

最近の車両の研究開発の話題

車両制御技術研究部

部長 小笠 正道

1. はじめに

鉄道総研では今期 5 年間の中長期基本計画である Research2010 に基づき活動を進めており、平成 24 年度はその 3 年目に当る。研究開発の目標として、「安全性の向上」、「環境との調和」、「低コスト化」、「利便性」の 4 つの大きな柱があり、車両関係では「安全性の向上」と「環境との調和」に重点的に取り組んでいる。本稿ではその中から基礎的な検討を軸とした最近の研究開発成果の一部として、側面からの荷重に対する車体強度特性評価、高熱伝導性有機材料を用いた半導体素子の放熱部材の開発、直流電車帰線電流の低周波成分予測手法の構築例について紹介する。

2. 側面からの荷重に対する車体強度特性評価⁽¹⁾

これまでも万一の事故時に乗客・乗員の被害を軽減するため、車両の衝突安全に関する技術開発自体は行われてきたが、車体側面からの荷重に対する車体強度に関する研究はほとんどなされていなかった。

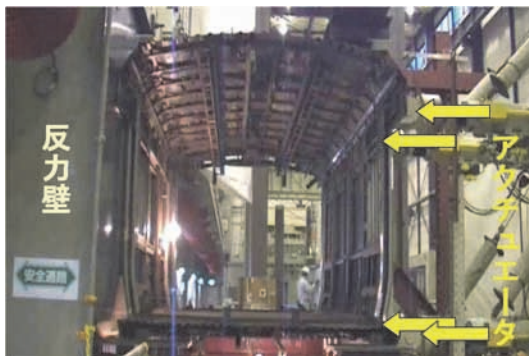
そこで鉄道総研では、裾絞り構造の標準的なステンレス鋼製車両を対象として、中間車を模擬した実物大部分車体を用いて、静的圧縮試験および落錘式衝撃試験を実施した。車体の変形形状や荷重－変形量特性等の側面強度特性データを取得し、各試験と同条件下での FEM 解析による再現を試みた。その結果を基に側面衝撃時の 1 車両の挙動評価手法を開発することとした。

2.1 静的圧縮試験による車体側面強度特性と FEM 解析による再現

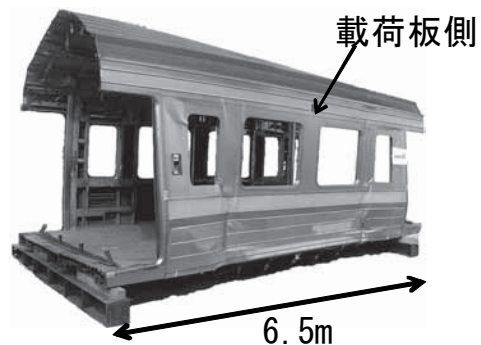
裾絞り構造の経年ステンレス鋼製車両の窓部およびドア部を中心とした部分試験体を切り出し、反力壁と載荷板の間に試験対を設置し、載荷板を油圧シリンダで側面から平行に押し付けるように、準静的に載荷した (図 1)。

その結果、側構体は載荷板によって平面状に変形し、屋根は上方に膨らみ、台枠については横梁が下方方向に座屈した。また、静的圧縮試験に相当する FEM 解析を実施した。FEM 解析による変形形状、荷重と変形量の関係についての実測結果と FEM 解析結果の例を図 2 に示す。

これらの検討結果から、スポット溶接部の破断強度が車体の圧縮破壊特性に大きく影響していることが分かった。



試験状況 (平行条件)



試験後の変形状況

図 1 静的圧縮試験における試験状況と試験後の変形状況

2.2 落錘式衝撃試験による車体側面強度特性

落錘試験装置を製作して、台座上に試験体を横向きに設置し、落下高さが 5m となる載荷板を自由落下させて速度約 10m/s で衝撃させた。

衝撃後の変形状況を図 3 に示す。台枠は主に載荷板寄りの横梁端部が座屈し、側梁と横梁および横梁と床板を結合するスポット溶接部が破断した。屋根は上方に膨らみ、タルキと長桁を結合するスポット溶接部が破断した。

