

# 疲労入力・接合評価技術の新展開



## 自動車技術会 シンポジウム

岸 義幸 (東京都市大学大学院 総合理工学研究科 機械専攻)

稲村 香織里 (東京都市大学大学院 総合理工学研究科 機械専攻)

### 1. はじめに

2021年11月26日(木)にNo.12-21 シンポジウム「車体軽量化と信頼性を支える疲労入力・接合評価技術の新展開」が開催されました<sup>(1)</sup>。本シンポジウムは、自動車技術会の疲労信頼性部門委員会が企画する、車体構造の信頼性に活用できる新たな技術を提案するための有意義な議論の場となっており、入力関係では、「汎用波形に向けた入力波形と車体ダメージに関する新たな考察」、耐力関係では、「CFRPの採用や、接着の適用拡大に向けた疲労評価技術」についての講演がありました。シンポジウム当日は企業の方のみならず学生の参加も見受けられました。

私は、大学院で自動車関連部品の構造に関する研究を行っており、専門分野と近い議題の講演があったり、軽量化や接合評価について更に知識を深めたいと思い、今回参加させていただきました。(稲村)

以前参加した自動車技術会フォーラムのシンポジウムにおいて、車体の最新技術の一つに接着剤を用いた接合技術に関するお話があり、そこで接合についての最新の動向に興味を持ち、今回参加させていただきました。(岸)

### 2. 講演内容

#### 2-1. 基調講演1「有人宇宙活動における安全の確保と確実なミッション達成を実現するために」

講演：白井 達也氏 (宇宙航空研究開発機構)

宇宙航空研究開発機構(JAXA)での有人宇宙活動として、国際宇宙ステーション(ISS)での日本実験棟である「きぼう」では、地球では得られない微小重力や高真空、放射線などの宇宙環境での実験や観測が行われています。また、ISSにクルーを輸送するロケットや、貨物を輸送する新型の宇宙ステーション補給機を開発しているとのことです。宇宙での安全確保のために、ハザードの要因の識別や除去を行うのはもちろんのこと、安全対策を取り入れ有効性を検証したり、第三者が安全性の確認を行っているとのことです。また、宇宙での確実なミッション達成のために、信頼性の解析や試験を行い、それを設計にフィードバックすることで信頼性を確保してい

るとのことです。それだけでなく、宇宙では放射線や打ち上げ時などの過酷な使用環境が考えられるため、材料工程や電子部品の管理、品質保証活動を徹底しているとのことです。新しい宇宙での有人活動に向けて、月および火星に向けた中継基地を製作し、有人での月探査や火星探査を行うゲートウェイプログラムが検討されているとのことです。この計画にあたっては、日本は機器の提供や物資補給を行うことが予定されているとのことです。また、ISSの運用は継続され、今後商用利用が進む傾向にあるため、これまでの知見を活かし更なる安全確保へ取り組み、新しい宇宙環境条件へミッション達成の手法を更新しつつ取り組んでいるとのことです。

宇宙での安全確保やミッション達成の実現に対する考え方やプロセスは、部品や車の構造検討を行う上での考え方に似ているのではないかと感じました。様々な面から評価できるような検討を研究活動でも行っていきたいと思いました。



図1 国際宇宙ステーション(ISS)<sup>(2)</sup>

#### 2-2. 講演1「有汎用波形作成手法に関する一考察～車両加振実験と上下2自由度系数値シミュレーションの相関～」

講演：八木 淳史氏 (トヨタ車体株式会社)

前報では、特定周波数やランダム波形と1自由度モデルの相関について報告がありましたが、今回は実際の自動車の挙動を考慮し、ばね下・ばね上質量の2自由度モデルを用いて正弦波変位を入力したときの、加振機の変位、ホイール6分力計の各成分、

