

車両衝突を受ける橋梁用鋼製防護柵の 材料ひずみ速度効果と性能照査に関する研究

伊藤義人¹・劉斌²・宇佐見康一³・草間竜一⁴・貝沼重信⁵

¹フェロー会員 工博 名古屋大学大学院教授 附属図書館長 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 名古屋大学大学院博士課程 工学研究科 土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 名古屋大学大学院生 工学研究科 土木工学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町) (現 都市基盤整備公団)

⁴学生会員 名古屋大学大学院生 工学研究科 土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

⁵正会員 博士(工学) 岐阜大学助教授 総合情報メディアセンター (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

平成11年に制定された防護柵の設置基準では性能照査型設計法が導入され、性能照査には原則として実車衝突実験が規定されている。実車衝突実験は膨大な時間と費用を必要とするため、性能照査型設計をより有効に活用するためには実車衝突を精度良く再現できる解析モデルの開発が不可欠である。本研究では橋梁用鋼製防護柵を対象として、使用材料のSS400鋼板とSTK400鋼管に対してひずみ速度効果を動的引張試験によって明らかにし、ひずみ速度効果や、残留応力および摩擦などの各因子が車両衝突時の防護柵と車両の挙動に与える影響を検討し、精度の良い車両衝突数値解析モデルを作成した。実車衝突実験結果と比較して性能照査を行い、数値解析が実車衝突実験を補完する手法として有効であることを示した。

Key Words : steel bridge guard fence, vehicle collision, numerical analysis, strain rate effect, performance-based design

1. はじめに

防護柵は、i)車両の路外逸脱の防止、ii)衝突車両の乗員安全の確保、iii)衝突車を正常な進行方向に復元、及び、iv)二次被害の防止などを目的とした道路上の安全施設である。平成11年4月には性能照査型設計を取り入れた防護柵の設置基準¹⁾(以下新基準と略す)が制定された。性能の照査項目は、米国の基準²⁾と同様に、i)車両の逸脱防止性能、ii)乗員の安全性能、iii)車両の誘導性能、iv)構成部材の飛散防止性能とされた。なお、基本的に防護柵の性能確認は道路管理者が実車衝突実験によって行うこととされた。

しかし、実車衝突実験は膨大な時間とコストが必要であり、かつ実験施設が限られているため、性能照査型設計を普及させるための実車衝突実験を補完する数値解析シミュレーションモデルの開発が強く望まれている。建設省土木研究所(現国土技術政策総合研究所)においては実車衝突実験を補完する手段として二次元シミュレーションプログラムが開発された³⁾。また、日本自動車研究所では日本軽金属協会(現日本アルミニウム協会)からの委託を受け、二次元シミュレーションでは考慮できなかったサスペンションの荷重-変位特性を考慮したトラックと橋梁用防護柵の三次元剛体-ばねモデルを開発した⁴⁾。筆者らも、このような背景から大型トラックモデル

の開発、防護柵モデルの開発などを行ってきた^{5) 6)}。特に文献⁵⁾では、大型トラックの橋梁用ビーム型鋼製防護柵への車両衝突解析を行い、応力-ひずみ関係、ひずみ速度効果及びメッシュサイズなどのモデル化の妥当性を実車衝突実験との比較により確認している。

本研究では、橋梁用ビーム型鋼製防護柵への車両衝突解析を高精度化するため、解析モデルの問題点を明らかにし、i)引張試験による使用部材のひずみ速度効果の検証、ii)引張試験結果から得られたひずみ速度効果を考慮した解析、iii)残留応力、摩擦などのモデル化と解析結果への影響などの検討を行う。また、新たに小型乗用車モデルを開発し、乗員の安全性に関する性能照査も試みる。

そして、防護柵の実車衝突実験の軽減などに役立つための車両衝突解析の応用として、複数の解析結果を防護柵の性能照査に適用し解析の有用性と限界を検討し、数値解析シミュレーションが実車衝突実験を補完する手法としての有効性を検討する。

2. 解析モデルの検討課題

本研究で用いられた橋梁用鋼製防護柵とトラックの有限要素モデルを図-1に、モデルの諸元を表-1に示す。この鋼製防護柵は文献⁷⁾で行われた実車衝突実験の防護柵

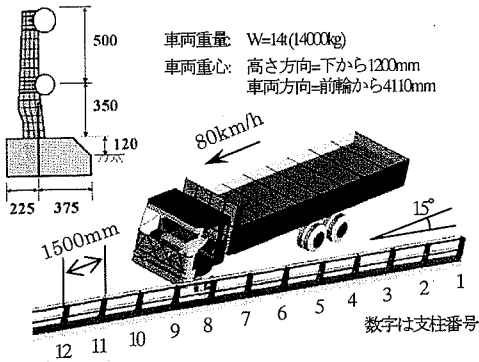


図-1 解析モデル

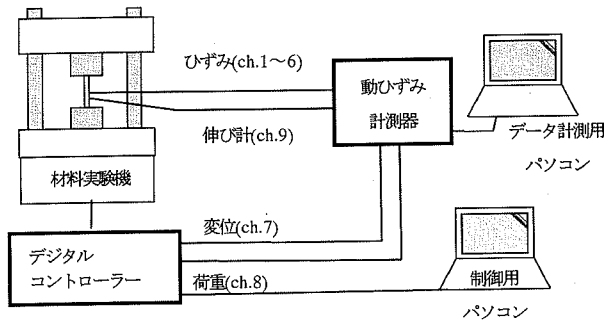


図-2 試験システムの概要

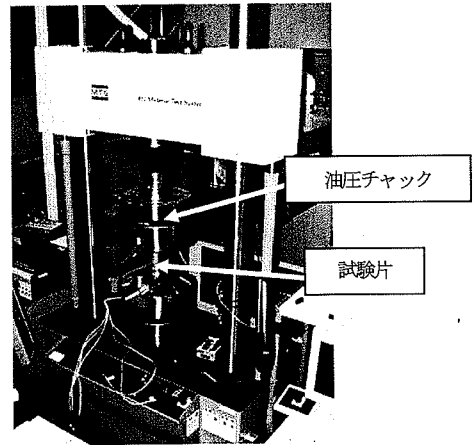


図-3 電気油圧サーボ式材料試験機

をモデル化したものであり、文献5)で扱われた解析モデルを高精度化するため以下のような検討を行う。

1) 応力-ひずみ関係及びそのひずみ速度効果

文献5)では鋼材に関して、トリリニアでモデル化した応力-ひずみ関係と高橋らの研究成果⁹⁾によるひずみ速度効果を用いて数値解析を行っている。しかし、鋼製防護柵のオフセットビームとして用いられているパイプ材は塑性加工の影響によりその材質が変化していることは明らかであるが、それを考慮した応力-ひずみ関係及びひずみ速度効果は考えられていない。そこで、まず動的引張試験によって、円形中空断面のオフセットビームの材料 (STK400) とH型断面の支柱材料 (SS400鋼材) の応力-ひずみ関係とそのひずみ速度効果を明らかにする。

2) 残留応力

オフセットビーム及び支柱の残留応力がどの程度、鋼製防護柵の性能に影響を及ぼすかを明らかにする。

3) 摩擦

鋼製防護柵とトラックとの摩擦がどの程度車両と防護柵の挙動に影響を与えるかを明らかにする。

4) その他

トラックの車体のひずみ速度効果がどの程度車両と防護柵の挙動に影響を与えるかを明らかにする。

表-1 文献5)の解析モデルの諸元

タイプ	防護柵モデル	トラックモデル
節点数	10404	3532
要素数	9621	3904
要素タイプ	2点積分 Belytschko-Tsay Shell 要素* 1点積分 solid 要素	2点積分 Belytschko-Tsay Shell 要素* 1点積分 solid 要素
境界条件	地覆部固定	—

* Belytschko-Tsay shell 要素は、今回使用した LS-DYNA のシェル要素タイプのデフォルトで、2つの対角線と要素インシデンスからシェルの形状を定義し、Mindlin-Reissner 板理論に基づき、変位・回転成分を同一の補間関数で表す。CPU コストの点で有利なシェル要素であり、広範に利用されている。

3. 防護柵部材の応力-ひずみ関係及びひずみ速度効果

(1) 動的引張試験方法

動的引張試験には動的能力±500kNの電気油圧サーボ式材料試験機(MTS社製)を用いた。試験機の制御には制御ソフト(Test Star II)を用い、計測は動的ひずみ計測器(東京測器社製DRA101A)を用いた。試験システム及び材料試験機を図-2及び図-3に示す。

試験片はSS400鋼材及び鋼管の加工する前のSTK400原板からはJIS5号試験片を製作し、STK400の鋼管からはJIS12号試験片を製作した。試験片の寸法はJIS5号試験片、12号試験片ともに、平行部60mm、幅25mmとした。ひずみゲージは、ゲージ長5mmの塑性域用(最大測定可能ひずみ: 150,000~200,000 μ)を用いた。ひずみゲージは縦ひずみと横ひずみを測定するため、試験片の表裏両面にそれぞれ3枚ずつ(縦2枚、横1枚)合計6枚を貼付した。試験片の側面に設置した伸び計(最大測定可能ひずみ: 40,000 μ)の測定間距離は25mmである。

ひずみ速度は、青木らの研究成果⁹⁾を参考に載荷時の

ストローク変位速度を一定に制御することによって制御した。ストロークの変位を平行部の長さで除した値がひずみであると仮定すると、ひずみ速度は次式のようになる。

$$\dot{\epsilon} = V/L \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$: ひずみ速度(1/s), V : ストローク変位速度(mm/s), L : 平行部の長さ(mm)

試験片は、材料試験機の制限などもあり、ひずみ速度を 1×10^5 から 1×10^6 まで6段階のひずみ速度に分けて各3片ずつ用意した。また、ひずみ速度が 1×10^5 の場合のみ引張試験を何度か停止させ、ひずみ速度が0の静的な引張試験結果として測定した。なお、実際の平行部のひずみ速度は伸び計及びひずみゲージの実測値から算出した。

