

橋梁用ビーム型鋼製防護柵の性能および設計方法に関する考察

STUDY ON PERFORMANCES AND THE DESIGN OF BRIDGE STEEL GUARDFENCE

宇佐見康一*, 伊藤義人**

Koichi Usami, Yoshito Itoh and Kazuhiko Ando

*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)

キーワード: 橋梁用防護柵, 車両衝突, 性能

(bridge guard fences, vehicle collision impact, performance)

1. はじめに

平成5年11月の道路構造令および車両制限令の変更により, 車両重量の制限が20tfから25tfに引き上げられた。これに伴い, 道路交通の高速化や車両の大型化・高重心化が進み, 車両用防護柵に対しても安全性を増した設計が強く要望されている。

さらに, 地域特性や景観への配慮など, 防護柵の形式や構造に関する要望も多様化しており, これらの背景を踏まえて, 防護柵設置要綱¹⁾の改訂が実施され, 新たに防護柵の設置基準²⁾が平成10年11月5日に各道路管理者に通知された。そして, 平成11年4月からは, 新基準に従って防護柵が設置されることとなった。旧防護柵設置要綱からの主な改訂点は以下の通りである。

- i) 種別の分化・拡充
- ii) 被害程度に応じた種別適用区間の規定
- iii) 仕様規定から性能規定への変更
- iv) 橋梁用ビーム型防護柵の設計手法の確立

車両衝突時における防護柵の変位や車両の離脱角, 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, 防護柵を設計するためには, 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なければならない。

これまでに, 実車衝突実験は建設省土木研究所などで多数行われている^{3,4)}。しかし, 実車衝突実験はコストや基礎条件などの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。日本国内では, 日本自動車研究所などで防護柵のシミュレーションモデルの開発がされている^{7,8)}。

また, 米国においても NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) から道路上の安全施設の性能評価や実験方法などの基準が提案されており⁹⁾, これに基づいた実験や数値解析シミュレーションなどの研究が行われている。例えば, 防護柵の端部の危険性を軽減さ

せるための研究として, 端部処理や, クラッシュクッションに関する数値解析シミュレーションなどである^{10,11)}。

本研究では, 橋梁ビーム型鋼製防護柵に対して, LS-DYNA を用いて大型トラックの実車衝突実験の衝突シミュレーションを行い, 衝突応答解析による性能評価の可能性を検討した。衝突応答解析ではさらに, 実車衝突実験より厳しい衝突条件での解析を行い, 橋梁用防護柵の設計方法について考察した。

2. 防護柵の設置基準

2.1 仕様規定から性能規定への変更

新基準では, 防護柵の仕様を規定するのではなく, 防護柵の有すべき性能が規定されることとなった。これによって, 定められた性能を有してさえいれば, 自由な形状の防護柵を設置することが可能となった。そのため技術開発の成果も取り入れることが容易となり, 景観への配慮がされた防護柵の設計も可能となった。

具体的な性能規定は, 以下の i), ii), iii), iv) のようなものである。これらの性能確認は道路管理者が実車衝突試験により行うこととなっている。

- i) 逸脱防止性能 (強度性能, 変形性能)
種別に応じた衝撃度による衝突で, 防護柵が突破されないこと。衝突時の車両の最大進入行程が, 種別に応じて規定値以下であること。
- ii) 乗員の安全性能
衝突で車両の受ける衝突加速度(瞬間値)が, 衝突速度の区分別に評価基準値未満であること。ただし, 衝突条件は, 車両重量 1tf, 衝突角度 20 度であり, 加速度は車両の重心位置で測定する。
- iii) 車両の誘導性能
衝突後, 車両は横転などをせず, 車両の離脱速度, 離脱角度が規定値を満たすこと。
- iv) 構成部材の飛散防止性能
衝突時に防護柵の構成部材が大きく飛散しないこと。

