

FPC 防護柵の性能照査型設計に関する研究

Numerical analyses on vehicle collision to FPC guard fences for performance-based design

劉斌*, 伊藤義人**

Bin LIU, Yoshito ITOH

*学生会員 名古屋大学大学院博士課程 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**フェロー会員 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 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

A new type of guard fence named Flexible Precast Concrete (FPC) guard fence has been developed. In this study, FEM models are established for vehicles and FPC guard fences to simulate impact behaviors. Firstly, dynamic tension tests on the spring steel (SUP9) for the flat-springs used in the FPC guard fence are conducted to obtain the stress-strain relationship and the strain rate effect. Secondly, the numerical analyses are carried out using the material parameters obtained from the tension tests. The analytical results are compared with the results of full-scale truck collision experiment, and the FEM models for the FPC guard fence are proved to be valid and practical. As a result, effectiveness for evaluating the performances of the FPC guard fence by numerical analysis results is validated. In addition, the analytical results of the FPC guard fence are also compared with those of the normal type of concrete guard fence, and effectiveness of four improved FPC guard fences is also validated by numerical analysis results.

Key Words: vehicle collision, FPC guard fence, performance-based design, numerical analysis, FEM

キーワード: 車両衝突, FPC 防護柵, 性能照査型設計, 数値解析, 有限要素法

1. はじめに

自動車用防護柵の種別は、大きく剛性防護柵とたわみ性防護柵の2種類に分類され、剛性防護柵はコンクリート製防護柵、たわみ性防護柵は金属製防護柵が一般的である。防護柵の設置基準は、平成11年4月に「仕様規定」から「性能規定」へ改訂され、性能照査型設計の考え方が導入された^{1),2)}。「性能照査型設計」とは、一般に具体的な設計仕様は示されておらず、設計された構造物の保有性能が要求性能レベルを満足していることを実証するとともに、第三者機関に承認されれば、どのような構造形式や構造材料、設計手法、工法を用いてもよいとする設計法である。防護柵の要求性能の項目は、米国の基準と同様に、i) 車両の逸脱防止性能、ii) 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とされた^{2),3)}。

中央分離帯に適用される防護柵については、中央分離帯を乗り越え対向車と衝突する事故が増えていることから、衝突の際に変形量の小さな図-1に示すようなコンクリート製防護柵が多数採用されている。しかし、コンクリート製防護柵は剛性が高すぎるため、たわみ性防護柵と比較し、衝突時の乗員に発生する衝撃が大きく、復旧工事に時間を要する等の問題もある⁴⁾。

国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所では、平成6年度から平成9年度にかけて鋼球による衝突実験とその解析を積み重ね、衝突の際に防護柵の姿

形を抑える機能を保持したまま、人と車への衝撃力を弱め乗員の安全性を確保することのできるコンクリート製のたわみ性防護柵が開発された⁵⁾。平成10年度には実車による衝突実験を実施し、国内初の「防護柵の設置基準」に準拠した中央分離帯用の種別SAm(衝撃度420kJ以上)とSBm(衝撃度280kJ以上)のたわみ性防護柵としての性能が確認された⁶⁾。開発にあたっては、施工時の交通渋滞による影響を最小限にするため、迅速な施工が可能となるようにプレキャスト構造が採用された。この新型防護柵は、Flexible Precast Concrete 防護柵と呼ばれ、その頭文字を取ってFPC 防護柵と略称されている。この形式の防護柵は、国有特許となっており、平成12年度に名阪国道における過酷な道路線形、交通状況、さらに新設置基準の適合を勘案し、名阪国道の一部で設置されている。

FPC 防護柵は、プレキャストコンクリート製防護柵にバネ構造を組み込み、変形性能を持たせたものであり、図-2に示すその構造は、図-1に示す従来の一体型コンクリート製防護柵と大きく異なっている。その特徴や開発時の目標は、主として性能向上、従としては急速施工性を目指したものであった。これは、防護柵の設置基準で定められた4つの性能以外に、維持管理や施工性の要求性能を高めるために考えられるものと言える。具体的な開発上のコンセプトは次のように定められた。

1) 防護柵の性能向上

① 従来の一体型コンクリート製防護柵と同等の

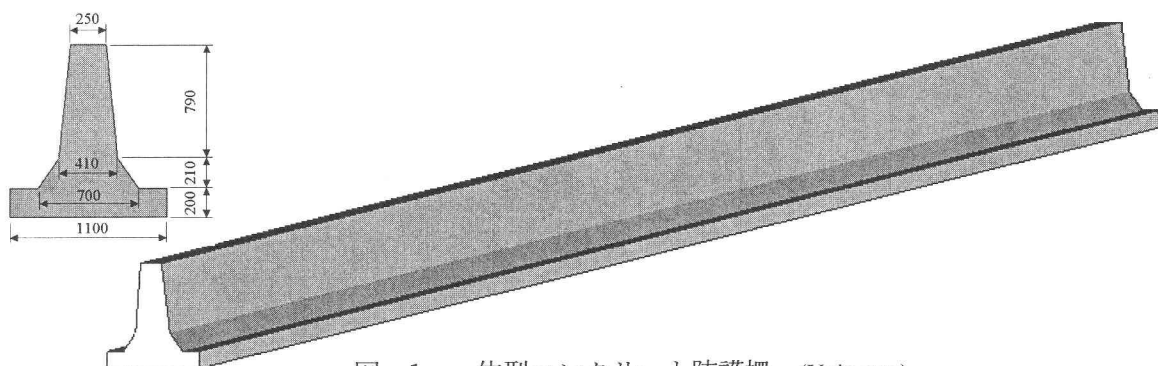


図-1 一体型コンクリート防護柵 (Unit: mm)

