

炭素繊維補強における接着面のせん断破壊応力に関する検討

株式会社 平設計 ○ 正会員 山田 稔 *

首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科

学生員 白石泰隆

首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科

正会員 長嶋文雄

1. はじめに

炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸・硬化させた炭素繊維集成板（以後、CCFP）を用いた補修・補強工法では、終局状態のひとつである剥離の挙動について未解明な点が少なからず残されている。鋼部材に接する接着剤が剥離する際に接着面に生じるせん断破壊応力と、JIS に規定する試験から求めたせん断接着応力（JIS ではせん断接着強さと称する）との関係は、せん断応力分布特性に起因すると考えられる違いがあることがこれまで実施した実験から認められている。本報告では、数値解析を行う際に剥離挙動を的確にシミュレートすることのできるせん断破壊応力に関する検討を行った。

2. 接着剤のせん断破壊応力

JIS K 6852¹⁾で規定される接着剤のせん断接着強さ試験方法に従い、図1に示す 30mm×25mm×10mm の鋼材片を用いて試験を実施した。接着剤はパテ状エポキシ樹脂接着剤（E2370MS）を用いた。最大荷重(P)は 12.25kN、試験片の接着面積（A=25mm×25mm）625 mm²、せん断接着応力（S=P/A）は 19.6N/mm²であった。一方、筆者らは、鋼材を長手方向に突き合わせ、その表裏両面に CCFP を接着し、接着剤の強度のみで力を伝達する継手状試験体による実験を行い、その挙動をシミュレートする3次元ソリッド要素を用いた有限要素法解析モデルを開発した²⁾。実験を模した解析では、接着剤の剥離を判定するためのせん断破壊応力として、JIS の試験方法で求まるせん断接着応力に対し3～4割程度大きい値とすることで近い結果を得ることができたが、明確な関係を把握するに至っていない。

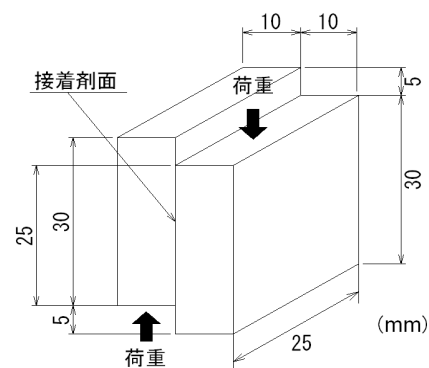


図1 せん断強さ試験体の形状と寸法

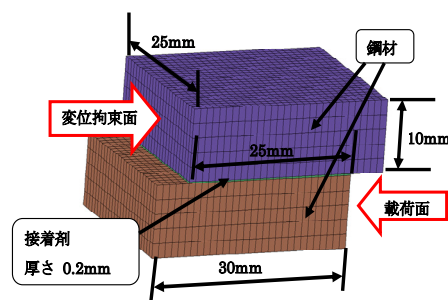


図2 せん断剥離挙動解析モデル

3. 解析モデルと解析手法

JIS に規定される試験体で、せん断破壊応力をパラメータとした解析を行った。解析モデルを図2に示す。これまでの実験結果で、剥離は接着剤と鋼材の界面で生じたことから、鋼材と接着剤の間のせん断破壊応力に着目した解析を行う。また、接着剤内部での凝集破壊は生じなかったことから接着剤は1層としてモデル化した。接着剤層は鋼材と鋼材の間に 0.2mm の厚さで設けた。接触する面と面の間には破壊を考慮できる接触条件を用いた。この接触条件では以下の条件式を用いて破壊（剥離）の判定を行う。

表1 せん断破壊応力と最大せん断荷重

$$\left(\frac{\tau}{\tau_f} \right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_f} \right)^2 \geq 1 \quad \dots (1)$$

ここで、

τ : 接着剤の面内方向に生じるせん断応力(N/mm²), σ : 接着剤の面外方向に生じる垂直応力(N/mm²),

τ_f : せん断破壊応力(N/mm²), σ_f : 垂直破壊応力(N/mm²) である。

表1にせん断破壊応力 τ_f と剥離が生じた最大せん断荷重の関係を示す。解析ケース No.1～No.5 は、せん断破壊応力として JIS による試験結果(せん断接着応力 19.6N/mm²)を 1.25～1.65 倍に変化させ、剥離が発生する最大せ

キーワード：炭素繊維集成板、せん断破壊応力、3次元有限要素法解析

* 株式会社 平設計 技術部 〒110-0005 東京都台東区上野 3-17-11, TEL03-3836-3246, FAX03-3833-7467

ん断荷重を求めた結果である。

図3に解析ケース No.3 の荷重－変位関係を示す。接着剤層が最終剥離（④）に達するまでに微小剥離（①～③）の発生が認められた。微小剥離発生過程とせん断接着応力の分布パターンを図4に示す。高せん断応力範囲は、まず荷重方向の両端部①で認められ、この部分がせん断破壊応力に達して微小剥離が生じる。次いで荷重に平行な両側縁の四隅②から中央付近③へと微小剥離が生じ、最終剥離直前では一回り小さな領域④がせん断破壊応力に達し、一気に完全な剥離が生じる。JIS では作用する荷重は接着面積全体で均等に分担する