ただし、例外として、ブロックアウト型構造の橋梁用ビーム型防護柵は静荷重試験により部材の強度を確認することで実車衝突試験を行わずに防護柵を設置することができる設計手法が提示されている。

2.2 橋梁用ビーム型防護柵の設計手法の確立

橋梁用車両防護柵は、一般道の車両防護柵と同様の機能を有すると同時に、景観の配慮から一般道の防護柵とは異なるデザインが施されている場合が多い。

このような理由から、以前から提案されていたのが橋梁ビーム型防護柵の設計手法である。橋梁用ビーム型防護柵の設計法に従えば、以下のi)～viii)の項目を検討することにより、コストのかかる実車衝突試験を行わずに、防護柵の設計を行うことができる。

- i) 部材選定グラフ
- ii) 静荷重試験
- iv) 横梁の最小強度
- v) ブロックアウト量
- vi) 高さの規定
- vii) 継手部の引張力の規定
- viii) 支持構造の設計

ただし、この場合も最上級種別であるSS種防護柵は、実車衝突試験によって性能を確認する必要があるとされている。

3. 数値解析による車両衝突シミュレーション

3.1 解析対象実験

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。

文献12)では、建設省土木研究所により報告されているブロックアウト型構造の橋梁用高欄型防護柵への実車衝突実験³⁾を衝突シミュレーションの対象として、解析モデルの妥当性の検討が行われている。実験の衝突速度は80km/h、衝突角度は15度である。本研究では、この解析モデルを用いて、橋梁用ビーム型防護柵の性能に関する検討を行う。

3.2 橋梁用ビーム型防護柵モデル

橋梁用ビーム型防護柵の有限要素モデルを図-1,2に、モデルの諸元を表-1に示す。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、主要横梁は管径165mmで板厚7mm、下段横梁は管径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 Belytschko-Tsay 要素、コンクリート地覆については、1点積分 solid 要素を用いた。解析モデルのメッシュ分割方法は、支柱についてはウェブおよびフランジ共に4分割、横梁で使用している鋼管については断面16分割を基本とした¹²⁾。

解析モデルの境界条件は、コンクリート地覆の部分を

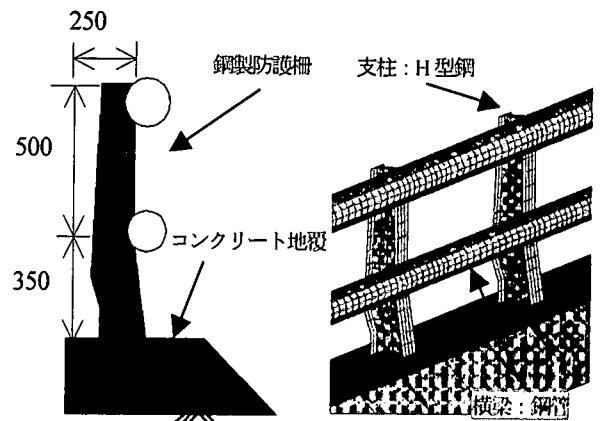


図-1 防護柵側面図

図-2 防護柵立体図

表1 防護柵モデルの諸元

| 防護柵タイプ | 橋梁用ビーム型防護柵 |
|--------|---|
| 節点数 | 10404 |
| 要素数 | 9621 |
| 要素タイプ | 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 |

完全固定とし、横梁の端部については実車衝突実験で使用された防護柵に合わせ自由端とした。橋梁用ビーム型防護柵の設計手法では、静荷重試験において部材の最大支持力を求める事となっており、支柱基礎部分の強度は、この最大支持力にて照査されることとなっている。そして、土木研究所の実験でも支柱基礎部分の破損がなかった事から、今回扱うタイプの支柱基礎部分は、コンクリート地覆と剛結とした。

