

二輪車における軽衝突シミュレーション

Simulation of Motorcycle Low Speed Frontal Collision

山口 秀 樹* 松 野 稔 生*

Hideki Yamaguchi Toshio Matsuno

門 田 正 和* 上 田 順 一*

Masakazu Kadota Junichi Ueda

要 旨

衝突現象の予測評価技術の必要性は、従来より四輪車の分野で高く、車体変形や乗員挙動を時間刻みで予測する技術が確立されつつある。

一方、二輪車の基本骨格であるフレーム強度の妥当性を判断するため、開発段階で実車による軽衝突試験が行われている。この軽衝突試験で、は、テスト一回にテスト車一台を必要とし、結果によっては基本レイアウトを変更する必要も生じるため、以前から開発費の低減と開発効率の向上をめざした衝突強度の予測技術を求める声が高かった。

FEM(有限要素法)を用いて二輪車の軽衝突における車体の塑性変形を動的に予測することを試み、実用的な予測手法を確立することができた。なお、この衝突シミュレーションは、二輪車に限定され、またライダーの挙動に関する研究は含まれていない。

ABSTRACT

Predicting and assessing the collision phenomena of automobiles by computer simulation has been useful for various reasons. This paper presents the results of a similar study applied to motorcycle folks and frames.

“Light collision” tests, involving a simple frontal barrier impact at low speed, have been performed as one method for evaluating the structural properties of a motorcycle body in the development stage. The test destroys one motorcycle per test, which can be inefficient, and the basic layout of the frame can be altered depending on the result. Alternatively, it would be desirable to predict the structural properties of the motorcycle body in a light collision to possibly reduce the cost and increase the efficiency of development.

A dynamic simulation for the plastic deformation of a motorcycle body has been attempted for a light collision using Finite Element Method (FEM) and the practical method is illustrated in this paper. This simulation considers the motorcycle alone, and the rider and possible rider-related crashworthiness issues are not included.

1. まえがき

二輪車の基本骨格部品であるフレームは、エンジン、燃料タンク等のコンポーネントを搭載するだけでなく、その構造や剛性は、操縦安定性、振動、乗り心地等に影響をおよぼす。そのため、開発段階では種々のテストが行われ、軽衝突試験は強度確認の一手法として位置付けられている。軽衝突試験では、テスト一回にテスト車一台を必要とし、結果によっては基本レイアウトの変更も必要になる。初期図面段階で軽衝突強度予測の精度を高め

ることが、レイアウト変更やテストのやり直しを減らし、開発効率を高めることに繋がる。

従来の予測手法は、FEMの線形静解析であり、動的な現象を確実に予測することが困難であった。そこでFEMの非線形動解析を用いて、車体塑性変形の動的シミュレーションを試みた結果、精度の良い実用的な衝突強度の予測手法を確立することができた。

本稿では、動的シミュレーションに用いた構造解析モデルと予測手法について解説する。

* 朝霞研究所

2. 二輪車軽衝突試験の考え方

二輪車の開発では、種々の強度試験が行われる。多くは「一般的な使い方で不具合が生じないことを確認する」ことを目的としているが、「予期できないダメージが加わった場合に生じる変形や破損が、二次的な事故を引き起こすことを防止する」ことも重要な目的として存在する。本稿で扱う軽衝突試験は後者にあたる。ダメージが少ない事故の場合、一見して判らない小さなクラック等が発生、その後の乗車中に突然破壊に至るというのは危険である。こうした危険を防止するため、ダメージを受

けクラックが発生する場合には、一見して判る曲がりやへこみが伴うように、材料や構造面での配慮を行っている。

軽衝突試験は、完成車を約 20km/h の速度で壁衝突させ、各部強度のバランスを判断する方法を従来から採っている (Fig. 1)。このとき、基本骨格の強度バランスを次のように設定し、ダメージが加わったことによる部品の変形がユーザに判るように配慮している。

