



技術論文

二輪車タイヤの衝突特性解析

Crash Analysis of Motorcycle Tire

藤井 茂 Shigeru Fujii

●研究開発センター コア技術研究室

Abstract

When a motorcycle crashes, the front tire generally receives the reaction force first. And the force influences the following motion of the motorcycle and the rider. So the reaction force for the tire should be calculated with a good degree of accuracy, otherwise the evaluation of injury potential in a motorcycle crash simulation may have serious error. This paper describes the development of the FE (Finite Element) model of a tire consisting of rubber, nylon cord, aluminum rim and air. The results of the tire crash simulation using this model produced good agreement with the data from both static and dynamic experiments.

要旨

二輪車が衝突する多くの場合において、前輪タイヤが一番はじめに対象物に接し、反力を受ける。そして、タイヤが受けた力はその後の二輪車やライダーの挙動に大きな影響を与える。よって、タイヤの反力を十分な精度を持って求めることができれば、シミュレーションによってライダーの傷害の程度を予測することはできない。本論文ではゴム、ナイロンコード、アルミ製のホイール、空気内圧をできるだけ正確に表現できるように詳細なタイヤの有限要素モデルを開発した経緯について述べる。このタイヤモデルの衝突シミュレーションの結果は静的な実験、動的な実験のいずれの結果ともよく一致した。

1 はじめに

二輪車の衝突問題については衝突形態の多様性からシミュレーションモデルの活用が期待されており、近年シミュレーションの有効性を示す報告がなされている^{1, 2)}。一方、図1に見られるように衝突時の二輪車乗員の挙動は自由度が大きく、再現性が得られにくい。たとえば、二輪車の前輪が四輪車のセンターピラーに当たるかまたは外れるかの僅かな違いで二輪車及び乗員のその後の挙動は大きく異なる。従って、シミュレーションで二輪車の衝突現象を解析するためには、はじめに対象物に衝突する個所であるタイヤの衝突特性を精度良く求め



図1 二輪車対四輪車の衝突試験の様子

ることが必要不可欠であると考えられる。そこで、本研究ではリムが破損するような条件まで含めてタイヤが衝突対象物から受ける力を精度良く推定する手法を検討する。

2 解析モデル

一般的にはタイヤのFEM (Finite Element Method) モデルではホイールを剛体と見なしたり拘束点とする。しかし、実車の衝突試験にてホイールのリム部が破損する場合があることから、このような場合まで適用範囲を広げられるようにホイールのリム部もFEMモデルとした。また、ナイロンコードはモデル対象としたバイアスタイヤでの実際の配置に合わせて1層ごと1方向補強膜として表し、タイヤゴムはソリッド要素で表した。また、タイヤとホイールで囲まれる密閉されたエリアの周囲に空気圧要素³⁾を配し、圧力変動を考慮できるようにモデル化した(図2、3)。

2.1 リムとその周辺部のモデル

ホイールはリムの部分のみモデル化し、リムの付け根部分を全周にわたり拘束した(図3)。なお、スポークの有無で解析結果に有意の差が生じなかったため解析時間短縮のため、スポークは省略することとした。

図3で○に囲まれた部分、すなわちタイヤの下端になる面はビードワイヤーにてリムに強く押し付けられているので、リムに固着されているとした。一方、サイドウォールの外側の面とリムはすべりが生じるため接触対象面として定義した。リムの先端部周辺のタイヤは大きく変形するために、メッシュを密にした。

リムの材料データはリムの一部から取り出したテストピースにて引張試験を行い塑性時の特性を求めた。

2.2 タイヤゴムのモデル化

タイヤゴムについては8節点のソリッド要素を用い、材料モデルについては以下の3つの仮定を採用した。

①材料は等方性を有する。(Neo-Hookean 形ひずみエネルギー関数を適用)