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、文献12,13)による衝撃解析に関する研究成果をもとに文献14)を参考にして、ひずみ硬化および、ひずみ速度効果を考慮した。降伏点応力は部材の鋼種が SS400 であるので、JIS 要覧に基づいて 235MPa とした。防護柵下部のコンクリート地覆部分についても、直接衝突しないため文献15)によって示されたひずみ速度効果を考慮していないモデルを用い、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、ヤング率とポアソン比はそれぞれ 24.365GPa と 0.165 を用いている。

3.3 トラックモデル

トラックモデルは、カタログ等を参照して本研究室で独自に作成したものを用いた。また、車両総重量 25tf の車両と、14tf 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、荷

台積載重量を変えることで対処した。

3.5 解析内容

本研究で用いている防護柵は、新基準の設計方法にあてはめるとSB種に該当することとなる。そこで設計条件以上のSA、SS種防護柵の衝突条件である、車両重量25tf、衝突速度80km/h、100km/hの解析を行うこととし、旧要綱の最上級種別S種防護柵(14tf、80km/h対応)が新基準で規定されている衝突条件に対して、どの程度の余剰性能を有するかを検討する。

本研究で数値解析によって検討を行う衝突条件は表-2に示す通りである。なお、BF-14-80とは前述した土木研究所の実験と同様の衝突条件であり、文献12)で行われた解析である。

表-2 解析内容

| 解析タイプ | 車両重量 (tf) | 衝突速度 (km/h) | 衝突角度 (°) | 衝撃度 (kJ) |
|-----------|-----------|-------------|----------|----------|
| BF-14-80 | 14 | 80 | 15 | 232 |
| BF-25-80 | 25 | 80 | 15 | 414 |
| BF-25-100 | 25 | 100 | 15 | 646 |

4. 橋梁用ビーム型防護柵の余剰性能の検討

4.1 解析結果

a) BF-14-80の解析結果

文献12)で行われたBF-14-80の解析結果の車両の挙動と実験との比較を図-3に示す。車両前端部が防護柵に接触し、ほぼ同時に前輪が地覆に乗り上げ、防護柵に衝突した。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。防護柵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。また、図-6に示すように解析結果を実験値と比較すると、支柱頂部

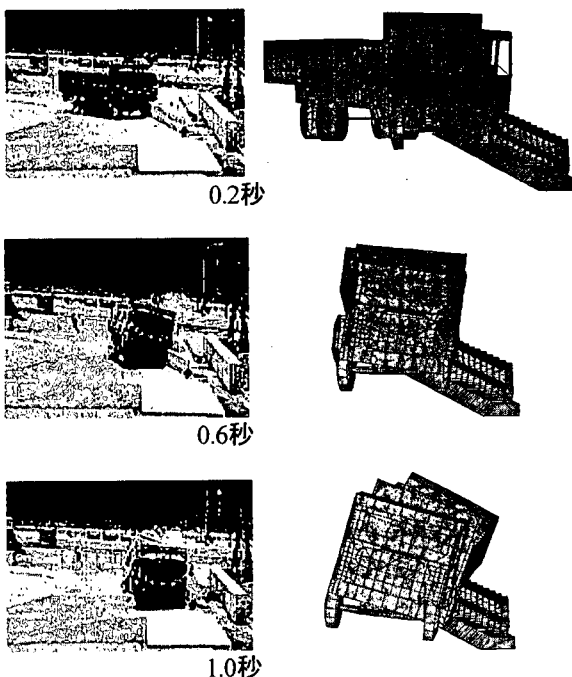


図-3 車両の挙動

の最大変位量および残留変位量ともに良い一致を示している。

b) BF-25-80の解析結果

解析結果の支柱頂部の柵外方向への応答変位を図-5に示す。応答変位が最大となる支柱は支柱11である。また、BF-14-80の場合は、図-6に示すように応答変位が最大となる支柱は支柱10となる。このように、衝突速度が同じであるにもかかわらず、車両重量の異なると、両応答変位が最大となる支柱が異なる。これは、BF-14-80の場合よりBF-25-80の場合の方が、防護柵の変形が大きい