フレーム変形 < フロントフォークを含む
操舵系部品の変形

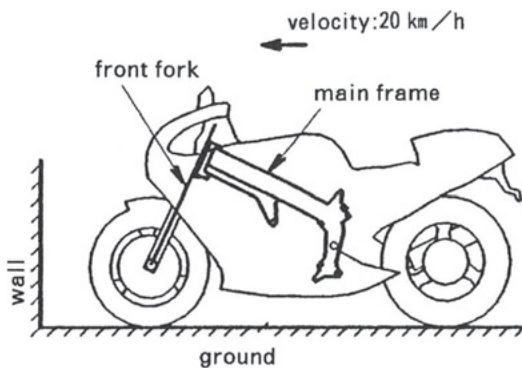


Fig. 1 Light Collision Test

3. 新軽衝突解析の方針

新解析手法の方針を決めるに際して、まず四輪車の衝突解析手法を参考にした。四輪車では、FEM 解析の対象となる衝突速度が 56km/h (35 mph) と速いため、陽解法である中央差分法を用い、応力波の伝播の影響も検討するのが一般的である。解析コードは、市販の専用解析コードが使われている。

一方、二輪車の軽衝突解析は、四輪車の衝突解析と次の点で異なっている (Fig. 2)。

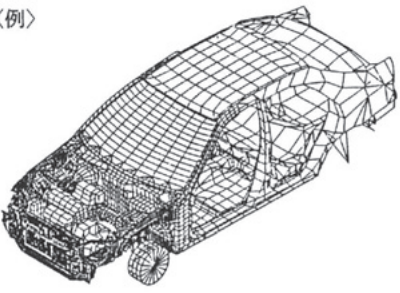
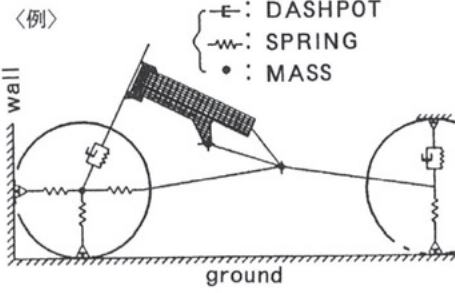
No.	項 目	四輪車での一般的な解析	新解析手法 (二輪車)
1	解析モデル	○モデルが大きい 節点数: 数万のオーダー <例> 	○モデルが比較的小さい 節点数: 1000~2000 <例> 
2	解析コード	PAM-CRASH, DYNA3D 等	ABAQUS
3	解 法	○非線形動解析 (塑性領域) ○複雑な接触問題の解法 ○陽解法	○非線形動解析 (塑性領域) ○非線形バネ接触問題の解法 ○陰解法
4	衝突条件	○速度が速い (56km/h) ○壁にバンパーを含む車体系が衝突	○速度は遅め (約 20km/h) ○壁にタイヤ、サスペンションを介して衝突

Fig. 2 Difference in Analysis between Automobile and Motorcycle

- (1) 対象とする衝突速度は約 20km/h であり、動的現象としての速度は遅い。このため、応力波の伝播の影響は少ない。
- (2) 解析モデルは比較的小さくてよい。
- (3) フレーム材料としては鉄系とアルミ系があり、それぞれ数種の材質がある。フロントフォークの変形部分にあたるフォークパイプは材料が鉄系なので、鉄・アルミフレームとの組合せを含めて、数種の材料の組合せでも解析できる必要がある。
- (4) 四輪車では各部品やコンポーネント間の接触形態は複雑であるが、二輪車では接触の起こる箇所は少なく、壁・タイヤ間およびタイヤ・エンジン（またはラジエータ等）間のみである。
- (5) 四輪車では壁との直接衝突部位はバンパを含む車体系であるのに対し、二輪車ではまず壁にタイヤが当たり、タイヤからサスペンションを通じて変形部（フォークパイプ、フレーム）に荷重が伝わる。

以上の特徴を踏まえて、新解析手法の検討では次の方針を採った。

- (1) 応力波の伝播の影響は少ないので、FEM 解法としては一般の解析で用いられる陰解法とし、解析コードは ABAQUS とする。
- (2) 数種の異種材料の組合せ（鉄系、アルミ系）に対応できること。
- (3) タイヤ、サスペンションの特性を反映できること。
- (4) 解析モデルはできるだけ簡略化し、短時間での解析が可能なこと。

4. 新解析手法

4.1. 解析モデルの構成

簡略化のため車体中心面で 1/2 に分割した解析モデルを Fig. 4 に示す。動解析の開始時間は衝突の瞬間とし、衝突速度は車体モデル全体に初速として与えた。個々のデータは以下に示すように扱った (Fig. 3)。

