

積層繊維補強ゴムの衝撃緩衝効果に関する解析的考察

AN ANALYTICAL STUDY ON THE SHOCK ABSORBING EFFECT OF LAMINATED FIBER REINFORCED RUBBER

西本安志*, 玉井宏樹**, 園田佳巨***, 別府万寿博****, 彦坂熙*****

Yasushi NISHIMOTO*, Hiroki TAMAI**, Yoshimi SONODA***, Masuhiro BEPPU****, Hiroshi HIKOSAKA*****

*博士(工学) シバタ工業株式会社, 研究開発部研究開発グループ (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地)

**九州大学大学院修士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

***工博 九州大学大学院助教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

****博士(工学) 防衛大学校助手, システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*****工博 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

キーワード: 衝撃緩衝材, 積層繊維補強ゴム, 衝撃応答解析

(Shock absorber, Laminated fiber reinforced rubber, Impact analysis)

1. 緒言

1995年兵庫県南部地震以後, 道路橋示方書^{1), 2)}において, 大規模地震時に衝撃的な力が作用する落橋防止構造にゴムなどの緩衝材を設けることが推奨されている。著者らは, 衝撃荷重の低減とエネルギー吸収という2つの効果を発揮する落橋防止用緩衝材として, 積層繊維補強ゴム(写真-1)に着目し, 力学特性を実験的に評価した^{3), 4)}。さらに, 適用に関する実験的考察として, 落錘式衝撃実験⁵⁾を実施し, 積層繊維補強ゴムは, 埋設繊維の破断により, 通常の総ゴムと比較して高いエネルギー吸収性能を示すことや伝達荷重を低減できることを明らかにした。しかし, 設置条件に応じて, 積層繊維補強ゴムを衝撃緩衝材として設計するためには, 衝撃力が作用した際に生じる衝撃荷重を推定できるだけでなく, その応答状況(繊維の破断の有無など)を予測できる手法が不可欠といえる。

そこで本研究は, ゴムと繊維材を個別にモデル化した3次元有限要素モデルによる衝撃応答解析手法を作成し, 落錘式衝撃実験のシミュレーションを試み, 衝撃緩衝材としての積層繊維補強ゴムの性能を事前に評価できるとともに, その設計が理論的に行えるかどうか検証することを目的とした。

2. 落錘式衝撃実験

2.1 落錘式衝撃実験の概要

落錘式衝撃実験には, 防衛大学校が所有する落錘式

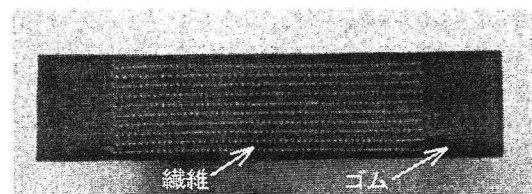


写真-1 積層繊維補強ゴムの断面写真

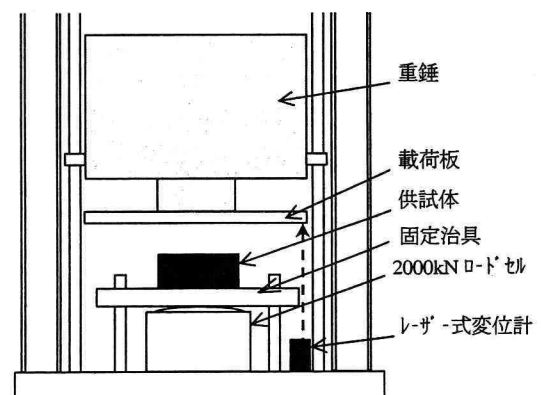


図-1 落錘式衝撃実験の模式図

衝撃実験装置を使用し, 重錘質量を408kgとして, 所定の高さから重錘を自由落下させ, 供試体に衝撃的な外力を与えた。実験概要を図-1に示す。

次に, 本実験における実験条件を表-1に示す。表-1より, 入力エネルギー1.0kN・mは積層繊維補強ゴムの埋設繊維が破断しない吸収エネルギーに対応し, 10.0kN・mは積層繊維補強ゴムの埋設繊維が確実に破

