

コンクリート製防護柵の車両衝突数値解析に関する研究

Study on numerical collision analyses of concrete guard fences

伊藤義人*, 服部良平**, 劉斌***, 草間竜一****

Yoshito Itoh, Ryouhei Hattori, Liu Bin and Ryuichi Kusama

*工博, 名古屋大学大学院教授, 工学研究科地圏環境工学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

** 大学院生, 名古屋大学大学院 工学研究科地圏環境工学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

***大学院生, 名古屋大学大学院博士課程 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

****工修, (株)トヨタテクノサービス (〒470-0334 豊田市花本町井前 1-21, 当時大学院生)

The performance-based design concept has been implemented in the code for guard fence designs in Japan, in which the full-scale collision experiments for checking the performances of guard fences are required. However, the experiments need huge time and cost, and the performance-based design has not been prevalent. The numerical simulation of the full-scaled collision instead of experiments is expected to check the performance in the design. In this study, appropriate FEM models of the vehicle and the concrete guard fences are developed to simulate the field collision experiments. Comparing the results of the simulations with those of the experiments, it is shown that the numerical analyses can be used for checking the performances of concrete guard fences and behaviors of the vehicle.

Key Words: concrete guard fence, vehicle collision, numerical analysis, strain rate effect

キーワード: コンクリート製防護柵, 車両衝突, 数値解析, ひずみ速度効果

1. はじめに

近年, 道路交通の高速化や車両の大型化, 高重心化が進み, それに伴い防護柵により高い安全性能が求められている。さらに, 環境や地域特性および景観を配慮した構造や形式など, 防護柵の要求性能が多様化している。それらの背景から平成11年4月に防護柵の設置基準¹⁾が改定され, 従来の構造諸元等の仕様を規定する仕様規定方式から, 防護柵の有すべき性能を規定する性能規定方式へと変更された。新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である。これらの性能を有していればどのような構造諸元や材料でも良いという性能照査型設計が導入されたことにより, 防護柵の設置箇所によって異なる要求性能に応じた防護柵の開発が可能となった。

コンクリート製防護柵はコンクリートの弾性限界内での変形しか見込まない剛性防護柵である。車両衝突エネルギーは, 主として車両の変形のみで吸収されるため, 狭い幅員の区間にも設置可能で, 車両の逸脱防止性能にも優れている。さらに, 安価であり, 維持補修の容易さも利点として挙げられる。ただし, コンクリート製防護柵は, 他の

タイプの防護柵より衝突車両の乗員に危険であることからこれまで積極的に用いられてこなかったと文献 9) で述べられている。

車両用防護柵は区間ごとの交通の状況に応じて各種の防護柵が設置される¹⁾。乗員の人的被害の防止を目的として防護柵を設置する区間には, 車両と防護柵の両方の変形を見込んで車両衝突エネルギーを吸収させる車両乗員の安全性能を重視したたわみ性防護柵が設置される。大半の道路がこの区間に該当する。しかし, 橋梁や高架などの構造物上や幅員の狭い分離帯などの防護柵の変形量が制限される区間や, あるいは鉄道やガスタンクなどの危険物貯蔵施設との交差部や近接区間など, 防護柵が突破された場合に重大な二次被害が生じると予想される区間などには, 限られた設置スペースであっても衝突車両に突破されない強度が必要であり, 車両の逸脱防止性能を重視したコンクリート製防護柵が用いられてきた。

防護柵の設置基準では原則として, 防護柵の性能は実車衝突実験にて照査される。しかし, 実車衝突実験は多大な時間とコストがかかり, パラメトリックな検討も困難であるなどの問題を抱えており, 性能照査型設計の障害となっている。そこで実車衝突実験を補完するため車両衝突数値解析のモデルの確立が強く望まれている。

名古屋大学では平成9年度より、車両総重量25t(25,000kg)の大型トラックの有限要素モデルを独自に開発し、防護柵に対する車両衝突数値解析が行われ、橋梁用鋼製防護柵やアルミニウム合金製防護柵の数値解析による性能照査の有効性を明らかにした^{2,3,4)}。本研究ではコンクリート製防護柵の数値解析モデルを作成し、解析結果と平成10年6月に実施された実車衝突実験の実験結果と比較し、解析モデルの精度を検証するとともに、コンクリート製防護柵の性能照査の可能性を検討する。

なお、本研究における解析には汎用解析プログラムLS-DYNA Ver.960を用いた。

2. 数値解析モデルに関する検討

2.1 対象とする実車衝突実験と防護柵

本研究で対象としたのは、高速化対応型コンクリート製防護柵の開発に関する研究において実施された2種類の防護柵への大型トラックによる実車衝突実験⁹⁾である。実験の対象となったのは図-1(a)に示す単スロープ型コンクリート製防護柵と図-1(b)に示すフロリダ型コンクリート製防護柵である。これらの防護柵は直壁型コンクリート製防護柵の車両衝突エネルギーの緩衝効果が少ないという

短所を補うため、コンクリート壁の前面形状に工夫を加え、緩衝効果を高めたものである。対象とした図-1に示す防護柵は、土中埋め込み用の鉄筋コンクリート製防護柵であり、実験に使用された供試体の長さは単スロープ型が51m、フロリダ型が50mである。また、防護柵の土中への埋め込み深さは300mmである。実験の衝突条件は、単スロープ型およびフロリダ型ともに、防護柵の強度が最も高く、最も危険な区間に設置される種別SS¹⁵⁾に相当する車両重量20t(20,000kg)、衝突速度100km/h、衝突角度17度である。車両中心線と防護柵中心線の交差点(クロスポイント)は端部から20mの位置である。

