107 アクリル系接着剤の繰返し粘塑性挙動とそのモデル化

Viscoplastic Behaviour of Acrylic Adhesive under Cyclic Torsion and Its Modeling

○学 水谷 憲彰 (広島大・院) 正 吉田 哲哉 (広島商船高専) 正 瀧口 三千弘 (広島商船高専)
濱崎 洋 (広島大院) 正 吉田 総仁 (広島大院)

Noriaki MIZUTANI, Hiroshima University, Kagamiyama 1-4-1, Higashi-Hiroshima, Hiroshima
Tetsuya YOSHIDA, Hiroshima National College of Maritime Technology
Michihiro TAKIGUCHI, Hiroshima National College of Maritime Technology
Hiroshi HAMASAKI, Hiroshima University
Fusahito TOSHIDA, Hiroshima University

Key words : Acrylic adhesive, Cyclic torsion, Viscoplasticity, Constitutive equation

1. 緒言

接着剤による接合では溶接に比べ、軽量化、コスト削減が可能であり、また、接合が容易、異種材料の接合が可能などの長所を利用して幅広い分野において使用されている¹⁾。従来、接着接合は製品の組立段階で行われているが、著者らはコスト削減や組立の簡素化を目的とした「接着接合した金属板材のプレス加工」という新たな技術を提案し²⁾、多軸応力状態における接着剤のせん断応力—せん断ひずみ関係について調査してきた³⁾。

本論文ではアルミニウム合金を被着体とした突合せ継手を用いてアクリル系接着剤の繰返しねじり試験を行い、ひずみ速度を変化させた際のせん断応力—せん断ひずみ関係を測定した。また実験から得られたせん断応力—せん断ひずみ曲線の特徴を考慮した応力—ひずみ弾粘塑性構成式を提案し、計算結果と実験結果を比較・検討した。

2. 繰返しねじり試験

2.1 試験方法

供試材には電気化学工業(株)製の二液主剤・変性アクリル系構造用接着剤ハードロック M-372-20を使用した。繰返しねじり試験に使用した試験片の概略図をFig. 1に示す。被着体はアルミニウム合金A5052であり、外径30mm、内径20mmの円筒部分に接着剤を塗布し、突合せ接着を行った。試験にはラチェット試験機SW1500(株)昭和製作所製を用い、押当て式変位計によりひずみを計測した。繰返し変形中の材料の粘塑性挙動を観察するため、せん断ひずみ速度0.002、0.02、0.2 s⁻¹の3速度で実験を行った。試験温度は20±0.5℃とし、温度の影響が出ないよう配慮した。繰返し変形時の目標せん断ひずみおよび実測値をTable 1に示す。

2.2 試験結果

Fig. 2, Fig. 3に実験から得られたせん断応力—せん断ひずみ曲線を示す。Fig. 2には単純ねじり試験結果も同時に示す。Fig. 2よりひずみ速度が一定のとき、せん断ひずみ幅±0.2、±0.5ともに繰返し加工軟化が見られた。また、ひずみ履歴②、③においてせん断ひずみが0のときのせん断応力は、せん断ひずみ幅±0.2の時にはそれぞれ約-3、2.5MPaに対し、せん断ひずみ幅±0.5ではそれぞれ約-4.5、3MPa

Fig. 1 Schematic illustration of specimen.

となり、せん断ひずみ幅の増大に伴い繰返し加工軟化が顕著に現れた。また、ひずみ履歴③においてせん断応力が急増して単純ねじり試験結果に収束した。Fig. 3では、せん断ひずみ速度の上昇に伴い、せん断応力が増加するひずみ速度依存性が観察された。またせん断ひずみ履歴②、③において反転負荷後からせん断応力の急増を示す直前までのせん断応力は速度によらずほぼ同程度となり、速度の増大に伴いソウシグナー効果およびせん断応力の急増が顕著に表れた。

Table 1 Shear strain history.

Shear strain rate[s ⁻¹]	Shear strain range	Shear strain history					
		①	②	③	④	⑤	⑥
0.002	±0.2	0	→ 0.20	→ -0.20	→ 1.2		
	±0.5	0	→ 0.48	→ -0.39	→ 1.1		
0.02	±0.2	0	→ 0.19	→ -0.20	→ 0.74		
	±0.5	0	→ 0.50	→ -0.49	→ 1.3		
0.2	±0.2	0	→ 0.22	→ -0.18	→ 1.1		
	±0.5	0	→ 0.51	→ -0.48	→ 0.98

Fig. 2 Experimental results of torsion and cyclic torsion tests under a strain rate of 0.002s⁻¹ with various strain range.

Fig. 3 Experimental results of cyclic torsion tests under various shear strain rates with a shear strain range of ±0.5.

