

積層繊維補強ゴムを用いた緩衝材の衝撃挙動に関する解析的考察

An analytical study on the impact response of the laminated fiber reinforced rubber as a shock absorber

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, 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)

After the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, the various shock absorbing devices for the bridge-restrainer were provided by many research groups. In these devices, the laminated fiber reinforced rubber was presented as an effective shock absorber, and the basic mechanical properties had already been investigated (It has high-energy absorption capacity and enough shock absorbing effect). But, the analytical method that can predict the impact response and the failure process of laminated fiber was not developed. In this study, 3-dimensional impact response program that can simulate the impact behavior of the laminated fiber reinforced rubber is developed. As a result, it is confirmed that the proposed method could simulate the failure process of laminated fibers and predict the degree of reduction of impact load.

Key Words: Shock absorber, Laminated fiber reinforced rubber, Impact analysis

キーワード: 衝撃緩衝材, 積層繊維補強ゴム, 衝撃応答解析

1. 緒言

平成7年に発生した兵庫県南部地震以降, 落橋防止構造のように衝撃的な荷重が作用する可能性が高い箇所には, 桁同士の衝突などによって発生する衝撃力を低減させることを目的としてゴム等の緩衝材を設置することが推奨されている¹⁾²⁾. しかし, 落橋防止構造は支承部付近に設けるものが多いため, 通常の厚いゴム製緩衝材の設置に要する空間スペースを確保することができずに特別な対応を迫られる場合も多い. (写真-1 参照) また, ゴムは変形能力に優れた材料ではあるが, 鋼やコンクリートに比べて剛性が3~4桁小さく非線形弾性体として挙動するため, 衝突物のエネルギーを吸収する効果はあまり期待できない.

理想的な衝撃緩衝材とは, 衝撃荷重を十分に低減すると同時に衝撃エネルギーを吸収する能力に優れたものと考えられる. しかし, 衝撃荷重を低減するためには, 剛性ができるだけ小さい方が望ましいのに対し, 衝撃エネルギーを吸収するには, 大きなヒステリシスループを描けるような剛性と変形能力が大きな材料が望ましく, 両者は相反するために単一材料で同時に満足させることは非常に難しいといえる.

以上のことを踏まえ, 著者らは衝撃荷重の緩和とエネル

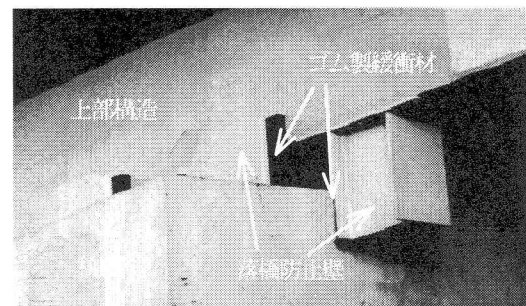


写真-1 落橋防止構造の設置事例

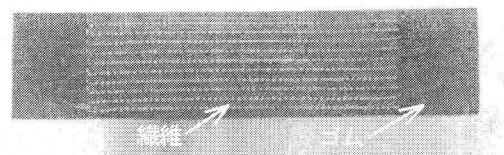


写真-2 積層繊維補強ゴムの断面写真

ギー吸収という2つの効果を同時に期待するには, 非可逆的な塑性変形や破壊を生じることでエネルギー吸収の役割を担う材料をゴムと併用することが有効であると考え, ゴムの中に高剛性の繊維材を互層に配置した積層繊維補強ゴム(写真-2, 以降「補強ゴム」という。)が上記の相反する要求に対応できる数少ない素材であるものと考

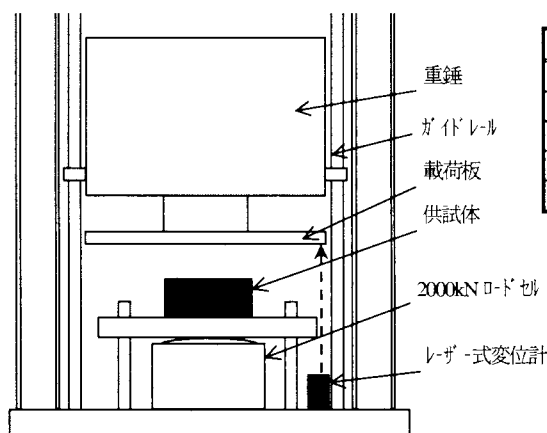


図-1 落錘式衝撃実験の模式図

表-1 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。

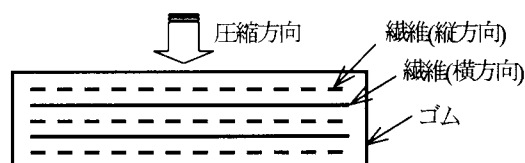


図-2 積層繊維補強ゴムの構造

え、主に実験的な考察によってその力学特性を検討してきた^{3,4)}。その結果、通常のゴムより高い剛性を示すだけでなく、繊維の破断が逐次生じることにより延性的な挙動を示すことで高いエネルギー吸収性能を有することを確認している。しかし、補強ゴムを衝撃緩衝材として実際の現場の条件に応じて設計するためには、衝撃力が作用した場合に緩衝材背面に伝達される衝撃荷重を推定できるだけでなく、補強ゴムの応答状況(繊維の破断の有無など)を予測できる手法が不可欠である。

本論文では、実際に衝突物が作用した場合の衝撃力の低減効果やエネルギーの吸収効果など、補強ゴムの衝撃緩衝材としての性能について落錘式衝撃実験⁵⁾による結果を整理し、通常のゴムとの比較を念頭におきながら総括した。その上で、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た。