2.2 基部の支持条件

埋め込み部の地盤の抵抗を考慮するために、ばね要素によって地盤反力をモデル化した。考慮したのは、防護柵側面の柵直角水平方向、底面での鉛直方向および底面での水平方向である。地盤ばねモデルの概要を図-2に示す。まず、防護柵側面についてはアスファルト舗装による地盤抵抗と粒調碎石による地盤抵抗を考慮できるように片側2本、計4本のばねでモデル化した。アスファルト舗装部にあたる上側2本は1mあたり15kN/mmのばね定数とし、粒調碎石部にあたる下側2本は1mあたり5kN/mmのばね定数とした。これは過去の土中埋め込み用コンクリート製防護

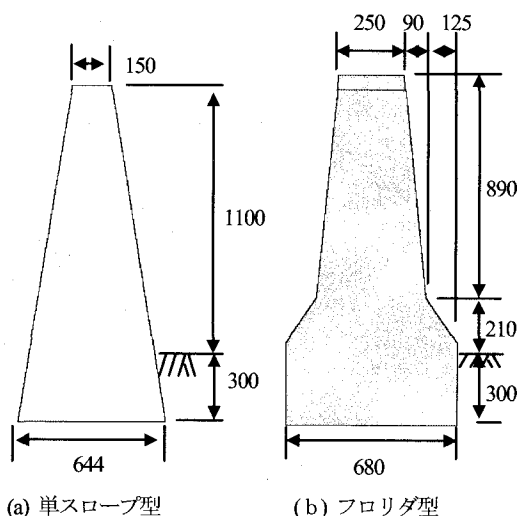


図-1 対象としたコンクリート製防護柵(単位: mm)

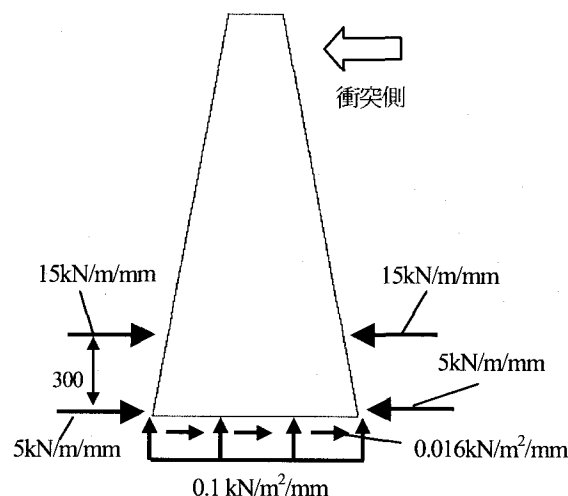


図-2 ばねによる地盤反力のモデル化

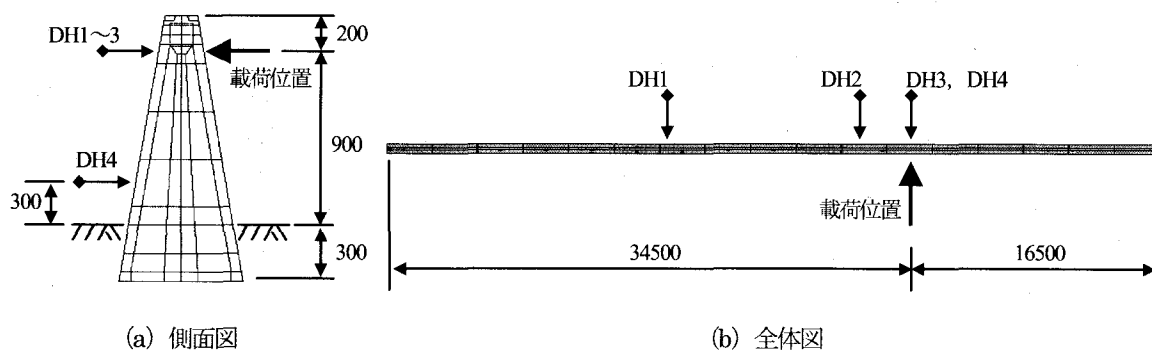


図-3 単スロープ型コンクリート製防護柵の静荷重試験概要(単位: mm)