表-1 落錘式衝撃実験条件

入力エネルギー (kN・m)	落下高さ (m)	衝突速度 *(m/s)
1.0	0.25	2.21
5.0	1.25	4.94
10.0	2.50	7.00

*衝突速度 $v=(2gh)^{1/2}$ により算出。

表-2 ゴムと繊維の材料諸元

	高強度繊維	中強度繊維	低強度繊維	ゴム
材質	ナイロン	6,6-ナイロン	ビニロン	天然ゴム系
引張強度	1764(N/cm)	882(N/cm)	588(N/cm)	10.2(MPa)
破断時の伸び(%)	40	25	20	600
硬度	-	-	-	65
構成糸(denier*)	2520	1260	1200	-

*1denier とは、繊維の太さの単位であり、

長さ 9000m の繊維の重さが 1g の時の糸の太さ。

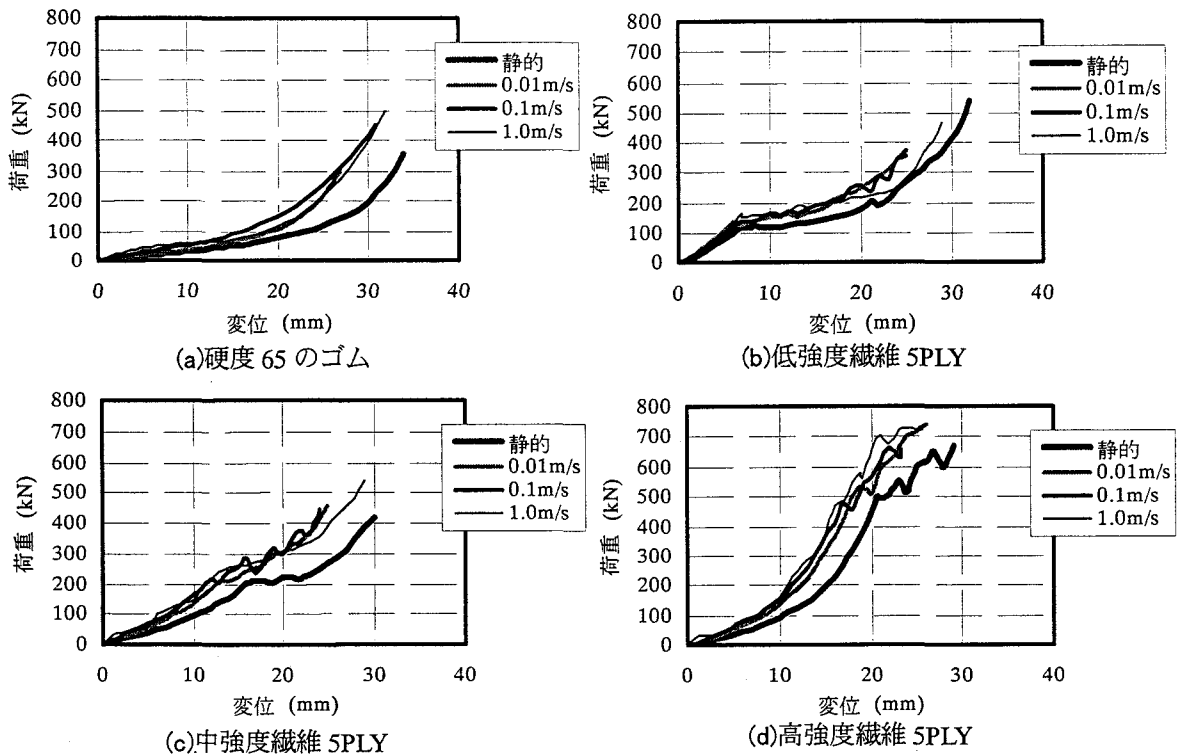


図-2 静的および高速載荷実験結果

断する吸収エネルギー量に対応する。5.0kN・m はそれらの中間に相当する。

本実験での計測項目は、レーザー式変位計による重錘の位置とロードセルによる供試体背面に発生した衝撃伝達荷重の2つである。なお、計測におけるサンプリング時間間隔は、いずれの入力条件においても 0.1msec である。

2.2 供試体

本実験に使用した供試体の形状は、縦 150mm×横 150mm×高さ 50mm の矩形状ブロックとした。ゴムおよびゴム中に埋設した繊維の材料諸元は、表-2 に示すとおりである。本実験では、繊維の引張強度の低いものから低強度繊維、中強度繊維、高強度繊維と呼ぶこととした。供試体の種類は、硬度 65 のゴムと硬度 65 のゴムの中に低強度繊維、中強度繊維、高強度繊維をそれぞれ 5 枚積層埋設したものの 4 種類とした。

