

側面からの荷重に対する車体強度特性評価

沖野 友洋* 宇治田 寧*

Evaluation of Carbody Strength against Loads from the Side

Tomohiro OKINO Yasushi UJITA

It is a regretful fact that despite ongoing efforts to reduce accident risk and ensure the safety of railways, fatal accidents sometimes still occur. At the Amagasaki accident in April 2005, one carbody was severely damaged by the side impact. For evaluating the carbody side strength, we performed static and dynamic compression tests using full-size partial carbodies and FE analyses under the same loading conditions as the empirical tests. The numerical results by FE analyses were consistent with the empirical results in terms of the load-time characteristics as well as deformed shape of carbodies. We developed a method for the evaluation of the impact deformation behavior of carbody against loads from the side by using FE analysis.

キーワード：車体強度，ステンレス車体，側面荷重，強度試験，数値解析

1. はじめに

鉄道の安全対策として、事故を発生させないようにすることを目指して取り組みが行われてきたが、時として甚大な被害を伴う事故が発生している。平成17年4月に発生した福知山線の脱線衝突事故では、車両が側面方向から衝撃を受け、車体が大きく損壊した¹⁾。事故当時、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、本研究では、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、実物大部分車体を用いた静的側面圧縮試験および衝撃圧縮試験を実施して得られた車体の変形形状や荷重-変形量特性等の基本的な側面圧縮破壊特性について検討した。また、各試験と同様の条件でFEM解析を行い、試験結果と比較して検証するとともに、FEM解析を用いた側面衝撃時の車体の挙動評価を行ったので、その結果について報告する。

2. 静的条件下における車体側面強度評価

2.1 静的圧縮試験条件

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、経年車両から切り出して、窓部（以後、窓部試験体）およびドア部（以後、ドア部試験体）を中心とした2種類の実物大部分試験体を製作した。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、試験装置に設置後に取り外した。

車体側面圧縮試験において、圧縮方向を変化させるために2種類の試験装置を製作した。図2(a)に示すように、反力壁と載荷板の間に、支持台上に試験体を設置し（固定せず）、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、準静的に圧縮する試験装置（以後、平行条件）および、図2(b)に示すように、15度傾斜した支持台（載荷方向の並進運動のみ動作可能）に試験体を固定し、支持台と反力壁の間にロードセルを配置し、試験体に対して、載荷板を油圧シリンダで平行に押しつける試験装置（以後、傾斜条件）である。

