

界面剥離を考慮した解析的平均化手法による FRP 梁の 曲げ試験挙動とその強度予測

Prediction of strength and behavior of FRP girders in bending test
by analytical averaging method considering debonding effect

桐木 真也*
Shinya KIRIKI

*構造強度学研究室（指導教官：岩熊哲夫 教授）

Various composites are increasingly used in civil engineering field. But, interlaminar delamination and interfacial debonding between the fiber and matrix, lead to brittle fracture. We employ an FEM analysis using analytical averaging method based on the Mori-Tanaka theory, and explain phenomena in experiments numerically. As for criteria of the brittle debonding, we employ the interfacial debonding as well as the interlaminar delamination. The ultimate states of the beams are predicted and compared with experimental results of FRP girders in bending test.

Key Words : composites, delamination, debonding, Mori-Tanaka theory, averaging method

1. はじめに

繊維強化プラスチック複合材料 FRP はその代表的なものに、強化繊維に炭素繊維を用いた CFRP やガラス繊維を用いた GFRP などがあり、従来の土木材料と比べて、軽量であり比強度が大きいこと、保温性や耐腐食性に優れていること、補修が容易であるなどの利点が注目され、土木の分野でもその適用範囲が広がっている。

一方で、FRP 材料は繊維方向にのみ強度が増すため、強い異方性を持つことになる。そのためこれらの FRP 材料が積み重ねて作られた FRP 複合積層材料では、各 FRP 積層材料の積層比率や積層方向、積層順序などを変えることにより、複合積層材料としての平均的な挙動も影響を受け変化する。近年盛んに行われている FRP 複合積層材料の強度実験では、各 FRP 積層材料の層間剥離や、層内部での母材と界面の界面剥離が確認されており、これらの剥離の発生と進展に伴う極めて脆性的な破壊挙動が問題となっている。

そこで本研究では、埼玉大学で行われた FRP 複合積層梁の曲げ実験¹⁾を対象に、森・田中理論²⁾に基づく平均化手法を取り込んだ複合材料有限要素解析を行う。層間剥離および界面剥離の発生基準を提案し適用することで、FRP 複合積層梁の終局強度およびその破壊モードの予測を試みる。

2. FRP 複合積層梁のモデル化

(1) 解析対象の曲げ試験概要

埼玉大学では図-1 に示すような I 型断面の FRP 複合積層梁に対して 4 点曲げ試験を行った。上下フランジ部の CFRP の積層比率を変化させて、計 3 パターンのモデルに対して曲げ試験を行った。各モデルのフラ

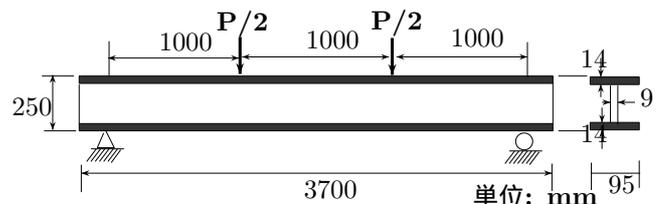


図-1 曲げ試験供試体

表-1 各積層材料の積層比率 (%)

	モデル	CF0°	GF0°/90°	GF±45°	GFCSM
フランジ	A52	52	10	13	25
	A33	33	29	13	25
	A14	14	48	13	25
ウェブ	全モデル	0	32	42	26

ンジ部とウェブ部の各積層材の積層比率は表-1 のとおりである。ここで表-1 にある 0° や ±45° といった値は、各積層材料において、梁の長手方向に対して繊維が向いている角度である。たとえば、モデル A52 のフランジ部では CF-0° が 52% となっているが、これは上下フランジ部において、長手方向に対して 0° (つまり長手方向) の方向に炭素繊維が配置された CFRP 層が、フランジ厚さに対して 52% (フランジ厚さが 14mm なので 7.7mm) 分だけ積層されていることを示している。実験に用いられた各積層材料の材料定数は表-2 のとおりである。

実験における各モデルの荷重変位関係は図-2 のようになる。すべてのモデルで線形的な変形から、ある荷重レベルで極めて脆性的な破壊を起こしている。また梁の剛性はフランジ部に用いられている高強度・高剛度で

表-2 各積層材料の平均材料定数 (実験)