2. 積層繊維補強ゴムの衝撃緩衝効果

2.1 落錘式衝撃実験による検討

2.1.1 落錘式衝撃実験の概要

補強ゴムの衝撃緩衝効果を調べるために、落錘式衝撃実験を実施した。重錘質量は 408kg とし、3 通りの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。落錘式衝撃実験の模式図を図-1 に示す。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。レーザー式変位計は、(株)キーエンス社製の LB-300 (測定範囲 0.2~0.4m、分解能 50 μ m、応答性 915Hz) を用い、ロードセルは、共和電業株製の LC-200TE (定格容量 2000kN) を用いた。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。

2.1.2 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配置した繊維の材料諸元は、表-1 に示すとおりである。

本実験では、繊維の剛性は大きくても伸び能力が小さく引張強度の低いものを低強度繊維と呼び、引張強度の大きさを基準として他の 2 種類についても中強度繊維、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 枚配置したものの 4 種類とした。なお、補強ゴムは、見かけ上の等方性を付与するために、メッシュ状の平織りの繊維材を図-2 に示すように、力が作用する方向に対し直行方向に交互に積層し均等に平行して配置した。

次に、これら供試体の静的および高速載荷実験結果を図-3 に示す。静的圧縮実験は、5000kN 圧縮試験機 (株島津製作所製) を使用し、圧縮速度 5mm/min (8.3×10^{-5} m/sec) で行った。高速載荷実験は、防衛大学校が所有する 1000kN 中速度高圧載荷装置を使用し、圧縮速度 0.01, 0.1, 1.0m/sec にて実施した。測定項目は、載荷点荷重と載荷点変位である。図-3(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 倍に上昇する傾向を示した。ゴムの荷重~変位関係は、非線形であるため、それぞれの載荷速度で、変形量 0mm~30mm の間で 5mm の変形量毎に直線近似して剛性を求めたところ、変形量 0~5mm と 20mm~25mm の区間の剛性が約 2.5 倍と最大の値を示した。一方、図-3(b)~(d)より、補強ゴムの荷重~変位関係は、配置する繊維が破断することにより明確な降伏点が存在し、その後は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が存在し、その領域を上回る変形を与えるとハードニングを迎えることが認められた。載荷速度の影響としては、いずれの繊維強度の場合も降伏点までは比較的安定した挙動を示し、その後は繊維の破断により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。

2.1.3 落錘式衝撃実験の入力条件

落錘式衝撃実験における入力条件は、補強ゴムの緩衝効果が繊維の破断の有無により、どのように変化するかに着目して決定した。本実験の入力条件を表-2 に示す。表-

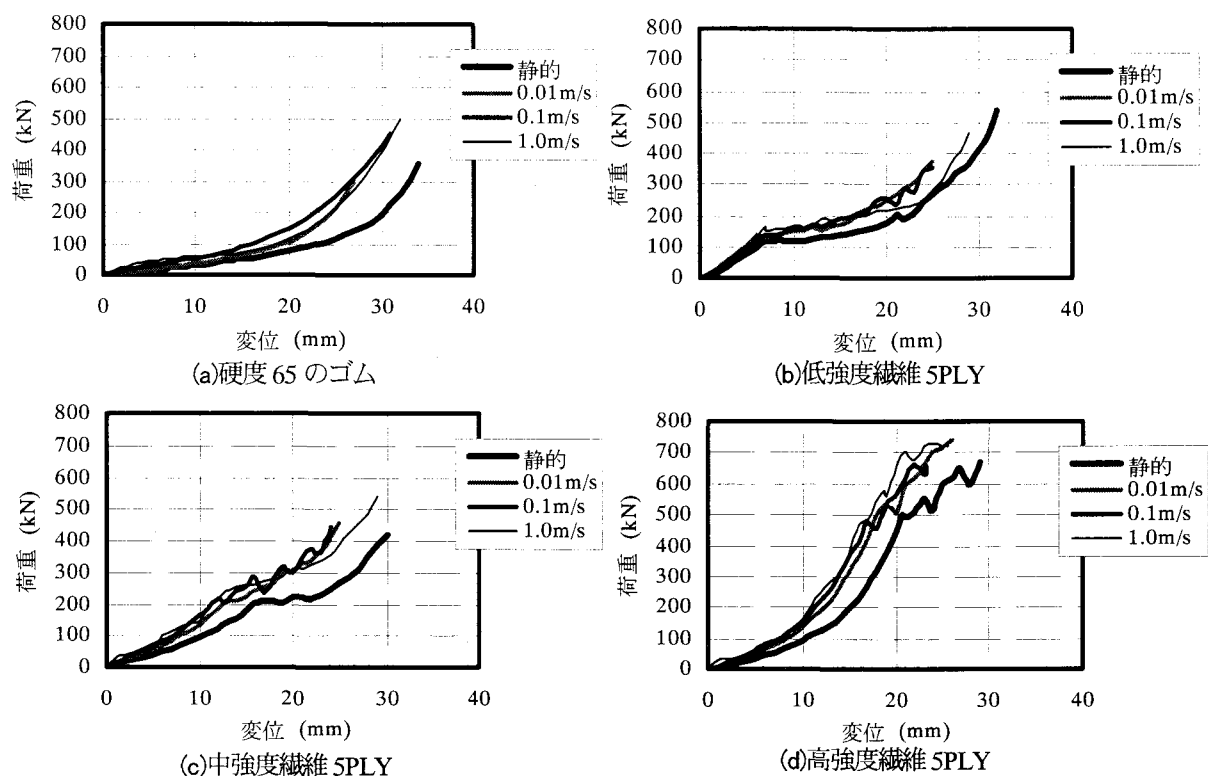


図-3 静的および高速載荷実験結果

表-2 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。

2より、本実験で与えた重錘の運動エネルギー1.0kN・mは、補強ゴムの静的載荷実験から繊維が破断しない吸収エネルギーに対応し、10kN・mの運動エネルギーは、補強ゴムの繊維が確実に破断する負荷に対応するもので、供用期間中にこのレベルの衝撃力が作用した場合には速やかに交換することを想定している。さらに、本実験ではその中間レベルの負荷となる5.0kN・mの運動エネルギーについても実施した。