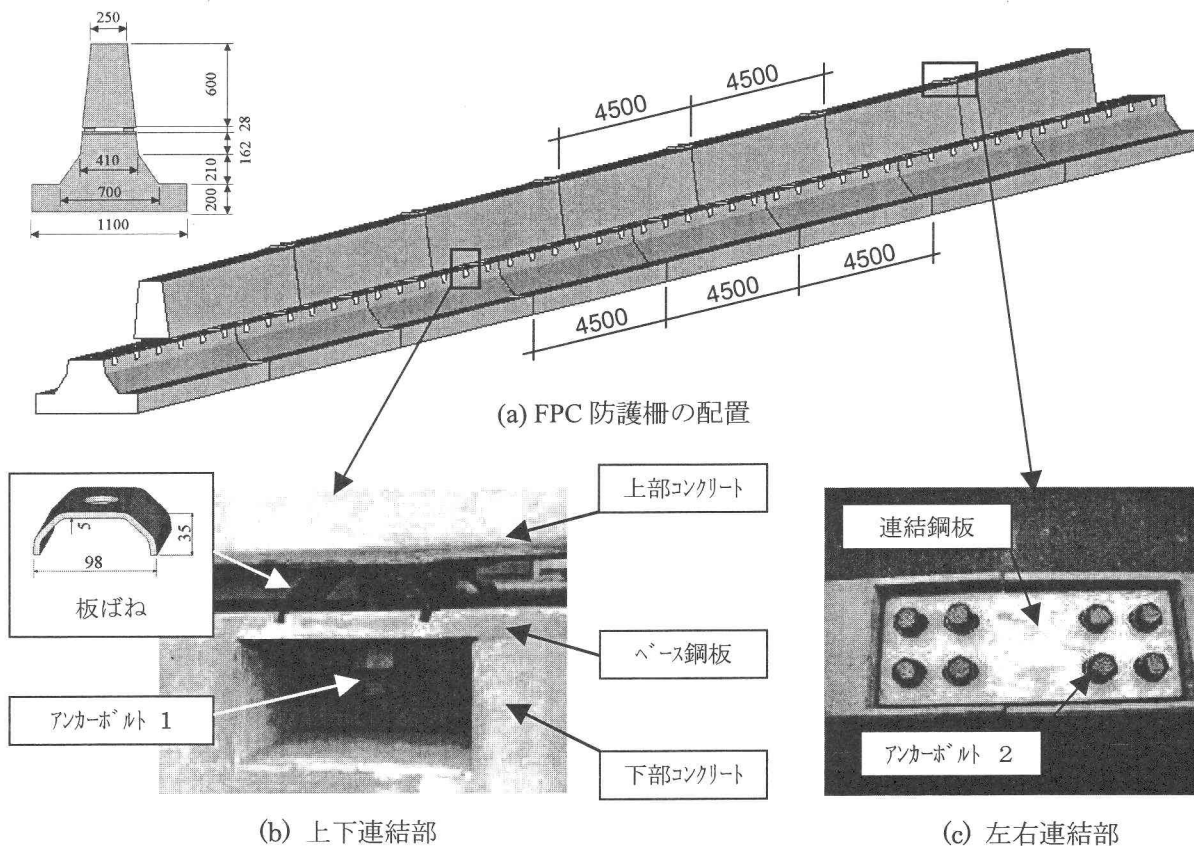


図-2 FPC 防護柵の構造 (Unit: mm)

耐力を有する。

- ② 従来の鋼製防護柵と同等のエネルギー吸収性を持たせる。

2) 急速施工性

- ① 新規設置時の急速施工性確保のため、躯体はプレキャスト化とする。
- ② 損傷時の更新は最小のコストと時間で行えるよう考慮する。

以上のコンセプトに沿う形で開発されたFPC防護柵は図-2(b)に示すように、上下部に分かれたプレキャストコンクリートエレメントは、その間に台形の形状の板ばねを入れ、アンカーボルトで締結している。また、図-2(a)に示すように、上下部コンクリートのそれぞれ長さ 4.5m のエレメントを千鳥積に配置し、損傷時は上部プレキャストコンクリートエレメントと板ばねを交換することによって復旧する

表-1 FPC 防護柵の構成部材

部材	材料
上部コンクリートエレメント	SFRC (スチールファイバーコンクリート)
下部コンクリートエレメント	SFRC (スチールファイバーコンクリート)
ベース鋼板	SS400 (一般構造用鋼)
アンカーボルト 1	SS400 (一般構造用鋼)
アンカーボルト 2	SS400 (一般構造用鋼)
板ばね	SUP9 (ばね鋼) ⁷⁾
連結鋼板	SS400 (一般構造用鋼)

ことを考えている。なお、図-2(c)に示すように、上部のエレメントは連結鋼板(520×200×9mm)を用いて繋がれている。また、上下部コンクリートは衝撃強度およびひび割れに対する抵抗力が大きく、かつ、ある程度耐力を保持した状態で変形性能が大きいスチールファイバコンクリート(SFRC)を採用している。FPC 防護柵の構成部材とその材料を表-1 に示す。

FPC 防護柵は実車実験により、耐力を含む性能について十分実用性があることは証明されている⁶⁾。しかし、改良すべき諸点も有している。防護柵の設置基準によれば、異なる寸法などの FPC 防護柵を開発することは、すべて実車衝突実験を行う必要がある事項に属している。実車実験は膨大な時間と費用を要するため、今後の改良において全て実車衝突実験を実施することは困難と考えられる。そこで、車両および防護柵に対して有限要素解析モデル化を行い、実車衝突実験の代わりに 3 次元衝突シミュレーションを用いて改良 FPC 防護柵に対する性能照査を行うと良い。

伊藤ら^{8)~12)}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-DYNA を用いて 3 次元の衝突シミュレーションを行ってきており、数値解析シミュレーションが実車衝突実験を補完するものとして有効であることを示した。

そこで、本研究では、まず FPC 防護柵に用いられたばね鋼材 SUP9 に対して動的引張試験を行い、SUP9 鋼材の解析用応力-ひずみ関係およびひずみ速度効果を明らかにする。次に FPC 防護柵をモデル化し、引張試験結果を用いて、車両衝突数値解析を行い、実車衝突実験結果と比較して、FPC 防護柵解析モデルの正確性および数値解析による性能照査の有効性を検証する。その後に FPC 防護柵を実用化するため、いくつかの改良型 FPC 防護柵の数値解析を行い、実車衝突実験の代わりに数値解析を用いて性能照査を行う可能性を検討する。また、一体型コンクリート防護柵の解析も行い、その結果と比較することによって、FPC 防護柵の設計コンセプトを検証する。

2. 防護柵部材の応力-ひずみ関係とひずみ速度効果

既往の研究^{12)~14)}によると、防護柵に用いられる材料の応力-ひずみ関係およびひずみ速度効果は防護柵の性能(たとえば防護柵の柵外変位等)に影響を及ぼすことが分かっている。そこで、本研究では、まず FPC 防護柵に用いられるばね鋼 SUP9⁷⁾に対して動的引張試験を行い、SUP9 鋼材の解析用応力-ひずみ関係およびひずみ速度効果を明らかにする。

2.1 SUP9 鋼材に対する動的引張試験方法

動的引張試験には動的能力 $\pm 500\text{kN}$ の電気油圧サーボ式材料試験機(MTS 社製)を用いた。試験片は JIS6 号試験片を製作し、試験片の寸法は平行部 70mm、幅 15mm である。ひずみゲージは、ゲージ長 5mm の塑性域用 YFLA-5 (最大測定可能ひずみ: 150,000 ~ 200,000 μ) を用いた。ひずみゲージは縦ひずみと横ひずみを測定するため、試験片の表裏両面にそれぞれ 3 枚ずつ(縦 2 枚、横 1 枚)合計 6 枚を貼付し

た。試験片の側面に設置した伸び計(MTS 社製、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¹⁵⁾を参考に载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、ひずみ速度は次式のようにになる。

$$\dot{\epsilon} = V / L \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$: 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、ひずみ速度を 1×10^{-5} から $1 \times 10^{-0.5}$ まで 6 段階のひずみ速度に分けて各 3 体ずつ用意した。なお、実際の平行部のひずみ速度は伸び計およびひずみゲージの実測値から算出して整理した。

2.2 SUP9 鋼材の試験結果

1) 応力-ひずみ関係

ひずみ速度 10^{-5} を目標とした代表的な試験結果の SUP9 鋼材の静的公称応力-公称ひずみ関係を図-3 に示す。降伏棚(塑性流動域)を持たない応力-ひずみ関係となり、3 体の平均の降伏点応力は 1227MPa と非常に大きい結果となった。

