

## アルミニウム合金製橋梁用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 BRIDGE FENCES

杉江昌宣\*, 伊藤義人\*\*, 宇佐見康一\*\*\*, 貝沼重信\*\*\*\*  
Sugie Masanobu, Yoshito Itoh, Sigenobu Kainuma and Koichi Usami

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

\*\*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)

\*\*\*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)

\*\*\*\*工博, 名古屋大学助手, 工学研究科, 土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

キーワード: アルミニウム合金, 橋梁用防護柵, 車両衝突  
(aluminum, guard fences, vehicle collision impact)

## 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, 防護柵のビーム, 支柱などの幅, 高さ, 厚さなどの構造緒元などの仕様を規定している仕様規定であった<sup>1)</sup>。しかし, 平成11年4月より設置される防護柵に対して適用される防護柵設置の基準では, 衝突車両の逸脱防止性能, 衝突車両の乗員の安全性能, 衝突車両の誘導性能, 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<sup>2)</sup>。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<sup>3,4)</sup>, 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り, 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容易に使用できるようになった。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。

伸びが悪い, 強度が低いなどのマイナスイメージの強い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が行われて以来<sup>5)</sup>, その美観, 軽量化, 耐食性から日本各地で採用され, 東京湾などでもレインボーブリッジに採用されている。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<sup>6)</sup>。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・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が期待される。

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を対象に引張実験を行う。この実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<sup>7)</sup>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し, 実車衝突実験の解析シミュレーションに適用し, 実験結果と比較を行う。

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」<sup>8)</sup>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種々の検討を行い, 解析結果を実験結果と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, 実験よりも厳しい衝突条件での解析を行うことにより, この防護柵について余剰性能も検討する。

なお, 本研究における実験には動的能力±500kNの電気油圧サーボ式材料実験機(MTS社製, 最大変位速度49mm/s)とMTS test star IIを, 解析には汎用衝撃応答解析プログラムLS-DYNAを用いた。

## 2. アルミニウム合金引張実験

## 2.1 アルミニウム合金A6061S-T6の特長

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く, 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<sup>9)</sup>。

A6061S-T6はAl-Mg-Si系合金に分類される。このAl-Mg-Si系合金についての特長を以下に挙げる<sup>9)</sup>。

## 1) 軽量

鉄の単位体積重量が7.85 (gf/cm<sup>3</sup>)であるのに対し, アルミニウム合金の単位体積重量は2.7 (gf/cm<sup>3</sup>)であり, 鉄のおよそ1/3である。したがって, 構造物, 運搬具, 車両および船舶などの軽量化に役立つ。

## 2) 耐久性

通常環境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不要である。

### 3) 加工性

切断、成形、あるいは溶接などの加工を自由に行うことができ、形状豊かで細かな表現ができる。

### 4) 用途を拓げる表面処理

すぐれた金属光沢を保持するが、用途によって耐候性や耐摩耗性のよい陽極酸化処理を施し、また種々の色調を与えることができる。

### 5) 使いやすい強度

引張強さが 70~590 (MPa) と、合金の種類や質別によってかわり、用途に応じて適切なものを選べる。

### 6) 衝撃吸収性

ヤング率が鋼材の  $2.06 \times 10^2$  (GPa) に対し、約 3 分の 1 の 68.6 (GPa) であり、衝撃を吸収する働きが良い。

### 7) 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、その応力-ひずみ関係は静的負荷時のものと大きく異なるひずみ速度効果という現象が知られている。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はひずみ速度効果はあまりよく知られていない。

そこで、これら金属材料のひずみ速度効果を明らかにするべく、大阪府立大学の谷村らによって、広範囲の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(2)が提案された<sup>8)</sup>。

$$\sigma = \sigma_s + (\alpha \epsilon^p + \beta) \left(1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_{CR}}\right) \ln(\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_s) + B(\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_s)^m \quad (2)$$

ここに、 $\sigma$  : 動的応力(MPa)

$\sigma_s$  : 準静的降伏応力(MPa)

$\dot{\epsilon}_s$  : 準静的ひずみ速度(1/s)

$\epsilon^p$  : 動的ひずみ速度(1/s)