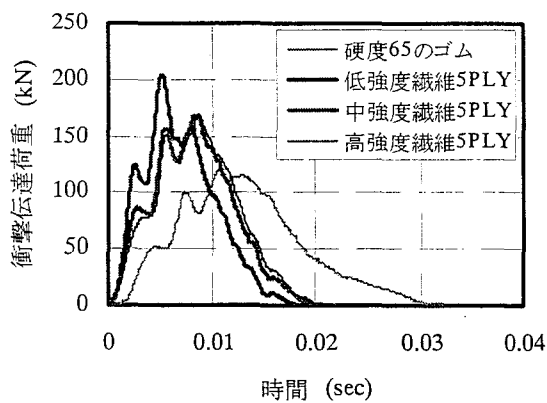
次に、これら供試体の静的および高速載荷実験結果を図-2 に示す。載荷速度は、静的載荷が 8.3×10^{-5} m/sec、

高速載荷が 0.01, 0.1, 1.0m/sec とした。図-2(a)より、硬度 65 のゴムは、高速載荷の速度範囲では荷重～変位関係に明確な差異が認められないが、静的載荷と比較すると高速載荷では剛性が約 2.0～2.5 倍に上昇した。一方、図-2(b)～(d)より、積層繊維補強ゴムの荷重～変位関係は、埋設繊維が破断することで明確な降伏点が存在し、その後は埋設繊維の逐次破断により変形が進行しても荷重が増加しない領域を有しハードニングを迎える。また、降伏点までは載荷速度に対して比較的安定した挙動を示すが、埋設繊維破断後はゴムの特性が支配的となるため載荷速度の影響を大きく受けることがわかる。

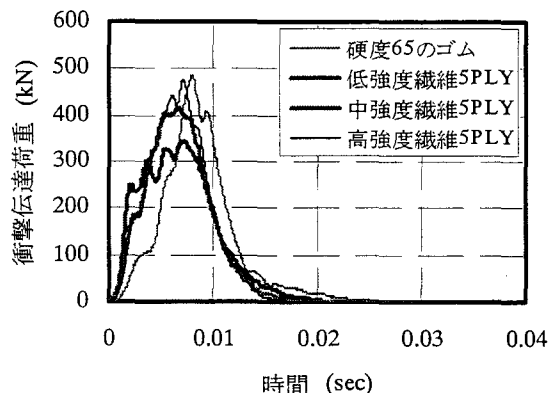
2.3 実験結果と考察

本実験により得られた衝撃伝達荷重～時間関係を図-3 に示す。

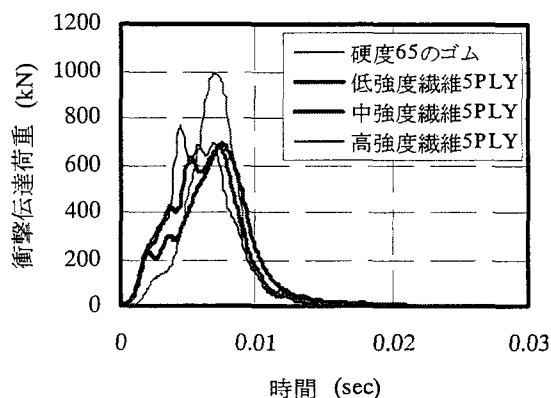
図-3(a)の入力エネルギー 1.0kN・m の場合では、積層繊維補強ゴムは、埋設繊維が破断しないレベルの応答であるため、硬度 65 のゴムと比較して剛性が高い



(a)入力エネルギー1.0kN・m



(b)入力エネルギー5.0kN・m



(c)入力エネルギー10.0kN・m

図-3 衝撃伝達荷重～時間関係

めに荷重の起ち上がりが早く、衝撃伝達荷重が大きな値を示す。次に、図-3(b)の入力エネルギー5.0kN・mの場合では、硬度65のゴムと比較して低強度繊維および中強度繊維5PLY 供試体では、埋設繊維の破断が生じたため、衝撃伝達荷重が低減し荷重の作用時間も同程度となっていることがわかる。さらに、図-3(c)の入力エネルギー10.0kN・mでは、いずれの積層繊維補強ゴムも埋設繊維の破断が生じ、硬度65のゴムに比較して小さい衝撃伝達荷重となり、荷重の作用時間もほぼ等しくなった。

