

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

Numerical collision analysis of aluminum alloy guard fences

伊藤義人*, 宇佐見康一**, 貝沼重信***, 杉江昌宣****

Yoshito Itoh, Koichi Usami, Shigenobu Kainuma and Masanobu Sugie

*工学博士 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)

**名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 博士課程前期課程 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

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

****名古屋大学工学部 社会環境工学科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

In the new design of the guard fence, the aluminum alloy is regularly allowed as a material of the guard fence. In this study, firstly, aluminum alloy coupon tests considering strain rate effect are carried out to find the material characteristics. Then, FEM models are developed by using material parameters obtained from the tests, and numerical analyses are also carried out to obtain the collision behavior of the aluminum alloy guard fence. The analysis results are compared with the field test results in order to investigate the prescribed performances of the aluminum alloy guard fence and parametric analyses are also performed to obtain the residual performance.

Key Words: aluminum alloy, guard fences, vehicle collision impact

キーワード: アルミニウム合金, 防護柵, 車両衝突

1. はじめに

昭和 47 年より防護柵に適用されていた防護柵設置要綱では, 防護柵の横梁, 支柱などの幅, 高さ, 厚さなどの構造諸元などを規定している仕様規定に従って防護柵が設置されていた¹⁾. しかし, 平成 11 年 4 月より適用された防護柵の設置基準では, 米国の道路上の安全施設の基準²⁾と同じように i) 衝突車両の逸脱防止性能, ii) 衝突車両の乗員の安全性能, iii) 衝突車両の誘導性能, および iv) 防護柵構成部材の飛散防止性能の 4 つの性能に対して有すべき性能を規定する性能照査型への変更が行われた³⁾. これに伴い, 橋梁用ビーム型防護柵の設計手法が確立され⁴⁾, 従来行われていた過度な強度の橋梁用防護柵を設計する必要がなくなったとも言われている. そのため, 防護柵の設置に必要な費用が低下し, 高価なアルミニウム合金が従来よりも容易に使用できるようになったと言われている.

また, 定められた性能を有していれば自由な形状の防護柵を設置できることが可能になったことや, 防護柵の使用材料としてアルミニウム合金が設置基準の中に明記されたことにより, アルミニウム合金製防護柵に対する関心が高まってきている.

伸び性能が悪い, 強度が低いなどのマイナスイメージの

強かったアルミニウム合金が, 防護柵の使用材料として明記されたのは, 伸び, 強度の面での技術開発が進んできたためである. 昭和 54 年に建設省・土木研究所で, アルミニウム合金製橋梁用防護柵の実車衝突実験⁷⁾が行われて以来, その美観, 軽量化, 耐食性から日本各地で採用され始め, 東京湾のレインボーブリッジなどにも採用されている. 最近では平成 11 年 8 月にアルミニウム合金製防護柵の実車衝突実験が報告されている⁸⁾. このような背景から現段階では国内の車両用防護柵は鋼製防護柵およびコンクリート製防護柵がほとんどであるが, 今後アルミニウム合金製防護柵の普及もさらに進むものと思われる.

本研究では, 最初にアルミニウム合金のひずみ速度効果を検証するためアルミニウム合金 A6061S-T6 を対象に引張試験を行う. この試験結果と谷村らの提案した各種材料グループに適用し得る実用構成式⁹⁾とを比較し, ひずみ速度効果の定式化およびひずみ速度効果の適用性を検討する.

次に, 「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」⁹⁾で報告されている実車衝突実験を対象にアルミニウム合金製防護柵の有限要素モデルを作成し, 衝突応答解析を行う. そしてモデルに対してひずみ速度効果など種々の検討を行い, 解析結果と実験結果とを比較することで実車衝突実験を補完する解析モデルを開発し, こ

れらアルミニウム合金製防護柵の性能を検討する。また、実車衝突実験よりも厳しい衝突条件についての解析を行うことにより、この防護柵の余剰性能も検討する。

2. 引張試験によるアルミニウム合金の物性の検証

2.1 アルミニウム合金A6061S-T6の特長

防護柵の設置基準に使用材料として明記されているアルミニウム合金 A6061S-T6 は耐食性が良好で、海岸地帯における用途でも防食処理を施す必要がほとんどない。また、引張強度や耐力などは A6063S-T5 などと比べ大きく、設計上、たわみの問題を除けば、普通鋼材とほぼ同等の許容応力をとれるという利点がある¹⁰⁾。

A6061S-T6はAl-Mg-Si系合金に分類されるアルミニウム合金である。Al-Mg-Si系合金の主な特徴を以下に示す¹¹⁾。

1) 軽量：

鉄の単位体積質量が7.85 (g/cm³)であるのに対し、アルミニウム合金の単位体積質量は2.70 (g/cm³)であり、鉄のおよそ1/3である。したがって、構造物などの軽量化に役立つ。

2) 耐久性：

通常、自然環境下ならば防錆を目的とした表面処理を施さずに使用できる。また、変質しないため、長期間にわたる使用に耐え、老朽化などの心配がほとんど不要である。

3) 衝撃吸収性：

ヤング率が鋼材の2.06×10² (GPa)に対し、約3分の1の6.86×10¹ (GPa)であり、衝撃を吸収する能力が優れている。

4) 外観が美しい：

アルミニウムの色調は銀白色で清潔感があり、また、塗装面は見苦しい汚れができるおそれが少ない。

2.2 アルミニウム合金のひずみ速度効果

一般に、金属材料の動的負荷時には、ひずみ速度効果という現象が知られており¹²⁾、その応力-ひずみ関係は静的負荷時のものと異なる。しかし、アルミニウム合金に関して

は、鋼材やコンクリートのようにひずみ速度効果に関する検討が十分行われていない。特に、防護柵に使用されるA6061S-T6についてのひずみ速度効果に関する実験的研究はほとんどない。

既往の実験的研究には、谷村らによって広範囲のひずみ速度域を対象とした式(1)に示す実用構成式が提案されている^{9,13-15)}。この構成式は、アルミニウム合金を含む各種材料グループに適用し得るものである。

$$\sigma = \sigma_s + (\alpha \varepsilon^p + \beta)(1 - \sigma_s / \sigma_{CR}) \ln(\dot{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_s) + B(\dot{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_u)^m \quad (1)$$

ここで、 σ ：応力(MPa)

ε^p ：塑性ひずみ

σ_s ：降伏応力(MPa)

$\dot{\varepsilon}^p$ ：ひずみ速度(1/s)

$\dot{\varepsilon}_s$ ：準静的ひずみ速度(1/s)

$\dot{\varepsilon}_u$ ：単位ひずみ速度=1 (1/s)

$\alpha, \beta, \sigma_{CR}, B, m$ ：材料定数

本研究では、車両用防護柵に使用されるアルミニウム合金の引張試験を実際に行い、アルミニウム合金についてのひずみ速度効果を求め、式(1)との比較検討も行う。

2.3 アルミニウム合金A6061S-T6の引張試験

(1) 試験方法

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。試験システムおよび材料試験機を図-1および図-2に示す。

試験片は図-3に示すような平行部60mm、幅25mmのJIS 5号試験片を用いた。使用したアルミニウム合金用ひずみゲージは、ゲージ長5mmのアルミニウム合金用であり、20,000～30,000 μ の測定が可能である。ひずみゲージは縦