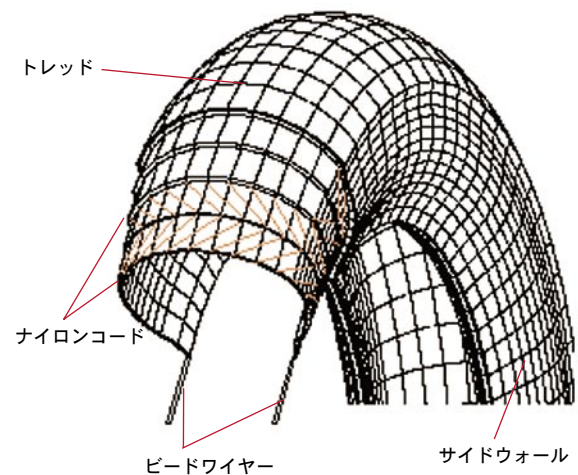


図2 タイヤの構造

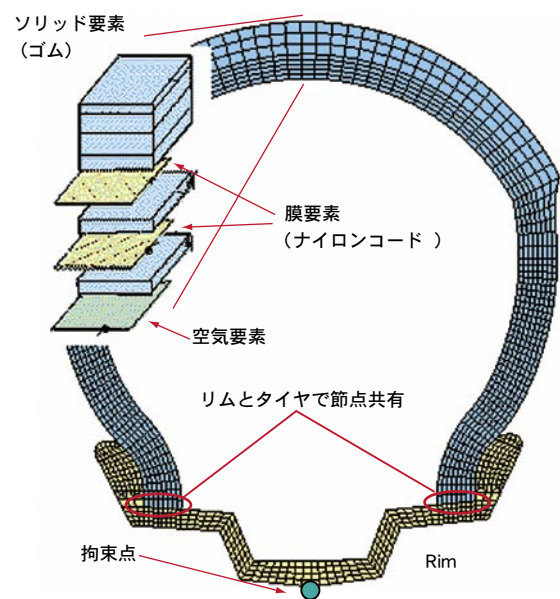


図3 タイヤのFEMモデル(断面)

- ②材料は近似的に非圧縮である。(体積比によるエネルギー増分をひずみエネルギー関数式に追加)
③材料は粘弾性を示す。(1項のみのProny級数による等方形線形粘弾性モデルをせん断挙動に適用)
Neo-Hookean 形ひずみエネルギー関数の式 (微小圧縮性を考慮)

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad (1)$$

U : 単位体積あたりのひずみエネルギー
 C_{10} : せん断剛性に関する材料定数
 D_1 : 体積弾性に関する材料定数
 $J = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3$: 弾性体積比
 λ_i : 主ひずみ方向の伸び度
 $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$: ひずみ第1不変量
 $\lambda_i = \lambda_i \cdot J^{(1/3)}$

Prony 級数 (1項) によるせん断粘弾性の式

$$C_{10} = C_{10}^0(1 - g(1 - e^{-t/t_0})) \quad (2)$$

$$C_{10}^\infty = C_{10}^0(1 - g) \quad (3)$$

C_{10}^0 : 瞬時的応答時の材料定数
 C_{10}^∞ : 静的な材料定数
 g : 粘弾性の性質を示す定数
 t : 対応するひずみ増分が生じてからの時間
 t_0 : 時定数

(1)(2)(3) 式において独立な4つの定数 D_1 、 C_{10}^∞ 、 g 、 t_0 を決めることにより材料モデルが定義できる。

タイヤゴムの材料定数は下記の1軸引張試験の結果より同定した。

試験方法: JIS K6251(加硫ゴムの引張試験方法)
に準拠

試験速度: 10mm/min

試験片形状: ダンベル状 3号形

(平行部長さ20mm、幅5mm、厚さ1~2mm)

タイヤからトレッド部、サイドウォール部、カーカス部、インナーライナー部とそれぞれの部位について各5枚のテストピースを作成し、それぞれについて100%伸びまでの引張試験を行った。当初は材料モデルとしては上記に示した3つの仮定のうち粘弾性を示すという③の仮定を採用しなかった。その場合には図4に示すように小さなひずみから大きなひずみまで応力が一致するようなモデルは得ら

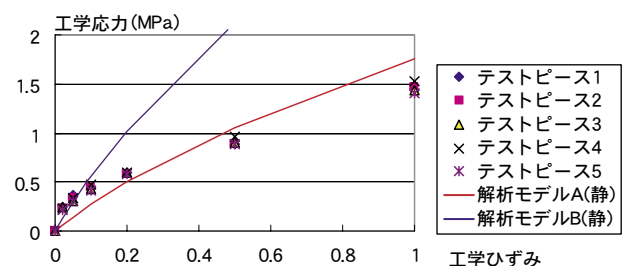


図4 材料試験結果と材料モデル応答の比較の例
(粘弾性考慮しない場合)

