

## 一面せん断接着継手試験による低弾性接着剤の破壊形式と接着強度の評価

首都大学東京大学院 学生員○今井貴也・タイウィサル 首都大学東京 正会員 中村一史  
 (一財)首都高速道路技術センター 正会員 増井隆・上條崇・小林明史  
 首都高速道路(株) 正会員 平野秀一 日本エンジニアリング(株) 正会員 政門哲夫  
 (株)ダイクレ 正会員 鈴木啓之 (株)ITW PP & F JAPAN 中川健太

### 1. はじめに

鋼部材の断面欠損に対する当て板接着工法において、施工・養生の効率化を図るため、一般のエポキシ樹脂接着剤より低弾性である、メチルメタクリエート系構造用接着剤の接着強度を、一面せん断接着継手試験<sup>1)</sup>により検討した。この接着剤は、粘度が高く、厚付け接着が可能であるため、不陸修正が不要であること、可使・硬化時間が短いため、施工・養生の時間を短縮できること、硬化後の弾性係数が小さく、破断伸びが大きいこと、はく離しにくいことなどの特徴を有する。一方、接着層が厚い場合の継手特性が不明確である。そこで、接着剤の厚さが接着接合部の接着強度と破壊形式に及ぼす影響を実験的、解析的に検討した。

### 2. 一面せん断接着継手試験の検討

#### 2.1 接着強度の評価方法

図-1に、試験片図を示す。接着強度の評価方法は、当て板端部の接着剤に、高いせん断応力と垂直応力が生じるため端部のせん断応力、垂直応力に基づいた主応力を用いる。主応力 $\sigma_{pe}$ は「FRP接着による構造物の補修・補強指針(案)」<sup>1)</sup>の次式によるものとした。

$$\sigma_{pe} = \frac{\sigma_{ye}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{ye}}{2}\right)^2 + \tau_e^2} \quad (1)$$

ここに、 $\tau_e$ は接着剤に生じるせん断応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{ye}$ は接着剤に生じる垂直応力(N/mm<sup>2</sup>)である。せん断応力 $\tau_e$ と垂直応力 $\sigma_{ye}$ の値については、引張力と付加曲げモーメントを受ける場合(試験法D)に基づいて、接着剤に生じるせん断応力 $\tau_e$ と垂直応力 $\sigma_{ye}$ の収束式<sup>1)</sup>から計算した。文献2)では、被着体の剛性が小さいと偏心曲げモーメントにともなう幾何学的な非線形性により、文献1)の収束式では評価できないことが指摘されている。被着体である鋼板の厚さは9mmとし、剛性を確保するが、接着剤の弾性係数が小さく、接着層厚が厚いことから、収束式<sup>1)</sup>の適用の妥当性は不明である。そこで、幾何学的な非線形性を考慮した有限要素解析を併用して検討する。解析には、汎用有限要素解析ソフトウェアMsc Marc 2018を適用した。図-2に、解析モデル図を示す。鋼板は、接着範囲では1×1mm、それ以外では5×5mmで分割し、その間の部分は自動分割とした。接着剤は、公称厚さとし、厚さ方向に4分割、長さ方向に1×1mmで分割する。要素はソリッド要素とする。幾何学的な非線形性の影響を検討するために、解析方法は、微小変位解析、有限変位解析の2つのパターンで行った。作用荷重は、各接着層厚における破壊荷重の平均値とした。

#### 2.2 試験片と実験方法

表-1に、実験シリーズを示す。表-2、表-3に、鋼材(SM490B)、実験で使用した接着剤(MA530)の材料特性を示す。鋼材の材料特性は、引張試験によって算出した値である。接着の際の鋼板の素地調整は、ブラスト処理とし、アセトンによる脱脂後、接着剤で鋼板同士を接着した。図-3に、接着状況を示す。接着には、ハンド

