

積層繊維補強ゴム緩衝材の衝撃破壊特性に関する解析的考察

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

下藺征史*, 園田佳巨**, 玉井宏樹***, 西本安志****

Masafumi SHIMOZONO*, Yoshimi SONODA**, Hiroki TAMAI***, Yasushi NISHIMOTO****

* エムエスシーソフトウェア株式会社 コンサルティング事業部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 1-23-7)

**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)

***九州大学大学院博士後期課程学生, 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)

****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)

After the Hyogo-ken Nanbu Earthquake, various shock absorbing devices by rubber material were developed. However, in case that there is insufficient installation space, a laminated fiber reinforced rubber is applied as an effective shock absorber. Although the basic mechanical properties of it had already investigated, basic important characteristics (static energy absorption capacity) have not been evaluated yet by numerical analysis. Thus, the analytical method that can predict not only the energy absorption capacity but also the impact response of laminated fiber is presented in this study. 3-dimensional failure analysis by static load and impact response analysis are performed, and it could simulate the precise behavior of laminated fiber reinforced rubber under static and impact load. As a result, the proposed method could provide the failure process of laminated fibers and predict the energy absorption capacity.

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

衝撃緩衝材, 積層繊維補強ゴム, 衝撃応答解析

1. 緒言

落橋防止構造などの衝撃的な荷重が作用する可能性がある箇所には, 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⁾. しかし, 緩衝材を設ける場所に空間スペースを十分に確保できないような場合には, 通常の柔らかいゴムを用いた緩衝材では要求性能に対応できず, 写真-1 に示すような高剛性の繊維材を埋設した積層繊維補強ゴムなどによって代用されることも多い.

積層繊維補強ゴムは, 繊維の非可逆的な塑性変形や破壊によって衝撃エネルギーを吸収するとともに, ゴム本来の柔軟性による衝撃荷重の低減効果も期待した緩衝材で, 著者らはこれまで主に実験的な考察によってそのエネルギー吸収性能と衝撃緩衝効果について定量的に検討を行ってきた^{2,3)}. さらに, ゴムと繊維を個別に簡易にモデル化した3次元衝撃応答解析を試み, 衝撃荷重の低減効果や埋設繊維の破断の可能性を概ね予測できることを示した⁴⁾.

しかし, 繊維補強ゴムは, ゴムに埋設する繊維の種類や枚数について選択の自由度が大きいだけに, 現場のニーズに応じた適切な諸元の決定は容易でない. また, 設計時に繊維補強ゴムの最も基本的な力学特性と考えられている

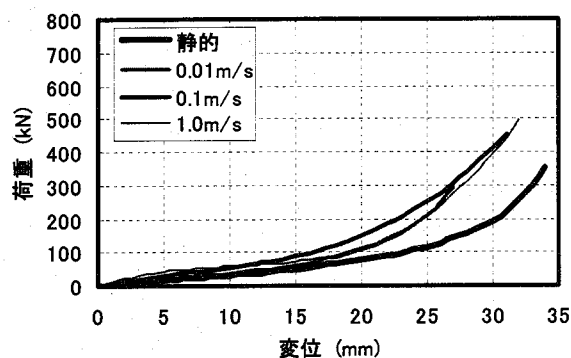


写真-1 積層繊維補強ゴム (断面写真)

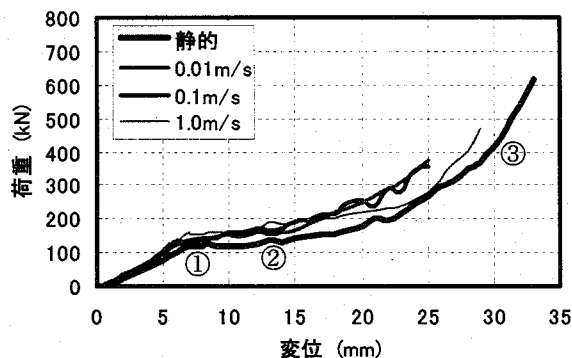
静荷重作用時のエネルギー吸収能力について, 繊維各層の破断の進展を解析的に追跡が困難なために, 未だにその評価方法について提示できていない. そのため, 供試体レベルの実験に基づく経験則を適用して実際に用いる繊維補強ゴムの諸元を決定しているのが現状である.

本研究は, この現状を開くために, 要求性能に応じた積層繊維補強ゴムの諸元決定を行う際に不可欠な静荷重に対するエネルギー吸収性能と衝撃荷重が作用したときの緩衝効果の2点を数値計算によって得ることを目的としたもので, 具体的な解析手順 (数値解析モデル, 解析手法) について検討・提案するものである.

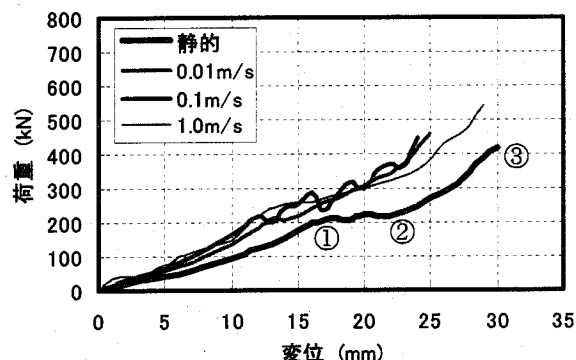
特に, 本研究では, 積層繊維補強ゴムを, ゴムはソリッド要素, 繊維はトラス要素でモデル化し, 繊維各層の破断進展状況を解析的に確認可能とすることで, 緩衝材としての適用限界を予測することを目的としている.



