接着した箱型断面部材の疲労強度評価* (ねじりを受ける場合)

書 上 正*¹, 富 岡 昇*²
新 澤 順 悦*², 北 川 英 夫*²

Evaluation of Fatigue Strength of Adhesive-Bonded Box Section Beams

Masashi KAKIAGE, Noboru TOMIOKA,
Jyunetu NIISAWA and Hideo KITAGAWA

Fatigue tests on adhesive-bonded box section beams under torsion, which are typical members of an automobile body structure, were carried out. Using the finite element three-dimensional elastostatic analysis, the stress intensity factor for interface crack was analyzed and the results of fatigue tests were tried to be arranged by the stress intensity factor range ΔK_{III} . Judging from the above, we conclude that it is possible uniformly evaluate the torsional fatigue strength of this beam by using ΔK_{III} .

Key Words: Adhesive Joints, Finite Element Analysis, Stress Intensity Factor, Fracture Mechanics, Interface Crack, Fatigue Strength

1. 緒 言

地球環境問題、省エネルギー問題から、自動車車体構造の軽量化による燃費向上が求められている。この軽量化は、強度、剛性、安全性等を損なわないで、むしろ向上させる方向に進めなければならない技術課題である。接着は、従来のスポット溶接に比べ、疲労強度、剛性の向上が計れる可能性があり、軽量化に寄与できうることから、車体構造への採用が期待されている^{1), 2)}。その実用化に際しては、引張せん断やT字形引張のような単純な継手試験片レベル^{3), 4)}に加え、実構造部材に近い部材レベルでの疲労試験を実施し、疲労強度特性を把握することが必要である。また、各種接着継手の疲労強度を統一的に評価できる手法の確立が強く望まれている。

接着継手の応力解析に基づく強度評価法については、森の解説⁵⁾に紹介されているように(1)局所応力に基づく方法、(2)特異応力係数を用いる方法、(3)破壊力学に基づく方法などが提案されているが、統一的評価法は確立されたとは言い難い。結城⁴⁾は、界面破壊力学に基づく評価法で引張せん断やT字形引張

など接着継手の疲労強度が統一的に評価できることを示し、この手法が接着継手の疲労強度の定量的評価法として有効であることを報告している。著者ら³⁾も各種接着継手の疲労強度を破壊力学に基づいて評価し、同様の結果を得ている。

本研究では、破壊力学に基づく評価法の実構造への適用の可能性を探るため、車体構造のモデル部材である接着した箱型断面部材のねじり疲労試験を行い、疲労強度に及ぼす板厚、隔壁、断面の大きさの影響を実験的に調べ、さらに、接着界面にき裂を想定し、その応力拡大係数を詳細なFEM三次元弾性解析により求め、界面破壊力学に基づく疲労強度評価について検討した。

2. 実 験 方 法

2.1 試験体及び作成方法 試験体材料は、板厚0.8と1.6mmの自動車用冷間圧延鋼板SPCEを用いた。その化学成分と機械的性質を表1に示す。使用した接着剤は構造用1液性エポキシ系で、その硬化後の材料特性を表2に示す。

表 1 試験体材料の化学成分と機械的性質

	Thickness (mm)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	N (%)	YF (MPa)	TS (MPa)	EL (%)
SPCE	0.8	0.05	0.02	0.23	0.017	0.014	0.036	0.0063	167	364	47
	1.6	0.05	0.02	0.22	0.013	0.013	0.034	0.0063	157	273	46

* 1994年11月10日 第7回計算力学講演会において講演、原稿受付 1995年5月24日。

*¹ 正員、日本大学大学院 (〒101 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)。

*² 正員、日本大学理工学部。

試験体は、図1に示すように、鋼板をハット形に加工し、その開口部を突き合わせフランジで接着した両ハット材（DHB）と、一枚の平板を挟んで三枚重ねで接着した隔壁付両ハット材（DHBP）の2種類の箱型断面部材である。疲労強度に及ぼす断面の大きさの影響を調べるため、フランジ幅 $d = 15 \text{ mm}$ 一定とし、断面寸法は、 $2a = 2b = 50$ および 35 mm とした。全長 L は、すべて 600 mm とした。

