

(4) 積層繊維補強ゴム緩衝材の衝撃応答解析

An Impact Response Analysis of the Laminated Fiber Reinforced Rubber as a Shock Absorber

下藪征史*, 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, 商品企画第二グループ (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地)

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. 諸言

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. 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と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あり, 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^{1,2)}. 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³⁾.

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, この現状を打開するために, 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

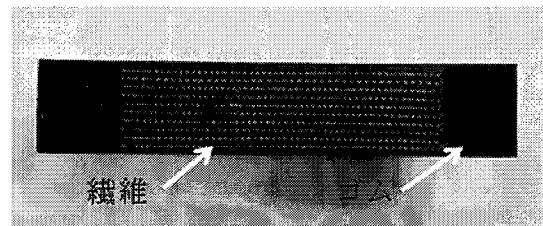


写真-1 積層繊維補強ゴム断面

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.

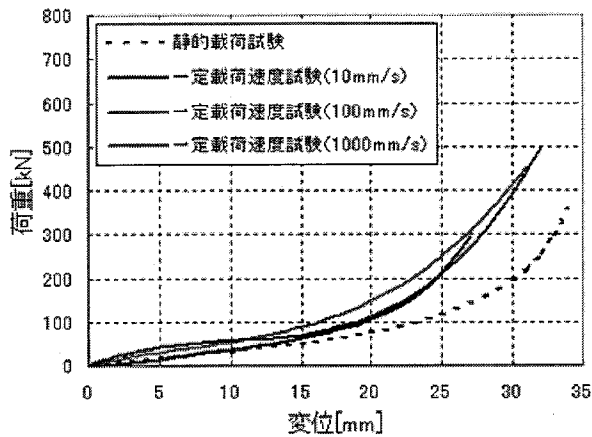
2. 積層繊維補強ゴムの力学的特徴

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^{1,2)}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.

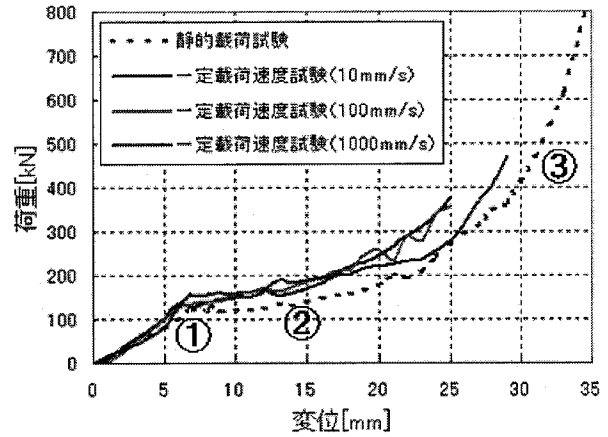
2.1 積層繊維補強ゴムの圧縮変形特性

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・高速度載荷実験の典型的な結果をもとに, 繊維補強ゴムに対し埋設繊維が荷重-変位関係に与える影響について示す.

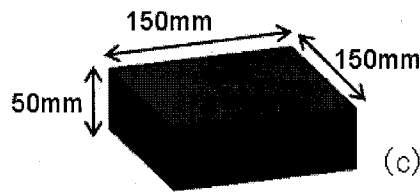
図-1(a)は, 硬度 65 の総ゴム, 図-1(b)は硬度 65 のゴム中



(a) 硬度65の総ゴム



(b) 積層繊維補強ゴム



(c) 試験体の形状寸法

図-1 静的載荷試験および一定速度載荷試験結果

表-1 ゴムと繊維の材料諸元

材料	材質	引張強度	破断時伸び	硬度	構成糸
ゴム	天然ゴム系	10.2[MPa]	800[%]	65	-
繊維	ナイロン	1080[MPa]	6.5[%]	-	2520[denier]

*) 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。

に繊維を5枚埋設した積層繊維補強ゴムについて、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10, 100, 1000m/secで行った一定速度載荷試験の結果を示したものである。図-1(c)に試験体の形状寸法を、表-1に各材料の諸元を示す。