ばね下の加速度、ばね上加速度、サスペンションストローク、ショックアブソーバの荷重の6箇所の計測を行い、ばね下・ばね上の各伝達力の実験値と理論値、数値シミュレーション値を比較したそうです。実験結果から求めた伝達力を変位入力振幅で除した振幅倍率と理論値においては、ばね下共振域とばね上共振域以外の部位で同様の傾向を示したそうです。ばね下共振域とばね上共振域については、減衰係数が変化するショックアブソーバの非線形特性の影響が考えられ、実際のストローク速度を考慮し2種類の等価減衰係数を使い分けることで理論値は実験値により近づくことが分かったそうです。実験値と数値シミュレーション値においては、同様の傾向を示したため、ショックアブソーバの非線形特性を考慮すれば、数値シミュレーションによる解析により振幅倍率の傾向が推定可能であることが分かったそうです。実際の車体設計においては、艤装品に発生する慣性力や車体へのねじり入力の考慮が必要になり、ばね上慣性力の絶対値が重要となると考えられます。路面面波形パワースペクトル密度(以下、路面 PSD)により分類を行うと、傾き(waviness)によっては絶対値が大きく変化したため、傾き違いが重要になることが分かったそうです。また、ランダム路面波形においても、路面 PSD 傾き違いで応答ダメージに差があることから、ばね上慣性力の累積ダメージを考える際は傾きが重要になることが分かったそうです。

### 2-3. 講演 2「有汎用波形作成手法に関する一考察 ～路面入力による車両挙動を考慮した 市場路面分類の検討～」

講演：中村 明史氏

(三菱ふそうトラック・バス株式会社)

前報「3.有汎用波形作成手法に関する一考察～車両加振実験と上下2自由度系数値シミュレーションの相関～」において、路面 PSD の傾きが大きくなるとばね上ダメージも同様に大きくなる傾向があり、車両全体のダメージを考えるには路面 PSD の傾きについて注意する必要があることについて報告がありましたが、今回は実際の計測データから路面 PSD を推定し、車両に与えるダメージの影響を調査したそうです。実際の計測データは高速道路の走行データの中から、エンジンの振動の影響を受けない後輪の計測データを利用し、路面 PSD を推定したそうです。推定した3ルート of 路面 PSD の近似値と、ISO8608 で規定されている路面分類について、概ね A ランク(極良路)に該当することが分かったそうです。一方で、一定の値以下での領域では、B ランク(良路)へと変化しており、実際の道路は ISO8608 の路面分類では表現しきれないことが分かったそうです。また、ばね上加速度ダメージにおいては、路面 PSD の

傾きと相関があることが分かり、市場の耐久信頼性目標設定のために考慮すべき因子であることが分かったそうです。さらに、既報の汎用波形作成手法で路面 PSD の傾きによる市場のダメージの違いについて検討したところ、ガウス型路面と非ガウス型路面では、非ガウス型路面の方がダメージが大きくなるということが分かり、特に非ガウス型路面の中でも、群遅延時間分布の標準偏差の設定によってもダメージが異なることがあるそうです。よって、同じ PSD から作成される種々の路面を組み合わせる必要があることが分かったそうです。実際に作成した路面を組み合わせさせたことによって、市場より近いダメージ比になっており、路面 PSD の傾きが分かれば、市場を想定した路面波形を作成できる可能性があることが分かったそうです。

有汎用波形作成手法に関する一考察の講演より、実際の事例を再現する場合は様々な因子を考慮して検討していく必要があると知見を得ることが出来ました。また、波形やランダム振動について、専門外のことも知る事ができ、良い経験となりました。

### 2-4. 基調講演 2「E-ディフェンスの施設運用と 評価・開発実験での利用状況について」

講演：梶原 浩一氏 (防災科学技術研究所)