$\alpha, \beta, \sigma_{CR}$  は材料定数

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(2)との比較検討を行う。

## 2.3 引張実験結果

実験から得られたひずみ速度-耐力の動的応答倍率の関係を図2-1に、ひずみ速度-引張強度の動的応答倍率の関係を図2-2に、静的条件下での応力-ひずみ曲線を図2-3に示す。耐力はそれぞれ伸び計から算出された応力-ひずみ曲線から0.2%オフセットにより求めた。また、準静的ひずみ速度は、応力が耐力の値と等しくなった時点の実ひずみ速度とし、そのひずみ速度下での応力を準静的応

力とした。

この結果より、ひずみ速度  $10^0$  (1/s) において耐力のひずみ速度効果はたかだか 2%、引張強度のひずみ速度効果も 2%程度しかないことがわかった。引張強度の動的応答倍率では構成式の傾きが 0.0033 となり回帰曲線と若干異なるが、耐力の動的応答倍率ではほぼ一致を示した。ヤング率、ポアソン比、伸び、しぼりについては、ほとんどひずみ速度効果は見られなかった。

また、破断は図2-4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。

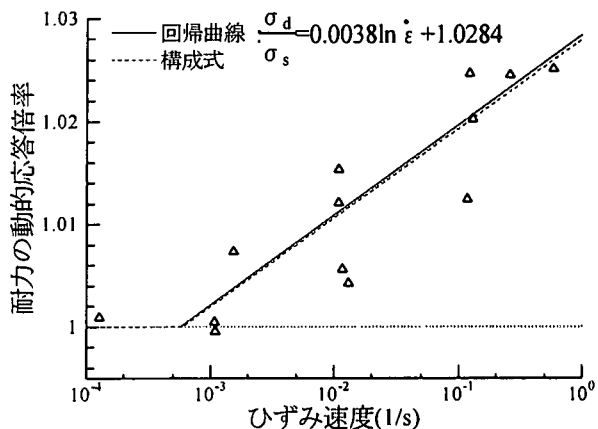


図2-1 耐力のひずみ速度効果

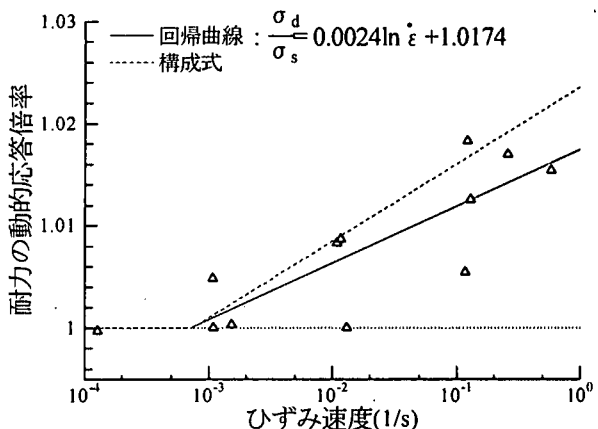


図2-2 引張強度のひずみ速度効果

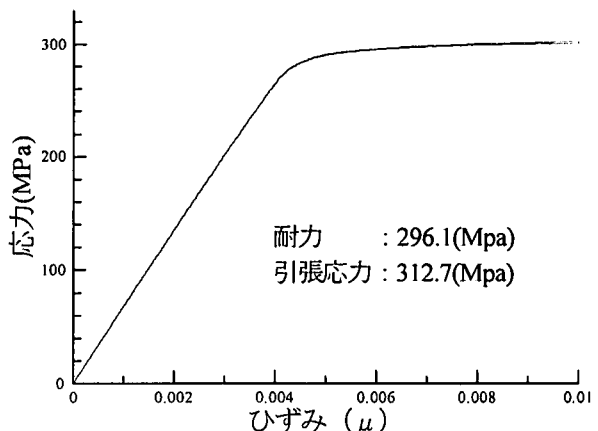
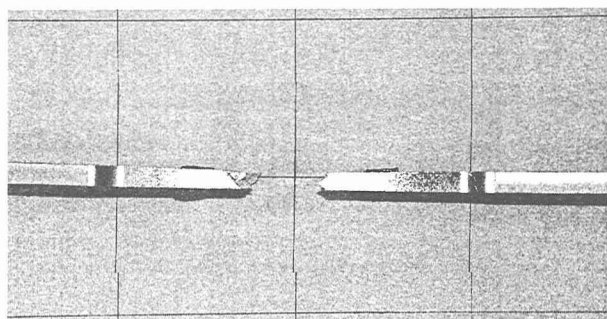
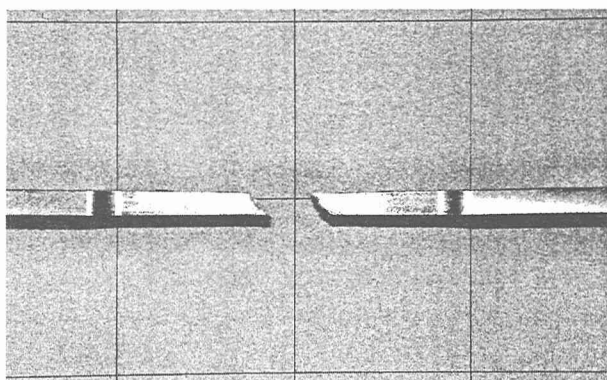


