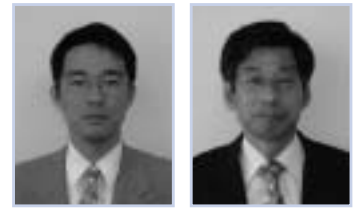


衝突シミュレーションを活用した 車両の安全確保対策に関する研究



畑 弘敏* 大野 潔*

本研究では、列車が踏切事故に遭遇した場合にも乗客と運転士の安全を最大限確保するため、衝撃吸収構造の考え方を取り入れた先頭車両構造を検討した。そして、そのような先頭車両が大型自動車との衝突時に生じる変形現象を衝突シミュレーションを用いて解析することによって、適切な強度バランスを検討して高い安全性が得られる構造を導き出し、新形車両の設計に反映させた。また、より効果的なエネルギー吸収性能をもつ新しい衝撃吸収構造を提案し、そのような構造を有する模型構体を製作して衝突実験を実施した。そして、その新しい構造の有効性を確認するとともに、実験結果をシミュレーションに反映してシミュレーション精度の向上を図った。その結果、シミュレーションの信頼性を高めることができ、今後の車両設計への衝突シミュレーションの活用に道筋をつけることができた。

キーワード：衝突シミュレーション、衝突実験、3次元有限要素モデル、衝撃吸収構造、鉄道車両設計、衝突対策

1 はじめに

これまで、自動車側の無謀運転による踏切事故によって、残念ながら乗客や運転士が死傷する事故が何度か発生してしまっている。このような事故については、予防が重要であるとは言うまでもないが、踏切が存在する限り、鉄道事業者の努力のみによる事故撲滅には限度があり、事故の発生を想定した被害の抑制策も大きな課題である。

このような課題を踏まえ、本研究では、踏切事故の場合にも乗客と運転士の安全を最大限確保するための具体策を検討した。そして、従来の車体前面の強化に代わって自動車でも用いられている衝撃吸収構造を採用し、衝突事故時には限られた範囲内で大きなエネルギー吸収を行う機能をもたせることとした^{1) 2)}。その上で、そのような構造を実現するため、大型自動車との衝突時に生じる車体の変形現象を汎用の衝突シミュレーション用ソフトウェアを用いて解析することにより、安全性の高い効果的な車両構造を開発し設計する手法を確立した。

本報告では、まず、この手法を活用して開発した2種類の衝撃吸収構造の特徴ならびに設計の際に行った検討内容について述べる。そして、この衝撃吸収構造の衝突時の変形挙動を確認するため、模型車両構体を製作して衝突実験を実施したので、その実験結果、ならびに、その実験結果を用いて実施したシミュレーションの精度向上について、あわせて述べる。

2 衝突対策の考え方

従来、踏切事故による鉄道車両側の被害を防ぐための対策としては、車体の前面を強化し自らの変形・損傷を小さくすることに重点がおかれていた。しかしながら、この方法では自動車の大型化に十分対応できなくなりつつあったため、1994年に登場したE217系と呼ばれる電車からは、衝突時に変形を誘発させてエネルギーを吸収する「クラッシュブルゾーン」と、変形を抑えて乗客と運転士を保護する「サバイバルゾーン」とを明確に区分した衝撃吸収構造を先頭車両の設計に取り入れることとした。そして、それぞれのゾーンが設計思想を反映した挙動を示し、かつ、次に示す安全性評価基準をすべて満たすよう、衝突シミュレーションを実施してその結果を設計に繰り返し反映し、改良を進めた。

<安全性評価基準>

- 衝突後の運転士サバイバルゾーンの前後方向長さが一定値以上確保されていること
- 衝撃加速度の大きさが一定値以下に抑えられていること
- 客室部に過大な変形が生じないこと

3 E231系近郊形電車の先頭構造の検討

3.1 衝撃吸収構造の考え方

本研究では、まず、E231系近郊形と呼ばれる電車の先

頭部分に衝撃吸収構造を取り入れることを検討した。そして、この車体前頭部と乗務員室扉部分をクラッシュゾーン、客室部と乗務員室小窓位置をサバイバルゾーンとし、大型自動車との衝突事故時には図1に示すような変形を生じさせて、乗客と運転士を保護できる設計とした。なお、このE231系近郊形は、それ以前に設計されたE217系の衝撃吸収構造の考え方を踏襲しており、その前面にあった貫通扉とその両側の柱を撤去した構造となることが特徴である。