本研究の解析では汎用プログラム LS-DYNA を使用しており、鋼材を多直線近似等方弾塑性体として扱い、材料試験などで求められる公称応力-公称ひずみ関係を真応力-真ひずみ関係に換算し、そこから式(2)に示すような相当応力(真応力)-相当塑性ひずみ関係を塑性域の応力ひずみ関係として入力した^{16),17)}。

$$\epsilon^P = \epsilon_{\text{true}} - \sigma_{\text{true}} / E \quad (2)$$

ここで、 ϵ^P : 相当塑性ひずみ、 ϵ_{true} : 真ひずみ、
 σ_{true} : 相当応力(真応力)、 E : ヤング率

相当応力-相当塑性ひずみ関係を、数個のパラメータによって任意に表現することを目的として、引張

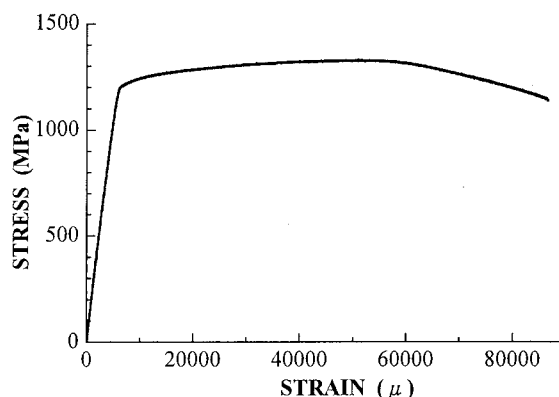


図-3 SUP9 鋼材の応力-ひずみ曲線

表-2 式(3) に代入するパラメータ	
パラメータ	値
$\sigma_{0.2}$	1227 MPa
$\varepsilon_{0.2}$	0.002
σ_u	1399 MPa
ε_u	0.0470

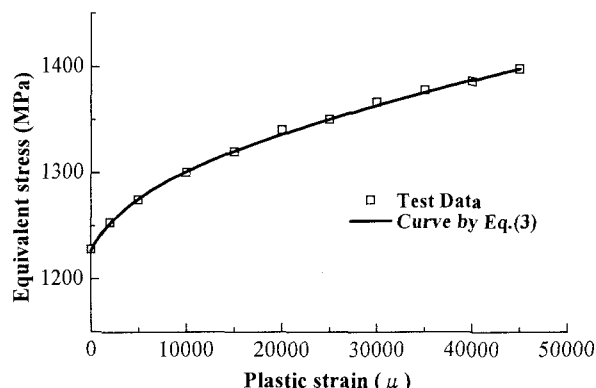


図-4 SUP9 解析用の相当応力-相当塑性ひずみ関係

試験結果と良く一致するように、一次関数と累乗関数との和で式(3)に示すように表現する¹⁸⁾。

$$\sigma = \sigma_u \varepsilon^P + \sigma_u (1 - \varepsilon_u) (\varepsilon^P / \varepsilon_u)^m \quad (3)$$

$$\text{ここで, } m = \frac{\ln\{\sigma_u (1 - \varepsilon_u) / (\sigma_{0.2} - \sigma_u \varepsilon_{0.2})\}}{\ln(\varepsilon_u / \varepsilon_{0.2})}$$

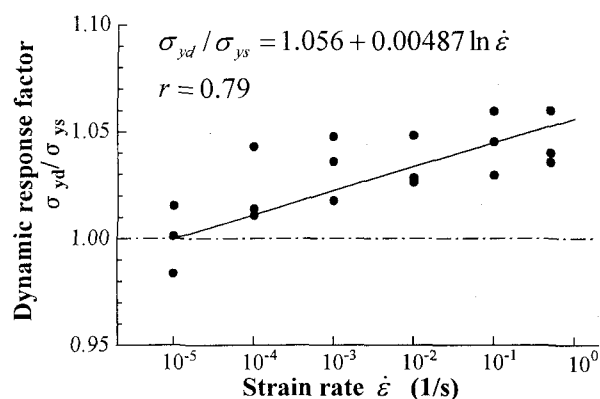
- σ : 相当応力,
- ε^P : 相当塑性ひずみ,
- $\sigma_{0.2}$: 0.2%オフセット耐力,
- $\varepsilon_{0.2}$: 永久ひずみ 0.002,
- σ_u : 終局応力,
- ε_u : 終局ひずみ.

本研究で用いる相当応力-相当塑性ひずみは今回行った引張試験結果を参考に表-2 に示すように式(3)に代入するパラメータを決定し、図-4 に解析用 SUP9 鋼材の相当応力-相当塑性ひずみ関係を示す。

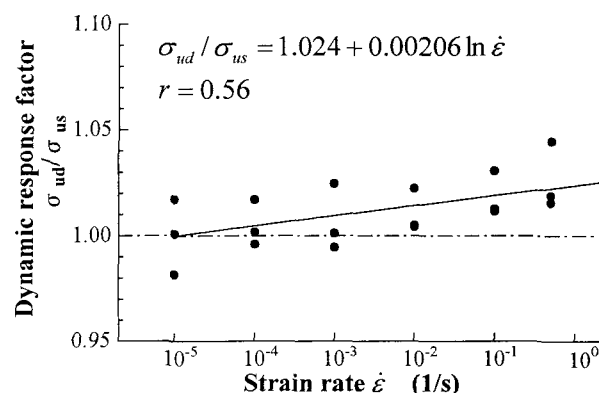
2) ひずみ速度効果

図-5 に引張試験結果から得られた降伏点応力 σ_{yd} および引張強度 σ_{ud} を静的試験結果 (σ_{ys} , σ_{us}) で除した動的応答倍率を示す。ここで降伏点応力とは、SUP9 鋼材については降伏棚を持っていないため 0.2%オフセット値による耐力のことであり、静的試験結果とは、ひずみ速度 10^{-5} を目標とした試験結果の平均値である。図中の実線はひずみ速度に対する動的応答倍率を対数関数で最小二乗近似したものであり、それぞれの回帰式および相関係数 r を図中に示す。

図-5 に示すように、SUP9 鋼材の降伏点応力および引張強度はひずみ速度 10^{-5} を超える領域でひず



(a) 降伏点応力の動的応答倍率



(b) 引張強度の動的応答倍率

図-5 SUP9 鋼材のひずみ速度効果

み速度効果があり、ひずみ速度 10^0 でそれぞれ約 1.05 倍と 1.02 倍となり同様の傾向を示しているが、SUP9 鋼材の降伏点応力および引張強度は非常に大きいため、通常の鋼材にくらべるとそれぞれの無次元化したひずみ速度効果は大きくない。

2.3 その他の材料試験

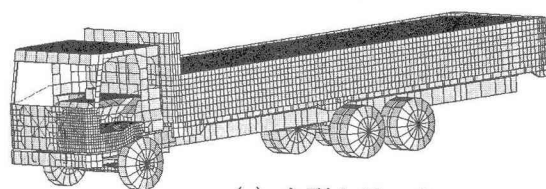
FPC 防護柵の連結鋼板などに用いられる SS400 鋼材の応力-ひずみ関係およびひずみ速度効果については、伊藤らの既往の研究¹⁹⁾で動的引張試験により得られた結果を使用する。

また、本研究では SFRC(スチールファイバーコンクリート、鋼繊維:シンコーファイバー、 $0.7\phi \times 50$, アスペクト比 71, 鋼繊維混入量 60kg/m^3)に対しても標準の試験体(直径 150mm, 長さ 300mm の円柱体)を製作し、単軸圧縮試験と割裂試験を行った。試験によって得られた 28 日の圧縮強度および引張強度はそれぞれ 44.7MPa と 4.2MPa であり、弾性係数は 29.9GPa であり、ポアソン比は 0.167 であった。なお、SFRC に関するひずみ速度効果については、これまで研究結果がないので、とりあえず、山口ら²⁰⁾の提案式を用い、通常コンクリートのひずみ速度効果を入れて検討する。