試験体には、試験機に取り付けるために、両端に厚さ 6 mm の端板をアーク溶接した。接着剤は、アーク溶接時の熱影響を避けるために、部材の両端から 30 mm 空けてフランジに塗布し、この両端部はスポット溶接とした。接着方法は、まず接着面をサンドペーパーで研磨後アセトンで洗浄し、乾いた脱脂綿で拭き取り、接着剤を塗布した。次に治具を用いて接着面を合わせ、フランジを固定し、電気炉で硬化処理を行った。硬化条件は、 $170^\circ\text{C} \times 40 \text{ 分}$ とし、硬化後常温で7

表 2 接着剤の材料特性

Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν
1	0.38

図 1 試験体

日間以上放置し実験に供した。接着厚は制御しなかったが、接着部の寸法を測定したところ、平均して 0.05 mm であった。

2. 2 疲労試験 疲労試験方法を図2に模式的に示す。疲労試験は変位制御式で、試験体の一端を固定し、他端をねじり中心から一定の位置を加振することによって試験体にねじりモーメントを負荷した。試験は、完全両振り ($R = -1$) で、試験速度は 25 Hz である。疲労寿命は、接着部が剥がれ、ねじりモーメントが設定値の $1/2$ に低下した時とした。

3. 実験結果

図3に、ねじり疲労試験結果をねじりモーメント範囲 ΔM_t - 破断寿命 N_f 図で示す。断面寸法 50 と 35 mm の疲労試験結果を比べると、両部材のフランジ接着面積は同じであるが、 35 mm の方が明らかに低い。箱型断面部材のねじり疲労強度に対する断面の大きさの影響が顕著に現れている。

図4は、疲労強度に及ぼす板厚と隔壁の影響を示す。図4(a)は、両ハット材を用いて板厚の影響を調べた結果である。板厚 0.8 より 1.6 mm の方が疲労

図 2 疲労試験の模式図

図 3 疲労試験結果

強度は高い傾向を示している。図4 (b)は隔壁の影響を示す。隔壁付両ハット材の疲労強度は、両ハット材に比べ高い傾向を示している。この疲労強度特性は前回用いた接着剤の場合⁶⁾と若干異なり、疲労強度特性は接着剤の種類によっても多少異なるようである。また、スポット溶接の場合⁷⁾と異なり、接着の場合、隔壁を導入しても疲労強度の低下は見られない。

以上のように、疲労強度に及ぼす影響因子は複雑、多様と思われ、これらの影響を統一的かつ定量的に評価する手法の確立が必要である。

4. 接着層の応力解析

接着した箱型断面部材の接着層の応力分布を求めるためにFEM三次元弾性解析を行った。図5に両ハット材の解析モデルを示す。部材の一端の全節点については全自由度を拘束し、他端にねじりモーメントを負荷した。接着層の応力分布は、ゆがみの拘束の影響を受ける端末近傍を除くと、部材長さ方向にはほぼ一定と考えられるので、ここでは、部材長を100mmとした。フランジ接着部は、板と接着層とも各一層分割、

幅方向には16分割、長さ方向に50分割した。用いた要素は、板と接着層とも8節点ソリッド要素である。要素数は9,800である。

接着層の応力解析結果の一例を図6に示す。これは、ゆがみの拘束の影響を受けない部分での、フランジ幅方向の応力分布を示す。せん断応力 τ_{xz} は、フランジ内縁部(以下接着端部と呼ぶ)で大きく、幅方向には急激に減少してほぼ零になる。他の応力成分は接着層

図 5 部材解析モデル (DHB)