	E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}
CF-0°	113000	7400	3200	0.32
GF-0°/90°(%)	24000	24000	3500	0.1
GF±45°(%)	11100	11100	10900	0.29
GF _{CSM}	10000	10000	3800	0.308

表-4 FEM 解析でモデルに与えた微視的な材料定数

	E_M (MPa)	ν_M	E_I (MPa)	ν_I	V_f (%)	a_3/a_1^*
CF-0°	3050	0.3	245000	0.3	46	500
GF-0°/90°	3550	0.3	76000	0.22	47	500
GF±45°	3550	0.3	76000	0.22	47	500
GF _{CSM}	3550	0.3	76000	0.22	49	1.6

* 繊維の形状比 ($a_1 = a_2 < a_3$ の楕円体)

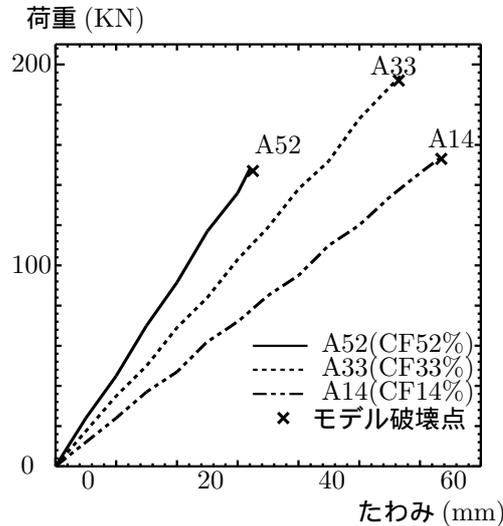


図-2 荷重変位関係 (実験)

表-5 巨視的材料定数の同定の結果

		E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}
CFRP-0°	FEM	113100	7400	3053	0.3
	実験	113000	7400	3200	0.32
GFRP-0°/90°	FEM	24020	23960	3461	0.13
	実験	24000	24000	3500	0.1
GFRP±45°	FEM	11000	11000	9870	0.51
	実験	11100	11100	10900	0.29
GFRP _{CSM}	FEM	10000	10030	3780	0.26
	実験	10000	10000	3800	0.308

れが特色でもあるように、母材と介在物それぞれの弾性係数とポアソン比、および介在物の体積比率、形状、向きといった微視的な材料定数を直接入力データとして、陽に与えることの出来るプログラムを用いて数値解析を行っている。しかし、埼玉大学の実験データとしてはFRP材料としての巨視的な材料定数しか明らかにされていない。そこで実験を精度よくモデル化するため、材料定数の同定を行う必要がある。本研究では森・田中理論および積層板理論を用いて材料定数の同定を行う。母材の弾性係数 E_M 、ポアソン比 ν_M 、介在物の弾性係数 E_I 、ポアソン比 ν_I 、体積比率 V_f 、介在物の形状 a_3/a_1 の微視的な材料定数に、それらを平均化した際の巨視的な材料定数が、表-2 に示した埼玉大学の実験で用いられた巨視的な材料定数と出来る限り一致するようなものを試行錯誤により選定し、入力データとして有限要素プログラムに与えた。ここで各積層材料モデルに与えた微視的な材料定数を表-4 に示す。さらに同定の結果として、この微視的材料定数より森・田中理論および積層板理論を用いて算出した巨視的材料定数と、埼玉大学の実験での巨視的材料定数を比較したものを表-5 に示す。

数値解析により得た各モデルの荷重変位関係を実験値と併せて図-3 示す。巨視的な材料定数を実験値に同定させてモデル化したこともあり、数値解析結果と実験結果との剛性はすべてのモデルでよく一致しており、埼玉大学の実験を精度良く有限要素モデル化できた。

3. FRP 複合積層梁の終局挙動予測

(1) 層間剥離基準の提案と適用

本研究では、埼玉大学の実験で観測された線形的な変形からの脆性的な破壊挙動を数値的にとらえたい。そこで、実験の終局状態観察 (表-3) で、すべてのモデルで確認された上フランジにおける層間剥離に着目し、

表-3 終局時に観測された破壊形式

モデル	観測された破壊形式 () 内はその発生箇所
A52	圧壊 (載荷点付近), 層間剥離 (上フランジ, スパン中央部)
A33	層間剥離 (上フランジ, スパン中央部)
A14	局部座屈 (ウェブ上部), 層間剥離 (上フランジ, スパン中央部)