試験条件は、試験体と載荷板の幅および載荷方向をパラメータとして、表1のように4種類とした。

載荷荷重の計測方法について、平行条件では、3m幅の載荷板は4隅の油圧シリンダ各々に、1m幅の載荷板は上下隅の油圧シリンダ各々に、ロードセルを取り付けた。

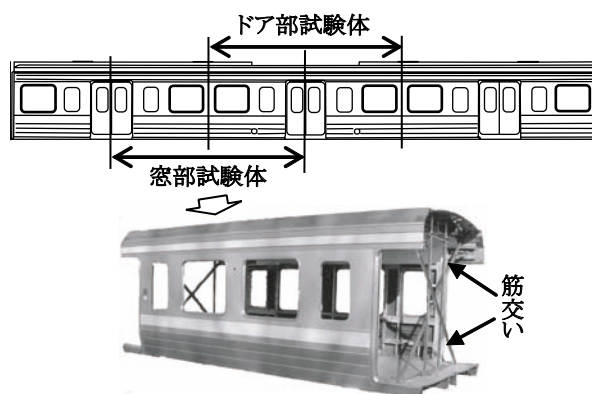


図1 試験体

* 車両構造技術研究部 車両強度研究室

特集：車両技術

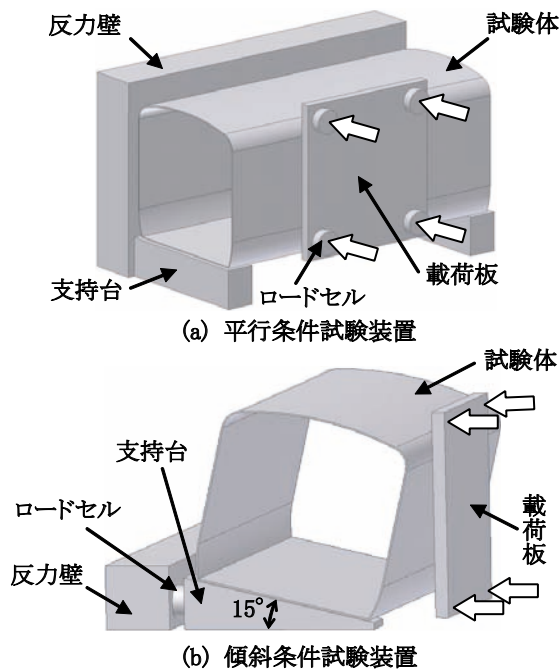


図2 試験装置概略

表1 試験条件

試験条件	M3H	D3H	D1H	M3K
試験体	窓部	ドア部	ドア部	窓部
載荷幅 (m)	3	3	1	3
載荷方向	平行	平行	平行	傾斜

傾斜条件では、2つの支持台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、載荷板の4隅に取り付けた巻込式変位計で計測した。

2.2 静的圧縮試験結果

変形形状に関する試験結果例として、試験条件 M3H での結果を図3に、各試験条件における荷重-変形量関係を図4に示す。平行条件では、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、横バリが下方向に座屈した。また、傾斜条件においては、車体断面が平行四辺形状に変形した。荷重-変形量関係について、平行条件においては、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。載荷幅が 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、載荷幅が 1m のとき、最大荷重は約 600kN となり、載荷幅 3m の条件での結果の約 66% となった。また、傾斜条件では、荷重は変形量 380mm 程度までは単調に増加し、最大荷重 25kN 程度となった後に、ほぼ一定となった。

図4の試験条件 D3H における変形量 210～230mm の時や、試験条件 D1H 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

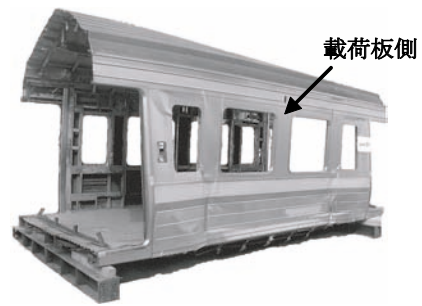


図3 変形形状 (試験条件 M3H)

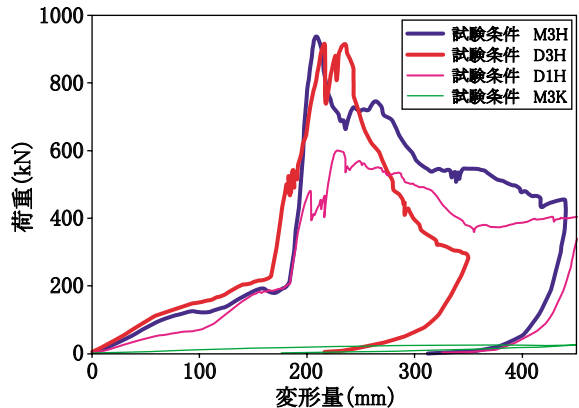


図4 試験結果 (荷重-変形量関係)