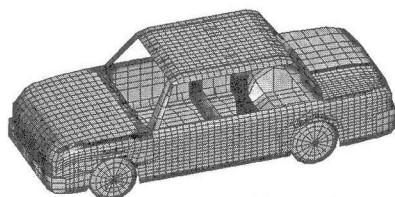
3. 解析モデル

3.1 車両モデル

FPC 防護柵に対する実車衝突実験は、大型トラックによる実験が 2 つと、小型乗用車による実験が 1 つある⁶⁾。2 つの大型トラックの実験によって確認さ



(a) 大型トラック

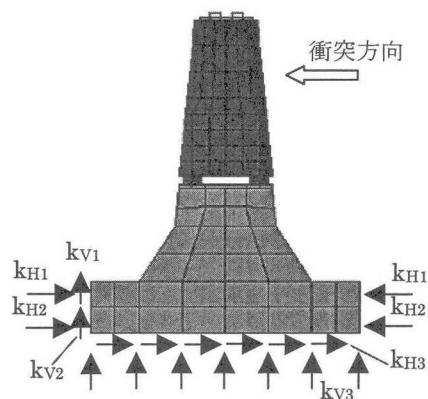


(b) 小型乗用車

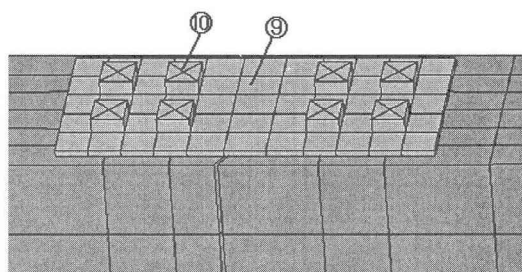
図-6 車両の解析モデル

表-3 車両解析モデルの諸元

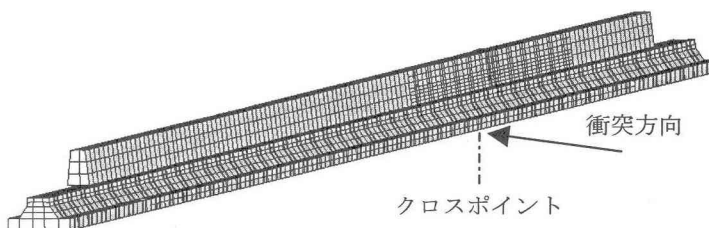
モデル	大型トラック	小型乗用車
節点数	10404	3532
要素数	9621	3904
要素 タイプ	2 点積分 Belytschko-Tsay Shell 要素 1 点積分 Solid 要素 断面積分を伴った Hughes-Liu Beam 要素	
重量	14 t	1.0 t
重 心	地面から	1400 mm
	前輪から	4400 mm
		400 mm
		1000 mm



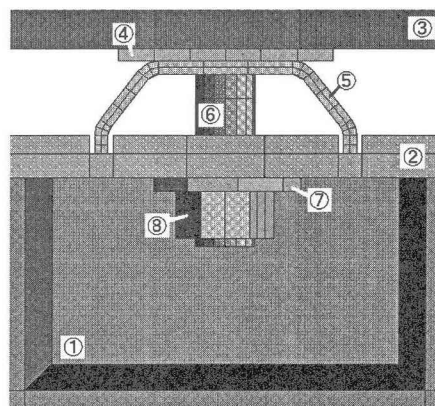
(a) 断面図



(c) 左右連結部



(b) 側面図



(d) 上下連結部

図-7 FPC 防護柵の解析モデル

れたのはそれぞれ種別 SBm と SAm としての i) 車両の逸脱防止性能, iii) 車両の誘導性能および iv) 構成部材の飛散防止性能であり、小型乗用車の実験によって確認されたのは ii) 乗員の安全性能, iii) 車両の誘導性能および iv) 構成部材の飛散防止性能である。

伊藤ら⁸⁾⁻¹²⁾は、平成 9 年から大型トラックモデルと小型乗用車の解析モデルを開発してきており、様々な防護柵への車両衝突解析によりそれらの車両モデルの有効性を検証した。本研究は実車衝突実験に用いられた車両と合わせるように、重量や重心位置などを調整してそれらの車両モデルを利用する。使用した大型トラックと小型乗用車の解析モデルを図-6 に、モデルの諸元を表-3 に示す。ひずみ速度効果については、車両モデルに用いられる鋼材は式(4)に示す Cowper&Symonds モデルを使っており、 $C=10000$, $P=5.0$ のように設定している¹⁶⁾。

$$\sigma_d / \sigma_s = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \quad (4)$$

ここで、 σ_d : 動的応力 (MPa),

σ_s : 静的応力 (MPa),

$\dot{\epsilon}$: 単位ひずみ速度 (1/s)

C, P : ひずみ速度パラメーター

3.2 FPC 防護柵モデル

FPC 防護柵の解析モデルを図-7 に、モデルの材料タイプと要素タイプを表-4 に示す。ほとんどの部材を 1 点積分 Solid 要素でモデル化しているが、アンカーボルトのコンクリート内部に入る部分を

表－4. FPC 防護柵解析モデルの諸元

No.	部材	材料タイプ	要素タイプ
①	下部コンクリート	Mat5 (SFRC)	Solid
②	ベース鋼板	Mat24 (SS400)	Solid
③	上部コンクリート	Mat5 (SFRC)	Solid
④	支圧鋼板	Mat24 (SS400)	Solid
⑤	板ばね	Mat24 (Sup9)	Solid
⑥	アンカーボルト 1	Mat24 (SS400)	Solid + Beam
⑦	円形ばね	Mat24 (Sup9)	Solid
⑧	ナット	Mat24 (SS400)	Solid
⑨	連結鋼板	Mat24 (SS400)	Solid + Shell
⑩	アンカーボルト 2	Mat24 (SS400)	Solid + Beam

Solid 要素でモデル化するのは困難であるため Hughes-Liu Beam 要素でモデルしている。車両に衝突される部分における上部コンクリートのブロック間の連結板を Solid 要素でモデル化するが、衝突されない部分の連結板は Shell 要素を用いる。図－7(b)に示すように、車両に衝突される部分のメッシュは衝突されない部分より細かく分割し、特に図－7(d)に示した上下連結部を詳細にモデル化している。実車衝突実験に用いられた防護柵の長さは 54.0m であり、解析モデルの節点数と要素数はそれぞれ 91590 と 45466 であるが、試算によると、衝突点に遠い部分はほとんど変形せず、防護柵と車両の挙動に及ぼす影響は小さい。したがって、計算時間を節約するため、解析の際に図－7(b)に示すようなクロスポイントに近い部分(長さは 31.5m)のみを考慮する。

表－4 に示すように、FPC 防護柵の解析モデルでは金属材料には von-Mises 降伏基準に従う LS-DYNA の多直線近似等方弾塑性体 (Mat24) を適用し、材料のひずみ速度もそれぞれ考慮する。SFRC のスチールファイバーはコンクリートとの付着強度が高く、ファイバーそのものの引張強度も高いため、SFRC の破壊荷重は普通コンクリートに比べ著しく増大し、最大荷重後の変形曲線の低下も緩やかである。ここ

表－5 地盤反力係数 (Unit: kN/m²/mm)

材 質	反力係数		せん断係数	
	底面鉛直方向	側面水平方向	底面水平方向	側面鉛直方向
アスファルト	—	$k_{H1}=1700$	—	$k_{V1}=510$
粒調碎石	—	$k_{H2}=280$	—	$k_{V2}=84$
底面補正*	$k_{V3}=49$	—	$k_{H3}=16$	—