図2-3 静的応力-ひずみ曲線



(a) 破断の形状1



(b) 破断の形状2

図 3-4 破断の形状

にモデル化した。なお、25tf 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。

積載物については solid 要素を用いてモデル化し、荷台内部に配置されている。積分点は面内 1 点、断面内 2 点となっており、要素数は 3904、接点数 3532 となっている。

### 3.2 防護柵モデル

「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」<sup>9)</sup>で実車衝突実験が報告されている橋梁用角ビーム型防護柵について、2 種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 種の防護柵モデルを用意した。これらの解析モデルを表 3-1 に示す。これらの防護柵モデルは全部材がアルミニウム合金 A6061S-T6 から成っており、それぞれをシェル要素でモデル化し、コンクリート地覆については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。また、支柱は車両進行方向に向かって順に 01 から 16 までの番号を付けた。

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<sup>12)</sup>のほか、アルミニウム加工技術便覧<sup>13)</sup>や報告書<sup>9)</sup>に記載されている耐力その他定数などを参考に作成した応力-ひずみ曲線を適用した。耐力は 264.6(MPa)、引張強度は 297.9(MPa)、ヤング率は 68.6(GPa)となっている。

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、車両重量 14tf、衝突速度 80km/h、衝突角度 15 度とした。この衝突条件は、旧要綱の最上級種別 S 種防護柵で、新基準では種別 SB 種防護柵に相当する衝突条件である。

### 3. 実車衝突実験の解析シミュレーション

一般的に、本研究で取り扱っているような道路構造物の車両衝突問題の場合、車両構造だけでなく防護柵構造によっても衝突挙動が大きく異なってくると考えられるため、実車両および実構造物を忠実にモデル化する必要がある。しかし、現在供用されている防護柵構造は、ビーム型防護柵、ケーブル型防護柵および剛性防護柵といったタイプ別や、縦断線形や横断線形、埋め込み方式の違いなどにより、その防護柵構造は多様に分類される。

そこで本研究では、まず、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<sup>9)</sup>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。衝突条件は、車両重量 14tf、衝突速度 80km/h、衝突角度は 15 度である。

#### 3.1 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、精密な車両モデルの外部からの入手は困難であり、有限要素モデルを用いた研究例はわずかである。そこで、本研究では、1998 年に名古屋大学で独自に作られたトラックモデルを使用する<sup>10,11)</sup>。

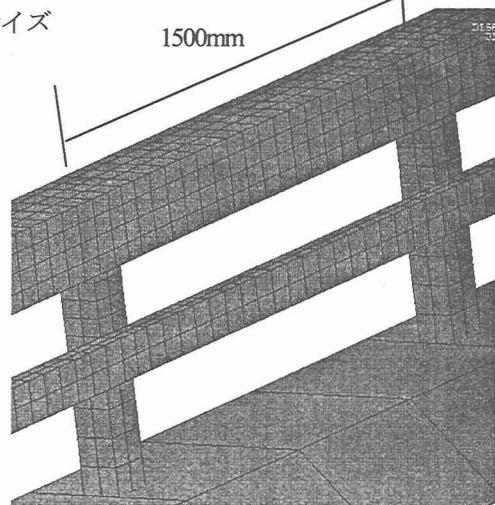
大型貨物車両が防護柵に衝突する際、衝突現象に直接影響する車両の主要部品は、車体、サスペンション、タイヤ、積荷などである。そこで、車両モデルは車両総重量 (GVW) 14tf の大型トラックを対象として、フレーム、エンジン、運転室、荷室、車輪など主要部品を中心

表 3-1 解析モデル

解析名	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-a	あり
AB-14-80-c	size-b	なし

