

車両衝突を受ける橋梁用防護柵に関する数値解析的研究

NUMERICAL ANALYSIS ON BRIDGE GUARD FENCES SUBJECTED TO
VEHICLE COLLISION IMPACT

伊藤 義人*, 森 正樹**, 鈴木 信哉***, 安藤和彦****

Yoshito ITOH, Masaki MORI, Shinya SUZUKI and Kazuhiko ANDOH

*工博 名古屋大学教授 理工科学総合研究センター (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**工修 名古屋鉄道株式会社 (〒450-8501 名古屋市中村区名駅 1 丁目 2 番 4 号)

***大学院生 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

****建設省土木研究所 主任研究員 (〒305-0804 筑波市旭 1)

Recently, there has been an increasing requirement to develop a new type of guard fences and improve their capacities due to the increases of the traffic speed, the large-scale vehicles and heavy trucks, and the height of the center of gravity of trucks. However, it is very hard to test the performances of full-scale guard fences in the field because of its huge consumption in time and cost. In this study, an FEM model is developed for trucks to reenact their behaviors. In addition, the feasibility of this model is demonstrated in an experimental case of collisions of the heavy truck with guard fences.

Key words : guard fence, vehicle collision impact, FEM

1. まえがき

近年、道路交通網の整備や車両性能の向上などにより、物流の中に占める自動車の役割はますます重要となっている。また、平成 5 年 11 月の車両構造令の変更により、車両重量(GVW)の制限が 20tf から 25tf に引き上げられたため、道路交通の高速化や車両の大型化・高重心化が進み、自動車のみならず道路構造や安全施設に対しても、それに対応してさらに安全性を増した設計が強く要望されている。この安全施設の一つに防護柵があげられるが、強度的に高速化、大型化、高重心化の影響を特に受けるものである。

車両衝突時における防護柵の変形や車両の離脱角、加速度、転倒条件などは防護柵の材料特性や形状などに依存するため、これらの影響を設計段階で推定するとともに、最終的には乗用車やトラックを用いた実車衝突実験によってその性能を把握しているのが現状である¹⁾。しかし、現在の防護柵構造の基本は昭和 30~40 年代に確立されたものであるため、今後の高速化・大型化・高重心化に向けて改良や新形式のものを開発していく必要がある²⁾³⁾が、実車衝突実験はコストや再現性などの面で多くの問題を抱えており、これを補完するための解析用衝突シミュレーションモデルの開発が強く望まれている。

車両衝突時の防護柵の衝撃特性を明らかにするために、さまざまな観点からの研究がなされている。例えば、振り子式実験装置を用いて車両の衝撃力特性を把握しようとし

た研究⁴⁾⁵⁾や、模型自動車⁶⁾の実験結果からばね質点モデルを推定して解析的に衝撃力特性を明らかにするような研究⁷⁾⁸⁾は比較的多く見られる。このようなモデルを用いた解析は、比較的良好に小型模型実験結果をシミュレートできている。

しかし、道路構造物の車両衝突問題においては、車両特有の衝撃力特性が存在するために、実構造物と実車両について検討する必要がある。加えて防護柵の機能として、車両の衝撃力を受けとめつつ車両の路外逸脱を防止し、正常な方向へ誘導する必要があるため、防護柵の耐衝撃力特性のみならず、衝突時の車両の挙動を再現できる車両モデルの構築が必要である。乗用車のような比較的重量が小さい車両は、車両前部のクラッシュブルゾーンにおいて衝撃エネルギーを吸収できる構造⁹⁻¹²⁾を持っている。それに対して大型トラックは車両前部の損傷によってエネルギー吸収をするが、車両重量が大きいことから衝撃力の影響は防護柵に大きく伝達してしまう。また、積載時には車両重量配分が後部に偏ることから、特に防護柵衝突のような方向転換を伴う衝突の場合、積載物の慣性によって車両挙動、衝撃力特性などに大きな影響を与えるものと考えられる。

そこで本研究では、大型貨物車両や高重心車両が防護柵に衝突した場合の車両の路外逸脱や積載物の散乱等を防止する防護柵構造のうち、橋梁用鋼製高欄型 S 種防護柵について三次元衝突シミュレーションモデルを作成し、衝突時における車両の挙動、防護柵の変形特性等についてフルス

ケールの数値シミュレーションを行い、実験結果と比較してその再現性を検討する。なお、S種とは防護柵の最上級種別を意味する。

本研究における解析には汎用衝撃応答解析プログラムLS-DYNA3D¹³⁾⁻¹⁵⁾を用いた。

2. 防護柵に関する現状と対象とした防護柵

2.1 防護柵の従来の研究

日本における防護柵に対する実車衝突実験は、1958年に運輸省運輸技術研究所の実験場において行われたのが最初であるが、橋梁用高欄型防護柵に限れば、1971年に開門橋に設置する景観性に配慮した防護柵の開発のために、衝突実験が行われたのが最初である。ここで開発されたものは、支柱定着部が横桁という特殊なタイプであったが、1977年に高速道路の一般の橋梁区間に適用できるよう、支柱定着部をコンクリート埋め込みとした鋼製高欄型防護柵が開発された。その後、美観上や重量の点で有利なアルミニウム合金製の高欄型防護柵の開発も行われた¹⁶⁾。

2.2 防護柵の設計基準

防護柵のタイプには、ビーム型防護柵（ガードレール、ボックスビーム）やケーブル型防護柵（ガードケーブル）、剛性防護柵（橋梁用高欄型防護柵、コンクリート製防護壁）などがあり、これらの防護柵は種々の条件によって形式が選定される^{17),18)}。ビーム型防護柵とケーブル型防護柵は車両衝突時に変形を伴いながら、主にビームやケーブルの張力によって衝撃力を柔らかく受けとめ、乗員の安全性の確保を図る構造となっている。それに対して、剛性防護柵は設置場所の条件などから車両の路外への逸脱防止に目的を絞ったものであり、非常に剛性が高く防護柵自体の緩衝効果を考えないものである。

現行の防護柵設置要綱¹⁹⁾に規定されている防護柵の設計条件を表-1に示す。これらの防護柵は設計条件からそれぞれ数種類の種別があり、路線の種別や路側の状況、路側用、分離帯用および歩道用など、使用目的と設置場所の条件に合わせて選定される。

このような防護柵の設計計算の基本は、車両が防護柵に持ち込む負荷を道路の進行方向と直角方向の負荷に分け、直角方向の負荷が車両を路外に逸脱させる大きな要素であるので、直角方向の負荷に抵抗する構造としている。一方、進行方向の負荷に対しては設計上考慮されていない。これは、衝突によって車両が著しく減速すると、後続車両の追突等の二次災害を引きおこす恐れがあるため、進行方向の速度成分は衝突前後で差が小さいことが望まれるということである。

