

異種材間接合における接着接合部シミュレーション

Simulation of Adhesively Bonded Parts for Multi-Material Bonding Structure

島 宮 智 弘*
Tomohiro SHIMAMIYA
古 沢 透 流*
Toru FURUSAWA

佐 藤 千 明**
Chiaki SATO
佐 藤 恵 一*
Keiichi SATO

横 井 栄一郎*
Eiichiro YOKOI

要 旨

接着接合部の破壊を伴う、完成車の衝突シミュレーションを行うため、粘着領域法と呼ばれる損傷力学モデルを接着剤部分に適用した。ひずみ速度依存性を考慮するため、幅広いひずみ速度に対応した動的引張り試験手法を構築した。

接着接合部シミュレーションに対して粘着領域法を用いた小規模なクーポンレベルから完成車の衝突シミュレーションを行い、これらの結果を構造全体の破壊挙動試験と比較し、良好な結果を得た。

ABSTRACT

In order to perform completed vehicle crash simulations involving the destruction of adhesively bonded parts, a damage mechanics model called a cohesive zone model was applied to the adhesively bonded parts. A dynamic tension-torsion testing method that supports a wide range of strain rates was constructed to take into account the strain rate dependency.

Simulations using cohesive zone model of adhesively bonded parts were performed at levels ranging from the small-scale coupon level to completed vehicle crash simulations. These results were compared with the results of full structure destruction behavior tests and exhibited a good correlation.

1. はじめに

現在、自動車のCO₂排出規制値が年々厳しくなっている。車体軽量化による車体走行エネルギーの低減は、CO₂排出量を改善するための有効な一手段である。方策の一つとして、従来用いられてきた鉄からの材料置換があり、比剛性に優れる非鉄金属やガラス繊維強化樹脂、さらに比強度にも優れる炭素繊維強化樹脂といった材料を適所に配した車体のマルチマテリアル化を進めることによる車体軽量化が期待されている。

その際に課題となるのが、スポット溶接などの鉄同士の接合に代わる異種材間の接合手法であり、その中で最も有望視されているのが、接着接合である。

接着接合は、これまでフロントガラス取り付け等に用いられている。車体設計に対する接着接合部の寄与度につ

いては、接着剤強度を下回る範囲に限定すると、連続体力学モデルを用いた静的シミュレーションにより予測することが可能である。しかし、接着部破壊を伴うシミュレーションを行う場合には、連続体力学モデルを用いて亀裂発生位置を特定した後に、そこからの亀裂進展を表現するための破壊力学モデルの適用が必要⁽¹⁾となる。このため、両方のモデルのカップリング計算により計算コストが増す。また、接着剤の主成分である樹脂材料は一般的にひずみ速度依存性が高いため、接着接合部を含む衝突シミュレーションを行うためには、接着接合部に発生するひずみ速度に対する考慮も必要である。

亀裂進展を扱うモデルの一つに、仮想亀裂閉口法 (Virtual Crack Closure Technique: VCCT)⁽²⁾があるが、亀裂発生位置にあらかじめ特殊な要素を配置する、すなわち、事前に別の応力解析等で亀裂が発生しうる位置を把握

* 四輪 R&D センター

** 東京工業大学

しておく必要があることと、亀裂の進展に応じて経路を特定するための解析メッシュ再作成によって解析時間が増大すること、の二つが大きな課題⁽³⁾である。

完成車衝突シミュレーションの精度を向上させることは、実衝突試験時の要件未達による手戻りを回避し、効率的な車両開発を行う上で必須である。本研究では、損傷力学モデルを用いることにより、連続体力学の枠組み内で、亀裂の発生から破断に至るまでを表現する。具体的には、接着接合部に適用する損傷力学モデルとして粘着領域法 (Cohesive Zone Model: CZM) を採用する。さらに、従来の試験規格ではカバーできないひずみ速度にも対応した材料物性取得試験手法を構築し、小規模なクーパーレベルから完成車の衝突シミュレーションと破壊挙動試験との比較検証を行うことで、本手法の有用性を確認することを目的とする。

2. CZM と材料パラメータ

CZM は、エネルギーを入力パラメータとして持ち、損傷を用いて剛性の低下を表現することで、連続体力学の枠組み内で亀裂の発生から進展、破断までを一度に扱える損傷力学モデルである⁽⁴⁾。Fig. 1 に、CZM 材料パラメータの代表的な定義の例を示す。

