

繰り返し衝撃荷重を受ける積層繊維補強ゴムの衝撃緩衝効果に関する研究

Shock Absorbing Effect of Laminated Fiber Reinforced Rubber under Repeated Load

西本安志*, 梶田幸秀**, 彦坂熙***, 石川信隆****, 西川信二郎*****

Yasushi Nishimoto, Yukihide Kajita, Hiroshi Hikosaka, Nobutaka Ishikawa, Shinjiro Nishikawa

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

****工博防衛大学校教授 建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*****シバタ工業株式会社 技術開発本部(〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058 番地)

In this paper, a weight dropping impact test was carried out in order to examine the energy absorption and the load reduction effect of the laminated fiber reinforced rubber as a shock absorber under the repeated load. It is concluded from this experiment that the load reduction effect of the laminated fiber reinforced rubber comes close that of the natural rubber with increasing the number of the weight droppings. However, the energy absorption of the laminated fiber reinforced rubber is a little bigger than that of the natural rubber even if the laminated fibers break in pieces. Furthermore, the impact response analysis was executed by the single-degree of freedom (SDOF) using the static load ~ displacement curve of a laminated fiber reinforced rubber obtained by static compression test as a spring.

Key Words: Laminated Fiber Reinforced Rubber, Repeated load, Shock absorbing effect

キーワード: 積層繊維補強ゴム, 繰り返し载荷, 衝撃緩衝効果

1. 緒言

1995 年兵庫県南部地震による高架橋の被災状況をふまえ、道路橋示方書^{1),2)}において、落橋という最悪の事態を防ぐために、落橋防止システムの項目が大きく見直された。具体例の1つとして、大規模地震時に衝撃的な力が作用する落橋防止構造は、その衝撃的な力を緩和できる構造とするように規定されている。そのため、落橋防止構造用緩衝材や桁間衝突用緩衝材として、ゴム材料をはじめ、低降伏点鋼、樹脂系材料などを用い、落橋防止構造に衝撃的な力が作用したときの緩衝効果に対する検討が活発に行われている^{3),4),5)}。

著者らは、落橋防止構造用緩衝材として積層繊維補強ゴム(写真-1)に着目し、その有効性の検証のため、静的・高速载荷実験⁶⁾および落錘式単一衝撃载荷実験⁷⁾を行った。静的载荷実験より、積層繊維補強ゴムは、ゴム中に互層して積層埋設した繊維が逐次破断することにより、通常のゴムと比較して初期剛性が向上し、高エネルギー吸収性能を示すことを明らかにした。続いて高速载荷実験により、载荷速度による荷重～変位関係への影響として、鋼材料やコンクリート材料で報告されているのと同様に、荷重が増加する現象がみられ、その増加率は静的载荷に比べ1.2 倍程度にな

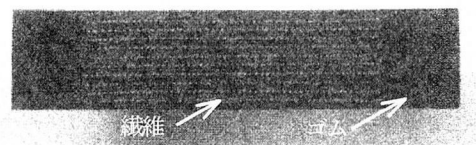


写真-1 積層繊維補強ゴムの断面写真

ることを明らかにした。さらに、単一衝撃载荷実験では、積層繊維補強ゴムの埋設繊維が切れるようなエネルギーが積層繊維補強ゴムに入力される場合、埋設繊維の破断により積層繊維補強ゴムはゴムに比べて衝撃伝達荷重を低減できることを明らかにした。

実際の大規模地震時においては、緩衝材に作用する衝撃力は1回とは限らず、複数回起こる可能性の方が大きいといえる。庄司ら⁸⁾は、高面圧下におけるゴム製緩衝装置の地震時繰り返し圧縮特性を把握するため静的繰り返し载荷実験を行い、復元力特性に関する検討の結果、ゴム製緩衝装置の応力度の低下が認められないことを明らかにしている。また、川島ら⁹⁾は、ゴム製緩衝材に対して繰り返し衝撃载荷実験を行い、ゴム製緩衝材の力学特性の定量化を行っている。