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。

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。

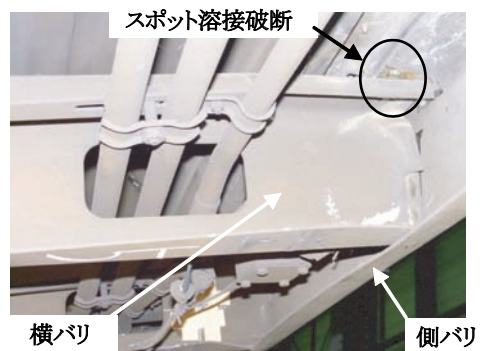


図5 側バリ-横バリ結合部

2.3 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

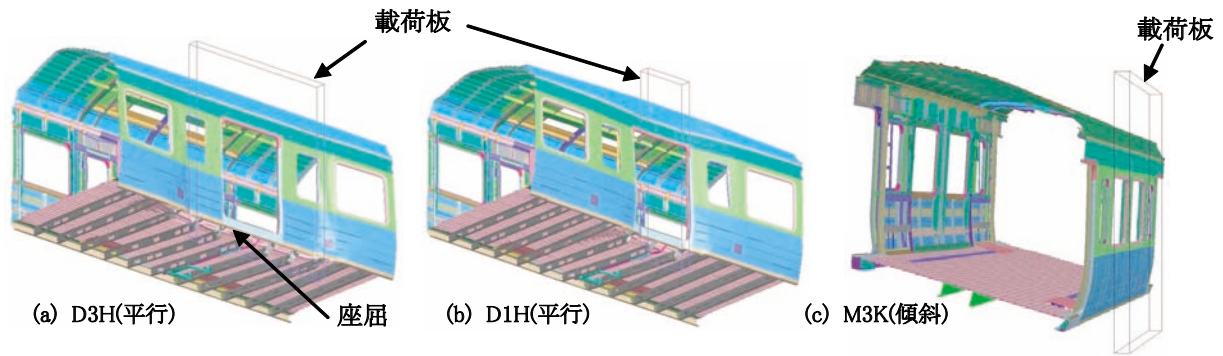


図6 FEM解析結果（変形状況）

試験条件の変形状況を図6に、圧縮荷重と変形量の関係を図7に示す。

変形状況を見ると、平行条件においては、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、台枠の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D3Hでは、FEM解析では横バリの端部で座屈が発生しているのに対して、試験結果では図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。また、傾斜条件については、試験結果と同様に、車体断面が平行四辺形状に変形した。

荷重と変形量の関係を見ると、平行条件では、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、その値も試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、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D1H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D3H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。一方、傾斜条件では、試験結果をよく再現することができた。

