

## 車両の側面圧縮強度特性評価

車両構造技術研究部 車両強度

主任研究員 沖野 友洋

### 1. はじめに

万一の事故時に乗客・乗員の被害を軽減するために、鉄道車両の衝突安全性に関する技術開発が行われてきているが、側面からの荷重に対する車体強度に関する検討はほとんどなされていない。そこで、本研究では、車両の側面強度特性を評価するため、実物大のステンレス鋼製部分車体を用いた静的圧縮試験を実施した。また、試験体をモデル化した FEM 解析結果と実験結果を比較・検証し、モデルの妥当性を確認した。本報告では、車両の側面圧縮強度に関し、強度試験と FEM 解析について報告する。

### 2. 静的圧縮試験

1980 年代以降に量産された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、図1に示すように、窓部(以下窓部試験体)およびドア部(以下ドア部試験体)を経年車両から切り出して 2 種類の実物大試験体を製作した。試験体の外形は長さ約 6.5m×幅約 3m×高さ約 3m である。例として、窓部試験体を図 1 に示す。なお、試験体端部の筋交いは移動時の試験体保護が目的であり、試験装置に設置後、取り外した。

試験装置の概略を図 2 に示す。反力壁と載荷板の間に、支持台上に試験体を設置し、載荷板を油圧シリンダで試験体の側面から平行に押し付けるように、準静的に載荷した。試験条件は、試験体と載荷幅をパラメータとして、表 1 のように 3 種類とした。

表 1 試験条件

試験条件	M3	D3	D1
試験体	窓部	ドア部	ドア部
載荷幅(m)	3	3	1

載荷荷重の計測方法について、3m 幅の載荷板は 4 隅の油圧アクチュエータ各々に、1m 幅の載荷板は上下隅のアクチュエータ各々にロードセルを取り付けた。試験体の変形量は載荷板の移動量とし、巻込式変位計で計測した。

変形形状の例として、試験条件 M3 の結果を図 3 に示す。いずれの試験条件においても、図 3 のように、側構体は載荷板により平面状に変形し、屋根は上に膨らみ、台枠については、横バリが下方方向に座屈した。

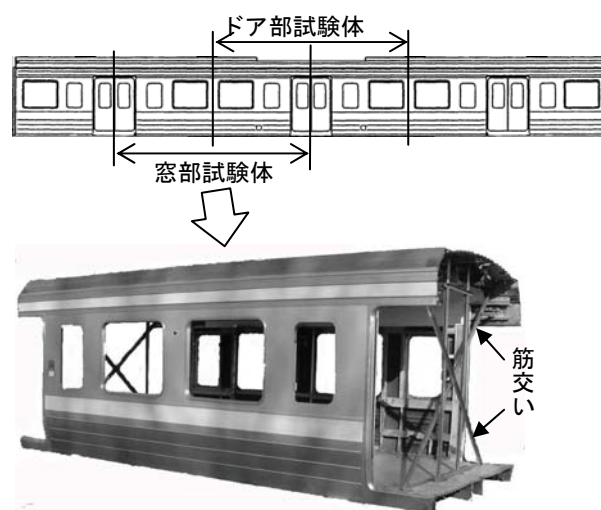


図 1 試験体

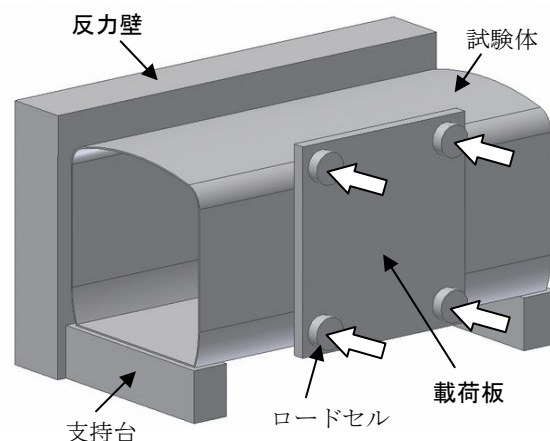


図 2 試験装置概略

各試験条件における荷重－変形量関係を図4に示す。全ての試験条件で、変形量160～180mm程度で荷重が急激に大きくなり、変形量200～240mm程度でピークを迎え、その後、徐々に低下した。



図3 変形形状（試験条件 M3）

た。载荷幅が3mのとき、試験体形状によらず最大荷重は約900kNとなった。一方、载荷幅が1mのとき、最大荷重は約600kNとなり、载荷幅3mの条件での結果の約66%となった。