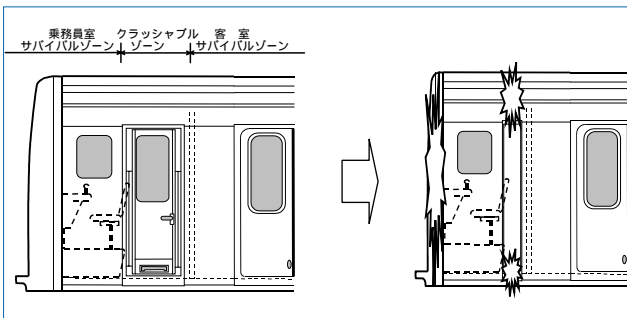


図1：E231系近郊形の衝撃吸収構造の考え方

3.2 衝突シミュレーションモデルと衝突条件

このゾーン区分を有する車体の衝突時の挙動を衝突シミュレーションにより検証するため、図2に示すような車体の3次元有限要素モデルを作成した。このモデルは、設計原案をもとに先頭車の前寄り約1/3の範囲(対称性を考慮し片側のみ)を3次元データ化したもので、これに材料特性や拘束条件などを与え、以下に示す条件下でこの車体構造がどのように変形していくかを、汎用の衝突シミュレーションソフトを用いて検証した。



図2：3次元有限要素モデル

- a 車両：質量 約32t，速度 60km/h
- b ダンプカー：質量 40t，線路に直角に静止

なお、車両は1両分の定員乗客を含んだ質量であり、これらの条件は、過去の踏切事故事例を考慮して決定した。

3.3 シミュレーションと設計改良の流れ

設計改良は、上記3次元モデルを用いて実施したシミュレーション結果をもとに、弱点となる箇所を中心に改良を加え、再びシミュレーションを実施するという繰り返しにより行った。その過程で行った試行錯誤の例を以下に示す。

- (1)まず、初期案の3次元モデルでシミュレーションを実施した。その結果、前面外板と中はりとの接続部に大きな曲げモーメントが加わり、そこから台枠が大きく変形することが判明した。
- (2)上記結果を踏まえ、前面外板と中はりとの間に斜めに補強材を追加して台枠の変形を抑える方法を検討した。そこで、補強材の形状を図3に示すようなy字型にしたところ、台枠の変形は抑えられたもののエネルギー吸収量も減少したため、後方の客室部の変形が大きくなってしまった。その結果、補強材は図4に示すような単純な直線構造とし、抑えきれない台枠の変形に対しては次の(3)の対策を施すこととした。

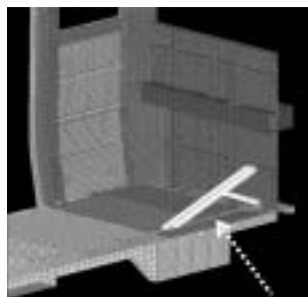


図3：前面外板補強材【y字型】

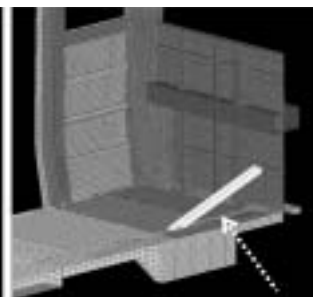


図4：前面外板補強材【直線型】

- (3)台枠の変形により乗務員室の床の変形が大きくなって運転士のサバイバルゾーンを確保できるよう、図5に示すように運転台高床に強度をもたせたいうでこの高床を側構体と接続し、台枠からは

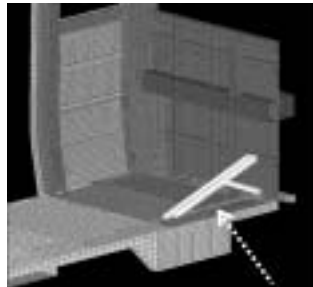


図5：運転台高床構造

独立させる構造を新たに導入した。そして、この高床を構成する骨部材を組み合わせる際の部材の向きをあわせて検討したところ、高床を枕木方向に強化した方が側構体の内側への変形を防ぐ効果が得られることもわかった。