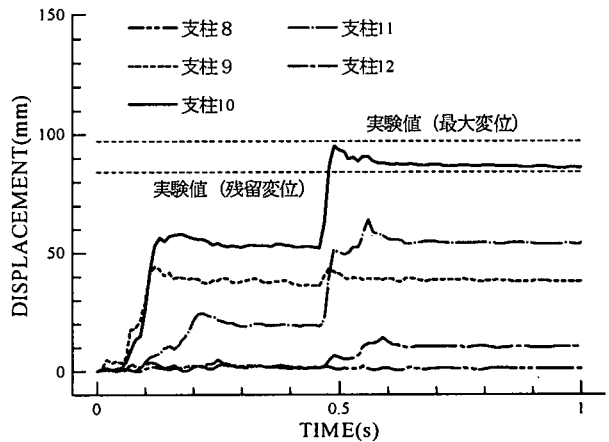


図-4 BF-14-80の支柱頂部の面外変形量

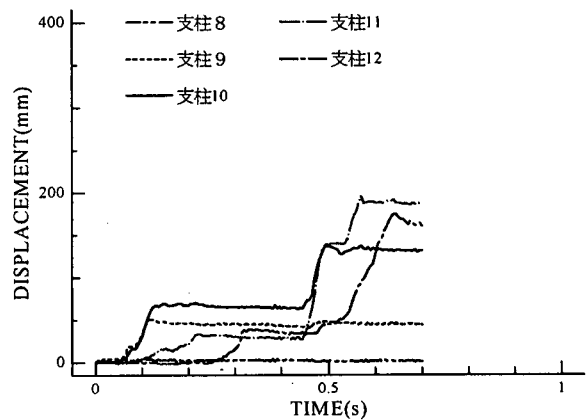


図-5 BF-25-80の支柱頂部の面外変形量

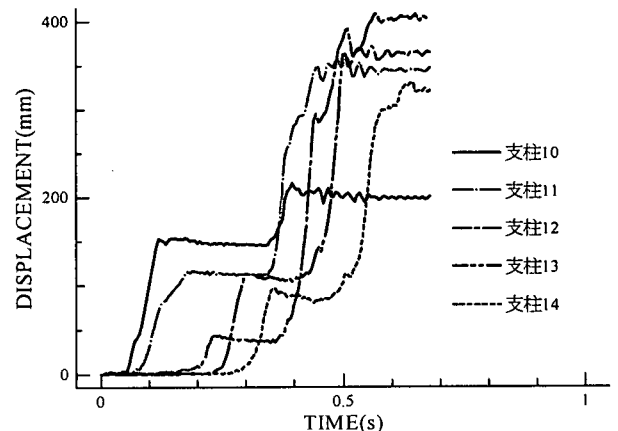


図-6 BF-25-100の支柱頂部の面外変形量

ことや、防護柵の車両前部との接触区間が大きいことなどが原因で、車両の挙動が異なり、後輪の衝突位置がBF-14-80よりも前方にずれたためであると考えられる。

最大変位が最も大きくなったのは、支柱11の200mm、主要横梁11の235mm、下段横梁10の196mmとなっており、防護柵の変位は現行の設置基準に規定されている300mm以内に収まっている。

c) BF-25-100の解析結果

BF-25-100の解析結果の支柱頂部の柵外方向への応答変位を図-6に示す。車両重量および衝突速度ともに最も大きいBF-25-100では、車両後部は衝突時にはかなり傾斜しており、防護柵にもたれかかってしまうような挙動を示している。

しかし、図-6に示すように、変位はBF-14-80、BF-25-80と同様に0.1秒前後と0.5秒前後で二段階に分かれて、その後は変位が収束している。したがって、車両重量25tf、衝突速度100km/hの場合においても、防護柵は車両に突破されることはないと考えられる。