図4の試験条件D3における変形量210～230mmの時や、試験条件D1における変形量200～230mmの時に、荷重が急激に減少した後、再度荷重が増加する現象が発生している。荷重減少時の大きな破裂音、試験時に床下から撮影した記録映像および横バリに貼付したひずみゲージ出力結果から、荷重の急激な減少は図5に示すように、側バリと横バリを接合しているスポット溶接部が破断したためと推定される。

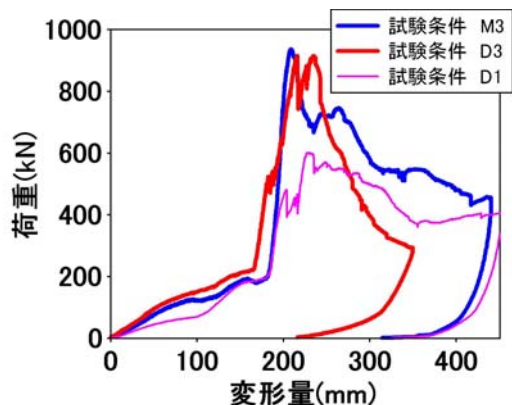


図4 荷重－変形量関係（試験結果）

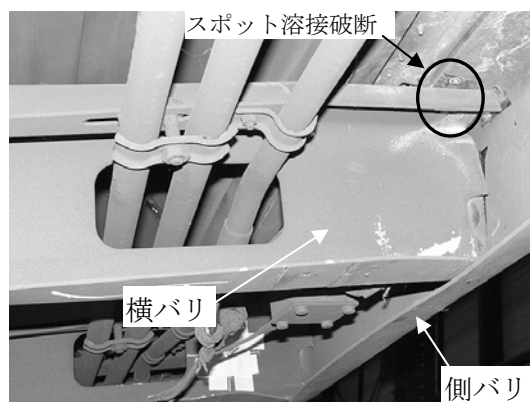


図5 側バリ－横バリ結合部

以上から、スポット溶接部の破断強度が車体構造の圧縮破壊特性に大きく影響していると考えられる。

### 3. 静的圧縮試験に対応するFEM解析

静的圧縮試験に相当するFEM解析を実施した。解析に使用したモデルは要素ピッチ25mmを基本とし、主に等方性シェル要素で構成し、各部材間の溶接部もモデル化した。節点数は約320,000、要素数は約260,000である。解析には汎用の陽解法有限要素解析プログラムPAMCRASHを使用した。