構造設計は、まず目的とする防護柵の種別、構造形式を決定し、部材の強度、断面形状あるいは定着方式を選定し、これらの諸条件を静的荷重実験によって強度や変形能を満足するか判定し、すべての条件を満たしていることを確認し、構造寸法が決定される。具体的には、車両が防護柵に持ち込むエネルギーを支柱やビーム、ケーブルが吸収可能かどうか判定するために、静的荷重実験より得られた防護柵の支持力と変位量の関係から規定されている諸条件にあてはめて決定されている。

表-1に示される車両速度や車両重量などの設計条件はほとんどが統計的な観点から定められているが、平成5年11月に車両制限令の改正が行われ、車両総重量(GVW)の制限が20tfから25tfに引き上げられたにも関わらず、現在改訂中ではあるが、現行の防護柵設置要項の設計車両重量は未だ14tfのままである。これは現行の最大車両総重量の60%弱でしかない。衝突速度については最上級種別であるS種で80km/hを想定しており、現行の高速道路の最高速度である100km/h、第二東名・名神高速道路で予定されている最高速度140km/hに対して、衝撃度での比較でそれぞれ約65%と約35%にすぎないなど、今後の交通状況を考えると必ずしも満足のいくものではないと思われる。また、基本的に防護柵のビーム部の高さにおける防護柵直角方向のみの運動エネルギーについて受けとめるように計算されているため、防護柵高さが60cm（路側用・分離帯用）～110cm（橋梁用高欄型）と低い従来の防護柵では、高重心車両の転倒モーメントを受けとめることは難しいと思われ、特に車両の路外逸脱を防止する必要がある鉄道との交差部分など、重要区間に対応する新形式の防護柵の開発が望まれている。

2.3 本研究で対象とした実験

今後、高速道路・高規格道路の整備に伴い、道路交通の高速化がますます進むものと思われる。また、現行の防護柵設置要綱に定められている防護柵では、柵高が低いため、高重心車両が衝突した際に車両が転倒、路外逸脱する恐れがある。そこで本研究では、研究の第1ステップとして、文献20)で報告されている建設省土木研究所で行われた防護柵への車両衝突実験を衝突シミュレーションの対象とした。

図-1に実験概要を示す。実験速度は80km/h、衝突角度は15度である。

3. 解析モデル

3.1 橋梁用高欄型防護柵モデル

橋梁用高欄型防護柵モデルは、土木研究所の実験で用いられた構造を、文献20)をもとに基本となるモデルを作成した。防護柵の構造図と有限要素モデルを図-2に示す。

橋梁用高欄型防護柵では、支柱はH型断面でウェブは幅158mm、板厚6mm、フランジは幅150mm、板厚は9mmである。また、主要横梁、下段横梁は円形断面で、主要横

表-1 防護柵の設計条件¹⁹⁾

種別	適用する道路の種類	設計条件					
		衝突速度 (km/h)	車両重量 (t)	衝突角度 (度)	車両の受ける 加速度 (g)	車両の最大 進入行程 支柱埋土 (m)	支柱埋 コブレット (m)
路側用	A 高速自動車国道 自動車専用道路 特に主要な一般国道	60	14 および 3.5	15	4 以下	1.1 以下	0.3 以下
	B 主要な一般国道 主要な地方道 都市内の主要道路	40					
	C その他の道路	35					
	S 道路の種類に関係なく 国鉄幹線等と交差または 近接している道路区間	80					
分離帯用	Am 高速自動車国道 自動車専用道路 特に主要な一般国道	60	14 および 3.5	15	4 以下	1.5 以下	0.5 以下
	Bm その他の道路	40				1.1 以下	0.3 以下

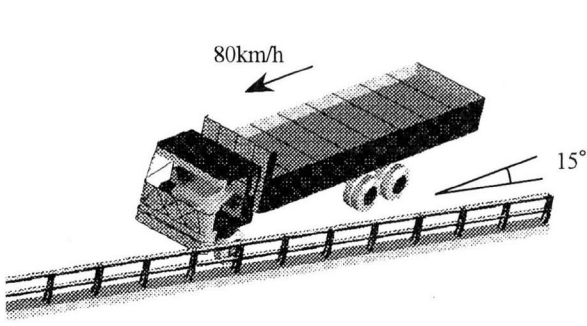


図-1 実験概要

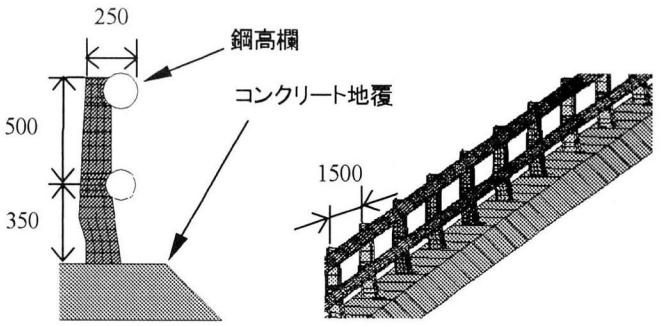


図-2 橋梁用高欄型防護柵の解析モデル

梁は管径 165mm で板厚 7mm，下段横梁が管径 140mm で板厚 4mm となっている。

支柱や横梁などの鋼部材については，4 節点断面内 2 点積分 Belytshko-Tsay 要素を用いてモデル化した。また，コンクリートについては，1 点積分 solid 要素を用いた。

解析に使用した材料定数を表-2 に示す。材料の構成則は，鋼については Von-Mises の降伏条件に従う等方弾塑性体とし，応力-ひずみ関係はひずみ硬化，ひずみ速度効果²¹⁾のそれぞれについて考慮したものを基本とした。降伏応力は部材の鋼種が SS400 であるので，235MPa とした。本研究で取り扱ったような橋梁用高欄型防護柵への衝突の場合，衝突車両が単純に地覆に乗り上げるだけであるため，防護柵下部のコンクリート地覆部分については文献 21) に示されるひずみ速度効果を考慮していない完全弾塑性体モデルを用いた。このモデルの構成則においては圧縮側で降伏後は完全弾塑性，引張応力が引張強度に達した後はカットオフ応力のみが働くものとし，降伏基準は Drucker-Prager の条件を用いている。圧縮強度は 23.52MPa，引張強度は 2.195MPa で，ヤング率，ポアソン比はそれぞれ 24.365Gpa と 0.165 を用いている。

解析モデルの境界条件は，コンクリート地覆の部分完全固定とした。

3.2 トラックモデル

(1) モデル化の必要性

防護柵への車両の衝突を考える際，自動車の構造や挙動を忠実に再現する解析モデルを作成することが必要となる。すなわち，防護柵は強度やダクティリティだけでなく，衝突車両の路外逸脱を防ぐと同時に，方向を大きく変えることなく走行車線に誘導する機能を要求されるからである。