表-3 本解析に用いるゴムの材料定数

	c_{01} (MPa)	c_{10} (MPa)
硬度65度のゴム	-0.49	2.45

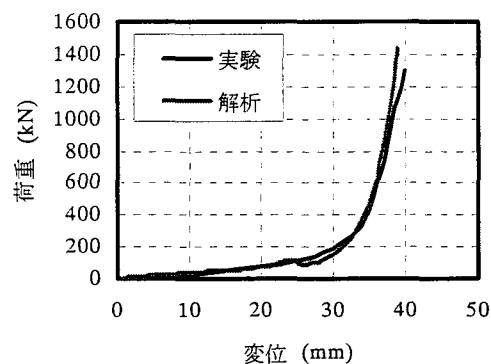


図-4 静的載荷シミュレーション解析と実験結果の比較

3. 積層繊維補強ゴムの衝撃応答解析手法

著者らは、過去に通常の総ゴムを対象として、単軸引張試験結果を利用した3次元有限要素解析で得た圧縮変形特性を非線形ばねに置換した簡易なばね質点系モデルによる衝撃応答計算により、その緩衝性能（最大衝撃伝達荷重）を評価した⁶⁾。しかし、この方法では緩衝材内部の変位やひずみ分布を得ることができないため、積層繊維補強ゴムのゴムと繊維を個別にモデル化した3次元有限要素モデルによる衝撃応答解析手法を検討することとした。本研究における衝撃応答解析は、時間積分として中央差分法による陽解法を用いた。

3.1 ゴムの構成方程式

ゴムには、一般に以下の式で定義される超弾性体の構成式が用いられる⁷⁾。

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (1)$$

ここで、 S_{ij} ：第2 Piola-Kirchhoff 応力、 W ：ひずみエネルギー密度関数、 E_{ij} ：Green-Lagrange ひずみテンソル。

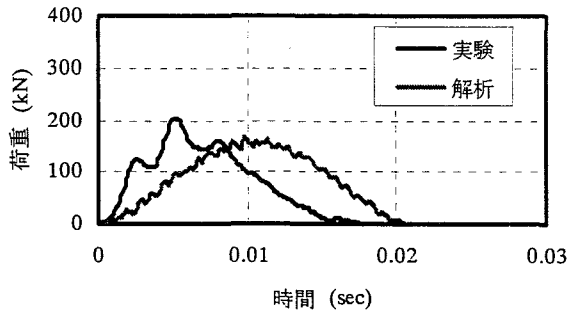
式(1)に用いるひずみエネルギー密度関数⁸⁾には、2パラメータの Mooney-Rivlin 式を用いることにした。

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (2)$$

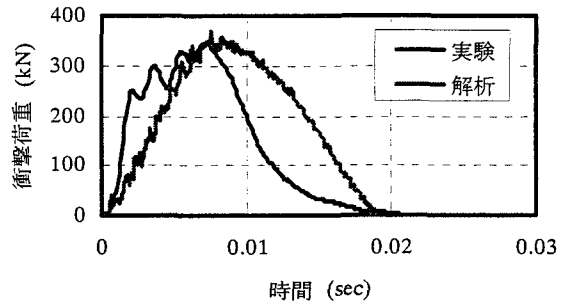
ここで、 c_{10}, c_{01} ：材料実験により得られる Mooney-Rivlin 定数 (MPa)、 I_1, I_2 ：右 Cauchy-Green 変形テンソルの不変量。

表-4 本解析に用いる繊維材の物理特性

	縦方向			横方向			厚さ方向	
	ヤング率 (MPa)	破断 ひずみ	ポアソン比	ヤング率 (MPa)	破断 ひずみ	ポアソン比	ヤング率 (MPa)	ポアソン比
低強度繊維	1.08×10^3	0.065	0.380	1.13×10^4	0.065	0.345	1.11×10^3	0.363
中強度繊維	3.14×10^2	0.22	0.400	3.14×10^2	0.22	0.400	3.14×10^2	0.400
高強度繊維	5.80×10^2	0.30	0.350	5.80×10^2	0.30	0.350	5.80×10^2	0.350



(a)入力エネルギー1.0kN・m



(b)入力エネルギー5.0kN・m

図-5 衝撃荷重～時間関係の比較 (低強度繊維衝 SPLY)