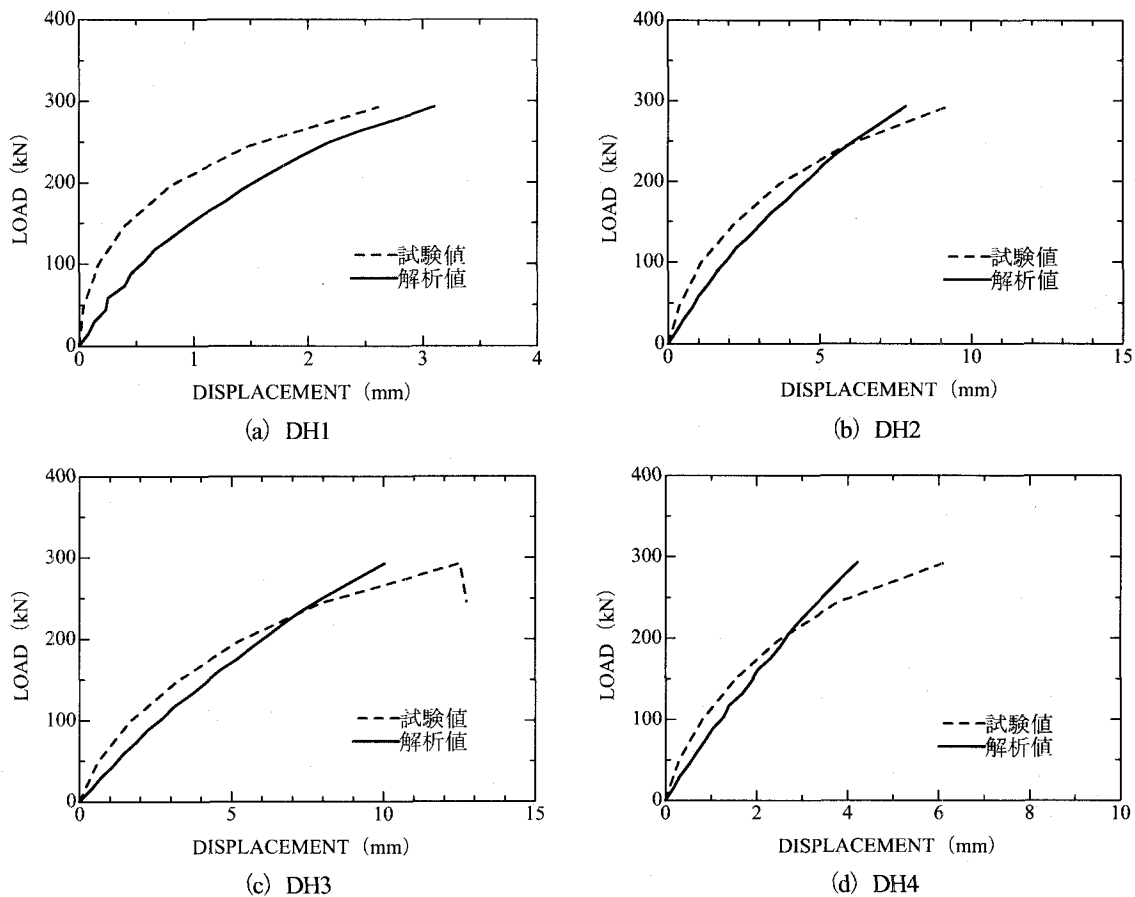


図4 各点における荷重－変位関係の比較

柵に対する実車衝突実験から経験的に得られている値である。次に底面鉛直方向および水平方向についても防護柵メーカーが一般的に使用している値である。なお、防護柵側面水平方向ばねと底面鉛直方向ばねについては圧縮された場合のみ抵抗するようになっている。

この地盤ばねモデルの妥当性を検討するために、実車衝突実験と同様に、高速化対応型コンクリート製防護柵の開発に関する研究において実施された図3に示すような単スロープ型の防護柵に対する静荷重試験⁹⁾の数値解析モデルを作成し、数値解析を行った。地盤ばねについては図-2に示す値を用いてモデル化を行った。防護柵全長は51m、埋め込み深さはフロリダ型防護柵と同様に300mmである。静的荷重载荷した防護柵躯体の図3中に示すDH1～DH4のポイントでの荷重－変位関係を図4に示す。防護柵のコンクリート自身の塑性変形もあるので完全な線形の荷重－変位関係は示さない。また、地盤反力として弾性ばねを用いているため全体的に剛性の低下が小さくなった。しかし、全体的な防護柵の挙動はよく再現できていると考えられ、車両の衝突解析においても前述した地盤ばねモデルを使用する。

ただし、今回対象とした静荷重試験の全体的な防護柵の挙動は再現できたが、本研究で開発した地盤ばねモデルは、非線形ばねを用いていない点や、経験的に得たばね定数を用いている点から、あらゆる地盤において適用できるとは

言えない。よって、地盤反力をより正確に反映した汎用性の高い地盤反力モデルの開発と、地盤状態によるばね定数の算出は今後の課題である。

2.3 コンクリートのひずみ速度効果

鋼材と同様にコンクリートにもひずみ速度効果が存在し、これまでの研究で様々な構成式が提案されてきた^{16)~22)}。しかし、LS-DYNA Ver.960には式(1)で示すDrucker-Pragerの破壊基準でひずみ速度効果を考慮できる材料モデルは備わっていない。

$$\sqrt{J_2} + \alpha I_1 = \kappa \quad (1)$$

ここで、 I_1 ：応力の第一不変量、

J_2 ：偏差応力の第二不変量、

$$\alpha = \frac{df'_c - df_t}{\sqrt{3}(df'_c + 2df_t)},$$

$$\kappa = \frac{\sqrt{3} \cdot df'_c \cdot df_t}{df'_c + 2df_t},$$

df'_c ：コンクリートの動的圧縮強度、

df_t ：コンクリートの動的引張強度

そこで、本研究ではユーザーサブルーチンを開発し、式(2)、式(3)に示す山口らの公式^{16),17),18)}によるコンクリートのひずみ速度効果を考慮した Drucker-Prager 構成則材料モデルを LS-DYNA に組み込み、数値解析を行った。

圧縮について：

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_{\alpha\alpha} > 2.44 \times 10^{-5} / \text{sec} : \\ \quad d f_c' / f_c' = 1.021 - 0.05076(\log \dot{\gamma}_{\alpha\alpha}) + 0.02583(\log \dot{\gamma}_{\alpha\alpha})^2 \\ \dot{\gamma}_{\alpha\alpha} \leq 2.44 \times 10^{-5} / \text{sec} : \\ \quad d f_c' / f_c' = 1.0 \end{cases} \quad (2)$$

引張について：

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_{\alpha\alpha} > 2.44 \times 10^{-5} / \text{sec} : \\ \quad d f_t' / f_t' = 0.8267 - 0.02987(\log \dot{\gamma}_{\alpha\alpha}) + 0.04379(\log \dot{\gamma}_{\alpha\alpha})^2 \\ \dot{\gamma}_{\alpha\alpha} \leq 2.44 \times 10^{-5} / \text{sec} : \\ \quad d f_t' / f_t' = 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $d f_c'$ ：コンクリートの動的圧縮強度、
 f_c' ：コンクリートの静的圧縮強度、
 $d f_t'$ ：コンクリートの動的引張強度、
 f_t' ：コンクリートの静的引張強度、
 $\dot{\gamma}_{\alpha\alpha}$ ：八面体せん断ひずみ速度 ($10^6/\text{sec}$ 単位)

