

景観性に配慮した橋梁用防護柵の衝突性能に関する実験的・数値解析的研究

伊藤 義人¹・伊藤 誠慈²・北根 安雄³・高堂 治⁴

¹フェロー会員 名古屋大学大学院教授 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)
E-mail: itoh@civil.nagoya-u.ac.jp

²学生会員 名古屋大学大学院院生 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)
E-mail: ito.seiji@d.mbox.nagoya-u.ac.jp

³正会員 名古屋大学大学院准教授 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)
E-mail: ykitane@civil.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 (株)住軽日軽エンジニアリング (〒136-0071 東京都江東区亀戸2-35-13新永ビル)

平成16年の車両用防護柵の設置基準改訂により、防護柵を設置する際にその地域特性に応じた景観への配慮を行うことが規定された。この設置基準改訂に伴って景観性を向上させるために、様々なタイプの防護柵が開発されている。本研究では、その中の防護柵の一つである、眺望性を確保するために背面の圧縮部に横ねじれ座屈を発生させるという変形特性を有した、新型の橋梁用ビーム型鋼製防護柵支柱の衝突性能の検討を行った。従来型防護柵と比較を行いながら、実験的及び数値解析的に検討した結果、防護柵の設置基準の要求する性能を、新型防護柵は十分に満足する事を明らかにすると共に、背面の圧縮部の横ねじれ座屈変形によって衝突エネルギーを吸収しており、緩衝性に優れている事を定量的に明らかにした。

Key Words : vehicle collision, collision experiment, bridge guard fence, numerical analysis, FEM

1. はじめに

防護柵は、自動車の路外逸脱防止等を図る施設として、技術開発と改良を重ね道路交通の安全確保に大きな役割を果たしてきた¹⁾。日本の防護柵の設置基準は、米国のNCHRP (National Cooperative Highway Research Program) の基準²⁾⁻⁴⁾などを参考に作成され、平成11年の改訂によりそれまでの仕様規定から性能規定に変更された⁵⁾。この設置基準で規定された防護柵の有すべき性能は、i) 車両の逸脱防止性能、ii) 車両乗員の安全性能、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⁵⁾。この改訂により防護柵の設計の自由度が増大し、これらの4つの性能を満たしていれば、自由に使用材料や形状を決定する事が可能となった。

防護柵の設置基準では、防護柵が規定の性能を満足しているかどうかの確認を実車衝突実験で行う事を原則としている。実験の衝突条件には、車両重量、衝突角度と重心位置は規定されているが、車両形状などの規定は含まれていない。実車衝突実験を行う

ためには長期の準備期間と多大なコストが必要であり、パラメトリックな検討をするために実験を繰り返すことは困難であるため、限られた実験結果を基に性能照査を行っているのが現状である。

そこで、伊藤ら⁶⁾⁻¹¹⁾は大型トラックモデルと乗用車モデルを独自に開発し、橋梁用鋼製防護柵、アルミニウム合金製防護柵、コンクリート製防護柵、コンクリート-メタル複合防護柵、FPC防護柵などに対して様々な衝突解析モデルを作成し、汎用のプログラムLS-DYNA¹²⁾⁻¹⁴⁾を用いて3次元の衝突数値シミュレーションを行った。その中で実車衝突実験を補完するものとして衝突数値解析が有効である事を示した。車両衝突解析を用いれば、防護柵性能のパラメトリックな評価を行うことが可能であるばかりでなく、実験からは評価することが難しい部材のエネルギー吸収に関する情報も得ることが可能である。

防護柵の設置基準は平成11年に引き続き、平成16年にも再度改訂が行われた¹⁵⁾。この改訂により防護柵を設置する際に、その地域特性に応じた景観への配慮を行うことが明確に規定された。これに従

って良好な景観形成を図るため、従来の防護柵とは異なる構造的特徴を有した新しいタイプの防護柵が開発されつつある¹⁶⁾。本研究では、平成16年の防護柵の設置基準改訂以降に開発され、景観性を向上させ眺望性を確保するために特徴的な変形特性を有した新型の橋梁用ビーム型鋼製防護柵の支柱の衝突性能を、従来型の橋梁用ビーム型鋼製防護柵の支柱と比較を行いながら評価し、また設置基準で規定された防護柵の有すべき性能を満足するかを検討する。

2. 静荷重実験及び重錘衝突実験による新型防護柵支柱の衝突性能の検討

(1) 景観を配慮した新型の防護柵

防護柵の設置基準によって規定された防護柵を持つべき景観への配慮として最も重要な項目は、走行車両から柵外へより多くの眺望性を確保することであるとされている¹⁵⁾。従来の橋梁用ビーム型鋼製防護柵は、支柱の背面フランジ下部に設けた、くびれ部分に局部座屈を生じさせることで支柱が変形し、衝突エネルギーを吸収する変形特性を有する構造であった。そのため、局部座屈を生じさせるくびれ部分以外の断面を増加させる必要があり、支柱全体として骨太な形状となるため、柵外の眺望性を確保しづらい構造であった。

そこで、柵外の眺望性をより大きく確保する事を目的として新型の橋梁用ビーム型鋼製防護柵が開発されている。この新型の橋梁用ビーム型鋼製防護柵は、支柱の背面フランジ全体に横ねじれ座屈を生じさせることで支柱が変形し、衝突エネルギーを吸収するという新しい変形特性を有した構造である。そのため、支柱断面の均等化とくびれないスレンダーな形状が可能となり、従来型に比べて柵外へのより大きな眺望性を確保している。本研究では、この新しい変形特性を有した2つのタイプの新型の橋梁用ビーム型鋼製防護柵の支柱を対象とし、衝突性能の検討を行う。

2つの新型の橋梁用ビーム型鋼製防護柵の支柱の形状を図-1に示す。両タイプ共に支柱の材料はSS400を用いている。図-1(a)のM typeは、背面の圧縮フランジが図-1(b)に示すような横ねじれ座屈を^{17), 18)}起こして衝突エネルギーを吸収するものである¹⁹⁾。それに対し、図-1(c)のR typeは、M typeの改良型として開発された防護柵である。変形特性としては、M typeと同様に圧縮フランジの横ねじれ座屈変形に加え、引張フランジを直線形にして下部

にくびれ部が設ける事で、変形時にそのくびれ部が伸びて衝突エネルギーを吸収する変形特性が、新たに追加されている²⁰⁾。また、表-1には両タイプの支柱の遮蔽面積を示す。この場合の遮蔽面積とは、柵外の眺望をどれだけ透過させずに遮蔽するかという

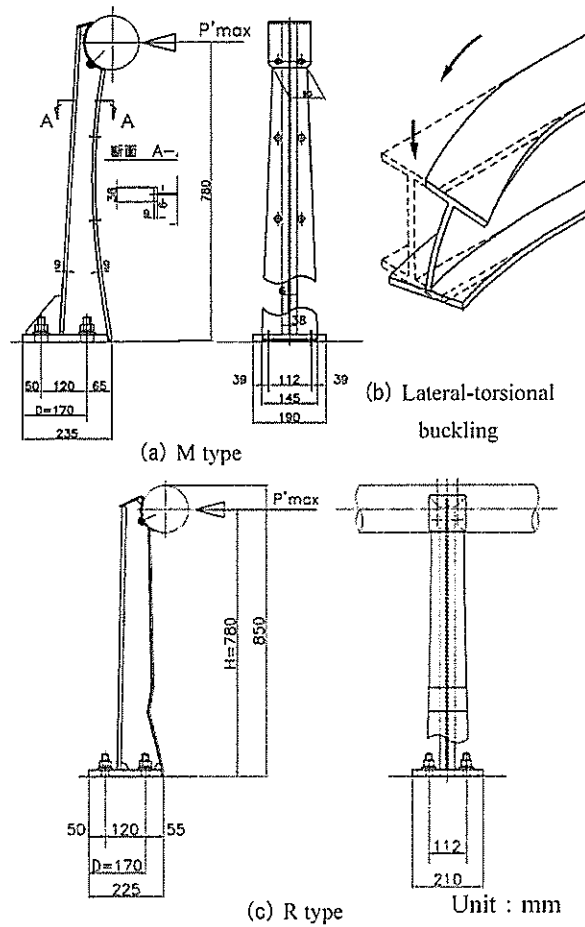


図-1 新型防護柵支柱

表-1 各タイプの遮蔽面積

	Choking area (mm ²)
M type	146,080
R type	149,130

表-2 防護柵の種別

Impact index (kJ)	Classification
over 45	C
over 60	B
over 130	A
over 160	SC
over 280	SB
over 420	SA
over 650	SS