一般に、ゴムは非圧縮性を有すると言われているが、衝撃荷重が作用して極短時間に局所的な変形が生じるような場合、特に、衝突部近傍で体積変化を許容しないような条件を与えることは、計算の安定性を損なう場合が多いと考えられる。そこで、本解析では式(2)を式(1)に代入して得られる以下の構成式をゴムに適用することにした。

$$S_{ij} = 2 [c_{10} + c_{01} I_1] \delta_{ij} - 2 \{c_{01}\} C_{ij} \quad (3)$$

ここで、 C_{ij} : 右 Cauchy-Green 変形テンソル, δ_{ij} : クロネッカーのデルタ。

式(3)に含まれる2つの材料定数は、硬度65のゴムの単軸引張試験に対する同定解析により表-3に示す値を求めた。その値を用いた静的圧縮試験の解析値と実験結果を比較した結果を図-4に示すが、約80%の変形領域まで精度よく再現できていることがわかる。

また、図-2(a)に示す硬度65のゴムの高速載荷実験において、載荷速度の影響で荷重が静的載荷と比較して約2.0~2.5倍に増加することが認められたため、ゴムの材料定数 c_{10} , c_{01} に速度効果係数として、簡易に2.5を乗ずることとした。

3.2 繊維材の構成方程式

一般に繊維材は異方性を示すことから、繊維材の構成式として直交異方性の式(4)を適用した⁹⁾。すなわち、繊維が直交する2方向に埋設されていることに対応させて2方向それぞれに対する繊維の引張試験結果を式(4)に用いた。また、厚さ方向の剛性 E_z は、縦方向と横方向のヤング率の平均値を適用した。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & 0 & 0 & 0 \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & 0 & 0 & 0 \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ただし、

$$E_{11} = \frac{1}{E_y} \left(\frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{xy}^2}{E_x} \right) \frac{1}{A}, \quad E_{22} = \frac{1}{E_x} \left(\frac{1}{E_y} - \frac{\nu_{yx}^2}{E_y} \right) \frac{1}{A}, \quad E_{33} = \frac{1}{E_z} \left(\frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{xz}^2}{E_x} \right) \frac{1}{A},$$

$$E_{12} = E_{21} = \frac{1}{E_x} \left(\frac{\nu_{xy} \nu_{yz}}{E_y} - \frac{\nu_{yx}}{E_x} \right) \frac{1}{A}, \quad E_{13} = E_{31} = \frac{1}{E_x} \left(\frac{\nu_{yz} \nu_{xz}}{E_z} - \frac{\nu_{xz}}{E_x} \right) \frac{1}{A},$$

$$E_{23} = E_{32} = \frac{1}{E_y} \left(\frac{\nu_{xy} \nu_{yz}}{E_x} - \frac{\nu_{yz}}{E_y} \right) \frac{1}{A}, \quad E_{44} = G_{xy}, \quad E_{55} = G_{yz}, \quad E_{66} = G_{zx},$$

$$A = \frac{1}{E_x E_y E_z} \left(1 - 2\nu_{xy} \nu_{yz} \nu_{xz} - \frac{E_x \nu_{xz}^2}{E_z} - \frac{E_y \nu_{yx}^2}{E_x} - \frac{E_z \nu_{zy}^2}{E_y} \right)$$

ポアソン比は、織布の織り方で大きく異なり、明確な値の測定が非常に困難であるため、繊維の公称値を用いた。本解析で使用した繊維材の物理特性を表-4に示す。なお、繊維の破断については、単軸引張試験で得られた縦方向および横方向の破断ひずみに達した時点で、同一方向の剛性のみを低下させることで表現した。具体的には、破断ひずみの90%の値から徐々に剛性を低下させ、破断ひずみに達した時点で剛性が初期値に対してある一定値に収束するような線形関数を与えた。また、この際に相反定理が成立するようにポアソン比も同様に低下させた。