ユーザーサブルーチンでは、前のタイムステップのひずみおよびひずみ速度から、山口らの公式を用いて動的引張強度および動的圧縮強度を求め、また現在のタイムステップの応力を算出して、式(1)に示す Drucker-Prager 破壊基準に従って降伏判定し、降伏している場合は偏差応力を修正

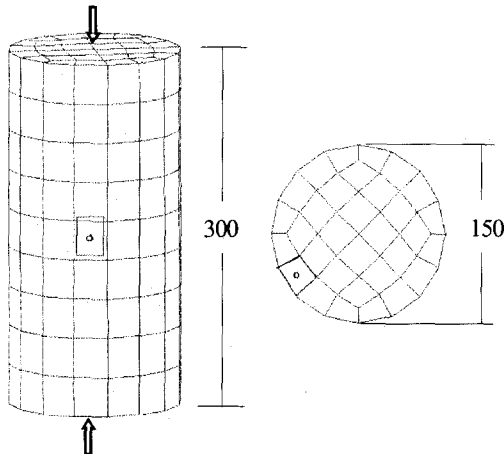


図-5 コンクリート供試体モデル (単位: mm)

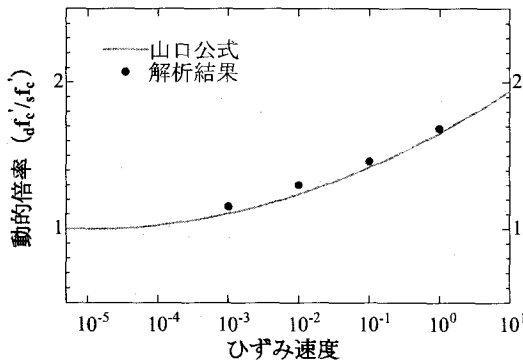


図-6 ひずみ速度別の圧縮強度増加率

するようにプログラムされている。

このユーザーサブルーチンの有効性を検討するために、図-5に示すようなコンクリート標準供試体モデルを作成し、動的圧縮解析を行って、図-5に示すモデル中央の要素における載荷方向の応力-ひずみ関係を調べた。ひずみ速度による圧縮強度の増加率を図-6に示す。図-6をみると解析値は山口らの公式によく従っている。よって、本研究で開発したひずみ速度効果を考慮した Drucker-Prager 構成則材料モデルのユーザーサブルーチンは有効に機能していると考えられる。ただし、このモデルにはコンクリートのひび割れが考慮されておらず、より詳細なユーザーサブルーチンの開発が今後の課題である。

2.4 トラックモデル

衝突車両モデルについては名古屋大学で独自に開発されたトラックモデル^{1, 2, 3)}を用いた。トラックの有限要素モデルを図-7に、その諸元を表-1に示す。このトラックモデルは車両総重量 25t(25,000kg)のトラックを参考にモデル化されたものに改良を加えたものである。本研究で対象としている実車衝突実験で用いられたトラックは車両総重量 20t(20,000kg)で、車両形状などに細かな差異はあるが基本的な構造は同じなので、車両重心を合わせるように荷台積載重量を調節し車両総重量を 20t(20,000kg)とした。また、衝突する際、車両の変形によるエネルギー吸収が車両挙動に大きく影響を及ぼすので、車両の変形をよく再現できるように、図-7に示すように防護柵と衝突する部位は他の部位よりもメッシュを細かくしてある。また、トラックと防護柵の間の接触についてはペナルティ法を用いた面-面の自動接触機能¹⁴⁾を使用した。

トラックの部材に金属部材は使用されており、ひずみ速度効果は存在する。既往の研究²³⁾によると、トラック鋼

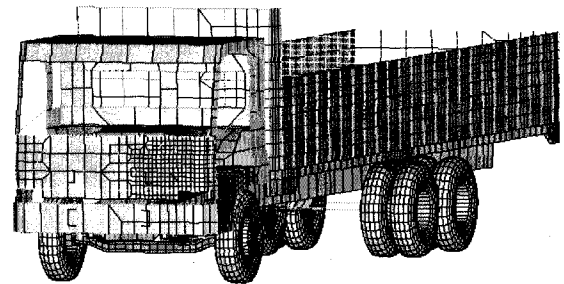


図-7 トラックモデルの全体図

表-1 トラックモデル諸元

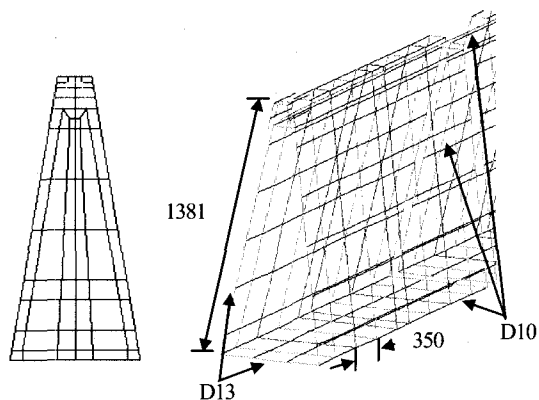
節点数	16095
要素数	15505
ヤング率 E (GPa)	鋼: 206 アルミニウム: 70
ポアソン比 ν	鋼: 0.3 アルミニウム: 0.34
降伏応力 σ _y (MPa)	鋼: 235 アルミニウム: 248

材のひずみ速度効果は防護柵の柵外変位などの挙動に影響を及ぼすことが分かっている。よって、本研究の解析結果には文献 2) に示す鋼材のひずみ速度効果を考慮したトラックモデルの結果のみを示す。

3. 単スロープ型コンクリート製防護柵に関する数値解析シミュレーション

3.1 解析モデル

衝突解析で用いる単スロープ型コンクリート製防護柵モデルを図-8 に、その諸元を表-2 に示す。鉄筋は防護柵長



(a) 躯体側面図

(b) 鉄筋配置図

図-8 単スロープ型コンクリート製防護柵モデル(単位: mm)