(2) 試験結果

a) 応力-ひずみ関係

ひずみ速度 10^5 を目標とした試験結果のSS400鋼材、STK400原板及びSTK400鋼管の静的応力-ひずみ関係の代表例を図-4に示す。図-4に示すようにSS400鋼材が直線的に上降伏点応力に達するのに対し、STK400原板では緩やかなカーブを描きながら上降伏点応力に達している。これはSTK400原板には鋼管製造工程の塑性曲げ加工を容易にするため、化学成分の違いなどがあるためであると考えられる。

また、図-4に示す通りSTK400原板とSTK400鋼管を比較すると、STK400鋼管は塑性加工を受けているため、降伏棚を持たない応力-ひずみ関係となっている。STK400鋼管の0.2%オフセット耐力をSTK400原板の降伏点応力で除した降伏点応力の上昇率は1.27となり、加藤・青木による研究成果¹⁰⁾と良く一致している。

b) 降伏点応力、引張強度のひずみ速度効果

図-5, 6に引張試験結果から得られた降伏点応力及び

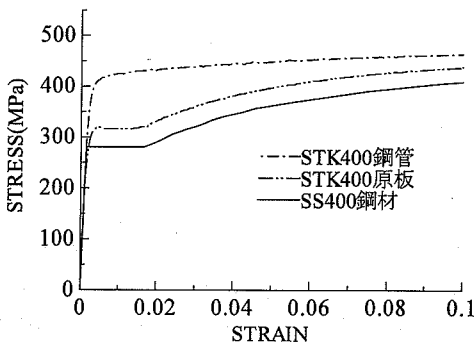


図-4 鋼材の応力-ひずみ曲線

引張強度を静的試験結果で除した動的応答倍率を示す。ここで降伏点応力とは、SS400鋼材及びSTK400の原板に対しては降伏点応力、STK400の鋼管については0.2%オフセット値による耐力のことである。静止降伏点応力及び引張強度はストローク変位を停止させて測定した静的な測定結果の平均値を用いた。図中の破線はひずみ速度に対する動的応答倍率を対数関数で最小二乗近似したものであり、それぞれの回帰式及び相関係数 r を図中に示す。

図-5(a)に示したSS400鋼材の降伏点応力の動的応答倍率は、文献8)と近い結果となった。これと比較して、図-5(b)に示したSTK400原板の試験結果は回帰式の傾きが15%程度減少しているが、ひずみ速度 10^5 程度からひずみ速度効果があり、 10^6 で約12倍となり、SS400鋼材と同様の傾向を示した。また、図-5(c)に示したSTK400鋼管の実験結果は、STK400原板の動的応答倍率と比較して回帰式の傾きが40%程度小さくなった。

図-5に示すように降伏点の動的応答倍率はSS400鋼材とSTK400原板についてはほぼ同様の傾向を示しているが、STK400鋼管では傾きが小さくなっている。したがって、降伏点応力のひずみ速度効果は同程度の強度の鋼材ではあまり相違がなく、塑性加工によって小さくなるものと考えられる。

また、図-6に引張試験結果の引張強度を静的な引張強度で除した動的応答倍率を示す。図-6に示すように、引張強度の動的応答倍率はSS400鋼材、STK400原板及びSTK400鋼管についてはほぼ同様の傾向を示している。また、引張強度の動的応答倍率を降伏点の動的応答倍率と比較するとSS400鋼材、STK400原板については傾きが50%程度小さくなったが、STK400鋼管についてはあまり変化がなかった。

c) 硬化開始ひずみ、引張強度時ひずみのひずみ速度効果

SS400鋼材とSTK400原板の硬化開始ひずみを図-7に示す。なお、他の結果と同様に最小二乗近似した回帰式を破線で示す。SS400鋼材では高い相関性を有するが、STK400原板ではSS400鋼材と比較して相関性は低い。SS400鋼材の静的硬化開始ひずみは0.0151、STK400の硬化開始ひずみは0.0156となり3%程度の差となり、今回対象としたSS400鋼材とSTK400原板では静的な硬化開始ひずみの鋼種による差は小さい。しかし、STK400原板の回帰式の傾きはSS400鋼材の約20%程度となっており、硬化開始ひずみのひずみ速度効果は鋼種によって相違がある。

次に、SS400鋼材、STK400原板及びSTK400鋼管の引張試験で得られた応力-ひずみ関係で応力が最大値を示す引張強度時ひずみ(終局ひずみ)を図-8に示す。終局ひずみの測定は伸び計とひずみゲージの測定範囲を越えているため、ストローク変位を平行部の長さで除したひずみを用いた。図中の破線はこれらの試験結果をひずみ速

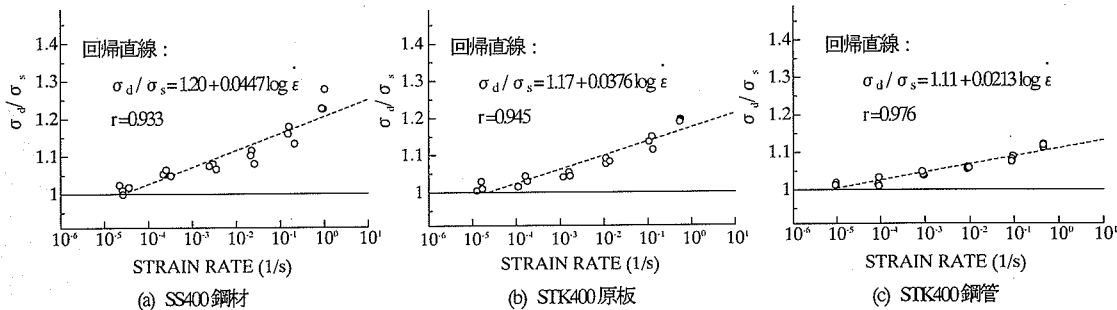


図-5 降伏点応力の動的応答倍率

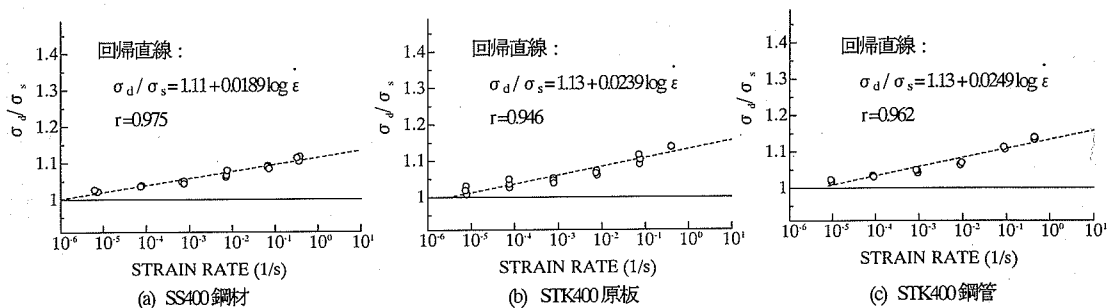


図-6 引張強度の動的応答倍率

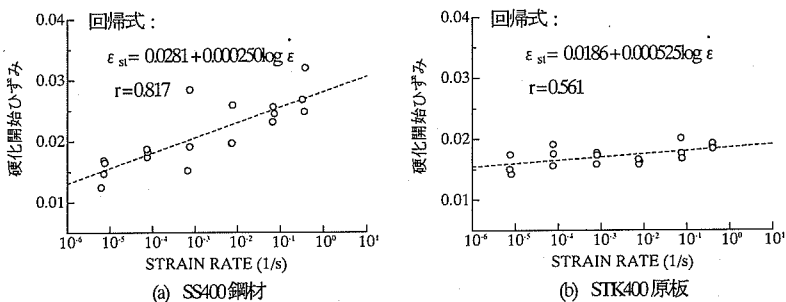


図-7 硬化開始ひずみ

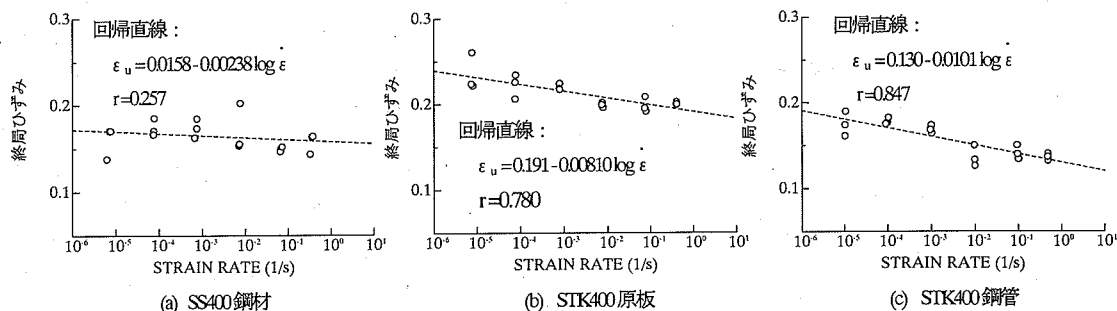


図-8 引張強度時ひずみ (終局ひずみ)

度によって対数関数で回帰した直線である。降伏点応力のひずみ速度効果が異なり、負のひずみ速度効果が表われている。それぞれの回帰式の相関係数は図-8中に示すようになっており、SS400鋼材は相関性が低いが、STK400原板及びSTK400鋼管はSS400鋼材と比較して相関

性が高い。静的終局ひずみの平均値はSS400鋼材で0.160、STK400原板で0.236となりSTK400原板の方が約50%程度大きな測定結果を得た。これは、STK400原板は鋼管に塑性加工されることを前提にしているため、高い伸び性能を有するようにされているためであると考えられる。