(1) フレームモデル

フレーム後部は変形に係わらない剛体とみなし¹⁾、リジッド要素に置き換えた。1/2 モデルにしたことと併せて FEM モデルの節点数を 1000~2000 と比較的小さくした。

(2) フロントフォーク

梁要素で表すが、サスペンション機能はばね要素 (SPRING-1) およびダッシュポット要素 (DASHPOT-1) として表わした。ばね要素およびダッシュポット要素は、フロントフォークの下方に組み込み、変形に影響をおよぼさないように留意した。

(3) リヤサスペンション

全体系に対するばね要素 (SPRING-2) およびダッシュ

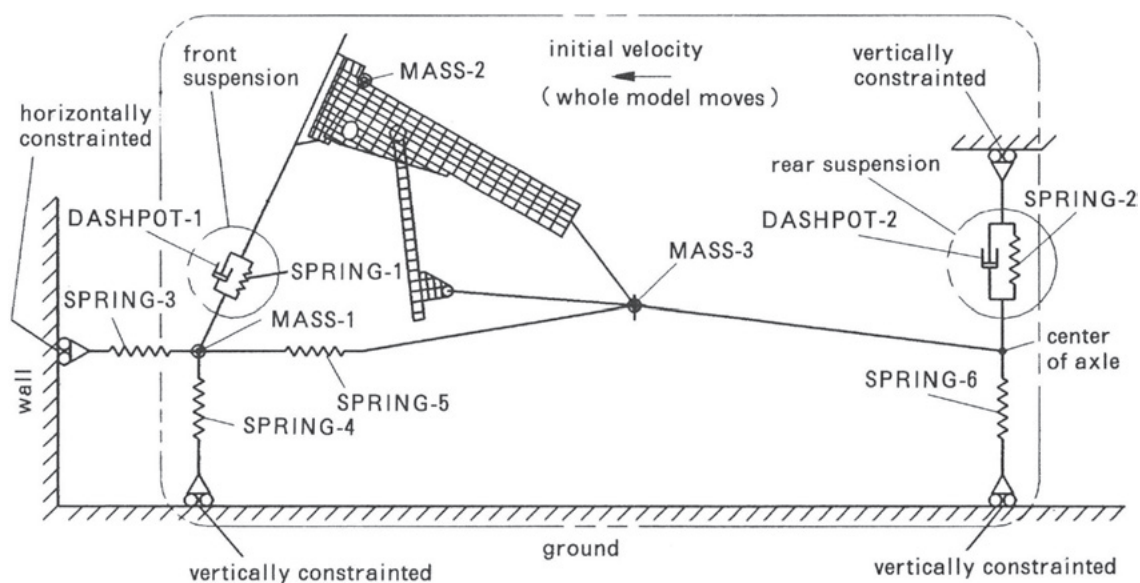


Fig. 3 FEM Model for Analysis of Motorcycle Light Collision

ポット要素 (DASHPOT-2) で表し、特性は伝達比で換算して与えた。

(4) フロントホイール系

壁、地面、エンジン (またはラジエータ等) 間の三つのばね要素 (SPRING-3~5) として表し、非線形特性を与えた。これにより接触から離脱までを表わすことができ、接触問題としての扱いが不要となった。ばね要素 (SPRING-3) の特性を Fig. 5 に示す。

(5) リヤタイヤ

地面との間のばね要素 (SPRING-6) として表わした。

(6) 質量

各部の質量はその位置により軽衝突で生じる変形への影響が異なる。そのため全体の質量を三つに分けて扱った。フロントばね下廻りの質量を MASS-1、燃料タンクおよび計器廻りの質量を MASS-2 とした。その他の質量は、変形に関しほぼ同じ役割を果たすとみなし、全質量から前記二つの質量を除いて MASS-3 とした。各々の質量はそれぞれの重心位置に配置した。

(7) 操舵系部品

フレームとフロントフォークをつなぐ操舵系の部品は梁要素で表わした。必要に応じてシェル要素を用いれば、詳細を解析することもできる。

4.2. 材料特性

4.2.1 応力-ひずみ線図

一般に弾性域を扱う線形解析では、材料データとしてヤング率とポアソン比があれば解析できる。これに対し、永久変形を求める材料非線形解析では、塑性域まで含めた応力-ひずみ線図が必要になる。また、与える材料データの精度がそのまま解析結果の精度を左右するので、材料データには高い精度が必要である。