積層繊維補強ゴムについては、1回の衝撃力の作用によ

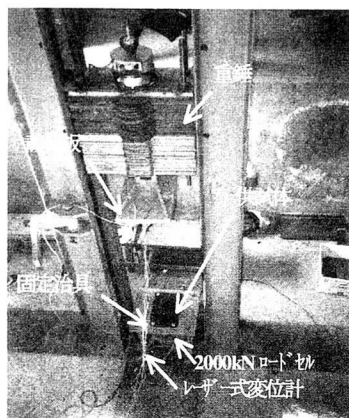


写真-2 落錘式衝撃実験装置

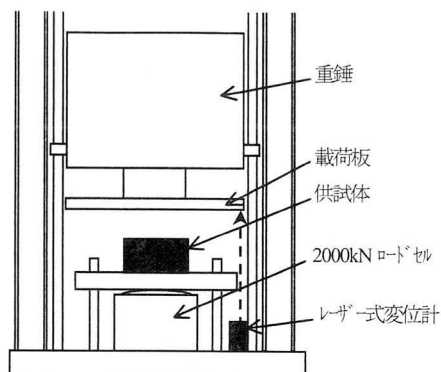


図-1 実験概要と計測装置の取り付け位置

表-1 材料諸元

材質	積層繊維補強ゴム		天然ゴム
	繊維	ゴム	
引張強度	588 (N/cm)	10.2 (MPa)	
破断時の伸び	20 (%)	600 (%)	
硬度	—	65	

り埋設繊維が破断した際には、伝達衝撃力をゴムに比べて大きく低減できることを文献7)で示したが、埋設繊維が破断した積層繊維補強ゴムに、さらに衝撃力が作用した場合、どのような緩衝効果を示すのかについては、未だ検討していない。実際の使用環境・使用目的を考慮すると、積層繊維補強ゴムに対しても繰り返し衝撃力が作用する場合、特に1回目の衝撃力の作用により埋設繊維が破断したとき、その後の衝撃力の作用に対して、どのような緩衝効果を示すのかについての検証を行う必要がある。そこで本研究では、積層繊維補強ゴムに対して繰り返し衝撃载荷実験を行うことにより、積層繊維補強ゴムに繰り返し衝撃力が作用した場合の緩衝効果を評価することを第一の目的とした。

次に、積層繊維補強ゴムを落橋防止構造用緩衝材として適用する場合に、設計の観点から、衝撃力が作用した際の衝撃荷重を実用レベルで予測する必要があるといえる。園田ら¹⁰⁾は、矩形のゴム製緩衝材に関して静的圧縮特性を非線形ばねの剛性として置換した1質点系ばねモデルによる衝撃応答解析により、実用レベルで伝達衝撃荷重を予測できるとしている。

そこで、積層繊維補強ゴムに関しても静的载荷実験結果から得られる圧縮変形特性を非線形ばねに置換した1質点系ばねモデルによる衝撃応答解析により、実験結果を実用レベルで推定可能かについて評価することを第二の目的とした。すなわち、繰り返し衝撃载荷実験をシミュレーションすることにより、埋設繊維が破断した後の積層繊維補強ゴムをどのようにモデル化すれば伝達衝撃荷重を実用レベルで評価できるかの検討を行うことにした。

2. 繰り返し衝撃载荷実験

2.1 実験概要

繰り返し衝撃载荷実験は、防衛大学校が所有する落錘式衝撃実験装置を使用した。写真-2に実験状況を示す。重錘質量は408kgとし、所定の高さから重錘を自由落下させて、供試体に衝撃的な力を作用させた。

実地震動では、非常に短時間(数秒程度)に繰り返し衝撃力が緩衝材に作用すると考えられる。ゴムは超弾性体材料であるため荷重を完全に除去すればもとの状態に戻るが、このように短時間