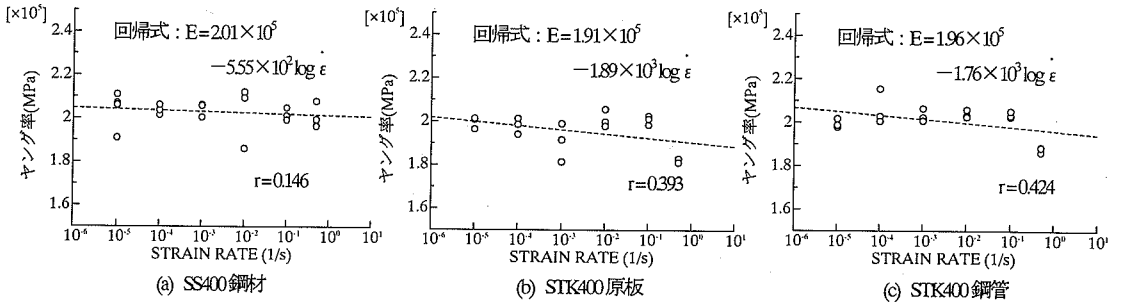


図-9 ヤング率の試験結果

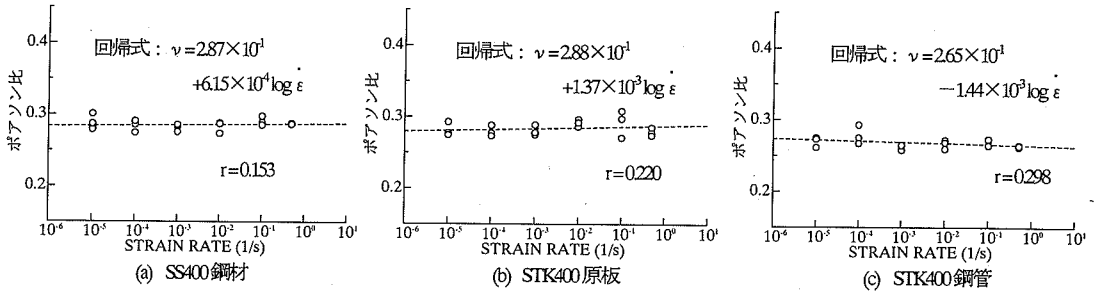


図-10 ポアソン比の試験結果

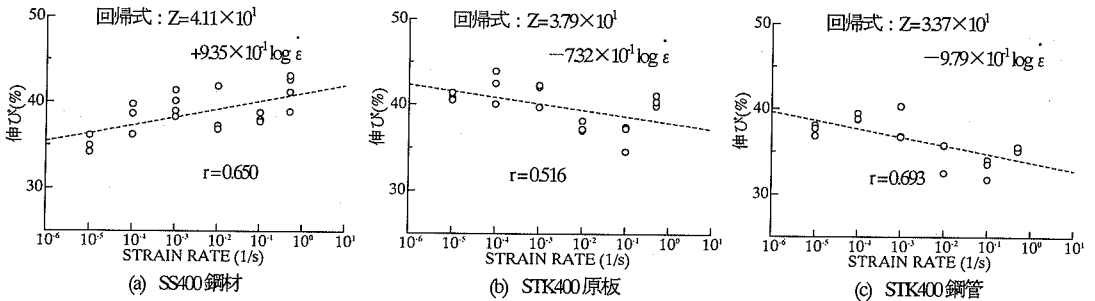


図-11 伸びの試験結果

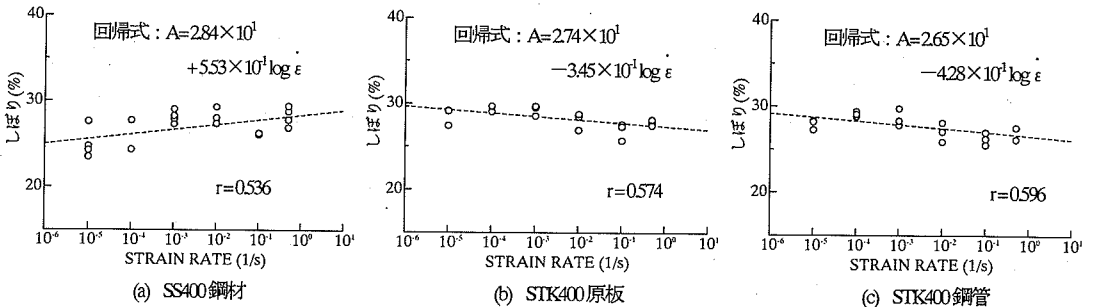


図-12 しぼりの試験結果

また、STK400鋼管の静的終局ひずみは0.175でSTK400原板より約30%小さい値となり、塑性加工による伸びの低下が確認された。しかし、STK400鋼管の終局ひずみはSS400鋼材の試験結果と比較すると10%程度大きい結果となり、STK400鋼管の伸び性能はSS400鋼材と同等であると考えられる。

さらにこれらの回帰式の傾きの絶対値に着目すると、SS400鋼材と比較してSTK400原板は240%大きくなっており、終局ひずみのひずみ速度効果は鋼種によって大きく異なると言える。また、STK400原板と比較してSTK400鋼管の傾きの絶対値は25%大きくなり、曲げ加工によるひずみ速度効果の変化が見られた。

表-2 本研究の解析モデルの諸元

タイプ	防護柵モデル	トラックモデル
節点数	23690	15626
要素数	21623	15345
要素タイプ	2点積分 Belytschko-Tsay Shell 要素 1点積分 solid 要素	2点積分 Belytschko-Tsay Shell 要素 1点積分 solid 要素
境界条件	アンカーボルト化	—

d) その他の材料定数のひずみ速度効果

ヤング率, ポアソン比, 伸び及びしぼりについてのひずみ速度効果のまとめを図-9 から図-12 にそれぞれ示す。図-9 と図-10 にそれぞれ示すヤング率, ポアソン比の回帰直線はわずかに傾きを有しているが, 相関性は低い。また, ひずみ速度が 10⁰ における値の増減も 5% 以下であり, ひずみ速度効果は小さいと言える。

図-11 と図-12 にそれぞれ示す伸び及びしぼりのひずみ速度効果は, 降伏点応力ほどではないが, 相関係数 r が 0.6 前後で相関性はあると言える。ひずみ速度が 10⁵ 倍に増加すると 15% 程度の回帰直線の増減がある。SS400 鋼材の伸びとしぼりの測定結果がひずみ速度とともに増加する傾向にあるのに対し, STK400 原板, STK400 鋼管の測定結果はひずみ速度効果とともに減少するという興味深い傾向があり, 鋼種によってひずみ速度効果が大きく異なることが分かった。

4. 引張試験結果を用いた解析

本研究の解析モデルについては図-1 に示す文献⁵⁾ で用いられた有限要素モデルを基にして, 解析精度をさらに向上させるため, 防護柵支柱のベースプレートとコンクリート間のアンカーボルト連結を詳細にモデル化した。また, トラックの解析モデルでは車両挙動に大きな影響を及ぼす足回り構造を中心にモデルの改良を行った。本研究の解析モデルの諸元を表-2 に示す。この解析モデルに基づき, 引張実験結果を用いた解析結果を述べる。

(1) 応力-ひずみ関係

a) 応力-ひずみ関係のモデル化

本研究の解析では汎用プログラム LS-DYNA を使用しており, 鋼材を多直線近似等方弾塑性体として扱い^{11), 12)}, 材料試験などで求められる公称応力-公称ひずみ関係を真応力-真ひずみ関係に換算し, そこから式(2)に示すような相当応力(真応力)-相当塑性ひずみ関係を塑性域の応力ひずみ関係として入力する。

$$\epsilon^P = \epsilon_{true} - \sigma_{true} / E \quad (2)$$

表-3 応力-ひずみ関係を決定するためのパラメータ

SS400		STK400	
ϵ_{st}	0.01362	$\epsilon_{0.2}$	0.002
σ_{st}	285.5 MPa	$\sigma_{0.2}$	408.0 MPa
ϵ_u	0.1518	ϵ_u	0.1480
σ_u	495.4 MPa	σ_u	532.5 MPa

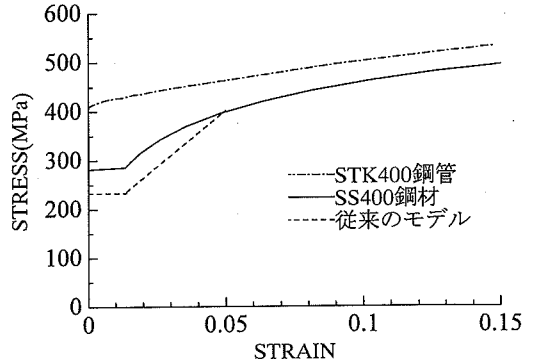


図-13 解析用相当応力-相当塑性ひずみ関係

ここで, ϵ^P : 相当塑性ひずみ, ϵ_{true} : 真ひずみ,
 σ_{true} : 真応力, E : ヤング率

相当応力-相当塑性ひずみを, 数個のパラメータによって任意に表現することを目的として, 引張試験結果と良く一致するように以下のような数式表現を行った。SS400 鋼材については, 上降伏点を考慮せず降伏棚を線形, 硬化域を対数関数とした。式(3)に硬化域の対数関数を示す。STK400 については一次関数と累乗関数との和で式(4)に示すように表現した。

$$\sigma = \frac{\sigma_u - \sigma_{st}}{\ln \epsilon_u - \ln \epsilon_{st}} \ln \epsilon^P + \frac{\sigma_{st} \ln \epsilon_u - \sigma_u \ln \epsilon_{st}}{\ln \epsilon_u - \ln \epsilon_{st}} \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_u \epsilon^P + \sigma_u (1 - \epsilon_u) (\epsilon^P / \epsilon_u)^m \quad (4)$$

ここで, $m = \frac{\ln\{\sigma_u(1 - \epsilon_u) / (\sigma_{0.2} - \sigma_u \epsilon_{0.2})\}}{\ln(\epsilon_u / \epsilon_{0.2})}$

- σ : 相当応力,
- ϵ^P : 相当塑性ひずみ,
- σ_{st} : 硬化開始応力,
- ϵ_{st} : 硬化開始ひずみ,
- $\sigma_{0.2}$: 0.2% オフセット耐力,
- $\epsilon_{0.2}$: 永久ひずみ 0.002,
- σ_u : 終局応力,
- ϵ_u : 終局ひずみ

表4 解析モデル一覧

解析モデルタイプ		a	b	c	d	e	f	g
応力-ひずみ 関係	トリリニアモデル	○						
	新モデル (平板)		○					
	新モデル (平板・鋼管)			○	○	○	○	○
ひずみ速度効果	無し				○			
	高橋モデル	○	○	○				
	新モデル					○	○	○
残留応力	無し	○	○	○	○	○		
	支柱・横梁						○	○
摩擦	静的のみ	○	○	○	○	○	○	
	速度依存							○