メッシュサイズ

(a) size-a



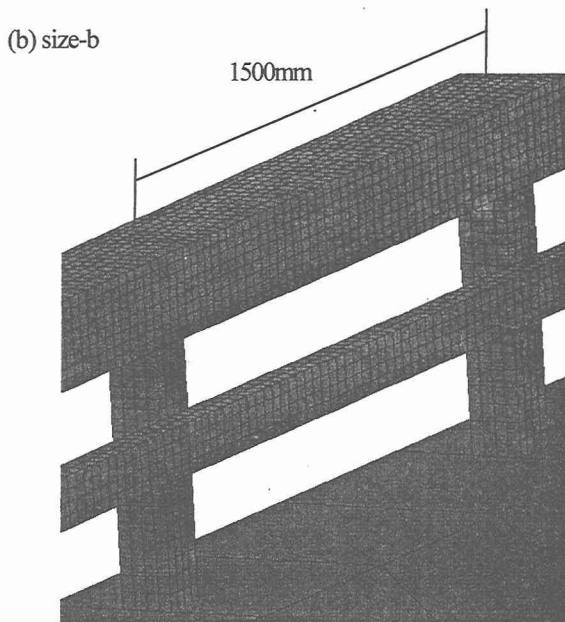


図3-2 防護柵モデルのメッシュサイズ

主要横梁の最小メッシュサイズ  
 size-a) 69.0mm×45.3mm  
 size-b) 34.5mm×22.7mm

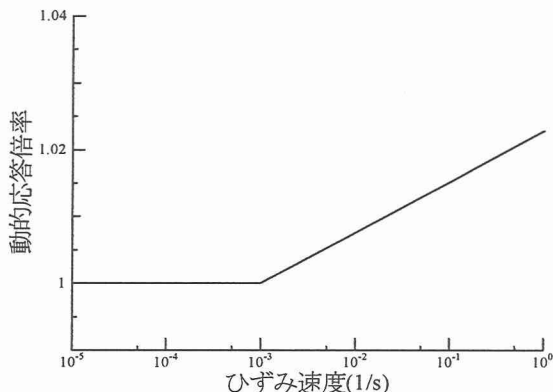


図3-3 ひずみ速度 - 動的応答倍率

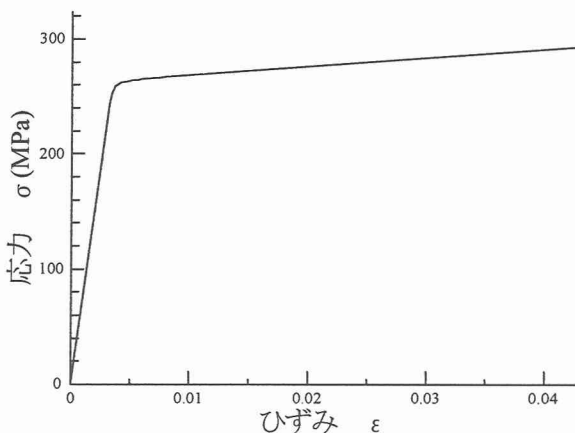


図3-4 応力 - ひずみ曲線

### 3.3 メッシュサイズの比較

解析ではメッシュサイズを細かくすることによりその結果が正確に出力されることが確認されている。そこで、AB-14-80-a と AB-14-80-c の解析結果を比較検討する。

衝突時の車両の挙動については両結果でよい一致を示した。変形は支柱06~08の横梁のみで確認された。変形は両方とも小さいが、メッシュサイズの細かい AB-14-80-c のほうが詳細な変形が出ている。

図3-5に支柱08についての変位時刻歴を他の解析、実験結果とともに示す。この変位時刻歴についても AB-14-80-a と AB-14-80-c とでほとんど差は見られなかった。最大変位量について比較すると両解析結果とも47mmとなっており、メッシュサイズの分割はsize-aを適用しても結果に支障はないが、防護柵の変形モードをより正確に求めたい時にはsize-bを適用したほうがよいと言える。

### 3.4 ひずみ速度効果の影響

引張試験で求めたひずみ速度効果を考慮した AB-14-80-b と考慮していない AB-14-80-a の2つの解析を比較し、ひずみ速度効果が結果にどれほどの影響を及ぼすかを確認した。