面積であり、斜め方向からの眺望も考慮して、図-1 で示した各支柱の正面図と側面図の表面積を合計したものである。比較のため 3. で示す従来型 (N type) の遮蔽面積は 266,980mm²であり、M type と R type 共に Ntype と比較して柵外の眺望性をそれぞれ約 45%と約 44%大きく確保できている。両タイプとも、表-2 に示す防護柵設置基準が規定する種別 A に分類される¹⁾。

(2) 静荷重実験

橋梁用ビーム型防護柵は既に標準設計法が確立されており、3次元剛体-ばねモデルを用いた数値解析によって作成された図-2 に示す部材選定グラフが基本となっている¹⁾。

図-2 は橋梁用ビーム型防護柵が車両衝突に対して図-3 のように変形するものと仮定した支柱と横梁の組み合わせを選定するためのものである。まず、設計された支柱と横梁に対し静荷重実験を行い、その荷重-変位関係から図-4 に示すように矩形モデルに等面積置換することによって、支柱の極限支持力 P_{II} と横梁の極限曲げモーメント M_0 を求める。そして、求めた P_{II} と M_0 の組み合わせ強度を図-2 にプロットした場合に設定した種別の領域に入れなければならないとされている。ここでは、種別 A 防護柵として設計された M type と R type の防護柵の支柱に対して行われた静荷重実験の結果を示し、 P_{II} と M_0 の組み合わせ強度が、種別 A の部材選定域内にプロットされるかを確認する。

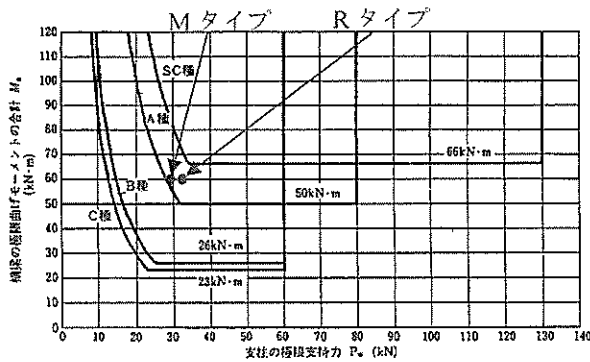


図-2 橋梁用ビーム型防護柵部材選定グラフ¹⁾

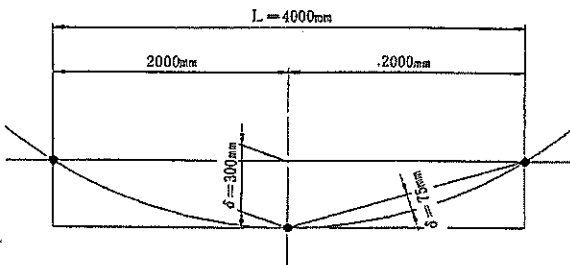
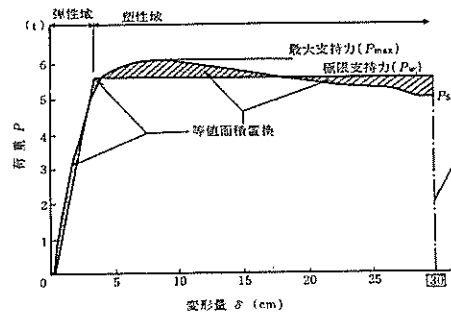
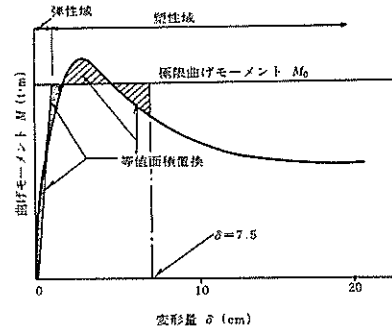


図-3 防護柵の変形モード¹⁾



(a) 支柱



(b) 横梁

図-4 ビーム型防護柵の部材性能値の算定法¹⁾

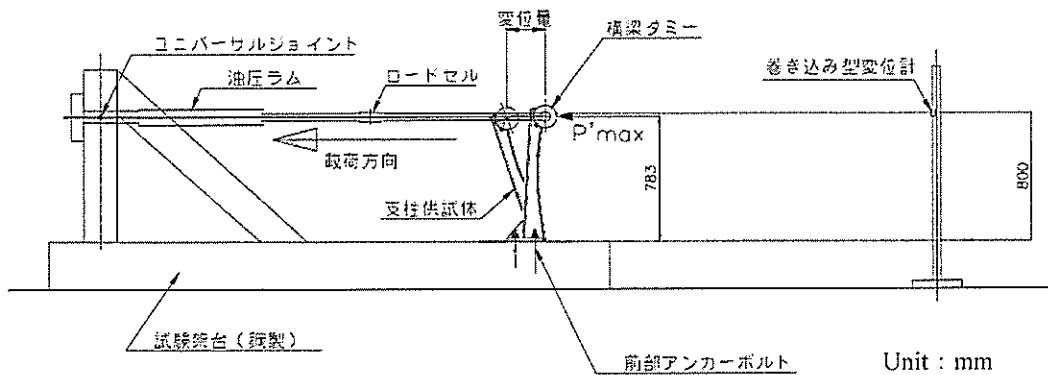


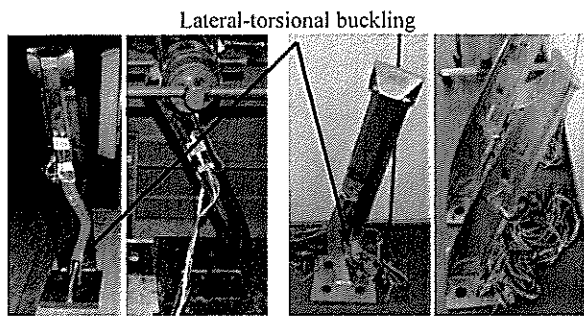
図-5 静荷重実験概要

a) 実験方法

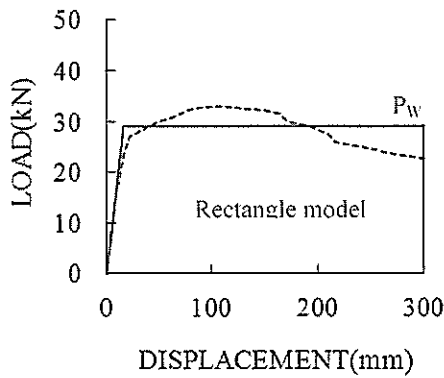
図-5 に静荷重実験の概要を示す。支柱に対する静荷重実験では荷重点高さを原則 800mm とし、300mm の水平変形に破断なく耐えることが求められる。本実験では荷重点高さを載荷のしやすさから各タイプの主要横梁中心高さとしたが、水平変位計測高さを 800mm とし、ロードセルを用いて主要横梁中心高さで計測した水平荷重に、800mm を荷重点高さで除した換算係数を乗じる事で、水平荷重を 800mm の高さに換算した。

b) 実験結果

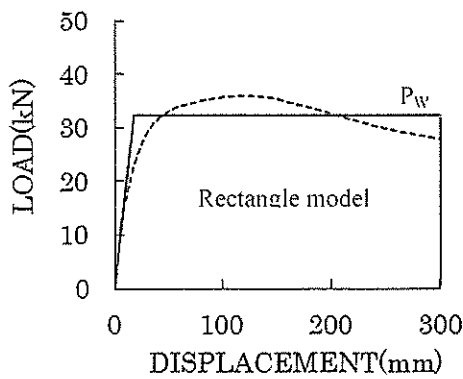
実験結果から得られた両タイプの変形後の状



(a) M type (b) R type
図-6 変形後の防護柵支柱



(a) M type



(b) R type

図-7 静荷重実験の荷重-変位関係

態を図-6 に、荷重-変位関係を図-7 に示す。図-6 に示すように、両タイプとも防護柵支柱の背面の圧縮部に横ねじれ座屈が生じる変形特性を示した。図-7 の等面積置換した矩形モデルより M type の P_W は 29.5kN となり、R type の P_W は 32.3kN となった。また、横梁の M_0 については各タイプの防護柵に対し設計した横梁の静荷重実験結果を使用する事とし、M type, R type 共に 61.0kN・m であった。これらの値を用いて P_W と M_0 の組み合わせ強度を部材選定域にプロットを行った結果、図-2 で示すように両タイプとも A 種の部材選定域内に含まれたため、M type と R type は種別 A 防護柵としての部材性能を満足している事が分かった。