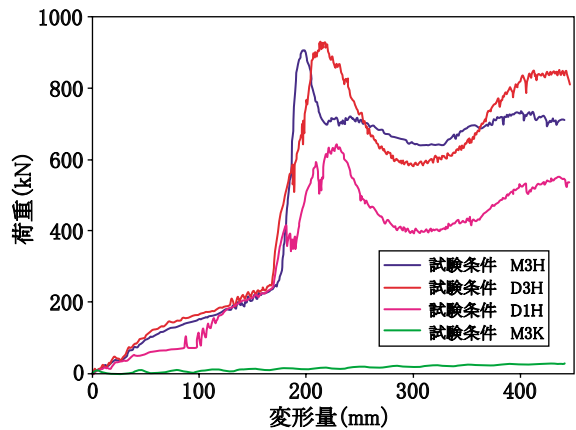


図7 FEM解析結果（荷重 - 変形量関係）

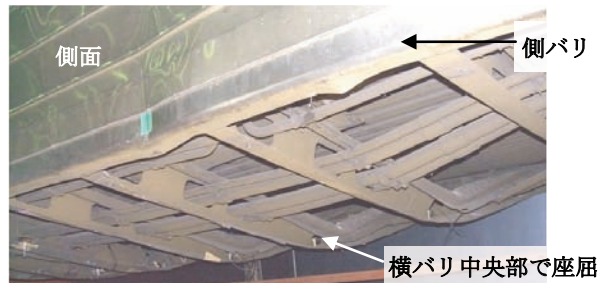


図8 台枠変形状況（試験条件 D3H）

2.4 考察

(1) 台枠・屋根構体の荷重分担

FEM解析により得られた試験条件M3H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。

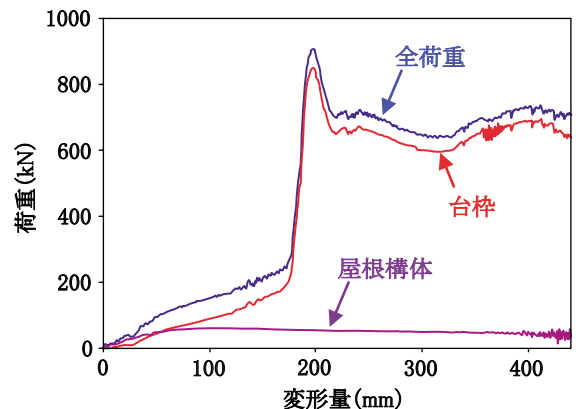


図9 荷重分担（試験条件 M3H での FEM 解析結果）

以上より、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たことが分かった。また、平行条件において、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

特集：車両技術

モードに遷移するためである。

(2) スポット溶接部の破断特性の影響

前節で述べたように、試験条件D3H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試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。

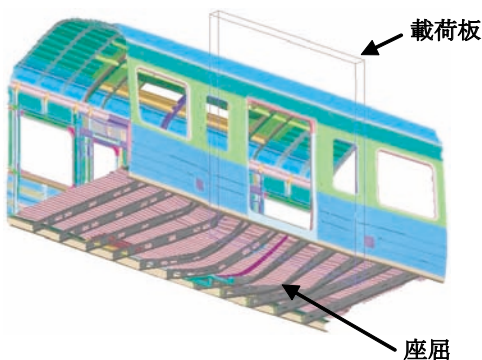


図10 スポット破断強度変更後の解析結果（試験条件D3H）

3. 動的条件下における車体側面強度評価

3.1 衝撃試験条件

静的試験で使用した窓部試験体と同等の試験体で側面衝撃試験を実施するために、落錘試験装置を製作した(図11)。台座の上に試験体を横向きに設置し、試験体側

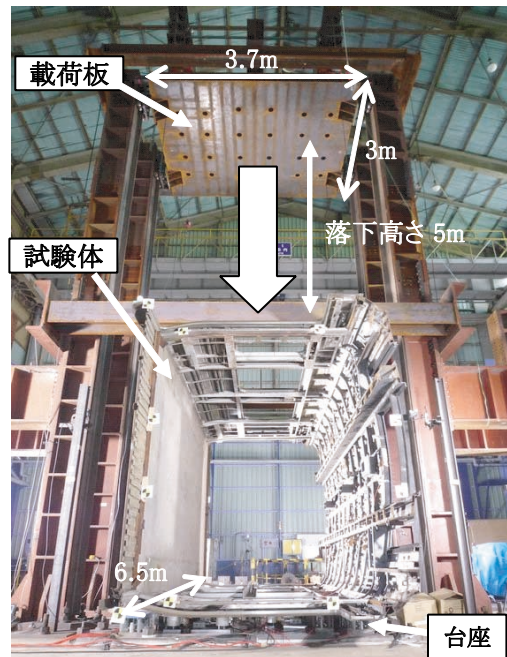


図11 落錘試験装置

面からの距離が5mとなるように載荷板を設置し、自由落下により、速度約10m/sで試験体に衝撃させた。載荷板は試験体長手方向3m×試験体高さ方向3.7m、重量約4.8トンである。試験装置の支柱にレールを、載荷板の4箇所にローラを取り付けることにより、載荷板を案内して水平を維持する構造とした。

試験体を支持する台座に組み込まれたロードセルにより衝撃荷重を、非接触式レーザ変位計および振動加速度計により、載荷板の四隅の落下方向変位および振動加速度を計測し、高速度カメラにより衝撃時の試験体の変形状況を記録した。