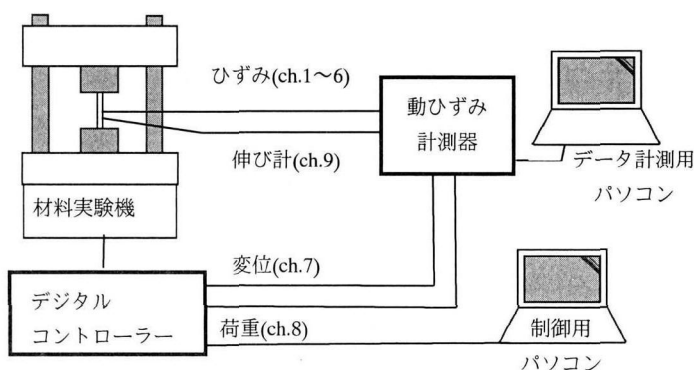


図-1 試験システムの概要

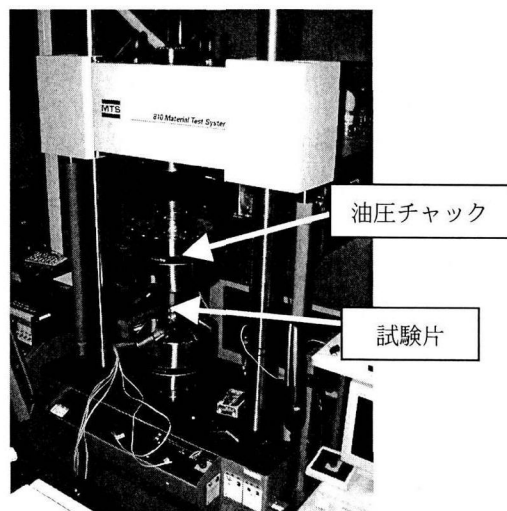


図-2 電気油圧サーボ式材料試験機

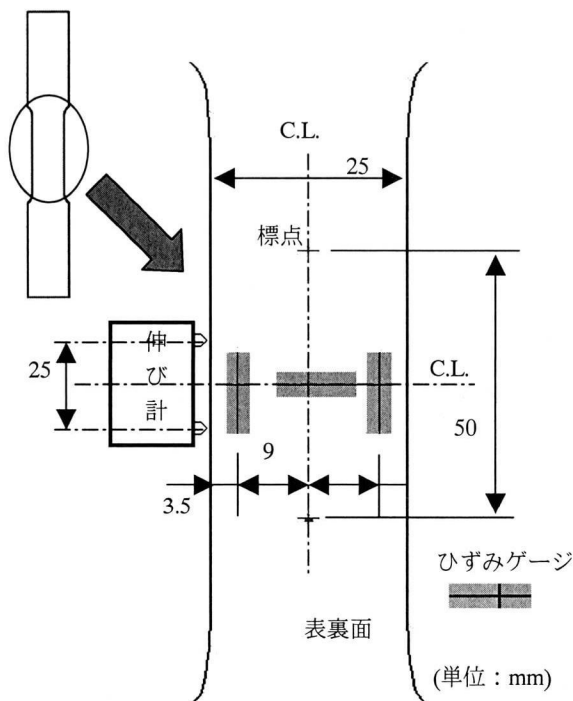


図-3 ひずみゲージの貼付位置
および伸び計の設置位置

ひずみと横ひずみを測定するため、試験片の表裏面にそれぞれ3枚ずつ合計6枚を図-3に示す位置に貼付した。試験片長手方向に貼付した表裏両面のひずみゲージ4枚から、試験片設置時の偏心が約3%以内となるように試験片を材料試験機にセットした。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¹⁶⁾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、ひずみ速度は次式ようになる。

$$\dot{\varepsilon} = V/L \quad \text{---} \quad (2)$$

ここで、 ε : 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、 $\dot{\epsilon}$ を 1×10^{-4} から 5×10^{-1} まで5段階のひずみ速度に分けて各3片ずつ用意した。表-1に引張試験を行った载荷速度、ひずみ速度および試験片数を示す。通常、静的な材料強度は、 1×10^3 (1/s) 程度のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で測定すれば十分であると言われているが、ここでは念のためひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が 1×10^4 (1/s) となる条件で試験を1体行い、 $\dot{\epsilon}$ が 1×10^3 (1/s) の場合と同程度となることを確認した。材料試験機的能力から最大ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を 5×10^{-1} (1/s) とした。この速度で試験片数が2

表-1 試験条件

ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ (1/s)	载荷速度 V (mm/s)	試験片数
1×10^{-4}	0.006	1
1×10^{-3}	0.06	3
1×10^{-2}	0.6	4
1×10^{-1}	6	3
5×10^{-1}	30	2

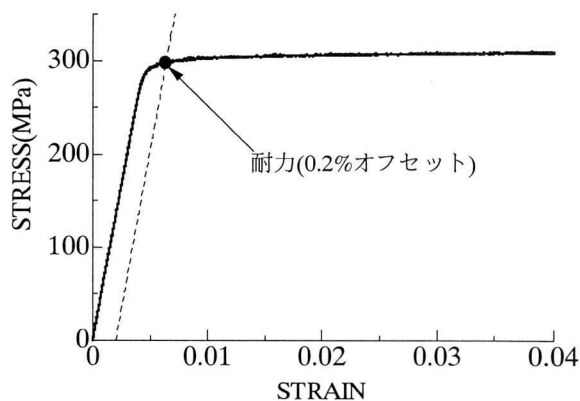


図-4 静的応力-ひずみ曲線

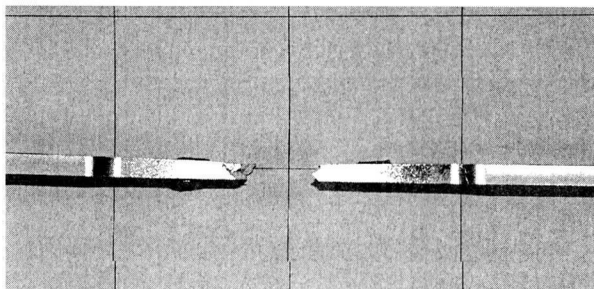


図-5 く字型破断面(目盛: 25mm 間隔)

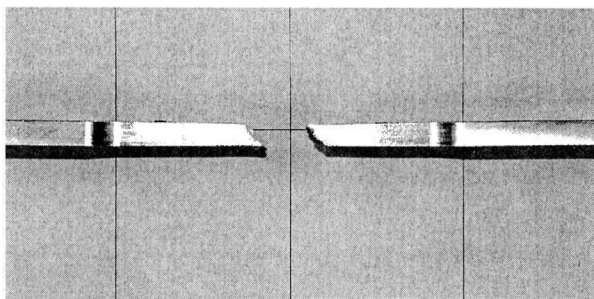


図-6 斜め型破断面(目盛:25mm 間隔)

となっているのは、当初 $\dot{\varepsilon}$ を 1×10^0 (1/s)として1体の試験を試みたが材料試験機のスロークの変位速度が一定に制御できなかったためである。後述する衝突解析において、トラックと防護柵が接触する部分で最大 10^2 (1/s)レベルのひずみ速度が発生するが、ごく局部的であるため図-7で示するような関係はこの範囲まで外挿できるものと仮定した。また、 1×10^2 で4体となったのは、この速度で予備試験を1体行ったためである。