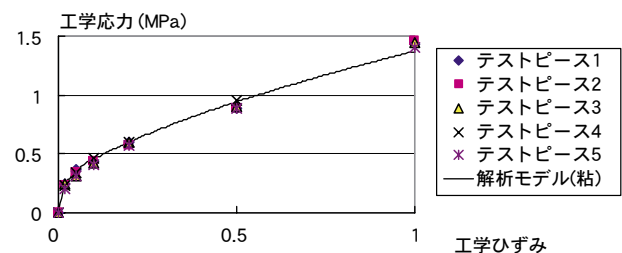


図5 材料試験結果と材料モデル応答の比較の例
(粘弾性考慮した場合)

れなかった。しかし、③の仮定を採用することにより、図5のように材料定数を同定することが可能となった（表1）。また、 D_1 については解析ソフト（ABAQUS explicit）のデフォルト値を用いた。

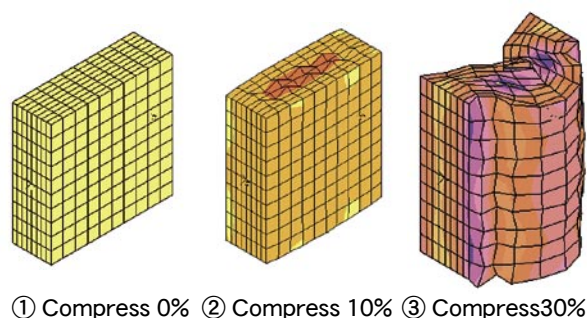
2.3 ナイロンコード特性とモデル化

ナイロンコードは繊維方向に1方向に補強された膜要素としてゴムを表すソリッド要素の間に1層ずつ配置した。ナイロンコードの強度的な役割は非線形性が強く、特に圧縮時の剛性については注意が必要である。本来は圧縮側と引張側で異なる材料特性を用いることが望ましいのであるが、用いたソフトにそのような機能がないため、ナイロンコードの剛性を線形とした。

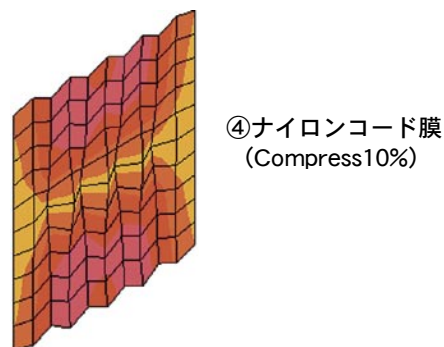
このモデル化の妥当性を検証するために図6に示すような部分モデルを利用した。この部分モデルはサイドウォールを模しており、ゴムのブロックがナイロンコードにて補強されている。このモデルを繊維方向に圧縮、引張する解析にて挙動や応力を求めた。引張りでは単に断面が小さくなりながら伸びるだけであるが、圧縮時には図6①～③に示すようになる。すなわち、圧縮力がかかると内部で膜が④のように蛇腹状に座屈し、その後③のように全体が座屈する。ナイロンコードを入れない場合と入れた場合の応力を比較すると（図7）引張時（グラフ右側）ではナイロンコードが入ることで剛性が増えるが圧縮側では差が小さい。図7を詳細に見るとナイロンコード入りのものは1%程度の圧縮ひずみまでは引張時と同様の傾きであるがそれ以上の圧縮ひずみに対してはゴムのみの場合の傾きと同程度であり、その傾きが変わる時点で膜の座屈が生じている。そして、同様の解析をメッシュをより細かくして行った場合には引張時の応答は変化しないが、圧縮時の応力はゴムのみの場合に近づく。このような現象が生じるため、充分細かいメッシュを作成すればナイロンコードの剛性を線形としてもゴムブロックと組み合わせたモデルでは実際に近い挙動を示すことが推定される。

表1 部位ごとの材料定数

部位	材料定数 C_{10}^{∞} (MPa)	g	t_0 (sec)
トレッド	0.3	0.9	2
サイドウォール	0.35	0.9	2
カーカス	0.37	0.85	2
インナーライナー	0.3	0.8	2



① Compress 0% ② Compress 10% ③ Compress 30%



④ナイロンコード膜
(Compress 10%)