(3) 静荷重実験の事後解析

a) 解析モデル

橋梁用ビーム型防護柵への静荷重実験を数値解析シミュレーションで補完する事の有用性を示すために、2.(2)で行ったM typeの静荷重実験の数値解析を行った。計算に汎用有限要素法プログラムABAQUS Ver 6.7 (SIMULIA社²¹⁾)を用いた。図-8に用いる解析モデルを示す。

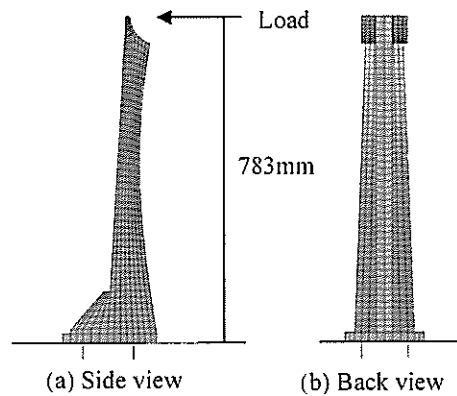


図-8 解析モデル

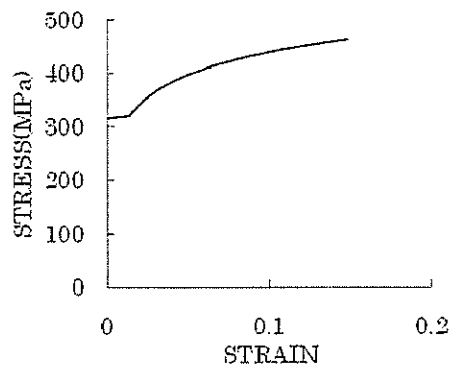


図-9 SS400 相当応力-相当塑性ひずみ関係

鋼材の材料定数に関しては、M type防護柵支柱の鋼材に対し行った引張試験の結果から得られた図-9に示す相当応力-相当ひずみ関係を、真応力-真ひずみに換算して用いている。アンカーボルトは、実験の結果から弾性域内ではしか変形していないことが分かっているので解析においても弾性体とした。支柱を1次低減積分シェル要素によってモデル化し、支柱底板を2次完全積分ソリッド要素、アンカーボルトは2次のはり要素によってモデル化している。支柱はアンカー構造をとっており、アンカーボルトの上部は支柱の底板と結合し下部は完全固定とした。また、基部を再現するために、支柱底板の下に剛体のプレートを設置し完全固定とした。モデル全体の要素数は3466、節点数は6700である。

b) 解析結果

解析結果から得られた変形状態を図-10に、荷重-変位関係の解析結果を、実験結果と共に図-11に示す。図-11から解析値と実験値を比較すると、解析値の初期剛性がわずかに大きくなっているが、これは、静荷重実験では実験装置のあそびによって変位が大きめに計測されることが原因として考えられる。しかし、全体的な変位特性は良く再現できていると考えられ、図-10からも想定した背面圧縮部の横ねじれ座屈が生じており、数値解析シミュレーションの有用性が示された。

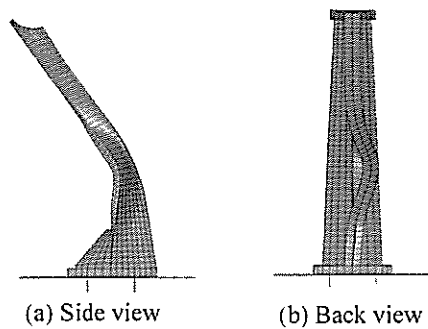


図-10 変形後の防護柵支柱

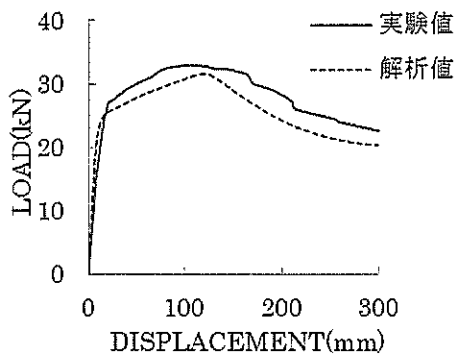


図-11 荷重-変位関係

(4) 重錘衝突実験

防護柵の設置基準では橋梁用ビーム型防護柵は静荷重実験による標準設計法が確立されており、支柱の強度は静荷重実験により確認する事をもって、衝撃実験にかえることができるものとしている。しかし、新型の防護柵支柱は従来の防護柵支柱と異なる変形特性を有しているため、衝撃荷重に対する挙動を明らかにし、安全性を確認する必要があるものと考えられる。そこでここでは、M typeとR typeの防護柵支柱に対し重錘衝突実験を行い、静荷重実験だけでは評価できない衝撃荷重に対してのひずみ速度効果等の影響を考慮した防護柵支柱の挙動を求め、安全性を検討する。

a) 実験方法

重錘衝突実験の様子を図-12に示す。質量 470kgの鋼球を振り子で鋼架台に固定された防護柵支柱に衝突させた²³⁾。防護柵支柱は300mmの水平変形に破断なく耐えることが求められるため¹⁾、鋼球の落下高さは防護柵支柱を300mm以上水平変形させる衝撃力を有する高さとして、M typeに対して2150mm、R typeに対して2300mmとして定めた。この落下高さは、静荷重実験から得られた荷重-変位関係の矩形モデル面積を、防護柵支柱の300mm水平変形時の吸収エネルギーとし、それと等価の位置エネルギーを鋼球に与える高さとして設定した。

b) 実験結果

重錘衝突後の各防護柵支柱の変形を図-13に示す。

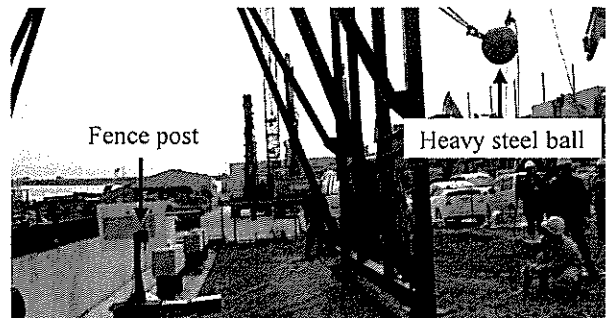
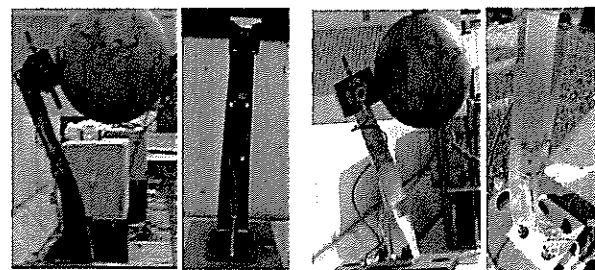


図-12 重錘衝突実験概要



(a) M type

(b) R type

図-13 衝突後の防護柵支柱

両タイプとも 300mm の水平変位を生じたが、目視によって支柱に割れや破断は無く衝撃荷重に対して十分な強度を保持していた事を確認した。

3. 重錘衝突実験の数値衝突解析

2. で示した M type と R type の重錘衝突実験の数値衝突解析を行う事で、実験では得る事の困難な各部位のエネルギー吸収分布を定量的に求める。また、従来の橋梁用ビーム型鋼製防護柵の支柱に対する重錘衝突解析を併せて行い、M type と R type の解析結果と比較をして、新型の橋梁用ビーム型鋼製防護柵の支柱の衝突性能を明らかにする。比較のための従来型の橋梁用ビーム型鋼製防護柵として、図-14 の図面に示す橋梁用ビーム型鋼製防護柵を用いた。この防護柵は F 橋に既設され、M type と R type と同様の種別 A の防護柵に分類される。この防護柵は、支柱の背面フランジ下部に設けた、くびれ部分に局部座屈変形を生じさせることで支柱が変形する典型的な従来型の防護柵の変形特性を有している。以下、この防護柵を N type とする。