(2) 試験結果

ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を 1×10^{-4} として制御した試験結果の応力ひずみ関係を図-4に示す。図-4の関係から0.2%オフセット耐力（以下耐力と略す）を求めた結果 $\sigma_y = 296$ (MPa) となった。この結果を $\dot{\epsilon}$ が 10^3 (1/s) の場合の試験結果と比較したところ図-7に示すように、耐力がほぼ等しかったため、これらの結果を平均した値を静的な試験結果として扱うこととした。以後、他の試験結果を静的な試験結果で除した値を、ひずみ速度効果による動的応答倍率として扱うこととする。なお、ひずみ速度に関係なく図-5および6に示すように、くの字型の形状と斜めに切れる破断の2種類が見られた。

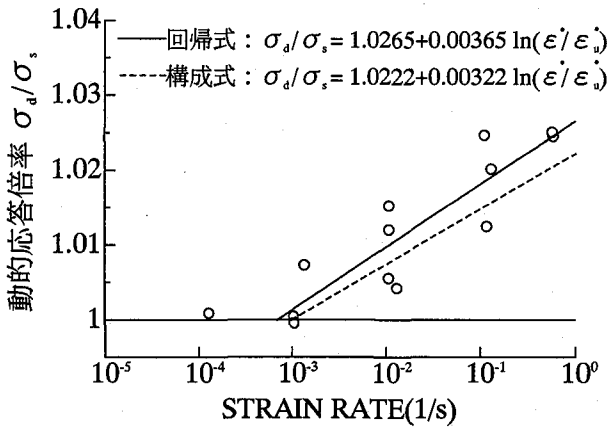


図-7 耐力のひずみ速度効果

各ひずみ速度における試験結果に基づき算出した耐力の動的応答倍率を図-7に示す。ここで用いたひずみ速度は式(2)に示したひずみ速度ではなく、試験で計測された伸び計のひずみの時刻歴から算出した値を用いている。図-7中の実線は試験結果からひずみ速度に対する動的応答倍率の回帰直線を示している。回帰曲線の決定係数は0.79となり、回帰式の適合性は良いものと考えられる。また、谷村らの提案した式(1)の第三項は $\dot{\epsilon}$ が 10^3 以上に効く項であるので無視し、塑性ひずみ ϵ^p に0002, 準静的ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_s$ に 10^{-3} を代入したものを図-7中に破線で示す。このように試験結果の耐力動的応答倍率は式(1)とほぼ一致している。

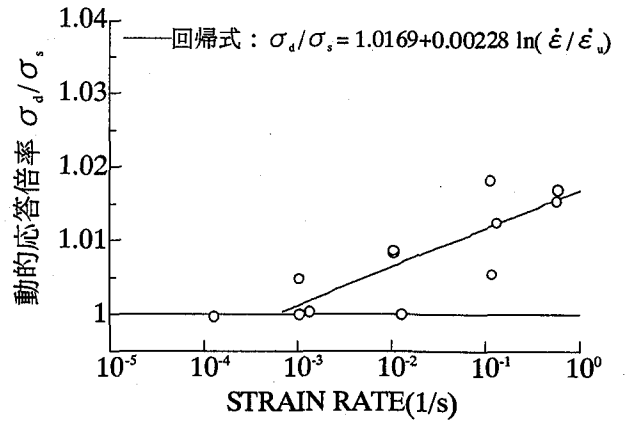


図-8 引張強度のひずみ速度効果

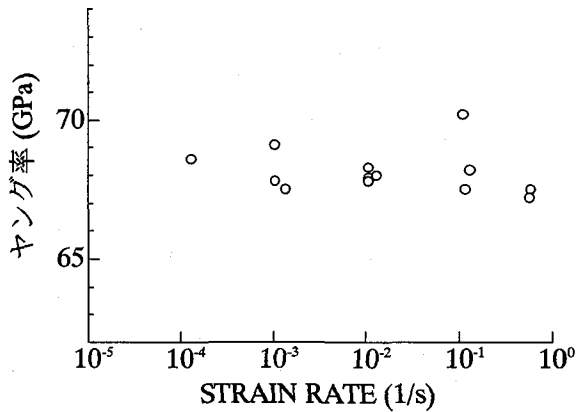


図-9 各ひずみ速度におけるヤング率

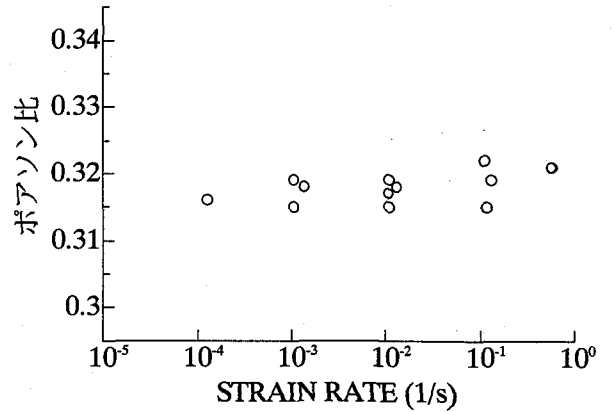


図-10 各ひずみ速度におけるポアソン比

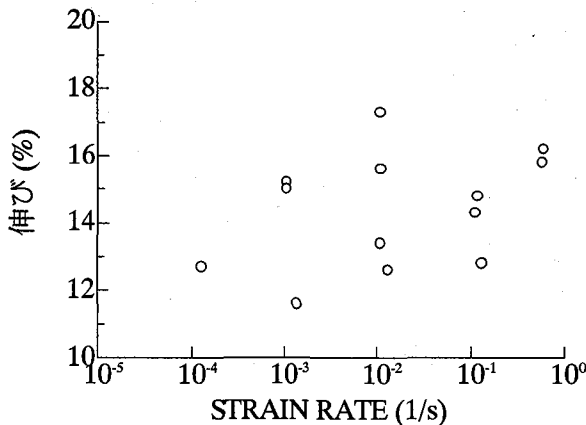


図-11 各ひずみ速度における伸び

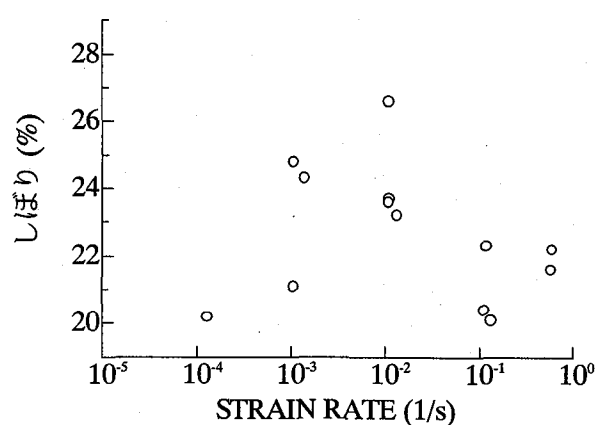


図-12 各ひずみ速度におけるしぼり

静的な引張強度 σ_u は313 (MPa)であり、動的応答倍率は図-8 に示すような結果となった。図中の実線は試験結果の回帰直線であり、決定係数は0.69 となった。このように引張強度の動的応答倍率は、耐力の動的応答倍率よりも勾配が小さくなっている。

これらの結果より、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が $10^0(1/s)$ において耐力のひずみ速度効果はたかだか 3%程度であり、引張強度のひずみ速度効果も $\dot{\epsilon}$ の $10^0(1/s)$ 場合で 2%程度であることがわかった。