3.3 解析結果と考察

(1) 衝撃伝達荷重

本衝撃応答解析により得られた衝撃伝達荷重～時間関係と実験結果を比較した一例を図-5に示す。図

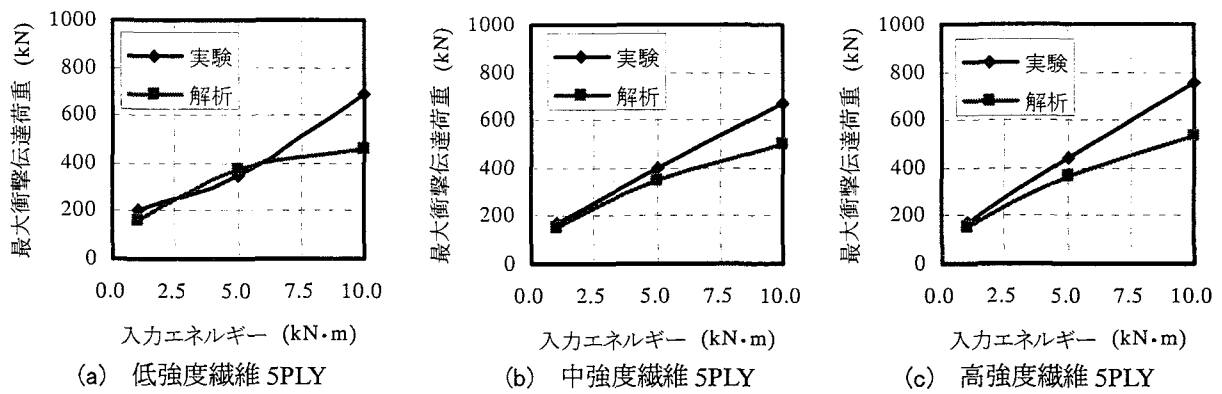
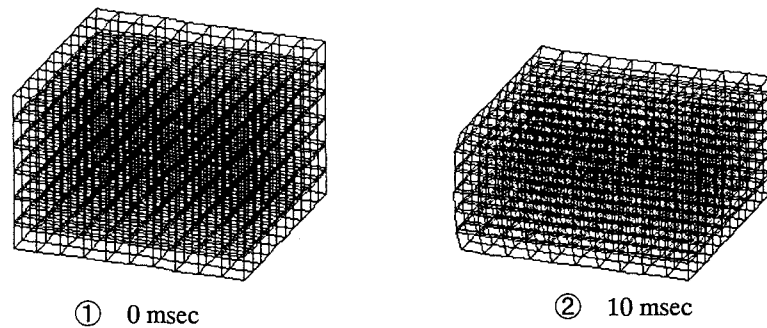
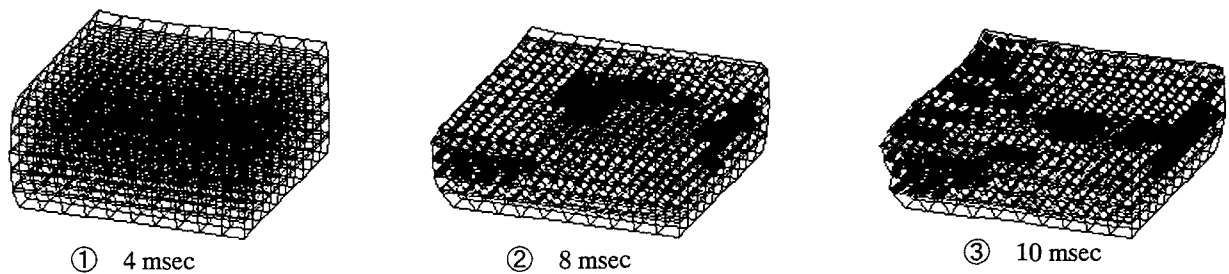


図-6 最大衝撃伝達荷重の比較



(a) 低強度繊維衝 5PLY (入力エネルギー1.0kN·m) の変形状況



(b) 低強度繊維衝 5PLY (入力エネルギー5.0kN·m) の変形状況

図-7 衝撃応答解析で得られる変形状況

-5 より、衝撃伝達荷重～時間関係は、いずれの条件においても実験値と比較して解析値の方が遅い立ち上がりを示した。これは、本解析では、供試体底面の応力分布から底面全体に伝達される荷重として評価しているのに対して、図-1 に示すように、落錘式衝撃実験では、供試体の下面に供試体取り付け用の鋼製の固定治具（厚さ 30mm）を介して、それと先端が円弧状のロードセルを点接触させて金属間の荷重伝達を計測していることなどによると考えられる。しかしながら、本解析により、衝撃実験の衝撃伝達荷重～時間関係を概ね良好にシミュレートしていることがわかる。

次に、落錘式衝撃実験結果と本解析により得られる最大衝撃伝達荷重を比較した結果を図-6 に示す。いずれの繊維強度においても、入力エネルギーが 10.0kN·m のケースを除けば、解析結果と実験結果は、