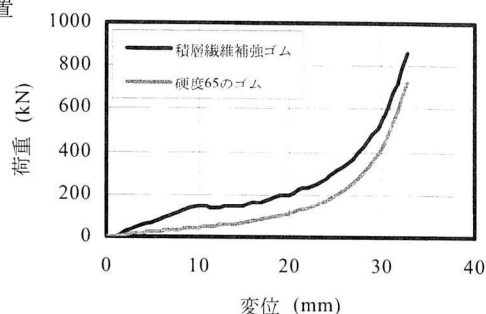


図-2 供試体の静的荷重～変位関係

に荷重が繰り返し载荷される場合、変形が完全にもとの状態に戻るかどうかかわからない。本実験では、計測準備や重錘を所定位置まで持ち上げるのに時間を要し、再度衝撃力を载荷するために要した時間は約3～5分であった。その時間内であれば、緩衝材は完全にもとの状態に戻っていると考えられ、実現象を完全に模擬しているとはいえないが、繊維破断後の最大伝達荷重やエネルギー吸収量を定性的に把握するには、緩衝材が完全にもとの状態に戻った後に载荷の方が好ましいと考える。重錘の衝突面の形状は、落橋防止構造用緩衝材として実際に設置された状況下において、上部構造の衝突面が平面であることを考慮し、平面形状とした。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する伝達荷重である。計測装置の取り付け位置は図-1に示す通りであり、レーザー式変位計は、(株)キーエンス社製のLB-300を用い、分解能50μm、応答性915Hzの性能を有するものである。ロードセルは、共和電業(株)製のLC-200TEを用い、定格容量2000kNである。計測におけるサンプリング時間間隔はいずれの実験ケースにおいても0.1msecである。

2.2 実験供試体

本実験に用いた供試体の形状は、過去の実験^{6),7)}と同じく縦150mm、横150mm、厚さ50mmの直方体形状とした。供試体として使用したゴムおよび繊維の材料諸元を表-1に示す。積層繊維補強ゴム供試体は、表-1に示すように、繊維の引張破断強度が588N/cmのビニロン繊維を使用し、硬度65のゴムの中に5枚積層したものである。また、積層繊維補強ゴム供試体と比較対象となるゴム供試体については、硬度65の天然ゴムを用いた。本実験に用いた供

表-2 繰り返し落錘式衝撃実験の入力条件

入力条件 ／ 入力エネルギー (kN・m)	重錘質量 408kg		概要
	落下高さ (m)	衝突速度* (m/s)	
入力 A /1.0	0.25	2.21	埋設繊維が破断しないエネルギー量.
入力 B / 5.0	1.25	4.94	埋設繊維が破断するが、ハードニング領域に入らないエネルギー量.
入力 C /10.0	2.50	7.00	埋設繊維が破断して、ハードニング領域に入るエネルギー量.

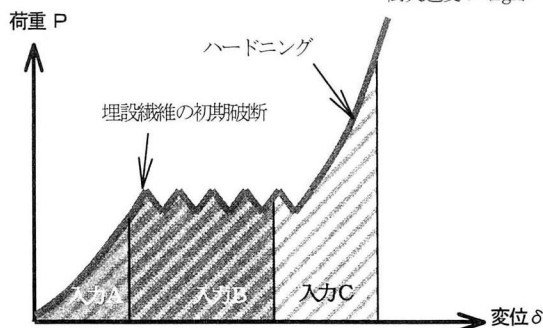
*衝突速度 $v=(2gh)^{1/2}$ により算出.