このため、実力値としての応力-ひずみ線図を、実体

から切り出したテストピースを用いて求め、代表的な鉄系とアルミ系の材料値をデータベースとして揃えた。ただし、これは常温におけるほぼ静的な場合に限定されている。

4.2.2 降伏応力のひずみ速度依存

動的な場合、多くの材料ではひずみ速度が増すに伴ってその降伏応力は高くなる。Fig. 6, 7 は、軟鋼およびアルミニウムのひずみ速度の違いによる応力-ひずみ線図を示している²⁾。

一般に、軟鋼のように上下の降伏点の明瞭な材料では、降伏応力のひずみ速度依存性は高く³⁾、ひずみ速度によっては降伏点が静的な場合に対し二倍以上になる。アルミニウムのように上下降伏点の明瞭でない材料では、速度依存性は低い³⁾、ひずみ速度の増加に伴い降伏点および同一ひずみでの応力値が増加している。

降伏応力が速度依存性を持つための材料モデルとして Symonds-Ting による次の提案式がある⁴⁾。

$$\sigma_y = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/p} \right] \quad \dots\dots (1)$$

σ_y : 有効降伏応力

σ_0 : 静的降伏応力

$\dot{\epsilon}$: ひずみ速度

D, p: 降伏点のひずみ速度依存の状態を表す実験から得られる定数

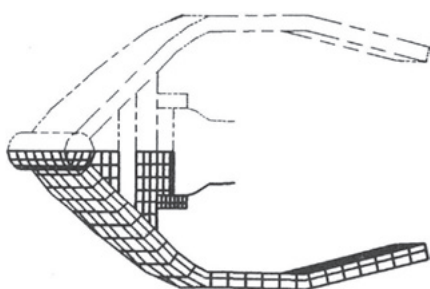


Fig. 4 FEM Model of Frame (Upper View)

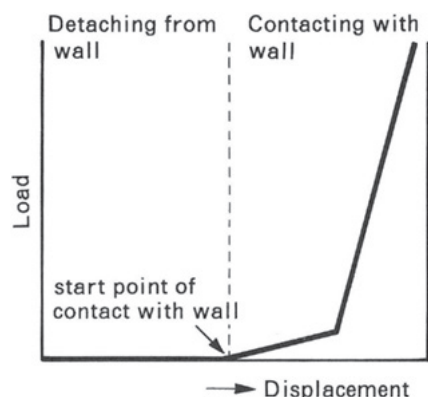


Fig. 5 Example of Front Tyre Spring Characteristics (between Wall and Front Tyre)

4.2.3 降伏応力のひずみ速度依存に関する入力データ

解析コード ABAQUS でも(1)式が採用されている。個々の材料に対する入力データとして、実験定数 D 、 p は公表されているものが極めて少ない。新たな実験によってデータを採るには大がかりな設備が必要となるため、各材料につき暫定値を推定することから始めた。

暫定値の推定に際しては、ひずみ速度依存に関して公表されている実験データを収集し、その中から実際に使われている個々の材料に近いものを選び、(1)式から定数 D 、 P の推定値を求めた。更に、新解析手法の妥当性を弾性変形範囲内で確認した後に、塑性変形を伴う解析を実施し、実験との照合を繰り返して値を修正し、定数とした。