以上のように繰り返し諸条件を変更してシミュレーションを実施し、最良の効果が得られる方法を設計に取り入れた。その結果、冒頭に示した安全性評価基準を満たす衝撃吸収構造が完成し、E231系近郊形電車に反映させた。この衝突シミュレーション結果を図6に示す。

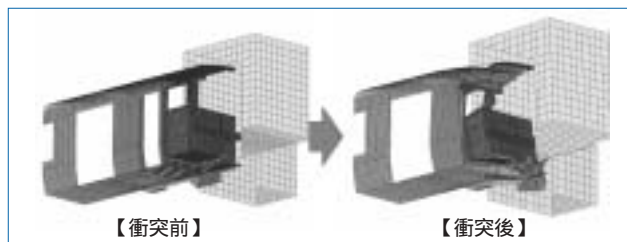


図6：衝突シミュレーション結果

4 ACトレインを想定した先頭構造の検討

4.1 新しい衝撃吸収構造の考え方

E231系近郊形電車の衝撃吸収構造につづき、得られたノウハウを活用してACトレインを想定した先頭構造の検討に取り組んだ。ここでは、衝撃吸収構造がより効果的に衝突エネルギーを吸収できるよう、クラッシュブルゾーンとサバイバルゾーンの配置を見直した図7に示すような新しいゾーン区分構造を提案した。これは、乗務員室小窓位置を含む先頭部分全体をクラッシュブルゾーンとして変形させ、運転士座席は前面強化フレームに固定した強化高床ごとサバイバルゾーンに移動させて運転士を保護できるように考えられている。また、エネルギーの吸収容量を増加させるため、最前部には衝撃吸収用アルミハニカムを装備している。

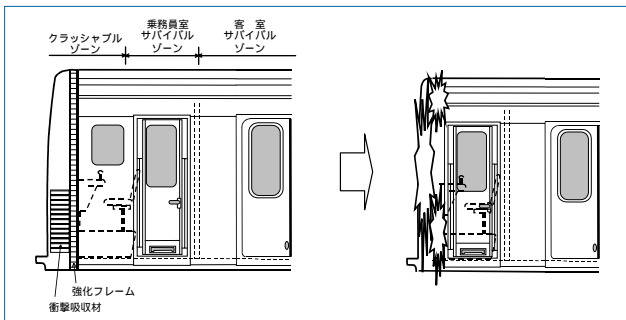


図7：新しい衝撃吸収構造の考え方

4.2 衝突シミュレーションモデルと衝突条件

この新しいゾーン区分構造をもつ衝撃吸収構造については、この構造を組み込んだ3次元モデルを新たに作成してE231系近郊形と同様の方法で衝突シミュレーションを実施し、それぞれのゾーンが設計思想どおりの挙動を示すかどうかを検証した。なお、今回は、左右非対称の車両構造を取り上げたため、片側半車体ではなく左右両側をモデル化した。また、材料特性については、ひずみ速度の効果^{3) 4)}を加味するため、別途高速引張試験を実施して式1に示すCowper-Symondsの式の形でモデルに反映させた。ここで、 K_σ 、 σ_0 、 n^* 、 D 、 P は、それぞれの材料に固有のパラメータである。

$$= K_\sigma \left(\sigma_0 \left\{ 1 + \left(\dot{\epsilon} / D \right)^{1/P} \right\} \right)^{1/n^*} \quad (1)$$

このほかの、衝突速度や衝突相手などの諸条件は、すべてE231系のシミュレーションと同様とした。

4.3 シミュレーションと設計改良の流れ

ここでも、シミュレーションとその結果を反映させた設計改良を繰り返し実施した。その主な内容を以下に示す。

- (1)まず、初期設計案でシミュレーションを実施した。その結果、乗務員室サバイバルゾーンの側構体の変形が大きいほか、屋根構体の一部に相対的に弱い箇所があるためにそこから屋根が大きく変形してしまい、クラッシュブルゾーンの屋根がうまくつぶれない、という問題があることが判明した。そこで、これらに対しては、部材の組合せ方法の変更などによって弱点箇所を解消した。
- (2)その後、再びシミュレーションを実施したところ、今度は、屋根構体の変形がサバイバルゾーン内から発生して広がってしまう、という結果が得られた。この原因を分析したところ、(1)で実施した設計変更によって屋根構体の強度バランスが崩れてしまったことが判明した。そこで、クラッシュブルゾーン内の骨部材に図8に示すような切欠きを入れ、ここから変形を誘発させるとともに、図9の右に示すように多段階の折れ曲がりが発生させてエネルギー吸収量を大きくするなど、シミュレーションを繰り返しながらか最も適した強度バランスならびに効果的な変形挙動を示すよう、屋根構体を改良した。