一般に，自動車メーカーからは乗用車およびトラックとも衝突解析を行うために作成した有限要素モデルは公表されていない。しかし，乗用車については実物の自動車のモデルを用いた実験は多くの研究成果が発表されており，衝撃特性なども明らかにされている。また，車両の衝突解析については米国では多くの研究センターで行われており^{22),23)}，車両の有限要素モデルなどもインターネットを通じて入手することができる。

トラックやトレーラーのような総重量の大きな車両の衝突では，被衝突体に大きな衝撃力が働く。また，重量分布が乗用車とは異なり，特に貨物積載時には車両後部に大きな質量マスをもちこととなり，その慣性力の影響から衝突時の衝撃特性や車両の挙動にも大きな違いが生じる。しか

表-2 解析に使用した材料定数

材料定数	鋼材	コンクリート
ヤング率 E (GPa)	206	24.36
ポアソン比 ν	0.3	1/6
せん断弾性係数 G (GPa)	15.85	10.44
降伏応力 (MPa)	235	---
初期ひずみ硬化係数	4120	---
ひずみ硬化開始ひずみ	0.0014	---
体積弾性係数 (GPa)	---	12.18
圧縮強度 f_c' (Mpa)	---	23.52
引張強度 f_t (MPa)	---	2.20

しながら，トラックやトレーラーのような大型貨物車両の構造の詳細なデータはほとんど公開されておらず，精密な車両モデルの入手は困難であり，有限要素モデルを用いた研究例は文献 1),24)などにわずかな例があるのみである。そこで本研究では，トラックのモデルをカタログ等を参照して，日野自動車の榎本氏，荷室部については名古屋ボデーの坂氏の協力を得ながら独自に作成した。大型貨物車両が防護柵に衝突する際，衝突現象に直接影響する車両の主要部品は，車体，サスペンション，タイヤ，積荷などである^{1),24)}。そこで，車両モデルは車両総重量(GVW)25tf の大型トラックを対象として，フレーム，エンジン，運転室，荷室，車輪など主要部品を中心にモデル化することとした。車両総重量 25tf の車両と，同 20tf の車両はフレームの補強や車軸などの耐荷性能などに細かな差異はあるが，基本的に構造は同じであるので，モデル化に際しては 25tf のものを参考にした。なお，同様な理由で，14tf および 20tf のトラックモデルは，荷台積載重量を変えることで対処した。

(2) シャーシフレームのモデル化

シャーシフレームのモデル化については，文献 25),26)にあるような一般的な大型トラックに利用されているフレームを参考にした。実車のフレームの写真を図-3 に，作成したフレームの形状を図-4 に示す。このフレームは，一般的なはしご型フレームで，サイドメンバーの断面形状はみぞ型断面である。みぞ型断面は各種装置等を取り付けるのに容易であることなどから，大型トラックによく用いられている。ただし，開断面であるためねじり剛性が小さくなるので，それを補う意味でクロスメンバーを用いて剛性を高めている。サイドメンバー形状や板厚については文献 26),27)を参考にし，板厚を 8mm とした。降伏応力は 295MPa，応力-ひずみ関係は完全弾塑性とした。

(3) その他の部分のモデル化

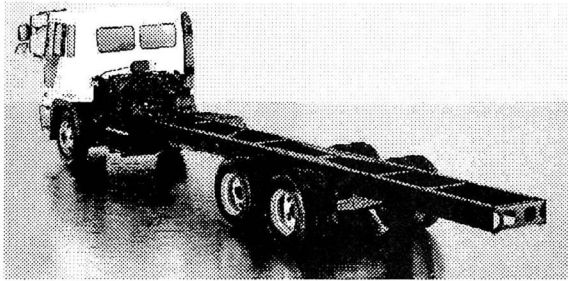


図-3 実車のシャーシフレーム

表-3 トラックモデルの重量配分

モデルパーツ	重量 (tf)
運転室 (キャブ)	0.64
エンジン, トランスミッション	1.60
シャーシフレームその他	2.47
荷台, 積載物	12.72
バネ下 (車輪, 車軸など)	2.57
Total	20.00

エンジン, トランスミッションについては, 同形状・同体積の solid 要素を用いてモデル化し, 重量を実際の車両と同じになるように調整した²⁸⁾。

車輪や車軸およびばねなどの足まわりは, 衝突時の車両の挙動を左右する重要な要素である。ここでは, 実際のトラックをモデル化するため, 車軸と車輪の結合部分に回転ジョイントを用い, 車輪の運動を妨げないようにした。タイヤ, ホイールは米国の National Crash Analysis Center(NCAC)で公開されている Ford Taurus Car Model を参考に, 各寸法, 空気圧を調整し, トラックモデルに組み込んだ。タイヤと路面の間には摩擦を考慮し, 摩擦係数は文献 3)を参考に 0.45 とした。また, 前軸の板ばねについては実際の車両構造をそのまま shell 要素としてモデル化したが, 特に衝突時に大きな力がかかる前輪軸については, 横剛性および上下剛性を財団法人日本自動車研究所の実車静的載荷実験^{1),24)}より得られた結果を基にバネ要素を用いて補正した。

運転室 (キャブ) については, カタログの外寸を利用して shell 要素を用いて大まかな形状をモデル化し, 各部の補強については beam 要素を用いてモデル化し shell 要素と節点を共有させた。キャブの板厚については文献 26)よりここでは 2.3mm としている。

その他の部品については, 衝突時に車両挙動に与える影響は小さいと考えられるので, 質点集中荷重を各部品の位置に設定することにより, 実際の車両と重量・重心高を合わせた。表-3 に車両各部の重量分布を示す。

また, 積載物については solid 要素を用いてモデル化し, 荷台内部に配置した。

(4) 解析モデルの概要

以上より, 完成した車両の有限要素モデルを図-5 に, モデルの諸元を表-4 に示す。なお, 解析モデル名の FB は Flat Body を示す。

材料の構成則については, 鋼部材は防護柵モデルと同様に Von-Mises の降伏条件に従った等方弾塑性体を用い,

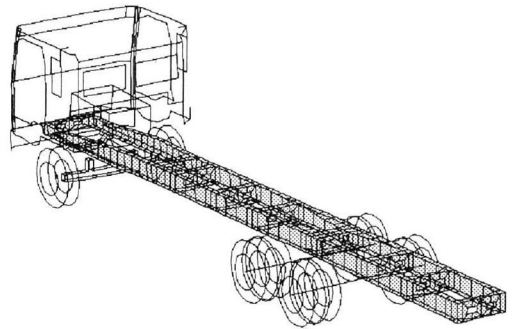


図-4 シャーシフレームモデル

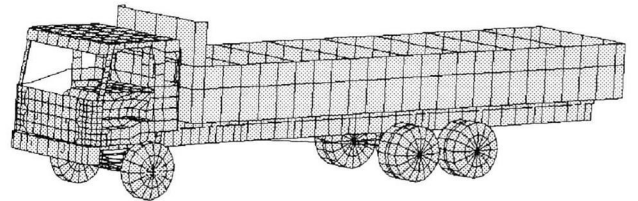


図-5 車両の有限要素モデル

表-4 トラックモデル諸元

モデル名	FB (平ボデータイプ)
節点数	3532
要素数	3904
ヤング率 E(GPa)	鋼 : 206, アルミニウム : 70
ポアソン比 ν	鋼 : 0.3, アルミニウム : 0.34
せん断弾性係数 G (GPa)	15.85