図-1(a)より、総ゴムの場合、一定速度載荷試験と静的載荷試験で、剛性に約2.0~2.5倍の相違が存在し、変形が進行するほど両者の差が拡大する傾向にあるが、3タイプの一定速度載荷試験の間には、荷重-変位関係に明確な差が認められない。したがって、ゴムに対する動的圧縮耐力を正確に評価するためには、ゴムの変形速度と剛性の間に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)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、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移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試験装置により、総ゴムを含む先述の2つの供試体に対し、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。試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試験での変形量とした。図-3は、衝撃試験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)の落下高さ250mm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高い値を示すことがわかる。一方、図-3(b)の落下高さ1250mmの場合、埋設繊維の破断が生じたために衝撃伝達荷重が低減し、最大

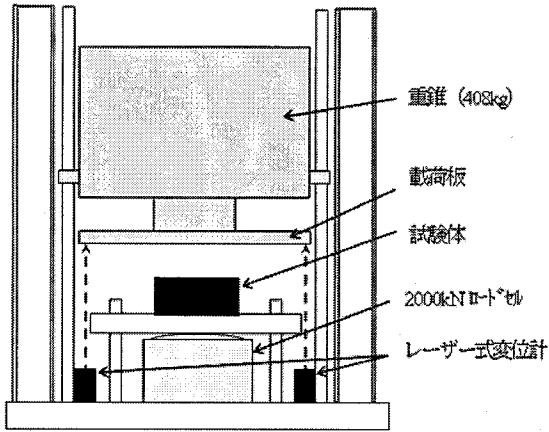


図-2 落錘式衝撃試験装置

表-2 落錘式衝撃試験条件

落下高さ [mm]	衝突初速度 [mm/s]	入力エネルギー [kJ・mm]
250	2214	1000
1250	4950	5000

荷重は総ゴムよりも小さな値になっている。このことから、積層繊維補強ゴムに衝撃的な力が作用し、埋設繊維が破断する場合、最大衝撃伝達荷重は大幅に低減されることがわかる。また、衝撃伝達荷重の作用時間については、総ゴムの場合とほぼ変わらず、図-3の衝撃伝達荷重-時間の関係から求められる力積は、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、埋設繊維の破断が早い段階で現れるハードな衝突になるほど、図-3(b)の積層繊維補強ゴム試験体にみられるように、力積及び最大衝撃伝達荷重を低減し得る衝撃緩衝材として期待できることがわかる。

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精度良く再現できるよう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、汎用非線形構造解析プログラム 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なわれるため、繊維補強ゴムの変形特性を正確に評価

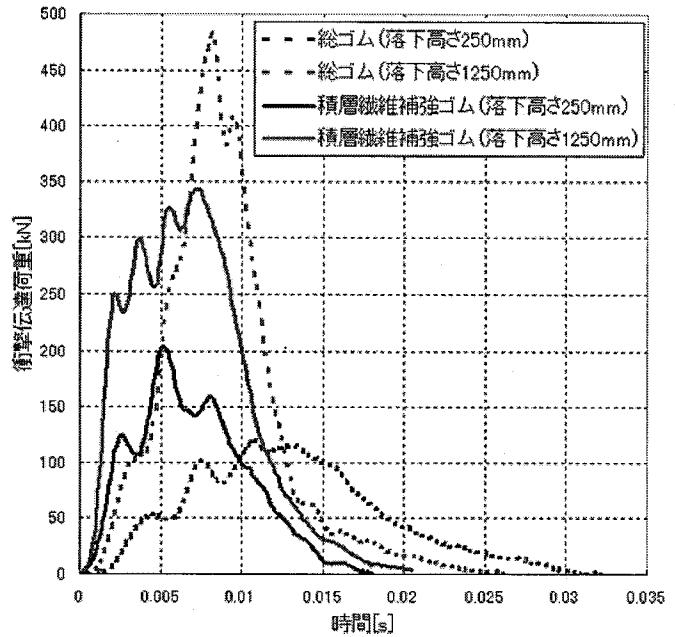


図-3 衝撃伝達荷重-時間の関係

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⁸⁾が考えられるが、パラメータの少ない材料モデルでは、圧縮および引張の両域に渡る S 字カーブ状の応力-ひずみ関係を表現し切れない。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、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 に示す圧縮・引張両域の応力-ひずみ関係式を完全に再現できるよう、5つの定数をカーブフィッティングにより決定した。以下に、硬度 65 の総ゴムの静的圧縮載荷試験より求めた材料定数を示す。