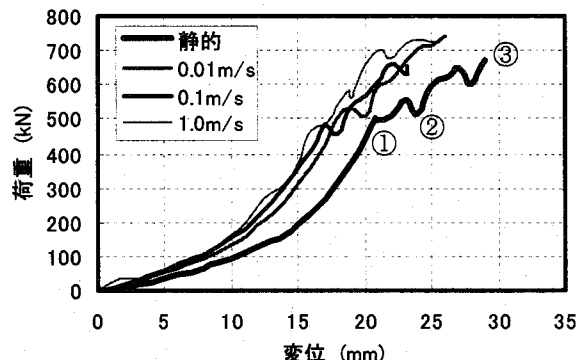
(a) 硬度 65 のゴム



(b) 低強度繊維 5 層



(c) 中強度繊維 5 層



(d) 高強度繊維 5 層

図-1 静的および高速載荷実験結果

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)	102(MPa)
破断時の伸び(%)	40	25	20	600
硬度	—	—	—	65
構成糸(denier*)	2520	1260	1200	—

* denier とは繊維の太さの単位であり、1denier は長さ 9000m の繊維の重さが 1g の時の糸の太さ。

2. 積層繊維補強ゴムの力学的特長

積層繊維補強ゴムの基本的な力学特性については、既に著者の中の西本によって定量的な検討^{2,3)}を行っている。ここでは、本研究で解析的に評価した項目(緩衝材としての基本特性)について簡単に紹介する。

2.1 積層繊維補強ゴムの圧縮変形特性

被衝突物の保護を目的に繊維補強ゴムを用いる場合、圧縮変形時の荷重-変位関係が、緩衝材としての基本性能を大きく左右する。そこで、過去に実施した静的・高速載荷実験の典型的な結果をもとに、繊維補強ゴムに対して埋設繊維の種類や層数が荷重-変位関係に与える影響について示す。図-1 は、通常の総ゴム(硬度 65)と硬度 65 のゴムの中に表-1 に示すような 3 種類(低強度、中強度、高強度)の異なる繊維をそれぞれ 5 枚埋設した 4 種類の供試体(縦 150mm×横 150mm×高さ 50mm の矩形状ブロック)に対して、圧縮速度 5mm/min (8.3×10^{-5} m/sec)で行った静的試験と圧縮速度 0.01, 0.1, 1.0m/secで行った定速度載荷試験の結果を示したものである。図-1(a)より、通常のゴムの場合、定速度試験と静的載荷で剛性に約 2.0~2.5 倍の相違が存在し、変形が大きくなるほど両者の差が拡大する傾

向にあるが、3 種類の定速度試験の間には荷重~変位関係に明確な差が認められない。したがって、通常の総ゴムの動的圧縮耐力を正確に評価するには、変位(もしくはひずみ)速度と剛性の間に微小な速度の発生とともに、大きな剛性の変化を伴うような非線形な関係を仮定する必要があることがわかる。

一方、図-1(b)~(d)より、積層繊維補強ゴムの荷重-変位関係の力学的特徴として、埋設繊維が破断するために通常のゴムには見られない明確な降伏点(図中①)が存在することがわかる。また、埋設された繊維の各層が逐次破断することによって、変形が進行しても荷重が増加しない領域(図中②)が存在し、最終的にはほぼ全ての繊維が破断した後に、総ゴムと同様のハードニング的な傾向を示す領域(図中③)があることがわかる。繊維補強ゴムの剛性に対する載荷速度の影響は、いずれの繊維の場合も降伏点までは比較的小さいが、埋設繊維が破断し、母材となるゴムの特性が支配的となる変位域に至ると載荷速度の影響が無視できなくなることがわかる。