定数 D 、 P は、その後の開発における解析に適用され、実用上での精度が十分であることが確認されている。

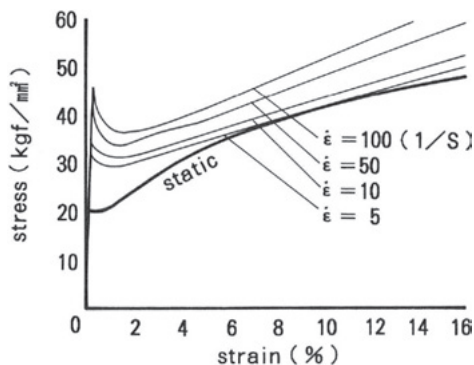


Fig. 6 Stress-strain Curve of a Low Carbon, Steel for Different Rate of Strain

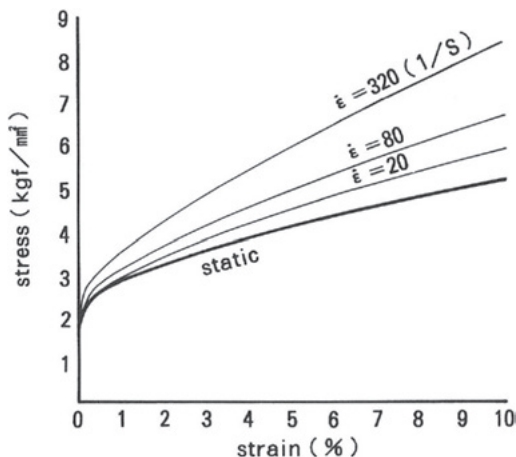


Fig. 7 Stress-strain Curve of a Aluminum for Different Rate of Strain

5. 新解析手法の評価

新解析手法により、以下の代表的な出力が得られる。

(1) 各節点における時間毎のひずみの変化

結果はグラフ表示され、ひずみ波形の大きさ、残留ひずみの有無、程度等がわかる。通常は代表的な高応力箇所について出力する。

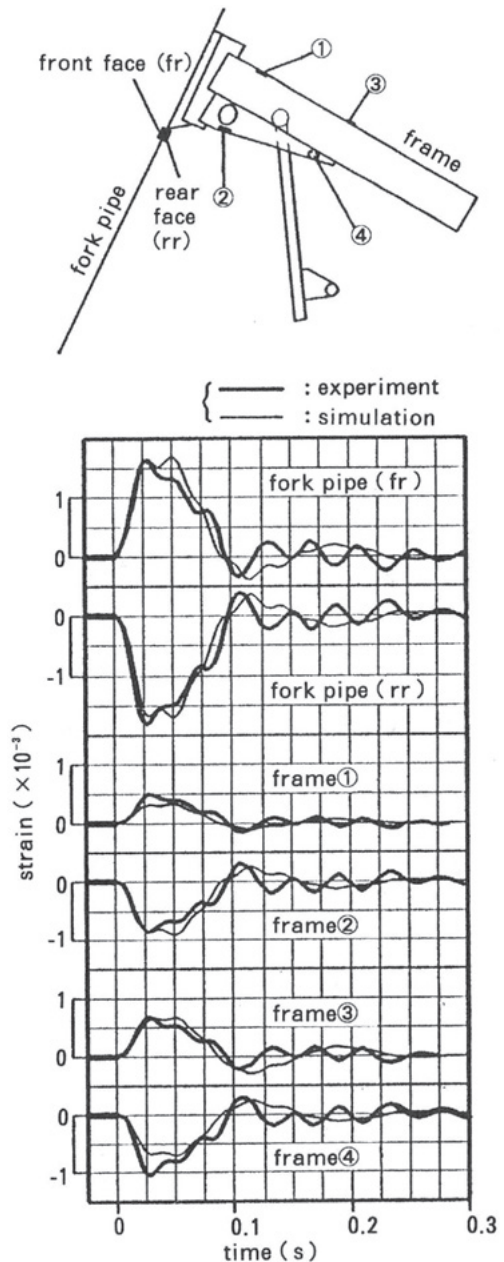


Fig. 8 Comparison of Strain between Experiment and Simulation at Collision Velocity of 5.9 km/h

(2) 時間毎の車体全体の変形状態

等時間刻みで出力すれば、車体の挙動と変形の過程を把握できる。また、最終変形図から衝突後の変形形態がわかる。

(3) 残留変形量 (ホイールベース換算)

最終変形図を変形前の図に重ねることにより、残留変形量が得られ、ホイールベース変化量に換算して評価できる。変形後のフロントフォークを変形前に置き換えることで、フレームとの変形割合は算出される。

本解析手法は、これらの出力を実験結果との照合で検証しており、以下にその内容の一部を示す。

(1) 弾性変形範囲内の軽衝突

Fig. 8 に弾性変形範囲内の軽衝突について、シミュレーションと実験の結果を比較して示す。

テスト車は排気量 75cm³ の二輪車で、この時の衝突速度は 5.9km/h と遅い。

比較点は、フォークパイプで最も高応力となるボトムブリッジ (操舵系部品のひとつ) 付根部の前後とフレームの代表的な高応力箇所 4 点とし、時間的なひずみ変化を

グラフに表した。シミュレーションと実験結果の時間的なひずみ変化は、波形および大きさが共に良く一致していることがわかる。また、衝突をエネルギーの伝達として捕える場合の重要なファクタである壁への接触開始から離れるまでの衝突時間は、この例では約 0.1s であることがわかる。