表-2 防護柵モデルの諸元

タイプ	剛性防護柵
節点数	16179
要素数	20579
要素タイプ	1点積分 Hughes-Liu Beam 要素
	1点積分 Solid 要素

手方向の横筋に D10 が配置され、その他の横筋、縦筋に D13 が配置されている。鉄筋とコンクリートについては節点を共有させ完全付着としてモデル化した。コンクリート部分には Solid 要素を用い、鉄筋部分には Hughes-Liu Beam 要素 (この要素は軸方向の積分点は要素中心の一点のみなので CPU の負担が少ないなどの利点がある¹⁴⁾) を用いた。防護柵モデルの材料定数については、実車衝突実験時の材料試験によって得られた表-3 に示す値を使用した。基部支持条件については、単スロープ型コンクリート製防護柵への実車衝突実験は 2.2 で言及した静荷重試験と同一地盤で行われたので、図-2 に示す地盤ばねモデルを用いた。

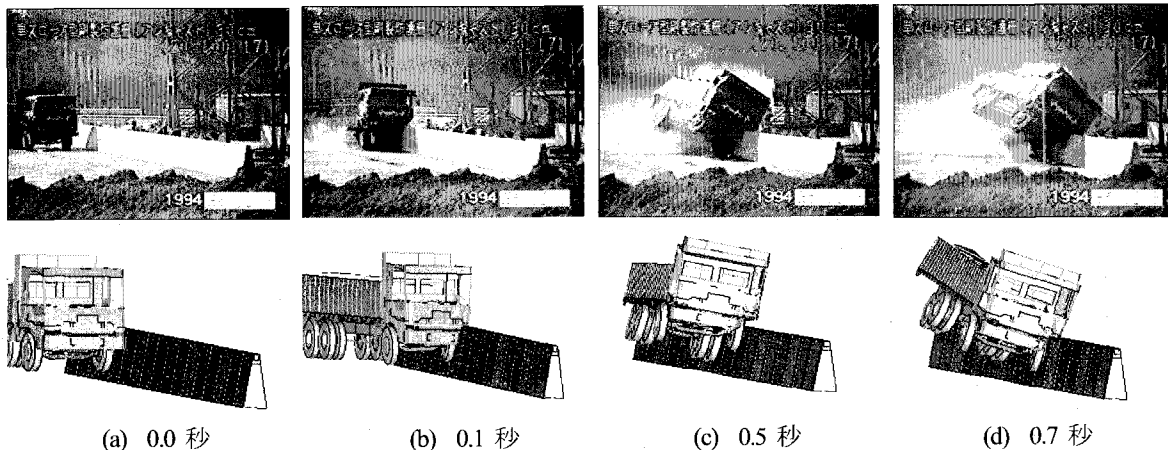
3.2 車両挙動

実車衝突実験と衝突解析との車両挙動の比較を図-9 に示す。防護柵の新設置基準では車両の誘導性能の照査で、車両は防護柵衝突後に横転などを生じないことと定められている。図-9 の実車衝突実験では、車両は柵外に飛び出してはいないものの、防護柵に乗り上がり転倒し、車両は正常に誘導されていない。よって、この防護柵は規定されている防護柵の有すべき性能の車両の誘導性能を有していないと判断できる。

解析では、実験と同様に車両が防護柵から離脱することなく、最終的な速度は 79.4km/h となり、実験結果の 84.7km/h とほぼ一致した。図-9 に示すように、全体的に解析結果の方が防護柵衝突後の車両の傾きが小さくなったが、防護柵に乗り上がり転倒し、車両は正常に誘導されないという挙動は一致した。よって、本研究で対象とした土中埋め込み 300mm の単スロープ型コンクリート製防護柵は、数値解析シミュレーションによる防護柵の性能照査か

表-3 コンクリート製防護柵の材料定数

	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	降伏応力 (MPa)
コンクリート	18.4	34.2	—
鉄筋 D10	167	—	373.8
鉄筋 D13	170	—	407.6



(a) 0.0 秒

(b) 0.1 秒

(c) 0.5 秒

(d) 0.7 秒

図-9 車両挙動の比較

らも車両の誘導性能を有していないと判断できる。

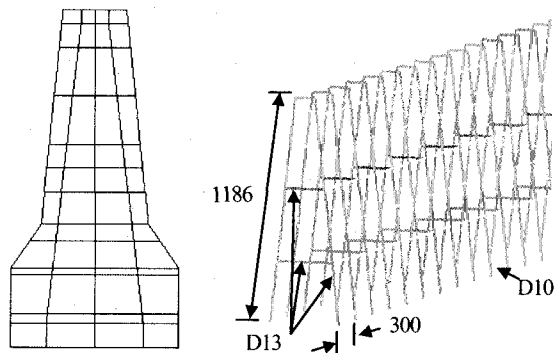
以上より、車両が防護柵衝突後に転倒し、防護柵が車両の誘導性能を有していないと判断できるケースも解析で再現可能であることを示した。

4. フロリダ型コンクリート製防護柵に関する数値解析シミュレーション

4.1 解析モデル

3. において、単スロープ型コンクリート製防護柵の実車衝突実験のシミュレーション解析によって、本研究で作成したコンクリート製防護柵の車両衝突数値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。ここでは、文献9)で単スロープ型コンクリート製防護柵と同条件で行われた別タイプのコンクリート製防護柵の実車衝突実験にも適用できるかどうかを検証する。

衝突解析で用いたフロリダ型コンクリート製防護柵モデルを図-10に、その諸元を表4に示す。このモデルも前述した単スロープ型コンクリート製防護柵モデルと同様に、防護柵長手方向の横筋にD10が配置され、その他の部分にD13が配置されている。鉄筋とコンクリートは節点を共有させ完全付着とし、コンクリート部分にはSolid



(a) 躯体側面図

(b) 鉄筋配置図

図-10 フロリダ型コンクリート製防護柵モデル(単位:mm)