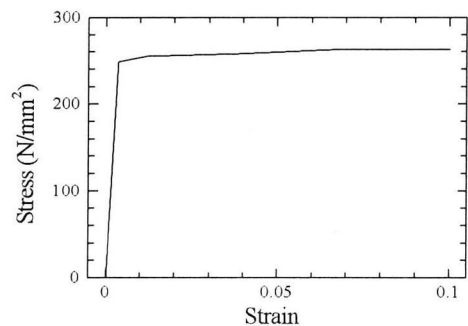


図-6 アルミニウムの応力-ひずみ関係

応力-ひずみ関係については完全弾塑性体を基本とした。荷室部分のアルミニウムについては, 文献 29)の乗用車の有限要素モデルで使われているアルミニウムの物性を使用し, 応力-ひずみ関係は図-6 に示すような多直線近似とした。

4. 解析結果の処理

4.1 ひずみ硬化およびひずみ速度効果

本研究で対象とした防護柵のように鋼材が大変形を伴う場合, 材料のひずみ硬化の影響は部材変位量などに大きく関わってくるものと考えられる。本研究では, 防護柵の鋼部材についてひずみ硬化の影響を考慮した場合とそうでない場合について検討を行った。ひずみ硬化を考慮した解析では, ひずみ硬化開始ひずみは 0.0014, 初期ひずみ硬

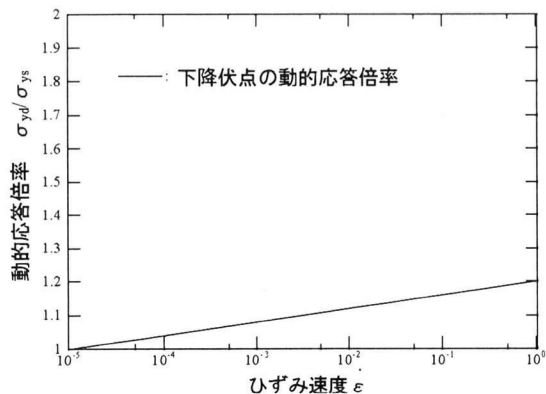


図-7 鋼材の降伏点応力に及ぼすひずみ速度効果

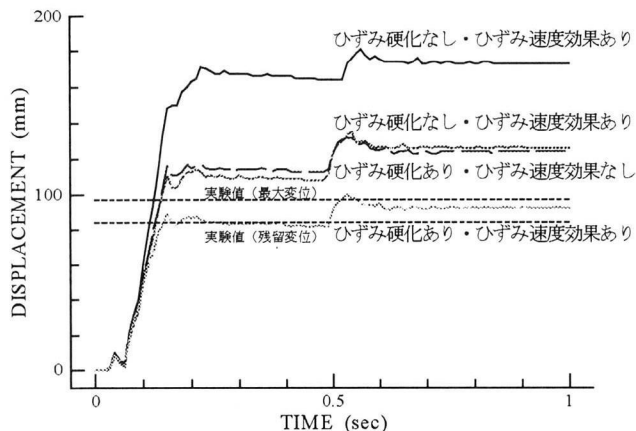


図-8 ひずみ硬化及びひずみ速度効果の有無による比較

表-5 橋梁用高欄型防護柵モデルの諸元

モデル名	橋梁用高欄型防護柵		
	1-2-8 分割	4-4-16 分割	8-8-32 分割
節点数	5739	10404	28125
要素数	5158	9574	27045
要素タイプ	2点積分 Belytschko-Tsay Shell 要素 1点応力 Solid 要素		
境界条件	地覆部固定		

化係数は 4.01GPa (E/50, E:ヤング率) とした。

一方、一般に衝突現象においては、鋼材の力学特性にひずみ速度効果の影響が現れる³⁰⁾。具体的には、ひずみ速度の増加によって降伏応力の増加が見られる。本研究では、降伏応力のスケーリング関係として図-7³¹⁾を用い、防護柵の鋼部材についてひずみ速度効果を考慮した場合とそうでない場合について検討を行った。薄板鋼部材の場合、降伏応力は JIS 規定値よりも高くなる傾向が強く、降伏応力が SS400 材で 300 MPa に達することもある。しかしながら文献 2),3) では材料に対する静的実験は行われておらず正確な値は不明であるので、解析モデルの降伏応力は JIS³²⁾に記載されている規定値を用い、防護柵の鋼部材については 235 MPa とした。

解析結果を図-8 に示す。なお、この解析結果は橋梁用高欄型防護柵に車両重量 14tf のトラックが衝突速度 80km/h、衝突角度 15 度で衝突した場合のひずみ硬化およびひずみ速度効果の影響を、最も変位の大きくなる支柱(図-11 の支柱 10) の頂部の面外水平変位で比較したもの