2.2 積層繊維補強ゴムの衝撃応答特性

繊維補強ゴムに衝突物が作用した場合の衝撃荷重の低

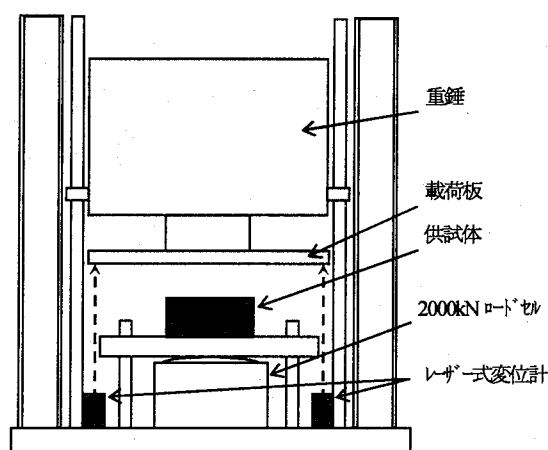


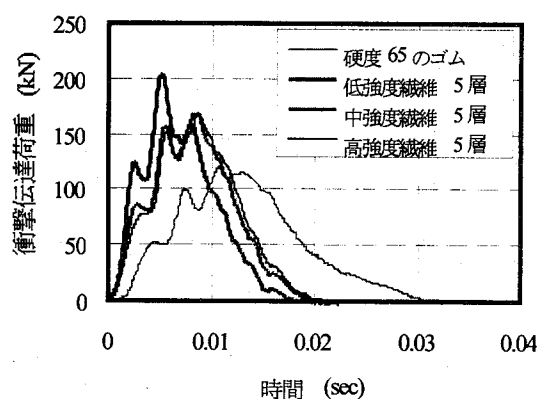
図-2 落錘式衝撃実験の状況

表-2 落錘式衝撃実験条件

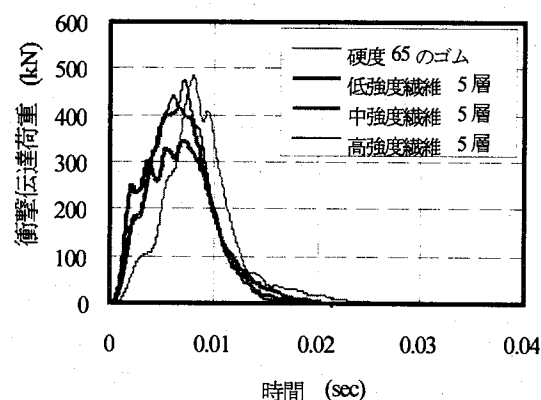
入力エネルギー (kN・m)	落下高さ (m)	衝突速度 *(m/s)
1.0	0.25	2.21
5.0	1.25	4.94

*衝突速度 $v=(2gh)^{1/2}$ により算出

減効果は、緩衝材として最も重要な性能である。そこで、図-2に示すような落錘式衝撃実験装置により、総ゴムを含む4種類の供試体（縦150mm×横150mm×高さ50mmの矩形状ブロック）に対し、質量408kgの重錘を表-2に示す条件で落下・衝突させた結果を示す。実験では載荷板の左右にレーザー式変位計を設置し、両者の値はほぼ等しい値を示したことから、これらの平均値を本実験での変形量とした。図-3は、衝撃実験により得られたゴム底面への衝撃伝達荷重の時間的変化を示したものである。図-3(a)の入力エネルギー1.0kN・mの場合、繊維補強ゴムの埋設繊維が破断しない弾性範囲内の応答であることから、総ゴムよりも弾性剛性が高い繊維補強ゴムの方が衝撃伝達荷重の立ち上がりおよび最大値ともに大きな値を示すことがわかる。次に、図-3(b)の入力エネルギー5.0kN・mの場合、低強度および中強度繊維供試体には埋設繊維の破断が生じたために衝撃伝達荷重が低減し、総ゴムよりも小さな値となっている。すなわち、積層繊維補強ゴムに衝撃的な力が作用して埋設繊維が破断する場合には、最大衝撃伝達荷重は大きく低減されることが認められる。一方、衝撃伝達荷重の作用時間はゴム単体の場合とほぼ変わらず、また、図-3に示す衝撃伝達荷重時間関係から求めた力積は積層繊維補強ゴムの方がやや小さい値を示した。よって、積層繊維補強ゴムは、埋設繊維が破断するようなハードな衝突になると、図-3(b)の低強度繊維供試体に見られるように力積及び最大衝撃伝達荷重を低減することができる有用な衝撃緩衝材として期待できる。



(a)入力エネルギー1.0kN・m



(b)入力エネルギー5.0kN・m

図-3 衝撃伝達荷重～時間関係

3. 積層繊維補強ゴムの解析モデル

積層繊維補強ゴムのモデル化に際して、数値解析で各層繊維の破断の進展を忠実に再現できるように配慮した離散化モデルを検討した。本研究における解析には、非線形有限要素解析ソフトウェア MSC.Marc を用いており、各要素のひずみ-変位関係は、大ひずみ・大変形解析に対して適用可能なように定式化されている。以下に本研究で用いた数値解析モデルを示す。

3.1 ゴム材料のモデル化

繊維補強ゴム緩衝材の母材となるゴム材料は、埋設繊維に比べて2～3桁ほど小さな剛性しか有していない。しかし、矩形状の緩衝材を圧縮したときに、ゴムの非圧縮性に基づく側方への伸長によって埋設繊維に荷重の伝達が行われるため、繊維補強ゴムの変形特性を正確に評価するには、ゴムの圧縮・引張両域の変形特性を精度良く再現できる構成式を適用する必要がある。一般にゴムは式(1)で定義される超弾性体⁹⁾として扱われることが多いことから、本研究でも同様に取り扱い、適切なひずみエネルギー密度関数の検討を行った。

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

ここに、 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
ひずみエネルギー密度関数には各種の式⁹⁾が考えられ、

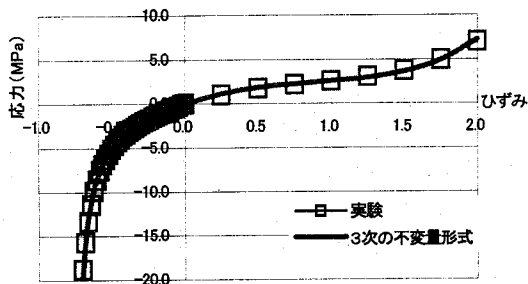
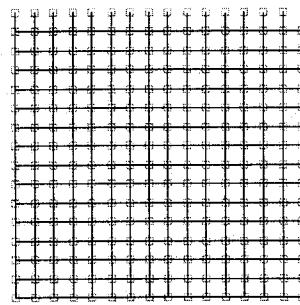
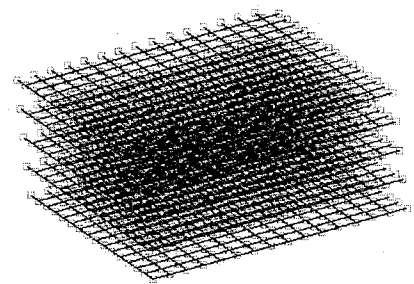