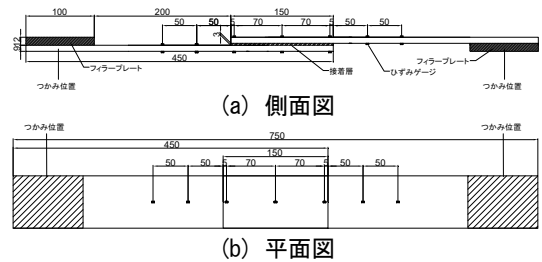


図-1 試験片図(接着層厚 $t_a=3\text{mm}$ )

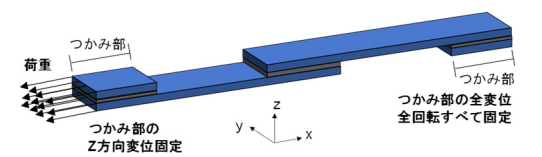


図-2 解析モデル図(接着層厚 $t_a=3\text{mm}$ )

表-1 実験シリーズ

試験片名	接着層厚(mm)	試験体数
SLT03	3	3
SLT05	5	5
SLT10	10	3

表-2 鋼材(SM490B)の材料特性

弾性係数 $E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )	207.4
ポアソン比 $\nu_s$	0.29
降伏強度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	396.5
引張強度 $\sigma_{tu}$ (N/mm <sup>2</sup> )	563.7
伸び $\delta$ (%)	30

表-3 実験に用いた接着剤(MA530)の材料物性値

引張弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	759
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	18.1
引張せん断接着強さ (N/mm <sup>2</sup> )	9.9
可使時間 (min)	30
硬化時間 (h)	2



図-3 接着の状況

キーワード 当て板, 接着接合, 一面せん断接着継手, 低弾性接着剤, 接着強度, 破壊形式

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京大学院 TEL.042-677-1111 内線(4564)

ガンにより、ライン状に塗布を行った。養生条件は、完全硬化を基準として評価するため、室温（約23℃）にて12時間の養生、その後、24時間、40℃の加温養生とした。接着層厚は、スペーサーとして、公称厚さと同じ厚さの亚克力板を用意し、その上に鋼板を置くことで管理した。引張試験には、油圧チャック式万能試験機（静的容量：1000kN）を用いて、変位制御により载荷を行った。载荷速度は2mm/minとした。

### 2.3 検討結果と考察

検討結果の一部として、図-4に、接着層厚と破壊荷重時における最大主応力の関係を、図-5に、荷重とチャック間の相対変位の関係を、図-6に、破壊荷重時における接着層の主応力分布を、図-7に、代表的な接着接合部の破壊面をそれぞれ示す。

図-4、図-5より、接着層が厚くなるほど、最大荷重（破壊荷重）、主応力は小さくなるのがわかる。また、接着層の厚さが3mmと5mmでは、破壊荷重時の最大相対変位の差異は小さいが、接着層の厚さが5mmと10mmを比較すると、その差が大きいことがわかる。これは、一般のエポキシ樹脂接着剤と同様の傾向であり、接着層厚の増大により、偏心曲げモーメントによる2次応力の影響が強くなることによるものと考えられる。

図-4、図-6から、収束式りと微小変位解析による主応力は、同程度であるが、有限変位解析による主応力は、収束式の値に比べて82~84%であり、小さくなるのがわかる。したがって、収束式では、主応力の大きさを過大に評価する可能性があるため、収束式の適用は困難であると考えられる。

破壊形式は、図-7に示したように、接着層の内部で破壊する凝集破壊と、鋼板の界面近傍において接着層の内部で破壊する薄膜凝集破壊の2種類であった。薄膜凝集破壊は、使用した接着剤特有の現象である。図-4に、破壊形式を併記したが、薄膜凝集破壊は、接着層が厚いと生じる可能性が高くなる傾向がみられ、接着層厚10mmでは、全て薄膜凝集破壊であった。