次に、ヤング率、ポアソン比、伸びおよびしぼりの試験結果を図-9～図-12 にそでそれぞれ示す。ただし、ひずみ速度は図-7、8 と同様に伸び計のひずみの時刻歴から算出したものを用いている。これらの試験結果を耐力、引張強度と同様に対数関数で近似したとき、決定係数はヤング率が0.04、ポアソン比が0.30、伸びが0.13、しぼりが0.04 と小さくひずみ速度効果はほとんどないものと考えられる。

3. 解析モデル

3.1 解析対象

本研究では、「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」⁶⁾の中で行われた衝突実験で用いられた車両とアルミニウム合金製防護柵を対象として

解析モデルを開発し、その妥当性の検討を行った。
なお、解析には汎用衝撃応答解析プログラム LS-DYNA (Ver.950)を用いた。

3.2 トラックモデル

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、現在ほとんど公開されておらず、精密な車両モデルを外部から入手することは困難である。また、有限要素モデルを用いた防護柵に関する研究例はほとんど行われていない。既往の研究としては、ガードレール端部を地中に埋め込んだ場合の乗用車の乗り上げに関する解析的研究¹⁷⁾ などがあるが、トラックモデルを用いたフルスケールシミュレーションを行った研究例は文献19) などを除きほとんどない。

そこで、本研究では、図-13 に示す伊藤らが独自に開発したトラックモデルを使用する^{18,19)}。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。そこで、トラックモデルは車両総質量 14t 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した。なお、25t のトラックモデルは、他の実車衝突実験で行われているのと同様に荷台積載質量を変えることで対処した。

トラックモデルは、主に Belytschko-Tsay シェル要素でモ

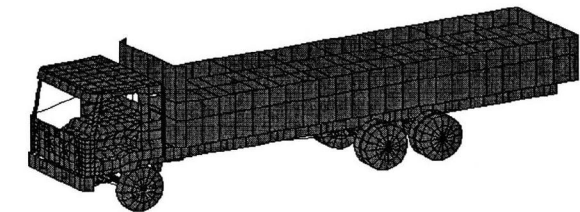


図-13 トラックモデル
表-2 解析モデル

解析モデル名	メッシュサイズ	ひずみ速度効果
AB-14-80-a	size-a	なし
AB-14-80-b	size-b	なし
AB-14-80-c	size-a	あり

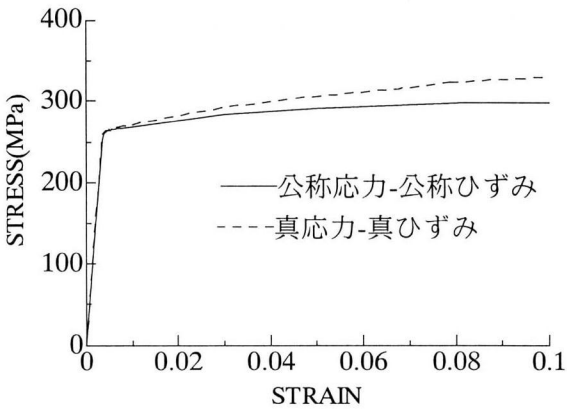


図-17 解析で用いた応力-ひずみ関係

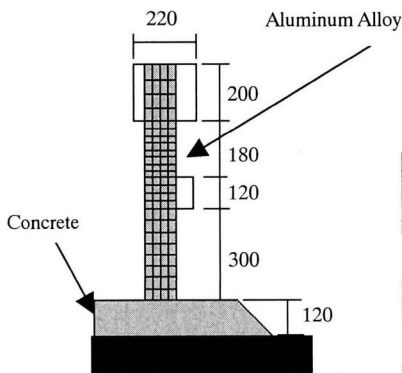


図-14 モデル側面図

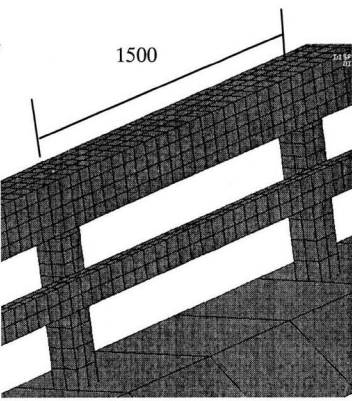


図-15 モデル立体図(size-a)

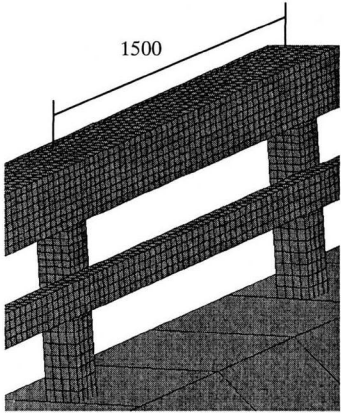


図-16 モデル立体図(size-b)

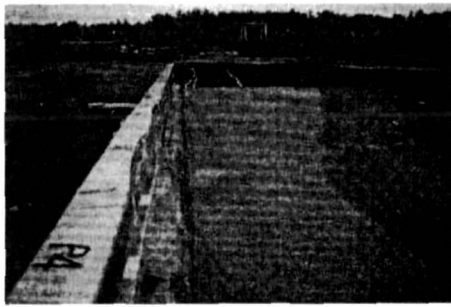


図-18 実験結果の変形モード

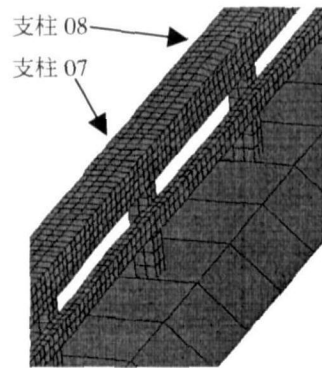


図-19 AB-14-80-a の変形モード

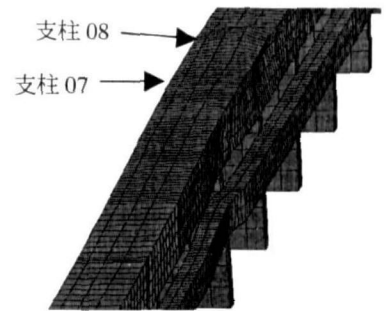


図-20 AB-14-80-b の変形モード

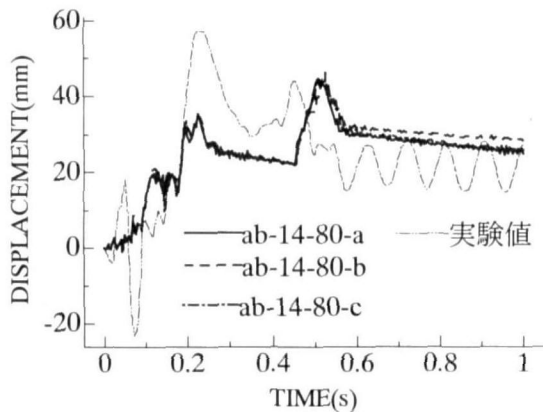


図-21 支柱 08 頂部の変位時刻歴

デル化されており、積分点は面内 1 点、断面内 2 点である。積載物については一点積分 solid 要素を用いてモデル化し、荷台内部に配置されている。トラックモデルの総要素数は 3,904 となっている。トラックモデルの寸法は、全長 11,835mm、高さ 3,100mm、幅 2,500mm、前後車輪間隔 6525mm となっている。