最大変位が最も大きくなったのは、支柱13の401mm、主要横梁12の470mm、下段横梁11の370mmとなっており、防護柵の変位は現行の設置基準に規定されている300mmを上回っている。今回の解析では支柱基部がコンクリート地覆と剛結されているためコンクリート地覆の損傷は見られなかった。しかし、橋梁用ビーム型防護柵の設計方法では支柱の最大変位が300mmまでしか想定されていないので、実際にはコンクリート地覆が損傷してしまう可能性があると考えられる。

また、防護柵は車両に突破されてはいないが、横梁の変位が大きく車両が支柱に接触してしまいスムーズな移動が妨げられる可能性も考えられる。

4.3 現行防護柵の余剰性能

BF-25-80では、防護柵の最大応答変位が235mmとなり、防護柵の設置基準における車両の最大進入行程である300mm以内となった。また、横梁の変形も、今回扱った旧要綱橋梁用S種防護柵は設計条件である14tf車両の80km/hの衝突よりもエネルギーの大きい25tf車両の80km/hの衝突に耐えることができると言える。

また、表-6に示したようにどの衝突条件においても、離脱速度、離脱角度が規定値以内に収まっている。橋梁用ビーム型防護柵は、設計時の衝突条件において最大変位量が300mm以下と、他の防護柵に比べて小さくなるように設計されているので、設定想定値を超えるような衝突条件に対しても、車両の進行を大きく妨げるほどの変位は発生せず、車両の誘導性能に優れていると言える。

したがって、今回扱ったタイプの橋梁用ビーム型防護柵は、十分な余剰性能を有しており、新基準において種別SA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分かった。

表-3 車両の離脱速度と離脱角度

| 解析名 | 衝突速度 (km/h) | 離脱速度 (km/h) | 離脱角度 (°) |
|-----------|----------------|----------------|-------------|
| BF-14-80 | 80 | 70.3 | 4.8 |
| BF-25-80 | 80 | 70.5 | 5.0 |
| BF-25-100 | 100 | 86.7 | 8.2 |

4.4 設計方法と解析結果

橋梁用ビーム型防護柵においては、部材強度等を静荷重試験によって確認している。また、支柱基部とコンクリート地覆との定着部分の設計を、静荷重試験結果の最大強度に耐え得るもとするように規定されている。

図-7に静荷重試験結果および解析結果の支柱頂部と支柱基部の反力の関係を示す。動的解析結果の反力は静荷重試験よりも大きな値を示している。この原因としては、i) ひずみ速度効果、ii) 定着部分のモデル化が不十分であること、iii) 連成構造物であるため横梁から力が作用していることなどが考えられる。

i), ii)については、反力が大きくなる要因にはなりうるが、反力が2倍以上になるほどの大きな要因であるとは考えにくい。そこでiii)について横梁が定着部分にどのような力が作用させているかを解明することが、今後の大きな課題である。現在の設計方法では、これらの影響が考慮されておらず、前述したようにコンクリート地覆を除いた防護柵の鋼製部分はかなりの余剰性能を持っている。従って、基部の定着部もそれに見合った強度に設計すればさらに高性能な防護柵を設計できるものと考えられる。