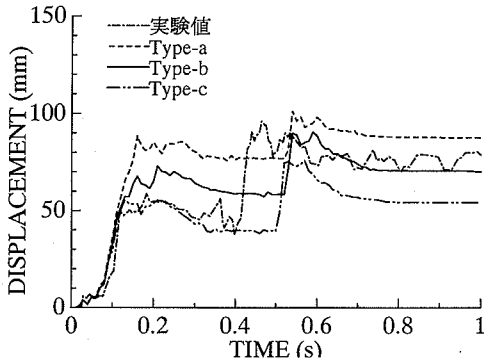


図-14 支柱10頂部の柵外方向変位

対象とした実車衝突実験では材料の引張試験が行われていないため今回対象とする防護柵の材料の応力-ひずみ関係は不明である。そこで、本研究で用いる相当応力-相当塑性ひずみは今回行った引張試験結果を参考に表-3に示すように式(3)、(4)に代入するパラメータを決定した。図-13に解析で使用する鋼材の応力-ひずみ関係を示す。

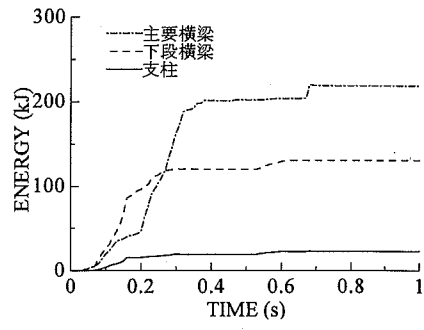
b) 解析内容

本研究で種々の検討を行う解析モデルを表-4に示す。表-4には、5.で後述するモデルも示している。まず、応力-ひずみ関係が防護柵の挙動に与える影響について検討を行った解析モデルは表-4に示したType-a~Type-cであり、各モデルの応力-ひずみ関係は以下のようにした。なお、ここでの全てのモデルにおける防護柵材料のひずみ速度効果は文献(8)の下降伏点の動的応答倍率を使用している。

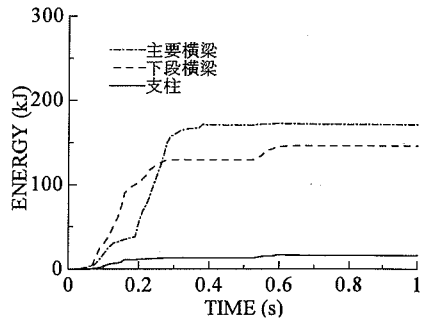
Type-a: トリリニアモデルを防護柵モデルのSS400鋼材と鋼管STK400に適用するモデル

Type-b: 図-13のSS400鋼材の曲線を防護柵モデルのSS400鋼材と鋼管STK400に適用するモデル

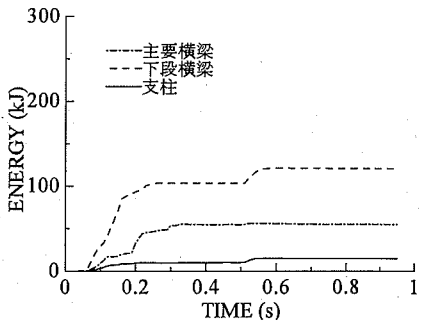
Type-c: 防護柵モデルのSS400鋼材に図-13のSS400鋼材のモデルを、鋼管STK400に図-13のSTK400モデルをそれぞれ適用するモデル



(a) Type-a



(b) Type-b



(c) Type-c

図-15 エネルギー吸収の比較

c) 解析結果

図-14に横軸を時刻、縦軸を変位とした支柱頂部の柵外方向への変位の時刻歴を示す。なお、変位を示した支

柱は衝突の影響を最も受けたものであり、図-1中の番号10の支柱(以下支柱10と記述する)である。

解析結果を比較すると Type-b は Type-a より車両左前部が衝突(以下、これを1次衝突と記述する)した時の変位と車両の左後輪部が衝突(以下、これを2次衝突と記述する)した時の変位が15%程度小さくなっている。Type-c は Type-b より1次衝突時の変位と2次衝突時の変位がさらに20%程度小さくなっている。残留変位についても同様な傾向を示している。鋼管の応力-ひずみ関係を導入することによって防護柵の変位は小さくなることが明らかになった。

また、図-15に防護柵各部材のエネルギー吸収量の時刻歴を示す。Type-b は Type-a と比較すると残留変位が15%小さくなっているが、エネルギー吸収も合計で10%小さくなっている、特に上段主要横梁のエネルギー吸収は20%小さくなっている。鋼管の応力-ひずみ関係の考慮の有無に関しては変位に大きな差異が見られ、図-15の(b)と(c)に示すようにエネルギー吸収にも大きな差が見られた。鋼管の応力-ひずみ関係を考慮することによってエネルギー吸収は横梁の合計で45%程度減少し、特に主要横梁では60%以上の吸収エネルギーの減少が見られた。鋼管の応力-ひずみ関係は、防護柵のエネルギー吸収に及ぼす影響は非常に大きいことが分かった。

(2) ひずみ速度効果

a) ひずみ速度効果のモデル化

SS400鋼材のひずみ速度効果は下降伏点応力、引張強度、硬化開始ひずみの引張試験結果を考慮できるように、ひずみ速度別に相当(真)応力相当塑性ひずみ関係が変化するように図-16に示すような関係をモデル化した。

また、STK400のひずみ速度効果は0.2%オフセット耐力と引張強度のひずみ速度効果がほぼ同様になったため、

次式に示す耐力のひずみ速度効果を考慮した。

$$\sigma_d / \sigma_s = 1.11 + 0.0213 \log(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0) \quad (5)$$

ここで、 σ_d : 動的応力(MPa),

σ_s : 静的応力(MPa),

$\dot{\epsilon}_0$: 単位ひずみ速度(1/s)

b) 解析内容

ひずみ速度に依存する応力-ひずみ関係を考慮した解析を行うにあたって、以下のType-c~Type-eの3タイプの解析結果の比較を行った。

Type-c: SS400鋼材とSTK400鋼管に対して文献8)の下降伏点応力の動的応答倍率を考慮したモデル

Type-d: ひずみ速度効果を考慮しないモデル

Type-e: 引張試験結果によってモデル化したひずみ速度効果(STK400鋼管に対して式(5)に示す、SS400鋼材に対して図-16に示す)モデルを考慮した解析モデル

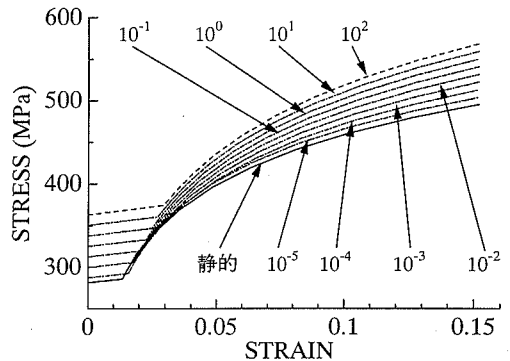
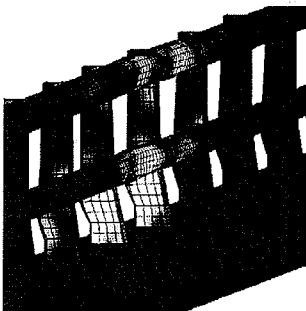
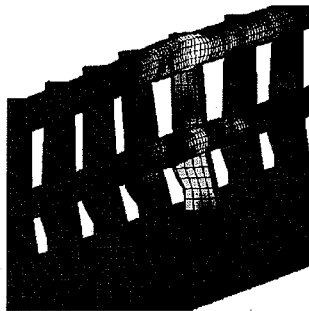


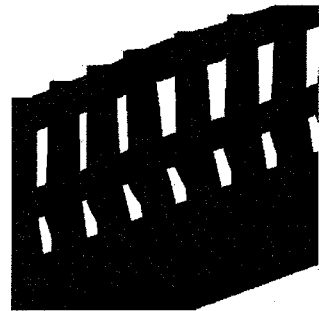
図-16 SS400鋼材のひずみ速度別の応力-ひずみ関係



(a) 衝突後 0.1 秒



(b) 衝突後 0.5 秒



(c) 衝突後 0.7 秒

ひずみ速度(1/s)	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1
濃淡						

図-17 時刻別のひずみ速度分布

c) 解析結果

図-17にType-cの解析のひずみ速度分布の時刻による変化を示す。図は濃淡でひずみ速度が識別できるようにひずみ速度が 10^4 1/sから大きくなるにしたがい濃淡が薄くなり、ひずみ速度 10^7 以上で白となるようにした。衝突後0.1秒では、車両前部が衝突し衝突箇所及び支柱基部付近のひずみ速度が 10^7 以上と大きくなっている。このように、ひずみ速度は防護柵と車両の接触箇所と支柱基部付近の背面側では大きくなるが、その他の箇所では非常に小さい。3.の引張試験は、ひずみ速度 1.0×10^5 までしか試験を行うことができなかったが、ひずみ速度が 1.0×10^5 より大きくなるのは、ごく瞬間であり、かつ局部的であるため、引張試験で得られたひずみ速度効果を外挿しても影響は少ないものと考えた。また、これまでに他機関で行われた鋼材のひずみ速度効果の実験においても、 10^7 程度までのひずみ速度効果は、ここで考えたように、線形と考えても良いという結果を示している⁹⁾。

図-18に支柱10頂部の柵外方向への変位時刻歴の実験結果との比較を示す。Type-cとType-dを比較するとひずみ速度効果を考慮しないType-dの方が1次衝突の変位、2次衝突時変位ともに50%程度大きくなる。これは、防護柵の変位が支柱基部付近の降伏点応力に依存しているためであると考えられる。実験値との整合性は明らかにひずみ速度効果を考慮した場合の方が良い。また、Type-cとType-eの解析結果を比較すると、Type-cの解析結果の方が1次衝突時変位、2次衝突時変位ともに16%程度大きい。これは、Type-cとType-eでは、支柱の応力-ひずみ関係のひずみ硬化以降の経路がひずみ速度効果によって異なっており、Type-cの方がひずみ速度効果によるひずみ硬化以降の応力の上昇が大きいためであると考えられる。また、1次衝突における解析結果の変位の立ち上がりは実験値とよく一致しているが、2次衝突における解析結果の変位の立ち上がりは実験値より約0.1秒遅れている。その理由はよく分からず、今後の検討課題である。