図8：屋根部材の切欠き

【切欠きなし】
図9：屋根部材の切欠きの効果

以上のように、このACトレインを想定した先頭構造の検討においても、繰り返し諸条件を変更してシミュレーションを実施し、最良の効果が得られる方法を設計に反映させた。

また、ここでは、最前部に装備した衝撃吸収用アルミハニカムのエネルギー吸収効果についても検証を行った。当初案では、エネルギー吸収容量が大きい、強度の高いアルミハニカムを選定した。ところが、ハニカム背面の車両前面構体から十分な反力を得られないために、高強度のハニカムでは、広範囲にわたってハニカムの内部応力が座屈応力にまで達せず、そのままハニカムがその背面の前面構体を図10に示すように後方に押し込んで構体の変形を助長してしまうことが判明した。そこで、ハニカム強度の条件を変えたシミュレーションを繰り返し、前面構体の変形量とエネルギー吸収量との関係性を求めて、変形量が小さく、かつ、エネルギー吸収量になるべく大きくなる強度のアルミハニカムを選定しなおした。

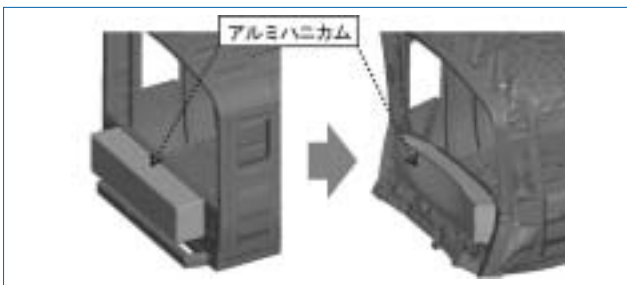


図10：前面構体の変形状況

このシミュレーション結果を図11に、改良前の結果とともに示す。このように、クラッシュブルゾーン（小窓部分）がうまくつぶれて大きなエネルギーを吸収できるようになり、サバイバルゾーン（乗務員室扉の部分）には運転士の生存空間が確保されるようになったため、それぞれのゾーンが設計思想を反映する挙動を示すようになった。

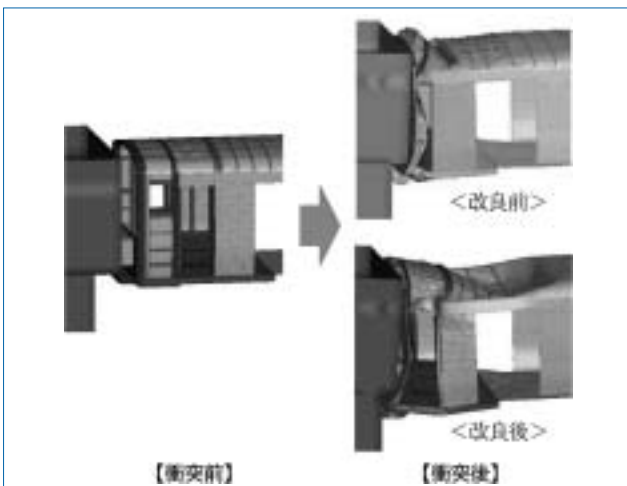


図11：衝突シミュレーション結果

5 模型構体の衝突実験

5.1 実験方法

前章で述べた新しいゾーン配置をはじめとするこれまでの設計内容の検証ならびに実施しているシミュレーションの精度向上を図ることを主な目的として、車両先頭部分の模型構体を製作し、衝突実験を実施した。