図4 ゴム材料の応力-ひずみ関係

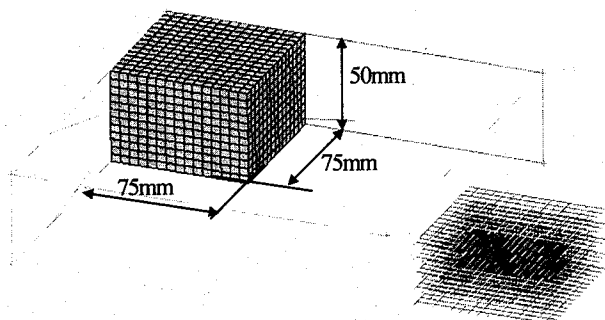


(a) 平面図 (5層モデル)



(b) 全体図 (5層モデル)

図5 積層繊維要素モデル (トラス要素格子構造)



ゴム要素: 2700 (15X15X12)

繊維要素: 2250 (15X15X2X5)

図6 解析モデル (5層モデル)

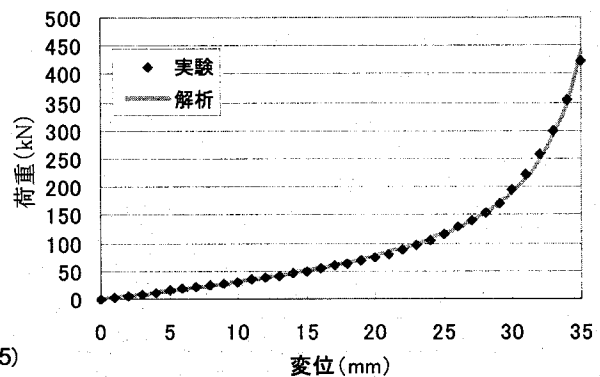


図7 硬度65ゴムの圧縮変形解析結果

著者らも、最も簡便な以下の Mooney-Rivlin の2パラメータ式を用いた検討を行ったことがある。

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

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。

しかし、2パラメータモデルでは、圧縮もしくは引張域どちらかの応力-ひずみ関係を再現するだけの自由度しかなく、両域に渡るS字カーブ状の変形特性を表現し切れない。そこで、本研究では式(3)に示すような5個のパラメータを用いて右 Cauchy-Green 変形テンソル不変量の3次関数式で表現されたひずみエネルギー密度関数を適用することにした。

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (3)$$

ここに、 $c_{10}, c_{01}, c_{11}, c_{20}, c_{30}$: Mooney-Rivlin 定数 (MPa)

式(3)を適用するにあたり、図4に示すように圧縮・引張両域のゴムの応力-ひずみ関係式を完全に再現できるようにカーブフィッティングを行い、5つの定数を決定した。以下に、硬度65の総ゴムに対して求めた材料定数を示す。

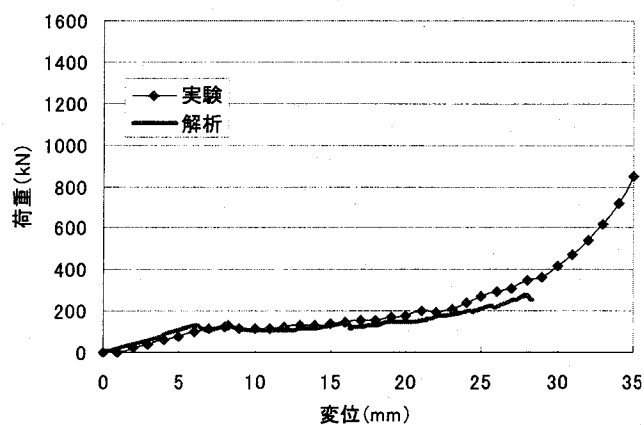
$$\begin{aligned} C_{10} &= 1.004 \text{ (MPa)}, C_{01} = 0.077 \text{ (MPa)} \\ C_{11} &= 0.021 \text{ (MPa)}, C_{20} = -0.103 \text{ (MPa)} \\ C_{30} &= 0.012 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

3.2 繊維材のモデル化

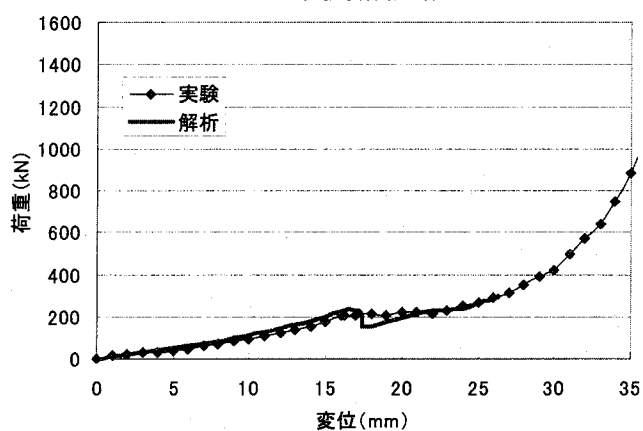
本解析では繊維材をトラス要素で表現し、繊維要素の相当ひずみが、表-1に示した繊維材の破断ひずみに達したときに要素機能が停止するディアクティベイトの判定条件を設定した。本機能は、Marc ユーザーサブルーチンを用いて定義したもので、繊維要素のひずみが破断ひずみを超える状態となった要素は、剛性マトリックスを作成する段階で除外されるように設定され、このとき要素内に蓄積されたひずみエネルギーは失われるものとみなした。その際、要素を構成する節点位置は、要素機能が停止する以前のため、視覚的には繊維要素が消失したように表示される。