車両の挙動や支柱の変位時刻歴を比較するかぎりほとんど違いは認められず、防護柵の変形の位置、形、大きさのいずれにおいてもあまり差が見られなかった。また、最大変位量は両方ともに47mmとなっており、解析結果に差はほとんど生じないことがわかった。

この結果より、ひずみ速度効果による影響はごく微小で、アルミニウム合金製防護柵では考慮する必要のないものであるという結論を得た。このことから、以後の解析はひずみ速度効果を考慮しないモデルで行った。

### 3.5 実車衝突実験結果との比較

実車衝突実験結果と AB-14-80-a の解析結果について比較検討を行う。

防護柵の最大変位量はいずれも支柱08で計測され、実験結果で55mm、AB-14-80-aの解析結果で47mmとなった。また、残留変位を比較すると、AB-14-80-aでは支柱06で24mm、支柱08で25mm、支柱10で10mmとなっており、若干大きめの値となった。

支柱の変位時刻歴について比較を行うと、最大変位を示す時間が実験で衝突後0.23秒であるのに対し、解析結果では衝突後0.52秒となり時間的な差を生じた。防護柵の変形モードを比較すると、実験では支柱05~06の横梁に大きな変形がみられるが、解析結果ではそれと同等の大きさの変形は支柱06以前には認められない。

実車衝突実験をモデル化した AB-14-80-a は上記のように細かな違いはあるが、最大変位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。

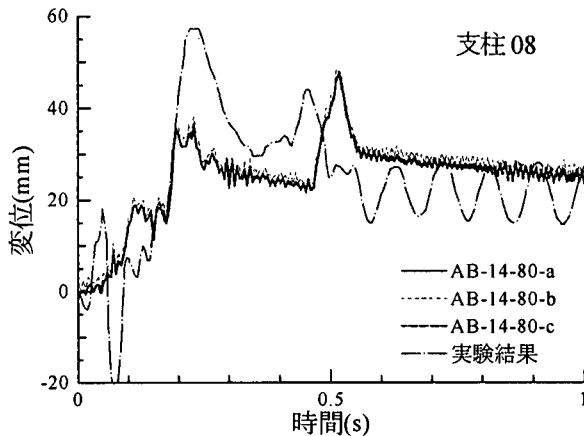


図 3-5 支柱 08 の変位時刻歴

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。

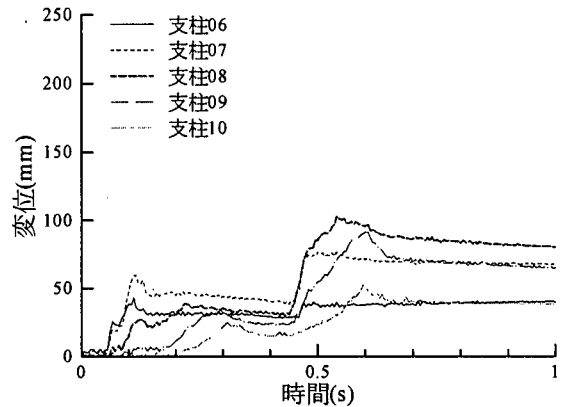


図 5-1 支柱の変位時刻歴

#### 4. アルミニウム合金製防護柵の余剰性能の検討

この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。この防護柵の静荷重試験の結果を新基準の橋梁用ビーム型防護柵の部材選定領域上にプロットすると、プロット点は SB 種の領域内に位置する。したがって、今回扱う旧要綱 S 種防護柵は新基準では SB 種に相当するものである。

この防護柵モデルに対して、車両重量 25t、衝突速度 80km/h の衝突条件となる解析と、車両重量 25t、衝突速度 100km/h となる衝突条件の解析を行い、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。

解析で使用する防護柵モデルは、衝突後の変形モードをより正確に求めるために前章で取り扱った解析名 AB-14-80-c の防護柵を適用した。支柱の変位時刻歴は、車両衝突に強く関係する支柱 06～10 までのすべての支柱において求めた。

##### 4.1 AB-25-80 の解析結果

支柱 06～10 の変位時刻歴を図 4-1 に示す。

車両の挙動は AB-14-80-a などと比較してもあまり変わらず、乗り越えや転倒などはなく、衝突後の防護柵も目立った変形はなかった。また、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た。残留変位についても、支柱 06 で 40mm、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。

この結果より、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重量 14t、車両速度 80km/h よりもエネルギーの大きい車両重量 25t、車両速度 80km/h の衝突に耐えることができたと言える。