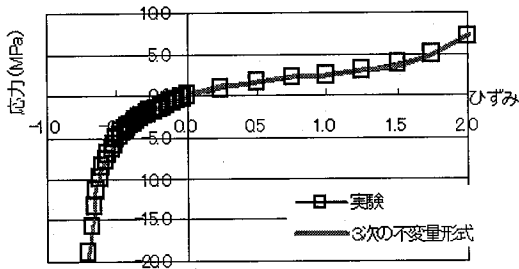
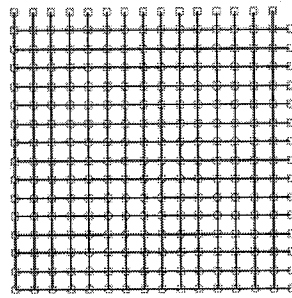
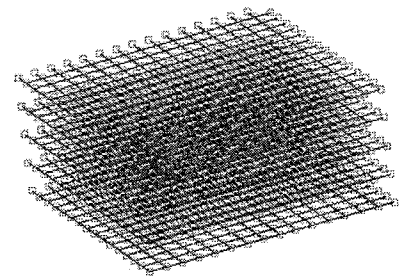


図4 ゴム材料の応力-ひずみ関係



(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)

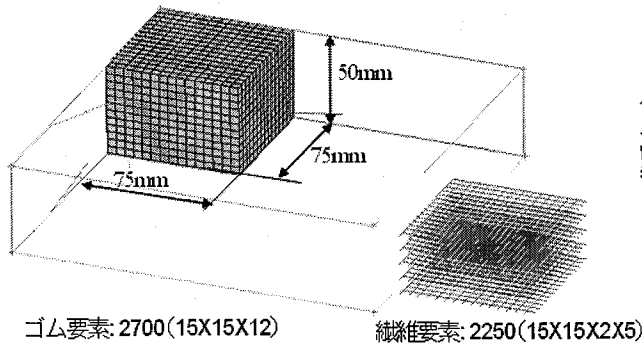


図6 解析モデル (5層モデル)

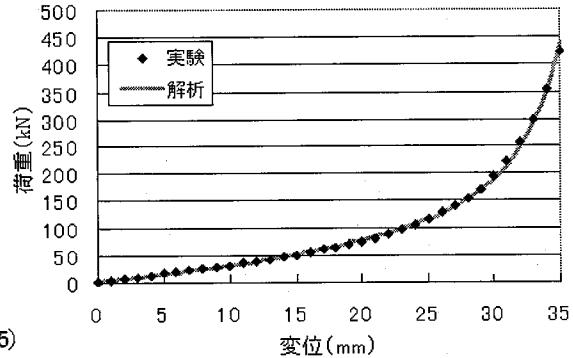


図7 硬度65ゴムの圧縮変形解析結果

$$C_{10} = 1.004 \text{ (MPa)}, C_{01} = -0.077 \text{ (MPa)}$$

$$C_{11} = 0.021 \text{ (MPa)}, C_{20} = -0.103 \text{ (MPa)}$$

$$C_{30} = 0.012 \text{ (MPa)}$$

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、ディアクティブ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 `uactive` を用いて定義したもので、繊維要素の相当ひずみが破断ひずみを超えると、要素剛性を計算する段階で剛性マトリックスからその要素が除外されるよう設定されており、このとき要素内に蓄積されたひずみエネルギーも消失すると仮定している。また、繊維要素が破断クライテリアに達すると、要素を構成する節点位置は、機能が停止する直前の状態となり、視覚的に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にある節点が共有節点となるようモデル化した。なお繊維断面及び本数については、試験体に対する繊維剛性が等価となるように調整している。

以上のゴム、繊維の 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共有を行い、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。

