

II-5 カイザー効果を用いたシングル・ラップ接着継手の強度評価

○春名一志¹, 寺本和良¹
原賀康介¹, 月館隆二²

Strength Evaluation of Single-lap Adhesively Bonded Joints
using Kaiser Effects

Kazushi Haruna¹, Kazuyoshi Teramoto¹, Kosuke Haraga¹ and Ryuji Tsukidate²

概要

接着剤の強度特性評価法としてシングル・ラップ接着継手の静的引張試験が一般的であり、得られた最終破壊荷重を接着強度とすることが多い。しかし、最終破壊以前から、継手内部での微小破壊の発生、進展が生じていると考えられ、最終破壊荷重を継手性能とした設計は危険側であると考えられる。本研究では、2種類のエポキシ系接着剤を用いたシングル・ラップ接着継手の負荷-除荷試験からカイザー効果を評価し、致命的破壊がなく、継手の健全性が保持された荷重値の測定を行なった。その結果、カイザー効果が接着継手にも成立し、フェリシティー比により、健全性を維持し得る実用的な強度値の測定が可能であることを明らかにした。

キーワード: Kaiser Effect, Felicity Ratio, Loading-Unloading Test, Adhesive Strength

1. まえがき

接着継手の性能評価として、シングル・ラップ接着継手の引張試験が広く適用されており、得られた最終破壊荷重を継手の性能として設計に適用する機会が多い。しかし、最終破壊に至る以前から継手内部で微小破壊が生じ、最終破壊荷重を継手の性能とした設計は危険側であると考えられる。材料内部の微小破壊の発生や伝播を検出する手法としてアコースティック・エミッション(以下、AE)法が有効であるが、接着継手への適用例は少ない。カイザー効果^{1)~11)}の利用により、荷重履歴に対する健全性を評価できるのもAE法の利点の一つであるが、接着継手への適用はほとんどない。しかし、接着継手においてカイザー効果の成立が確認できれば、カイザー効果を利用した負荷-除荷繰り返し試験により、継手内部で生じる微小破壊が継手性能に及ぼす影響を評価でき、最終破壊荷重ではなく、健全な状態で継手を使用し得る荷重を知ることができると考えられる。

本研究では、2種類のエポキシ系接着剤を用いたアルミシングル・ラップ継手の負荷-除荷繰り返し試験を行ない、カイザー効果の成立性を調べた。接着剤はカタログ上室温硬化型を用いたが、後加熱による後硬化の効果に対しても同様の評価を行なった

¹ 三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8丁目1番1号 Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation, 1-1, 8 Chome, Tsukaguchi Honmachi, Amagasaki, Hyogo, 661-8661

² 三菱電機株式会社 鎌倉製作所 〒247-8520 神奈川県鎌倉市上町屋325番地 Kamakura Works, Mitsubishi Electric Corporation, 325, Kamimachiya, Kamakura, Kanagawa, 247-8520

2. 試験片および試験方法

図1に試験片形状を示す。形状はJIS K-6850に準じた。用いた材料および接着条件を表1に示す。接着剤は、強度、剛性が同レベルで、カタログ上室温硬化型とされている2液混合型エポキシ系接着剤2種類(接着剤A, Bとする)を用いた。接着膜厚は、

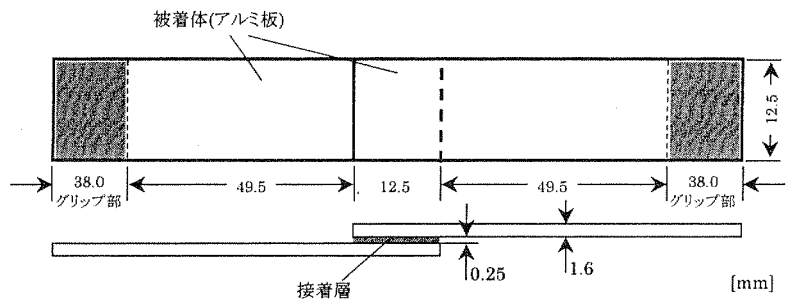


図1 用いた試験片形状

$\phi 250\mu\text{m}$ のワイヤーをスペーサとすることにより制御した。試験片は、接着後、クリップ固定した状態で7日間室温にて養生した。本研究では、室温硬化のみの場合との比較として、後硬化を行なったサンプルも作製した。接着剤A,Bの後硬化条件は、それぞれ、 $80^\circ\text{C}/4$ 時間、 $100^\circ\text{C}/4$ 時間とした。