防護柵材料に関して、ひずみ速度効果の有無だけでなくそのモデル化の違いによっても解析結果に大きな影響

を与えることが分かった。よって、防護柵に関する衝突解析では部材に合わせたひずみ速度効果を考慮する必要があるといえる。

なお、今回の解析における衝突ではトラックのタイヤと防護柵との接触が主である。そのため、トラックモデル側の鋼部材のひずみ速度効果の有無についても検討してみたが解析結果に大きな影響は無かった。

5. その他の要因による解析モデルの検討

(1) 残留応力

一般に圧延鋼や鋼管の座屈耐荷力や曲げ耐荷力は、残留応力の影響を受けるものであり、防護柵の挙動に対しても影響を及ぼす可能性があると考えられ、本研究では防護柵モデルのH形鋼の支柱と鋼管の横梁に対して残留応力を考慮して検討を行った。

a) 残留応力のモデル化

電縫鋼管の残留応力は本来円周方向に複雑に分布するが、今回は簡便のため図-19(b)の破線と一点鎖線に示すように一様に分布すると仮定した。また、入力する初期応力は青木・福本¹³⁾や加藤・青木¹⁰⁾の研究成果を参考に軸方向を $\sigma_x^T = -\sigma_x^C = 0.2\sigma_y$ 、周方向を $\sigma_\theta^T = -\sigma_\theta^C = 0.5\sigma_y$

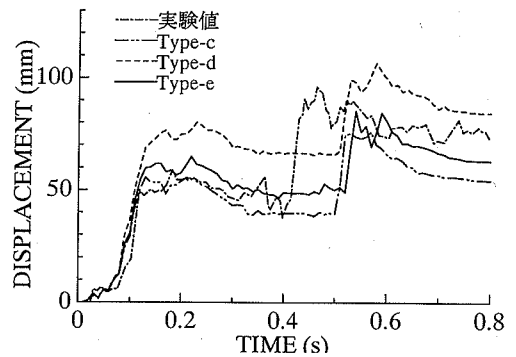


図-18 支柱10頂部の柵外方向変位

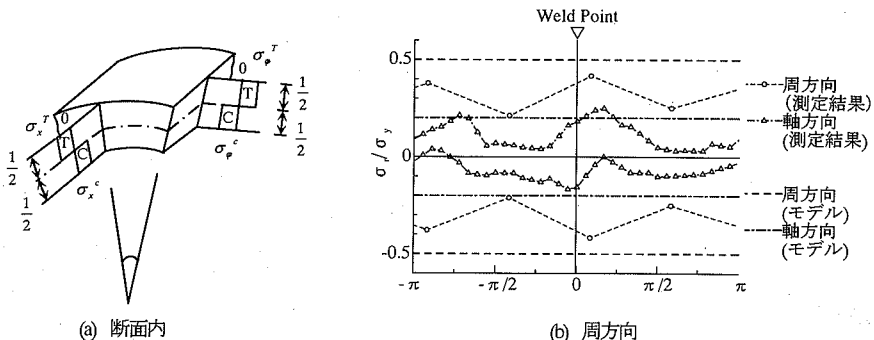


図-19 鋼管の残留応力分布

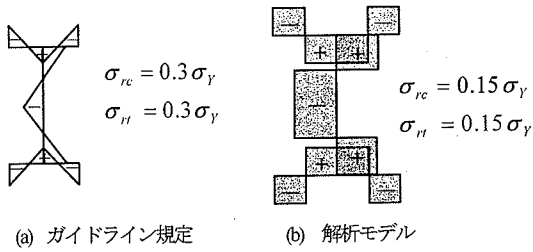


図-20 圧延H形鋼の残留応力分布

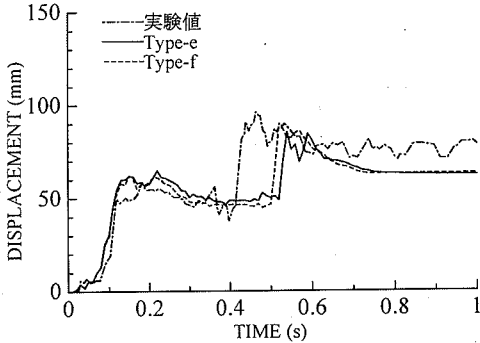


図-21 支柱10頂部の柵外方向変位

(σ_y :降伏点応力)と仮定しモデル化を行った。圧延H形鋼の残留応力は土木学会構造工学委員会座屈設計ガイドライン小委員会によると図-20(a)に示すような仮定がされている¹⁹⁾。今回対象としている防護柵モデルの支柱はウェブ・フランジが4分割となっているため、今回は図-20(b)のようにモデル化した。

b) 残留応力に関する検討

電線鋼管・圧延H形鋼の残留応力がどのように影響するかを調べるために、4のTypeeのモデルを基本として、以下に示すようなモデルを作成し解析結果の比較検討を行った。

Typee: 4. で述べた今回新たにひずみ速度効果を考慮した応力-ひずみ関係をモデル化したモデル

Typef: Typeeを基本に鋼管及びH形鋼の残留応力を考慮したモデル

支柱10の頂部の柵外方向変位時刻歴の解析結果を図-21に示す。最大変位についてはTypeeと比較して1次衝突においてはほぼ同じく、2次衝突においてTypefは4%程度大きくなった、その形状には大きな違いはなく、特に残留変位にはほとんど違いがないことが分かる。

(2) 摩擦

a) 摩擦のモデル化

LS-DYNAでは静摩擦から動摩擦への移行を滑らかにす

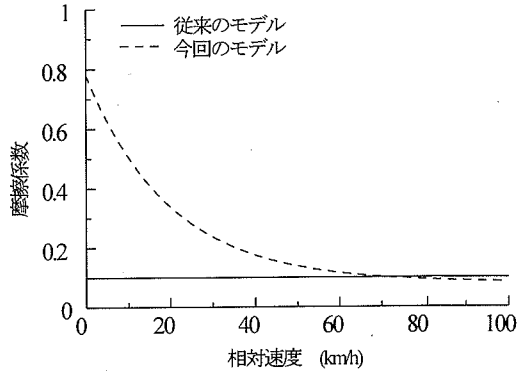


図-22 摩擦のモデル化

るために、摩擦係数が次式のように計算され、接触面の相対速度Vによって変化するように設定できる¹¹⁾。

$$\mu_c = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-C|V|} \quad (6)$$

ここで、 μ_c : 摩擦係数, μ_d : 動摩擦係数,
 μ_s : 静摩擦係数, C: 指数減衰係数

従来の数値解析シミュレーションでは車両と防護柵の間の摩擦係数は、静摩擦係数、動摩擦係数ともに0.1とされていた^{5,6)}。しかし一般に、静摩擦係数は動摩擦係数より大きいと考えられ、静摩擦係数と動摩擦係数の違いを考慮すると解析結果に影響を及ぼす可能性がある。したがって、今回は指数減衰定数Cを0.05、静摩擦係数を0.78、動摩擦係数0.08を適用した場合¹²⁾の解析を行った。これらの摩擦係数と相対速度の関係は図-22に示すようになる。

b) 摩擦に関する検討

前述したTypefのモデルを基本として、以下に示すようなモデルを作成し解析結果の比較検討を行った。

Typef: 車両と防護柵の間の静摩擦係数、動摩擦係数ともに0.1とした解析モデル (図-22の実線モデル)

Typeg: 車両と防護柵の間の静摩擦係数を0.78、動摩擦係数0.08を適用した解析モデル (図-22の破線モデル)

これらの解析結果の支柱10頂部の柵外方向変位時刻歴の比較を図-23に示す。図に示したようにTypefは1次衝突時の変位、2次衝突時の変位とともに3%程度大きくなっているが、動摩擦を考慮することにより車両挙動が大きな変化はない。

したがって、防護柵に関する衝突解析において、車両挙動に与える摩擦力の影響は大きくなく、実用上は摩擦係数が解析結果に与える影響は物性値などと比較して小さいと考えられる。

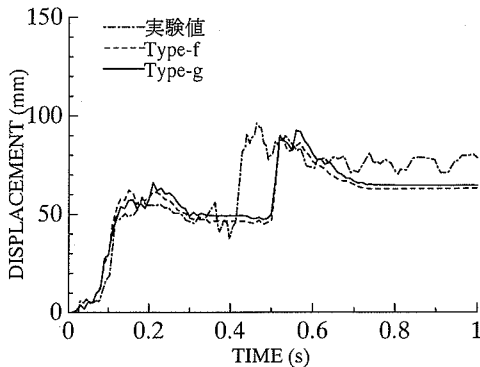


図-23 支柱10頂部の柵外方向変位

6. 乗用車モデルの開発

実車衝突実験は、通常、小型乗用車による実験1と大型トラックによる実験2があり、実験1によって確認するのはii)乗員の安全性能、iii)車両の誘導性能およびiv)構成部材の飛散防止性能であり、実験2によって確認するのはi)車両の逸脱防止性能、iii)車両の誘導性能およびiv)構成部材の飛散防止性能である。

数値解析によって乗員の安全性能を評価するには、乗用車モデルを用い、加速度の応答を求めることが必要である。しかし、一般に公開されている乗用車モデルは米国のNational Crash Analysis Center (NCAC) によるFord Taurus Car Model¹⁶⁾、ホンダシビックの1982年モデルなどごく少数である。また、入手可能なこれらのモデルも、必ずしも現在の日本の交通事情にあった乗用車モデルであるとは言えない。そこで本研究ではトヨタカローラをモデルとした車両総重量1.0t(1000kg)の小型乗用車モデルを独自に開発した。車体の形状や部材の諸元は文献16)や公開されているモデルを参考にし、乗用車の車両挙動に大きく影響を及ぼすサスペンション部¹⁷⁾については、図-24(b)のようなマクファーソン式の独立懸架をパネとジョイントなどを用いて忠実にモデル化した。その小型乗用車の有限要素モデルを図-24に、モデルの諸元を表5に示す。車両材料の内、鋼材のひずみ速度効果を考慮している。