本研究では、変形と応力の関係が三角形で表現される CZM 材料パラメータの定義を用いる。図中の初期傾き K は接着剤の弾性率を接着厚さで割ったもの、頂点の高さ σ は亀裂発生応力、三角形の面積 G_c は亀裂が破断するまでに吸収する単位面積当たりのエネルギーを表す。これをエネルギー解放率と呼ぶ。この定義によって、接着部に掛かる応力が σ を超えるまでは弾性挙動を示し、 σ に到達した段階で亀裂が発生し、それ以降は亀裂が進展することによる剛性の低下によって線形的に応力が下がっていき、最終的に応力がなくなった時点で破断に至る、という接着部破壊までの一連の流れを表現できる。

次に、CZM で扱う亀裂進展のモード分類を Fig. 2 に示す。

CZM 材料パラメータは、Mode I の剥離 (Peel) と、Mode II のせん断 (Shear) について、それぞれ定義され

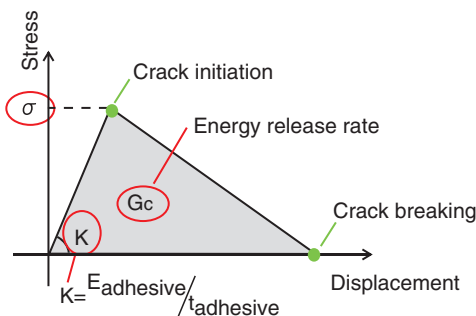


Fig. 1 Example of CZM parameter definition

る。またこれらが混合され、Mode I, II が複合的に加わる剥離現象 (Mixed Mode) の場合は、亀裂発生応力については式 (1)、エネルギー解放率については式 (2) を用いて定義される⁽⁵⁾。

$$\left(\frac{N}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{S}{\tau}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

$$G_{1c} + (G_{2c} - G_{1c}) * \left(\frac{G_{2i}}{G_{1i} + G_{2i}}\right)^\eta = G_{mc} \quad (2)$$

接着部のモデリングに CZM を用いる利点は、亀裂の発生や進展の計算に接着剤層厚み方向の詳細な応力分布を必要としないため、厚み方向の細かい要素分割と計算が不要となり、解析モデル規模の拡大が抑えられることである。また、陽解法においては最小要素長から決まる時間刻み幅も細かくならず済むため、衝突シミュレーションの解析負荷を低く抑えることができる。

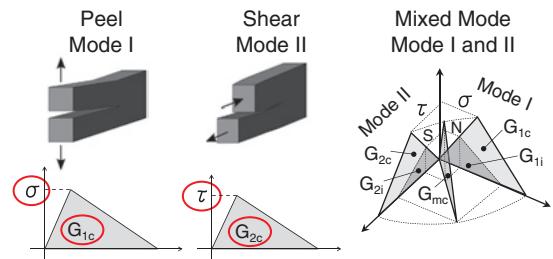


Fig. 2 Types of crack mode

3. 材料物性取得試験

3.1. 準静的材料物性取得試験

Table 1 に、2 章で示した三つのモードに対する試験規格⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾を示す。対象はいずれも準静的試験であり、接着に対する規格は Mode I の引張剥離 (Peel) のみだが、それ以外は複合材積層板の層間に対する規格を参照した。

上記試験規格においては、いずれも Fig. 3 に示すような 2 枚の板を接着剤で貼りあわせた試験片に対して荷重を負荷することで、荷重変位線図を結果として得ることができる。以下、各モードに対する試験概略とセットアップおよび得られた荷重変位線図を示す。

Fig. 4 および Fig. 5 に、Mode I に対応する Double Cantilever Beam (DCB) 試験の一例を示す。DCB 試験は、試験片に対してユニバーサルジョイントを介して上下に荷重を負荷することで、接着部に引張剥離荷重をかける試験である。

Fig. 6 および Fig. 7 に、Mode II に対応する End-Notched Flexure (ENF) 試験の一例を示す。ENF 試験は、試験片に直接 3 点曲げを掛けることで、接着部にせん断剥離荷重をかける試験である。

Table 1 Test standards for CZM parameters

Standard		Mode	Mode I Peel	Mode II Shear	Mode I and II Mixed Mode
Adhesive	ASTM		D3433-99(2012)	-	-
FRP Interlaminar	ASTM		D5528-13	D7905M-14	D6671M-13e1
	JIS		K 7086	K 7086	-