E-ディフェンスと呼ばれる実大三次元振動破壊実験施設は、東日本大震災で被害を出した長周期・長時間地震の再現が可能な世界最大の震動台で、重さ1200トンの構造物を震度7の地震動で壊れるまで加振可能な実験施設となっています。実用例として、古い木造住宅の地震に対する強さや耐震補強の効果を確かめるため木造住宅の耐震補強の実験や、遮水シートの敷設形態が耐震性に及ぼす影響や耐震性能評価手法の開発に資するデータの収集をするためにため池堤体の実験を行っているとのこと。また、現在行われている研究として、建物の外装材によるセンシング技術があり、建物のカーテンウォールや窓枠などの部材をセンサシステムとして利用することで、揺れの大きさや被災状況を見える化する工夫を検討しているとのこと。現在、大型耐震実験施設の共同研究・施設貸与等による共用促進を行っていることに加え、実験データを公開しており誰でも利用が可能だということ。③。

特に東日本大震災以降、これまで以上に地震災害に対する国民の警戒は強まっており、各種建造物の耐震性が見直しや高い耐震性を持つ建造物の設計が求められているように感じます。地震の多い日本だからこそ、このような施設で得られる貴重な知見を世界に向けて今後たくさん発信し、地震災害などによる被害者をより少なく抑えられるような世の中になってほしいと強く感じました。



図2 E-ディフェンス外観<sup>(4)</sup>

## 2-5. 講演3「車体構造の評価を目的とした CFRP 試験体の提案」

講演：木村 敬一氏（本田技研工業株式会社）

今後採用が拡大すると見込まれる CFRP を用いた車体構造に着目し、基本となる実構造の接合部疲労特性を把握するための実構造模擬試験体を検討したそうです。疲労強度上の最弱部となるのは接合部であることから、本活動では骨格の主断面に CFRP を用いる構造の接合部に着目して検討を行うこととしたそうです。具体的な対象部位として、閉断面構造内の接合部の評価のためにフロントルーフレール、閉断面構造同士の接合部の評価のためにセンターピラー上部の結合部を選定し、それぞれの構造を模擬した片ハットねじり部材および I 字曲げ部材に決定したそうです。試験体の詳細仕様として、部材の板厚を従来スチール構造と剛性等価となるよう調整したほか、主接合である接着強度の安定性ならびに疲労試験における亀裂発生部位の特定の容易さを考慮した接合面の構造を決定したそうです。今後は今回の検討に基づき、実際に試験体を作成、疲労試験を実施することで CFRP 構造の疲労特性の把握に繋げていくとのことでした。

車体の軽量化に伴い CFRP に注目が集まっていることは理解していたものの、使用材料をスチールから CFRP にシフトすることで接合部において多くの課題が存在していることがよくわかりました。これまでスチール製の車体に用いられていた抵抗溶接ができない CFRP 材の接合には形状保持や接着厚さの安定のため、接着剤による接合に加えてリベットなどの機械接合が併用されていたり、接合強度の安定のためリベット打鉋面と接着面を分けたりなど、実構造物にはたくさんの工夫が施されていることを強く感じました。またその工夫を簡略化した模擬試験体に落とし込む考え方は他の構造物で検討する上でも参考となると感じました。今後実際に作成した試験体で疲労試験を行うことで得られる疲労特性との妥当性にも注視していきたいと思いました。

## 2-6. 講演4「接着接合における疲労破壊メカニズムの考察」

講演：巽 明彦氏（神戸製鋼所株式会社）

接着継手の疲労破壊におけるメカニズムをより深く考察するために、アルミ材を被着体として疲労試験中の歪変化からの亀裂進展状況への考察、接着端部のフィレット形状や接着剤内のフィラーの影響などを検討していました。薄層凝集破壊している接着剤は疲労試験中の剛性変化よりき裂発生が遅く、き裂進展速度が速い可能性が示唆されたそうです。また CAE 解析の結果、端部形状が応力集中位置に影響することが判明した為、接着剤種類の差を正確に調査するには端部形状を制御する必要があることが分かったそうです。さらに接着剤中のフィラーが接着剤内部での応力集中の原因となり、大きなフィラーを含む接着剤は凝集破壊し易い可能性が想定されたそうです。本検討より、各接着剤による破壊形態の特徴やそれによる強度への影響が明確になると共に、気を付けなければならないバラツキ要因の影響について明確となったとのことでした。今後、端部形状を制御したより精緻な接着疲労試験において、断面観察などにより検証を進めていくとのことでした。