2.1.4 実験結果と考察

(1) 衝撃伝達荷重の低減効果と繊維の破断

本実験により得られた衝撃伝達荷重～時間関係を図-4に示す。

図-4(a)の入力エネルギー1.0kN・mの場合では、補強ゴムは、繊維が破断しない弾性範囲内での応答であるため、硬度65のゴムと比較して剛性が高いために荷重の立ち上がりが早く、衝撃伝達荷重が大きな値を示す。次に、図-4(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、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。なお、繊維の

破断は、供試体の衝撃伝達荷重～変形量関係から静的実験で見られるような繊維の破断により生じる剛性の極端な低下の有無により判断した。さらに、図-4(c)の入力エネルギー10.0kN・mでは、いずれの補強ゴムも繊維の破断が生じ、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。

すなわち、補強ゴムに衝撃的な力が作用した際の最大衝撃伝達荷重は、繊維の破断により低減され、その作用時間も繊維が破断することでゴムの特性に近づくため、硬度65のゴムとほぼ等しくなるものと考えられる。よって、補強ゴムは、繊維が破断することによって大きな衝撃緩衝効果が得られるといえる。

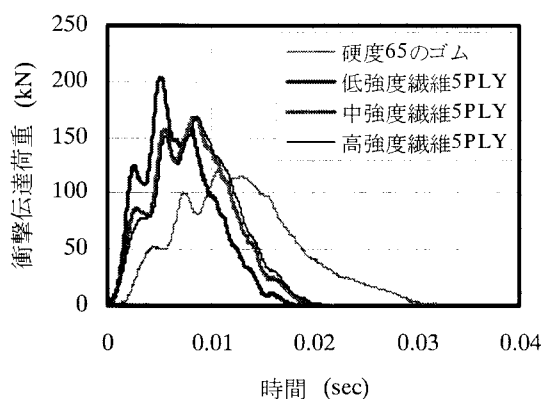
(2) エネルギーの吸収効果

衝撃緩衝材には、衝突物の持つ運動エネルギーを吸収する効果を有することが要求される。このエネルギー吸収効果を評価するため、式(1)に示すように供試体との衝突前後における重錘の運動エネルギーの変化に着目し、実験データを用いて考察した。なお、衝突前後の重錘速度 V_1 、 V_2 は、それぞれ10msec間の重錘の移動距離を基に平均速度として求めた。

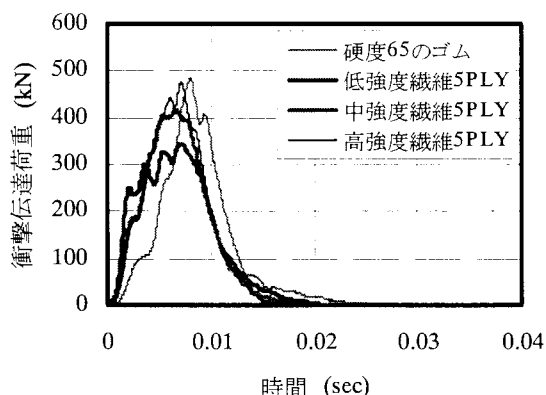
その結果を図-5に示す。

$$\Delta E = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100 \quad (1)$$

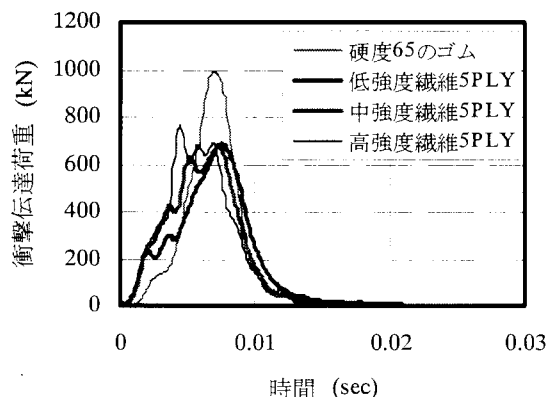
ここで、 ΔE ：エネルギー吸収率(%), E_1 ：衝突前の重錘の運動エネルギー ($E_1 = (1/2) \cdot m \cdot V_1^2$), m ：重錘質量, V_1 ：衝突前の重錘速度, E_2 ：衝突後の重錘の運動エ