要素を、鉄筋部分にはHughes-Liu Beam要素を用い、防護柵モデルの材料定数については表-3に示す値を用いた。コンクリートのひずみ速度効果に関しては2.3で記述したDrucker-Prager構成則を考慮したユーザーサブルーチンを用いた。基部支持条件については、フロリダ型コンクリート製防護柵への実車衝突実験も単スロープ型コンクリート製防護柵と同一地盤で行われたので、ここでも図-2に示す地盤ばねモデルを用いた。

4.2 車両挙動

実車衝突実験と衝突解析の車両挙動の比較を図-11に示す。また、車両挙動についての定量的な比較を表-5に示す。一次衝突後の車体前部の浮き上がりや二次衝突の際の防護柵と荷台後部の衝突など車両の挙動はよく一致しており、車両は横転することなく正常に誘導されている。

表-5より、離脱速度と離脱角度は実験と数値解析でほぼ一致した。数値解析結果では離脱速度は衝突速度の77%、離脱角度は衝突角度の7%となり、防護柵の新設置基準で車両の誘導性能の照査で定められた離脱速度は衝突速度の6割以上、離脱角度は衝突角度の6割以下という基準を満たした。以上より、本研究の車両衝突数値解析モデルによる車両の誘導性能の照査は可能であると考えられる。

表-4 防護柵モデルの諸元

タイプ	剛性防護柵
節点数	11845
要素数	15703
要素タイプ	1点積分
	Hughes-Liu Beam 要素
	1点積分 Solid 要素

表-5 車両挙動の比較

	実験	解析
離脱速度 (km/h)	78.6	77.0
離脱角度 (度)	1.9	1.4

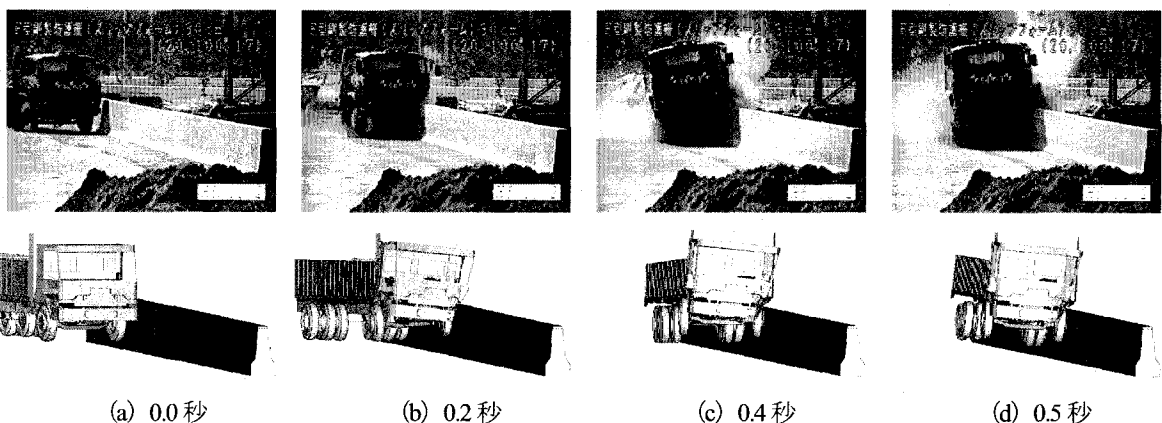


図-11 車両挙動の比較

4.3 防護柵変位

車両の逸脱防止性能の照査について、最も重要なパラメータは防護柵の最大変位である。防護柵の変位は一次衝突（車両の前部が防護柵に衝突する）、二次衝突（車両の後部が防護柵に衝突する）によって発生する。計算時間を節約するために、解析では二次衝突が発生したところで解析を終了させた。実車衝突実験の変位計測位置を図-12に、変位計測位置での柵直角方向変位時刻歴の比較を図-13に示す。図-13より、一次衝突および二次衝突とも、変位は解析でもよく再現されている。二次衝突の変位発生時間がわずかに遅れているが、最大変位量はほぼ等しくなった。

実験では車両の衝突に対して、防護柵全体で抵抗し、端部における変位（DH5）と衝突箇所における変位（DH6）はほぼ同等となった。解析においてもそれは再現できており、DH5とDH6においてはほぼ同じ変位が表れている。また、地覆部のDH7での変位についても実験値と良く一致しており、地盤ばねモデルについても十分に有効であると考えられる。