7. 実車衝突解析による性能照査

(1) 防護柵の有すべき性能

平成11年4月から施行された防護柵の設置基準(新基準)において車両用防護柵の種別は、衝突の際の衝撃度が応じて表-6のように設定されることとなった。衝撃度とは、防護柵の強度をエネルギーの観点から評価する指標である。衝撃度は、式(7)から算定される値であり、衝突車両の持つ防護柵直角方向のエネルギーのことである。

表5 小型乗用車モデルの諸元

タイプ	小型乗用車モデル
節点数	2686
要素数	2386
要素タイプ	2点積分 Belytschko-TsayShell 要素 1点積分 solid 要素

重量: $w=1.0t(1000kg)$
 重心位置: 高さ方向=下から390mm
 車両方向=前輪から1190mm

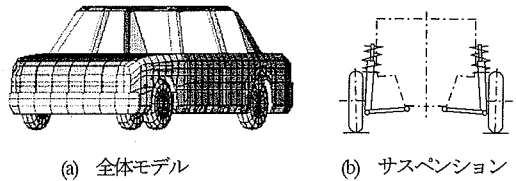


図-24 小型乗用車モデル

$$I_s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{V}{3.6} \cdot \sin \theta \right)^2 \quad (7)$$

ここで、 I_s : 衝撃度(kJ)、 m : 衝突車両の質量(t);

V : 衝突速度(km/h)、 θ : 衝突角度(度)

新基準で規定された性能規定とは、i)車両の逸脱防止性能、ii)乗員の安全性能、iii)車両の誘導性能、iv)構成部材の飛散防止性能の4つであるが、本研究では、数値解析による防護柵の性能照査の信頼性を確認するために、構成部材の飛散防止性能を除く3つの性能について、実験と解析結果を比較しながら検討する。解析には防護柵モデルは、これまでの検討でひずみ速度効果など、精度を上げるために必要な項目を考えたtype-gによるものを用い、衝突車両モデルはi)車両の逸脱防止性能、iii)車両の誘導性能については改良したトラックモデルを、ii)乗員の安全性能、iii)車両の誘導性能については今回開発した乗用車モデルを用いる。

なお、飛散防止性能については、車両が防護柵に引つかからないことや車両及び防護柵が著しく変形しないことなどの確認によってある程度の検討は可能である。しかし、数値解析では正確な飛散防止性能を確認できる解析モデルを作成することは困難であり、今後の課題の1つとして挙げられる。

(2) 車両の逸脱防止性能

車両の逸脱防止性能とは、大型トラックの実車衝突実験によって防護柵が車両に突破されず、かつ車両の最大進入行程が規定値以内であることである。車両の最大進入行程とは、車両の衝突側の車輪が防護柵面からどの程

表-6 防護柵の種類と衝撃度

衝撃度 k_1 (kJ)	45	60	130	160	280	420	650
種別	C	B	A	SC	SB	SA	SS

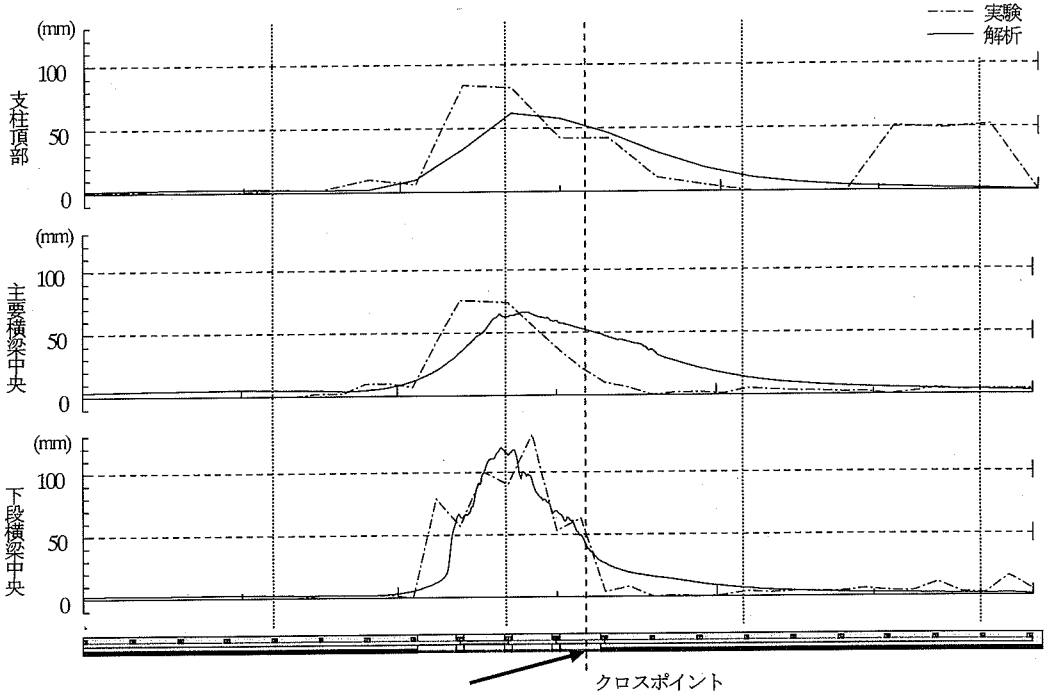


図-25 防護柵の残留変位の比較

度進入したかを防護柵の変位によって推定するものである。コンクリート埋め込みである橋梁用ビーム型防護柵の場合、最大変位が 300mm 以内にならなければならないとされている。

実験と解析結果を比較してみると、まず支柱 10 の頂部の変位時刻歴に関しては、図-23 に示すように、解析結果において、2 次衝突時に防護柵変位の立ち上がり約 0.1 秒遅れるが、最大変位では 1 次衝突と 2 次衝突とも良く一致している。次に、防護柵全体の残留変位の比較を図-25 に示す。残留変位については、支柱 10 頂部の残留変位は 15% 程度の差があるが、主要横梁中央及び下段横梁の残留変位は実験値とよく一致している。

変位が最大である支柱 10 及び主要横梁 9 の残留変位は実験結果とよく一致しており、実車衝突実験前の予備段階での防護柵の変位はおおよそ予測できるものであると考えられる。よって、本研究で作成した数値解析モデルによって防護柵の車両逸脱防止性能を照査することは十分に可能であると考えられる。

(3) 車両の誘導性能

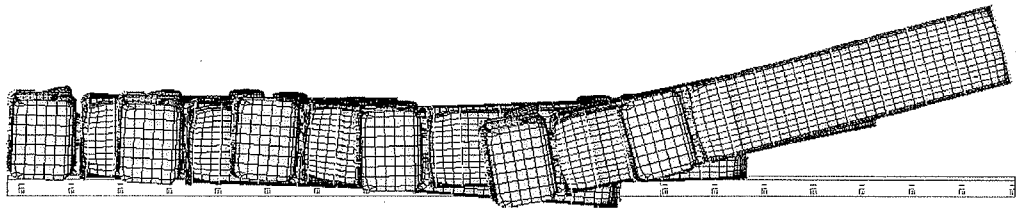
車両の離脱速度を衝突速度の 6 割以上、離脱角度を衝突角度の 6 割以内に保つ車両の誘導性能を有することが

必要であると規定されている。このため、防護柵は大きな変位によって車両の滑らかな進行を妨げたり、進行方向を過度に変えてしまったりするものであってはならない。

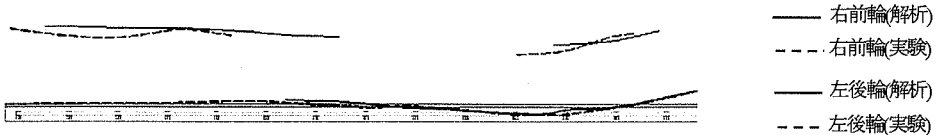
実車衝突実験では、車両の離脱速度はテープスイッチ式速度感知機や高速度フィルムの解析によって計測している。また、離脱角度については車両の後輪の軌跡より求めている。解析では、車両重心の速度の時刻歴により、車両が離脱した後の速度ベクトルの絶対値から離脱速度を、速度ベクトルの方向から離脱角度を算出した。

まず、大型トラックの解析結果の車両の軌跡を図-26 に示し、実験結果と解析結果の車両の挙動の比較を図-27 に示す。車輪の軌跡を実験と数値解析とで比較した場合、左前輪の軌跡については解析と実験が多少異っているが、右後輪の軌跡については解析の方が実験とよく一致している。車両挙動の比較をみると、0.4 秒付近車両の傾斜角や前輪の浮き上がりは実験より少し小さいほか、解析は実験と良く一致しており、実車衝突実験を補完するにあたって大きな問題はないと考えられる。

また、離脱速度・離脱角度の比較を表-7 に示し、速度の時刻歴、車両-防護柵間の角度の時刻歴を、それぞれ図-28、29 に示す。図中に示すように実験結果の離脱速度



(a) 車体の軌跡(0.2s間隔)