実際の繊維補強ゴムに埋設される繊維材は、縦糸と横糸が網状に交差しているが、解析モデルは、図-5に示すようにトラス要素を格子状に配置したものとして表現し、縦糸と横糸の交差箇所を節点を共有するようにモデル化した。なお、供試体に対する繊維剛性を等価となるように繊維層間及び格子間隔を設定した。

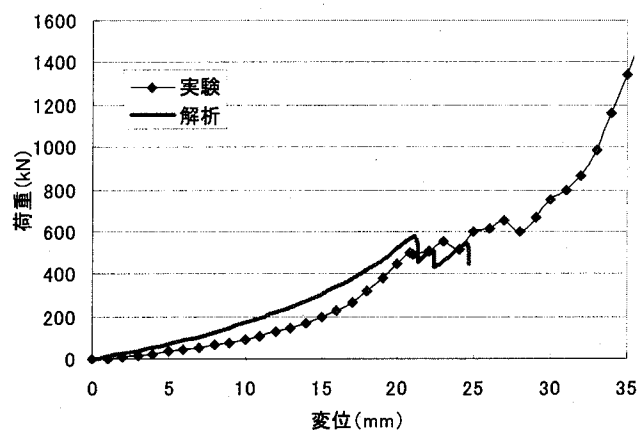
以上のゴム、繊維2種類の材料要素を併用し、3.1で示したゴムの構成則を適用した3次元ソリッド要素(8積分点)とトラス要素(1積分点)による格子構造で節点を共有させ、複合した積層繊維補強ゴムモデルを作成し、静的解析および衝撃応答解析を行った。



(a)低強度繊維5層



(b)中強度繊維5層



(c)高強度繊維5層

図-8 積層繊維補強ゴムの静的破壊解析結果

4. 積層繊維補強ゴムの挙動解析

積層繊維補強ゴムの基本性能となる限界吸収エネルギーと衝撃緩衝効果の2点を解析的に把握するために、図-6に示す矩形形状の供試体1/4領域をモデル化し、静的破壊解析および衝撃応答解析の2種類の数値計算を試みた。

4.1 静的破壊解析結果および考察

積層繊維補強ゴムの静的限界吸収エネルギーを数値計算により把握可能かどうか検討した。対称面および供試体底面（鉛直方向のみ）に変位拘束を与え、上面に剛体によ

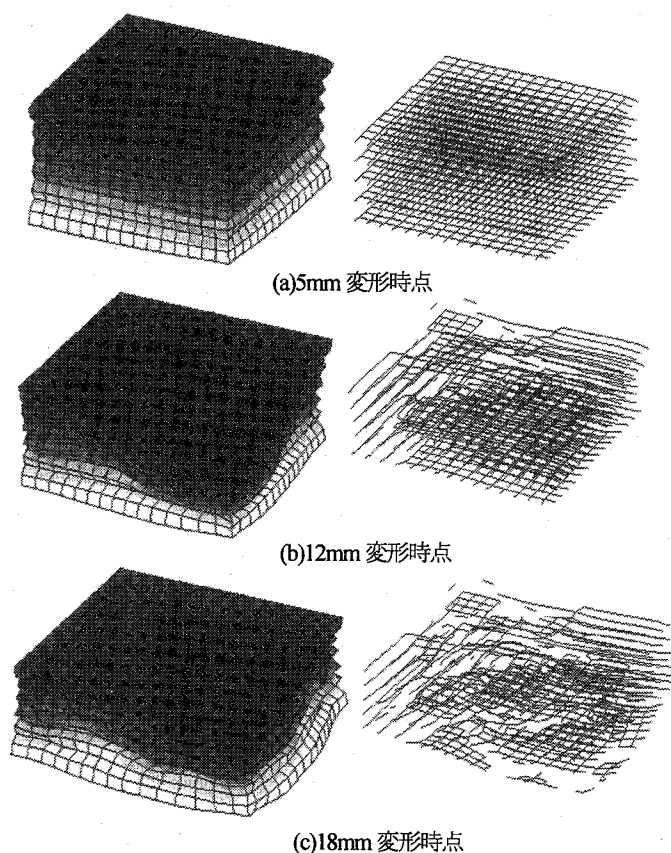


図-9 圧縮変形と埋設繊維の破断の進展状況
(低強度繊維モデル)

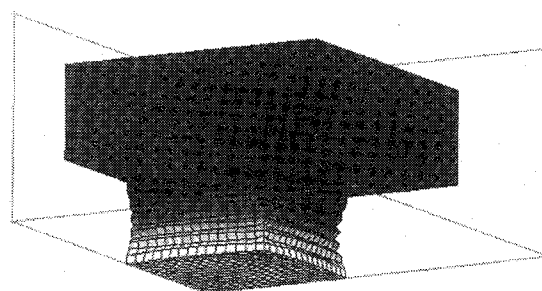
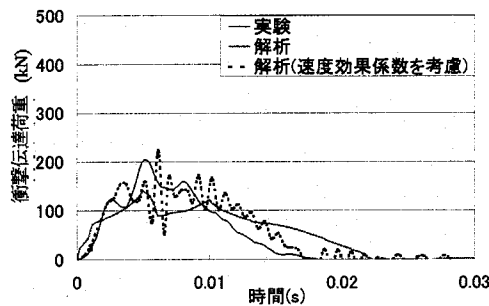