FEM解析によって得られた各試験条件の変形形状を図6に、計算された圧縮荷重と変形量の関係を圧縮試験で測定された結果と併せて図7に示す。

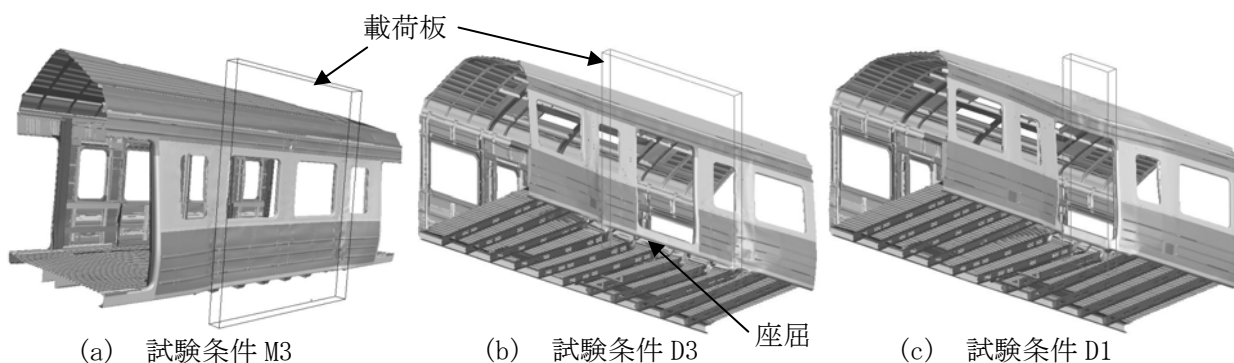


図6 FEM解析結果（変形形状）

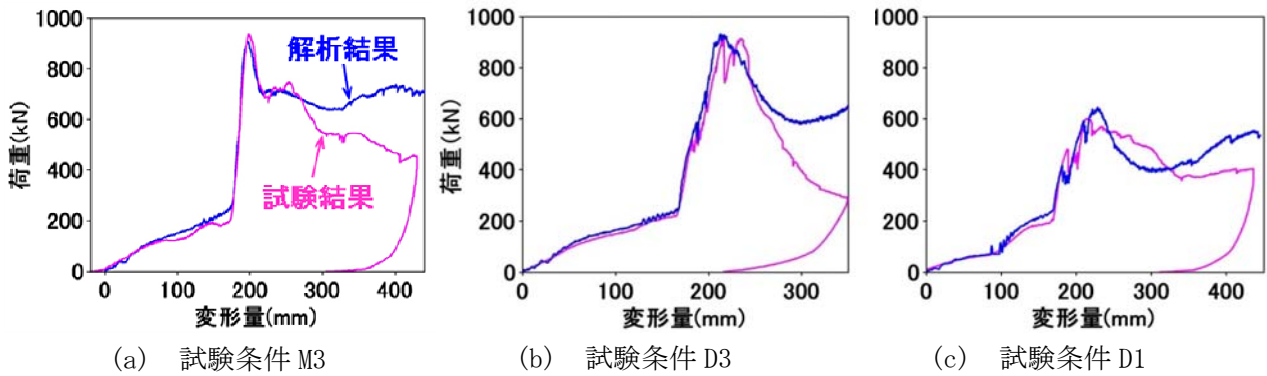


図7 荷重-変形量関係（解析結果と試験結果の比較）

変形形状を見ると、FEM 解析においても、側構体は載荷板により平面状に変形し、屋根は上に膨らみ、台枠については、横バリが下方方向に座屈しており、実物車体での試験結果の特徴をよく再現することができた。しかしながら、試験条件 D3 では、FEM 解析では横バリの端部で座屈が発生している（図 6(b)）のに対して、実験結果では図 8 に示すように中央部で発生しており、台枠の変形モードに違いが発生した。

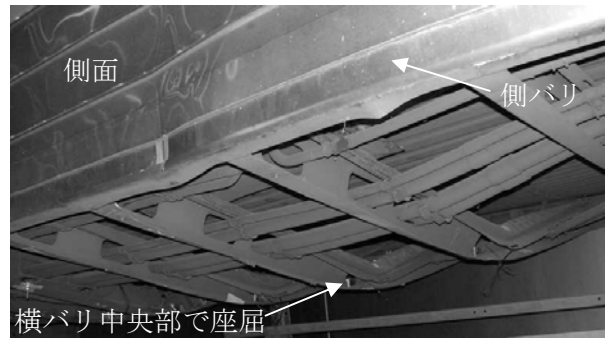


図8 台枠変形形状（試験条件 D3）

FEM 解析による荷重と変形量の関係をみると、いずれの試験条件についても、変形量 160~180mm 程度で荷重が急激に大きくなり、変形量 200~240mm 程度で荷重のピークに達しており、その値も実験結果とほぼ同じである。その後、徐々に荷重が低下しており、圧縮試験結果とよく一致していることが確認できる。また、試験条件 D1 において、変形量 190mm および 220mm 近傍でのスポット溶接部の破断による荷重の急激な低下も再現できている。しかしながら、試験条件 D3 については、変形量 220mm 近傍での荷重の急激な低下や変形量 250mm 以降の荷重の低下が、FEM 解析では再現できていない。

#### 4. 考察

##### 4. 1 荷重分担

FEM 解析により得られた試験条件 M3 での荷重と変形量の関係について、台枠および屋根構体それぞれが負担した荷重を図 9 に示す。図において、屋根構体が負担した荷重は変形量 100mm 前後で最大約 60kN となり、その後は緩やかに減少している。一方、台枠が負担した荷重は、変形量 170mm 程度で急激に大きくなり、変形量 200mm 程度で最大値約 850kN となり、その後、徐々に低下している。