*注：底面補正は深さ方向の換算値である。

では、SFRC の詳細な構成則を考えるのではなく、簡易的に Drucker-Prager 降伏基準に従う LS-DYNA の土質およびクラッシュブルフォーム材 (Mat5) を使用し、圧縮側で降伏後は弾塑性、引張側で引張強度(カットオフ圧力とする)に達した後はカットオフ圧力のまま引張応力を伝達してゆく。ただし、LS-DYNA の Mat5 はひずみ速度効果を考慮できないため、本研究ではユーザーサブルーチンを開発し、コンクリートのひずみ速度効果を考慮する。

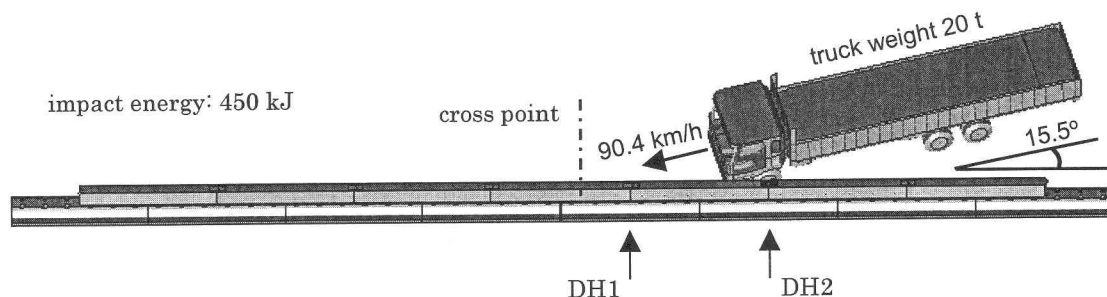
なお、防護柵底板の側面および底面の地盤反力をそれぞれ x,y,z 三方向の Spring 要素を用いて、図－7(a)のようにモデル化する。防護柵底板の側面の水平 Spring 要素と底面の鉛直 Spring 要素は圧縮のみ有効であるばね要素を適用するが、各面のせん断ばねはその面の垂直方向のばねとは独立のため、圧縮領域のみ有効であり、引張領域で無視されるという条件を適用するのは解析上困難であるため、本研究では、底面および衝突反対側の側面におけるせん断ばねを考慮し、線形弾性 Spring 要素を用いてモデル化する。各ばね係数は文献(21)に従い、実車衝突実験が 9 月(気温約 30℃)であったことを考えて算出された表－5 に示す地盤反力係数を用いる。

4. 実車衝突解析による性能照査

平成 11 年 4 月から施行された防護柵の設置基準で規定された性能規定とは、i) 車両の逸脱防止性能、ii) 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 つであるが、本研究では、まず土木研究センターで行われた FPC 防護柵についての 3 つの実車衝突実験を再現する解析を行う。数値解析による防護柵の性能照査の信頼性を確認するために、構成部材の飛散防止性能を除く 3 つの性能について、実験と解析結果を比較しながら検討する。

表－6 解析ケースと衝突条件

ケース	防護柵の種別	衝突条件				
		衝突車両	車両質量(t)	衝突速度(km/h)	衝突角度(度)	衝撃度(kJ)
1	SBm	大型トラック	20	73.4	15	278
2	SAm	大型トラック	20	90.4	15.5	450
3	SAm SBm	小型乗用車	1.0	100.4	20	45



図－8 解析衝突条件(ケース 2)

4.1 解析内容

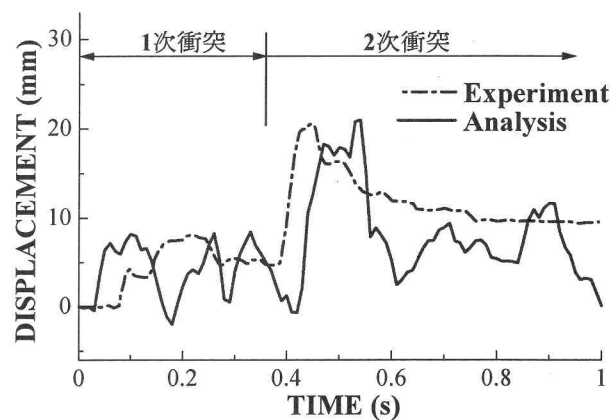
FPC 防護柵の実車衝突解析ケースおよび衝突条件を実験時の条件に合わせて表-6 に示す。例として解析ケース 2 の衝突条件を図-8 に示すが、いずれの解析でもクロスポイントは図-8 に示したクロスポイントと同じである。

4.2 車両の逸脱防止性能の照査

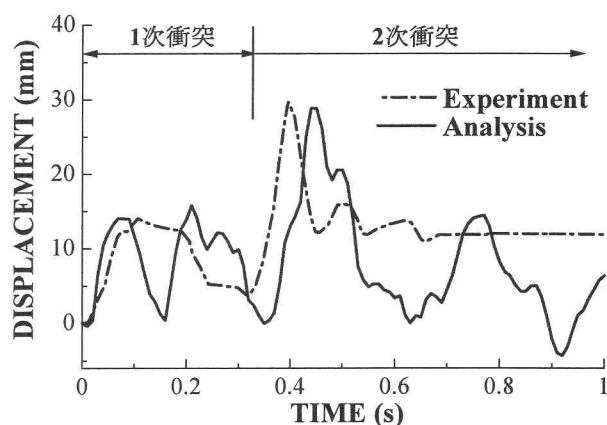
車両の逸脱防止性能の照査は、基本的に大型トラックが防護柵と衝突した場合に防護柵の柵外方向変位により行い、たわみ性防護柵については最大変位が 300mm 以内にならなければならないとされている²⁾。

図-9 に示したのは実験によって防護柵の柵外変位が最も大きい位置における実験結果と解析結果を比較したものである。解析ケース 1(種別 SBm)と解析ケース 2(種別 SAm)では衝突速度が違うため最大変位が発生する位置は異なる。いずれのケースでも 1 次衝突(車両の前部が防護柵に衝突する)と 2 次衝突(車両の後部が防護柵に衝突する)ともに解析値と実験値は多少の応答時間はずれているが、最大応答変位はよく一致している。解析では 2 次衝突のピーク値が発生する時間が実験よりわずかに遅く、残留変位が実験値より小さいが、数値解析の防護柵の最大柵外変位により車両の逸脱防止性能を照査することは十分に可能であると考えられる。

また、2. で述べたように、既往の研究によると、防護柵に用いられる材料のひずみ速度効果は防護柵の性能、特に防護柵の柵外変位に影響を及ぼすことが分かっている。図-9 に示した結果はコンクリー

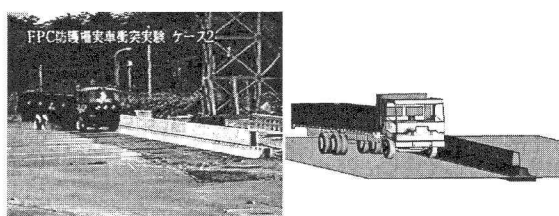


(a) 解析ケース 1 (DH2 位置)

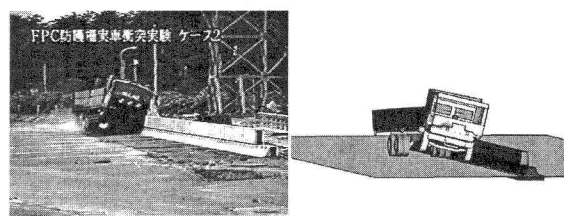


(b) 解析ケース 2 (DH1 位置)