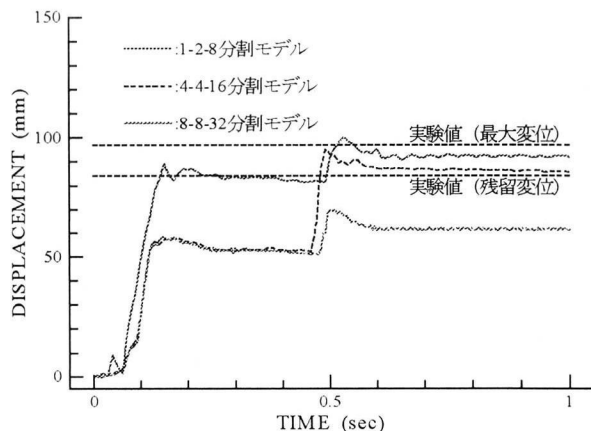


図-9 支柱頂部における面外変位量の比較

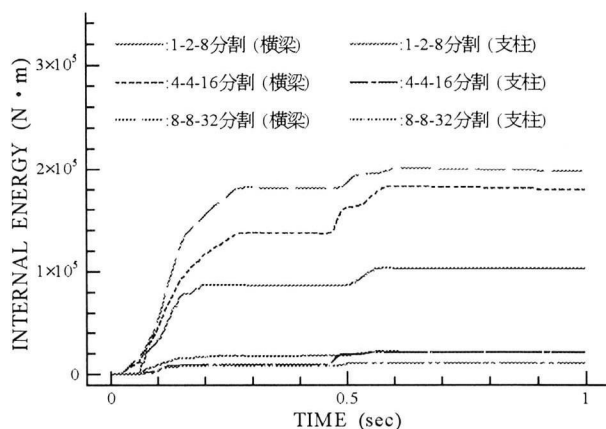


図-10 各部材におけるエネルギー吸収能

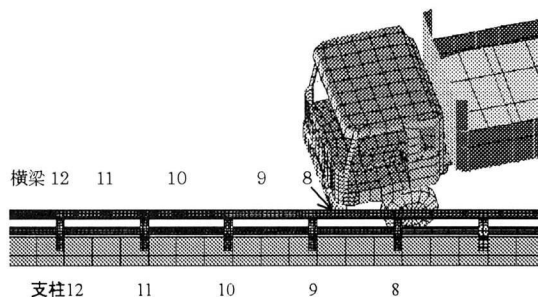


図-11 面外変位量を測定した支柱

である。

解析結果では、ひずみ硬化の影響を考慮した時の方が最大応答変位量で約 25%、残留応答変位量で約 30%の減少が見られた。また、ひずみ速度効果を考慮した場合、最大応答変位量、残留応答変位量ともに約 25%の減少が見られた。ひずみ硬化およびひずみ速度効果の両方を考慮した場合、最大応答変位量で約 45%、残留応答変位量で約 50%の減少が見られた。実車実験では、最大応答変位量は 97mm、残留応答変位量は 84mm であり、ひずみ硬化およびひずみ速度効果の両方の影響を考慮した解析の結果が実験結果とよく一致している。

この結果より、ひずみ硬化およびひずみ速度効果により降伏応力の増加および降伏後の耐力の増加が認められ、応答変位量が小さくなったことがわかる。本研究の以後の計

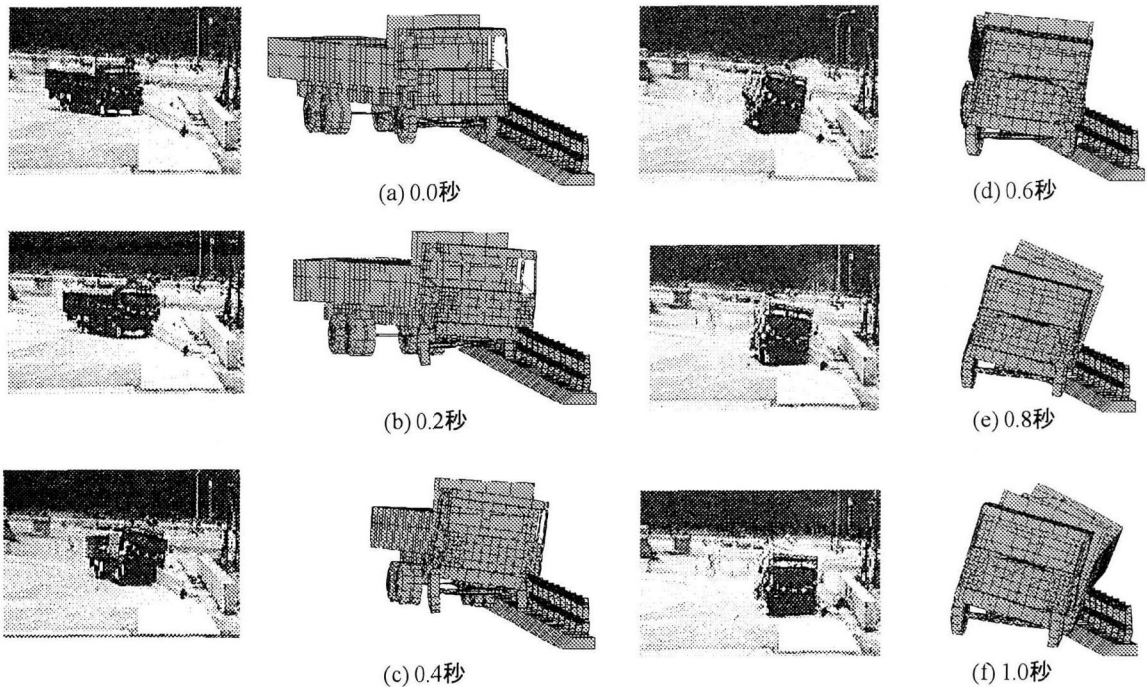


図-12 車両の挙動

表-6 解析種類

解析 タイプ	防護柵 モデル	車両 モデル	衝突 速度 (km/h)	衝突 角度 (°)	衝撃度 (tf・m)
BF-FB14 -080-15	BF	FB	80	15	33.7



図-13 車両の軌跡

算においては、防護柵の鋼部材についてひずみ硬化およびひずみ速度効果を考慮することとする。

4.2 メッシュサイズ

本研究で対象としたような構造を有する防護柵については、一般にメッシュサイズを細かく設定するほど、正確な結果を得ることが可能になる。そのためメッシュサイズの影響は結果として全体の変位量に対して大きな影響を与えようと考えられる。

そこで本研究では、支柱ウェブ、支柱フランジおよび鋼管についてメッシュの分割方法を変え、実験結果と比較することで、最適なメッシュの分割方法を決定する。

各メッシュサイズにおける橋梁用高欄型防護柵モデルの諸元を表-5 に示す。表中の解析タイプ名は、(支柱ウェブ)－(支柱フランジ)－(鋼管)における分割数を意味する。例えば 4-4-16 分割の場合、支柱ウェブ 4 分割、支柱フランジ 4 分割、鋼管 16 角形のモデルである。なお、本研究では、表-5 に示すように 1-2-8 分割、4-4-16 分割、8-8-32 分割の 3 ケースについて検討した。

解析結果を図-9 に示す。なお、この解析結果は橋梁用高欄型防護柵に車両重量 14tf のトラックが衝突速度 80km/h、衝突角度 15 度で衝突した場合のメッシュサイズの違いによる支柱頂部における面外変位量への影響を比較したものである。1-2-8 分割モデルを波線、4-4-16 分割モデルを実線、8-8-32 分割モデルを一点鎖線で示している。実車実験で面外変位量を測定した支柱は、図-11 に示した支柱 8 から支柱 12 の 5 本であり、本論文では、その

中でも最大の変位を示す支柱 10 について比較した。

解析結果では、1-2-8 分割モデルと 4-4-16 分割モデルを比較した場合、残留応答変位量が 0.5 秒以内で約 40%、最終値で約 10%減少した。一般的にメッシュサイズは細かくするほど、実際の結果に近づくものと考えられているため、本来ならば 8-8-32 分割モデルを選択することが適当であると考えられる。しかし、フルスケールの解析モデルであり、解析時間および解析コストがかかることが大きな問題となるため、図-10 に示した支柱および横梁のエネルギー吸収能の収束具合より、4-4-16 分割モデルを選択することに決定した。