3.3 防護柵モデル

本研究で対象とする防護柵は、全部材にアルミニウム合金 A6061S-T6 が使用されている。防護柵モデルは、図-14 に示すような Belytschko-Tsay シェル要素を用いてモデル化した。物性のタイプは von-Mises の降伏条件に従う多直線近似弾塑性等方性体を用い、図-15 および 16 に示すような 2 種類の異なるメッシュサイズ、ひずみ速度効果の有無により 3 種の防護柵モデルタイプを作成した。これらの解析モデルを表-2 に示す。表中の解析名は、(防護柵タイプ) - (車両質量 : t) - (衝突速度 : km/h) - (モデルタイプ) である。防護柵タイプの AB は Aluminum alloy Bridge guard fence の略である。

コンクリート地覆については一点積分ソリッド要素でモデル化した。実験では支柱はコンクリート地覆に埋め込み式であったが実車衝突実験では損傷がほとんどないため、解析モデルでは支柱とコンクリート地覆の接合を剛結とした。剛結は、シェル要素の辺とソリッド要素の面を接合させるタイプの接触定義によって行った。

解析で使用する応力-ひずみ曲線は、社団法人軽金属協会

から出版されているアルミニウム材料の基礎と工業技術²⁰⁾のほか、アルミニウム加工技術便覧²¹⁾や報告書⁶⁾に記載されている耐力その他定数などと今回の試験結果を参考に作成した応力-ひずみ曲線を適用した。解析で用いた応力-ひずみ関係を図-17 に示す。図中の実線で示す公称応力-公称ひずみ関係は、耐力が 265(MPa)、引張強度が 298(MPa)、ヤング率が 68.6(GPa)となっている。今回、解析で使用した LS-DYNA 物性タイプ 24 (等方性多直線近似弾塑性体) では、図中の破線で示す真応力-真ひずみ関係のひずみ成分から弾性ひずみを差し引いた相当応力-相当塑性ひずみ関係を入力した。

実車衝突実験の衝突条件は、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と同じ条件の、車両質量 14t、衝突速度 80km/h、衝突角度 15 度とした。防護柵の支柱には、実車衝突実験と同様に車両の進行方向に沿って 01 から 16 まで番号を付けた。また、車両を衝突させる位置は、車両中心が支柱 09 から進行方向に 460mm ずれた位置と車両中心線が交わるようにして、実車衝突実験と同様の条件にした。

メッシュサイズは、size-a では図-15 に示すように主要横梁を一边 4 分割、下段横梁と支柱を一边 2 分割とした。size-b では図-16 に示すように主要横梁を一边 8 分割、下段横梁と支柱を一边 4 分割とした。要素数は size-a で 8,124、size-b で 29,092 である。

ひずみ速度効果は、引張試験から得られた図-6 に示す耐力の動的応答倍率の回帰式を前述した相当応力-相当塑性ひずみの相当応力にスケーリングすることで考慮した。

4. 解析結果の検討

4.1 解析モデルの検討

(1) メッシュサイズの影響

実験結果と AB-14-80-a、AB-14-80-b の解析結果の変形モードを図-18～図-20 に示す。AB-14-80-a と AB-14-80-b の解析結果の残留変形は、支柱 06～08 の横梁のみで確認された。残留変形は AB-14-80-a、AB-14-80-b の解析結果ともに小さいが、図-20 に示すようにメッシュサイズの細かい AB-14-80-b のほうが、支柱 07 付近で下段横梁に正確な変形が生じており、図-18 の実験結果との整合性が良い。こ



(a) 上方から見た後輪の軌跡



(b) 上方から見た車両全体の軌跡

図-22 車両の軌跡

これらの結果と実験結果を比較すると、実験結果では支柱 05 付近でも主要横梁に残留変形が生じている。これはトラック荷台部分が実験では支柱 05 付近で衝突しているのに対し、解析では荷台が衝突していないためであると考えられる。

図-21 に AB-14-80-a、AB-14-80-b、AB-14-80-c の解析結果および実車衝突実験結果における支柱 08 頂部の変位時刻歴を示す。図の横軸は衝突直後からの時刻であり、縦軸は支柱頂部の柵外方向の変位である。また、図中の実線は AB-14-80-a の解析結果、破線は AB-14-80-b の解析結果、一点鎖線は AB-14-80-c の解析結果、二点鎖線は実車衝突実験結果となっている。AB-14-80-a と AB-14-80-b の解析結果の最大変位について比較すると両解析結果とも 46mm となっており、残留変位について比較すると AB-14-80-a で 31mm、AB-14-80-b で 33mm となっている。このように変位時刻歴については、AB-14-80-a と AB-14-80-b とでほとんど差は見られなかった。したがって、メッシュサイズの分割は size-a を適用しても結果に大きな差異はないが、防護柵の変形モードをより正確に求めたい時には size-b を適用した方が良いと考えられる。

(2) ひずみ速度効果の影響

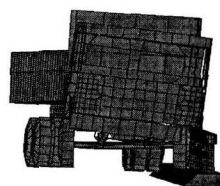
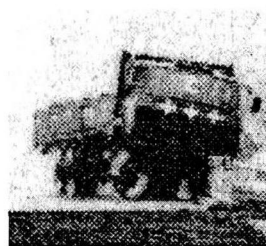
図-21 中の AB-14-80-a、AB-14-80-c の支柱頂部の変位時刻歴を比較するかぎり、両者の結果はほとんど重なっており、違いは認められなかった。また、最大変位量は両方ともに 46mm となっており、解析結果に差はほとんど生じない。この結果より、ひずみ速度効果による影響はごく微小であるため、アルミニウム合金製防護柵ではひずみ速度効果を考慮する必要のないものと考えられる。

4.2 実車衝突実験結果との比較

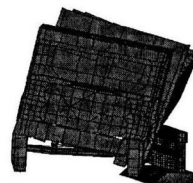
以上の解析結果から、アルミニウム合金製防護柵では、メッシュサイズは size-a、ひずみ速度効果は考慮しないモデルタイプ AB-14-80-a の解析結果を用い実車衝突実験と比較検討を行い、解析モデルの整合性を検証する。

(1) 車両の挙動

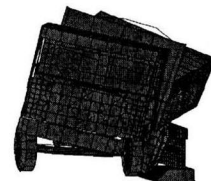
実車衝突実験では離脱速度 55km/h、離脱角度 1.0 度となっている、解析結果の車両の挙動は図-22 に示すような軌跡を描いている。車両重心位置での速度の時刻歴から算出



(a) 衝突後 0.3 s



(b) 衝突後 0.6 s



(c) 衝突後 0.9 s

図-23 車両の挙動

した離脱速度と離脱角度は、それぞれ 75km/h、1.5 度となった。図-22(a)の後輪の軌跡に示すように離脱角度は防護柵とほぼ平行であり実車衝突実験結果と近い結果となっている。離脱速度は実車衝突実験結果より 36%大きい結果となった。その原因としては、解析では摩擦を考慮していないため防護柵平行方向の減速があまりないことなどが考えられる。

車両の挙動の実験結果と解析結果との比較を図-23 に示す。このように解析では、アルミニウム合金製防護柵の実車衝突実験を、車両前部が衝突する一次衝突 (0.1~0.3 秒後) から車両後部が衝突する二次衝突 (0.3~0.6 秒後)、そして誘導されるまで (0.6 秒以降) をほぼシミュレートできていると言える。