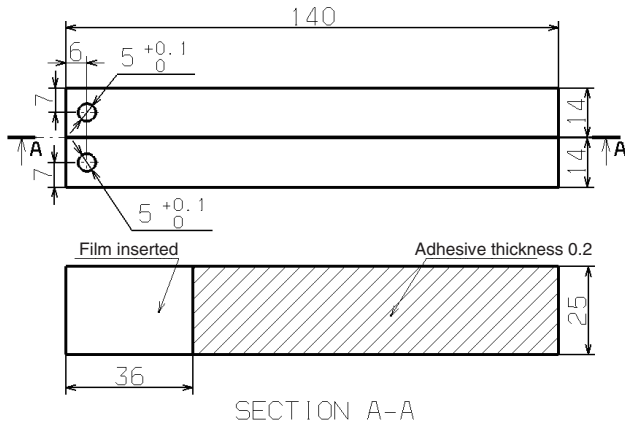


Fig. 3 Test piece drawing

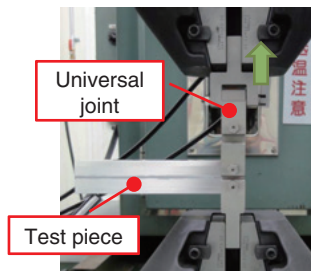


Fig. 4 DCB test setup

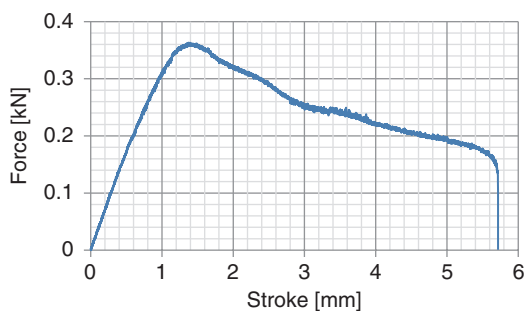


Fig. 5 Force-stroke diagram of DCB test

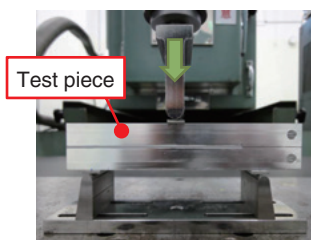


Fig. 6 ENF test setup

Fig. 8 および Fig. 9 に, Mixed Mode Bending(MMB)試験の一例を示す. MMB 試験は, 接着部に Mode I の引張と Mode II のせん断を同時に掛けることができ, またアーム長 c を調整することで引張とせん断の割合を任意に変えることが可能な試験である.