破壊挙動を目視で観察した結果、凝集破壊では、载荷とともに接着剤のせん断変形が大きくなり、破壊した。薄膜凝集破壊では、最大荷重後に急激に荷重が低下し、大きな音を立てて、界面破壊に近い状態で破壊した。ここで、接着層5mmの試験片では、SLT05\_2のみ凝集破壊であったが、破壊形式による強度の違いは見られなかった。また、図-7(b)より、接着層が10mmになると、ライン塗布を何度か重ねて行うため、接着剤内部に空隙による不良が生じる可能性は高くなるといえ、鋼板との接触面でのボイドの発生が顕著になり、破壊荷重の低下につながることが考えられた。

### 3. 結論

以上のことから、接着層が厚くなると、破壊荷重は小さくなること、接着層厚が10mmでは破壊荷重の低下が大きくなり、鋼板の界面近くでの薄膜凝集破壊となることがわかった。また、低弾性接着剤による一面せん断接着継手試験では、はく離時の主応力の評価には、幾何学的非線形の影響を考慮する必要があるといえた。なお、ライン塗布に伴う接着剤内部の空隙の評価は、今後の課題である。

### 参考文献

- 1) 複合構造委員会編：FRP接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ09，土木学会，2018。
- 2) 坂本貴大，石川敏之：シングルラップ接着接合のはく離破壊評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.63A，pp.483-492，2017.3

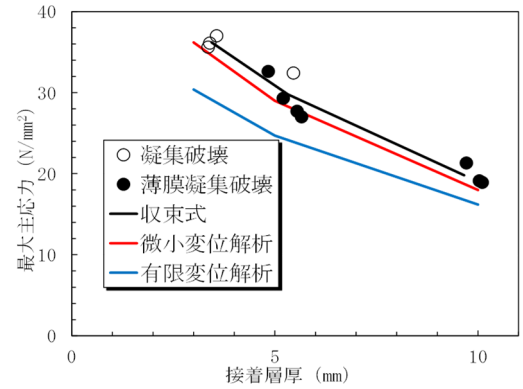


図-4 接着層厚と破壊荷重時における最大主応力の関係

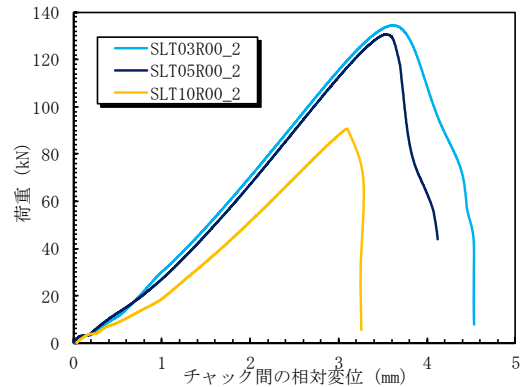


図-5 荷重とチャック間の相対変位の関係

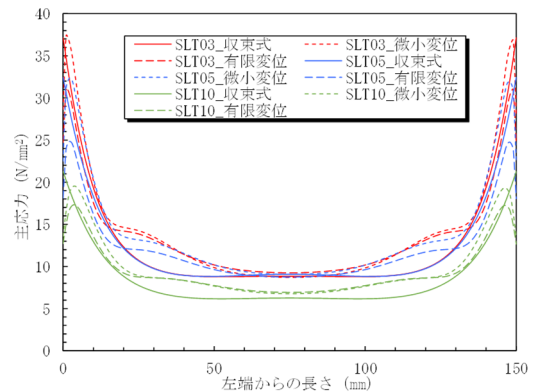


図-6 破壊荷重時における接着層の主応力分布

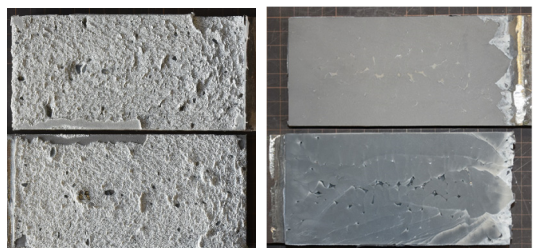


図-7 代表的な接着接合部の破壊面