図-3 積層繊維補強ゴムの荷重～変位関係と入力条件の模式図

試体の静的荷重実験結果を図-2 に示す。図-2 より、ゴム供試体は、変位 20mm（ひずみ 40%）までほぼ直線的に荷重が増加する傾向を示し、それ以降は 2 次曲線的に荷重が増加することがわかる。一方、積層繊維補強ゴム供試体は、変位 10mm 程度までほぼ直線的に荷重が増加し、変位 20mm 程度までは荷重がほぼ一定値を示す。その後、ゴム供試体同様に 2 次曲線的に荷重が増加していることがわかる。すなわち、変位 10mm 付近で埋設繊維が破断し始め、変位 25mm を過ぎたあたりでは、埋設繊維は殆ど粉々の状態になっていることを示す。

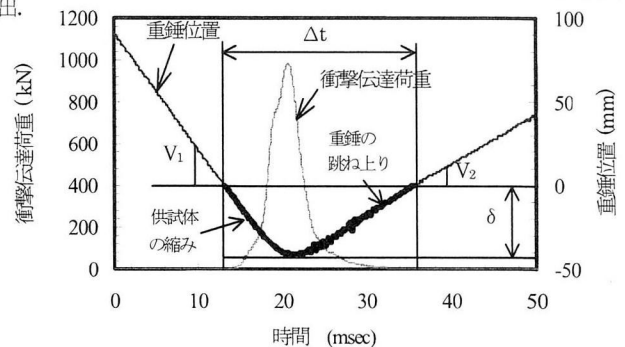
2.3 繰り返し衝撃実験の入力条件および荷重条件

本実験における重錘の落下高さ（供試体に与えるエネルギー）は、図-2 に示した積層繊維補強ゴムの静的荷重実験結果より決定した。まず、荷重～変位関係を次の 3 つの段階に分類した。(1)埋設繊維が破断しない段階（変位 10mm まで）、(2)埋設繊維が破断するもののハードニングはおこしていない段階（変位 10～25mm）、(3)ハードニングに達する段階（変位 25mm 以上）の 3 段階である。図-3 に示すように、これらの段階に達するまでに必要なエネルギー量を荷重～変位関係から求めると、(1)埋設繊維の破断を生じさせないエネルギー量 1.0kN・m（入力 A）、(2)ハードニング領域に入る前のエネルギー量 5.0kN・m（入力 B）、(3)ハードニング領域に入るエネルギー量 10.0kN・m（入力 C）が得られる。以上をまとめると、本実験で供試体に与えるエネルギー量（入力条件）は、表-2 に示すとおりになる。

次に、3 種類の入力条件の組み合わせは、数多く考えら

表-3 繰り返し落錘式衝撃実験の荷重条件

荷重条件	入力条件		
	1 回目	2 回目	3 回目
载荷①	入力 A	入力 A	入力 A
载荷②	入力 A	入力 C	—
载荷③	入力 B	入力 A	—
载荷④	入力 B	入力 B	入力 C
载荷⑤	入力 B	入力 C	—
载荷⑥	入力 C	入力 A	—
载荷⑦	入力 C	入力 B	—
载荷⑧	入力 C	入力 C	入力 C

図-4 計測結果の一例（伝達荷重および重錘変位～時間関係）
（载荷⑦の 1 回目入力条件 C、硬度 65 のゴム）

れるが、本実験では、表-3 に示す 8 種類の荷重条件を設定した。本実験の主たる目的は、積層繊維補強ゴムの繊維破断後の緩衝効果であるが、積層繊維補強ゴムを実際に落橋防止構造用緩衝材として用いるときの基本コンセプトとして、「地震終了後、積層繊維補強ゴムの埋設繊維が破断していない場合は、取り替えることなくそのまま使用し、埋設繊維が破断している場合は、取り替える」ことを考えている。なお、埋設繊維が破断したかどうかの判断は、非破壊検査により確認することは可能である。ただし、何枚破断したか、どの程度破断したかについては、現状では把握できない。

表-3 に示した荷重条件①、②は、「埋設繊維が破断しなければ、取り替えることなくそのまま使用してもいいのか」を確認するために想定した実験ケースである。すなわち、埋設繊維が破断しないエネルギー量（入力 A）が複数回作用しても積層繊維補強ゴムの埋設繊維が破断しないこと、および、供用期間中に埋設繊維が切れなかった地震を経験した後に大規模地震が作用した場合の緩衝効果を確認するものである。次に、1 回の大規模地震中に、複数回の衝撃力が落橋防止構造用緩衝材に作用する場合を想定し、荷重条件③～⑧を設けた。