(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-4 衝撃伝達荷重～時間関係

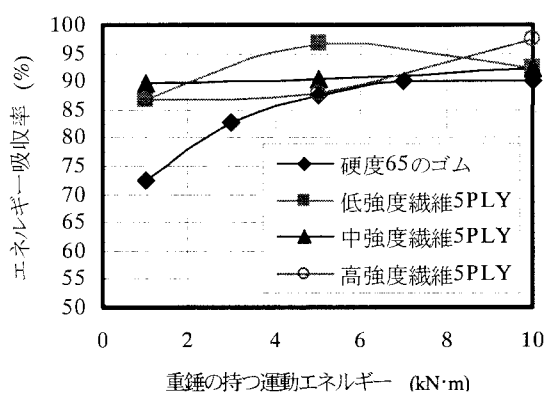


図-5 エネルギー吸収率の比較

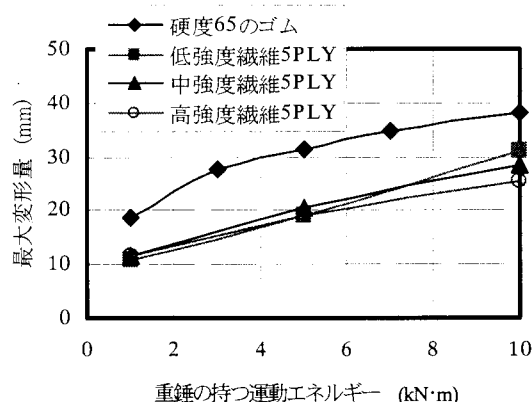


図-6 最大変形量の比較

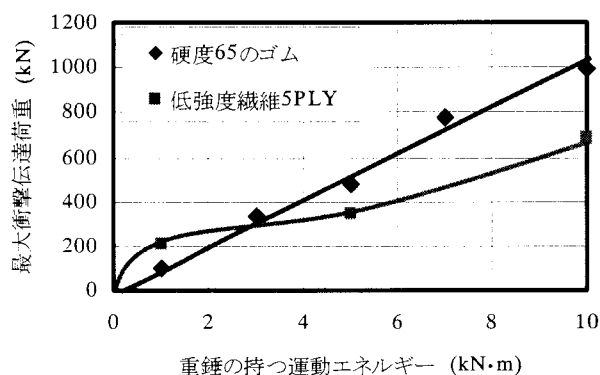


図-7 最大衝撃伝達荷重の比較

エネルギー ($E_2 = (1/2) \cdot m \cdot V_2^2$), V_2 : 衝突後の重錘速度である。

図-5 より、補強ゴムは、硬度 65 のゴムと比較していずれの入力エネルギーに対しても高いエネルギー吸収率を示した。また、補強ゴムのみに着目すると、繊維が大きく破断しない場合(約 5.0kN・m 以下)と繊維が大きく破断した後(約 5.0kN・m 以上)を比較すると、ゴムのひずみによるエネルギー吸収に加え繊維の破断によるエネルギー吸収効果のため、繊維破断後のエネルギー吸収率の方がやや高い値を示す傾向にある。

よって、補強ゴムは、通常のゴムと比較して高いエネルギー吸収効果を有すると共に、いずれの入力レベルでも安定した性能を示す。

(3) 衝撃的な力が作用した際の最大変形量

各入力エネルギーを作用させた際に発生する供試体の最大変形量について、図-6 に示す。図-6 より、補強ゴムは硬度 65 のゴムと比較していずれの入力エネルギーに対しても最大変形量は小さく、特に繊維が大きく破断しない入力エネルギーの範囲では、最大で約 30% 小さい値となった。しかしながら、補強ゴムは、入力エネルギーが増加するほど繊維の破断が進行しゴムの特性に近づくと考えられるため、通常のゴムとの最大変形量の差は小さくなる傾向にある。

2.2 衝撃緩衝材としてみた積層繊維補強ゴム

補強ゴムの特徴を整理すると、図-7 より、重錘の持つ

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

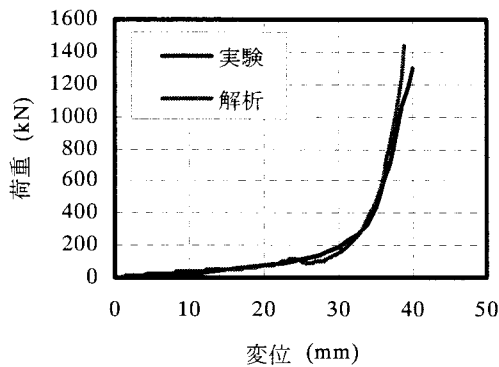


図-8 ゴムの静的載荷シミュレーション解析と実験結果の比較

運動エネルギーが小さいレベル (0~3.0kN・m) では、通常のゴムと比較すると大きな衝撃伝達荷重となるが、重錘の持つ運動エネルギーが大きくなり繊維が破断するようなレベル (3.0kN・m 以上) では通常のゴムと比較して最大衝撃伝達荷重を大きく低減でき、その差もより大きくなる。よって、幅広いレンジで衝撃伝達荷重を低減できるといえ、繊維が破断しないレベルの最大衝撃伝達荷重を犠牲にしたとしても全体として有用な緩衝材と考えられる。

また、エネルギー吸収効果に関しては、通常のゴムは、重錘の持つエネルギーが大きくなり高ひずみ域になる程、高いエネルギー吸収効果を示すが、補強ゴムは繊維の破断の有無やそのひずみ量にかかわらず一定レベル (約 90% 程度) の高いエネルギー吸収効果を示す。よって、エネルギー吸収効果という観点からも有用な緩衝材といえる。

さらに、補強ゴムは繊維の枚数を変化させることで圧縮剛性を変化させることができ、過去に実施した補強ゴムの静的圧縮実験から、本実験に用いた供試体と同形状 (縦 150mm×横 150mm×厚さ 50mm) で低強度繊維を 50 枚積層した場合、通常のゴムと比較して、繊維が破断する降伏点までの剛性が約 400 倍 ($3.2 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$) まで向上させることが可能であり、設計自由度が大きい素材といえる。他にも緩衝材としてアルミニウムや樹脂などを用いて形状を工夫して緩衝材として用いられているが、設置空間が狭小な箇所では設置困難な場合が想定される。よって、補強ゴムは、繊維の物性や枚数を変化させることで緩衝材として一般的な矩形ブロックで衝撃荷重の低減とエネルギー吸収効果を高いレベルで両立でき、桁間衝突や落橋防止用緩衝材として有用な緩衝材といえる。

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、1 質点系モデルによる簡易な衝撃応答計算を行えば、その緩衝性能 (最大衝撃伝達荷重) を概算できることを確認している⁹⁾。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、内部に破壊を生じするような材料を混在した補強ゴムには適用できない。そこで本研究では、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プログラムを作成し、緩衝材として適用した際に発生する衝撃荷重や変形量の時刻歴応答の推定と、繊維の破断の有無について実験結果との比較を通して検討した。

3.1 解析モデルの概要

(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⁷⁾が用いられる。

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (2)$$

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(2)に用いるひずみエネルギー密度関数^{8),9)}には各種の式が提案されているが、本研究では以下の Mooney-Rivlin の 2 パラメータ式を用いることにした。