図6 サイドウォールモデル圧縮シミュレーション

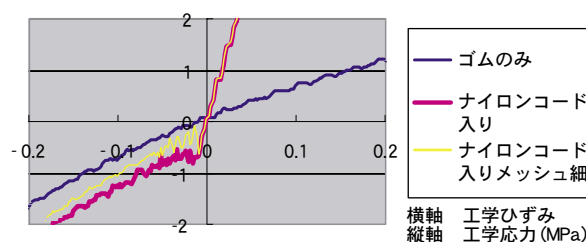


図7 サイドウォールモデル応力-ひずみ

3 解析結果と検証試験

3.1 静荷重試験

静荷重試験（図8）では10mm/minと500mm/minの2通りの負荷速度にて試験を行った。その結果、反力はタイヤが底付きする（トレッドとサイドウォールの内面同士が接触する（図9③）ところまではほぼつぶれ量に比例して大きくなり、底付き後は急激に反力が大きくなった（図10）。また、底付き後のつぶれ量に対する反力の増加量はホイール単体で圧縮した場合の2倍ほどであった。これはホイール単体で圧縮する場合リムが容易に対象物とすべるために曲がり易いのに対して、タイヤがついている場合にはタイヤがリムの曲がりを妨げることが原因になっていると考えられる。なお、負荷速度の違いは反力の大きさに大きな影響を与えることがわかった。また、いずれの場合も破損はリムの付け根の角部に発生した。

