140 μm の接着継手における、せん断応力 τ に対する往復伝搬時間変化率 $\Delta T_1/T_1$ とエコー高さ比 h_1'/h_1 の測定結果をそれぞれ $\circ$ と $\triangle$ 印で示す。なお、せん断応力 τ はせん断荷重 W を見掛けの接着面積 ($19 \times 20\text{mm}^2$) で除した値を用いた。図中における $\Delta T_1/T_1$ の値はせん断応力 τ がある大きくなるまでほとんど変化が見られないが、 τ がそれぞれ約 19MPa, 18MPa, 18MPa を境にして急激に増加している。これは接着層前部にき裂が発生し、その後表面波がき裂先端部分で反射し、 $\Delta T_1/T_1$ がそのき裂進

Fig. 8 Relationships of ratios of round-trip propagation time and echo height to shearing stress. (Adhesive layer thickness $t=75\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 7 Relationships of ratios of round-trip propagation time and echo height to shearing stress. (Adhesive layer thickness $t=68\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 9 Relationships of ratios of round-trip propagation time and echo height to shearing stress. (Adhesive layer thickness $t=140\text{ }\mu\text{m}$)

展量に応じて増加するためである。 $\Delta T_1/T_1$ が大きな変化をする以前のせん断応力では、 $\Delta T_1/T_1$ は l_1 部分の平板が伸びてわずかに増加していると考えられる。従って、き裂が発生すると $\Delta T_1/T_1$ の値が急激に変化するの、その時の応力値をき裂発生時のせん断応力と見なした。また、図 7~9 の接着継手のせん断強さ ($=W/19 \times 20 \text{ mm}^2$) はそれぞれ約 34 MPa, 32 MPa, 32 MPa であり、き裂発生時のせん断応力はそれぞれせん断強さの約 56%, 56%, 56% に相当していることがわかった。

図 10 は接着層厚さ t が異なる接着継手について、往復伝搬時間変化率 $\Delta T_1/T_1$ の変化より検出されたき裂発生時のせん断応力 τ_g 及び接着継手のせん断強さ τ_s を示す。図中の実線は各データにおける最小 2 乗値を示す。図より、 t が 40~154 μm の範囲における τ_g , τ_s は、それぞれ約 17 MPa, 32 MPa とほぼ一定であり、接着層厚さの影響をほとんど受けないことがわかった。

図 11 は、図 10 の実験結果を基に接着層厚さ t とき裂発生時のせん断応力 τ_g / 接着継手のせん断強さ τ_s との関係を示す。図より、 τ_g / τ_s は接着層厚さが 40~154 μm の範囲において、約 52% とほぼ一定であることがわかった。

Fig.10 Relationships of shearing stress of crack generation and shearing strength to adhesive layer thickness.

Fig.11 Relation between ratio of shearing stress of crack generation to shearing strength and adhesive layer thickness.

図 12 は接着層厚さ t が異なる接着継手について、せん断荷重 W を 490 N 毎に加えていった時に往復伝搬時間変化率 $\Delta T_1/T_1$ が急激に変化した値、すなわち接着層にき裂が発生したと見なせた $\Delta T_1/T_1$ の値を示している。図より、荷重間隔が 490 N と大きいためにき裂の検出範囲はばらついているが、接着層のき裂は $\Delta T_1/T_1$ の値が約 1 % 以上になった時に発生すると予測された。

3・2 エコー高さ比によるき裂進展測定 図 7~9 中の Δ 印は、せん断応力 τ に対するエコー高さ比 h_1'/h_1 の実験結果を示す。 h_1'/h_1 はせん断応力が大きくなるにつれて徐々に小さくなっていき、あるせん断応力を境に急に減少した後複雑な挙動を示している。エコー高さが減少していく理由は、せん断応力が大きくなるにつれて接着層前部で徐々に局部的なき裂が発生することからエコー高さ比は徐々に減少し、さらに接着層のき裂が大きく進展していくとき裂面の凹凸が大きくなり、接着層前部からのエコー強さが急激に低下するためであると考えられる。図 7~9 より、 h_1'/h_1 が約 60% 以下になると h_1'/h_1 は急激に減少する挙動を示している。この変化より検出されたき裂発生時のせん断応力値 τ_{ge} は、 $\Delta T_1/T_1$ が急に大きな変化をするせん

Fig.12 Relation between ratio of round-trip propagation time when the crack was detected and adhesive layer thickness.