3.2 衝撃試験結果

落錘試験は再現性を確認するために2回実施した。載荷板の四隅の落下方向変位の平均を微分することにより、衝突直前の載荷板の落下速度を計算した結果、1回目は9.87m/s、2回目は9.95m/sであった。2回目の落錘試験における衝撃後80ms経過時の変形状況を図12に、荷重－時間関係を図13に示す。なお、載荷板と試験体との接触による振動が、載荷板に取り付けた振動加速度計によって検出された時刻を時間0とした。

試験体の変形形状および荷重－時間関係について、2回の試験はほぼ同様な結果となり、試験の再現性を確認した。いずれも、図12のように、載荷板は試験体の屋根側が下がる方向に傾斜した。前章で述べたように、車体側面からの荷重に対しては台枠の荷重分担が大きいため、載荷板に対してモーメントが作用し、載荷板が平行に落下するよう拘束しているローラが破損したためである。

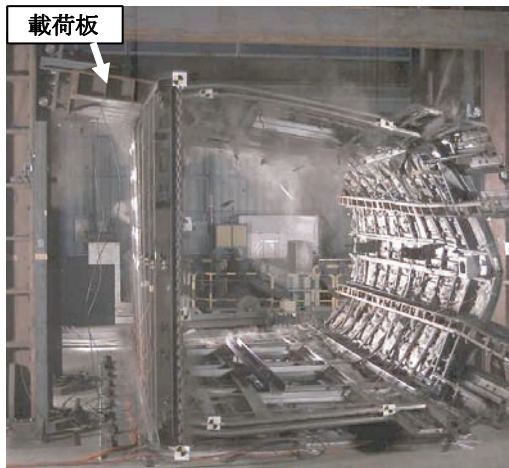


図12 衝撃後80ms時の変形状況（試験結果）

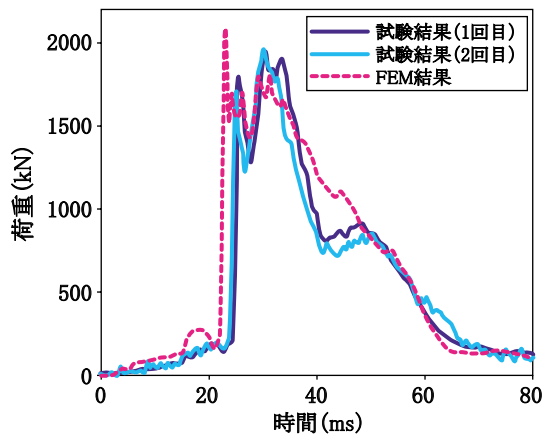


図13 荷重-時間関係

試験体の変形状況について、台枠は主に载荷板寄りの横バリ端部が座屈し、側バリと横バリおよび横バリと床板を結合するスポット溶接部に破断が確認された。屋根構体は図12のように、屋根が上に膨らみ、タルキと長桁を結合するスポット溶接部に破断が確認された。また、荷重-時間関係は、試験体側面との衝突後、徐々に荷重が増加し、衝撃後24ms程度で台枠と衝撃することにより1800kN程度まで上昇し、荷重が低下した後、2つ目のピークで最大荷重2000kN程度となった。

3.3 衝撃試験に相当するFEM解析

落錘試験に相当するFEM解析を実施した。FEM解析モデルは静的圧縮試験により十分に検証された試験体モデルを対象とし、材料特性にひずみ速度依存性を考慮することで衝撃挙動に対応するように作成した。

衝撃後80ms時の変形状況を図14に、荷重-時間関係を図13に試験結果と併せて示す。図のように、FEM解析結果は台枠の座屈箇所や屋根構体の変形状況等、衝撃試験時の試験体の変形モードを再現した。また、荷重-時間関係については、時間35ms～50ms間で乖離が見られるが、それ以外では、ほぼ試験結果と一致した。前述