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

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。

一般に、ゴムの変形特性として非圧縮性が存在すると言われているが、衝撃荷重が作用してごく短時間に局所的な変形が進行するような場合、衝突部近傍で体積変化を許容しないような条件を直接的に課すことは、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(3)を式(2)に代入することで得られる以下の構成式をゴムに適用することにした。

$$S_{ij} = 2[c_{10} + c_{01}I_1]\delta_{ij} - 2\{c_{01}\}C_{ij} \quad (4)$$

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(4)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求めた。解析で得られた材料定数を表-3 に示す。表-3 の値を用いて行った静的圧縮試験の解析値と実験結果とを比較した結果を図-8 に示すが、この図より、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。

ところで、緩衝材が高速で圧縮される際、静的荷重に対して変形する場合、その力学特性は大きく異なることが予想される。実際に、図-3(a)に示す硬度 65 のゴムの高速載荷実験において、載荷速度の影響で剛性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。本来であれば、速度効果に関する係数は、変形速度の関数として表

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

現されるべきであると考えられるが、今回実施した実験では、静的载荷と高速载荷で相違は認められるものの $10^{-2} \sim 1.0\text{m/sec}$ の広範囲な速度域でほぼ等しい剛性が得られていることから、本研究ではゴムの材料定数 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。

(2) 繊維材の構成方程式

補強ゴムには、平織りなどの織布状になった繊維材が積層して配置されている。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。すなわち、繊維が直交する 2 方向に配置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(5)に用いることにした。なお、用いた供試体は、補強ゴム中の繊維に近い状態を表現するため、繊維の両側に薄くゴムを貼り付け一体化した構造(ゴム引布)とした。このため、表-1 に示す繊維材の材料特性と表-4 に示す物理特性とは、ゴムの拘束の影響などにより異なる性質を示している。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することとした。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & 0 & 0 & 0 \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & 0 & 0 & 0 \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

ただし、

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

$$E_{33} = \frac{1}{E_x} \left(\frac{1}{E_y} - \frac{\nu_{xy}^2}{E_x} \right) \frac{1}{A}$$

$$E_{12} = E_{21} = \frac{1}{E_z} \left(\frac{\nu_{zx}\nu_{yz}}{E_y} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} \right) \frac{1}{A}$$

$$E_{13} = E_{31} = \frac{1}{E_y} \left(\frac{\nu_{yz}\nu_{yx}}{E_x} - \frac{\nu_{zx}}{E_z} \right) \frac{1}{A}$$

$$E_{23} = E_{32} = \frac{1}{E_x} \left(\frac{\nu_{xy}\nu_{zy}}{E_z} - \frac{\nu_{yz}}{E_y} \right) \frac{1}{A},$$

$$E_{44} = G_{xy}, \quad E_{55} = G_{yz}, \quad E_{66} = G_{zx}$$

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

ポアソン比は、織布にした際に織り方によって大きく異なり、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ることにした。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とき、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。

3.2 衝撃応答解析手法の概要

衝撃応答解析のための時間積分には中央差分法による陽解法を用いた。中央差分法¹⁰⁾の手順について以下に簡単に示す。

①現在の時間 t における変位 $\{u\}_t$ に対し、微小時間 Δt だけ異なる時の変位は、それぞれ Taylor 展開を適用することで以下のように書ける。

$$\{u\}_{t+\Delta t} = \{u\}_t + \Delta t \left\{ \dot{u} \right\}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \left\{ \ddot{u} \right\}_t + \dots \quad (6)$$

$$\{u\}_{t-\Delta t} = \{u\}_t - \Delta t \left\{ \dot{u} \right\}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \left\{ \ddot{u} \right\}_t - \dots \quad (7)$$

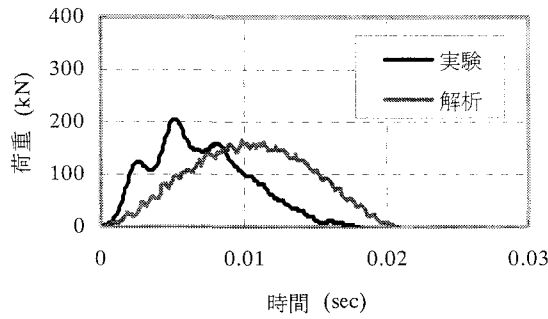
②式(6)および式(7)の 2 次の項までを対象に、和と差をとり整理すると、現時刻 t における加速度 $\left\{ \ddot{u} \right\}_t$ および速度 $\left\{ \dot{u} \right\}_t$ を以下のように表すことができる。

$$\left\{ \ddot{u} \right\}_t = \frac{1}{\Delta t^2} [\{u\}_{t+\Delta t} - 2\{u\}_t + \{u\}_{t-\Delta t}] \quad (8)$$

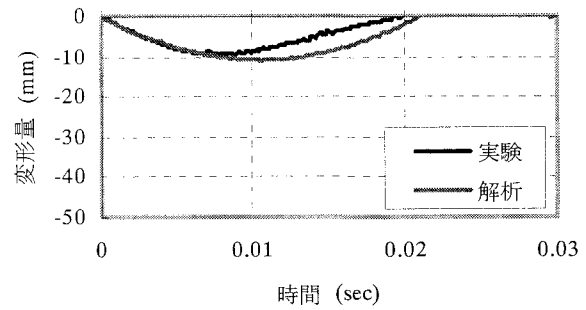
$$\left\{ \dot{u} \right\}_t = \frac{1}{2\Delta t} [\{u\}_{t+\Delta t} - \{u\}_{t-\Delta t}] \quad (9)$$

③以下に示す現時刻 t における運動方程式(10)に、上記の式(8)および式(9)を代入すると、次の時間ステップにおける変位 $\{u\}_{t+\Delta t}$ を、現時刻の変位 $\{u\}_t$ と Δt だけ以前の変位 $\{u\}_{t-\Delta t}$ の式(11)として表すことができる。

$$[M]_t \left\{ \ddot{u} \right\}_t + [C]_t \left\{ \dot{u} \right\}_t + [K]_t \{u\}_t = \{f\}_t \quad (10)$$