3. 実験結果と考察

3.1 実験の妥当性

本実験で得られた衝撃伝達荷重～時間関係および重錘位置～時間関係の一例を図-4 に示す。重錘位置～時間関係を求めるに際しては、衝撃伝達荷重～時間関係において

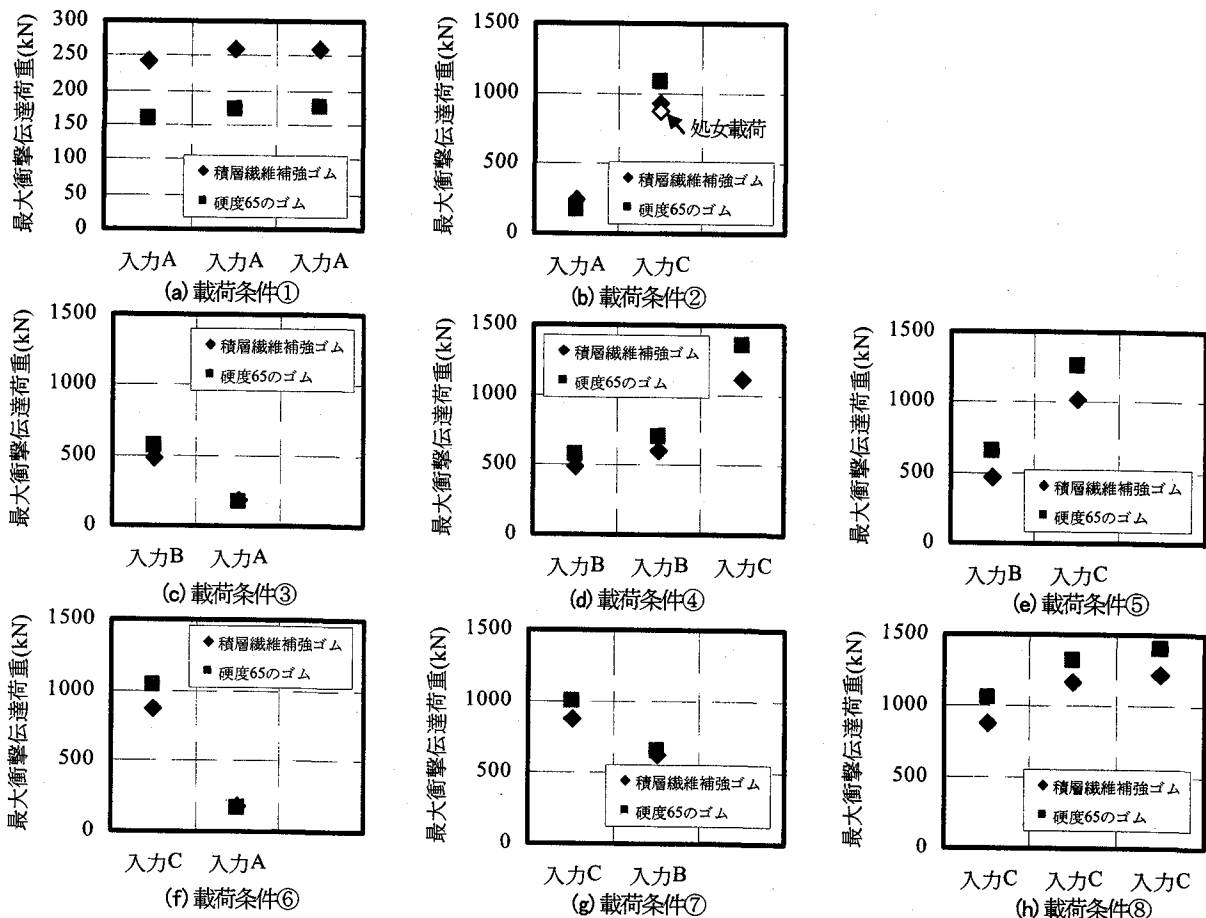


図-5 各载荷条件における最大衝撃伝達荷重

衝撃伝達荷重が増加しはじめる時間の重錘位置を 0 とし、図中の δ を緩衝材の最大変位量とした。すなわち、図中の重錘位置～時間関係の太線部分が供試体の変形をあらわしている。また、衝撃伝達荷重～時間関係のピーク値を緩衝材背面に発生する最大衝撃伝達荷重と定義し、図中に示す Δt を衝撃伝達荷重の作用時間とした。次に、衝突前後の速度は、図中の重錘位置～時間関係より求めた。衝突前の速度 V_1 は、重錘が供試体に衝突した時間における重錘位置とその時間から 10msec 前のデータ間を最小 2 乗法にて近似し、速度（傾き）を求めた。また、衝突後の速度 V_2 は、重錘の跳ね返り時に、重錘が供試体に衝突した重錘位置に達した時間およびその時間から 10msec 後のデータ間を最小 2 乗法により近似している。

ここで、実験の妥当性としては、ニュートンの第 2 法則と等価である力積－運動量の関係式(式(4))より判断することとした。以下に力積－運動量の定理について簡単に示す。

ニュートンの第 2 法則より、質点の運動量の時間変化率は、その質点に作用している力に等しく式(1)のように表される。

$$F = m \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