本研究では、以後の解析については支柱ウェブ、フランジ、鋼管の順にそれぞれ 4、4、16 分割したものを基本とした。

5. 橋梁用高欄型防護柵への衝突解析

5.1 解析内容

本研究では、表-6 に示すように、建設省土木研究所で行われた橋梁用高欄型防護柵についての実験¹⁷⁾を再現する解析を行った。表の中の解析タイプ名は(防護柵モデル)－(衝突車両モデル、車両重量)－(衝突速度)－(衝突角度)の意味である。BF-FB14-080-15 は、橋梁用高欄型防護柵に、車両重量 14tf の平ボゲートラックが、衝突速度 80km/h、衝突角度 15 度で衝突したことを示す。

5.2 解析結果 (BF-FB14-080-15)

(1) トラックモデルの衝突時の挙動

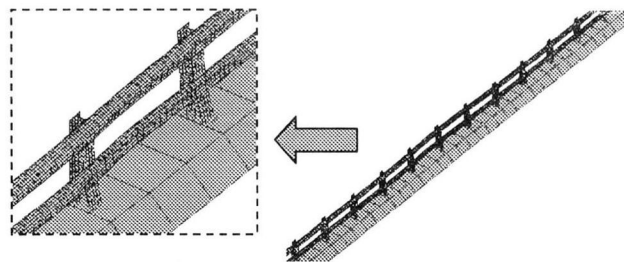


図-14 防護柵の変形モード

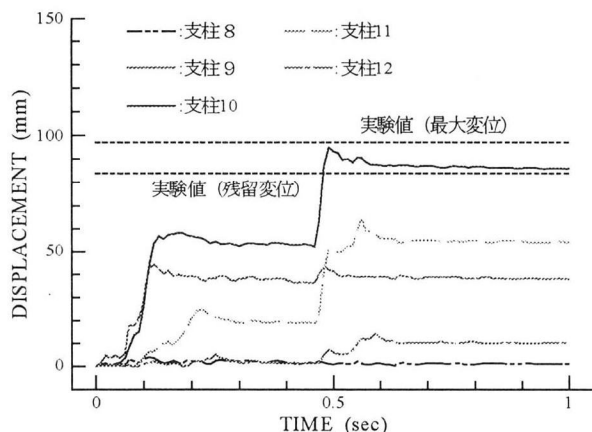


図-15 支柱頂部における応答変位曲線

衝突後の車両の挙動を実験結果と解析結果を比較したものを図-12 に、車両の軌跡を図-13 に示す。車両前端部が高欄に接触し、ほぼ同時に前輪が地覆に乗り上げ、高欄に衝突した。その後車両は車体を傾斜させながら向きを変え、後輪が地覆に乗り上げた。高欄には後輪のタイヤ部分が接触、さらに車体後部の傾斜角が増大したが、横転することなく誘導された。

このように解析結果は、実験結果をうまくシミュレーションできていると言える。

(2) 橋梁用高欄型防護柵モデルの衝突時の挙動

防護柵の変形モードを図-14 に、支柱頂部における応答変位曲線を図-15 に示す。なお、図中、それぞれ二点鎖線が支柱 8、破線が支柱 9、実線が支柱 10、点鎖線が支柱 11、一点鎖線が支柱 12 における支柱頂部面外変位量を示している。最初に車両前端部が防護柵に衝突し、その後 0.5 秒前後でタイヤの後輪部分が衝突する。そのため、支柱は 0.5 秒前後で再び変位する。支柱頂部の最大応答変位量は 95 mm、残留応答変位量 85 mm で、図中に示した実車実験での最大応答変位量 97 mm、残留応答変位量 84 mm と良い一致を示した。

また、主要横梁の中央における応答変位曲線を図-16 に、下段横梁の中央における応答変位曲線を図-17 に示す。支柱頂部の面外変位量と同様に、図中、二点鎖線が横梁 8、破線が横梁 9、実線が横梁 10、点鎖線が横梁 11、一点鎖線が横梁 12 における面外変位量を示している。主要横梁中央部における残留応答変位量は 99 mm であり、図中に示した実車実験で測定された 76 mm と比較すると、約 30% 増加という結果が得られた。一方、下段横梁中央部における残留応答変位量は 105 mm で、実車実験の残留応答変位量

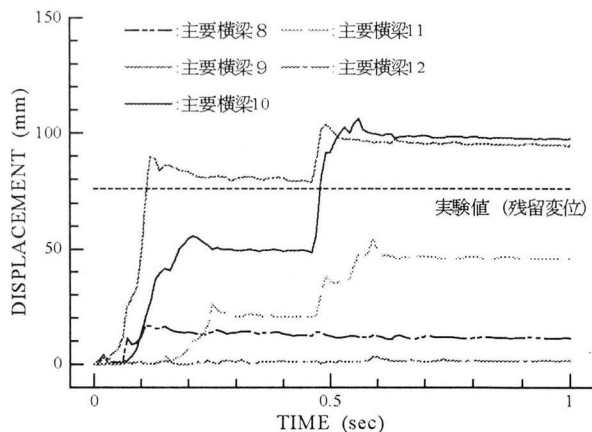


図-16 主要横梁中央部における応答変位曲線

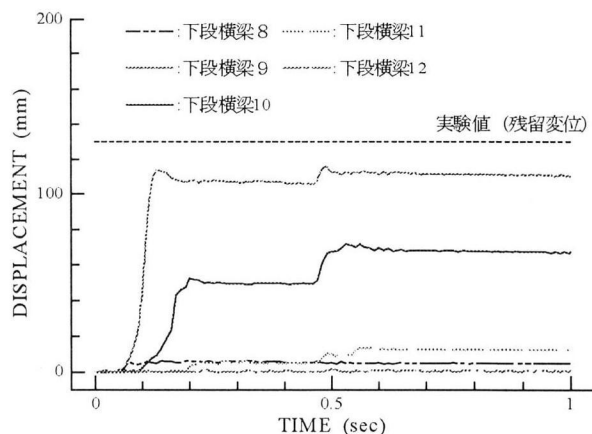


図-17 下段横梁中央部における応答変位曲線

130 mm と比較すると 20% 減少している結果となった。

(3) 橋梁用高欄型防護柵モデルの衝突時の動的応答

橋梁用高欄型防護柵モデルの衝突時の動的挙動として、支柱に作用した防護柵直角方向の水平力応答を取り上げ、実験結果と比較した。防護柵直角方向水平力の動的応答曲線の一例を図-18 に示す。

動的水平力の解析結果は実験値を非常によく再現しており、本解析モデルが、残留変位等の静的な応答だけではなく、動的応答においても再現可能なモデルであることを示している。