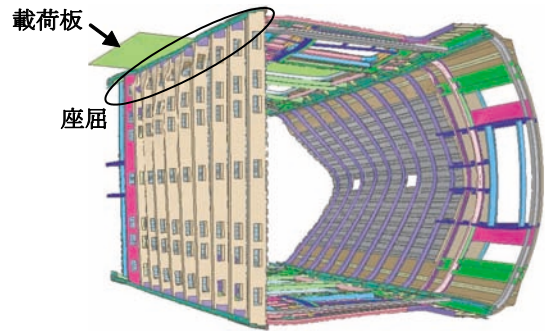


図14 衝撃後80ms時の変形状況（FEM結果）

のように、衝撃試験では载荷板は落下方向に平行移動するように案内されていたが、FEM解析では、载荷板に拘束を与えず自由落下する条件で計算したため、荷重-時間関係の時間35ms～50ms間での試験結果とFEM解析結果の間に乖離が生じたと考えられる。

4. FEM解析による側面衝撃評価

4.1 1両相当モデル

静的側面圧縮試験結果および落錘式側面衝撃試験結果と比較検証することにより、各試験結果を再現できるFEM解析モデルが作成できた。本モデルは長さ6.5mの部分車体モデルであるが、1車両の衝突挙動を評価する場合、衝突条件によっては、車体の両端部近傍にあるまくらばり等の重量物による慣性力の影響が重要となる場合がある。そこで、図15に示すように、車端部の重心位置に相当質量を付加し、部分車体モデルの両端と結合して拘束することにより、部分車体を用いて1両の挙動を模擬するモデル（以後、1両相当モデル）を作成した。

1両相当モデルは1両全体を詳細に作成したモデル（以後、1両モデル）と比較して、計算時間が大幅に減少し、多くの解析条件での結果を比較検証する目的には有利である。しかしながら、モデル長さが6.5mであるため、衝突対象物は限定され、1両モデルと比較して解析精度が劣る可能性が考えられる（解析精度についての検討は後述する）。

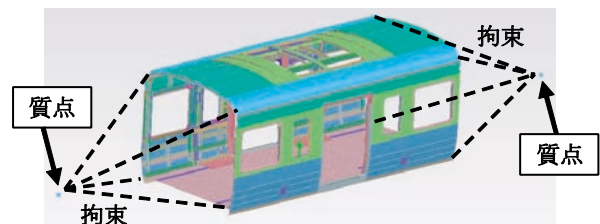


図15 1両相当モデル

4.2 1両相当モデルによる側面衝撃評価

1両相当モデルを用いた、車体の側面衝撃時の挙動評価例として、1両相当モデル（台車相当の質点を含む）が

特集：車両技術

3m幅の剛体壁に側面から速度30km/hで衝突する条件でFEM解析を行った。車体変形形状の解析結果を図16に示す。図のように、車端部の慣性による影響で、車体は剛体壁を巻き込むように変形した後、スプリングバックが発生する結果となった。また、図16に示すようにドアフレームの内側にある戸袋内柱間を室内幅と定義した場合、衝突により、室内幅は衝突前の90%程度となった。よって、今回解析した衝突条件では、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。

本報告では、衝突条件を前述のように設定して、側面衝撃時の車体の挙動評価例を示したが、想定する衝突シナリオによって、車体の衝撃挙動は大きく異なり、衝突安全性向上のための着目点は異なると考えられる。