ここで、 F : 質点に作用する力、 m : 質点の質量、 v : 質点の速度、 t : 時間である。

式(1)は、式(2)のように変形でき、式(2)を積分すると式(3)のようになる。

$$F \cdot dt = m \cdot dv \quad (2)$$

$$\int F dt = \int m \cdot dv \quad (3)$$

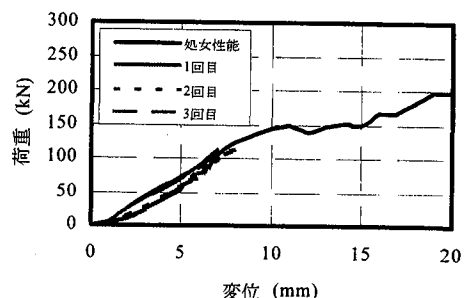


図-6 埋設繊維破断荷重の 80% 荷重までの繰り返し静的载荷実験結果

ここで、 $\int F dt$: 力積、 $\int m \cdot dv$: 運動量の変化量である。

つまり、式(3)は、質点に作用した力積は、衝突前後の運動量に等しいことを示している。よって、本実験に力積－運動量の定理を適用すると、式(4)となる。

$$\int_{\Delta t} F dt = mV_1 - mV_2 \quad (4)$$

ここで、 $\int_{\Delta t} F dt$: 衝撃伝達荷重による力積、 m : 重錘の質量、 V_1 : 衝突前の重錘の速度、 V_2 : 衝突後の重錘の速度、である。

式(4)より衝撃伝達荷重～時間関係から求めた力積（左辺）と衝突前後の重錘速度から求めた運動量の変化量（右辺）が等しければ、実験データの妥当性が証明される。実際に実験データを整理してみると、重錘の運動量の変化量に比較して、衝撃伝達荷重～時間関係から求めた力積の方が約 10% 大きい程度に収まっており、本実験により得られたデータの妥当性が証明されたといえる。