さらに 2.1 節で検討に用いた数値モデルを用いて衝撃試験結果の検証を実施した。時間に対する荷重の関係について、実測結果と FEM 解析結果を図 4 に示す。試験体側面との衝突後、最大荷重 2000kN 程度となるなど、ほぼ一致した。

2.3 FEM 解析による側面衝撃の評価の例

上述の実測と FEM 解析の一致を基に、部分車体数値モデルの車端部重心位置に質量を付加し、部分車体の両端と結合して拘束することにより、1 両全体の挙動を模擬できるモデルを構築した。

挙動評価の一例として、この部分車体モデルが 3m 幅の剛体壁に側面から速度 30km/h で衝突する場合を解析した。その結果、車体は剛体を巻き込むように変形した後、スプリングバックが発生した。ドアフレームの内側にある戸袋内柱間を室内幅と定義すると、衝突によって室内幅は衝突前の 90% となった。

この例では、このような衝突条件下においては、衝突による生存空間の減少よりも、乗客が車内設備等に衝突（2 次衝突）する挙動評価が重要な検討課題になると考えられる。

このように、車体の変形挙動について大凡の傾向を把握し、安全性評価および安全性向上のための対策を検討し得るツールを構築した。

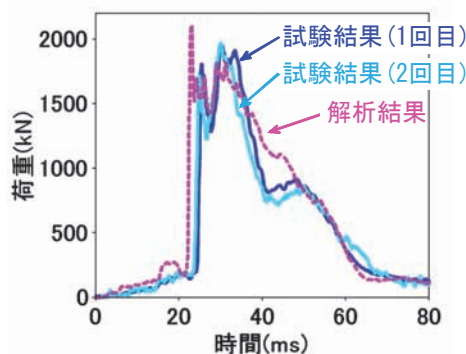


図 4 落錘式衝撃試験における実測結果と FEM 解析結果

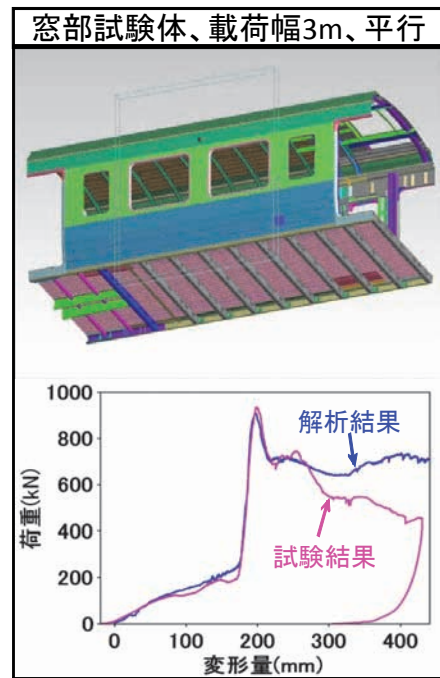


図 2 静的圧縮試験における実測結果と FEM 解析結果

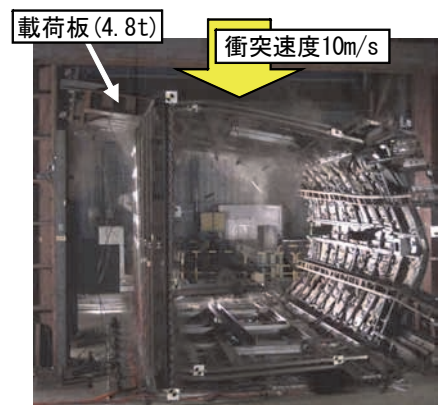


図 3 落錘式衝撃試験後の試験体

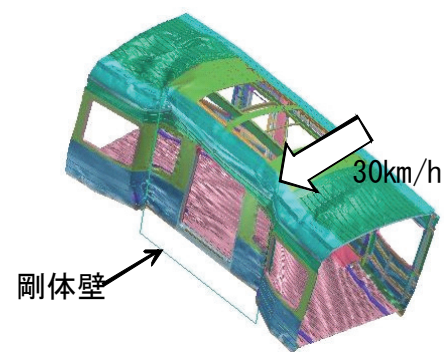


図 5 速度 30km/h での側面衝突時におけるドア付近の変形状況 (FEM 解析による評価例)