(1) 数値解析モデル

各解析モデルを図-15 に、各解析モデルの節点と要素数及び衝突条件を表-4 に示す。解析には LS-DYNA Ver 971^{13)・14)}を使用した。各タイプの支柱には SS400 鋼材を使用しており、その材料特性については、降伏後の相当ひずみ-相当応力の関係を

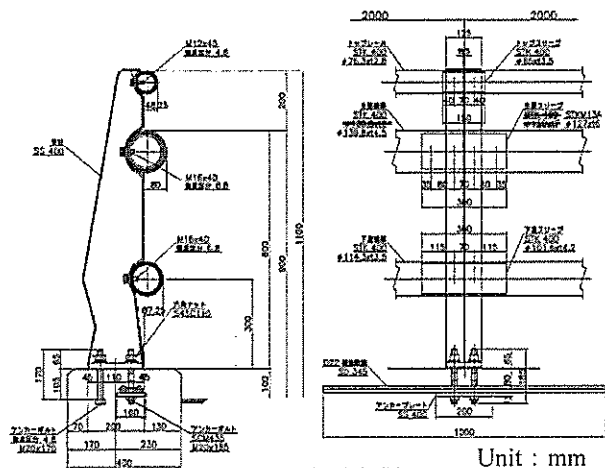


図-14 従来型防護柵

表-3 Nタイプの遮蔽面積

	Choking area (mm ²)
N type	266980

von-Mises 降伏基準に従う多直線近似等方弾塑性体モデルとし、伊藤ら²³⁾が行った動的引張試験から得られたひずみ速度効果の影響を考慮している。各タイプの要素特性に関しては、支柱を、ねじれが問題となる解析に適応される Belytschko-Leviathan シェル要素によってモデル化し、鋼球、支柱底板等を 1 点積分ソリッド要素によってモデル化した。境界条件として支柱底板の下面を完全固定とした。衝突条件については、衝突位置を実験と同様に各防護柵支柱の主要横梁位置とし、鋼球モデルに与えた衝突速度は実験時の落下高さ換算した値を用いた。N type の衝突速度は M type と同じとした。

(2) 数値解析結果

M type と R type の重錘衝突による最大変位発生時

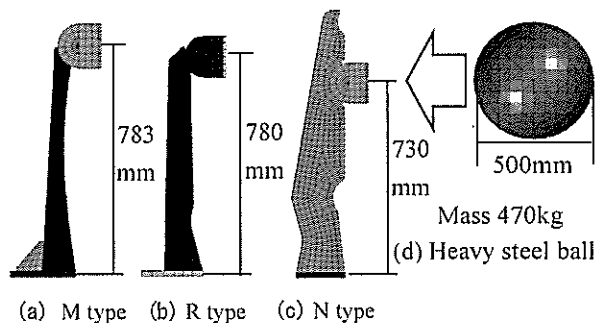


図-15 数値解析モデル

表-4 各解析モデルの諸元及び衝突条件

	M type	R type	N type
Node No.	1704	2098	1510
Element No.	4253	4744	4081
Collision speed (mm/s)	6492	6714	6492

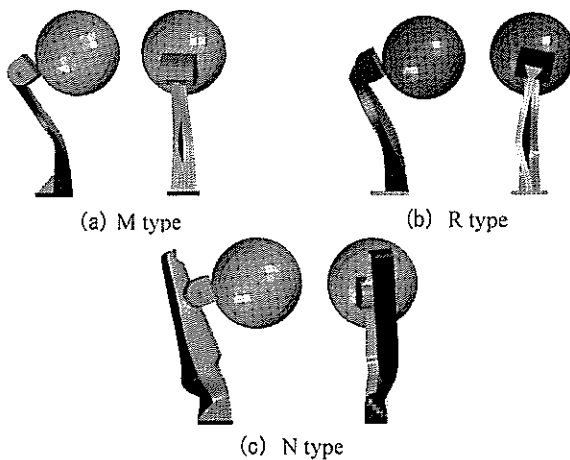


図-16 衝突後の防護柵支柱モデルの挙動

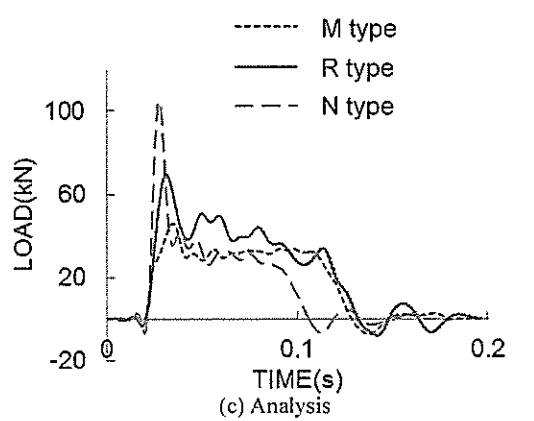
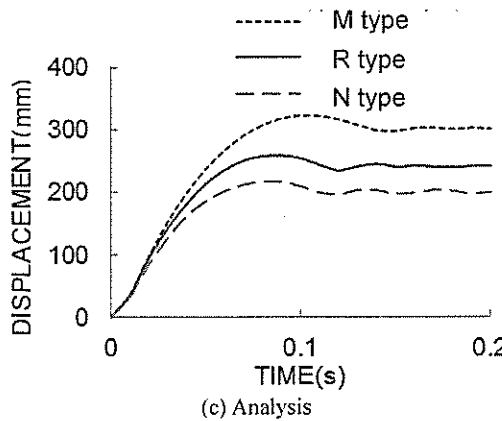
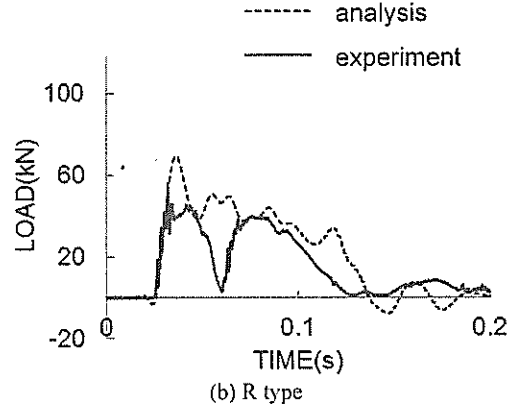
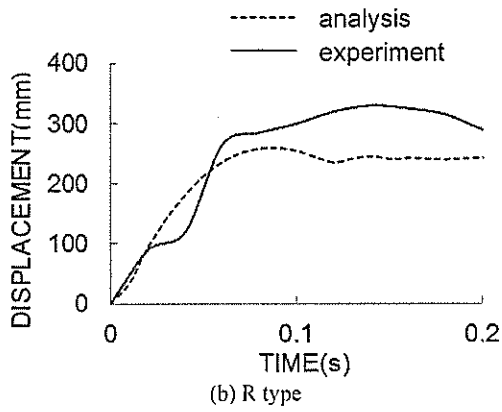
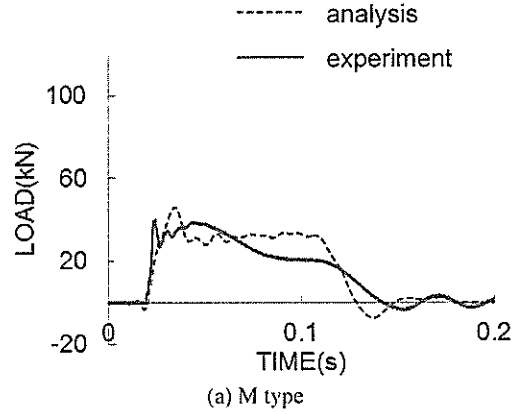
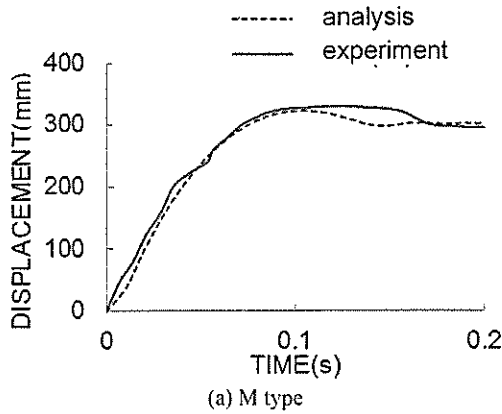