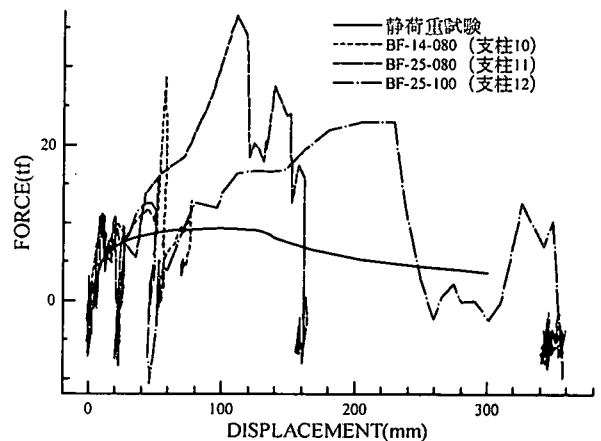


図-7 支柱頂部の変位と基部の反力の関係

5. 乗員の安全性能の検討

5.1 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)¹⁶⁾が用いられる。また、米国の道路安全施設の乗員安全性に関する基準⁹⁾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 (=196m/s²) 以下であれば、乗員に重い後遺症が残らない障害 (AIS2 相当) となるとされている。

表-4 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 | 重篤な症状下であり、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 |

まず、実験との比較のため、橋梁用ビーム型防護柵モデルとトラックモデルを衝突させた場合の解析結果の車両重心加速度を処理し、実車衝突実験の結果およ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。

5.2 フィルター処理の必要性

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。

加速度を評価するためのフィルターには、通常のローパスフィルターのほかに、米国での衝突時の頭部の生存限界を評価するための指標である HIC (Head Injury Criterion) や、JIS 規格に準拠した低域フィルターである SAE などがある。

新基準においては、実車衝突実験を行う際に車両重心に加速度計を取り付け、0.5ms 間隔で加速度の応答を測定することとなっている。この測定値に対しては、ローパスフィルターなどは用いずに、10ms の移動平均を計算し、その最大値を求めることとなっている。

5.3 橋梁用ビーム型防護柵の安全性能

解析結果の応答加速度の水平 2 方向 (進路方向と柵面直角方向の合成値) の合成値を図-8 に示す。サンプリングタイムは実車衝突実験で用いられている 0.5ms 間隔よりさらに細かい 0.1ms 間隔とした。前述したように、加速度の波形は高周波を多く含み、最大値が 1000m/s² と大きな応答値を示している。

そこで、文献 3) における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に、加速度の合成を行ったものを図-9 に示す。合成加速度の最大値は 105m/s² であり、実験値

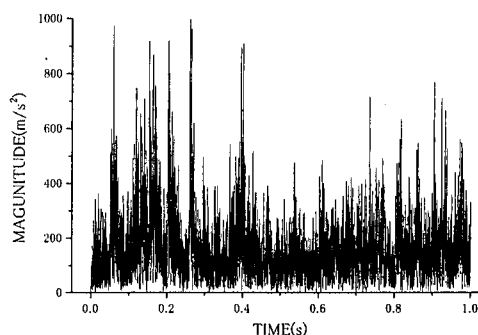


図-8 応答加速度の原波形の合成値

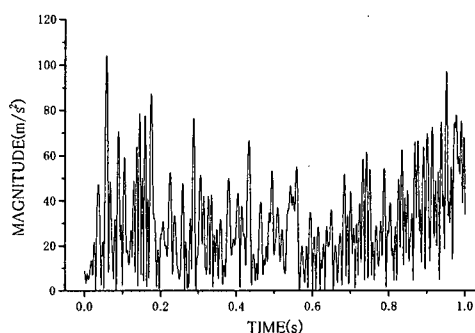


図-9 フィルター処理後の合成値

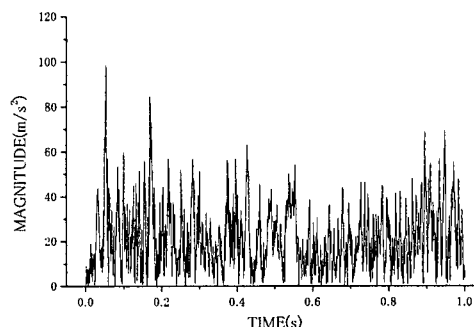


図-10 移動平均処理後の合成値

の最大加速度 95 m/s² より約 10% 上回っている。しかし、最大値が人体に大きく後遺症を残すほどでないことや、波形が実験と近いことなどから、比較的实验に近い結果を得ているといえる。