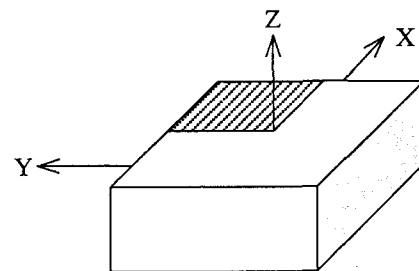


図-8 衝撃応答解析に用いた 1/4 モデル (図-7 はこの方向から見た状況図)

ほぼ一致する傾向を示した。10kN·m のケースで実験値が解析値よりも大きな値となった理由としては、本解析で与えたゴムの材料定数に対する速度効果などの影響と考えられ、今後の検討課題である。

表一5 埋設繊維の破断の比較

入力エネルギー (kN・m)	低強度繊維		中強度繊維		高強度繊維	
	実験	解析	実験	解析	実験	解析
1.0	破断せず	破断せず	破断せず	破断せず	破断せず	破断せず
5.0	破断	破断	破断	破断	破断せず	破断せず
10.0	破断	破断	破断	破断	破断	破断

(2)変形状況と埋設繊維の破断状況の評価

本衝撃応答解析で得られた低強度繊維 5PLY の入力エネルギー1.0kN・mおよび5.0kN・mにおける供試体の変形状況を図一7 に示す。なお、供試体の変形状況図は図一8 に示すように実際の供試体の 1/4 モデルで示している。

図一7 より、上下面を拘束した状態で供試体の変形が生じているため、側面が太鼓状に張り出しているのがわかる。また、図一7(b)中の丸印は、繊維の破断が生じていることを示すものであり、濃い色ほど繊維の破断が進行していることを示している。

次に、埋設繊維の破断の有無を落錘式衝撃実験と本衝撃応答解析の変形状況図より評価した結果を表一5 に示す。表一5 より、落錘式衝撃実験と解析結果は完全に一致し、作用した衝撃的な力のレベルに応じた埋設繊維の破断を確実に予測できることがわかる。

4. 結論

本研究では、3次元有限要素モデルによる衝撃応答解析により、積層繊維補強ゴムを衝撃緩衝材として適用した場合の性能評価について検証したものである。本研究で得られた成果を要約すると以下の通りである。

- (1) ゴムを超弾性体(Mooney-Rivlin の2パラメーターモデル)と仮定し、埋設繊維を引張限界と直交異方性を有する弾性体としてモデル化することにより、積層繊維補強ゴムの衝撃応答特性を評価できることが認められた。
- (2) 本衝撃応答解析により、落錘式衝撃実験における積層繊維補強ゴムの衝撃伝達荷重の時刻歴応答とその最大値を概ね良好にシミュレートできた。
- (3) 本衝撃応答解析により、衝撃的な力が作用した際の積層繊維補強ゴムの埋設繊維の破断の有無を評価することができた。

よって、本手法を用いることにより、任意の積層繊維補強ゴムを衝撃緩衝材として適用した際の性能評価を数値計算により行うことが可能となり、設置条件に適合した緩衝材の設計ができるものと考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，1996.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，丸善，2002.
- 3) 西本安志，梶田幸秀，石川信隆，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの静的特性に関する実験的研究，「材料」Vol.50, No.4, pp.432-439, 2001.04.
- 4) 西本安志，梶田幸秀，石川信隆，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.46A, pp.1865-1874, 2000.03.
- 5) 西本安志，梶田幸秀，石川信隆，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの落錘式衝撃実験と伝達荷重の予測に関する一考察，構造工学論文集 Vol.47A, pp.1655-1664, 2001.03.
- 6) 園田佳巨，西本安志，石川信隆，彦坂照：落橋防止用矩形状ゴム製緩衝材の性能評価法に関する基礎的考察，土木学会論文集 No.689/I-57, pp.215-224, 2001.10.
- 7) 久田俊明，野口裕久：非線形有限要素法の基礎と応用，丸善，1995.
- 8) 飯塚博，山下義裕：ゴム材料の力学特性同定とFEM解析への利用，日本ゴム協会誌 Vol.77, No.9, pp.22-27, 2004.09.
- 9) 例えば，日本機会学会：計算力学ハンドブック (I 有限要素法 構造編)，丸善，1998.