用いたAE測定系のブロック線図を図2に示す。AE解析装置、AE変換子は、それぞれAE Tester 9501(NF回路設計ブロック)、AE-900S-WB(広帯域型、NF回路設計ブロック)を用いた。AE変換子は、圧電素子側にシリコングリスを塗布した後、ビニールテープで圧着、固定した。出力であるAEカウント・レートは、A/D変換後、パソコンに取り込んだ。

負荷－除荷繰り返し試験は、万能試験機UTM-10T(A&D)を用い、図3に示すような負荷－除荷を荷重制御で行なった(クロスヘッドスピード: $1\text{mm}/\text{min}$.)。先行荷重は、一回目を 1.5kN とし、以後、 0.5kN 間隔に荷重を上げ、継手が破壊するまで行なった。また、継手に圧縮荷重が負荷されることを避けるため、除荷時の最低荷重は、 0.5kN とした。

表1 用いた材料リスト

被着体
アルミ A2024-T3 1.6mm厚
表面処理: #240サンディング, 溶剤洗浄, クロム酸処理
接着剤A
2液混合型(100:26)室温硬化型エポキシ系接着剤
硬化物弾性率(室温): 5.4GPa
アルミ シングル・ラップ接着継手強度(室温): 13.6MPa
接着剤B
2液混合型(100:50)室温硬化型エポキシ系接着剤
硬化物弾性率(室温): 4.5GPa
アルミ シングル・ラップ接着継手強度(室温): 12.7MPa

3. 負荷－除荷繰り返し試験結果

図4に試験結果の一例を示す。カイザー効果¹⁾⁻¹¹⁾は、内部クラックの連結などの作用を受けて、内部構造が不安定な状態に近づけば成立しないが、それ以前の載荷履歴に対しては、先行荷重を越えた荷重レベルまで載荷されなければAEが検出されないという現象である。この現象は、

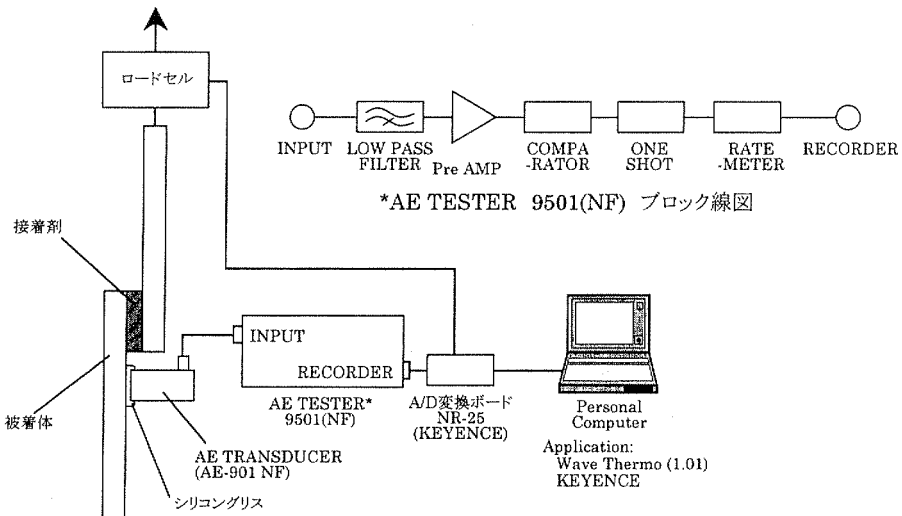


図2 用いたAE測定系のブロック線図

カイザーにより金属材料で発見され⁴⁾、コンクリートではRushらの研究⁵⁾、岩石ではGoodmanらの研究⁶⁾でも観察されている。接着継手では、事例がほとんどないが、8回の載荷までカイザー効果が観察され、接着継手でもカイザー効果が成立するといえる(図4)。