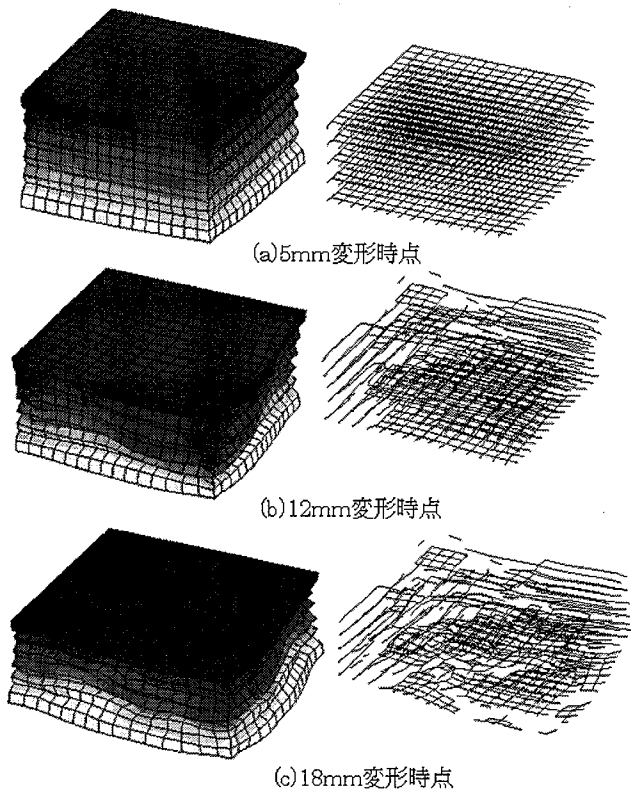
4. 積層繊維補強ゴムの挙動解析

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。対称面および試験体底面 (鉛直方向のみ) に変位拘束を与え、上面は剛体によ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、ゴムの材料特性に対する妥当性を確認するために試算した、硬度 65 の総ゴムに対する静的荷重-変位関係を試験結果と比較したものである。この図によれば、解析結果は矩形ブロック高さの 70% に相当する 35mm の変位領域まで試験結果を精度良くシミュレートできており、式(3)に示す 5 パラメータ構成則をゴム材料に適用すれば、硬度 65 のゴムの圧縮変形特性を再現可能であることが確認できる。

次に、繊維補強ゴムに関する静的破壊解析で得られた荷重-変位関係を、図-8 に示す。この図より、最初に繊維の破断が現れる初期降伏点から、徐々に繊維各層の破断が進展し、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、計算精度は低くなると考えられる。ここでは、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限界とした。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、本手法である程度まで把握できることが確認できた。また図-8(a,b,c)では、繊維を5層埋設した試験体について、静的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ハードニング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-9 に示すモデルを用い衝撃応答解析を行った。被衝突体である積層繊維補強ゴムは、静的破壊解析と同一とし、衝突体である重錘については、質量が等しくなるよう調整した矩形形状の弾性体にてモデル化を行った。また、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ルボルト法を採用した。

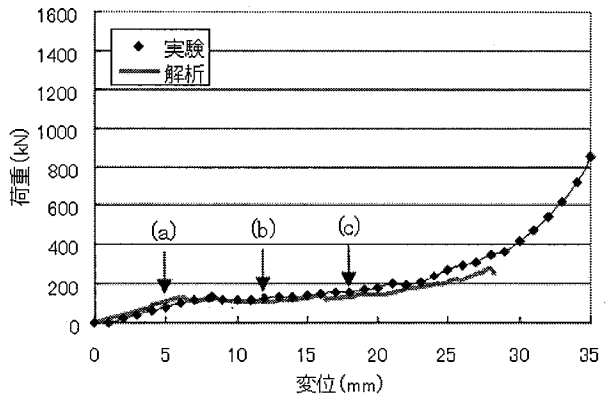


図-8 積層繊維補強ゴムの静的破壊プロセス

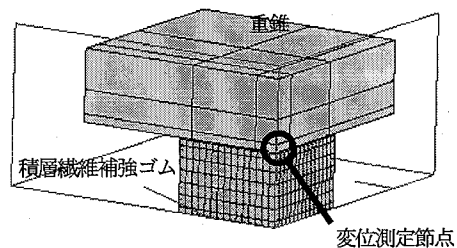
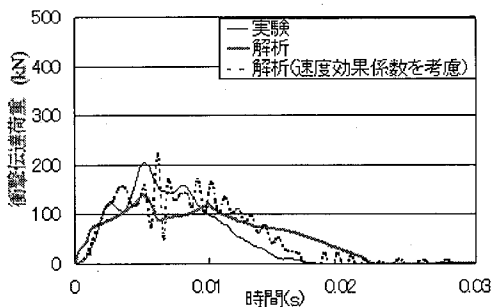