3. 高熱伝導性有機材料を用いた半導体素子の放熱部材の開発⁽²⁾

IGBT 素子等をスタックに組む場合、現在はパワーモジュールをアルミ等で出来た放熱フィンにエポキシ系絶縁樹脂を用いて接着しているが、電気絶縁性を有する材料は一般に熱伝導率が低い。パワーモジュール内部も含め、パワーモジュールから接着剤を介した冷却フィンまでの熱抵抗を小さくできれば、接着面積が同一の場合に冷却フィンを通した冷媒（空気）への移動熱量が増加し、十分な冷却が可能となる。逆に同じパワーモジュール温度で良ければ、冷却フィンの小型化が可能となる（図 6）。

近年出現してきた低熱膨張線材である PBO（Poly Para-phenylene Benzo-bis-oxiazol）繊維は方向性熱伝導性能を有する絶縁材である。IGBT スタック構成の中で熱抵抗の高い、IGBT モジュールと放熱フィンの接着面に対し、現在使用されているコンパウンド接着剤に代えて、試行錯誤を経て開発した PBO 繊維を強化繊維とした接着シートを開発した（図 7、表 1）。繊維は起毛化を施し、厚さ $150\mu\text{m}$ から $200\mu\text{m}$ で繊維用はさみ等にて裁断可能である。

開発した接着シートを 3300V-1200A の IGBT スタックを用いた直流 1500V 対応の実機チョップに適用した。負荷電流 250A にて通電した結果、既存のコンパウンド材に比べてモジュールと放熱フィンの温度上昇の差が約 2 倍となり、放熱性能の改善には至らなかった。

この原因はシート薄膜化が現時点での製造上の限界に達しているためである。既存のコンパウンド接着剤に比べて開発した接着シートの熱抵抗値が約 3 倍となっていることが分かった。

そこで、シート厚さを $70\mu\text{m}$ にして放熱シミュレーションを行ったところ、試験結果に比べて最高温度を 10°C 以上低減できる結果となった（図 8）。

今後うまく薄膜化できれば、現状と遜色ない温度上昇に抑制できることが明らかになった。

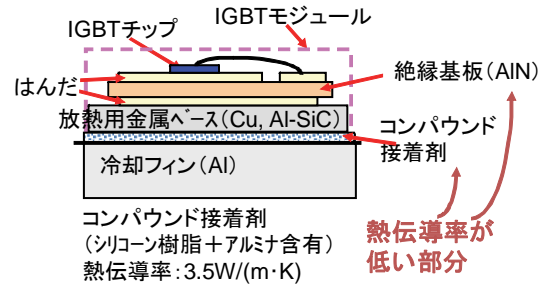


図 6 現状 IGBT の放熱構造



図 7 開発した PBO 繊維による高放熱接着シート

表 1 PBO 繊維接着シートの仕様

・繊維：PBO（ザイロン）起毛処理
・樹脂：エポキシ（半硬化・プリプレグ状態）
・寸法：210×160×0.2mm
・熱伝導率（キセノンフラッシュ法測定） （厚さ方向）0.781 [W/(m・K)] （面方向）10.4 [W/(m・K)]

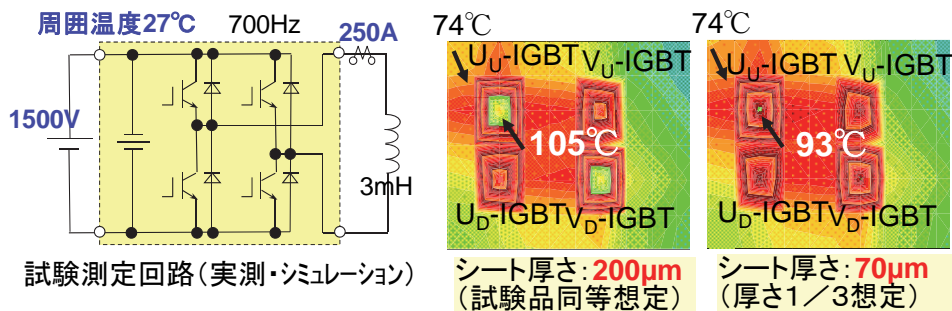


図 8 PBO 繊維接着シート厚さを変えた場合の IGBT モジュール最高温度の変化

4. 直流電車帰線電流の低周波成分予測手法の構築例⁽³⁾

電車完成時の誘導障害試験は、車両から発生する雑音（電流や電磁波）が地上の鉄道施設（主に信号装置）に影響を与えないことを確認する試験である。近年、誘導障害試験の合格に時間がかかり、対策コストの上昇や新車投入工程の遅延がしばしば起きている。