ある CFRP 積層材料の積層比率が高いほど大きくなっている (モデル A52 > モデル A33 > モデル A14)。一方、梁の終局強度に関してはモデル A52 よりも CFRP 積層材料の積層比率の少ないモデル A33 の方が高くなっている (モデル A33 > モデル A52 ≈ モデル A14)。

ここで、各モデルの終局段階において観察された FRP 複合積層梁の破壊形式を表-3 に示す。各モデルによって破壊形式が異なり、モデル A52 とモデル A14 では終局段階において 2 つの破壊形式が観察されている。これらはメインの破壊モードと、それに伴い発生した副次的な破壊モードであると考えられる。しかし、図-2 に示したように、これらのモデルは線形的な変形挙動から急激に極めて脆性的な破壊を起こしているため、どちらがメインの破壊モードであるかを実験で視覚的に判断するのは困難であった。

(2) 複合材料有限要素解析

本研究では先に述べた FRP 複合積層梁の曲げ試験を対象として有限要素解析を行った。本研究では、そ

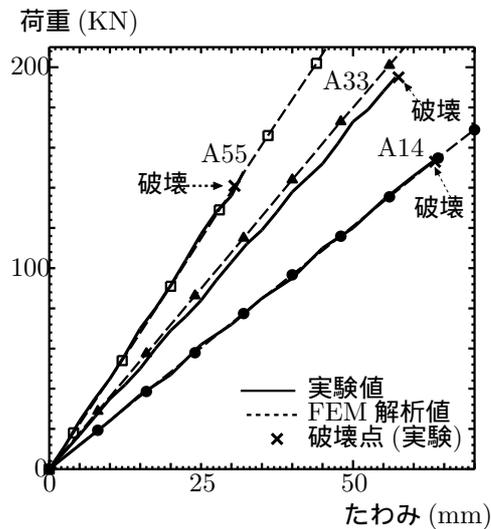


図-3 実験値と FEM 解析値の剛性比較

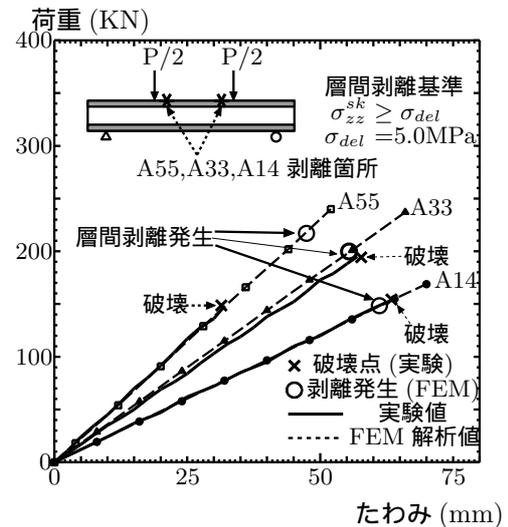


図-4 層間剥離発生の荷重・変形レベルと剥離発生箇所

この上フランジでの層間剥離が脆性的な破壊を引き起こすメインの破壊モードとして生じている可能性を検討する。FRP 複合積層梁のような各積層材料ごとに剛性が異なる場合、各層に発生する応力状態も異なる。この応力状態の違いにより、各層の層間に応力（層間応力）が生じる。

本研究では、フランジ部において最も剛性の差が大きくなる CFRP-0° 積層材料と GFRP-0°/90° 積層材料の間に、厚さ 0.02mm の極薄い要素を境界層として挿入する。そして、この挿入した薄い要素内の応力を層間に働く層間応力 σ^{sk} とみなす。

FRP 積層材はその特性上、積層板の面内方向に比べて面外方向の強度が弱くなる。そこで、積層板面外方向の層間応力 σ_{zz}^{sk} がある値に達した際に層間剥離が発生するとし、その応力の限界値を層間剥離強度 σ_{del} と呼ぶことにする。また、層間剥離は引張応力でのみ発生し、圧縮応力では発生しないものとする。以上のような層間剥離モデルを考え、各モデルについて、埼玉大学の実験の破壊点に相当する荷重段階での積層板面外方向の層間応力 σ_{zz}^{sk} を計算した。