図-17 水平変位時刻歴曲線

図-18 水平荷重時刻歴曲線

の各解析モデルの変形状態を図-16 に示す。

また、重錘衝突時の水平変位の時刻歴応答の解析値と実験値の比較及び3タイプの解析値の比較を図-17 に示す。水平荷重の時刻歴応答についても同様の比較を図-18 に示す。変位量は防護柵支柱の主要横梁が設置される位置で計測し、実験における水平荷重は支柱に添付したひずみゲージより側定したひずみから、モーメントを算出し水平荷重に換算したものである。解析による水平荷重には、周波数を100Hz と設定したローパスフィルタで処理を行って

いる²⁴⁾。フィルタ周波数を100Hzと設定した根拠を示すために、解析結果の衝突水平荷重の周波数分析を図-19 に示す。横軸は周波数、縦軸はフーリエスペクトル(衝突荷重に時間の半分を乗じたもの)である。図-19 より、衝突水平荷重による周波数範囲が100Hz付近より小さくなっていることが分かる。そこで、100Hz 周辺の50Hz, 150Hz, 200Hz でフィルタ周波数を設定し、フィルタ処理を行った衝突荷重の時刻歴を比較した所50Hz, 100Hz, 150Hz のフィルタ周波数によるフィルタ処理の結果に大きな差

がないことが分かった。よって衝突水平荷重による周波数範囲は 50Hz~150Hz を境としてそれよりも低い範囲に限られると考えられ、フィルタ周波数を 100Hz として設定することは妥当であると言える。

図-16 から重錘衝突後の防護柵支柱モデルは、それぞれ前述した衝突実験とほぼ一致した変形状態を示している事が分かる。2つの新型支柱は背面の圧縮部に横ねじれ座屈を生じている。R typeは、横ねじれ座屈に加えて前面フランジ下部のくびれ部が伸びている。なお、従来型の N type は支柱下部のくびれ部分に局部座屈が生じている。

a) 防護柵支柱の水平変位及び水平荷重の検討

図-17 と図-18 から、M type については、変位量と衝突荷重の解析値と実験値は概ねよく一致しており、精度の高いモデルと言える。また、R type については解析値と実験値に少し差が見られる事や、水平荷重の実験値が 1 度低下している事が確認できる。これは R type の実験において衝突位置に装着された荷重計の影響で、鋼球の 2 度当たりを起こしたことや過度な支柱のねじれが生じた実験上の誤差が原因と考えられる。しかし、図-16 からも R type は想定した横ねじれ座屈等の変形が生じており、妥当性のあるモデルと言える。

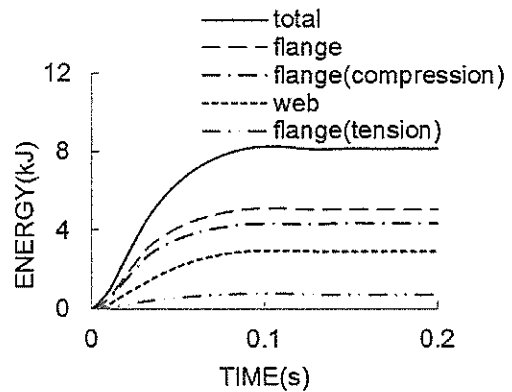
図-17 で各タイプの最大水平変位量を比較すると、M type, R type 及び N type は 322mm, 259mm 及び 210mm であり、M type と R type は、N type よりも約 48%と約 19%だけ大きい結果となった。

図-18 で各タイプの最大水平荷重を比較すると、M type, R type 及び N type は 46.0kN, 56.4kN 及び 104.7kN であり、M type と R type は、N type よりも約 56%と約 34%小さい結果となった。このように M type と R type は N type に比べ、水平変位が大きく緩衝性に優れていると言える。

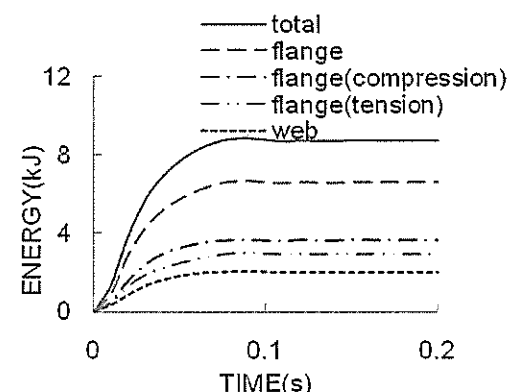
b) 防護柵支柱のエネルギー吸収分布

図-20 において防護柵支柱のウェブ部とフランジ

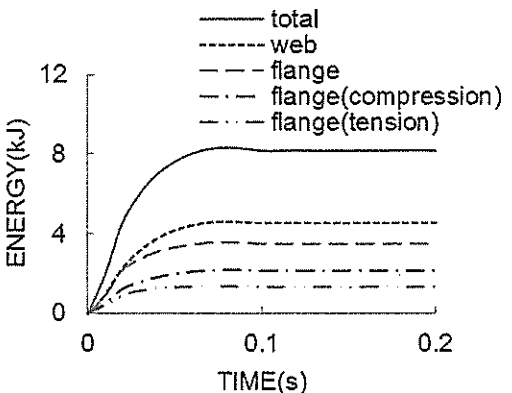
部で吸収された衝突エネルギーを比較した。青い実線は防護柵支柱が吸収した全ひずみエネルギー、赤い点線はウェブが吸収したエネルギー、紫の点線は圧縮フランジが吸収したエネルギー、水色の点線は引張フランジが吸収したエネルギー、緑の点線は両フランジが吸収したエネルギーの合計をそれぞれ示している。M type と R type は、フランジ部がウェブ部に比べエネルギー吸収量が大きくなっており、その差はそれぞれ全吸収エネルギーの約 26%と約 53%であった。一方、N type はウェブ部がフランジ部に比べエネルギー吸収量が大きくなっており、そ