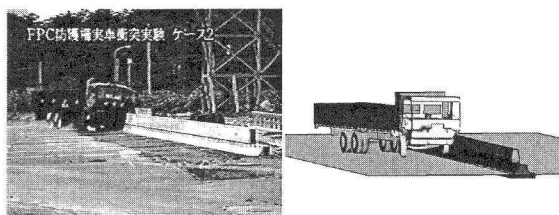
図-9 防護柵の柵外方向変位



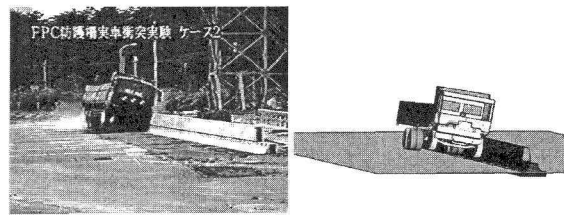
(a) $t=0.0s$



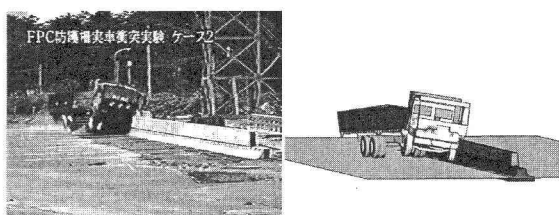
(d) $t=0.3s$



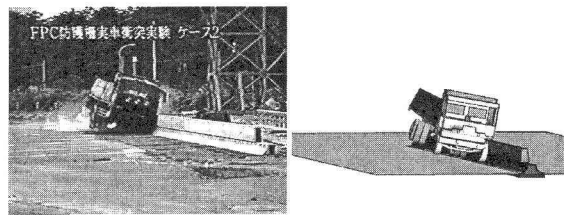
(b) $t=0.1s$



(e) $t=0.4s$



(c) $t=0.2s$



(f) $t=0.5s$

図-10 大型トラックの挙動の比較
(左側: 実験, 右側: 解析)

トのひずみ速度効果を考慮していないが、本研究では、ユーザーサブルーチンを開発し、コンクリートのひずみ速度効果を考慮して解析を行った結果によって、防護柵の柵外変位は、図-9の結果にくらべ大きな差はなかった。これは、防護柵の柵外変位は主に上下コンクリート連結部の板ばねおよびアンカーボルトの変形により発生し、コンクリート自体はほとんど弾性変形をしており、局部的に塑性変形が発生するが、防護柵の柵外変位などに影響が非常に小さいためであると考えられる。また、図-5に示した SUP9 鋼材の降伏点応力のひずみ速度効果は普通鋼に比べれば大きくないが、SUP9 のひずみ速度効果を考慮しない解析結果に比べて、防護柵の最大応答変位は 10% 減少した。板ばねは FPC 防護柵に対する重要な部材であり、その鋼材の特性は防護柵の挙動に影響することが分かった。

4.3 車両誘導性能の照査

車両の誘導性能の照査は車両の挙動により行い、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必要であると規定されている²⁾。

本研究で行った実車衝突実験を再現する 3 つの解析ケースにおける車両挙動の離脱速度と離脱角度の解析結果および実験値との比較を表-7 に示す。解析値と実験値は、おおむね良い一致をしており、いずれの場合でも、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確認できる。また、例として図-10 に解析ケース 2 における車両の挙動とその実験の車両挙動とを比較したものを示す。車両挙動の比較からみても、解析結果は実験結果とよく一致している。よって、これらの解析結果から FPC 防護柵は車両の誘導性能に優れていることが分かる。また、数値解析シミュレーションによって車両の誘導性能を照査することは可能であると言える。

表-7 車両挙動

ケース	項目	離脱速度		離脱角度	
		速度 (km/h)	[%]	角度 (°)	[%]
1	解析	65	89	4	27
	実験	63.5	87	1.2	8
2	解析	73.7	82	1.6	11
	実験	77.3	86	1.4	9
3	解析	83.2	83	7.3	36
	実験	75.8	76	8.1	40

4.4 乗員安全性能の照査

防護柵の基準においては、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により評価することとなっている²²⁻²⁶⁾。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 1t の乗用車

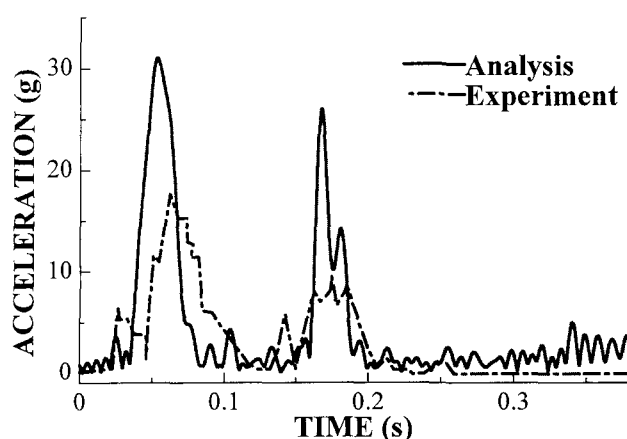


図-11 乗用車重心の加速度の比較

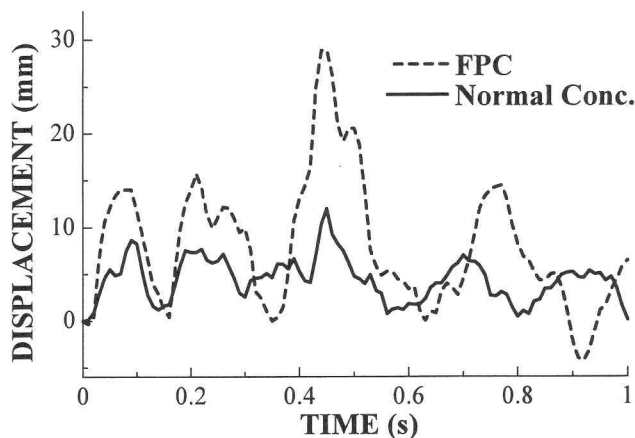
による衝突速度 100km/h、衝突角度 20 度の条件のもとで、車両重心における加速度の最大値が 20g (g: 重力加速度) 未満となることを確認する必要がある²⁾。

図-11 に乗用車重心の加速度の解析結果と実験結果を比較したものを示す。本研究で対象とした実車衝突実験 3 における乗用車重心の加速度の最大値は 17.5g であり、防護柵の設置基準の規定を満足している。しかし、解析では図-11 に示すように、乗用車重心加速度の波形は実験結果とよく似ているが、加速度の最大値は 31g であり、実験の最大値の 77% 程度上回って、防護柵の設置基準に規定された最大値 20g を超えている。したがって、金属性防護柵では実験結果と良い一致を示す乗用車モデルを使っても、FPC 防護柵に対しては、乗用車のモデル化はまだ不十分である。数値解析シミュレーションを用いて FPC 防護柵の乗員安全性能を精度良く照査することはできず、今後さらなる乗用車の解析モデルの検討が必要である。