よって、コンクリート製防護柵の車両逸脱防止性能についても、本研究の数値解析モデルにより照査することが可能であると考えられる。

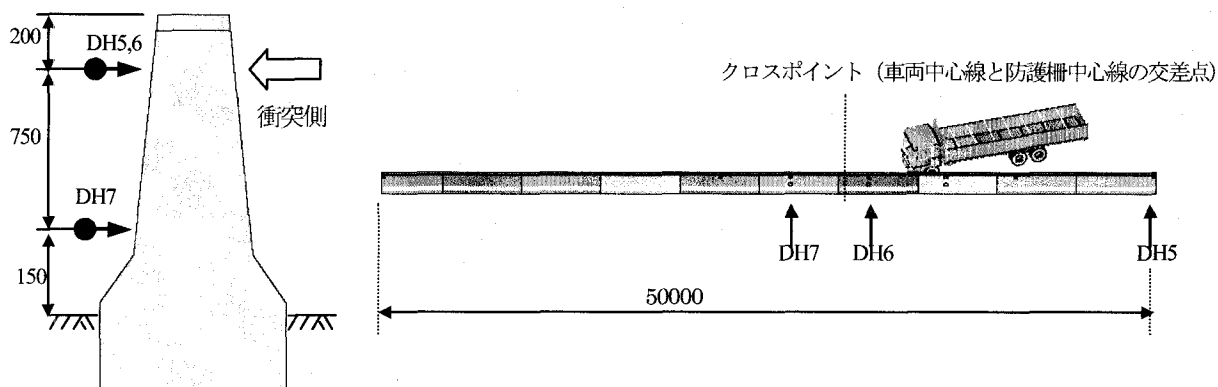


図-12 変位計測位置

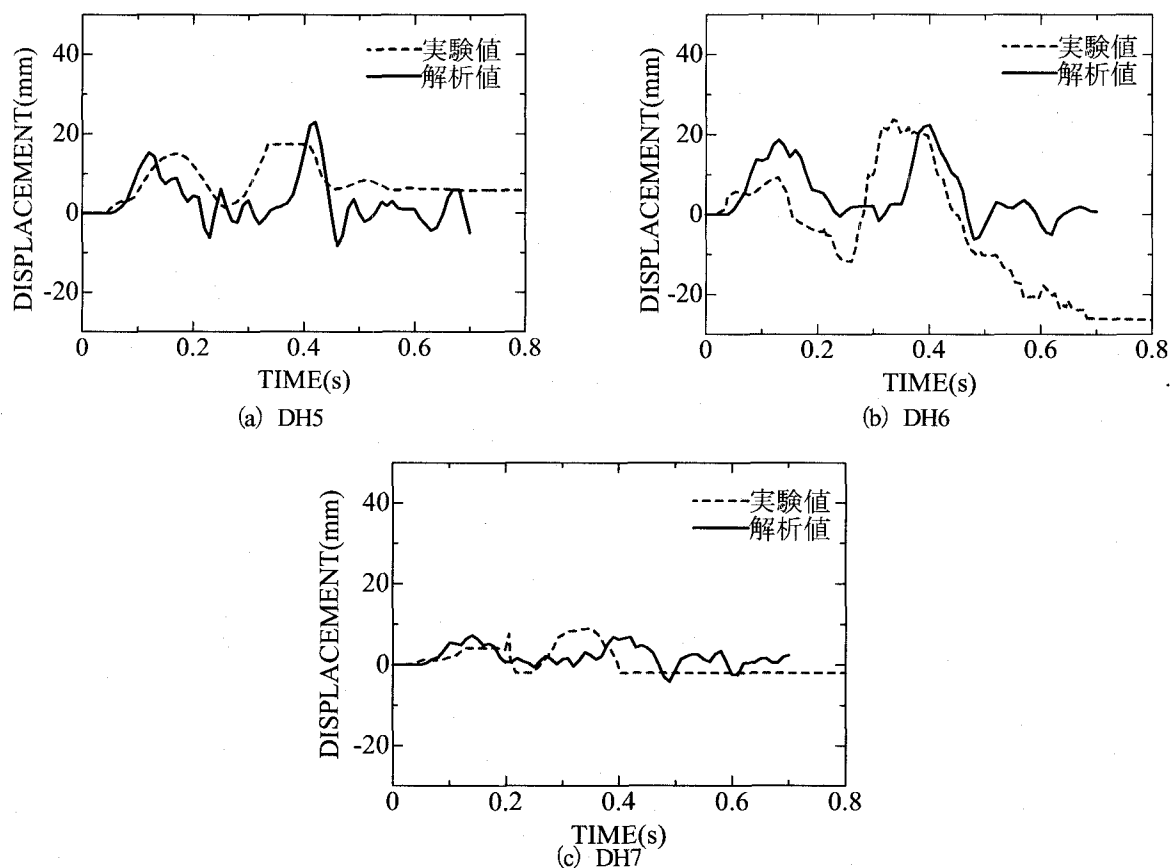


図-13 防護柵の変位時刻歴

4.4 ひずみ速度効果による防護柵の衝撃特性

前述したように、本研究におけるフロリダ型コンクリート製防護柵に関する車両衝突数値解析モデルは車両の逸脱防止性能および車両の誘導性能を照査することが可能である。ここで、コンクリートのひずみ速度効果を考慮しない場合、衝突現象にどのような影響を与えるかを検討する。そのために、4.1 で示した解析モデルのコンクリートのひずみ速度効果を入れた数値解析結果とコンクリートのひずみ速度効果を入れない数値解析結果を比較する。

離脱後の車両挙動の比較を表-6 に示す。離脱速度、離脱角度ともにひずみ速度効果の有無による違いはほとんどなかった。また、防護柵変位についても図-14 に示すようにひずみ速度効果を考慮しない方がわずかに大きくなったが、大きな差はないという結果が得られた。また、防護

柵全体に生じる柵直角方向水平力の時刻歴を図-15 に示す。これについてもほとんど違いはみられなかった。以上より、本研究で対象としたフロリダ型コンクリート製防護柵の数値解析シミュレーションにおいては、規定速度に対する検討だけであればコンクリートのひずみ速度効果を考慮する必要はないと言える。

本研究においてコンクリートのひずみ速度効果の影響が小さかった理由としては、剛性防護柵としてコンクリート自体の塑性変形が小さかったためと考えられる。よって、車両衝突エネルギーが大きくなる場合やコンクリート躯体の構造自体が弱い場合には、車両衝突による防護柵コンクリートの変形が大きくなり、ひずみ速度効果の影響がより顕著に現れてくるものと考えられ、今後の検討課題の一つである。