カイザー効果は、フェリシティー比^{7)~9)}と呼ばれるパラメータで評価されるようになっており、先行荷重

を L_m 、載荷中、AEが頻発し始めた荷重を L_f としたとき、 L_f の L_m に対する比としてあらわされる(図5)。すなわちカイザー効果が成立する荷重レベルでは、フェリシティー比が1以上となる。カイザー効果は、巨視的にみて、クラックが進展する際には、先行荷重を越えるレベルから再進展がみられることを意味している。したがって、材料内部で生じた微小破壊が、材料や構造に及ぼす影響が少なく、安定している場合には、フェリシティー比が1以上となり、致命的な損傷を与えた場合には、フェリシティー比が1以下となるといえる。このことから、フェリシティー比は、健全性評価の指標することができ、FRP容器ではASME、ASTMで規格化されている^{8)~11)}。

図4に示したような結果から、フェリシティー比を求めた結果を図6に示す。本試験の場合、AEが全く測定されない際には、前回の L_m と今回の L_m の比がフェリシティー比の最大値となり、本試験の上限となる。荷重が増加するにつれ、フェリシティー比が低下する傾向にあり、負荷レベルの上昇により、健全性が低下していくのがわかる。しかし、フェリシティー比1を健全なレベルとすると、破壊荷重直前まで、おおむね健全な状態であることがわかる。室温硬化品の -40°C 環境下(図6(a))では、接着剤Bの方が、健全性の低下が大きいとともに健全性を維持し得る最大荷重が低いことがわかるが、後硬化によって、接着剤A相当に向上できることがわかる(図6(b))。図6(c),(d)に示した