(a) M type



(b) R type



(c) N type

図-20 各部位で吸収された衝突エネルギー

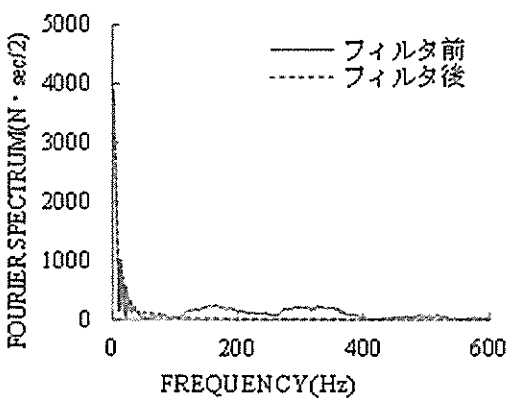


図-19 従来型防護柵

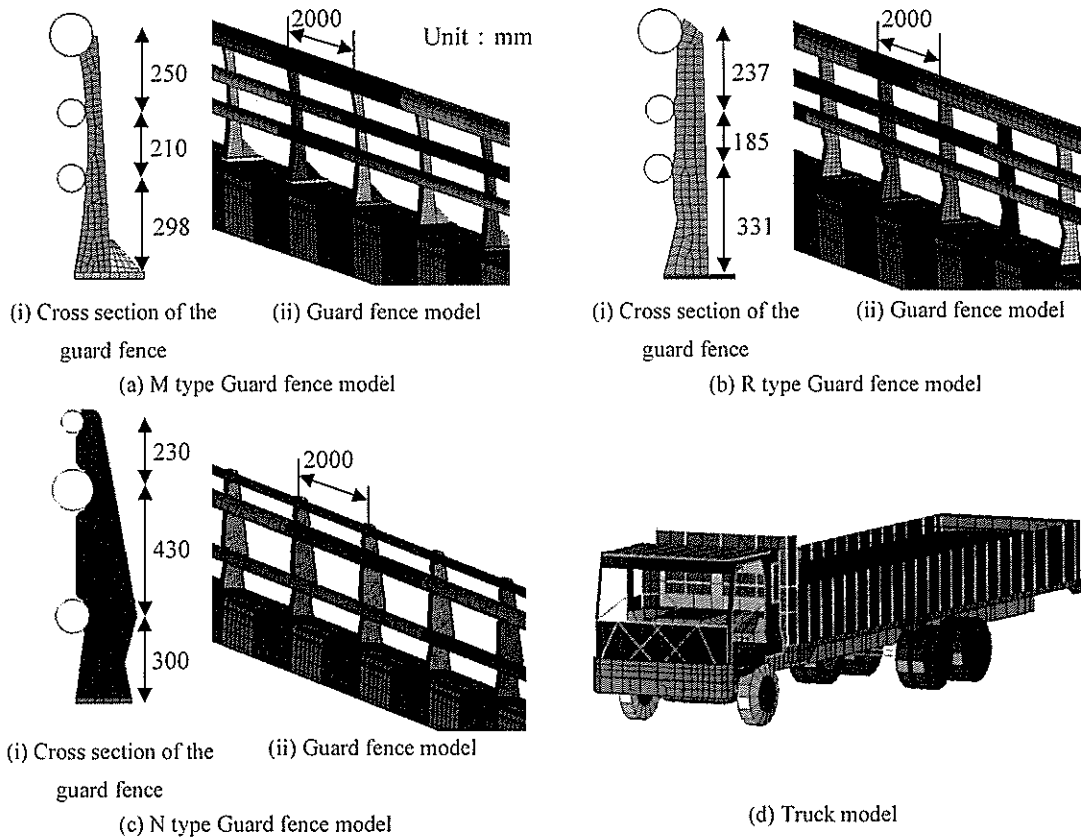


図-21 数値解析モデル

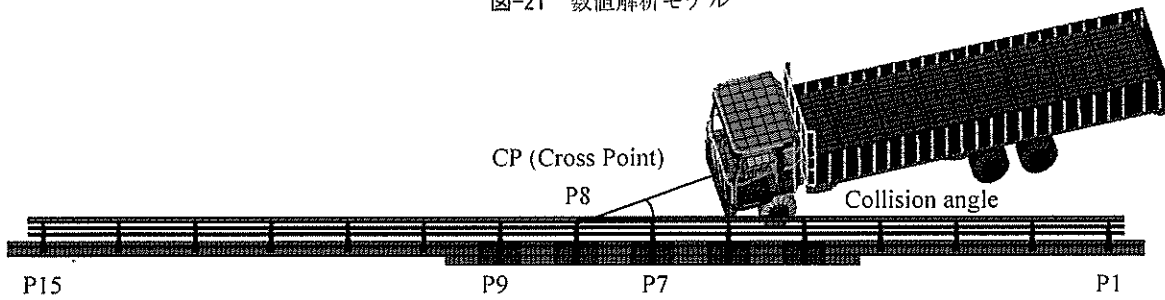


図-22 車両衝突

の差は全吸収エネルギーの約 19%であった。特に、M type と R type は両タイプとも、背面フランジ部のエネルギー吸収量が前面フランジ部に比べ大きくなっており、その差はそれぞれ全吸収エネルギーの約 44%と約 8%である。

以上より N type は支柱下部のくびれ部分の局部座屈変形によって、また、M type と R type は背面のフランジ部の横ねじれ座屈変形によって、衝突エネルギーを主に吸収していることが分かった。また、M type と R type の前面フランジ部のエネルギー吸収量を比較すると、M type に比べ R type の方が大きくなっており、その差は全吸収エネルギーの約 18%である。このことから、R type は前面のフランジ下部のくびれが伸びることで衝突エネルギーを吸収している事が定量的に分かった。

4. 新型防護柵支柱を配した防護柵に対する車両衝突解析

2.及び3.では、M type と R type の防護柵支柱が設置基準の要求する部材性能を満足している事を確認すると共に、その衝突性能を明らかにした。ここでは、M type と R type の防護柵支柱としての性能が防護柵としてどのように発揮されるか、また設置基準で規定された防護柵の有すべき性能を満足するかを検討するために、M type, R type 及び N type の防護柵支柱を使用した防護柵モデルを作成し、設置基準で規定された車両衝突実験の数値解析シミュレーションを行った。また、防護柵の基部のコンクリート構造及びスパン間隔等の諸条件は 2010 年に筑波で行った車両衝突実験²⁵⁾のものを採用し、横梁に

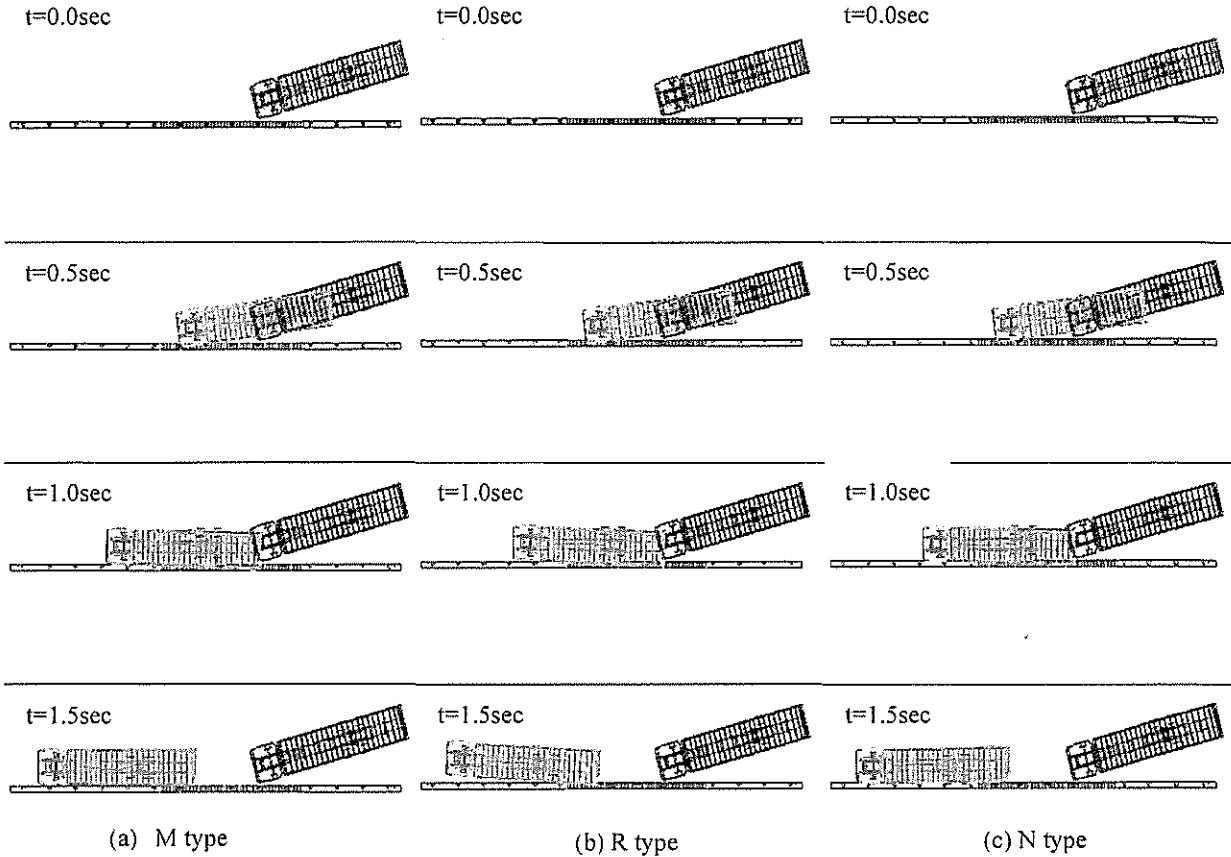


図-23 衝突時の車両の動き

については各タイプの設計図を基に解析モデルを作成した。また、解析モデルの作成には、文献 6)と 26)の橋梁用防護柵に対する車両衝突解析モデルを参考にした。

(1) 数値解析モデル

a) 防護柵モデル

3タイプの防護柵の解析モデルとトラックモデルを図-21に示す。解析には3と同様にLS-DYNA Ver.971^{12)・14)}を使用した。各タイプの支柱は重錘衝突解析で使用したモデルを用いている。横梁はSTK400鋼材が用いられた円形中空断面であり、その材料特性については、降伏後の相当ひずみ-相当応力の関係を von-Mises 降伏基準に従う多直線近似等方弾塑性体モデルとし、SS400と同様に伊藤ら²³⁾が行った動的引張試験から得られたひずみ速度効果の影響を考慮している。横梁の要素モデルはBelytschko-Tsay シェル要素によってモデル化した。また、防護柵の支持構造については車両衝突実験²⁵⁾の設計図面を参考に、アンカーボルトと鉄筋コンクリート躯体をモデル化した。コンクリートの材料特性については、圧縮力に対しては Drucker-Prager 降