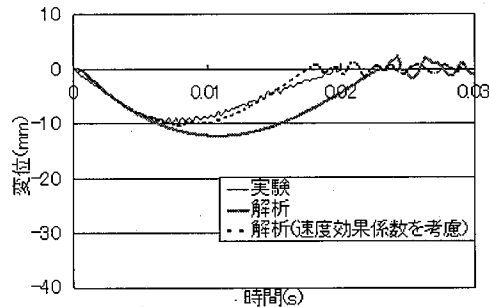
図-9 重錘落下衝撃解析モデル

落錘式衝撃試験と衝撃応答解析により得られた、衝撃伝達荷重応答と変位応答の比較をそれぞれ図-10 に示す。この図では、積層繊維補強ゴムの試験体を対象に、落下高さを 250mm, 1250mm の2ケースとした場合の比較を行っている。なお、図中に破線で示した値は、ゴムの速度依存性に関する計算例として、3.1 で示した5つの Mooney-Rivlin 定数について一律 2.0 を乗じ計算した結果を併記している。

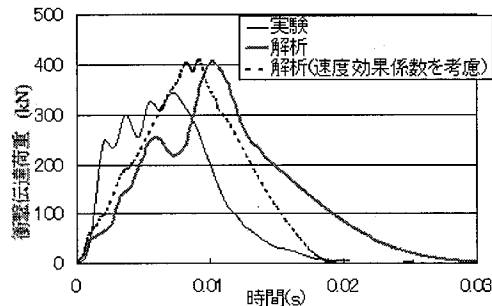
これらの結果より、落下高さ 250mm の場合は、荷重および変位ともに実験値に近いことがわかる。また、落下高さ 1250mm の場合には、埋設された繊維の破断の発生・進展に伴い、ゴムの荷重分担率が高まり、ゴムの有する速度依存性の影響が計算結果に大きく現れると考えられる。落下高さ 250mm では、2.0 程度のスケールファクターを用いれば解析結果は試験結果に近い傾向を示すが、落下高さ 1250mm では、積層繊維の破断が早期に起こるようになり、衝撃エネルギーの大部分をゴムが分担することから、ゴムの速度効果を考慮するためのスケールファクターは 2.0 以上の値が必要となることがわかる。



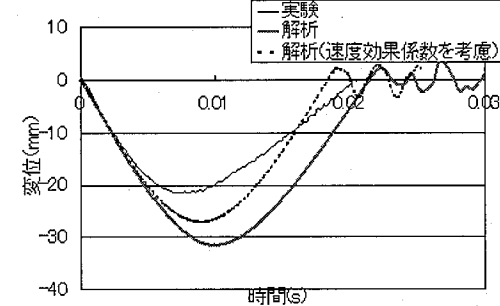
(1a) 衝撃伝達荷重応答 (落下高さ 250mm)



(1b) 変位応答 (落下高さ 250mm)



(2a) 衝撃伝達荷重応答 (落下高さ 1250mm)



(2b) 変位応答 (落下高さ 1250mm)

図-10 積層繊維補強ゴムの衝撃伝達荷重および変位の応答

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-変位関係を精度良くシミュレート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できることがわかった。
- (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、繊維が破断しゴム材料の荷重分担率が高まるほど、ゴムの材料特性として速度依存性を無視できないことが確認された。

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) 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.
- 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静的特性に関する実験的研究, 「材料」 Vol.50, No.4, pp.432-439, Apr.2003.
- 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.
- 4) 西本安志, 玉井宏樹, 園田佳巨, 別府万寿博, 彦坂照: 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.
- 5) 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.