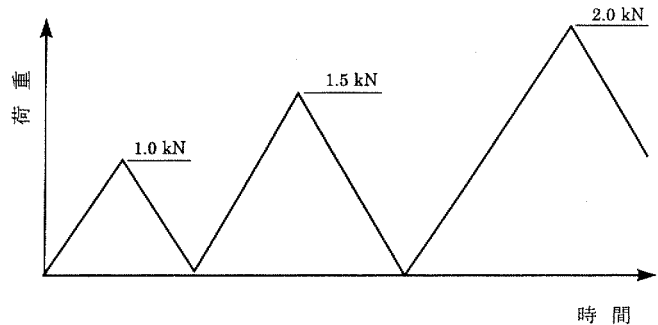


図3 負荷-除荷繰り返し試験の条件

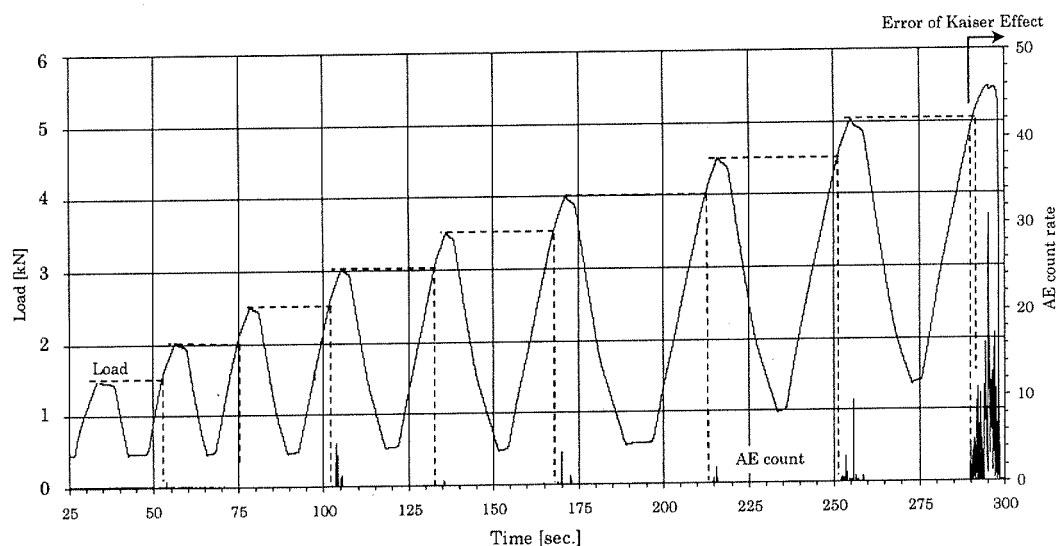


図4 負荷-除荷重繰り返し試験に伴うAEの発生時間推移

60℃環境下での試験結果でも同様のことがいえる。このことから、接着剤Bは、カタログ上、室温硬化型接着剤となっているが、室温のみの養生では、未硬化分が残り、接着剤Aより信頼性(健全性や強度)が低い、後硬化により未硬化分を硬化させ、接着剤A相当に向上できると考えられる。図7に、最終破壊荷重(Pmaxとする)とフェリシティー比が1以上のレベルを維持し得る最大荷重(Pkと

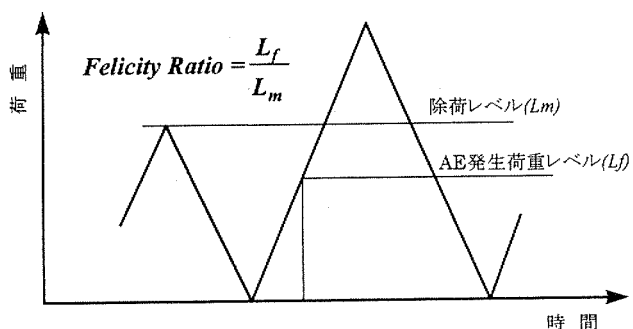


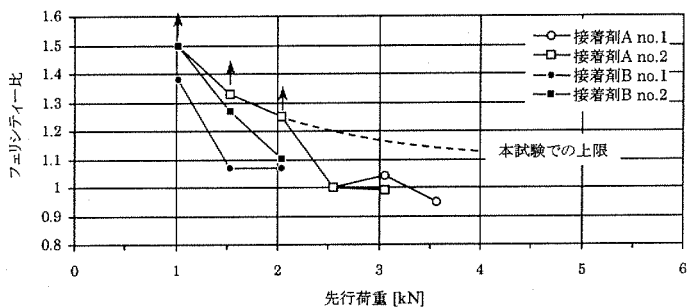
図5 フェリシティー比の定義

を示す。傾向は同様であるが、PmaxとPkは値が異なっている。Pmaxのレベルでは健全性が崩れていることから、先述のようにPmaxを継手性能とした設計は危険側であるといえる。一方、Pkは健全性を維持し得る最大荷重であることをカイザー効果の成立性から確認できており、対象とする継手の耐荷性能として設計に適用できると考えられる。

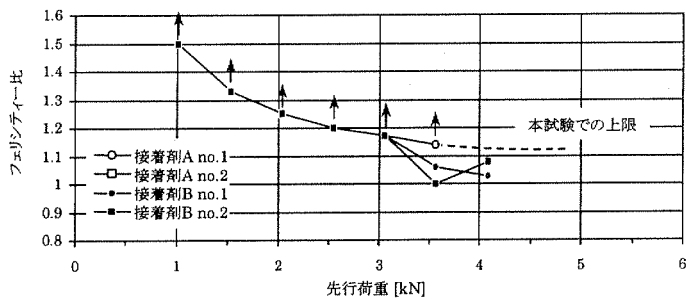
3. あとがき

本試験の結果、得られた知見を以下に示す。

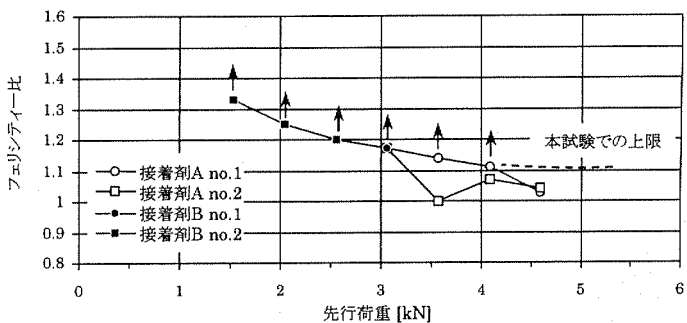
- 1) 接着継手においてもカイザー効果が観察される。
- 2) 負荷-除荷繰り返し試験におけるカイザー効果の成立性をフェリシティー比で評価でき、接着剤の優劣を評価できる。
- 3) フェリシティー比が1以上である最大荷重値を新たに定義することにより、より信頼性の高い接着継手の強度評価、設計が可能となる。