(4) 吸収エネルギー評価

防護柵が吸収するエネルギーの内訳を図-19 に示す。防護柵が吸収する全エネルギーの 50% を主要横梁、40% を下段横梁、10% を支柱が吸収している。

車両モデルが橋梁用高欄型防護柵モデルに衝突する以前に車両が有していた運動エネルギー ($3.6 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$) は、衝突後、主に防護柵の内部エネルギー、車両の内部エネルギー、運動エネルギーに分配される。しかし、橋梁用高欄型防護柵モデルでは、衝突後に分配される防護柵の内部エネルギーは、図-19 の支柱、主要横梁および下段横梁の吸収エネルギーを総和しても約 $2.0 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$ であり、全エネルギーの 10% 以下とかなり低いものとなる。

図-20, 21, 22 は、それぞれ支柱、主要横梁、下段横梁における吸収エネルギー分担率を示している。図-15, 16 と同様に二点鎖線が支柱 8 (横梁 8)、破線が支柱 9 (横梁

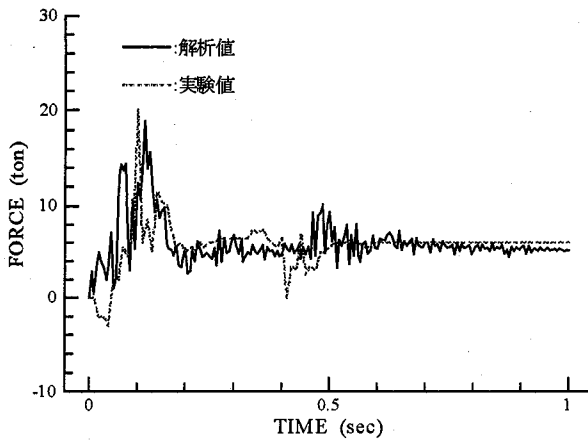


図-18 支柱9に作用した防護柵直角方向の水平力

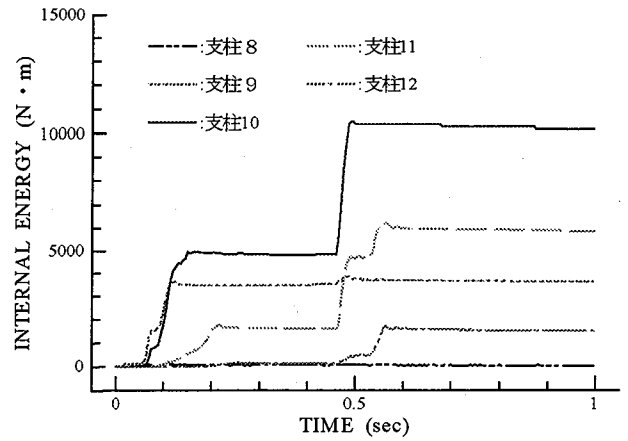


図-20 支柱における吸収エネルギー分担率

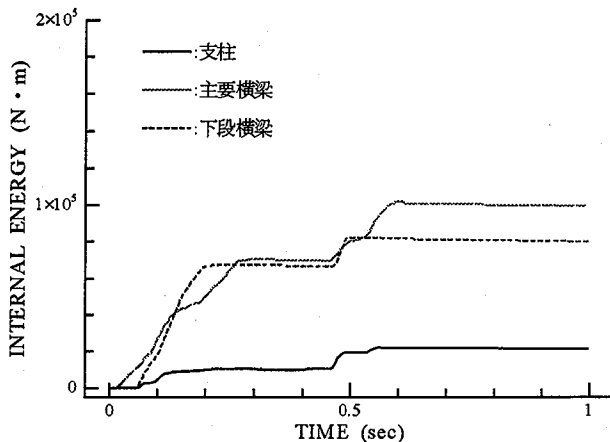


図-19 エネルギー伝達

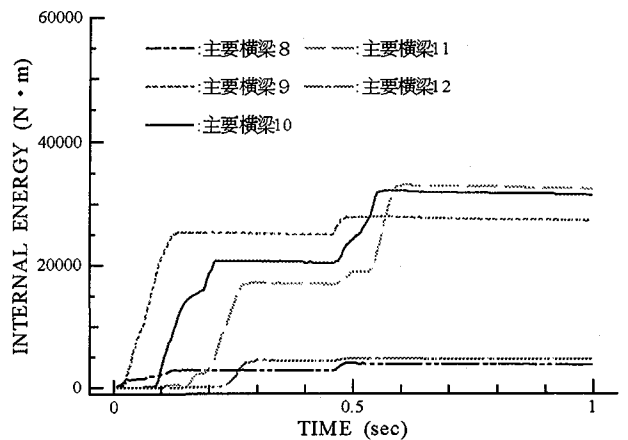


図-21 主要横梁における吸収エネルギー分担率

9), 実線が支柱10 (横梁10), 点鎖線が支柱11 (横梁11), 一点鎖線が支柱12 (横梁12) を示している。最もエネルギーを吸収する支柱は支柱10であり, 支柱が吸収する全エネルギーの約50%を吸収することになる。また, 最もエネルギーを吸収する主要横梁は主要横梁10および11であり, 主要横梁が吸収する全エネルギーの30%を吸収する。一方, 下段横梁では最もエネルギーを吸収する横梁は, 支柱, 主要横梁とは異なり, 下段横梁9および10となり, 下段横梁が吸収する全エネルギーの約45%を吸収する。これは, 下段横梁に衝突する部位が車両のタイヤのみであり, 慣性力の影響で荷台を大きく振った場合に, 車両後部に存在する後部タイヤが防護柵に衝突するためであると考えられる。

6. 結論

本研究では, 大型車両が橋梁用高欄型防護柵に衝突する際の車両・防護柵の挙動を再現できる数値解析モデルを作成し, それを用いて, 高重心車両に対応する現行の橋梁用高欄型防護柵について衝突解析を行った。

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 防護柵に大きな衝撃力が作用する大型貨物車両の衝突時の挙動を再現できる, 大型貨物車両と橋梁用高欄型防護柵の有限要素モデルを作成した。
- 2) 作成した車両モデルを用いて, 積載物の荷重の影響が大きい大型貨物車両の防護柵への衝突現象を再現し, 実