供試体は、前章の設計改良結果をベースとした、図12に示すような車両構体の前頭部分（まくらはり付近まで）の縮小模型で、質量調整のための死重を付加したトレーラを後部に取り付けて走行可能な構造としたものである。そして、この構体の最前部に衝撃吸収用のアルミハニカムを取り付けたほかは、一切のぎ装・内装は行わずに用いた。質量は、トレーラに死重を付加して合計を13tとし、実験設備が許容する最大質量とした。その他

の主要な寸法は以下のとおりである。

- a 全高 2,340 mm
- b 全幅 2,370 mm
- c 全長 9,700 mm
- d 車両構体長さ 2,880 mm

なお、車両構体長さのうち、クラッシュブルゾーンの長さは1,120mmである。

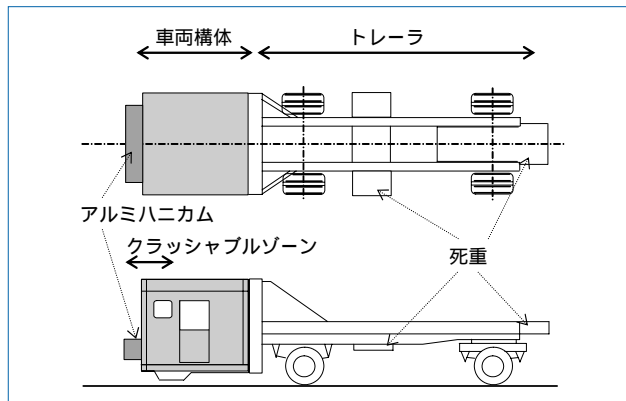


図12：衝突実験用供試体形状

衝突条件は、平面剛体壁に速度45km/hで衝突させることとし、加速路の地面に埋め込まれた牽引ワイヤーにより加速させて、剛体壁に対して正面から衝突させた。なお、この衝突速度は、質量34tの車体が40tの非拘束の相手に速度約38km/hで衝突する場合と、吸収エネルギーが等価となる条件である。

計測項目は、変形挙動を見るための高速度ビデオカメラ撮影のほか、衝突荷重、ひずみ、衝撃加速度、永久変形量の各データを採取した。

5.2 実験結果と考察

供試体の衝突実験後の状態を図13に示す。



図13：衝突実験後の状態

この変形状態を、ゾーン区分に着目して考察する。側構体については、クラッシュブルゾーンである小窓部分に変形が集中し、サバイバルゾーンである乗務員室扉部

分とその後方の変形は小さくおさまっているため、ゾーン区分は正しく機能しているといえる。屋根構体については、変形はクラッシュゾーン内ではほぼおさまっており、問題はないものの、シミュレーション結果とは若干異なる変形状況を呈してしまった。総合的に見ると、両ゾーンは設計時の考え方をほぼ反映した挙動を示したため、今回採用した新しいゾーン区分の設計方針については、有効であることが確認できたといえる。

次に、衝突荷重・吸収エネルギーと変形量との関係を図14に示す。

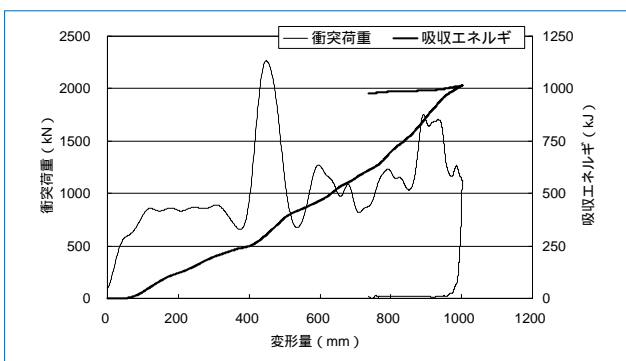


図14：衝突荷重・吸収エネルギー変形量特性

ここでは、変形量がアルミハニカムの厚さと同様となる約400mmの時点で第1のピークが、同じくクラッシュゾーンの長さから強化フレームとスミ柱の厚さを差し引いた残りの寸法と同等（クラッシュゾーンがつぶれきる）となる約850mmの時点で第2のピークがそれぞれ現れており、ここでも、設計時の考え方をほぼ反映した結果が得られている。

しかしながら、この実験の結果、耐え得ると考えていた溶接の一部が予想外の変形モードによって破断したほか、衝撃加速度のピーク値が高い値を示すなど、いくつかの問題点も見出され、今後に向けての課題も提起された。これらも含め、今回の実験では有意義な結果が得られたと考えている。