(2) 支柱 08 の変位

実車衝突実験で変位が測定されたのは、支柱 06、08、10 であり最大変位を示したのは支柱 08 であった。図-21 に示した実車衝突実験結果の支柱 08 の変位は、一次衝突の初期に値が負 (図-21 の 0.1 秒付近) になっているが、この原因は正確には解明できていない。原因としては、防護柵がジョイント部などを有し完全な連続体でないこと、車両前面も同様に均一な強度になっていないことから、車両は押すばかりでなく、引っかける力などが瞬間的に大きく作用することなどが考えられる。解析では、ジョイント部の引っか

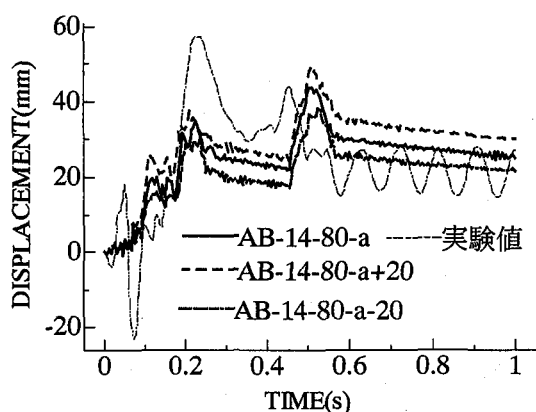


図-24 衝突位置のずれによる支柱頂部の変位の比較

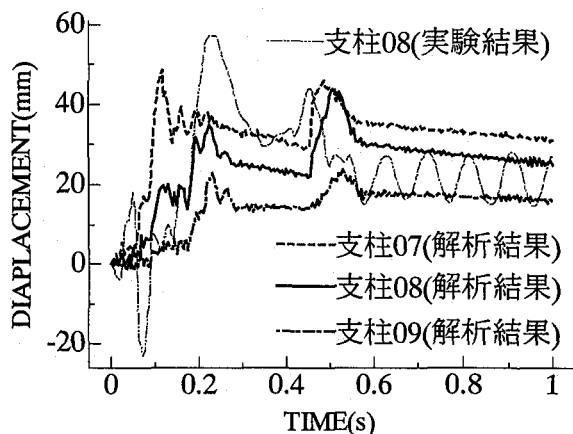


図-25 支柱07,08,10の変位時刻歴

けや車両前部の不均一性などがおよぼす影響を微細であるとし無視しているので、変位が負になることが無いと考えられる。しかし、このようなことは防護柵の性能を議論するときは、大きな問題とはならないと考えられる。

また、図-21 に示すように実験結果と解析結果とを比較すると、両結果ともに一次衝突時と二次衝突時に大きな変位が生じる傾向は一致している。しかし、実車衝突実験結果では最大変位が一次衝突時に発生しており、解析結果では二次衝突時に発生している。この原因として、前述した衝突初期段階での結果の相違や実験時の衝突位置のずれによる車両の挙動の相違が考えられる。

(3) 衝突位置の検討

実車衝突実験では、衝突車両をドーリー(牽引用連結金具)を介してワイヤーに接続し、巻き取りウインチにより防護柵に向かって牽引加速している。車両速度が 80km/h に達した後は、等速牽引され衝突直前にドーリーから切り離され、防護柵に衝突する状態になっている。そのため衝突車両がドーリーから切り離されてから防護柵に衝突する間の距離 18m を空走することになる。この空走による車両衝突位置の防護柵平行方向のずれは最大で±200 mm程度であると言われている。

そこで、本研究では実車衝突実験で起こりうる前後 200mm だけ衝突位置がずれた場合の解析を行い、衝突位置のずれが及ぼす影響について検討を行った。

図-24 に衝突位置をずらした場合の解析結果の支柱 08 の柵外方向の変位を示す。図中の AB-12-80+20 と記されているのが前方(車両進行方向)に 200mm だけ衝突位置がずれた場合の解析結果、AB-14-80-20 と記されているのが後方(進行方向と逆方向)に 200mm だけ衝突位置がずれた場合の解析結果である。

支柱 08 の変位はトラックが 200mm 前方にずれた場合最大変位で 5mm 程度大きくなっている。また、衝突位置が後方に 200mm ずれた場合には最大変位が 5mm 程度小さくなっている。このように衝突位置のずれによって支柱 08 の変位は±5mm 程度変動している。しかし、車両の挙動などに大きな変化はなかった。したがって、実車衝突実験の衝突位置のずれは車両および防護柵の挙動に対して大きく

影響するものではなく、実験結果と解析結果とで防護柵の挙動が一部異なる原因ではないと考えられる。

(4) 他の支柱の変位

図-25 に実験結果の支柱 08 の変位時刻歴と解析結果の支柱 07, 08, 09 の変位時刻歴を示す。最大変位が発生した支柱は、実験では支柱 08 であったが、解析では支柱 08 ではなく支柱 07 となった。このように最大変位が生じる支柱が異なるのは、前述したように実験と解析で車両の細部の挙動が異なってしまうためであると考えられる。

しかし、最大変位の発生している支柱は異なるが、最大変位は解析結果で 50mm、実験結果で 58mm と近い値を示した。実車衝突実験に用いられる棒状変位計の測定精度はそれほど高いものでないこと、防護柵自体の 2 次元の動的変位を精度良く測定できる技術がないことなどから、実車衝突実験では変位の測定値はあくまでも参考値の位置付けになっている。実車衝突実験をモデル化した AB-14-80-a の解析結果は上記のように、まだ細かな違いはあるが、最大変位や車両の挙動などの変形を見る上で支障はなく、適切であることが分かった。すなわち、本研究で作成したモデルは、実車衝突実験を補完する役割を果たせるものと考えられる。

5. アルミニウム合金製防護柵の余剰性能の検討

5.1 実車衝突実験の補完

本研究で対象としている防護柵は、旧防護柵設置要綱の種別 S 種防護柵として開発され、実車衝突実験が行われたものである。S 種とは旧防護柵設置要綱で規定されている最上級種別のことであり、防護柵の設置基準では新たに SS, SA, SB, SC に分化・拡充された。

新基準では、橋梁用ビーム型防護柵の設計手法が確立された。この設計方法では、支柱と横梁の静荷重試験の結果を図-26 に示すような部材選定領域上にプロットし、プロット点が規定された領域内に位置すれば、支柱および横梁が規定値以上の強度を有していることとされている。このように設計された防護柵は、実車衝突実験を行わずして設

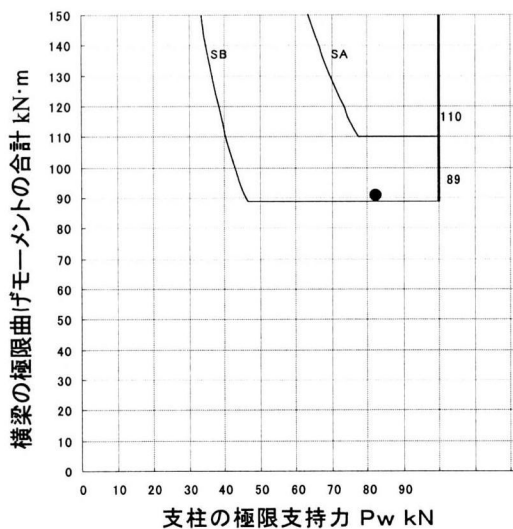


図-26 SA 種, SB 種の部材選定領域

表-3 解析モデル

解析モデル名	車両質量 (t)	衝突速度 (km/h)	衝撃度 I_s (kJ)
AB-14-80-b	14	80	232
AB-25-80-b	25	80	414
AB-25-100-b	25	100	647