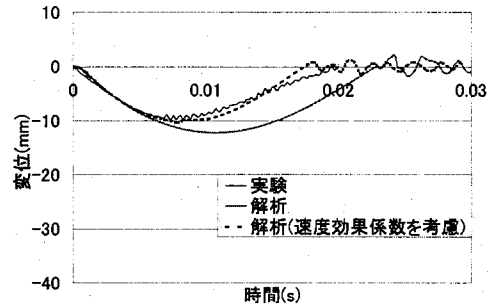
図-10 重錘落下衝撃解析モデル

る鉛直方向の強制変位を与える変位増分解析を行った。図-7は、繊維補強ゴムに対する解析を行う前に試算した硬度65の総ゴムの静的荷重-変位関係を実験結果と比較したものである。この図より、解析は矩形形状ブロック高さの70%に相当する35mmの変位領域まで実験をシミュレートできており、この程度の精度でシミュレートできれば、実設計時のゴム材の諸元決定として差し支えないと考えられる。式(3)に示す5パラメータ構成則をゴム材料に適用したことで、完全に硬度65のゴムの圧縮変形特性を再現可能であることが認められる。

次に、3種類の繊維補強ゴム（低・中・高強度繊維5層

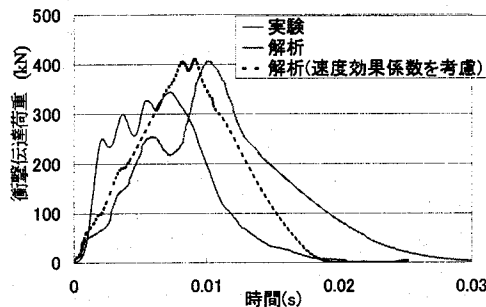


(a)衝撃力応答

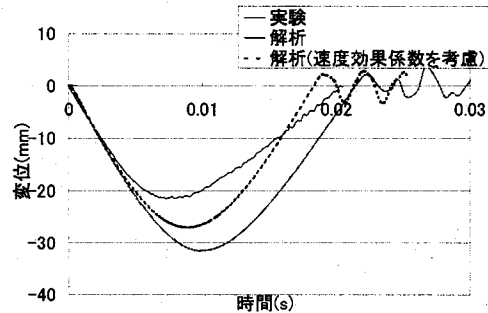


(b)変位応答

図-11 低強度繊維5層埋設モデル (入力エネルギー1.0kN・m)

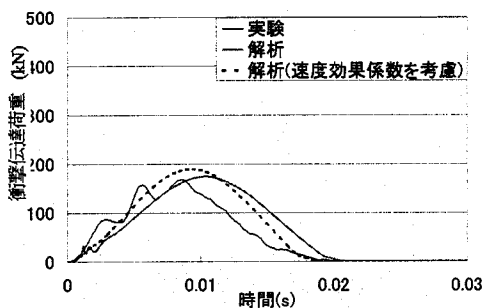


(a)衝撃力応答

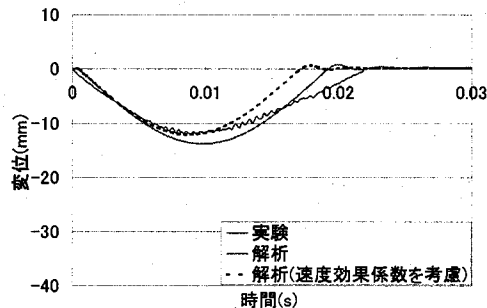


(b)変位応答

図-12 低強度繊維5層埋設モデル (入力エネルギー5.0kN・m)

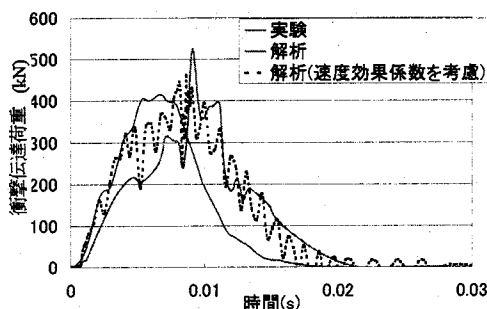


(a)衝撃力応答

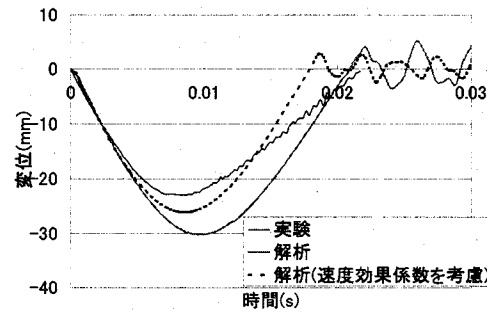


(b)変位応答

図-13 中強度繊維5層埋設モデル (入力エネルギー1.0kN・m)