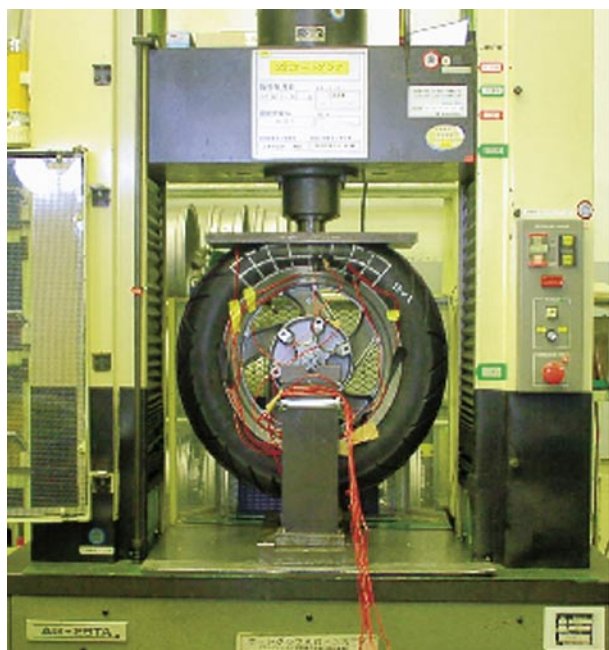


図8 静荷重試験の様子

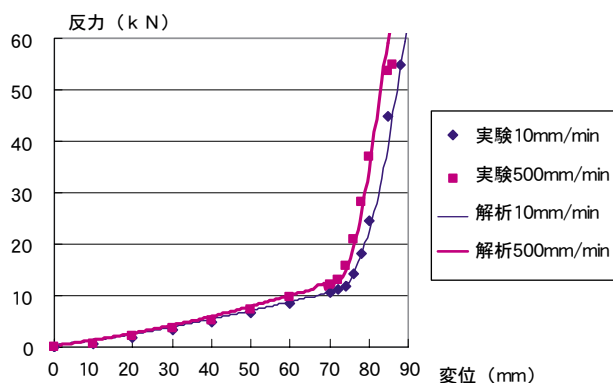


図10 反力比較（実験対解析）

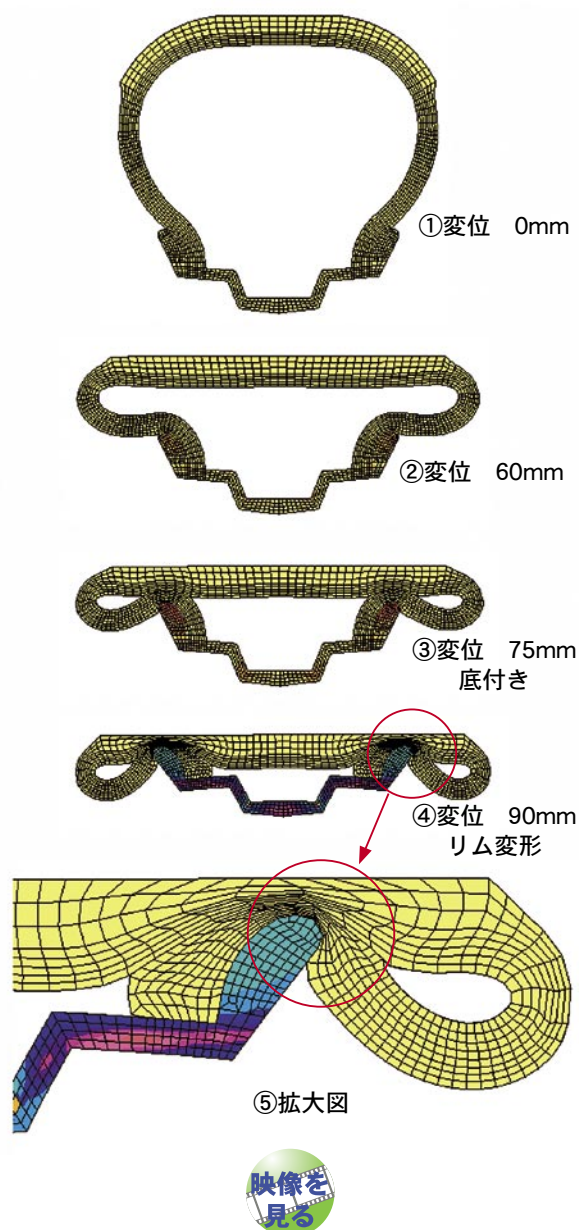


図9 解析変形状（断面図）

反力については粘弾性を考慮したタイヤゴムのモデルを用いることにより負荷速度の違いによる差も含めて再現できた（図 10）。また、変形形状の様子についてもシミュレーションで実験をほぼ再現できた（図 11、12）。なお、ナイロンコードの剛性値を低い値に変更した場合には図 13 のように折れ曲がり方が異なるものになる。

シミュレーションでは図 9 ⑤の○で囲まれた部分の要素形状が潰れ、かつ、ゆがむために ADAPTIVE MESH 法³⁾を用いている。また、図 12 の○で囲まれた部分はアワグラスモード変形が発生し易いためにアワグラス制御が必要である。

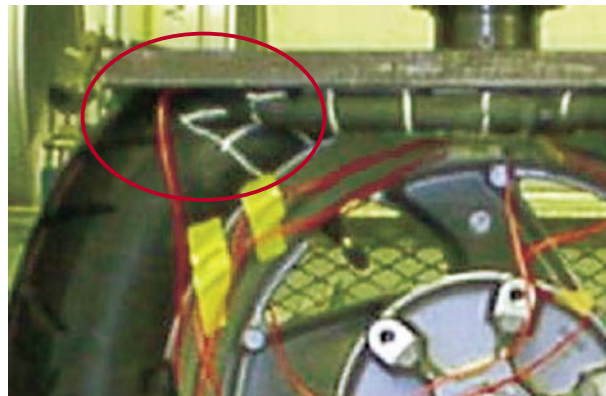


図 11 静荷重試験時圧縮変形形状

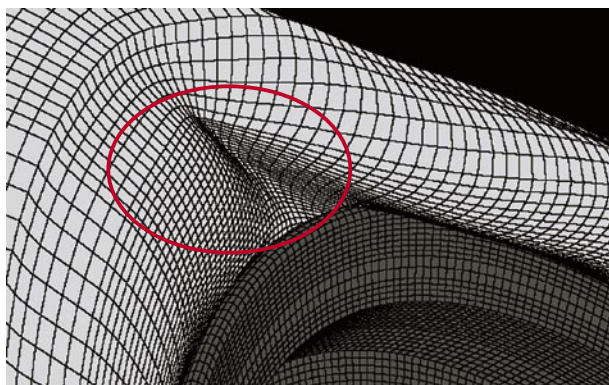


図 12 解析変形形状

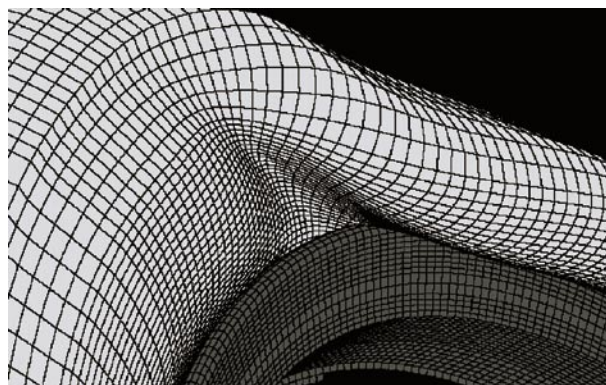


図 13 解析変形形状（ナイロンコード剛性弱くしたもの）

3.2 動荷重試験

静荷重試験では負荷速度のオーダーが、想定される2輪車の衝突速度と違うので、より実際に近い条件にてシミュレーションモデルを検証するために落下試験を行った。

80kg ほどの錘を高さ 25cm ～ 3m までの6段階の高さより自由落下させて固定したタイヤに衝突させ、その際の挙動や反力を計測した（図 14）。なお、高さ 3m の場合はホイールの破片が飛び散り、用いた試験設備においては危険であることがわかり、1度しかデータを取れなかった（図 15）。一方、高さ 2m からの落下は3度の試験を行い確度の高いデータが取れ、かつ完全にホイールが破損するまで試験が行えたので、2m の場合の反力の結果を解析結果と比較したものを図 16 に示す。この図のようにいずれの高さからの場合でも試験結果と解析結果で反力が良く一致した。ゴムの粘弾性モデル