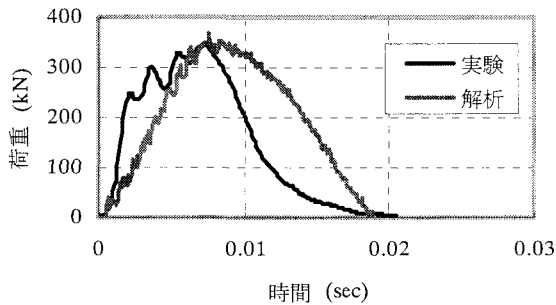


(a) 衝撃伝達荷重～時間関係

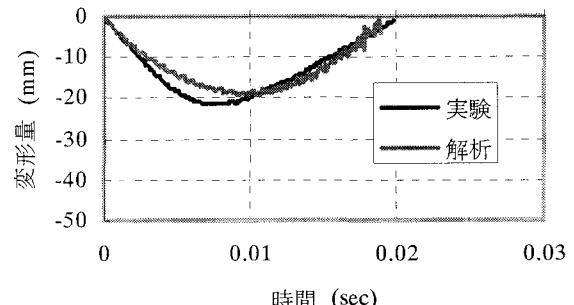


(b) 変形量～時間関係

図-9 低強度繊維衝 5PLY (入力エネルギー1.0kN・m)



(a) 衝撃伝達荷重～時間関係



(b) 変形量～時間関係

図-10 低強度繊維衝 5PLY (入力エネルギー5.0kN・m)

$$\left\{ \frac{1}{\Delta t^2} [M]_r + \frac{1}{2\Delta t} [C]_r \right\} \{u\}_{r+\Delta t} = \left\{ \frac{2}{\Delta t^2} [M]_r - [K]_r \right\} \{u\}_r - \left\{ \frac{1}{\Delta t^2} [M]_r - \frac{1}{2\Delta t} [C]_r \right\} \{u\}_{r-\Delta t} + \{f\}_r \quad (11)$$

④式(11)を用いて、逐次 Δt だけ時間を進めながら、全節点変位 $\{u\}_{r+\Delta t}$ を求めることで物体の衝撃応答を得ることができる。

また、衝突現象のモデル化として刻々と変化する接触領域を介して伝達される衝撃荷重を計算するための動的接触モデルを、以下のような簡易な方法で適用した。本解析では、重錘側の中心点 $C(x_c, y_c, z_c)$ に対して独立した座標を設定し、補強ゴム製緩衝材上面の接触判定点 (x_i, y_i, z_i) と点 C の距離が以下の式(12)の条件を満たす場合に両者は接触状態にあると判断し、式(13)により該当節点に作用する衝撃力を評価した。

$$\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2} < R_c \quad (12)$$

ここで、 R_c : 重錘中心から表面までの距離。

$$f_i = \frac{E_r A_r}{l_r} \left\{ R_c - \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2 + (z_c - z_i)^2} \right\} \quad (13)$$

ここで、 E_r : 補強ゴムの接触面にあるゴムのヤング率、 A_r : 補強ゴムの該当ゴム要素の断面積、 l_r : 該当ゴム要素厚

これを用いて重錘側の挙動については、式(14)で加速度

を求めた後に、質点としての取り扱いにより速度・変位の更新を行った。

$$a = g - \frac{\sum_{i=1}^n f_i}{m_w} \quad (14)$$

ここで、 a : 衝突物加速度 (鉛直下向きを正とする)、 g : 重力加速度、 n : 接触要素数、 m_w : 重錘質量

4. 衝撃応答解析結果と考察

4.1 衝撃伝達荷重および変形量の時刻歴応答

本衝撃応答解析により得られた衝撃伝達荷重～時間関係と変形量～時間関係の一例を図-9 および図-10 に示す。図-9 は、落錘式衝撃実験における低強度繊維 5PLY で入力エネルギー1.0kN・m の実験結果とシミュレーション解析結果の比較である。図-10 は、同じく低強度繊維 5PLY で入力エネルギー5.0kN・m の実験結果とシミュレーション解析結果の比較である。なお、10kN・m における解析では、繊維の破断プロセスは確認することができた。しかしながら、繊維破断後の変形状況は、繊維破断位置に過度な変形が集中するような応答がみられ、繊維要素内の変位場をうまく評価することができなかった。この点については、実際の補強ゴムの衝撃挙動に含まれると思われる減衰性や繊維破断時に逸散するエネルギーの影響が解析では考慮されていないことが大きな原因と考えられる。

図-9(a)および図-10(a)より、衝撃伝達荷重～時間関係

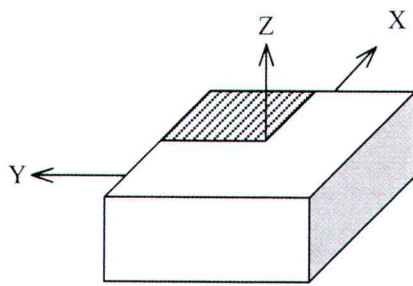
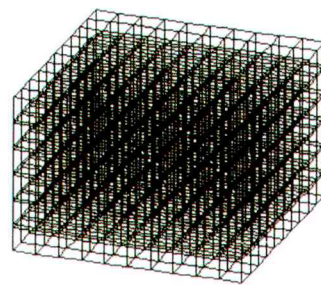
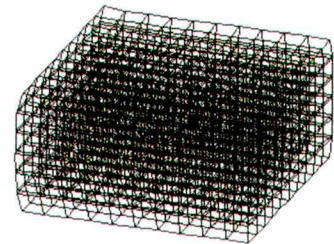


図-11 衝撃応答解析に用いた1/4モデル
(図-12および図-13は
この方向から見た状況図)