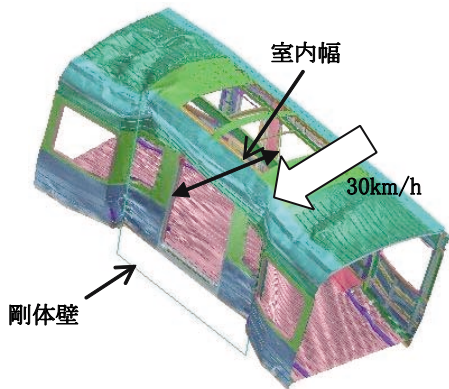


図16 1両相当モデルによる解析結果

4.3 1両モデルによる側面衝撃評価

1両相当モデルはモデル端部を拘束し、両端部を質点で表現しているため、実際の1車両の挙動を精度良く再現しているか確認する必要がある。そこで、1両相当モデルを拡張して1両モデルを作成し、前節の1両相当モデルで実施した衝突解析条件で解析を実施した。車体変形形状結果を図17に、荷重-時間関係を1両相当モデルによる結果と併せて図18に示す。ここで、荷重は剛体壁と車体が接触することにより、剛体壁に作用する反力とした。

1両相当モデルについて、変形形状の計算結果は、拘束による影響でモデル端部の変形が1両モデルと比較して大きくなっているが、全体的な変形モードはほぼ同一である。また、荷重-時間関係は衝突初期の22ms程度までは同一であり、その後若干の違いが見られるが、全体としての傾向は同一である。

以上の結果から、車体の変形挙動についておおよその傾向を把握し、安全性評価および安全性向上策の検討を目的とする場合、1両相当モデルを用いた解析の精度は、今回の解析条件では問題ないと考えられる。一方、衝突対象物が大きい場合や、車体が横転する等の衝突シナリオに対する挙動評価は、1両モデルにより実施する必要

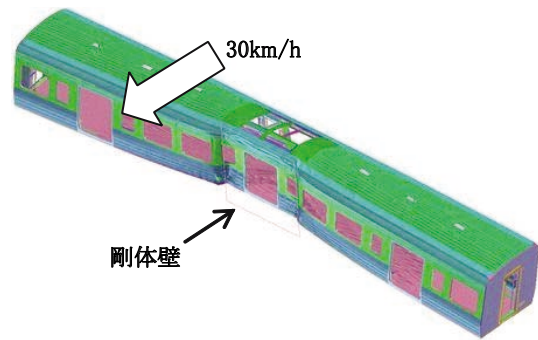


図17 1両モデルによる解析結果

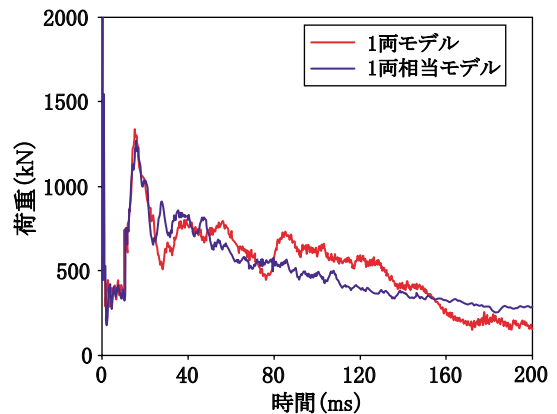


図18 荷重-時間関係

がある。衝突シナリオによって、1両相当モデル、1両モデルを使い分けることが効率的な挙動評価に有効である。

5. まとめ

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て、静的圧縮試験、落錘式衝撃試験および各試験と同様の条件でFEM解析を実施し、車体の変形形状や荷重-変形量特性等のステンレス鋼製車体の基本的な側面強度特性データを取得した。また、FEM解析は各試験結果を再現することを確認した。これにより、作成したFEM解析モデルは車体の側面からの荷重に対する精度の高い強度評価モデルとなっていることを確認した。さらに、側面強度評価モデルを用いて、側面衝撃時の挙動評価例を示した。今後は、本モデルを活用して、様々な衝突条件に対する側面強度評価を実施し、車体の衝突安全性向上のために活用する予定である。

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。

文献

- 1) 航空・鉄道事故調査委員会, 鉄道事故調査報告書西日本旅客鉄道株式会社 福知山線塚口駅～尼崎駅間 列車脱線事故, 2007