3.2. 動的 material 物性取得試験

ひずみ速度依存性の把握のため, 動的 material 物性取得試験手法を構築した. Fig. 10 に試験手法の概要を示す. 接着剤

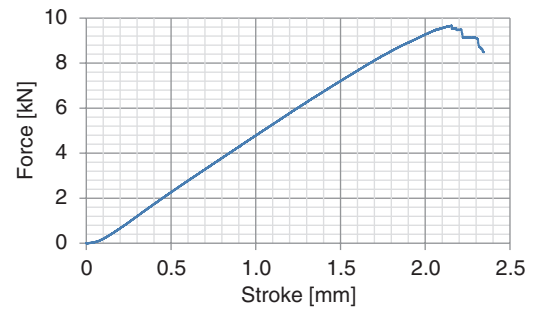


Fig. 7 Force-stroke diagram of ENF test

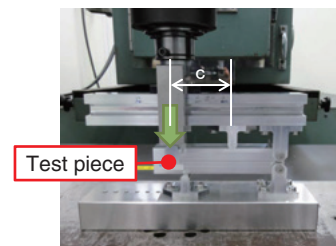


Fig. 8 MMB test setup

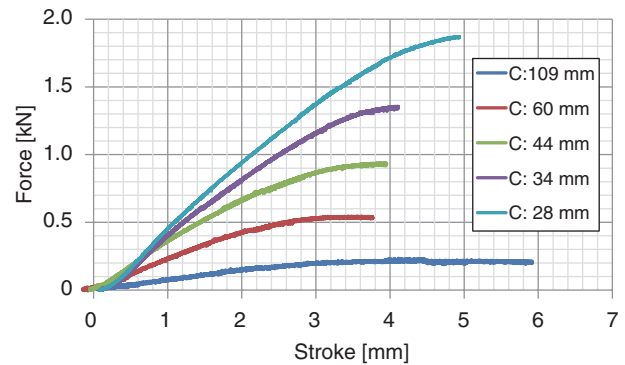


Fig. 9 Force-stroke diagrams of MMB test

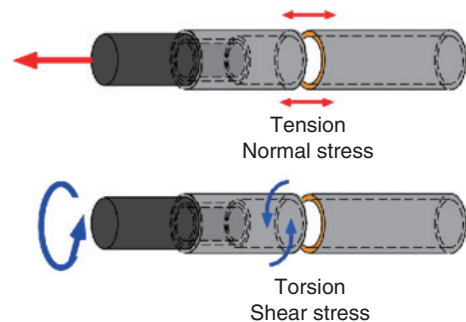


Fig. 10 Concept of loading

で貼りあわせた円筒状の試験片に対して、引張と振りを任意の割合で負荷することで、純粋な Mode I, Mode II からその中間である Mixed Mode までの試験を単一の装置により実施可能にし、負荷速度を上げることで高ひずみ速度にも対応する、というものである。

Fig. 11 に試験機全体を示す。ポンプから供給される油圧を、2 系統のサーボバルブを介して駆動ピストンに与えることで、試験片に掛ける引張と振りの荷重負荷開始タイミングを一致させることが可能⁽¹¹⁾である。

試験機上部のチャンバー内にセットされた試験片周辺には、Fig. 12 に示すように円筒軸方向と円周方向の変位を取得するギャップセンサがそれぞれ取り付けられており、ロードセルの値と合わせることで、Mode 別の応力変位線図を得ることが可能である。Fig. 13 に得られた応力変位線図の一例、Fig. 14 に Mixed Mode における引張応力とせん断応力の関係を示す。

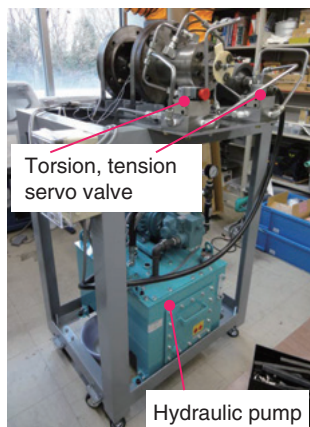


Fig. 11 Dynamic tension-torsion testing machine

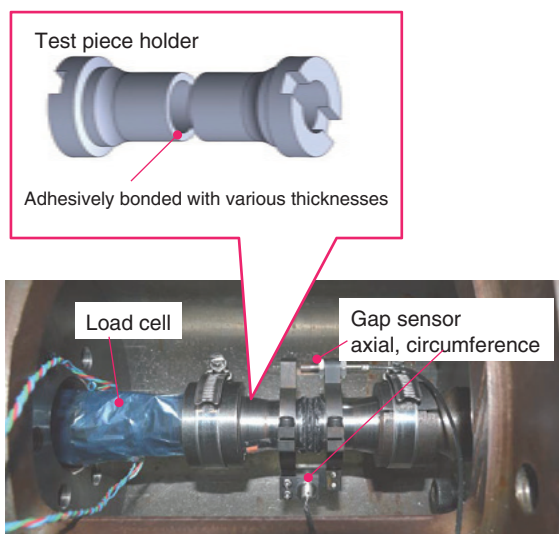


Fig. 12 Setup of test piece

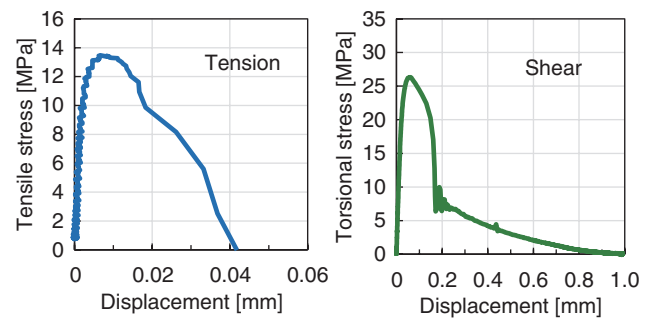


Fig. 13 Stress-displacement diagrams

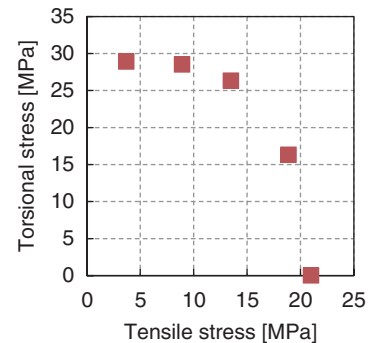


Fig. 14 Tensile-torsional stress diagram

4. CZM 材料パラメータ同定

Table 1 に示した各試験規格には、試験により得られた荷重変位線図からエネルギー解放率を直接計算する手法が掲載されているが、本研究では、材料物性取得試験と同等の試験片と拘束条件、荷重負荷条件を持つ解析モデルを作成し、そこから求めた解析の荷重変位線図が試験で得られた荷重変位線図と一致するまで CZM 材料パラメータの調整を繰り返すことで、パラメータを同定する手法を採用した。