(2) 塑性変形を含む軽衝突 (フォークパイプ変形の例)

Fig. 9、10 に排気量 250cm³ の二輪車による解析例を示す。フレームはアルミ系であり、衝突速度は 20km/h である。

Fig. 9 は、衝突直後からの車体の挙動を等時間刻みに出力したものである。まず、衝突後フロントフォークが沈みこみながら変形し、壁から押し戻されて伸び上がり、フォークが曲がったまま車体全体が壁から離れていく。この挙動は高速度カメラで捕らえた実際の挙動と良く一致しており、シミュレーション結果が妥当であることを示している。この例では、壁に接してから離れるまでの衝突時間は、約 0.12s である。

Fig. 10 は、変形状態を実験と比較したものである。変形状態は、衝突後のホイールベースの変化量に換算し、比較される。変形の大きさおよびフレームとフロント

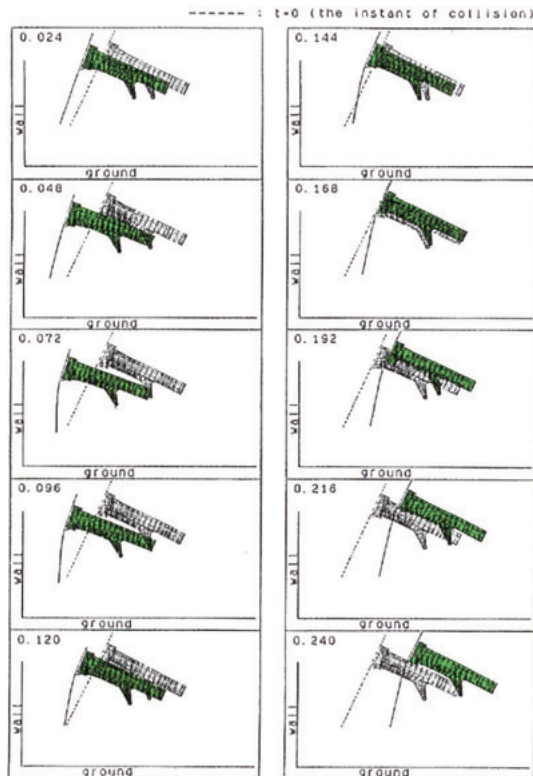
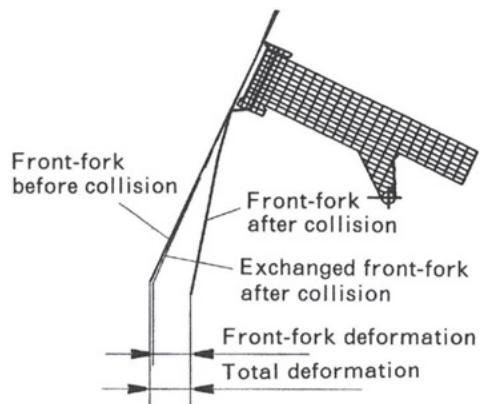


Fig. 9 Behavior of Motorcycle Body at Collision Velocity of 20 km/h



Remained deformation	Experiment	simulation
Total mm	53.5	49.1
Frame mm (%)	6.0 (11.2)	3.6 (7.3)
Front-fork mm (%)	47.5 (88.8)	45.5 (92.7)

Fig. 10 Comparison of Remained Deformation between Experiment and Simulation at Collision Velocity of 20 km/h

フォークの変形の割合は、シミュレーションと実験結果でよく一致していることがわかる。

(3) 塑性変形を含む軽衝突（フレーム変形の例）

次に、鉄系フレームが変形する例を示す。テスト車は排気量 75cm³ の二輪車であり、衝突速度は 20km/h である。

Fig. 11 は、衝突後のフレームの変形状態を、シミュレーションによる変形図と実際とを比較したものである。フレームの変形形態は、シミュレーションと実験結果で良く一致していることがわかる。