(a) 板厚の影響

(b) 隔壁の影響

図 4 疲労強度に及ぼす板厚、隔壁の影響

(a) τ_{xz}

(b) $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}$

図 6 接着層の応力分布 (DHB)

全域でせん断応力 τ_{xz} に比べて格段に小さい。このことから、接着層の応力はせん断応力 τ_{xz} が支配的で、この応力のみが作用していると考えられる。本解析で得られたせん断応力 τ_{xz} の最大値について、その長さ方向の分布を示すと図7となる。両端では、ゆがみの拘束の影響を受け中央部より小さくなる。これらの結果は、理論解析の結果^{6)・8)・9)}と良く一致している。

疲労き裂は、せん断応力 τ_{xz} の大きい部材中央付近の接着端部から発生することが予想される。実際、疲労試験後の観察より、部材中央付近の接着部にき裂が生じていた。破面は、接着剤が斑模様に着した界面破壊モードを呈していた⁶⁾。これは、せん断応力が支配的になるにつれ凝集破壊より界面破壊の割合が多く

図 7 長さ方向のせん断応力分布

図 8 接着部解析モデル (DHB)

なる傾向^{10)・11)}と一致している。この部材の疲労破壊は、接着界面端からき裂が発生し、界面に沿ってき裂が伝ばするものと考えられる。

5. 界面破壊力学による評価

5. 1 応力拡大係数の解析モデル 界面き裂の応力拡大係数のFEM三次元弾性解析を行うにあたって、図8に示すように、接着部を取り出した接着部解析モデルを考える。両ハット材の接着部は、図8(a)に示すように接着層を挟んで対称であるので対称性を考慮し、図8(b)のように接着層の中央より上部半分を取り出した。境界条件は、このモデルの表面上にある節点については、すべてX方向の変位のみ自由とした。ただし、接着層の下面の節点については全自由度を拘束した。荷重Pは、面e j n oの節点に等分布に負荷した。隔壁付両ハット材の場合は、対称性から隔壁の中央より上部半分について、両ハット材と同様の条件にて解析した。

図9(a)に両ハット材、図9(b)に隔壁両ハット材について、せん断応力 τ_{xz} の結果のみを部材解析

(a) DHB

(b) DHB P

図 9 接着部解析モデルの接着層応力分布

モデルの結果とともに示す。接着層の応力分布は、部材解析モデルの応力分布の結果と良く一致していることが分かる（以下、せん断応力 τ_{xy} を単にせん断応力と呼ぶ）。また、接着層の厚さ方向の応力分布は、接着層を3～5層に分割し解析した。その結果、厚さ方向の応力分布は、両ハット材、隔壁付両ハット材ともほぼ一定であった。

図10は接着層のせん断応力分布に及ぼす板厚と隔壁の影響をハット材のせん断流れ τ_{xy} 、 t 一定の場合について示す。1. 6mmの両ハット材と0. 8mmの隔壁付両ハット材は、0. 8mmの両ハット材と比べ接着端部のせん断応力が低い。これは、図4の疲労強度の傾向と対応しており、疲労強度は接着端部のせん断応力によって定性的に説明できるように思われる。

5. 2 界面き裂の応力拡大係数の解析 界面き裂の応力拡大係数は、図11に示すように接着部解析モデルを用い、接着端から接着界面に沿ってき裂を想定し、き裂長 c とフランジ幅 d の比であるき裂長比 c/d を変え解析した。

き裂先端部の応力特異性を詳細に検討するためには、要素分割を細かくする必要があるが、細かい要素分割による解析では大規模になってしまう。そこで、解析規模を縮小するためステップ解析¹²⁾を用いた。まず、図11(a)のStep1で比較的粗い要素分割で解析する。Step2では、き裂先端部を取り出して（ズーム）、その部位をより細かく要素分割した詳細モデルを作成する。詳細モデルの境界条件は、Step1の解析から得られた節点変位を与える。この境界条件下で解析を行う。今回の解析では、2回のズームを行い、図11(b)のStep3まで細分割し（0. 0025mm）、詳細な解析を行った。