4.1. 準静的 CZM 材料パラメータ同定

準静的 CZM 材料パラメータについては、DCB 試験の結果から Mode I, ENF 試験の結果から Mode II の CZM 材料パラメータを同定し、MMB 試験の結果から式 (2) の η を同定した。Fig. 15 に、二つの接着剤に対して同定された CZM 材料パラメータの例を示す。

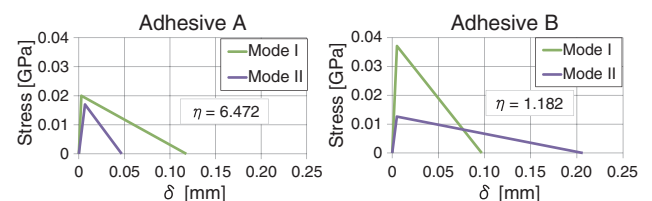


Fig. 15 Two examples of identified quasi-static CZM parameters

ここで示した接着剤はいずれもアクリル系だが、CZM 材料パラメータで表現すると三角形の大きさや、各々のパラメータが大きく異なることが分かる。

4.2. 動的 CZM 材料パラメータ同定

動的 CZM 材料パラメータについては、動的引張振り試験と同等の解析モデルを作成し、これらの結果から Mode I, Mode II, η の三つを同時に同定した。Fig. 16 に同定された接着剤 A の CZM 材料パラメータを示す。

先に同定した準静的 CZM パラメータに対して、特に Mode II のほうが大きく異なっている。

なお、エネルギー解放率は要素のサイズによって影響を受けることから、同じ CZM 材料パラメータを用いても接着面内方向の要素長が違えば解析結果が異なるため、同一解析モデル内、あるいは異なる解析モデル間においても、接着部をモデリングする際には要素長を統一している。

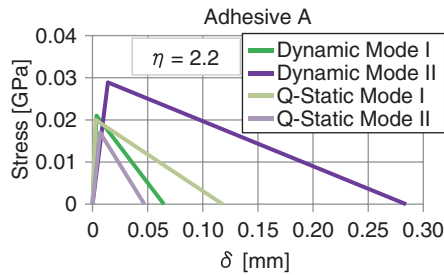


Fig. 16 Example of identified dynamic CZM parameters

5. 有用性確認

CZM による接着接合部シミュレーション手法の有用性確認を、五つのレベルに対する試験との比較検証により行った。各レベルに対して有用性を確認する項目を以下に示す。

- ・クーポンレベル: 準静的 CZM 材料パラメータ
- ・エレメントレベル: 動的 CZM 材料パラメータ
- ・サブコンポーネントレベル: 接合部動的破壊挙動
- ・コンポーネントレベル: 中規模構造全体挙動
- ・完成車レベル: 車体全体挙動

以下、各レベルでの比較結果について示す。

5.1. クーポンレベル: シングルラップシア試験

シングルラップシア試験は、一般的な引張せん断強度、すなわち接着部破壊荷重を接着面積で除した値を求める準静的試験である。Fig. 17 にシングルラップシア試験片の概要を示す。

4.1. 節で同定した準静的 CZM 材料パラメータの有用性

確認のため、接着剤 A, B を用いて、12.5 mm, 25 mm, 50 mm の 3 種類のラップ代に対するシングルラップシア試験⁽¹²⁾を行った。Fig. 18 に、試験と解析の結果比較を示す。

引張せん断強度の試験結果 (図中青) は、ラップ代 12.5 mm と 50 mm で比較すると、接着剤 A では引張せん断強度が 8.6 MPa から 8.0 MPa と変化が小さいが、接着剤 B では 10.5 MPa から 6.0 MPa と低下した。