(b) 車輪の軌跡

図-26 車両の軌跡

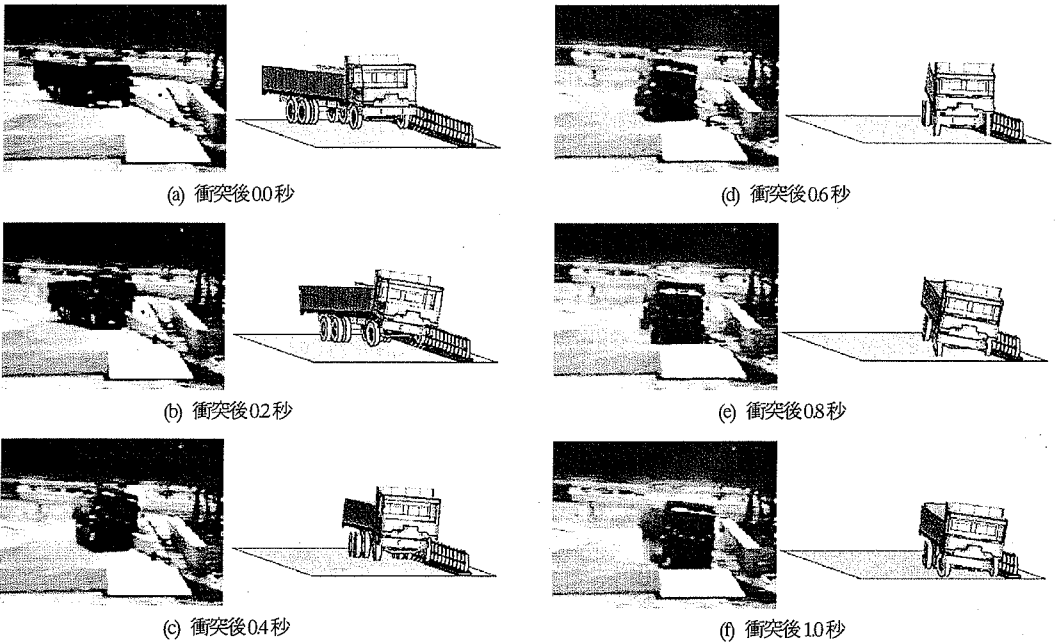


図-27 大型トラックの挙動

は64.8km/h、離脱角度は0度であったのに対して、解析結果は離脱速度が63.0km/h、離脱角度が0.3度となり、実験結果とよく一致した。

次に、小型乗用車の車両挙動を図-30に示す。これを見ると、一次衝突、二次衝突の時刻、挙動ともよく一致しており二次衝突後の車体がゆれる挙動も一致している。また、離脱速度は59.1km/h、離脱角度は6°となり、実験結果とよく一致した(表-7)。大型トラック、小型乗用車ともに車両の離脱速度を衝突速度の6割以上、離脱角度を衝突角度の6割以内に保たれており、これらの解析結果から車両の誘導性能に優れていると言える。

このように、解析では図-27~30に示したように車両の

表-7 離脱速度・離脱角度の比較

		離脱速度 (km/h)	離脱角度 (度)
トラック	実験	64.8	0
	解析	63.0	0.3
乗用車	実験	59.1	7.3
	解析	58.8	6.0

速度、車両と防護柵の間の角度などの時刻歴が簡易に算出でき、車両の挙動の変化が時系列で把握できるので、数値解析シミュレーションは車両の誘導性能を照査するには有効であると考えられる。

(4) 乗員の安全性能

a) 乗員の安全性能の評価方法

一般に、乗員の安全性を評価する基準としては、表-8に示すような、交通事故における標準化された傷害度であるAIS (Abbreviated Injury Scale) が用いられる¹⁹⁾。また、米国の道路安全施設の乗員安全性に関する基準²⁰⁾によれば、車両衝突時に生じる瞬間的な加速度などから、乗員に対する衝撃の程度を評価することが妥当であるとされており、瞬間的加速度 (10msec 移動平均の最大値) が20g (g:重力加速度) 以下であれば、乗員に重い後遺症が残らない障害 (表-8 の AIS の 2 レベル) となるとされている¹⁹⁾。

新基準においても、AIS や欧米の基準を参考に、防護柵の安全性能は乗用車の重心の加速度を測定することにより評価することとなっている。本研究で取り扱っているような種別 A 以上の強度を有する防護柵に関しては、乗員の安全性は車両総重量 1t (1000kg) の乗用車による衝

突速度 100km/h、衝突角度 20 度の条件のもとで、車両重心における加速度の最大値が 20g 未満となることを確認する必要がある。

b) 橋梁用ビーム型防護柵の安全性能

本研究では、前述した Type-g の橋梁用ビーム型防護柵モデルと新たに開発した小型乗用車モデルを衝突させた

表-8 AIS スケールと乗員障害度の程度

AIS	障害度	障害の程度
0	無傷	本人が受傷しないといい、痕跡も認められない
1	軽傷	必ずしも医師の手当てを必要としない
2	中等傷	医師の手当てを必要とする傷、入院を必要としない
3	重症	入院を要する傷、後遺症を残す
4	重篤	生命が危険な傷
5	瀕死	重篤な症状下にあり、助かる見込みの甚だ乏しい
6	即死	実質的に救命し得ない

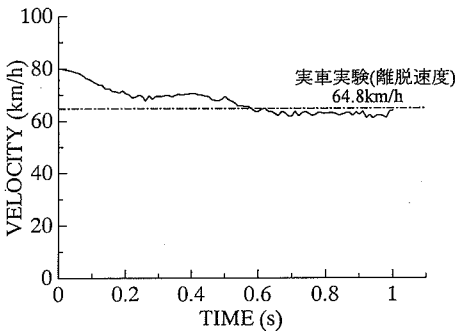


図-28 車両速度の時刻歴

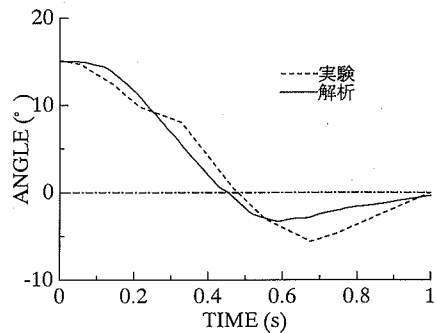
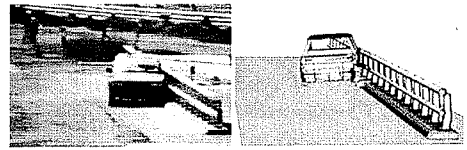


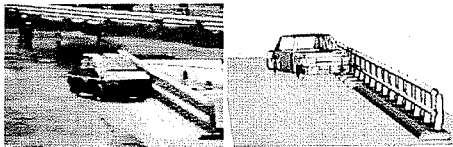
図-29 車両防護柵間角度の時刻歴



(a) 衝突後0.0秒



(d) 衝突後0.3秒



(b) 衝突後0.1秒



(e) 衝突後0.4秒



(c) 衝突後0.2秒



(f) 衝突後0.5秒

図-30 小型乗用車の挙動

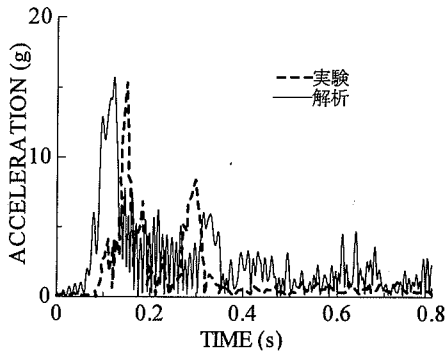


図-31 車両の加速度

場合の解析から得られた結果の車両重心加速度を処理し、実車衝突実験の結果及び限界許容値と比較し、安全性能を数値解析によって評価することができるか否かを検討した。

加速度のサンプリングタイムについては、当初は実車衝突実験の測定手法と同じ0.5ms間隔とすることを考えたが、解析では高周波ノイズが非常に大きいことから、サンプリングタイムをより小さくする必要があり、ここでは0.01msとしている。また、高周波ノイズ軽減のために加速度算出箇所を剛体とし加速度を算出するLS-DYNAの加速度計機能と呼ばれる機能を用いていた。

実験や数値解析による加速度の応答値は高周波成分を多く含んでおり、非常に大きな応答値を得てしまうことがある。しかし、これらのノイズは実際には人体に影響が現れないほどに微小である。そこで、これらをローパスフィルターによって除去することが、一般的な対処方法として用いられている。

そこで、実車衝突実験で行われているのと同様に80Hzのローパスフィルターで処理を施し、高周波成分を除去した後、加速度の合成を行ったものを図-31に示す。合成加速度の最大値は15.7gであり、実験値の最大加速度15.4gとよく一致しているといえる。

ローパスフィルター処理で得た加速度の波形の最大値が規定値以内に収まっていることから、乗用車乗員には重度の後遺症がなく、生命には危険がないと言える。したがって、本研究で独自に開発した小型乗用車モデルを用いた応答加速度の解析結果は実験値と良く一致し、モデルの有効性を確認できたとともに、数値解析シミュレーションを用いて乗員の安全性能を照査することが可能であるといえる。

(5) 他の実車衝突実験との比較

前述した実車衝突実験のシミュレーション解析によって本研究で作成した橋梁用鋼製防護柵及びトラックの解析モデルの有効性を示し、数値解析による防護柵の性能照査の信頼性を検討したが、ここでは他の実車衝突実験

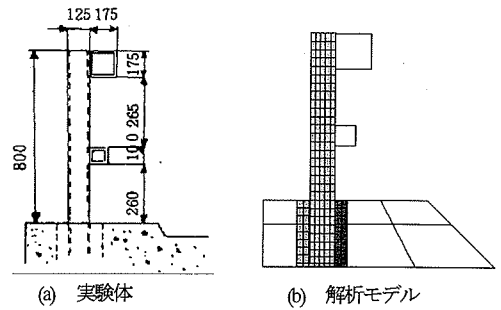


図-32 防護柵のモデル

表-9 衝突条件

衝突車種	大型貨物車	小型乗用車
衝突車重量(t)	14 (14000kg)	13 (1300kg)
衝突速度(km/h)	513	795
衝突角度(°)	20	20

に適用できるかどうかを検証する。

橋梁用鋼製防護柵の実車衝突実験は非常に少ない、特に新基準に従って行われた実車衝突実験はまだほとんどないため、ここでは新基準以前に行われた他の実車衝突実験²⁾のシミュレーション解析を行い、実車衝突解析の有効性及び数値解析による防護柵の性能照査の信頼性を確認する。

a) 実車衝突実験の概要

実車衝突実験で用いた鋼製防護柵及び解析モデルを図-32に示す。支柱の間隔は200mmであり、支柱の高さは800mmである。主要横梁と下段横梁とも四角形のボックス型ビームで、幅はそれぞれ175mmと100mmである。

衝突条件を表-9に示す。車両重量は車両モデルの積載物重量やマス要素を操作し、形状や重心位置を変化させないように変換した。クロスポイントは支柱5と支柱6の間であり、支柱6により近い(図-34に示す)。