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

##### 4.2 AB-25-100 の解析結果

支柱 06～10 の変位時刻歴を図 4-2 に示す。

最大変位量は支柱 09 の 202mm、残留変位は支柱 06 で 65mm、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すことが分かった。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わかった。しかし、車両の挙動を見ると、衝突後にはかなり傾斜しており、防護柵にもたれかかっている。解析は 1 秒までしか行っていないが、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ことがわかった。

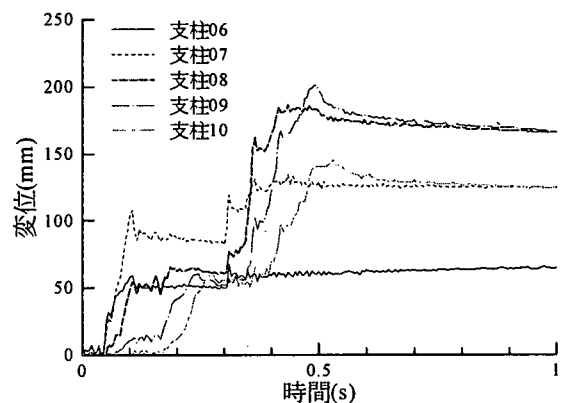


図 4-2 支柱の変位時刻歴

#### 5. 結論

本研究では、アルミニウム合金引張実験により谷村らの提案したひずみ速度効果に用いる実用構成式の整合性を確認し、求めたひずみ速度効果を用いて、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。

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) アルミニウム合金の引張実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 1.0(1/s)となる載荷に対しても硬化が 2%程度しかないことがわかった。
- 2) アルミニウム合金のひずみ速度効果は、材料の耐力においてひずみ速度 1.0(1/s)載荷時に硬化が 2%程度であり、防護柵への影響はごく微小で考慮する必要のないものであることがわかった。
- 3) 旧 S 種防護柵モデルを用いて、様々な衝突条件での解析を行うことにより、車両重量 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重量 25t、衝突速度 80km/h での衝突に対しての余剰性能を有することを示した。
- 4) 車両重量 25t、衝突速度 100km/h の衝突に対しても、最大変位は規定値より小さくなることを示し、突破されることがないことを明らかにした。今回扱ったタイプの橋梁用 S 種防護柵は新基準においても、早急に取り替える必要はないことが分かった。

#### 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) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，丸善，1999。
- 3) 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，p.312，1994。
- 4) 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，p.98，1999。
- 5) 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。
- 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，1999。
- 7) 谷村眞治，三村耕治，朱文輝，榎田努：広いひずみ速度域を対象とし，各種材慮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。
- 8) 軽金属協会：アルミニウム合金構造設計便覧，1975
- 9) 住友軽金属工業株式会社：アルミニウムハンドブック，1971。
- 10) 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，pp.47-58，1996。
- 11) 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。
- 12) 軽金属協会：アルミニウム材料の基礎と工業技術，1985。
- 13) 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。
- 14) 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。
- 15) 青木博文，加藤勉，難波恒夫，佐藤亘宏：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.11-19，1982。
- 16) 岩井哲，吉田望，中村武，若林賽：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，第 314 号，pp.102-111，1982。
- 17) 加藤勉，青木博文：鋼の機械的性質に及ぼす歪速度の影響，日本建築学会論文報告集，号外，p.469，1967。
- 18) 谷村眞治，三村耕治，朱文輝，榎田努：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。
- 19) 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。
- 20) 若林賽，中村武，吉田望，岩田哲，渡辺幸広：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究（その 1）—鋼ばりの曲げモーメント-曲率関係一，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.1043-1044，1979。
- 21) 若林賽，中村武，吉田望，岩田哲，渡辺幸広：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究（その 2）日本建築学会大会学術講演概要集，pp.1821-1822，1980。
- 22) 若林賽，中村武，吉田望，岩田哲，渡辺幸広：構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究（その 3）日本建築学会大会学術講演概要集，pp.1761-1762，1981。
- 23) 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，日本自動車研究所，Vol.18-3，pp.88-91，1996。
- 24) 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。
- 25) 日本規格協会(1999)：JIS ハンドブック 2 非鉄，p.966。
- 26) 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.97036，1997。  
<http://www.jari.or.jp/ja/3seika/sokuho/97036/97036.html>。
- 27) 日野自動車工業株式会社(1997)：トラックカタログ。