特に帰線電流の低周波（本稿では 200Hz 未満を指す）には振幅の大きい成分が観測され、周波数が低いほど振幅が大きいといった特徴が知られているが、この特徴がこれまで説明できなかった。これらの周波数成分は商用周波数軌道回路をはじめ多種の軌道回路に影響を与える。そこで今回、直流電車の帰線電流に低周波成分が含まれる要因を明らかにし、予測手法を構築した。

列車質量 M と引張力 F 、列車加速度 α との関係は運動方程式から $F = M\alpha$ であり、列車パワーは引張力 F に速度 v を乗じたものであると同時に、架線電圧 E と帰線電流 I_s の積である。

$$E \cdot I_s = F \cdot v = M \cdot \alpha \cdot v = M \cdot \frac{dv}{dt} \cdot v \quad (1)$$

ここで例えば定トルク域での加速時を考えると、車両加速度は α_1 一定のため、(1)式に $v = \alpha_1 t$ を代入すると帰線電流は(2)式

$$I_s = \frac{M \cdot \alpha_1^2}{E} t \quad (2)$$

で表すことができる（定数は省略）。(2)式を区間 $[-\pi, \pi]$ で打ち切り、繰返し波形とみなしてフーリエ級数展開し、周波数の単位（Hz）にすれば(3)式が得られる（直流成分は省略）。

$$I_s = \frac{M \cdot \alpha_1^2}{\pi E} \sum_{2\pi f=1}^{\infty} (-1)^{2\pi f-1} \frac{\sin 2\pi f t}{f} \quad (3)$$

ここで f は対応する n と同じく自然数であるが、設定した $[-\pi, \pi]$ の区間を広げるにつれて f の離散間隔は限りなく小さくなる。こうすると f は実質的に連続変数となる。

つまり、定トルク領域の帰線電流の低周波成分スペクトル（振幅）は周波数に反比例する連続スペクトルとなること、加速度（起動加速度）の 2 乗に比例することが明らかとなった。

この予測式に基づく帰線電流の予測値と実車での測定結果を比較したものが図 9 である。スペクトルが周波数に反比例する傾向や、代表周波数における値が良く一致している。直流電車の起動加速度が分かれば帰線電流の低周波成分が予測できるようになった。

5. おわりに

「安全性の向上」と「環境との調和」に関する成果を紹介した。

なお、側面からの荷重に対する車体強度評価は国土交通省からの補助金を、IGBT の高放熱化は NEDO 委託を受けてそれぞれ実施した。

文献 1) 沖野・宇治田, 「側面からの荷重に対する車体強度特性評価」, 鉄道総研報告 Vol.25, No.8, pp.23~28, (Aug.2011)

文献 2) 上條・福田・小笠, 「高熱伝導性有機材料を用いた電子部品・パワー素子の放熱部材の開発」, 鉄道総研報告 Vol.25, No.8, pp.35~40, (Aug.2011)

文献 3) 廿日出, 「直流電車帰線電流の低周波成分予測手法の構築」, 鉄道総研報告 Vol.25, No.8, pp.47~52, (Aug.2011)

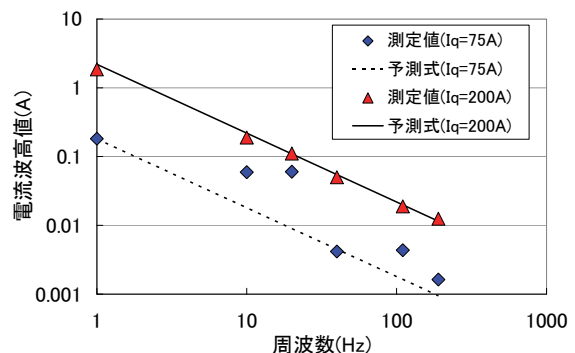


図 8 帰線電流の周波数別予測値と実測結果