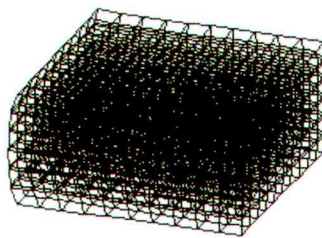


① 0 msec

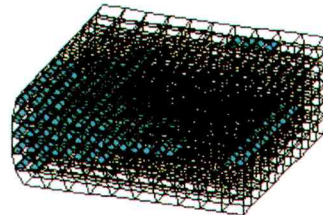


③ 10 msec

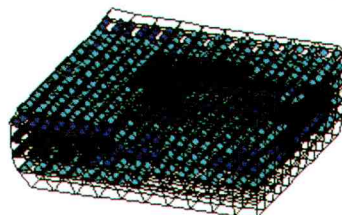
図-12 低強度繊維衝 5PLY (入力エネルギー1.0kN・m) の変形状況



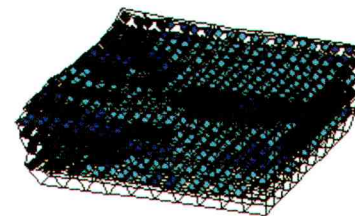
① 4 msec



② 6 msec



③ 8 msec



④ 10 msec

図-13 低強度繊維衝 5PLY (入力エネルギー5.0kN・m) の変形状況

は、いずれの条件においても実験値と比較して解析における応答値の方が遅い起ち上がりを示した。これは、本解析では、供試体底面における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における衝撃伝達荷重は、供試体の下面に供試体を取り付ける鋼製の固定治具(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の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、繊維破断後の挙動がメインとなるケースを除けば、本解析により、衝撃実験の衝撃伝達荷重～時間関係やその最大値を概ね良好にシミュレートしていることがわかる。

次に、図-9(b)および図-10(b)より、変形量～時間関係は、いずれの条件においても実験値と解析値を比較すると、最大変形量に達する時間が解析値の方がやや遅い傾向を示した。これは、落錘式衝撃実験において供試体の変形量を、図-1に示すように重錘の運動をレーザー式変位計で計測した値から算出したものであることも一因であると考えられる。すなわち、供試体が圧縮される方向ではその変形をとらえていると考えられるが、供試体が復元する方向では厳密に一致しているとは言い難いと考えられる。しかしながら、本衝撃応答解析により、落錘式衝撃実験の変

形量～時間関係やその最大値を概ね良好にシミュレートしているといえる。

4.2 変形状況と繊維の破断状況の評価

本衝撃応答解析で得られた供試体の時刻ごとの変形状況を示す。なお、供試体の変形状況図は図-11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-12に、低強度繊維 5PLY の入力エネルギー1.0kN・mにおける衝撃応答解析によって得られた変形状況図により、変形量～時間関係の各時刻における全体挙動を示した。図-12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。さらに、入力エネルギー1.0kN・mでは、繊維の破断も落錘式衝撃実験と同様に生じていないことがわかる。

図-13に、低強度繊維 5PLY の入力エネルギー5.0kN・mにおける衝撃応答解析によって得られた変形状況図を示す。また、図中の丸印は、繊維の破断が生じていることを示すものであり、水色、青色、黒色と濃い色ほど繊維の破断が進行していることを示す。これは、先に示した繊維の破断のモデル化において、単軸引張実験における破断ひずみの90%から徐々に剛性低下を始め、破断ひずみに達した時点で剛性が1/10に低下するよう表現したため、そ

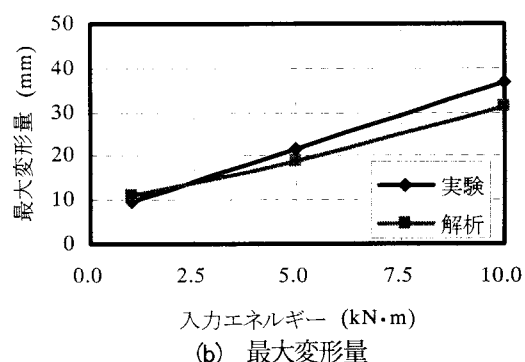
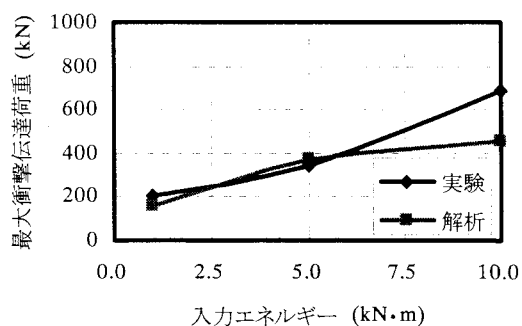


図-14 低強度繊維 5PLY

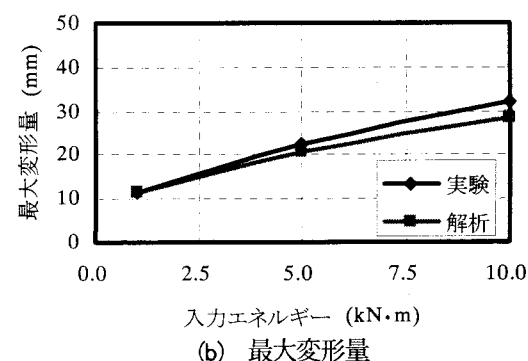
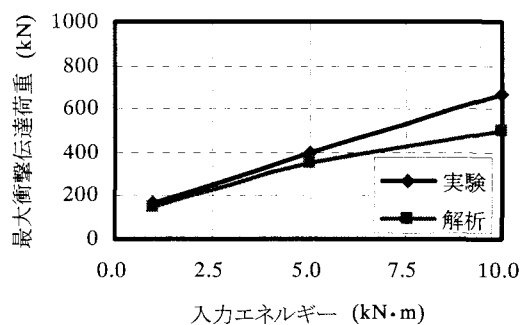