表-3 に示したように、モデル A33 では破壊形式として上フランジの層間剥離のみが確認されている。数値解析の結果、実験の破壊点に相当する荷重段階において、モデル A33 に生じる積層板面外方向の層間応力 σ_{zz}^{sk} が最大となるのは上フランジ荷重スパン内であり、その値は 5.0MPa であった。これより、 σ_{zz}^{sk} が 5.0MPa に達した際に層間剥離が発生するという層間剥離基準を提案し、この層間剥離基準を各モデルに適用してみる。

各モデルにおいて、層間剥離強度 σ_{del} を 5.0MPa に設定した場合の、層間剥離が発生する荷重・変形レベルと剥離発生箇所を図-4 に示す。

図-4 に示すように、モデル A33 の破壊荷重を参考に層間剥離強度を 5.0MPa として剥離発生を予測した場合、モデル A33 では当然であるが、モデル A14 でも層間剥離の発生点と実験での破壊点の荷重・変形レベルがほぼ一致した。しかし、実験では上フランジのス

パン中央部付近で層間剥離が観測されているのに対し、数値解析では上フランジの荷重点付近で剥離が発生しており、この上フランジでの層間剥離現象をうまく捉えることが出来なかった。またモデル A52 では、層間剥離の発生点と実験での破壊点で荷重・変形レベルに大きなズレがある。

(2) 界面剥離基準の提案と適用

ここでは、各積層材料内部における母材と介在物の界面剥離が、解析対象である FRP 複合積層梁の終局強度を支配する破壊モードとして発生している可能性について検討する。前述のとおり本研究では、母材と介在物それぞれの弾性係数とポアソン比、および介在物の体積比率、形状、向きといった微視的な材料定数を直接入力データとして陽に与えることの出来る有限要素解析プログラムを用いて数値解析を行っている。そのため、解析結果として母材および介在物それぞれの内部の微視的な応力状態を計算することが可能である。そこで、介在物である繊維内部の積層板面外方向の応力 σ_{zz}^{fiber} がある値に達した際に母材と介在物の界面に剥離が発生するとし、その応力の限界値を界面剥離強度 σ_{deb} と呼ぶことにする。また、界面剥離は引張応力でのみ発生し、圧縮応力では発生しないものとする。以上のような界面剥離モデルを考え、各モデルについて、埼玉大学の実験の破壊点に相当する荷重段階での繊維内部の積層板面外方向応力 σ_{zz}^{fiber} を計算した。

数値解析の結果、実験の破壊点に相当する荷重段階において、モデル A33 に生じる繊維内部の積層板面外方向応力 σ_{zz}^{sk} が最大となるのは上フランジ荷重スパン内であり、その値は 6.2MPa であった。これより、界面剥離強度 σ_{deb} を 6.2MPa と設定し、 σ_{zz}^{fiber} がこの界面剥離強度に達した際に界面剥離が発生するという界面剥離基準を提案する。つぎに、この界面剥離基準を各モデルに適用してみる。