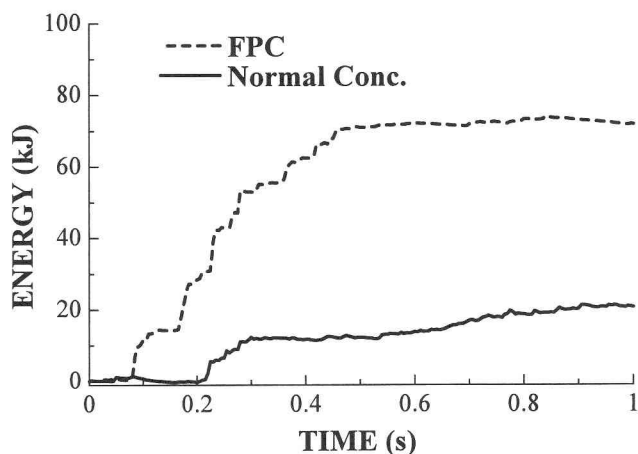
5. FPC 防護柵と一体型コンクリート防護柵の比較

FPC 防護柵は従来の一体型コンクリート製防護柵とは、その構造が大きく異なっており、FPC 防護柵は板ばねを挟んで上下二分割とすることによって、変形しやすく、従来のコンクリート防護柵より衝撃エネルギーを吸収しやすくなっている。こうした FPC 防護柵の設計で考えられた性能を確認するため、本研究では図-1 に示した一体型コンクリート製防護柵をモデル化し、解析を行った。比較のため、一体型コンクリート製防護柵の解析モデルのメッシュサイズは FPC 防護柵と一致させ、境界条件も FPC 防護柵と同じに設定した。また、衝突条件は図-8 に示した解析ケース 2 の衝突条件を設定した。

一体型コンクリート製防護柵の解析結果を FPC 防護柵と比較したものを図-12 に示す。図-12 によると、同様な衝突条件において FPC 防護柵の最大柵外変位は一体型コンクリート防護柵の 3 倍弱になり、FPC 防護柵に吸収されたエネルギーは 3 倍強に大き



(a) 防護柵の柵外変位の時刻歴



(b) 防護柵に吸収されたエネルギー

図-12 一体型コンクリート防護柵とFPC防護柵の比較

くなっており、FPC 防護柵の設計で考えられた性能が実現されていることを確認できた。

6. 改良型 FPC 防護柵の解析と性能照査

FPC 防護柵は実車衝突実験により、耐力を含む性能について十分実用性があることは証明された。また、前述したように、防護柵の性能照査、特に車両の逸脱防止性能、車両の誘導性能照査には数値解析結果が実車衝突実験結果とよく一致しており、数値解析手法の有効性が検証された。

しかし、FPC 防護柵は、改良すべき諸点を有している。特に、現場での適応性を高めるためには、いくつかの課題が提起されており、次のような改良点が考えられる。

(1) 平面曲線部への対応

平面曲線対応については上・下半部を直上積型とすることで $R=350\text{m}$ まで対応可能である。さらに小さい平面曲線に対応するためにはエレメント長さを短縮する必要がある。これは、施工におけるエレメントの運搬にも有利となる。

(2) 路肩設置への対応

路肩に設置するためには、現行底板幅 1.1m を 0.7m

と狭め、深さを増す形状に変更する。これは、路肩幅が狭い所にも設置可能とするためである。

(3) 構造細部の改良

構造細部の改良については作りやすさ、施工のしやすさ、構造各部の強度バランスを考慮して改良する必要がある。

上記の3点の対応はいずれも前述した基本型 FPC 防護柵とは異なった構造系といえる。防護柵の設置基準によれば、これはすべて実車衝突実験を行う必要がある事項に属している。しかし、実車衝突実験は膨大な時間と費用を要するため実施は困難と考えられる。よって、本研究ではこれらの3点の課題を解決するために衝突実験そのものを数値解析により再現することを検討する。

構造改良を行う場合の検証項目は大別して次の2点である。

- (1) FPC 防護柵の耐力に対する保証、
- (2) 衝突車両の誘導性能に対する保証。

曲線対応と構造改良を対象として、本研究では下記の改良型 FPC 防護柵を提案し、数値解析により構造系の耐力および誘導性能を照査する。

(1) 改良型 FPC 防護柵 1

エレメント長 $L=4.5\text{m}$ では平面曲線部対応が困難となるため、 $L=3.0\text{m}$ まで短縮する。

(2) 改良型 FPC 防護柵 2

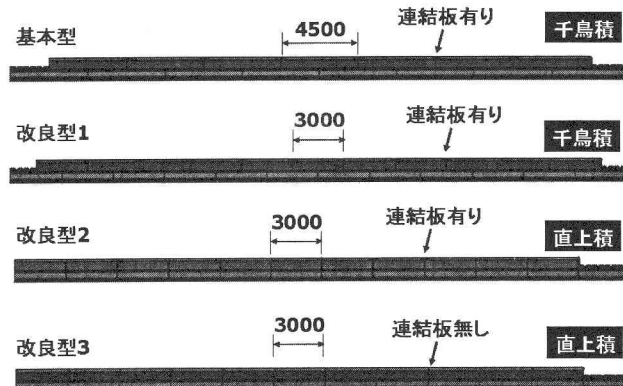


図-13 改良型 FPC 防護柵 1~3 (unit: mm)

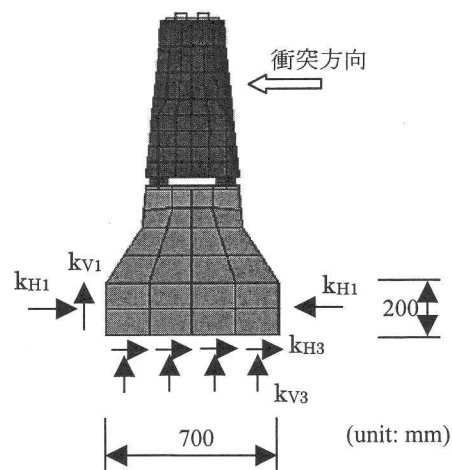


図-14 改良型 FPC 防護柵 4 (断面図)

施工や、損傷後の復旧を容易にするため、上・下半部を千鳥積から直上積に変更する。

(3) 改良型 FPC 防護柵 3

直線部や、緩やかな曲線部(R=500m)では上半部連結板のない構造とする。

(4) 改良型 FPC 防護柵 4

改良型 FPC 防護柵 3 の底板張り出しをなくして、底板幅 1.1m を 0.7m と狭める。底板の厚さを変更しないが、地盤のアスファルトの厚さを 0.1m から 0.2m に変更する。

改良型 FPC 防護柵 1～3 と基本型防護柵の比較を図-13 に、改良型 FPC 防護柵 4 の断面図を図-14 に示す。これらの改良型 FPC 防護柵に対して、図-8 に示した SA 種の衝突条件を設定し、境界条件などを基本型 FPC 防護柵と同様に設置して、解析を行った。

改良型 FPC 防護柵 1～3 と基本型防護柵の最大柵外変位の解析結果を図-15 に示す。エレメント長を短縮した改良型 1 の柵外変位は基本型より 1 次衝突では 2 倍強、2 次衝突では 1.5 倍になり、エレメント長は防護柵の変位に大きな影響を及ぼすことが分かった。改良型 2 と改良型 3 の最大変位は改良型 1 よ