3. 粘塑性構成式

前章の実験結果から本接着剤には強いひずみ速度依存性が確認されたため、単純せん断状態における構成式の基本的な枠組みとして、式(1)に表すような超過応力モデルを用いた。

$$\dot{\gamma}^p = \left\langle \frac{|\tau - \alpha| - K}{D} \right\rangle^n \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\gamma}^p$ はせん断ひずみ速度の絶対値、 α はせん断背応力、 K はせん断降伏応力、 n は応力感受性指数、 D は抗応力である。

α は式(2)のように3つの移動硬化の足し合わせとする。

$$\alpha = \alpha^{(1)} + \alpha^{(2)} + \beta \quad (2)$$

$\alpha^{(1)}$ は式(3)に示すような Armstrong-Frederick 型の非線形移動硬化とし、式(4)により繰返し加工軟化を表現した。

$$\dot{\alpha}^{(1)} = C^{(1)} (a^{(1)} \dot{\gamma}^p - \alpha^{(1)} |\dot{\gamma}^p|) \quad (3)$$

$$a^{(1)} = a_0^{(1)} - (a_0^{(1)} - a_f^{(1)}) \{1 - \exp(-\xi \bar{\gamma}^p)\} \quad (4)$$

$$\bar{\gamma}^p = \int \dot{\gamma}^p dt \quad (5)$$

ここで、 $a_0^{(1)}$ 、 $a_f^{(1)}$ 、 $C^{(1)}$ 、 ξ は材料定数である。

$\alpha^{(2)}$ は式(6)、(7)に示す非線形移動硬化則によりせん断応力の急増を表現した。また式(8)により繰返し変形後の単純ねじり試験結果への収束を表現した。

$$\alpha^{(2)} = a^{(2)} \{1 - \exp(-C^{(2)} |\dot{\gamma}^p|)\} \text{sign}(\dot{\gamma}^p) \quad (6)$$

$$a_0^{(2)} = a_{0.002}^{(2)} \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right|^b \quad (7)$$

$$a^{(1)} + a^{(2)} = \text{const.} \quad (8)$$

ここで $\dot{\gamma}_0$ は基準せん断ひずみ速度、 $a_{0.002}^{(2)}$ 、 $C^{(2)}$ は材料定数である。

β は式(9)に示すような線形移動硬化により、単純ねじり試験結果への収束後の加工硬化を表現した。

$$\dot{\beta} = H' \dot{\gamma}^p \quad (9)$$

ここで H' は加工硬化係数である。

Table 2 に計算に用いた材料定数を示す。Figs. 4 にせん断ひずみ速度 0.02s^{-1} の計算結果と対応する実験結果を示す。全体的に計算結果は実験結果とおよそ一致しており、また、本構成式により繰返し加工軟化が表現できることがわかる。一方 Figs. 4(c) より、ひずみ履歴②、③において、せん断応力の急増が開始するせん断ひずみを比較すると、実験結果ではそれぞれ約 0.1 と変化するのに対し、計算結果では約 0 と変化しない。これは、応力反転後に $\alpha^{(2)}$ が再び原点を通るためである。また、他のせん断ひずみ速度についても同様の傾向が見られた。

4. 結言

アクリル系接着剤の繰返しねじり試験を実施し、その弾粘塑性挙動を調査した。得られたせん断応力-せん断ひずみ関係の特徴を考慮した構成式を提案し、計算結果と実験結果を比較した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 本供試材は繰返し加工軟化を示し、その後一方向に変形を与えると単純ねじり試験結果に収束した。速度の増大に伴い、顕著なバウシinger効果およびせん断応力の上昇が見られた。
- (2) 提案した粘塑性構成式により、各せん断ひずみ速度について繰返し加工軟化などの特徴を表現できた。せん断応力の急増が開始するせん断ひずみ変化については表現できなかった。

参考文献

- 1) 柳澤誠一, 溶接学会誌, 第 73 巻(2004), 216-222.
- 2) 瀧口三千弘 他, 機論, 67-655, A(2001), 580-587.
- 3) T. Yoshida et al., Key Engineering Materials(2007), 340-341, 1485-1490.
- 4) 永田宏二監修, 接着剤と接着技術(2007), シーエムシー出版.

59-61, ISBN4882319381.

Table 2 Material parameters.

G	250	[MPa]
K	1.5	[MPa]
n	2.0	
D	15	[MPa]
$a_0^{(1)}$	6.0	[MPa]
$a_f^{(1)}$	1.0	[MPa]
ξ	5.0	
$C^{(1)}$	200	
$a_{0.002}^{(2)}$	3.0	[MPa]
b	0.28	
$C^{(2)}$	8.0	
H'	2.5	[MPa]

(a) Torsion test

(b) Cyclic torsion test (shear strain range: ± 0.2)

(c) Cyclic torsion test (shear strain range: ± 0.5)

Figs. 4 Comparison of shear stress-shear strain curves between experimental and numerical results under a shear strain rate of 0.02s^{-1} at 20°C .