また CZM を用いた解析 (図中赤) においては、ラップ代に対する引張せん断強度の変化の度合いを表現しており、いずれも試験結果との良好な一致を示している。

以上のことから、様々なラップ代を持つクーポンレベルでの接着接合部の強度予測に対して、準静的 CZM 材料パラメータの有用性を確認した。

5.2. エレメントレベル: ハット 3 点曲げ試験

4.2. 節で同定した動的 CZM 材料パラメータの有用性確認のため、落錘試験機を用いた動的ハット 3 点曲げ試験を行った。Fig. 19 に試験概要を示す。供試体は、炭素繊維強化熱可塑性樹脂 (CFRTP) で成形されたハット断面部材と平板を、フランジ部で接着接合したものである。接着には接着剤 A を用い、解析には 4.2. 節で同定した動的 CZM 材料パラメータを用いた。Fig. 20 に試験と解析の供試体破壊形態比較、Fig. 21 に得られた荷重変位線図の比較を示す。

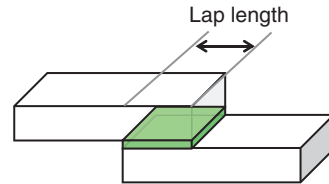


Fig. 17 Test piece for single lap shear test

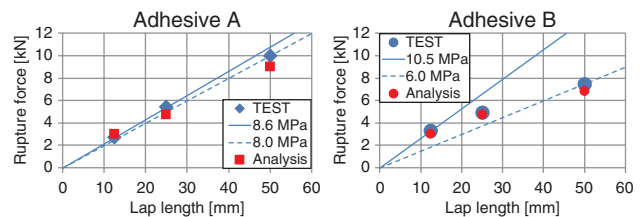


Fig. 18 Rupture force vs. lap length

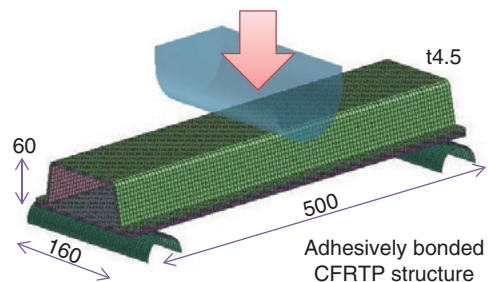


Fig. 19 HAT 3-point bending

Fig. 20 の比較から、荷重負荷とともにフランジ部の接着が剥がれることでハット部材と平板が分断され、ハット部材は破断する一方で平板は弾性変形を起こす、という破壊シーケンスが解析でも表現できていることが分かる。また Fig. 21 の荷重変位線図の比較から、初期ピーク荷重の解析誤差は 10% 程度であり、破壊シーケンスに応じた荷重変化もよく再現できている。

以上より、単純な接合部の破壊を含むエレメントレベルの解析に対して、動的 CZM 材料パラメータの有用性を確認した。

5.3. サブコンポーネントレベル:T-Joint 試験

サブコンポーネントレベルに対する確認として、落錘試験機を用いた動的な T-Joint 試験を行った。Fig. 22 に供試体概要を示す。アルミニウムのハット部材と平板をフランジ部で接着接合したものをさらに T 字状に組み合わせ、それらの交差部を L クリップで接着接合しているため、接着接合面が荷重負荷方向に対して様々な方向に配置されている。接着には接着剤 A を用い、解析には 4.2. 節で同定した動的 CZM 材料パラメータを用いた。