表-5 衝突前後における車両挙動の変化

	M type	R type	N type
Collision angle (deg)	15	15	15
Secession angle (deg)	3.4 (5.7)	5.6 (37.4)	3.9 (15.8)
Collision speed (km/h)	45	45	45
Secession speed (km/h)	27.2 (60.5)	27.3 (60.6)	28.1 (62.5)

伏基準に従い、引張力に対しては引張強度(カットオフ圧力とする)に達した後は要素が破壊したと見なされ引張応力を伝えなくなる、LS-DYNAの破壊を考慮した土質およびクラッシュブルフォーム材と、圧縮力に対しては Drucker-Prager 降伏基準に従い、引張力に対しては引張強度に達した後はカットオフ圧力のまま引張応力を伝達する、LS-DYNAの土質およびクラッシュブルフォーム材を使用した。また各材料定数のパラメータは、圧縮試験から得られたコンクリートの圧縮強度を基に決定した。コンクリートのひずみ速度効果については、伊藤ら⁹⁾によ

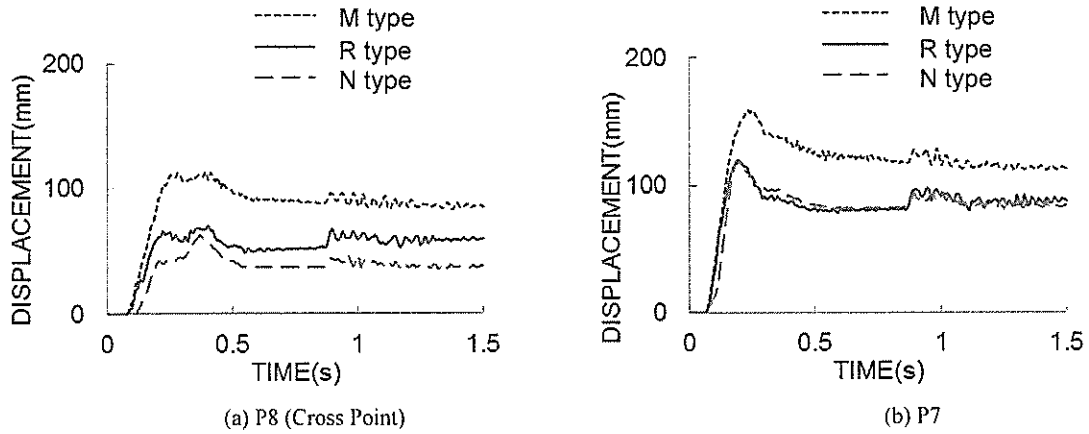


図-24 水平変位量の時刻歴

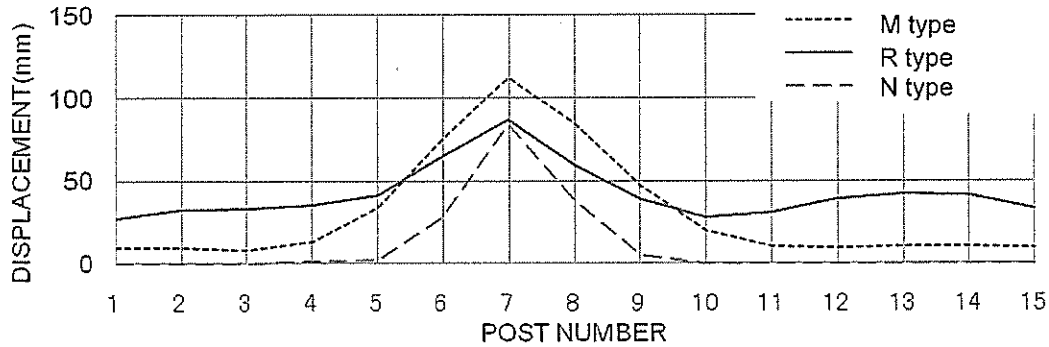


図-25 残留変位量

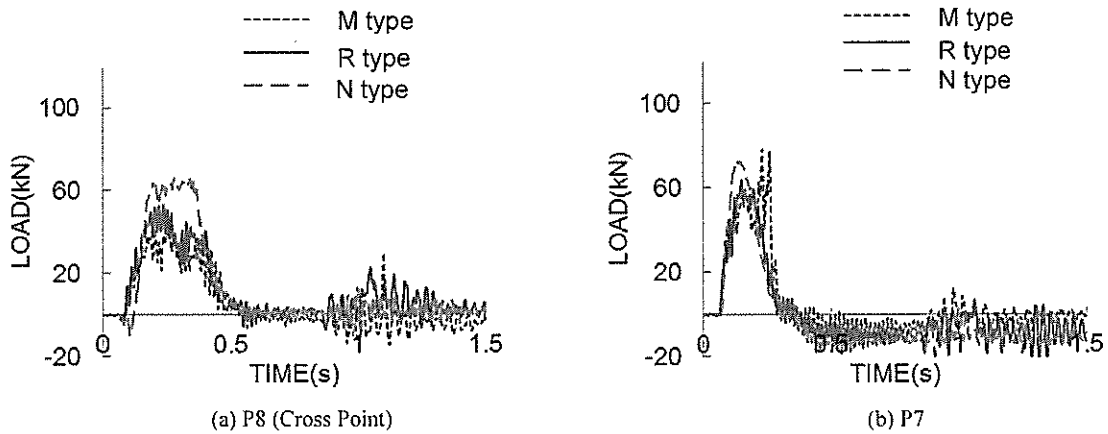


図-26 水平荷重の時刻歴

て衝突を受けるコンクリート架台の変形が弾性域でほぼ収まる場合、ひずみ速度効果の有無は解析結果に影響を及ぼさないことが示されており、本研究では特に考慮していない。

また、アンカーボルト及びコンクリート躯体内の埋め込み鉄筋については弾塑性体とした。要素特性に関してはコンクリート躯体、アンカープレート等を1点積分ソリッド要素によってモデル化し、埋め込み鉄筋とアンカーボルトについては、Hughes-Liuはり要素を用いてモデル化した。境界条件としてコン

クリート躯体の下面を完全固定とし、埋め込み鉄筋とコンクリートの付着については、剥離を考慮せず完全付着とした。

b) 車両モデル

衝突車両モデルは、自動車製造会社などの協力を得て名古屋大学で独自に開発した25tトラック有限要素モデルである⁶⁾⁻¹¹⁾。

c) 衝突条件

表-2に示したように防護柵は7つの種別に分類されており¹⁾、種別分類の基準とされているのは衝撃

度である。衝撃度とは衝突車両の持つ防護柵外方向のエネルギーのことである。防護柵に車両が衝突した時、車両の持つ防護柵直角方向のエネルギーを全て防護柵が吸収するとして、防護柵が突破されない強度を衝撃度 I_s に換算して分類されている。本研究で対象とする防護柵は A 種に分類され、車両重量 25tf (245kN)、衝突速度 45km/h、衝突角度 15 度で車両の衝突解析を行う。また、図-22 に示すように、モデルの防護柵は 15 本の支柱によって構成されており、それぞれを P1, P2 のように支柱番号で表記する。各支柱の中央に位置する P8 は車両衝突方向の延長線上の支柱であり、これを CP (Cross Point) 支柱とする。

(2) 数値解析結果

車両衝突時及び衝突後の車両モデルの 0.0 秒から 1.5 秒までの挙動を図-23 に示す。表-5 は各タイプの衝突前後の速度と角度を示しており、() 内の数字は衝突前に対する衝突後の割合 (%) を示している。また、図-24 には車両衝突時の各支柱の水平変位の時刻歴応答、図-25 には各支柱の残留変位を示す。さらに図-26 には各支柱の水平荷重の時刻歴応答を示す。変位量は防護柵支柱の頂部での値であり、衝突荷重は支柱に発生する防護柵直角方向の荷重である。衝突荷重は、周波数を 100Hz のローパスフィルタで処理を行ったものである²⁴⁾。

a) 設置基準の要求性能

本研究では大型トラックを用いる衝突解析を行っており、車両の逸脱防止性能と車両の誘導性能の 2 つの要求性能に対する性能照査を行う。

車両の逸脱防止性能は、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 以内とされている¹⁾。本解析では M type と R type 共に、最大水平変位は 300 mm 以下であったため、両タイプ共に車両の逸脱防止性能を満足する。