図-15 中強度繊維 5PLY

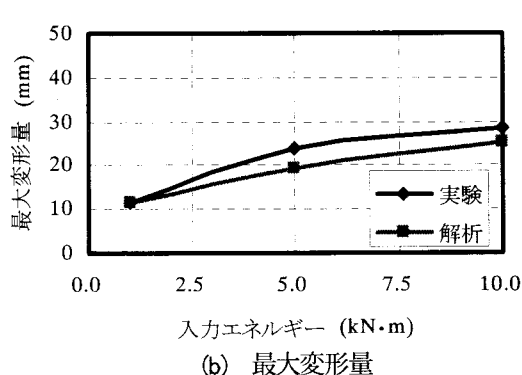
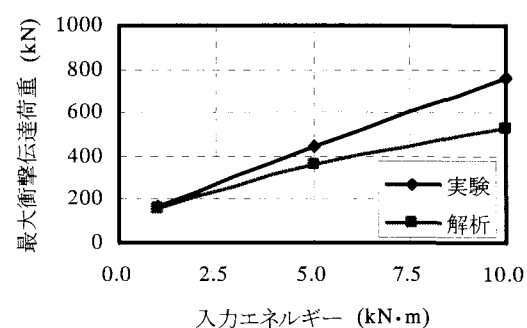


図-16 高強度繊維 5PLY

のレベルを3分割し表現したものである。図-13より、図-12と同様に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、本条件では、落錘式衝撃実験と同様に、繊維の破断が生じていることがわかる。この破断の状況は、圧縮変形が進行するにつれて、拘束面（供試体中央部）ではなく変形を生じやすい側面部に近い部分から繊維の破断が生じ始めることがわかる。さらに、変形が進行すると、5層ある繊維層のうち、側面が太鼓状に変形していることから中央層の繊維層の破断レベルが最も大きく、徐々に供試体上下面（拘束面）に破断レベルが増大している。また、平面方向に着目すると、変形を生じやすい側面部から徐々に内部に繊維の破断が進行していることがわかる。解析結果は、変形を生じやすい部分から順次繊維の破断が生じていくという実際に想定される状況に近いといえ、繊維の破断のメカニズムを概ね良好に評価できるといえる。

4.3 最大衝撃伝達荷重, 最大変形量

および繊維の破断の評価

以上のシミュレーション解析結果から、得られた時刻歴応答より求まる最大衝撃伝達荷重および最大変形量と、落錘式衝撃実験における最大衝撃伝達荷重および最大変形量を各繊維強度および入力エネルギーごとに比較した結果を図-14、図-15、図-16に示す。いずれの繊維強度においても、入力エネルギーが10.0kJのケースを除けば、落錘式衝撃実験における最大衝撃伝達荷重や最大変形量の入力エネルギーの増加に伴う増大傾向を良好にシミュレートしているといえる。

いずれの繊維強度においても、10kJのケースで最大衝撃伝達荷重に関して、実験値が解析値よりも大きな値となった。この理由としては、先に述べた減衰性能や繊維破断時に生じるエネルギーの逸散をうまく表現できていないことに加え、本解析では、速度効果として載荷速度が

表-5 埋設繊維の破断の比較

(a)低強度繊維 5PLY

入力エネルギー (kN・m)	実験	解析
1.0	破断せず	破断せず
5.0	破断	破断
10.0	破断	破断

(b)中強度繊維 5PLY

入力エネルギー (kN・m)	実験	解析
1.0	破断せず	破断せず
5.0	破断	破断
10.0	破断	破断

(c)高強度繊維 5PLY

入力エネルギー (kN・m)	実験	解析
1.0	破断せず	破断せず
5.0	破断せず	破断せず
10.0	破断	破断

1.0m/sec までの高速載荷実験結果から、ゴムの材料定数に対する速度効果に関する係数として簡易に 2.5 を乗ずることとしたが、10.0kN・m の場合は、衝突速度が 7.0m/sec にも達するため、2.5 以上の値を速度効果に関する係数として乗ずる必要があるためと考えられる。より高精度な高速載荷試験を行い、速度効果係数を変形速度の関数として表現することは今後の重要な検討課題といえる。

次に、落錘式衝撃実験における繊維の破断の有無と本衝撃応答解析の変形状況図より評価した繊維の破断の有無を比較した結果を表-5 に示す。

表-5 より、本手法を用いることで落錘式衝撃実験において、衝撃的な力が作用したレベルに応じた繊維の破断を確実に予測できることがわかる。したがって、本解析手法により、落錘式衝撃実験では確認することが困難であった繊維の破断とその状況を推定することができ、補強ゴムの適用範囲を決定するための不可欠な情報を得られることが確認された。

5. 結論

本研究では、補強ゴムを衝撃緩衝材として適用した場合の性能評価を 3 次元有限要素モデルによる衝撃応答解析により行ったものである。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、繊維を引張限界を有する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、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、衝撃的な力が作用した際の補強ゴムの繊維の破断の有無 (健全性評価) とその状況を評価することができるとともに、軽度な損傷であれば、落錘式衝撃実験における補強ゴムの衝撃伝達荷重や変形量の時刻歴応答とそれらの最大値を概ね良好にシミュレートできた。
- (3) 本手法を用いることにより、任意の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、現場の条件に適合した緩衝材の設計ができると考えられる。

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，Apr.2003。
- 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.1865-1874，2000.3。
- 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.1655-1664，2001.3。
- 6) 園田佳巨，西本安志，石川信隆，彦坂熙：落橋防止用矩形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) R.W.Ogden：Non-Linear Elastic Deformation，Dover，1997。
- 9) 河村幸伸，裏山健治，糀谷信三，深堀美英：エラストマーのひずみエネルギー密度関数の解析，日本ゴム協会誌 Vol.73，pp.6-13，2000.3。
- 10) 例えば，日本機学会：計算力学ハンドブック (I 有限要素法 構造編)，丸善，1998。

(2004 年 9 月 17 日受付)