表-6 車両挙動の比較

	コンクリートのひずみ速度効果あり	コンクリートのひずみ速度効果なし
離脱速度 (km/h)	77.0	79.4
離脱角度 (度)	1.4	0.9

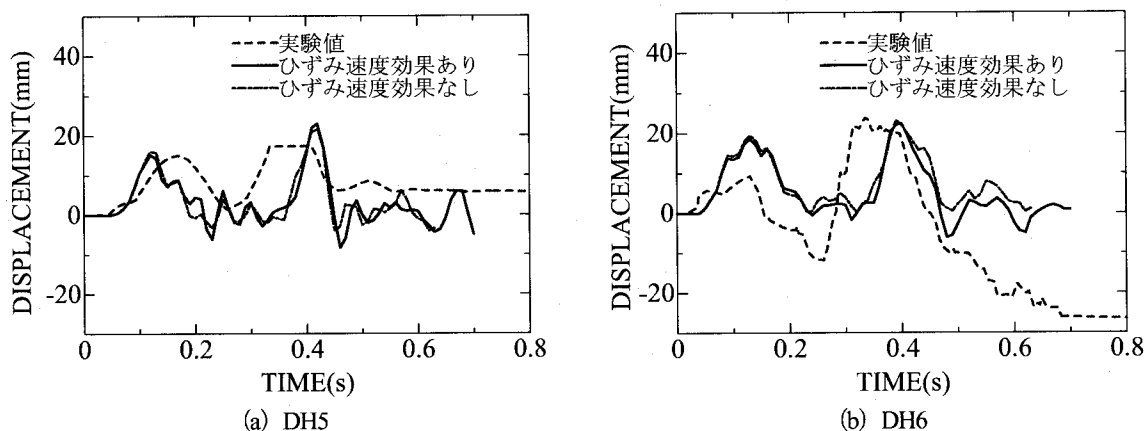


図-14 防護柵の変位時刻歴の比較

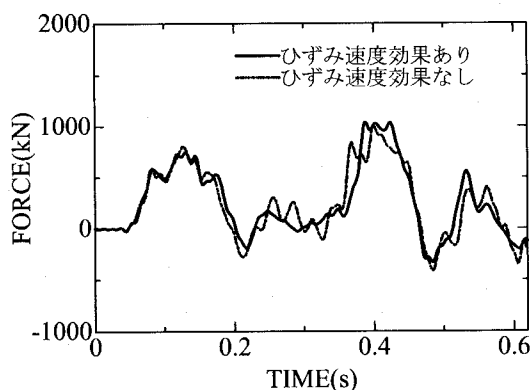


図-15 防護柵に生じる水平力の比較

5. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 土中埋め込み用コンクリート製防護柵の静荷重試験を対象として行った数値解析により、土中埋め込み部の地盤反力については、ばねを用いてモデル化することにより防護柵の変位特性を再現可能であることを示した。
- 2) ユーザーサブルーチンを LS-DYNA に組み込むことによって、コンクリートのひずみ速度効果を考慮した Drucker-Prager 構成則材料モデルを扱えるようにし、ユーザーサブルーチンの有効性を示した。
- 3) コンクリート製防護柵の車両衝突数値解析において、コンクリートのひずみ速度効果の有無による車両および防護柵挙動の変化を検討したが、今回のケースではコンクリートのひずみ速度効果は小さいことがわかった。
- 4) 単スロープ型コンクリート製防護柵に関する車両衝突数値解析によって、実車衝突実験で得られた車両の転倒挙動を再現できることを示した。
- 5) フロリダ型コンクリート製防護柵に関する車両衝突数値解析によって、防護柵変位および車両挙動について、実車衝突実験を十分な精度で再現することができ、防護柵の逸脱防止性能、車両の誘導性能を照査できることを示した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.45A, pp.1707-1717, 2001.
- 4) 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.
- 5) 株式会社日本総合研究所: LS-DYNA Version950 使用の手引き, 2000.
- 6) 建設省土木研究所: 高速化対応型防護柵の研究に関する共同研究報告書一狭幅員中央分離帯用剛性防護柵に関する研究一, 1992.
- 7) 建設省土木研究所: 防護柵衝突シミュレーションに関する研究, 1992.
- 8) 建設省土木研究所, 日本道路公団, 首都高速道路公団, 阪神高速道路公団, 本州四国連絡橋公団: 高重心型防護柵に関する研究一剛性防護柵に共同研究報告書一, 1994.
- 9) 建設省土木研究所: 高速化対応型コンクリート製防護柵に関する共同研究報告書, 1998.
- 10) 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.
- 11) 竹田仁一, 立川博之: 高速圧縮荷重を受けるコンクリートの力学的諸性質とその基本的関係式(構造物および構造材料の高速荷重に対する力学的性質の研究その4), 日本建築学会論文報告集, 第78号, pp.1-6, 1962.
- 12) 田辺忠顕: コンクリート構造, 朝倉書店, pp.4-10, 1992.
- 13) 日本総合研究所: LS-DYNA Version950 使用の手引き, 1999.
- 14) 日本総合研究所: LS-DYNA Version950 USER'S MANUAL, 1999.
- 15) 日本道路協会: 防護柵の設置基準・同解説, 1999.
- 16) 山口弘, 藤本一男: 高圧3軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係, その1 静的載荷, 日本建築学会構造系論文報告集第389号, 1988.
- 17) 山口弘, 藤本一男: 高圧3軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係, その2 高速載荷, 日本建築学会構造系論文報告集第396号, 1989.
- 18) 山口弘, 藤本一男: 鉄筋コンクリート版の衝撃応答に及ぼすひずみ速度効果, 日本建築学会構造系論文報告集第406号, 1989.
- 19) Dilger, W.H., Koch, R. and Kowalczyk, R.: Ductility of plain and confined concrete under different strain rates, ACI Journal, Jan-Feb, Vol.81, No.1, pp.73-81, 1984.
- 20) Holmquist, J., and Johnson, G.R.: A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures, 14th International Symposium on Ballistics, Quebec, pp.591-600, 1993.
- 21) Soroushian, P.: Dynamic constitutive behavior of concrete, ACI Journal, pp.251-259, 1986.
- 22) Soroushian, P. and Choi, K.: Steel mechanical properties at different strain rates, Journal of Structural Engineering, ASME, 113(4), pp.663-673, 1987.

(2003年9月12日受付)