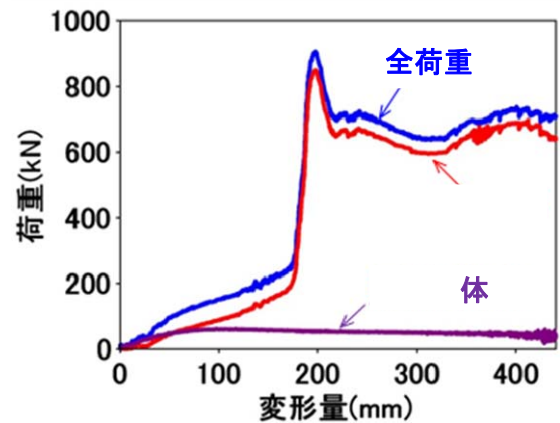


図9 荷重分担（試験条件 M3）

以上から、側面からの荷重に対しては、台枠が荷重を負担する割合が大きかったことが分かった。また、各試験条件において、変形量 160~180mm 程度で荷重が急激に大きくなったのは、試験体が裾絞り構造であるため、変形量 160~180mm 程度までは主に側構体に変形して平面形状となり、その後、比較的強度の高い台枠が変形するモードに遷移するためである。

#### 4. 2 スポット溶接部の破断特性の影響

前章で述べたように、試験条件 D3 での FEM 解析結果は圧縮試験結果と比較して、台枠の変形モードに違いが見られ、荷重-変形量関係についても実験結果を再現できていない。実物大部分試験体による圧縮試験では、変形量 180mm 程度から横バリと床板とのスポット溶接部の破断が発生するため荷重上昇が停滞し、最終的に横バリが中央部で座屈した。一方、FEM 解析結果では、当該スポット溶接部は変形量 180mm 程度時には破断せず、試験結果と変形モードの違いが生じた原因の一つであると考えられる。

FEM 解析のスポット溶接部破断強度に関する入力データはスポット溶接継手試験片の引張試験結果を基に作成しているが、横バリと床板とのスポット溶接部の破断強度を継手試験片の強度試験結果から求めた破断強度の 1/2 として FEM 解析を実施したときの変形形状を図 10 に示す。図 10 より、横バリは中央部で座屈しており、圧縮試験結果と同様の変形モードを再現できた。

今回の結果から、試験体のスポット溶接部の破断強度はスポット溶接継手試験片の破断強度よりも低いと考えられる。この原因として、試験体が経年車両から切断して製作されたために、スポット溶接部が疲労による影響を受けたこと、もしくは車両製作時の溶接品質と現在の溶接品質が異なること等が考えられる。

以上から、スポット溶接部の破断強度が車体構造の圧縮破壊特性に大きく影響することが、FEM 解析によって確認された。

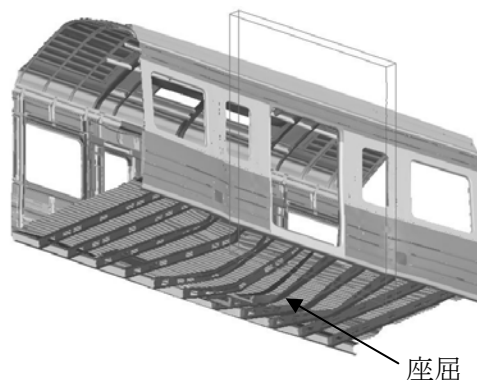


図 10 スポット破断強度変更後の解析結果(試験条件:D3)

#### 5. まとめ

鉄道車両の側面強度特性を評価する第一段階として、軽量ステンレス鋼製中間車を模擬した実物大部分車体を用いた静圧縮破壊試験および静圧縮破壊試験と同様の条件で FEM 解析を実施したところ、解析結果は圧縮試験結果とよく一致し、以下の破壊特性を得た。

- 側構体は載荷板により平面状に変形し、屋根は上に膨らみ、台枠については、横バリが下方方向に座屈した。
- 荷重-変形量関係について、変形量 160~180mm 程度で荷重が急激に大きくなり、変形量 200~240mm 程度でピークを迎え、その後、徐々に低下した。
- 載荷幅 3m では、試験体形状によらず最大荷重は約 900kN となり、載荷幅 1m では、最大荷重は約 600kN と幅 3m の約 66% となった。
- 載荷幅 3m での圧縮試験では、台枠が負担する荷重が最大 840kN 程度となるのに対し、屋根構体が負担する荷重は最大 60kN 程度となり、側面からの荷重に対しては、台枠が荷重を負担する割合が大きいことが分かった。
- 試験条件 D3 では横バリと床板とのスポット溶接部の破断特性により台枠の変形モードが異なることが分かった。以上から、スポット溶接部の破断強度が車体構造の圧縮破壊特性に大きく影響していると推定される。

なお、本研究は国土交通省の補助金を受けて「車両の衝突安全性向上に関する研究」の一環として実施した。