き裂先端近傍の変形モードには、三つのモードがある。接着した箱型断面部材がねじりを受ける場合、既に述べたように接着層にはせん断応力だけが作用していると考えられ、界面き裂先端近傍の変形様式はモードⅢに相当している。異材界面き裂がき裂面に対して面外にせん断変形を受ける場合（図12）、き裂先端の変位場は次式で表せることが知られている¹³⁾。

$$u_i = \frac{2K_{II}}{\mu_i} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (i=1,2) \quad (1)$$

ここで、 i は材料1、2を示す。 u_i はそれぞれの材料中での面外変位、 μ_i はそれぞれの材料のせん断弾性係数である。式(1)よりそれぞれの材料中で均質材と同じモードⅢの変位場となることがわかる。 K_{II} は

界面き裂の応力拡大係数であり、FEMの変位解から外挿により決定した。ここでは次式の変位法¹³⁾により K_{II} を求めた。

$$K_{II} = \frac{1}{2 \left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} \right)} \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \Delta u \quad (2)$$

図10 せん断応力分布に及ぼす板厚、隔壁の影響

図11 応力拡大係数解析モデル

図12 面外せん断変形を受ける界面き裂

ここで、 Δu はき裂上下面の相対変位である。この応力拡大係数 K_{II} とき裂進展に伴うエネルギー解放率 G_{II} とは、次式の関係がある¹⁴⁾。

$$G_{II} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} \right) K_{II}^2 \quad (3)$$

5. 3 K_{II} の解析結果

K_{II} の解析結果を図13 (a)に両ハット材、図13 (b)に隔壁付両ハット材の場合をそれぞれ示す。ただし、 K_{II} は接着層の平均せん断応力 τ_{mean} (τ_{mean} =せん断荷重 $\tau_{mean} \cdot th \cdot L$ /接着面積 $d \cdot L$)で除している。両部材とも K_{II} は、板厚0.8より1.6mmが小さく、その値はほぼ同じある。また、両部材の K_{II} は、き裂先端から離れるにつれ若干異なる傾向を示している。本研究では、 K_{II} は、き裂先端から離れた直線性を示す解析データから最小二乗法により直線近似式を求め、これをき裂先端に向かって延長し、 $r=0$ との交点の値を用いた。

図14は、き裂長比 c/d の変化に伴う K_{II} の変化を示す。図14 (a)は両ハット材の場合で、き裂長比の広範囲の変化に対し K_{II} がほぼ一定となっている。板厚0.8より1.6mmの K_{II} が小さい。図14

(b)隔壁付両ハット材の場合も両ハット材と同じ結果である。また、 K_{II} は両部材でほぼ同じ値を示している。

5. 4 疲労強度の評価 結城ら^{4), 15), 16)}は、各種タイプの接着継手の疲労強度は、 ΔK_I ($K_I^2 = K_1^2 + K_2^2$)により統一的に評価できることを明らかにしている。接着継手の疲労破壊は、大部分界面破壊であり、しかも応力特異性により接着界面端から早期に疲労き裂が発生し、寿命の大部分は界面に沿う疲労き裂伝ばに支配されると考えられている。混合モード比の異なる接着継手の疲労き裂伝ば速度 da/dN は、全エネルギー解放率範囲 ΔG_T で統一的に整理でき、次の関係がある。