(a)衝撃力応答

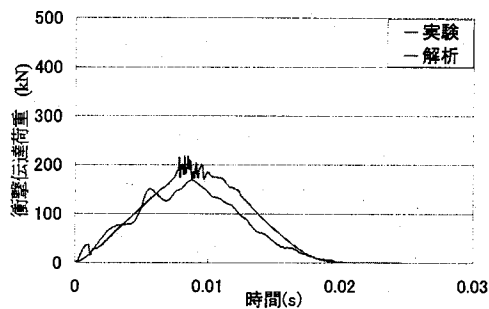


(b)変位応答

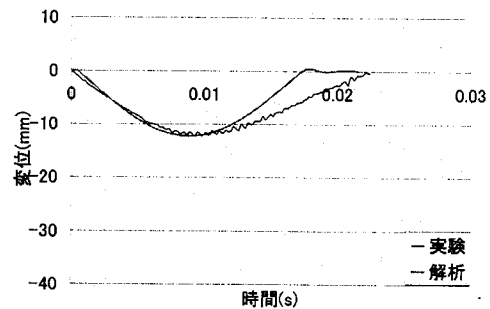
図-14 中強度繊維5層埋設モデル (入力エネルギー5.0kN・m)

埋設供試体)に関する静的破壊解析で得られた荷重-変位関係を、図-8(a)～(c)に示す。これらの図より、3種類の繊維ゴムいずれも、最初に繊維の破断が始まる初期降伏点から、徐々に繊維各層の破断が進展し、変形が進行しても荷重が増加しない領域まで良好に実験結果を再現できており、50%の圧縮ひずみとなる25mmの変位まで解析可能であることがわかる。ただし、これ以降の領域に関しては、非線形性が急激に高まるとともに収束性も悪化する場合が見られた。したがって、実務的にゴム製緩衝材の適用範

囲とみなされる40%圧縮ひずみを上回る50%までの変形挙動をシミュレートすることとした。以上のことから、これまで数値解析で評価できなかった積層繊維補強ゴムの静的限界吸収エネルギーを、本手法で把握できることが明らかとなった。図-9は、低強度繊維を5層埋設した供試体について、静荷重による圧縮変形と埋設繊維の引張破断の進展状況を3段階に分けて示したものである。この図より、繊維が埋設された層で側方への膨張が抑制され、緩衝材全体の剛性の向上に寄与している状況が把握でき

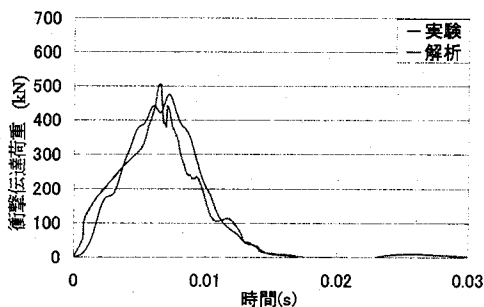


(a) 衝撃力応答

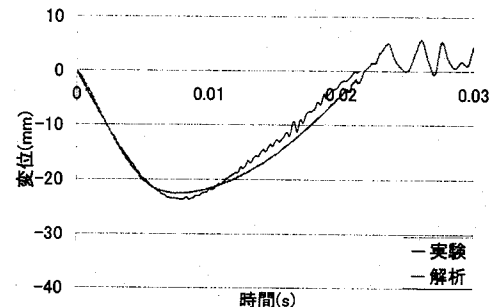


(b) 変位応答

図-15 高強度繊維 5 層埋設モデル (入力エネルギー 1.0 kN・m)

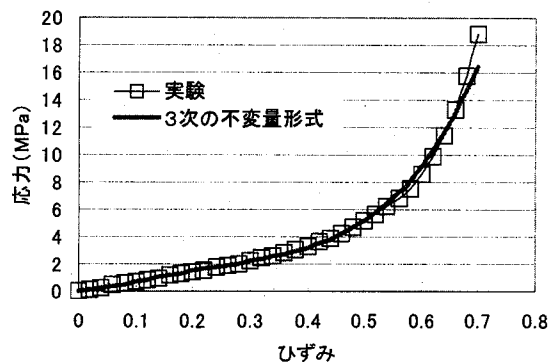


(a) 衝撃力応答

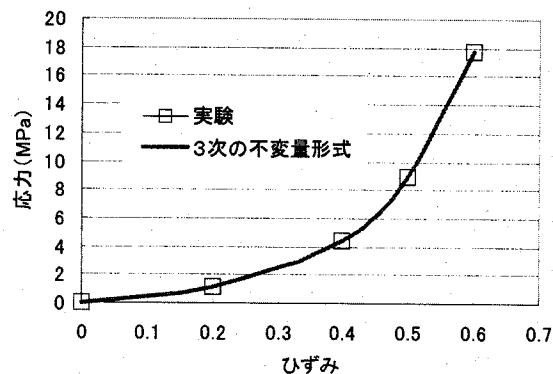


(b) 変位応答

図-16 高強度繊維 5 層埋設モデル (入力エネルギー 5.0 kN・m)



(a) 圧縮荷重-変位関係 (静的荷重)



(b) 圧縮荷重-変位関係 (載荷速度 1.0 m/sec)

図-17 ゴムの速度依存性に関する検討 (カーブフィッティング状況)

る。また、5mm 変形時 (10%圧縮) には殆どの繊維が健全であるが、18mm 変形時 (36%圧縮) にはほぼ全ての繊維が破損しており、これ以降はゴム自体の硬化領域に遷移していることが推察される。