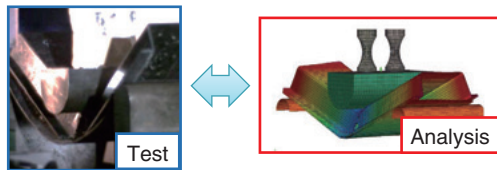


Fig. 20 Comparison of test piece destruction

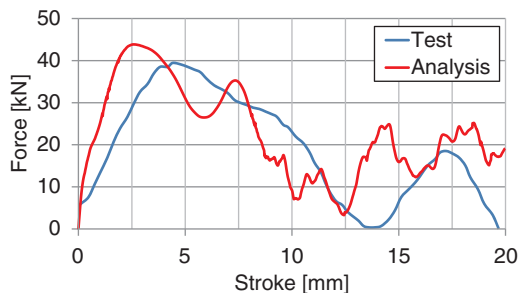


Fig. 21 Comparison of force-stroke diagrams

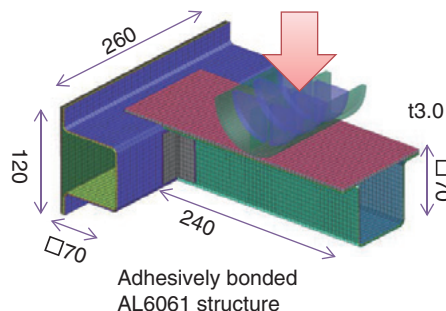


Fig. 22 T-joint test piece

Fig. 23 に供試体破壊形態の比較、Fig. 24 に得られた荷重変位線図の比較を示す。

Fig. 23 の比較から、接着部の破断が供試体先端部から起こり、根元に向かって進展していく動的な破壊シーケンスが、解析でも表現できていることがわかる。また Fig. 24 の荷重変位線図の比較から、初期ピーク荷重の誤差は 10% 以内であり、また破壊シーケンスに応じた荷重変化もよく再現できている。

以上より、CZM 材料パラメータが、複雑な接合部の破壊を含むサブコンポーネントレベルの解析に対しても、有用であることを確認した。

5.4. コンポーネントレベル:フロアサイドシル試験

コンポーネントレベルに対する確認として、フロアサイドシル試験を行った。供試体であるフロアサイドシルコンポーネントは、接着接合により多数の部品から構成されている。試験はボール衝突を模擬した準静的負荷試験であり、これに対応する解析モデルの結果と比較する。Fig. 25 に破壊形態の比較、Fig. 26 に得られた荷重変位線図の比較を示す。

Fig. 25 の試験結果より、フロア部の接着層剥離によりフロア板材が座屈を起こし、次にフロア部耐力の低下からサイドシル部に曲げが大きく加わり圧子直下で破壊を起こしたことが分かった。一方の解析結果でもこの破壊シー

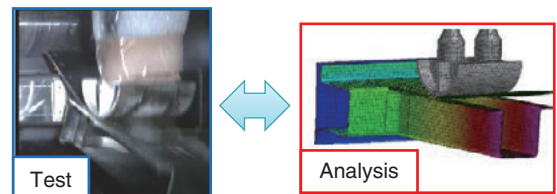


Fig. 23 Comparison of test piece destruction

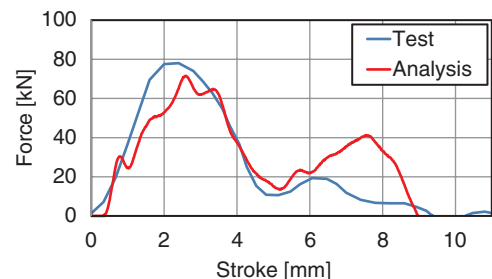


Fig. 24 Comparison of force-stroke diagrams

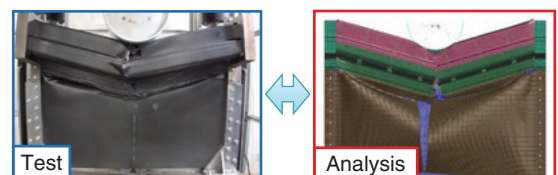


Fig. 25 Comparison of test piece destruction

ケンスがよく再現されており、破壊を伴う変形状態が試験結果とよく一致している。また Fig. 26 の荷重変位線図から、試験では接着層剥離によりフロア部耐力が低下した段階で荷重が急激に落ち込み、その後サイドシルの曲げにより残留強度を維持していたことが分かる。それに対し、剛体結合を適用し接着接合部が破壊しない場合の解析結果 (Analysis_RIGID) は、フロア部の接着層剥離を生じないため、フロア部耐力の低下が起こらずそのまま荷重が上がり続けており、試験結果と全く挙動が異なっている。一方接着接合部に CZM を適用した解析結果 (Analysis_CZM) は、フロア部耐力低下による荷重の落ち込みが再現されており、その後の残留強度もよい一致を見せている。このことから、実際に壊れる部分を解析上で精度良くモデリングし、適切なタイミングで破壊を表現することが、構造全体の挙動を的確に再現することを示した。

以上より、CZM 材料パラメータが、接着部破壊の有無により構造全体の破壊挙動が大きく変わりうるコンポーネントレベルの解析に対しても、有用であることを確認した。

5.5. 完成車レベル: SINCAP 試験

完成車レベルに対する確認として、接着接合部を含む車体への Side Impact New Car Assessment Program (SINCAP) 試験を実施した。使用した車体および試験内容の詳細については割愛するが、Fig. 27 に得られた荷重線図の比較を示す。