また、フィルター処理せずに、原波形の移動平均を計算したのちに合成した結果を図-10 示す。最大値は、80Hz のローパスフィルターで処理した結果とほぼ等しく最大値が 99m/s² となり、規定値 200m/s² 以内に収まっている。

2 種類の処理方法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、トラック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。

5.4 乗用車モデルの必要性

平成 11 年 4 月から施行された防護柵の設置基準においても、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 1tf 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が 200m/s² 未満となることを確認する必要があるとされている。

トラックでの実車衝突実験と同様に、乗用車の実車衝突実験は費用・時間の面で問題があり、これをシミュレーションできる 3 次元モデルの開発が望まれている。また、インターネットより入手可能な Ford Taurus Car Model など存在し、これらを防護柵への実車衝突シミュレーションに適用することも試みたが、車両重量が異なることや、正面衝突用、側面衝突用のモデルしか存在しないことから適用は困難であった。

そこで、本研究室では重量 1tf の乗用車のカタログ等を参考に乗用車モデルを現在開発中である。図 11 に乗用車モデルのプロトタイプを示す。

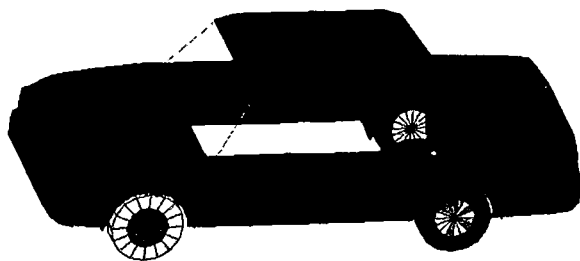


図-11 乗用車モデルのプロトタイプ

6. 結論

本研究では、実車衝突実験の車両と防護柵の双方の挙動を再現できる数値解析モデルを用いて、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。また、解析結果を用いて旧要綱の設計条件で設計された橋梁用ビーム型 S 種鋼製防護柵に対して、新基準で規定された性能に関する検討を行った。

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 橋梁用の旧要綱 S 種鋼製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 14tf、衝突速度 80km/h に対応して設計された旧要綱 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 25tf、衝突速度 80km/h での衝突にも対応できる余剰性能を有することを示した。
- 2) 車両重量 25tf、衝突速度 100km/h の衝突に対しても、最大変位は規定値より大きくなるものの、今回の解析では車両に突破されることがなかった。
- 3) 今回扱ったタイプの旧要綱 S 種の橋梁用ビーム型防護柵は新基準が施工された現在においても、早急に取り替える必要はないことが分かった。
- 4) トラックモデルによる解析では、加速度においても適切な解析結果の処理を行えば、実験値と比較的良好一致を示した。

- 5) トラックモデルによる解析では、加速度の応答値に対する、10msec 移動平均の最大値は規定値 200m/s² 以下となり、トラックの乗員の安全性を解析的に示した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：防護柵設置要綱，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) 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，1992。
- 4) 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，1993。
- 5) 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，1994
- 6) 建設省土木研究所ほか：防護柵衝突実験結果報告書，土木研究所資料，第 3108 号，1990。
- 7) 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，pp.88-91，1996。
- 8) 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>。
- 9) NCHRP Report 350 Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features : National Cooperative Highway Research Program , NATIONAL ACADEMY PRESS, 1993.
- 10) Computer Simulation of Roadside Crash Cushion Impacts, Journal of Transportation Engineering/September/October, pp.370-376, 1997.
- 11) Design and Analysis of Approach Terminal Sections Using Simulation , Journal of Transportation Engineering/September /October, pp.399-405, 1996.
- 12) 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。
- 13) 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。
- 14) 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，pp.1567-1580，1991。
- 15) 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。
- 16) 日本自動車研究所，筑波大学社会医学系法医学：The Abbreviated Injury Scale (AIS)，1992