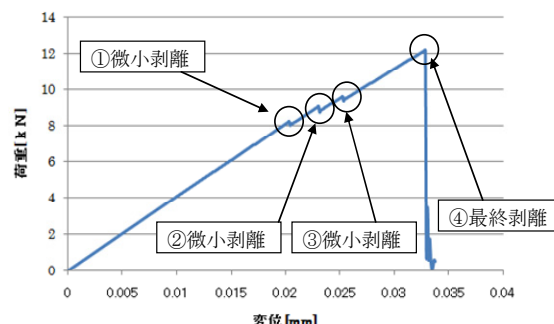


図3 せん断剥離挙動解析結果

荷重－変位関係(解析ケース No.3)

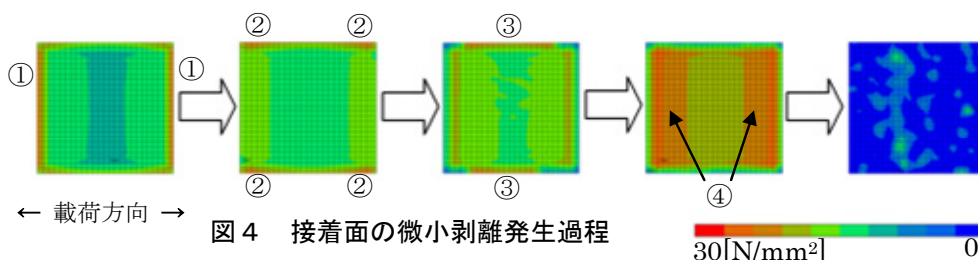


図4 接着面の微小剥離発生過程

ことから、剥離の際のせん断破壊応力は JIS で規定しているせん断接着応力より高くなる。JIS の試験から得られた最大せん断荷重 (12.25kN) と解析結果を等価にするためには、5 ケースの解析結果の線形回帰分析からせん断破壊応力を $\tau_{f0}=28.49(\text{N/mm}^2)$ とする必要があることがわかった。この値は JIS の試験から求まる平均的なせん断接着応力の 1.45 倍である。接着剤の面外方向に生じる垂直応力はせん断応力に比べ 1 割程度となり、剥離の判定式(1)では垂直応力の影響はせん断応力の高々数%であり、剥離は接着剤の面内方向に生じるせん断応力が支配的要因で発生することを確認している。

4. 継手状試験体の引張試験およびシミュレーション解析

これまでに実施した継手状試験体 (図5) による実験から得られた、初期剥離が発生する荷重と、その実験を模した解析で、断破壊応力を $\tau_{f0}=28.49(\text{N/mm}^2)$ とした場合の初期剥離荷重の比較を表2に示す。継手状試験体の引張試験では、CCFP の貼り付け長さを 50mm, 100mm, 150mm と変化させ各2体実施した。推定したせん断破壊応力を用いて解析を行ったところ、接着長さごとにばらつきがあるが、総数6体の平均値では、初期剥離荷重は実験と解析でよい一致がみられた。

5. おわりに

JIS で規定する接着剤のせん断接着強さ試験のシミュレーション解析を行い、接着剤が剥離するまでの過程を明らかにした。また、剥離挙動を解析で正確に再現するために用いるせん断破壊応力を、JIS で規定する平均的なせん断接着応力に対する倍率として確認することができた。微小剥離が段階的に生じ、剥離直前には接着面積が減少していることから、剥離挙動の検討には有効接着面積という考え方でデータ整理をすることもできると思われる。

【参考文献】1) JIS K 6852-1994 ; 接着剤の圧縮せん断接着強さ試験方法, 2) 山田、尾崎、石井、長嶋：炭素繊維補強材の接着強度とモデル化に関する検討，鋼構造年次論文報告集，Vol.14 PP.603～PP.610，2006。

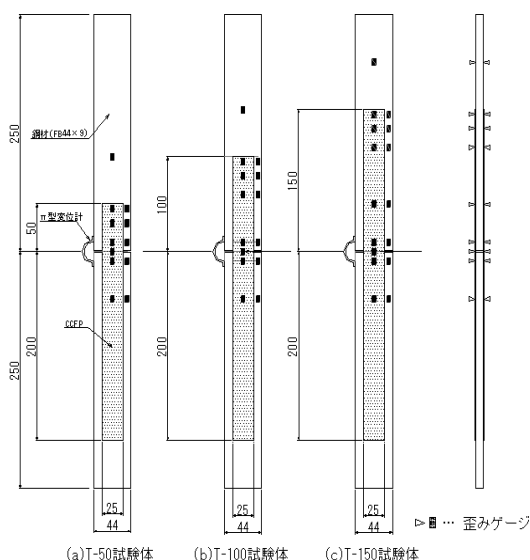


図5 継手状試験体

表2 初期剥離荷重の比較

実験	試験体No.	T50-1	T50-2	T100-1	T100-2	T150-1	T150-2	平均
	接着長さ[mm]	50		100		150		
	剥離荷重[kN]	13.32	11.84	14.58	11.99	13.25	18.31	
解析	剥離荷重[kN] ($\tau_{f0}=28.49$)	13.70		13.69		14.25		13.88