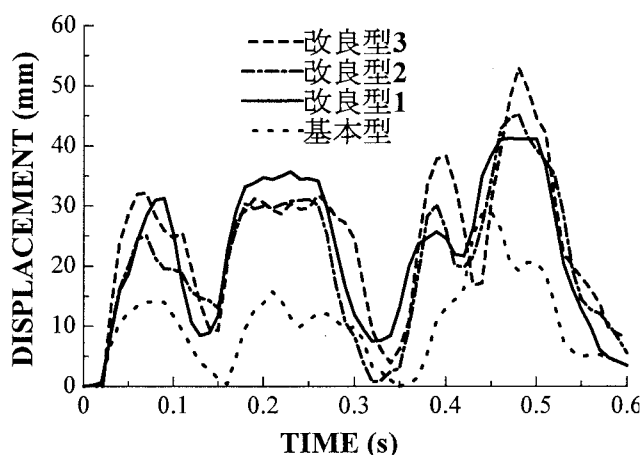


図-15 防護柵の柵外変位時刻歴
(改良型 1～3 と基本型の比較)

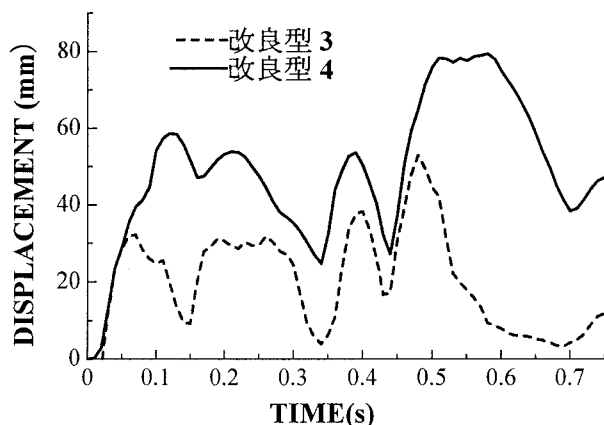


図-16 防護柵の柵外変位時刻歴
(改良型 4 と改良型 3 の比較)

りそれぞれ 10% と 30% 増加するが、それほど大きな差はなく、3 つの改良型防護柵でも車両の逸脱防止性能は、十分に有していると思われる。

また、改良型 FPC 防護柵 4 と改良型 FPC 防護柵 3 の最大柵外変位の比較を図-16 に示す。改良型 FPC 防護柵 4 の 1 次衝突の変位は倍程度大きくなり、2 次衝突の変位は 60% 上回っている。底板幅は防護柵の柵外変位に大きな影響を及ぼすことを明らかにしたが、防護柵が転倒することはない、防護柵の最大変位は 80mm であり、改良型防護柵 4 も車両の逸脱防止性能を十分に有しているといえる。

以上の解析結果によると、4 つの改良型 FPC 防護柵は車両の逸脱防止性能照査が可能になり、SA 種としての耐力を有していることを明らかにした。

また、車両の誘導性能照査のために、車両挙動の離脱速度と離脱角度を表-8 に示す。4 つの改良型防護柵において離脱速度の差はわずかであり、衝突速度の 82～87% である。また、いずれの離脱角度も非常に小さく、衝突角度の 20% に収まっている。よって、4 つの改良型防護柵は、車両の誘導性能を有していることが分かった。

表-8 車両挙動の比較

ケース	項目	離脱速度		離脱角度	
		速度 (km/h)	[%]	角度 (°)	[%]
基本型	実験	77.3	86	1.4	9
	解析	73.7	82	1.6	11
改良型 1	解析	77.5	86	1.5	10
改良型 2	解析	78.0	87	0	0
改良型 3	解析	77.0	85	3.0	20
改良型 4	解析	74.0	82	0	0

7. 結論

本研究では、種々の FPC 防護柵についての数値衝突解析を行うとともに、FPC 防護柵の改良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) FPC 防護柵に用いられる板ばねの鋼材 SUP9 に対しての動的引張試験により、SUP9 の応力-ひずみ関係、およびひずみ速度効果を明らかにした。SUP9 の降伏応力は非常に大きく、降伏点応力のひずみ速度効果は、 10^0 のひずみ速度で約 5% であることが分かった。
- (2) FPC 防護柵実車衝突実験の数値シミュレーション用の FEM モデル化を行い、大型トラックとの衝突数値解析結果を実験結果と比較することにより、そのモデル化が有効であることを示した。
- (3) 一体型コンクリート製防護柵の解析結果と比較して、FPC 防護柵が変形しやすく、衝撃エネルギーを吸収しやすい特性を持つことを確認した。
- (4) 改良型 FPC 防護柵を提案し、数値解析により防護柵の変形特性および車両の誘導性能の照査を行い、改良型 FPC 防護柵の有効性を示した。

なお、FPC 防護柵の性能照査設計を実現するために残された課題は以下のようなものがある。

- (1) 防護柵の破壊まで解析でき、余剰耐力を推定できるようなモデル化を実現する。
- (2) 地盤反力のモデル化について、実際の各種の地盤特性に対応できるものを考案する必要がある。
- (3) 乗用車の解析モデルを改良し、乗員の安全性能照査をさらに検討する必要がある。
- (4) 防護柵の要求性能として、今回検討したものだけでなく、環境要求性能についても検討する必要がある。

謝辞 鋼材の引張試験片および SFRC の圧縮試験体の作製にあたっては、第一技研コンサルタント(株)の佐光氏、古市氏および国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所にご協力を頂き、実車衝突実験の詳細な情報や、地盤反力係数など解析に関する貴重な資料とご意見を頂いた。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，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) NCHRP Report 350 Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features : National cooperative highway research program, National Academy Press, 1993.
- 4) 建設省土木研究所道路部交通安全研究室ほか：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，共同研究報告書整理番号第 207 号，平成 10 年 6 月。
- 5) 第一技研コンサルタント(株)：FPC 防護柵開発検討業務報告書，平成 9 年 3 月。
- 6) 財団法人土木研究センター：FPC 防護柵実車衝突実験業務報告書，平成 10 年 12 月。
- 7) 日本規格協会：JIS ハンドブック 鉄鋼 I，1999.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) Y. Itoh, K. Usami, M. Sugie and C. Liu: Numerical analyses on impact performance of steel and aluminum alloy bridge guard fences, WITPRESS, Structures Under Shock and Impact IV, pp.385-394, 2000.
- 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/I-63，pp.353-366，2003.4.
- 12) Y. Itoh and C. Liu: Nonlinear collision analysis of heavy trucks onto steel highway guard fences, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 12, No. 5, pp.541-558, 2001.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 日本総合研究所：LS-DYNA Version950 USER'S MANUAL，1999.
- 17) 日本総合研究所：LS-DYNA Version950 使用の手引き，1999.
- 18) 西村宣男，小野潔，池内智行：単調載荷曲線を基にした繰返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.27-38，1995.
- 19) Y. Itoh, K. Usami, R. Kusama and S. Kainuma: Numerical analysis of steel and aluminum alloy bridge guard fence, EASEC-8, Singapore, 2001.
- 20) 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.
- 21) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説(IV 下部工編)，平成 14 年 3 月。
- 22) 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.
- 23) 建築省土木研究所，道路部交通安全研究室：防護柵衝突実験時の乗員の安全性評価，土木研究所資料第 3380 号，平成 7 年 10 月。
- 24) P. Miller and J. Carney: Computer simulations of roadside crash cushion impacts, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 123:5, pp.370-376, 1997.
- 25) J. Wekezer, M. Oskard, R. Logan and E. Zywiec: Vehicle impact simulation, Journal of Transportation Engineering, ASCE, 119:4, pp.598-617, 1993.
- 26) 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.

(2003 年 9 月 12 日受付)