6 シミュレーションの精度向上の取り組み

6.1 シミュレーションの概要

前章で述べた衝突実験結果をシミュレーションの精度向上に活用するため、供試体の3次元有限要素モデルを作成してこれまでと同様に衝突シミュレーションを実施した。そして、そこから得られた結果を実験結果と比較し、差異が見られる点について、原因の分析とシミュレーションモデルの改良を行った⁵⁾。

供試体の3次元モデルは、今回の供試体がほぼ左右対

称の構造であるため、モデルに対称条件を与えて半車体のみとした。後方のトレーラについては、トレーラと車両構体との接続部分である取付フレームのみをモデル化し、それを重心位置に質量を与えた剛体として表現した。このほかについては、ほぼ実際の構造どおりにモデル化し、また衝突条件も実験と同一とした。

6.2 シミュレーションモデルの改良の流れ

当初のシミュレーションモデルを用いて衝突シミュレーションを実施し、得られた結果を実験結果と比較すると、変形モードはほぼ一致したが、屋根や側はりなど、破断発生箇所を中心に変形状況に差異が見られた。また、シミュレーションの方が、全体的に衝突荷重が高く、かつ、変形量が小さいため、シミュレーションモデルは実際の供試体よりも強度が高くなってしまっていた。

そこで、これらの差異を解決するため、シミュレーションモデルに対し、異なる挙動を示した部分の詳細化をはじめとする様々な改良を行った。その中で、特に溶接箇所については、実際には破断が数多く発生したにも関わらず、モデル上ではこれらの溶接箇所は節点の共有による剛結合となっていたため、破断が全く発生しない構成となっていた⁶⁾。そこで、破断が考えられる溶接箇所については、溶接要素に置き換えるとともに、あわせて、溶接部材の強度試験を実施して破断強度データを入力し、シミュレーション上でも破断が生じ得るモデル構成とした。溶接破断の一例を図15に示す。

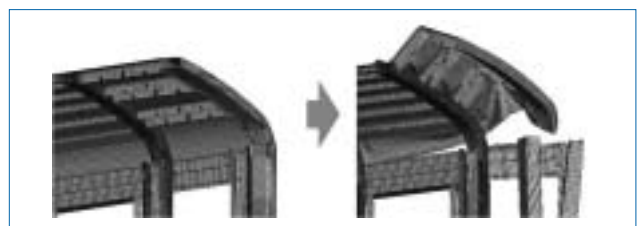


図15：溶接箇所の破断

6.3 改良モデルによる最終シミュレーション結果

以上、様々な改良策を反映させて実施した最終シミュレーションから得られた変形状況を、当初のシミュレーション結果、実験結果とともに図16に示す。

当初のシミュレーション結果と比較すると、スミ柱を含めた側構体が若干外側に開いてしまったものの、屋根部分の変形（破断）状態は実験結果にかなり似た様相を示しており、全体的に実際の現象に近づいたといえる。