置ることができる規定されている．今回解析対象とした防護柵の静荷重試験の結果は図-26 中のプロット点であり，プロット点は SB 種の領域内に位置する．したがって，本研究で対象とする旧要綱 S 種防護柵は新基準では SB 種に相当する．

この防護柵モデルに対して，実車衝突実験を補完する意味で，車両質量 25t，衝突速度 80km/h の衝突条件となる解析と，車両質量 25t，衝突速度 100km/h とする衝突条件のモデルを作成した．このモデルを用いて実車衝突実験では困難なパラメトリックな検討を行い，この防護柵がどれほどの余剰性能を有しているかを検討する．表-3 に解析モデル名と衝突条件を示す．なお，余剰性能を確認するための解析では，メッシュサイズは防護柵が大きく変形したときのモードを正確に求めることができる size-b を用い，ひずみ速度は考慮していない．表-3 中の衝撃度 I_s とは車両の防護柵直角方向の速度成分と車両質量から算出した車両の持つ防護柵直角方向の運動エネルギーのことである．

5.2 AB-25-80-b の解析結果

図-27 に示すように AB-25-80-b の車両の挙動は前節で述べた AB-14-80-b などと比較してもあまり変わらず，車両の乗り越えや転倒ではなく，衝突後の防護柵も極端な残留変形はなかった．また，図-28 に示す支柱 07～10 の変位時刻歴から，最大変位量も支柱 08 の 102mm となり，設計上の上限である変位量の 300mm を大きく下回る結果となっ

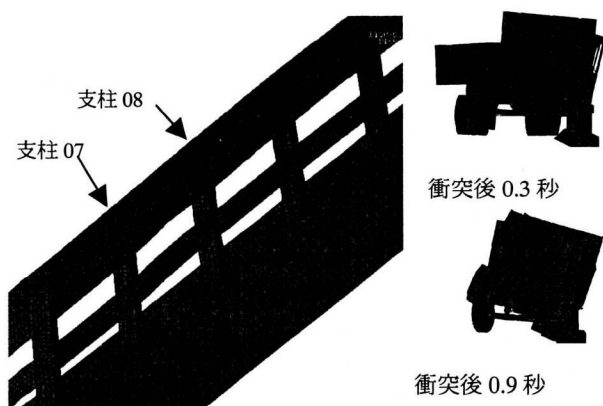


図-27 AB-25-80-b の車両・防護柵の挙動

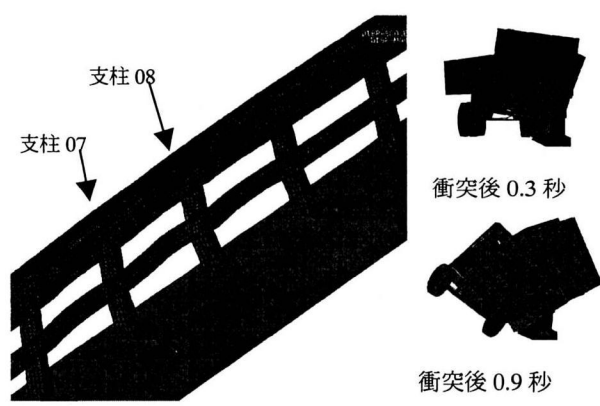


図-29 AB-25-100-b の車両・防護柵の挙動

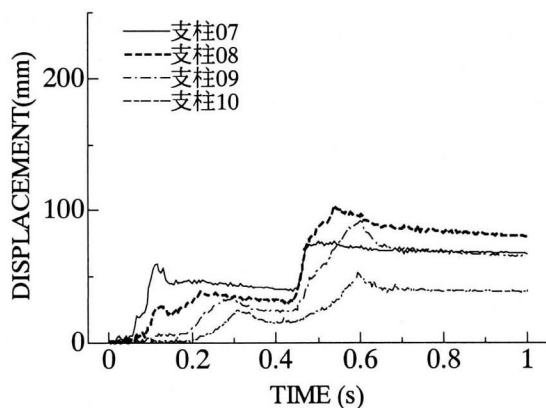


図-28 AB-25-80-b 支柱変位時刻歴

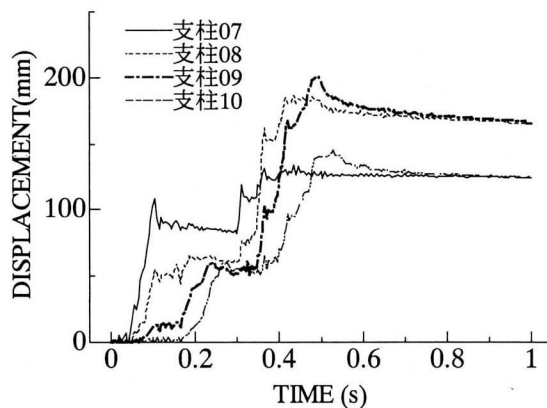


図-30 AB-25-100-b の支柱変位時刻歴

た。残留変位についても支柱07で68mm,支柱08で80mm,支柱09で65mm,支柱10で39mmとなり,防護柵設置基準で規定されている300mm以内に収まっている。

今回扱った防護柵は旧要綱でS種防護柵の設計条件として定められていた車両質量14t,車両速度80km/hよりもエネルギーの大きい車両質量25t,車両速度80km/hの衝突に対して十分な耐久性があると言える。

防護柵設置の基準で定められている離脱角度についても,進入角度の6割である9度をはるかに下回る0.6度となり,車両の誘導性能においても余剰性能を有していると言える。したがって,今回扱ったアルミニウム合金製橋梁用角ビーム型防護柵は十分な余剰性能を有しており,新基準において種別SB種が適用されるべき区間であっても取り替えが必要でないことがわかった。ただし,基部のコンクリートについては,固定としており基部の破壊については別の検討が必要であると考えられる。

5.3 AB-25-100-b の解析結果

AB-25-100-b 支柱07~10の変位時刻歴を図-30に示す。最大変位量は支柱09の202mm,残留変位は支柱07で124mm,支柱08で165mm,支柱09で169mm,支柱10で124mmとなり,何れも防護柵設置基準で規定されている300mm以下となった。離脱角度も7.6度であり,新基準の規定を満たしている。これにより,この防護柵が強度的,誘導性の両面において十分な余剰性能を有していることが明らかになった。

しかし,図-29に示す車両の挙動によると衝突後0.9秒には約45度と大きく防護柵方向に傾斜してしまっている。解析では衝突後1秒までしか計算していないが,このまま解析を行っても車両は進行方向に復元されることなく防護柵と接触したまま減速していくか,もしくは転倒してしまうものと考えられる。したがって,この防護柵を種別SS種の区間に適用することは適切ではない可能性がある。

6. エネルギー収支

一般に,車両が防護柵に衝突した時,エネルギーは数値解析では式(3)のような関係が成り立つ。

$$E_{kb} = E_{ka} + E_{iv} + E_{if} + E_h \quad (3)$$

ここで, E_{kb} : 衝突前の車両の運動エネルギー

E_{ka} : 衝突後の車両の運動エネルギー

E_{iv} : 衝突後の車両の内部エネルギー

E_{if} : 衝突後の防護柵の内部エネルギー

E_h : アワグラスエネルギーなど

AB-14-80-b のエネルギー分担の時刻歴を図-31に示す。物理的には,防護柵と車両内部の吸収したエネルギーと車両運動エネルギーの減少は,つり合いを保たなくてはならない。しかし,解析では全エネルギーは,衝突前より衝突後のエネルギーの方が5%程度小さくなり収支が一致していない。これはシェルの要素などの変形モードが砂時計状