接着接合部に剛体結合を適用し接着部が破壊しない場合の解析結果 (Analysis_RIGID) に比べて、CZM を接着接合部に適用した解析結果 (Analysis_CZM) は、破壊シーケンスを含む車体全体挙動を精度よく再現でき、結果として荷

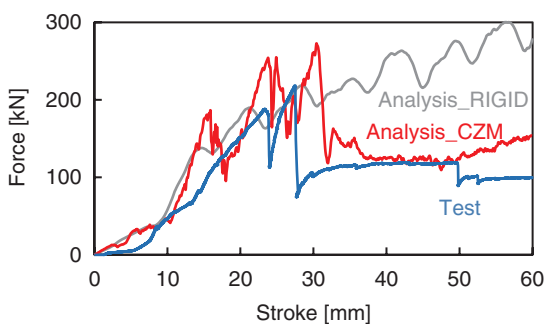


Fig. 26 Comparison of force-stroke diagrams

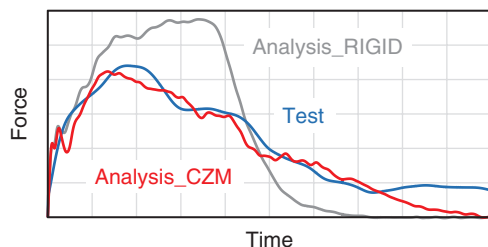


Fig. 27 Comparison of force diagrams

重線図の精度を向上させることができた。

以上より、CZM 材料パラメータが、接着部破壊やその他の破壊事象も複雑に絡む大規模な完成車衝突シミュレーションに対しても、有用であることを確認した。

これまでの結果より、小規模なクーボンレベルから大規模な完成車衝突シミュレーションに至るまで、CZM を用いた本シミュレーション手法の有用性を確認した。

6. まとめ

連続体力学の計算法に損傷力学モデルを用いる考え方から、CZM を用いた接着接合部衝突シミュレーションを実施した。引張振り試験機を用いた動的な材料物性取得手法を構築するとともに、物性取得試験結果から CZM 材料パラメータを同定し、解析を実行するまでのプロセスを構築した。

本手法の有用性確認を、小規模なエレメントレベルから大規模な完成車衝突シミュレーションまで実施した。いずれのレベルにおいても、亀裂の発生から進展、破断までを一気にシミュレートする CZM を用いることで、接着接合部の破壊を伴う全体構造挙動の再現性が向上し、良好な解析結果を得ることができた。

以上のことから、接着接合を含むあらゆるレベルの衝突シミュレーション、特に完成車の衝突シミュレーションのような大規模な解析に対しても、本手法が有用であることを示した。

参考文献

- (1) Banea M. D., da Silva, L. F. M.: Adhesively Bonded Joints in Composite Materials: an overview, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 223 (2009)
- (2) Rybicki, E. F., Kanninen, M. F.: A Finite Element Calculation of Stress Intensity Factors by a Modified Crack Closure Integral, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 9, p. 931-938 (1977)
- (3) Raju, I. S., Crews, J. H., Aminpour, M. A.: Convergence of Strain Energy Release Rate Components for Edge-Delaminated Composite Laminates, NASA TM-89135 (1987)
- (4) Camanho, P. P., Davila, C. G., Ambur, D. R.: Numerical Simulation of Delamination Growth in Composite Materials, NASA TP-2001-211041 (2001)
- (5) Camanho, P. P., Davila, C. G.: Mixed-Mode Decohesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Materials, NASA TM-2002-211737 (2002)

- (6) ASTM D3433-99(2012): Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints (2012)
- (7) ASTM D5528-13: Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International (2013)
- (8) JIS K 7086: 炭素繊維強化プラスチックの層間破壊靱性試験方法 (1993)
- (9) ASTM D7905M-14: Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International (2014)
- (10) ASTM D6671M-13e1: Standard Test Method for Mixed Mode I – Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International (2013)
- (11) Furusawa, T., Shimamiya, T., Yokoi, E., Sato, K., Hattori, H., Murakami, S., Sato, C.: Evaluation of Critical Fracture Energy of Adhesively Bonded Joints for Carbon Composites under Combined-Mode High-Strain Rate Loadings, ECCM16 Conference Proceeding (2014)
- (12) ASTM D1002-10: Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), ASTM International (2010)

■ 著 者 ■



島宮 智弘



佐藤 千明



横井 栄一郎



古沢 透流



佐藤 恵一