次に、同じく最終シミュレーションから得られた衝突荷重 - 変形量線図を、当初のシミュレーション結果、実験結果と重ねて図17に示す。

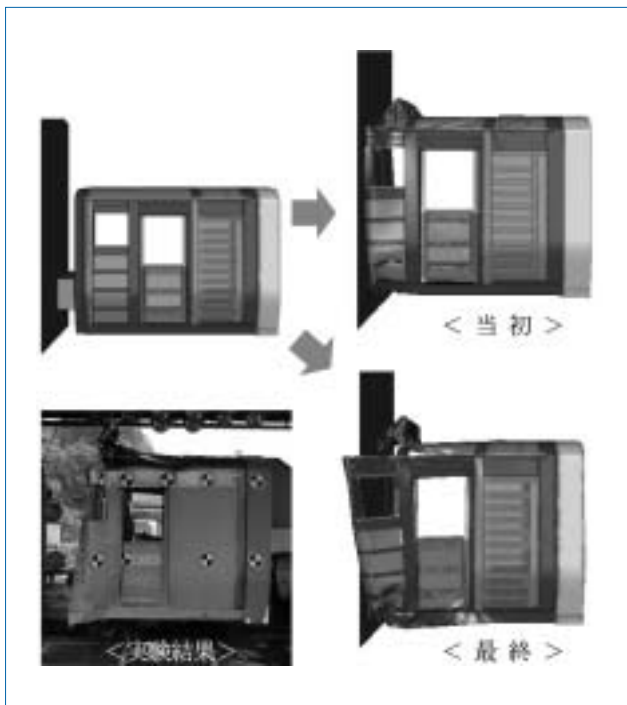


図16：変形状況の比較

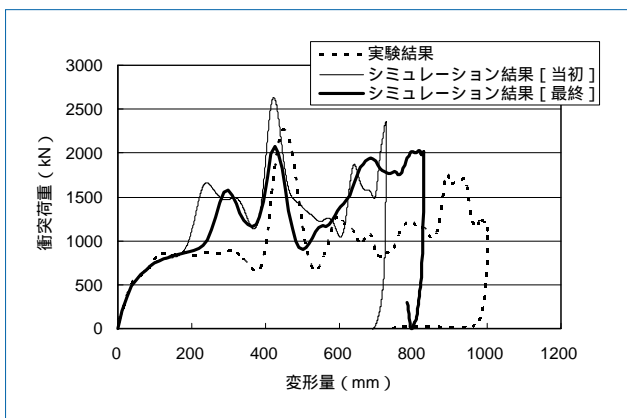


図17：衝突荷重 - 変形量特性の比較

シミュレーション結果と実験結果とを比較すると、衝突現象の特徴を示している各ピーク値は、モデルの改良によってかなり実験値に近づいたといえる。誤差について着目すると、全変形量が200mmほど不足しているが、これは、実際には多数発生した小さな破断がシミュレーション上で再現されていないため、大きな誤差として現れたと考えられる。

以上の結果から、今回のシミュレーションモデルの改良によって、モデル化しなかった小さな破断に起因すると考えられる誤差を除くと、一定のシミュレーション精度の向上が図られたと考えている。

7 おわりに

本研究では、踏切事故に遭遇した場合にも乗客と運転士の安全を最大限確保するための具体策として、衝撃吸収構造をもった先頭車両構造を検討し、衝突シミュレーションを用いて衝突事故時の変形挙動を解析した。そして、一定水準以上の安全性が得られる構造を導き出し、新形車両の設計に反映した。さらに、今回新しく提案した衝撃吸収構造について、模型構体を製作して衝突実験を実施し、その構造の有効性を確認するとともに、実験結果をシミュレーションに反映して精度の向上を図り、シミュレーションに一定レベルの信頼性をもたせることができるようになった。

これから先、本研究で得られたノウハウを用いることによって、信頼性の高い衝突シミュレーションが可能となる。そして、この衝突シミュレーションを車両設計に幅広く活用することによって、安全性の高い車両構造を効率的に実現でき、安全のレベルアップに大きく貢献することができる。今後、この成果を生かした車両設計が推進され、踏切事故に遭遇した場合にも人的な被害が最小限に収まることを期待する。

参考文献

- 1) 舟津浩二、宇治田寧、鈴木康文、前橋栄一：衝撃エネルギー吸収性を考慮した鉄道車両の車体構造，日本機械学会1999年度年次大会講演論文集(3)，No.99-1(1999)，pp.389.
- 2) Francois Lacôte, Henri Lagneau, et al. : Les Tolérances à la collision des matériels ferroviaires, Revue générale des chemins de fer - Novembre, (1993)，pp.25.
- 3) 小嶋啓達、水井直光、福井清之、川口喜昭、塚本雅敏：自動車用薄鋼板の高速引張試験と部材軸圧潰試験，住友金属技報，Vol.50 No.3(1998)，pp.31.
- 4) 鷹取収：加工硬化を考慮した実車衝突シミュレーションモデルのための材料特性，自動車技術会1998年秋季大会学術講演会前刷集，(1998).
- 5) 鷹取収、森本准哉、畑弘敏：鉄道車両の衝突シミュレーション，自動車研究，Vol.24 No.7(2002)，pp.265.
- 6) C.P.Nex, R.A.Smith : Impact performance of model spot-welded stainless steel structures, Experimental Mechanics, Allison ed., (1998)，pp.251.