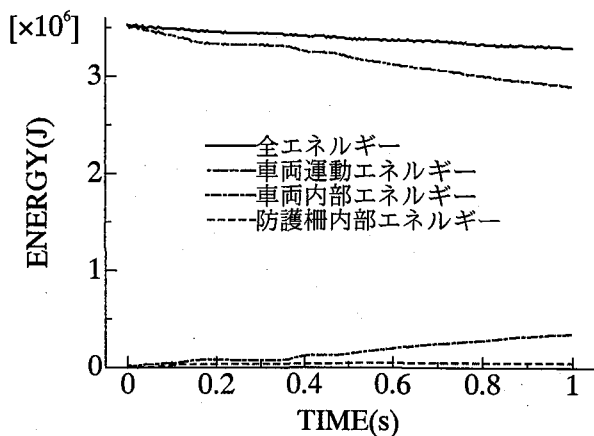


図-31 AB-14-80-b の解析結果のエネルギー分担の時刻歴

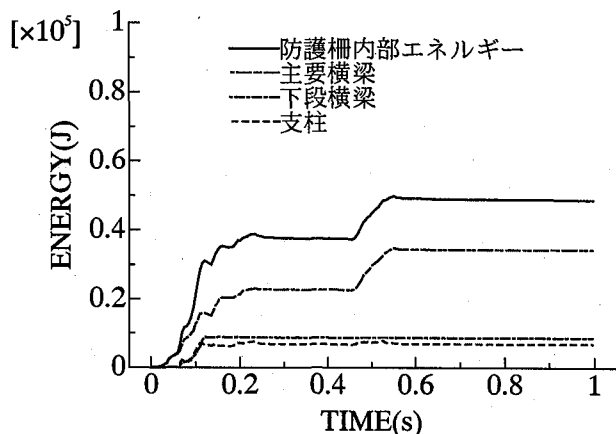


図-32 AB-14-80-b の解析結果の部材別エネルギー分担

となり剛性が零になることで生じるアワグラスエネルギーと呼ばれる数値不安定現象などが発生するためであると考えられる。

また,防護柵部材別の内部エネルギーの分担を図-32に示す。防護柵が吸収したエネルギーの67%を主要横梁,18%を下段横梁,15%を支柱が吸収している。伊藤らの行った橋梁用高欄型鋼製S種防護柵の解析結果¹⁸⁾では,防護柵の吸収したエネルギーの50%を主要横梁,40%を下段横梁,10%を支柱が吸収しており,本研究と同様に横梁が主にエネルギーを吸収する役割をしている。したがって,オフセット型の橋梁用ビーム型防護柵は,アルミニウム合金および鋼を問わずにエネルギー吸収は主に横梁で行われるものと考えられる。

7. 結論

本研究では,防護柵に使用されるアルミニウム合金の引張試験により,アルミニウム合金材料のひずみ速度効果を確認し,新たにひずみ速度効果を定式化した。また,実車衝突実験の行われたアルミニウム合金製車両用防護柵を対象に様々な衝突条件についての解析シミュレーションを行った。

本研究で得られた主な検討結果を以下に示す。

- 1) アルミニウム合金の引張試験を様々なひずみ速度で行い、アルミニウム合金のひずみ速度効果を明らかにした。この結果、アルミニウム合金はひずみ速度 $\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^0(1/s)$ となる場合においても、0.2%オフセット耐力で3%程度、引張強度で2%程度の影響しかない。
- 2) ひずみ速度を考慮したアルミニウム合金の引張試験によってひずみ速度効果を有する材料定数には、耐力、引張強度があり、ヤング率、ポアソン比、伸び、しぼりにはひずみ速度効果が無いことを明らかにした。
- 3) ひずみ速度効果を考慮する場合と考慮しない場合の実車衝突解析を行い結果を比較することで、アルミニウム合金製防護柵への実車衝突挙動においてひずみ速度の影響はごく微小でほとんど考慮する必要のないことを明らかにした。
- 4) 実車衝突実験が行われたアルミニウム合金製車両用防護柵の3次元モデルを作成し、実車衝突実験結果と解析シミュレーション結果を比較検討することによりモデルの整合性を明らかにした。
- 5) 旧S種防護柵に相当する今回のモデルを用いて、様々な衝突条件での解析を行うことにより、車両質量14t、衝突速度80km/hに対応して設計された旧S種防護柵

が1.8倍程度のエネルギーを有する車両質量25t、衝突速度80km/hでの衝突に対しての余剰性能も有することを示した。

- 6) 実車衝突実験では困難なパラメトリックな検討を行い、実車衝突実験を補完するモ解析デルとしてほぼ満足するものを作成した。
- 7) 橋梁用鋼製防護柵の場合と同様にアルミニウム合金製防護柵の場合も、防護柵が吸収するエネルギーの約9割を横梁が吸収していることを明らかにした。

謝辞

引張試験に用いた試験片の製作に際しては、日本軽金属株式会社に御協力を頂いた。実車衝突実験に関する情報の提供は建設省土木研究所安藤和彦氏に御協力を頂いた。また、本研究の一部は、平成11年度文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)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：防護柵設置要綱・同解説，丸善，1972。
- 2) NCHRP Report 350 Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features : National Cooperative Highway Research Program , NATIONAL ACADEMY PRESS, 1993.
- 3) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，丸善，1999。
- 4) 日本道路協会：防護柵設置要綱・資料集（橋梁用防護柵・耐雪用防護柵），丸善，1986。
- 5) 建築省土木研究所，日本アルミニウム協会：アルミニウム合金製橋梁用車両防護柵の設計手法に関する共同研究報告書，1999。
- 6) 建築省土木研究所，軽金属協会：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，1990。
- 7) 建築省土木研究所，軽金属協会：アルミニウム合金製高欄型自動車用防護柵に関する研究報告書—確認と実験—，1980。
- 8) 建築省土木研究所，軽金属協会：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，1999。
- 9) 谷村眞治，三村耕治，朱文輝，楳田努：広いひずみ速度域を対象とし，各種材料グループに適用し得る実用構成式について，第6回材料の衝撃問題シンポジウム，1999。
- 10) 軽金属協会：アルミニウム合金構造設計便覧，1975。
- 11) 住友軽金属工業株式会社：アルミニウムハンドブック，1971。
- 12) 土木学会：材料特性の数値モデル入門〜構成則主要用

語解説集〜，構造工学シリーズ4，p.119。

- 13) 谷村眞治，三村耕治，朱文輝，楳田努：検力ブロック式高速材料試験機および衝撃座屈試験機について，日本材料学会，第6回材料の衝撃問題シンポジウム，1999。
- 14) 谷村眞治：材料の高速変形と構成式：日本金属学会会報，第29巻第5号，pp.337-343，1990。
- 15) 東健司，向井敏司，海津浩一，土田信，谷村眞治：実用アルミニウム合金の高速変形特性，材料，第39巻第447号，pp.5-10，1990。
- 16) 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。
- 17) Design and Analysis of Approach Terminal Sections Using Simulation , Journal of Transportation Engineering /September /October, pp.399-405, 1996.
- 18) 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，pp.1725-1736，1998。
- 19) 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。
- 20) 軽金属協会：アルミニウム材料の基礎と工業技術，1985。
- 21) アルミニウム加工技術便覧編集委員会：アルミニウム加工技術便覧，1970。

2000年9月14日受付