車体開発などにおける疲労破壊というと、マクロな視点でのメカニズムの究明などのイメージを強く持っていました。しかし今回は接着剤の疲労破壊のメカニズムということで、車体構造の一部にはなっているものの分野としては化学に近く、ミクロな視点からの考察も盛り込まれていました。特に接着剤内部に存在する大きなフィラーは応力集中を引き起こす原因となる可能性があるなど、マクロな視点からの考察ではわからないような検討でとても興味を持ちました。

## 2-7. 講演5「Fe/Al 異材接着における被着体剛性の影響」

講演：川邊 直雄氏（JFE スチール株式会社）

鋼板とアルミ合金板の異材接着を対象に、疲労特性調査の前段階として、複数の板厚の組み合わせによる鋼板-アルミ接着の静的強度試験と数値解析を実施していました。実験を行ったところ、被着体と接着剤の界面を破壊起点とした凝集破壊が生じたそうです。破壊は鋼板側から優先的に起こっており、その傾向は異なる板厚の板組と比較して同じ板厚の板組で顕著だったそうです。また破断後の試験片の反り形状は曲げ剛性の低いアルミ板材側で大きく、面外曲げ変形が相手材によって抑えられるため、異種板組の静的強度は高強度となったと考えられるとのことでした。次に数値解析において、接着層端部のひずみが鋼板側で大きい結果となっていたことか

らも、実験で鋼板側から優先的に破壊が生じた一因である可能性が示されたとのことでした。また接着層端部近傍の被着体側の相当塑性ひずみはアルミ材側で大きい結果となったそうです。これは接着層端部近傍で発生する引張ひずみを被着体がより多く受け持つため、結果として接着層へのひずみ集中を抑えることができたと考えられるとのことでした。本検討により、鋼板-アルミの異材接着接合継手における静的強度の特性を明らかにすることができたため、ワーキンググループでは今後、評価対象を疲労強度特性として、引き続き異材接着接合継手の強度特性の調査を進める予定だということでした。

こちらでは被着体の剛性に着目した検討となりました。異材接着時における破壊起点や静的強度の変化を、曲げ剛性の違いや接着層端部およびその近傍の被着体側のひずみの特徴から予測することができる可能性があるということで、異種材料の相対的な特徴から破壊の起こり方を予測することができるのではないかと感じました。マルチマテリアル化が進む現在の車体開発においては、異なる材料の部材接着に関する知見の重要性は日々強まっているように感じます。今後は疲労強度について検討を進めるとのことです。様々な強度特性の解明に注視していきたいと思いました。

### 3. まとめ

当初は車体技術に関する疲労や接合について興味をもって本シンポジウムに参加しましたが、基調講演では地震といった自然災害や宇宙といったスケールの大きく見える話の中にある、疲労や接合に関する技術や考え方を聞くことができました。またマルチマテリアル化の進む車体部品を開発していく上で各社で土台固めが進んでおり、今後の技術の動向についても注目していきたいです。

### 4. 参考文献

- (1) 自動車技術会：No.12-21 シンポジウム「車体軽量化と信頼性を支える疲労入力・接合評価技術の新展開」, <https://www.jsae.or.jp/sympo/2021/no12.php> (accessed: 2021/12/22)
- (2) NASA: International Space Station, [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/index.html) (accessed: 2021/12/22)
- (3) 防災科学技術研究所：データ公開, [https://www.bosai.go.jp/hyogo/asebi/dataopen\\_1.html](https://www.bosai.go.jp/hyogo/asebi/dataopen_1.html) (accessed: 2021/12/27)
- (4) 防災科学技術研究所：E-ディフェンス, <https://www.bosai.go.jp/hyogo/> (accessed: 2021/12/27)