4.2 衝撃応答解析結果および考察

積層繊維補強ゴムの衝撃力の緩衝効果を解析的に把握するために、重錘落下試験状況を 1/4 領域で再現した図-10 に示すようなモデルを用いて衝撃応答解析を行った。被衝突体である繊維補強ゴムのモデルは、静的破壊解析と同様のものを用い、衝突体である重錘については、質量が等しくなるように矩形状の弾性体に置き換えてモデル化し、衝撃応答解析のための時間積分には、無条件安定かつ 2 次のオーダーの精度を有するシングルステップフォーバート法を採用した。

衝撃応答解析により得られた、衝突体接触面と対称軸が交差する位置にある節点の衝撃力応答と変位応答を図-11

～図-16 に示す。図-11, 12 は落錘式衝撃実験における低強度繊維 5 層埋設の供試体を対象に、入力エネルギー 1.0 kN・m、5.0 kN・m の 2 ケースの実験結果との比較であり、同様に、図-13, 14 は中強度繊維 5 層埋設供試体、図-15, 図-16 は高強度繊維 5 層埋設供試体の結果を示している。図-11～14 中に破線で示した値は、速度依存性に関する試算として、5 つの Mooney-Rivlin 定数に一律に 2.0 を乗じて解析した結果を併記している。なお、本来であれば、繊維材の載荷速度の影響についても評価すべきであるが、過去の実験で積層繊維補強ゴムの圧縮特性を評価した場合、ゴムと繊維の載荷速度の影響を比較すると、ゴムの方が載荷速度の影響が大きいという知見を得ており、本解析では、ゴムの載荷速度の影響に着目した。⁴⁾

これらの結果から、低強度・中強度繊維の入力エネルギー 5.0 kN・m のケース以外は、伝達荷重および緩衝材変位とも実験値に近い結果が得られていることがわかる。なお、衝撃実験において繊維の破断が認められなかった高強度

繊維の場合、ゴムの荷重分担が非常に小さいことを想定し、ゴムの速度効果の影響を考慮しなかった。本手法で繊維補強ゴムの弾性衝撃応答を精度良く得られることが認められる。

一方、低強度・中強度繊維の入力エネルギー $5.0\text{kJ}\cdot\text{m}$ の場合には、埋設繊維の破断の発生・進展とともにゴムの荷重分担が大きくなり、ゴムが有する速度依存性の影響が実験時の変位に大きく反映されていると考えられる。図-12(b)、図-14(b)に示すように、低強度繊維の $1.0\text{kJ}\cdot\text{m}$ エネルギー入力時には2.0程度の補正係数で変位が実験値に近くなるが、 $5.0\text{kJ}\cdot\text{m}$ エネルギー入力時には、ゴムの荷重分担がより大きくなることから、速度効果による補正係数は2.0以上の補正が必要であることがわかる。図-1(a)に示した矩形供試体の圧縮荷重-変位関係のみ（引張域を考慮しない）に着目し、静載荷と載荷速度 1.0m/s の場合で、それぞれ図-17(a)、(b)のようなカーブフィッティングを試みた。その結果、得られた主係数と考えられる右 Cauchy-Green 変形テンソル1次項の2つのパラメータに着目すると、以下のように約30~50%の値の増加が見られた。

$$C_{10}=9.045 \rightarrow 12.32 \quad C_{01}=-8.362 \rightarrow -12.90 \quad (\text{MPa})$$

衝撃荷重を受けて変形する緩衝材内部では、各位置で変形速度が異なり、局所的には大きなひずみ速度を生じることが考えられるため、一概にその影響を論じることはできない。しかし、繊維補強ゴムの衝撃緩衝効果を繊維の破断を許容する条件のもとで精度良く求めるには、母材となるゴムの速度依存性を考慮した構成式を研究し、その成果を本解析に利用する必要があることが確認された。

5. 結論

本研究は、要求性能に応じた積層繊維補強ゴムの諸元を決定する手法を確立するために、静荷重に対するエネルギー吸収性能と衝撃荷重が作用したときの緩衝効果の2点を定量的に評価可能な解析方法について検討したものである。本研究で得られた成果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 積層繊維ゴムの母材となるゴム材料の変形特性について、圧縮-引張の領域で精度良く再現するために、本解析では5パラメータモデルを適用した。その結果、総ゴムの静的圧縮荷重-変位関係をほぼ完全に再現できることが確認された。
- (2) 繊維をトラス要素でモデル化し、破壊ひずみに達した後は要素機能を停止させるような手法を解析プログラムに組み込むことで、繊維補強ゴムの破壊性状をシミュレートできることが認められた。破壊実験結果と比較すると、圧縮ひずみ50%（変位25mm）の領域まで静的荷重-変位関係を良好に再現可能であり、設計時に重要視される吸収エネルギー量を数値解析によって把握可能であることがわかった。
- (3) 繊維補強ゴムの衝撃応答解析を行い、衝撃挙動を概ね再現できることがわかった。ただし、既往の研究でも

指摘されているように、繊維が破断してゴム材料の荷重分担が大きくなるほど、解析の精度を向上させるにはゴム剛性に対する速度依存性を考慮する必要があることが確認された。

以上の結果を踏まえ、ゴム材料の速度依存性を考慮した構成式を提案するために、実験・解析の両面から検討を進める予定としている。

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，pp.247，2002。
- (2) 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。
- (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，玉井宏樹，園田佳巨，別府万寿博，彦坂熙：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，構造工学論文集 Vol.51A，pp.1625-1634，2005.3。
- (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，梶谷信三，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。

(2005年9月10日受付)