車両の誘導性能として、設置基準では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規定されている¹⁾。ここ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。表-5 から、M type と R type の解析結果

は共に、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 割以内に保っている。また、図-23 から車両が防護柵によって滑らかに誘導されている事が示されている。これらのことから、M type と R type 共に車両の誘導性能を満足する事が分かる。

b) 新型防護柵の衝突性能

図-24 (a) から P8(CP)における各タイプの最大水平変位量を比較すると、M type, R type 及び N type は 114mm, 70mm 及び 63mm であり、M type と R type は、N type よりも約 81 %と約 11 %大きい結果となった。また、図-24 (b) から P7 における各タイプの最大水平変位量を比較すると、M type, R type 及び N type は 159mm, 119mm 及び 120mm であり、M type は、N type よりも約 33 %大きい結果となったが、R タイプは N タイプよりも約 1 %小さい結果となった。

図-25 の残留変位の比較からは、M type と R type は、N type より発生する変位量が大きい事が分かった。また、R type は他の 2 タイプに比べ、車両衝突付近のみの支柱だけでなく、防護柵全体の支柱に変位が発生している。これは、R type 支柱の引張フランジ下部のくびれが伸びる変形が、防護柵全体の支柱で発生した影響と考えられる。R type は防護柵全体に変形が発生するため、効率的にエネルギー吸収が行われる構造であると考えられる。

また、図-26 (a) から P8(CP)における各タイプの最大水平荷重を比較すると、M type, R type 及び N type は 41.5kN, 53.0kN 及び 65.9kN であり、M type と R type は、N type よりも約 37 %と約 20 %小さい結果となった。図-26 (b) から P7 における各タイプの最大水平荷重を比較すると、M type, R type 及び N type は 78.2kN, 63.5kN 及び 72.8kN であり、R type は N type よりも約 13 %小さい結果となったが、M type は N type よりも約 7 %大きい結果であった。

結果として、以上の各タイプの最大水平変位、最大水平荷重、残留変位の比較から、新型防護柵支柱を防護柵に配した場合でも水平変位が大きく水平荷重が小さくなる傾向を示すことから、緩衝性に優れた衝突性能を発揮する事を明らかにした。

5. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 景観性を向上させるために開発された、支柱背面圧縮部に横ねじれ座屈を生じさせる新し

- い変形特性を持った, 2種の橋梁用ビーム型防護柵の支柱に対し静荷重実験を行い, 種別A防護柵としての部材性能を満足している事を明らかにした.
- 2) 新型防護柵支柱に対する静荷重実験の数値解析を行った結果, 実験値と良い一致を示し, 数値解析シミュレーションが静荷重実験を補完する可能性を示した.
 - 3) 2種の新型防護柵支柱に対して重錘衝突実験を実施し, 衝突性能に対しても十分な性能を保持している事を明らかにした.
 - 4) 重錘衝突実験の数値解析によって2種の新型防護柵支柱の衝突性能の検討を行った結果, 数値解析による衝突性能は実験と良い一致を示した.
 - 5) 重錘衝突解析によるエネルギー吸収分布の比較から, 従来型支柱は支柱下部のくびれ部分の局部座屈によって, また, 2つの新型防護柵支柱は背面圧縮部の横ねじれ座屈変形によって, 主として衝突エネルギーを吸収していることを定量的に明らかにした.
 - 6) 2種の新型防護柵支柱の中で, 前面フランジ下部にくびれ部を有するRタイプは, 背面フランジ部の横ねじれ座屈に加え, そのくびれ部が伸びて衝突エネルギーを吸収する事を定量的に明らかにした.
 - 7) 新型防護柵支柱を使用した防護柵モデルを作成し, 車両衝突解析による衝突性能の検討を行った結果, 防護柵設置基準の要求性能を満足し, 防護柵として緩衝性に優れた衝突性能を発揮する事を明らかにした.

参考文献

- 1) 日本道路協会: 防護柵の設置基準・同解説, 丸善, 2008.
- 2) NCHRP Report 350 Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features, National Cooperative Highway Research Program, National Academy Press, 1993.
- 3) Wekezer, J., Oskard, M., Logan, R. and Zywiec, E.: Vehicle Impact Simulation, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.119, No.4, pp.598-617, 1993.
- 4) Miller, P. and Carney, J.: Computer Simulation of Roadside Crash Cushion Impacts, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.123, No.5, pp.370-376, 1997.
- 5) 日本道路協会: 防護柵の設置基準・同解説, 丸善, 1998.
- 6) 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.
- 7) Itoh, Y., Usami, K., Sugie, M. and Liu, C.: Numerical Analyses on Impact Performance of Steel and Aluminum Alloy Bridge Guard Fences, *Structures Under Shock and Impact II*, pp.385-394, WIT Press, 2000.
- 8) 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.1707-1718, 2001.
- 9) Itoh, Y., Liu, C. and Kusama, R.: Modeling and Simulation of Collisions of Heavy Trucks with Concrete Barriers, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.133, No.8, pp.462-468, 2007.
- 10) 伊藤義人, 劉斌: FPC 防護柵の性能照査型設計に関する研究, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.207-217, 2004.
- 11) 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, pp.353-366, 2003.
- 12) 日本総合研究所: LS-DYNA Version 971 User's Manual Volume 1, 2007.
- 13) 日本総合研究所: LS-DYNA Version 971 User's Manual Volume 2, 2007.
- 14) 日本総合研究所: LS-DYNA 使用の手引き Second Edition, 2004.
- 15) 日本道路協会: 防護柵の設置基準・同解説, 丸善, 2004.
- 16) 国土技術研究センター: 景観に配慮した防護柵の整備ガイドライン, 2004.
- 17) Fukumoto, Y. and Itoh, Y.: Statistical Study of Experiments on Welded Beams, *Proc. of ASCE*, ST1, Vol.107, pp.89-103, 1981.
- 18) Itoh, Y.: Ultimate Strength Variations of Structural Steel Members, Doctoral Thesis, Nagoya University, 1985.
- 19) 伊藤 登, 天野光一, 横山公一, 山口 智, 柴田康博: 鋼製車両用橋梁用防護柵のデザインと開発, 景観・デザイン研究講演集, No.1, pp.150-153, 2005.
- 20) 伊藤 登, 横山公一, 高堂 治: 新たな変形特性による鋼製橋梁用車両防護柵の開発, 景観・デザイン研究講演集, No.3, pp.66-72, 2007.
- 21) SIMULIA 社: Abaqus Analysis User's Manual Version 6.9, 2007.
- 22) 土木研究センター, 全国高欄協会, 日本アルミニウム協会: 「薄型地覆への橋梁用車両防護柵用アンカー施工法」に関する研究会報告書, 2010.
- 23) 伊藤義人, 劉斌, 宇佐美康一, 草間竜一, 貝沼重信: 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, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.337-353, 2004.
- 24) 土木学会: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 構造工学シリーズ15, 2004.
- 25) 土木研究センター: 橋梁防護柵衝突試験評価業務報告書, 2010.
- 26) 伊藤義人, 宇佐見康一: 橋梁用ビーム型構成防護柵の性能および設計方法に関する考察, 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.51-56, 2000.

(2011. 9. 26 受付)

STUDY ON COLLISION PERFORMANCE OF
NEW BRIDGE RAILING GUARD FENCES ALLOWING FOR THE VIEW

Yoshito ITOH, Seiji ITOH, Yasuo KITANE and Osamu TAKADOH

The Japanese design specifications of guard fences were revised in 2004. Since this revision, it has been regulated to improve the choking rate from vehicles, and also to satisfy the requirements of the design specifications, a new bridge railing guard fences are designed. This study verified that the impact performance of the fence posts of new bridge railing guard fences satisfied the performance requirements of the design specifications. By comparing the new and existing types of fence posts, it was quantitatively verified that the fence posts of new types absorbed the impact energy by the lateral-torsional buckling behavior at the compression parts, and had better shock-absorbing properties than the fence post of existing types.