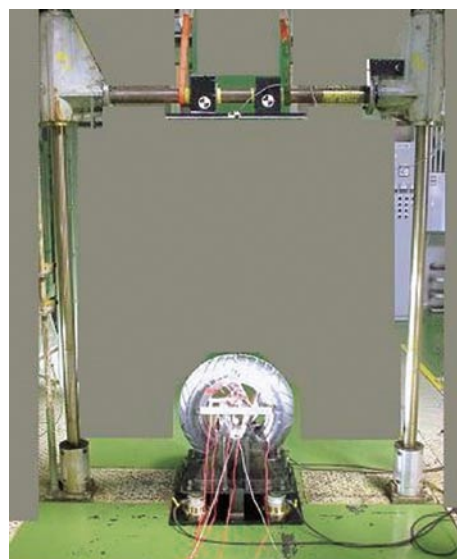


図 14 落下試験

が、この試験での速度域においても負荷速度の違いによる剛性の変化を表すことができたためと思われる。一方、アルミホイールの剛性のひずみ速度依存性については考慮しても反力に有意な差が生じなかった。

4 課題

本研究にて用いた解析モデルは節点数約30万とタイヤのみのモデルとしては非常に大きなモデルであり、現状では0.04秒のシミュレーションに約1日を要する。そのため、車体と連結したモデルでシミュレーションを行うことは非効率である。よって、解析モデルを簡略化することが必要である。

5 おわりに

本研究ではタイヤが衝突対象物から受ける力を求めることができるようにFEMモデルを作成した。静荷重試験、動荷重試験での検証結果から解析結果は十分な精度を持つことが確かめられた。

参考文献

- 1) S. Iijima, et al.: Exploratory Study of an Airbag Concept for a large touring Motorcycle, Paper No.98-S10-O-14, Sixteenth International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles(1998)
- 2) 中谷 有ほか：二輪車衝突コンピュータシミュレーション手法に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.104-01-152(2001)
- 3) Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc : ABAQUS/Explicit User's Manual(ver6.2) (2001)

著者



藤井 茂

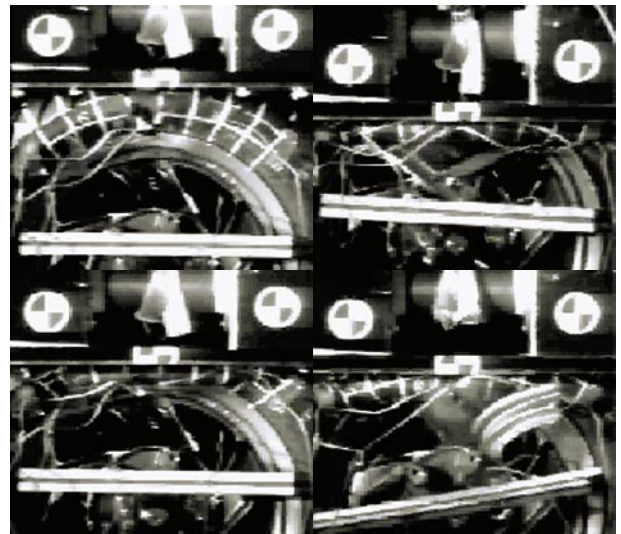


図 15 落下試験 ホイール破壊の様子
(高さ 3 m からの落下)

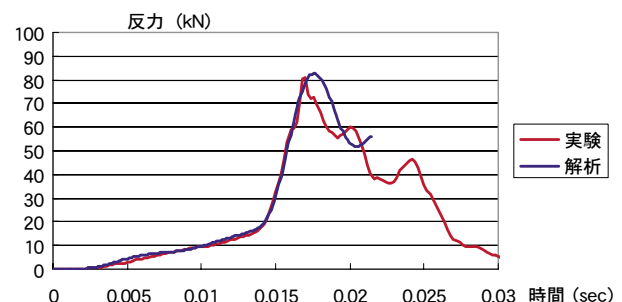


図 16 落下試験反力比較 (2 m からの落下)