$$da/dN = C_1 (\Delta G_T)^{m_1} \quad (4)$$

ここで、 C_1, m_1 : 材料定数

式(4)は、応力拡大係数範囲 ΔK_I を用いると次式で表せる。

$$da/dN = C_2 (\Delta K_I)^{m_2} \quad (5)$$

ΔK_I が界面き裂進展にかかわらず一定であれば、式(5)を積分して疲労寿命 N_f は次式で表せる。

$$N_f \Delta K_I^{m_2} = \text{一定} \quad (6)$$

(a) DHB

(b) DHBP

図13 K_{II} の解析結果

(a) DHB

(b) DHBP

図14 K_{II} とき裂長比 c/d の関係

図15 ΔK_{III} による疲労強度評価

接着した箱型断面材の K_{III} は、図14からき裂長比 c/d によらずほぼ一定であり、 ΔK_{III} がき裂進展にかかわらず一定とみなせば、モードⅠとモードⅡの混合モードで成立する式(6)の考え方がモードⅢの場合にも適用できるものと思われる。すなわち、式(4)の ΔG_T を ΔG_{III} 、式(5)、(6)の ΔK_I を ΔK_{III} に置き換えた式になる。

K_{III} の解析結果を用いて、図3で示した疲労試験結果を ΔK_{III} で再整理し、図15に示す。ただし、 K_{III} はき裂長比 c/d によらずほぼ一定であるので、ここではき裂長比 $c/d = 0.3$ の値で代表されるものとした。板厚、隔壁、断面の大きさの異なる部材の疲労データが比較的狭い分散帯に整理された。これらの結果から ΔK_{III} を用いれば、接着した箱型断面材の疲労強度を統一的に評価できる可能性があるものと思われる。

5. 結 言

本研究では、自動車車体のモデル部材として採用した接着した箱型断面材のねじり疲労試験を行い、疲労強度に及ぼす板厚、隔壁、断面の大きさの影響等を調べた。次に接着層の応力分布をFEM三次元弾性解析により求め、得られた応力分布になるように仮想境界での境界条件を定めた接着部解析モデルを考えた。さらに、このモデルを用い接着界面にき裂を想定し、

その応力拡大係数をFEM三次元弾性解析により求め、疲労強度の定量的評価を試みた。主な結論を以下に示す。

(1) 接着した箱型断面材の疲労強度は、断面の大きさの影響を受ける。また、板厚、隔壁の影響も若干受ける。

(2) その疲労強度は、接着端部のせん断応力で定性的に説明できる。

(3) 接着界面にき裂を想定し、その応力拡大係数に及ぼす板厚、隔壁の影響を明らかにした。

(4) 応力拡大係数範囲 ΔK_{III} を用いると、接着した箱型断面材の疲労強度データを統一的に整理できた。このことから、 ΔK_{III} でこの部材のねじり疲労強度を統一的に評価できる可能性がある。

6. 参 考 文 献

- 1) 芦田, 日本接着協会誌, Vol.25, No.12(1989), 572
- 2) 北川, 新時代を担う構造接着技術シンポジウム, 自動車技術会, No.12, (1990), 3
- 3) 富岡, 新時代を担う構造接着技術シンポジウム, 自動車技術会, No.12, (1990), 20
- 4) 結城, 他4名, 材料, Vol.41, No.467(1992), 1299
- 5) 森, 日本接着学会誌, 28(1992), 183
- 6) 書上, 他4名, 機論, A-60, No.569(1994), 87
- 7) Seok Hyun LIM, et.al, JSAE Review Vol.8, No.3 (1987), 56
- 8) 書上, 他3名, 日本機械学会山梨地方講演会公演論文集, 1992, 157
- 9) 富岡, 他3名, 日本機械学会講演会公演論文集, 1994,
- 10) 金子, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 1994, 340
- 11) 森, 他3名, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 1994, 332
- 12) 三好, 他3名, 有限要素法 構造要素の変形・破壊挙動の解析, 実教出版, (1976), 123
- 13) 結城良治編著, 界面の力学, 培風館, (1993), 107
- 14) Willis, J.R., J. Mech. Phys. Solids, 19(1971), 353-368
- 15) 結城, 他3名, 材料, Vol.39, 1095(1990)
- 16) 鄭, 他3名, 日本機械学会論文集, A-55, 1984 (1989)