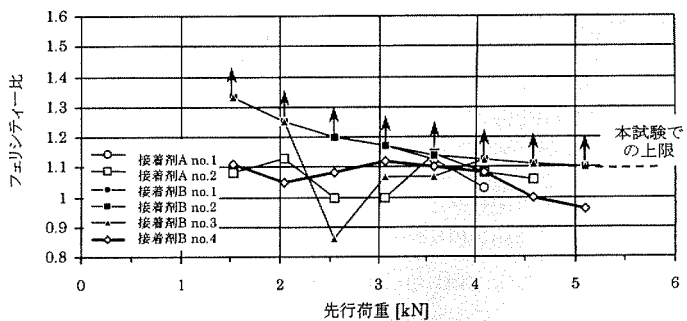
(a) -40°C環境下 ~室温硬化のみの場合~



(b) -40°C環境下 ~室温硬化+後硬化の場合~



(c) +60°C環境下 ~室温硬化のみの場合~



(d) +60°C環境下 ~室温硬化+後硬化の場合~

図6 負荷-除荷繰り返し試験時のAE測定より求めたフェリシティー比

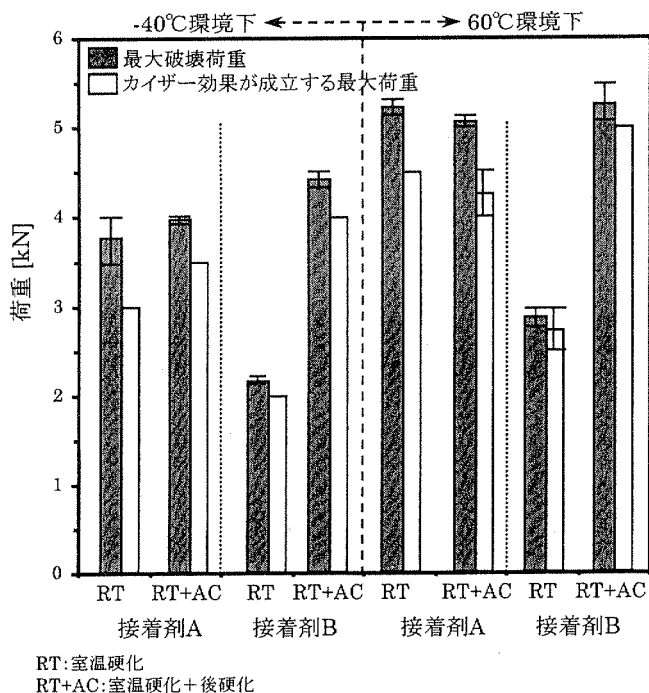


図7 最大破壊荷重とカイザー効果が成立する最大荷重

参考文献

- 1) 西本, 今中, 工業材料, Vol.41, No.11, 118(1993).
- 2) 今中, 佐野, 清水, 日本金属学会会報, Vol.12, 871(1973).
- 3) 新・非破壊検査便覧, (社)日本非破壊検査協会編, 日刊工業新聞社 (1992).
- 4) Kaiser, V. J., Arkiv fur das Eisenhüttenwesen, Vol.24, 43(1953).
- 5) Rusch, V. H., Zement-Kalk-Gips, Vol.1, 1(1959).
- 6) Goodman, R. E., Geological Society America Bulletin, Vol.74, , 487(1963).
- 7) Fowler, T. J., Progress in Acoustic Emission III, The Japanese Society of NDI, 150(1986).
- 8) CARP/Adams, C. H., Prepr. 37th Ann. CnFR.cin, Plas./Compos. Inst. SPI. Inc., Sec.27-A (1982).
- 9) Drodge, M. Proc. 1st Intern. Conf. on Acoustic Emission form Reinforced Composites, SPI, Inc., Sess.4(1983).
- 10) Acoustic Emission Examination of Fiber Reinforced Plastics Vessels, ASME Section-1 (1955).
- 11) Recommended Practice for Acoustic Emission Testing of Fiberglass Tank/Ve-ssel, SPI/CARP (1984).