各モデルにおいて、界面剥離強度を 6.2MPa に設定

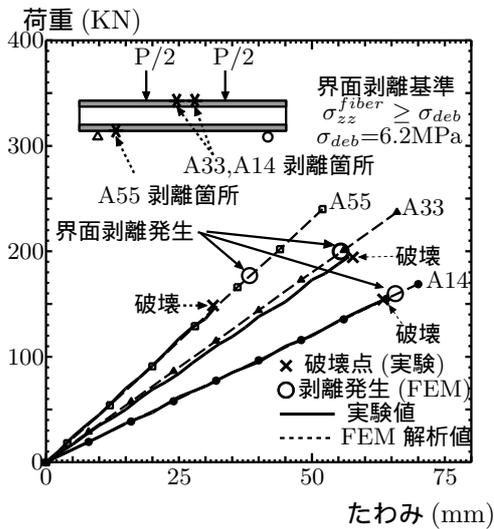


図-5 界面剥離発生の荷重・変形レベルと剥離発生箇所

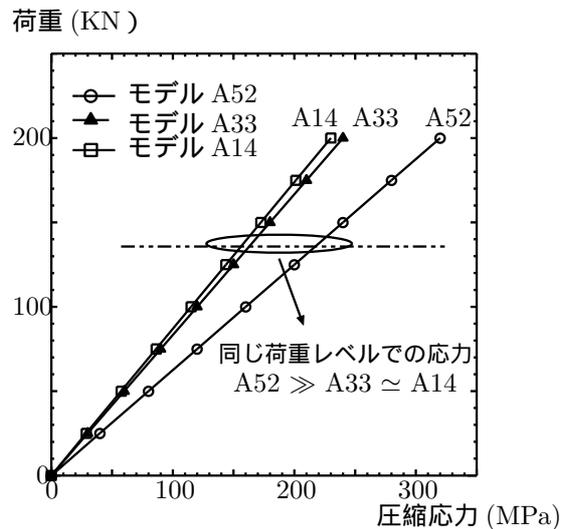


図-6 モデル A52 における載荷点付近の応力集中

した場合の、界面剥離が発生する荷重・変形レベルと剥離発生箇所を図-5 に示す。

図-5 に示すように、モデル A33 の破壊荷重を参考に、界面剥離強度を 6.2MPa として剥離発生を予測した場合、モデル A33 では当然であるが、モデル A14 でも界面剥離の発生点と実験での破壊点の荷重・変位レベルがほぼ一致した。また、これらのモデル A33、モデル A14 の界面剥離発生箇所は、上フランジのスパン中央部付近であった。実験の破壊段階において、層間剥離が上フランジのスパン中央部付近で観測されていることを考慮すると、これらのモデル A14 とモデル A33 では、FRP 複合積層梁の終局強度を支配する破壊モードとして上フランジ部に界面剥離が発生しており、その後派生的に層間剥離等を伴って破壊した可能性が考えられる。またモデル A52 では、層間剥離の発生点と実験での破壊点で荷重・変位レベルに大きなズレがあり、界面剥離発生箇所は下フランジの梁端部付近となった。

(3) モデル A52 の破壊モードの考察

ここでは、モデル A52 における終局時の破壊モードを検討するモデル A52 では、ここまで示してきた層間剥離モデルや界面剥離モデルを用いた終局挙動予測ではその挙動が捉えられなかった

表-3 に示したように、モデル A52 では他モデルと異なり、破壊形式として載荷点付近での圧壊が観察されている。この載荷点付近での圧壊は、上フランジ載荷点付近での強度の弱い積層板面外方向の応力集中に起因するものと考えられる。そこで、上フランジ載荷点における積層板面外方向の圧縮応力 σ_{zz} を計算した。

各モデルについて、縦軸に荷重、横軸に載荷点に加わる積層板面外方向の圧縮応力をプロットした荷重-応力関係を図-6 に示す。モデル A52 では他のモデル A33、モデル A14 と比べて、同じ荷重レベルにおける載荷点直下の積層板面外方向応力 σ_{zz} が相対的に大きな値となることが分かる。これより、モデル A52 では実験で確認されている 2 つの破壊形式の中で、載荷点付近で

の応力集中による圧壊がメインの破壊モードとして先に発生し、それに伴って上フランジの層間剥離が副次的な破壊モードとして発生したのではないかと考えられる。

4. まとめ

森・田中理論に基づく平均化手法を取り込んだ複合材料有限要素解析を行い、モデルに与える微視的材料定数を、その巨視的材料定数が実験でのものと一致するように適切に同定させることで、FRP 複合積層梁の曲げ実験を精度良く有限要素モデル化できた。

また、FRP 複合積層梁の終局強度およびその破壊モードの予測手法として、繊維内部の積層板面外方向応力に注目した界面剥離基準を提案し、CFRP 積層比率の比較的小さなモデルでは、終局強度を支配する破壊モードとして、界面剥離が発生している可能性について示せた。一方、CFRP 積層比率の大きなモデルでは、載荷点付近の応力集中による圧壊という破壊モードを生じる可能性を示せた。

参考文献

- 1) Nguyen, D.H., Mutsuyoshi, H., Asamoto, S. and Matsui, T.: Structural behavior of hybrid FRP composite I-beam, *Construction and Building Materials.*, Vol.21, pp.956-969, 2010.
- 2) Mori, T. and Tanaka, K.: Average stress in matrix and average energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metall.*, Vol.21, pp.571-574, 1973.

(2011 年 2 月 7 日 提出)