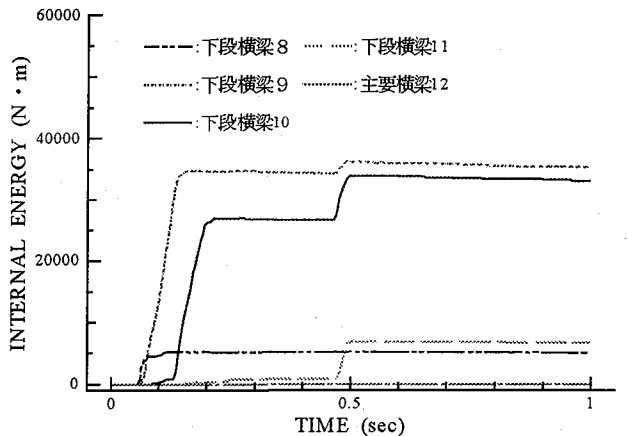


図-22 下段横梁における吸収エネルギー分担率

車衝突実験での車両の挙動と良い一致を示す結果を得た。

- 3) 橋梁用高欄型防護柵に大型貨物車両が衝突したときの動的応答水平力は, 実車衝突実験での水平力の挙動を, 比較的精度良く再現できる可能性があることを示した。
- 4) 橋梁用高欄型防護柵に大型貨物車両が衝突したときのエネルギー分担率は, 横梁の変形によって衝撃エネルギーを吸収する割合が大きいことを示した。横梁の断面がつぶれることにより効果的に大型貨物車両の衝撃エネルギーを吸収しているといえる。

あとがき

本論文で開発したトラックモデルと橋梁用高欄型防護柵モデルの妥当性がほぼ実証された。本論文のテーマをトラックモデルと高欄モデルの検証に重点を置いたことと紙面の都合上、実験で行われたケースのみの結果しか示していないが、既に他の速度や車両重量の場合も検討しており、次の機会にその考察結果を示したい。

参考文献

- 1) 田村陽介, 石川博敏: 防護柵の衝突シミュレーションモデルの開発, 自動車研究, Vol.18-3, 1996.3, pp.88-91.
- 2) 建設省土木研究所ほか: 高速化対応型防護柵の開発に関する共同研究報告書, 共同研究報告書第94号, 平成5年10月.
- 3) 建設省土木研究所ほか: 高重心車両用防護柵に関する研究, 共同研究報告書第102号, 平成6年5月.
- 4) 小林一隆, 奥田将樹, 石川信隆, 比留間豊: 緩衝型コンクリート製プレキャストガードフェンスの模型実験に対する衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.40A, 1994.3, pp.1531-1542.
- 5) 小林一隆, 奥田将樹, 石川信隆, 太田俊昭: 土中型プレキャストコンクリートガードフェンスの衝撃模型実験と衝撃応答解析, 土木学会論文集 No.549/I-37, 1996.10, pp.175-189.
- 6) 江守一郎: 模型実験の理論と応用 第2版, 技法堂出版, 1988.
- 7) 宮本文穂, KING M.W., 榊井弘樹: 構造物に作用する衝撃力特性のモデル化に関する基礎的研究, 構造工学論文集 Vol.37A, 1991.3, pp.1555-1566.
- 8) 宮本文穂, KING M.W., 石橋照久: 多質点系ばねモデルによる衝撃力特性の再現と設計衝撃力の検討, 構造工学論文集 Vol.38A, 1992.3, pp.1515-1528.
- 9) 式田昌弘, 金山幸雄: 自動車の強度, 山海堂, 1989.
- 10) Kamal, M. M. and Wolf, Jr. J. A. : Modern Automotive Structural Analysis, Van Nostrand Reinhold Company, 1982, pp.316-355.
- 11) 自動車工学全集編集委員会: 自動車工学全集 16 自動車の安全, 1980.
- 12) 江守一郎: 自動車事故工学 新版, 技術書院, 1993.
- 13) 日本総合研究所: LS-DYNA3D 使用の手引き, 1995.6.
- 14) 日本総合研究所: LS-DYNA3D Ver.930 USER'S MANUAL, 1994.10.
- 15) John O. Hallquist: LS-DYNA3D Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1991.6.
- 16) 建設省土木研究所ほか: アルミニウム合金製高強度型防護柵の開発に関する共同研究報告書, 共同研究報告書第42号, 平成2年3月.
- 17) 日本道路協会: 防護柵設置要項・資料編 (橋梁用防護柵・耐雪型防護柵), 丸善, 昭和61年7月.
- 18) 建設省土木研究所ほか: 高速化対応型防護柵の開発に

謝辞

車両のモデル化においては, 日野自動車工業株式会社技術研究所の榎本英彦氏, 愛知日野自動車株式会社の荒谷善昭氏, 名古屋ボデー株式会社の坂範一氏に資料の提供とアドバイスをいただきました。また, 建設省土木研究所の安藤和彦氏, 財団法人日本自動車研究所の石川博敏氏・王玉青氏には, 実車実験や防護柵への衝突解析について, 数々の示唆をいただきました。ここに深く感謝いたします。

- 関する共同研究報告書, 共同研究報告書第76号, 平成4年6月.
- 19) 日本道路協会: 防護柵設置要項, 丸善, 昭和47年10月.
 - 20) 建設省土木研究所ほか: 鋼製高欄型S種防護柵の開発に関する共同研究報告書, 共同研究報告書第74号, 平成4年3月.
 - 21) 伊藤義人, 笹田俊治, 大野 隆: 非線形衝撃応答解析を用いたひずみ速度効果に関する研究, 鋼構造論文集, 第3巻第11号, 1996.9, pp.47-58.
 - 22) Wekezer, J. W., Oskard, M. S., Logan, R. W. and Zywiec, E. : Vehicle Impact Simulation, Journal of transportation Engineering, Vol. 119, No. 4, 1993, pp.598-617.
 - 23) Zaouk A. K., Bedewi N. E., Kan C. and Schinke H. : Evaluation of a Multi-purpose Pick-up Truck Model Using Full Scale Crush Data with Application to Highway Barrier Impacts, 29th International Symposium on Automotive Technology & Automation, Florence, Italy, June 1996.
 - 24) 日本自動車研究所: コンピューターシミュレーションによる防護柵衝突の解析, JARI-研究速報 No.97036, <http://www.jari.or.jp/ja/3seika/sokuho/97036/97036.html>, 1997.
 - 25) 武田信之: 大型トラックの設計, 山海堂, 1992.
 - 26) 佐藤 武: 自動車工学全書 14 トラック, バスの車体構造, 山海堂, 昭和55年2月.
 - 27) 日野自動車工業株式会社: トラックカタログ, 1997.
 - 28) 斉藤 孟: 自動車工学全書 5 ディーゼルエンジン, 山海堂.
 - 29) 伊藤義人, 大野 隆, 森 正樹: 車両衝突を受ける鋼製橋脚の挙動に関する数値解析的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, 1998.3, pp.1725-1736.
 - 30) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法, 構造工学シリーズ6, 1993.12.
 - 31) 高橋芳彦, 大野友則, 太田俊昭, 日野伸一: 衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果, 構造工学論文集, Vol.37A, 1991.3, pp.1567-1580.
 - 32) 福田武雄, 友永和夫, 福岡正巳: 土木関係 JIS 要覧, 新日本法規, 1971

(1998年9月18日受付)