Fig.13 Relationships of shearing stresses of crack generation detected by $\Delta T_1/T_1$ and h_1'/h_1 to adhesive layer thickness.

断応力値 τ_g とほぼ一致していることがわかった。

図 13 中の●印は、接着層厚さ t が異なる接着継手において、 h_1'/h_1 が 60% になったときにき裂が発生したと見なしたときのせん断応力 τ_{ge} を、破線はこれらのデータにおける最小 2 乗値を示す。○印は図 10 で示した○印と同じ値で、 $\Delta T_1/T_1$ の変化より検出されたき裂発生時のせん断応力 τ_g を、実線はこれらのデータにおける最小 2 乗値を示す。両結果はよく一致したことから、 h_1'/h_1 が約 60% 以下になったとき、接着層にき裂が発生すると予測できることがわかった。

3・3 接着継手における破断面状態 図 14 は接着層厚さ t が 58, 71, 120 μm の接着継手の破断面状態を示す。 t が小さいとき接着層は凝集破壊し、 t が大きくなるにつれて界面破壊する傾向にあることがわかった。図より、接着層の破断境界面は一様ではなくかなり凹凸があることがわかる。従って、接着層のき裂面に表面波を入射させたときに得られるき裂面からのエコー強さは、き裂が発生していないときよりかなり減少することが考えられる。

4. 結 言

一液中温硬化型エポキシ樹脂系接着剤（セメダイン（株）EP-108 型）を用いた接着層厚さが異なる重ね合せ接着継手について、まず接着部の健全性を超音波探査映像装置を用いて確認した。次に、重ね合せ接着継

手上に接着層前面から 10mm 離れた位置に表面波探触子を取り付けた後、接着継手に引張せん断荷重を加えていきながら、接着層に向けて表面波を入射させた。このとき得られた接着層前部からのエコー特性より、接着層厚さが 40~154 μm の範囲の重ね合せ接着継手についてき裂進展評価を行った。本実験で得られた結論は次のとおりである。

(1) 重ね合せ接着継手に発生するき裂進展挙動は、探触子先端から接着層前部までの往復伝搬時間の変化率を測定することにより評価できる。

(2) き裂発生時のせん断応力は約 17MPa 及びせん断強さは約 32MPa であり、接着強度は接着層厚さに関係なくほぼ一定である。

(3) き裂の発生時のせん断応力はせん断強さの約 52% である。

(4) 接着層のき裂は、探触子先端から接着層前部までの往復伝搬時間の変化率が約 1% 以上になると発生する。

(5) 接着層のき裂は、接着層前部の負荷時と無負荷時のエコー高さ比が約 60% 以下になったときに発生する。

(6) 接着層の破断面は、接着層が薄いとき凝集破壊し、接着層が厚くなると界面破壊する傾向にある。

文 献

- (1) 服部, 応力特異場パラメータを用いた接着継手の強度評価, 機論, 56-523, A (1990), 618-623.
- (2) 池田・山下・宮崎, 接着継手中のき裂の弾塑性解析 (接着剤厚みが破壊靱性値に及ぼす影響の評価), 機論, 62-602, A (1996), 2200-2206.
- (3) 池田・宮崎・山下・宗像, 境界要素法と有限要素法の結合解法による接着継手中の界面き裂の応力拡大係数解析, 機論, 60-578, A (1994), 2220-2227.
- (4) McRae, K. I., Deconvolution Techniques for Ultrasonic Imaging of Adhesive Joints, Materials Evaluation, 48-11 (1990), 1380-1384.
- (5) Srivatsan, T. S., ほか 4 名, Electromagnetic Measurement of Damping Capacity to Detect Damage in Adhesively Bonded Material, Materials Evaluation, 47-5 (1989), 564-570.
- (6) 野中・下平・早川, 超音波による接着・はく離の非破壊評価, 機論, 58-546, C (1992), 431-438.
- (7) 坂・関口・阿部, 異種材界面微小領域の反射波形に基づく超音波探査映像, 非破壊検査, 41-3 (1992), 144-150.

Fig.14 Rupture conditions of adhesive joints.