支柱および横梁の材質はSTKR-41を使用しており、これは鋼管を製作した後矩形に加工するものであり、正確な材料特性は分からないが、解析で前述した本研究の材料試験により得られたSTK400鋼管の試験結果を用い、ひずみ速度効果も考慮する。

b) 解析結果

解析結果を図-33～図-35、及び表-10に示す。まず、大型トラックと防護柵を衝突させた際の防護柵の変位時刻歴を図-33に示す、解析結果と実験結果の最大変位とはよく一致している。この実車衝突は衝突速度が小さいため、2次衝突のピーク値は1次解析結果は良く再現している。

図-34に示す大型トラックの車両軌跡や表-10に示す離脱角度、離脱速度の比較から、解析でトラックの挙動は実験とほぼ一致していることが分かる。また、図-35に示

す小型乗用車重心の加速度の最大値も実験と一致している。よって、本ケースでは解析によって実車衝突実験をよく再現し、解析の有効性または数値解析による防護柵の性能照査の信頼性を確認できた。今後、文献21)で扱っているシステムに取り入れ、新しい性能照査型設計法の

考え方²³⁾への対応も考えたい。

8. 結論

本研究で橋梁用鋼製防護柵部材の動的引張試験を行い、試験結果を用いて車両衝突数値解析を行った。また、残留応力及び摩擦係数などについて検討し、数値解析を用いて性能照査を行った。さらに小型乗用車モデルを独自に開発し、モデルの有効性を検討した。

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 鋼材のひずみ速度効果は上降伏点、下降伏点応力、引張強度、硬化開始ひずみ、引張強度時のひずみ、伸び及びしぼりで確認された。また、鋼材のひずみ速度効果はヤング率及びポアソン比ではほとんど無いことが分かった。
- 2) 動的引張試験より、SS400 鋼材及び STK400 原板の下降伏点応力の動的応答倍率については高橋らによるものと良く一致する結果を得た。
- 3) STK400 鋼管の 0.2% オフセット耐力の動的応答倍率は、STK400 原板の下降伏点応力の動的応答倍率と比較して上昇率が 40% 程度小さくなり、曲げ加工によってひずみ速度効果の変化が見られた。
- 4) 引張試験結果から得られた SS400 鋼材及び鋼管 STK400 の応力-ひずみ曲線を考慮することによって、防護柵変位や吸収エネルギー量が変化し解析結果に大きな影響を与えることが分かった。
- 5) 引張試験結果から得られた SS400 鋼材及び鋼管 STK400 のひずみ速度効果をモデル化し、解析した結果、ひずみ速度効果の有無によって防護柵変位が大きく変化し、ひずみ速度効果については詳細にモデル化する必要があることが分かった。
- 6) 鋼管及び圧延 H 形鋼の残留応力を考慮した場合の解析結果は、残留応力を考慮しない場合の解析結果と比較して防護柵の最大変位が 4% 程度小さくなるが、残留変位や車両挙動に大きな影響を与えないことが分かった。
- 7) 静止摩擦係数 0.78 から動摩擦係数 0.08 への変化を指数関数でモデル化した場合の解析結果は、従来の静止摩擦係数及び動摩擦係数が 0.10 として考慮した場合の解析結果と大きな違いがないことを示した。
- 8) 本研究で独自に開発した小型乗用車モデルを用いた解析を行った結果、車両挙動は実験結果とよく一致し、その有効性が確認され、小型乗用車モデルを用いた防護柵の安全性能の照査が数値解析シミュレーションで可能となった。
- 9) 構成部材の飛散防止性能を除く 3 つの性能に対して数値解析シミュレーションを用いた性能照査を行い、

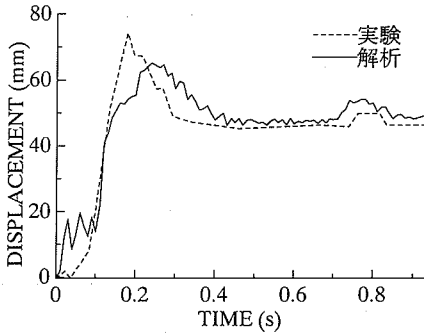


図-33 防護柵変位の時刻歴

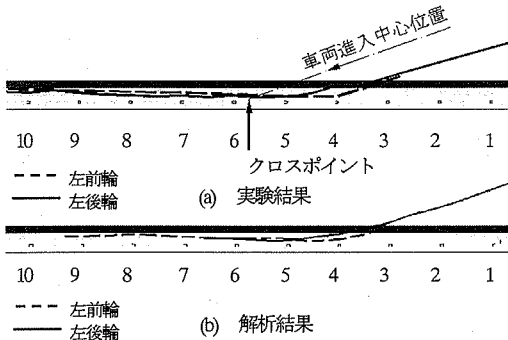


図-34 車輪の軌跡

(注：図中数値は支柱番号である。)

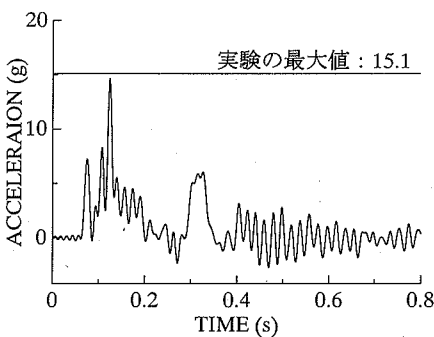


図-35 車両の加速度

表-10 離脱速度・離脱角度の比較

		離脱速度 (km/h)	離脱角度 (度)
トラック	実験	35.4	1.0
	解析	41.4	3.0
乗用車	実験	データなし	8.0
	解析	57.1	5.7

数値解析シミュレーションが実車衝突実験の補完手法として有効であることを示した。

謝辞：試験片作製にあたって日本鋼管株式会社の勝谷雅彦氏に多大なる御協力をいただいた。国土技術政策総合研究所の安藤氏には、実車衝突実験の詳細な情報や解析に関する貴重な御意見をいただいた。また、本研究の一部は、平成 11 年度～平成 13 年度文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(代表者:伊藤義人)の補助金を用いて実施した。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，丸善，1999。
- 2) NCHRP Report 350 Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features：National Cooperative Highway Research Program, NATIONAL ACADEMY PRESS, 1993。
- 3) 建築省土木研究所：防護柵衝突シミュレーションに関する研究，p265, 1992。
- 4) 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, No.3, pp.88-91, 1996。
- 5) 伊藤義人，森 正樹，鈴木信哉：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，構造工学論文集，Vol.45A, pp.1635-1643, 1999。
- 6) 伊藤義人，宇佐見康一，貝沼重信，杉江昌宣：アルミニウム合金製防護柵の実車衝突に関する数値解析的研究，構造工学論文集，Vol.47A, pp.1707-1717, 2001。
- 7) 建設省土木研究所，道路交通安全研究室，財団法人 土木研究センター：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。
- 8) 高橋彦彦，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, pp.1567-1580, 1991。
- 9) 青木博文，加藤勉，難波亘夫，佐藤恒宏：変断面鋼板引張材の変形能力に及ぼす試験温度・ひずみ速度の影響，日本建築学会論文報告集，第 322 号，pp.11-17, 1982。
- 10) 加藤勉，青木博文：電気抵抗溶接鋼管のひずみ履歴と残留応力—短柱の圧縮試験における見掛けの応力—ひずみ関係への影響について—，日本建築学会論文報告集，第 230 号，pp.43-51, 1975。
- 11) 日本総合研究所：LS-DYNA Version950 USER'S MANUAL, 1999。
- 12) 日本総合研究所：LS-DYNA Version950 使用の手引き，1999。
- 13) 青木徹彦，福本秀士：小口径電縫鋼管の統計的材料強度特性と残留応力分布の評価，土木学会論文報告集，第 314 号，pp.39-51, 1981。
- 14) 土木学会鋼構造委員会座屈設計ガイドライン作成小委員会（1987）：座屈設計ガイドライン，鋼構造シリーズ 2, p361。
- 15) NHTSA, Federal Motor Vehicle Safety Standards: Occupant Protection in Interior Impacts, Code of Federal Regulations, 49 CFR 571.201, 1997。
- 16) トヨタ自動車：パーツカタログ・トヨタ カローラ セダン，1998。
- 17) 川井正男：自動車工学全書 11 巻 ステアリング・サスペンション，山海堂，pp.53-130, 1980。
- 18) 日本自動車研究所，筑波大学社会医学系法医学（1992）：The Abbreviated Injury Scale (AIS)。
- 19) 建築省土木研究所，道路部交通安全研究室：防護柵衝突実験時の乗員の安全性評価，土木研究所資料，第 3380 号，平成 7 年 10 月。
- 20) 財団法人 高速道路調査会，交通工学研究会，橋梁用鋼製防護柵研究班：橋梁用鋼製防護柵に関する研究報告書（日本道路公団委託），昭和 53 年 2 月。
- 21) 伊藤義人，鈴木達：橋梁用防護柵の性能照査型統合設計システム，土木学会論文集，No.731/I-63, pp.353-366, 2003.4。
- 22) 日本鋼構造協会：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，2001。
- 23) 社会法人 土木学会：環境負荷低減型土木構造物建設ガイドライン，2001。

(2003.7.28 受付)

STUDY ON STRAIN RATE EFFECT AND PERFORMANCE EXAMINATION OF STEEL BRIDGE GUARD FENCES SUBJECTED TO VEHICLE COLLISION

Yoshito ITOH, Bin LIU, Koichi USAMI, Ryuichi KUSAMA and Shigenobu KAINUMA

A new code for the design of the guard fence performances was implemented and issued in April 1999 in Japan. In the new code, the full-scale experiment for checking the performances of guard fences is required in the determination of the structure of the guard fence. However, it is very difficult to test the performance of full-scale guard fences in the field for the parametric examination because of the huge time and cost consumption. In this study, the numerical analyses under the simulated condition of the truck-to-fence crash have been carried out for the steel bridge fence. Firstly, the tensile coupon experiment is conducted to determine the stress-strain relationship and the strain rate effect of materials. Secondly, the analytical results are compared with the field experimental results. Finally, The results of analysis are used for checking the performances of guard fences.