6. 実用化への対応

本解析手法では、実用性を高めるために次の対応を図っている。

(1) 解析モデル

解析モデルは、簡略化により節点数を限定しただけでなく、振動解析などの解析モデルを僅かに手直しするだけでそのまま軽衝突シミュレーションに使用できるようにした。

(2) データベースの構築

材料のデータベースでは、代表的な材料について実体

ベースでの応力-ひずみ線図とひずみ速度依存に関する定数を揃えた。ばね、ダッシュポットおよび質量のデータベースは、それぞれの車格毎に代表的なモデルの特性値を揃えた。これらの活用により、開発初期段階でも基本骨格の軽衝突強度の検討が容易になった。

7. まとめ

今回確立した軽衝突シミュレーション解析手法をまとめると以下のとおりである。

- (1) シミュレーション結果は、実際の軽衝突試験結果とよく近似しており、妥当な解析手法である。
- (2) 軽衝突テストを実施しなくても開発初期段階でのフレーム強度予測が可能になり、テスト車の削減、開発効率の向上に貢献できた。
- (3) FEM モデルの流用とデータベースの構築により実用性が更に高められた。
- (4) 今後は、材料データベースの充実、入出力の自動化等により更に実用性を高めていくとともに、高速域での検証を含め、応用範囲の拡大を計る必要がある。

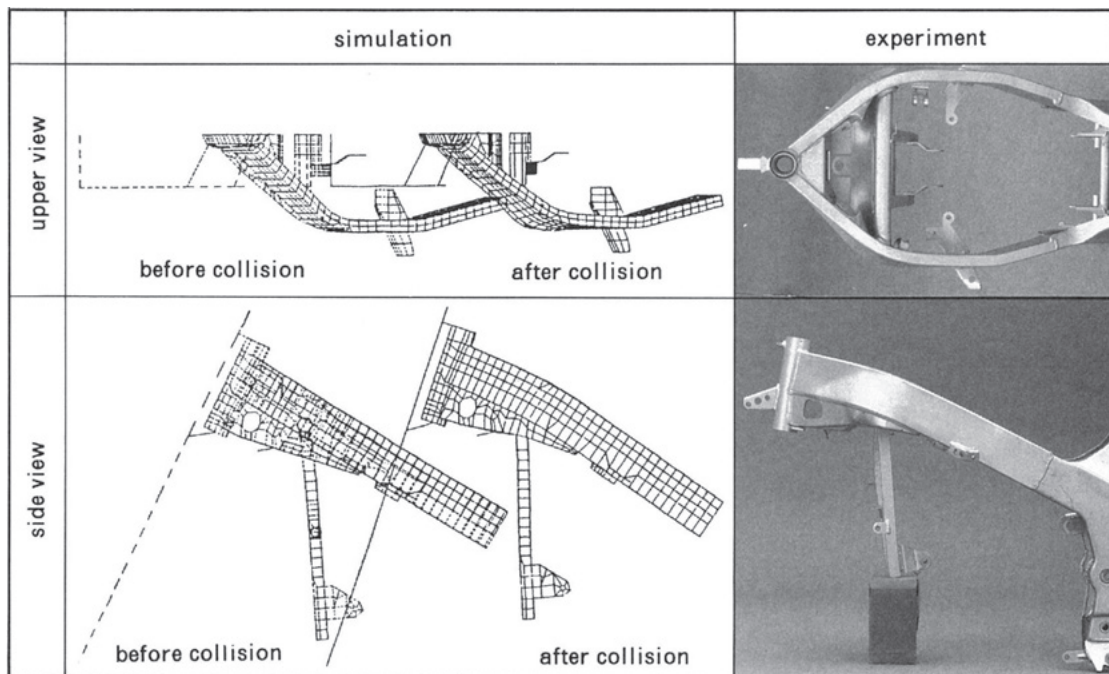


Fig. 11 Comparison of Frame Deformation between Simulation and Experiment at Collision Velocity of 20 km/h

参考文献

- (1) 江守一郎、自動車事故工学 技術書院
- (2) 田中吉之助、衝撃による応力ひずみ曲線
日本機械学会誌 第69巻 第575号 1966
- (3) 金属便覧 日本金属学会編 丸善株式会社
- (4) 林卓夫、田中吉之助、衝撃工学 日刊工業新聞社

■著 者■



山 口 秀 樹



松 野 稔 生



門 田 正 和



上 田 順 一