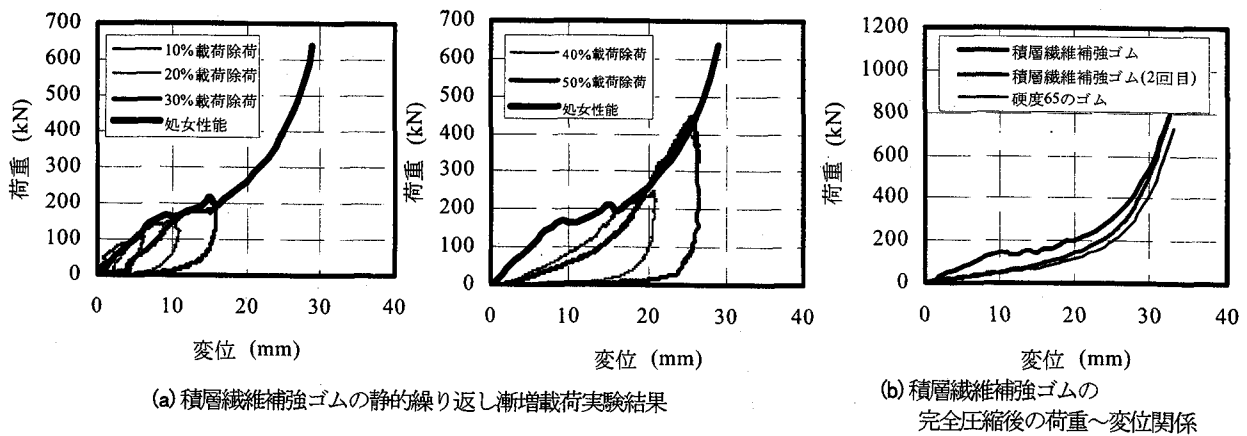


図-7 積層繊維補強ゴムの処女載荷後の荷重～変位関係

3.2 最大衝撃伝達荷重

各載荷条件において、積層繊維補強ゴムと硬度 65 のゴムの最大衝撃伝達荷重を比較したものを図-5 に示す。図-5(a) より、埋設繊維が破断しないエネルギー（入力 A）が作用した場合は、過去の実験と同様⁷⁾に、積層繊維補強ゴムの方が硬度 65 のゴムよりも、最大衝撃伝達荷重が大きくなった。さらに、埋設繊維が破断しない衝撃力（入力 A）が複数回作用した場合は、積層繊維補強ゴムの繊維の破断は確認されず、ほぼ等しい最大衝撃伝達荷重を示した。これは、図-6 に示す埋設繊維の破断荷重の 80% 荷重（約 125kN）まで 3 回繰返し静的載荷実験を行った結果からも判断できる。すなわち、繊維が破断しない範囲では、繰返し荷重が作用しても、処女性能とほぼ等しい荷重～変位関係を示すためである。また、図-5(b) より、埋設繊維が破断しないエネルギー（入力 A）が作用した後に、ハードニングに入るようなレベルのエネルギーが作用した場合、積層繊維補強ゴムは、硬度 65 のゴムと比較して、最大衝撃伝達荷重を低減する効果を有し、処女載荷（最初に入力 C を与えた場合）とほぼ同等の最大衝撃伝達荷重を示すことが確認された。つまり、積層繊維補強ゴムは、どのような荷重履歴を受けようとも埋設繊維が破断していなければ、処女状態にほぼ等しい力学特性を保有しているといえる。

次に、図-5(c), (d), (e) より、初めに作用するエネルギーが、埋設繊維が破断するもののハードニング領域に入らないレベルの場合（入力 B の場合）は、2 回目にそのエネルギーより小さいエネルギーが作用した際（図-5(c)）、積層繊維補強ゴムと硬度 65 のゴムの最大衝撃伝達荷重はほぼ等しい値を示した。しかし、同レベルのエネルギー、もしくは、埋設繊維が破断してハードニング領域に入るようなエネルギーが作用した場合は、積層繊維補強ゴムは、硬度 65 のゴムと比較して最大衝撃伝達荷重をより低減する効果を有していることがわかる。このことは、初めにハードニングを起こすエネルギー（入力 C）を作用させた図-5(f), (g), (h) においても同様の結果を示した。この理由を考察するために、積層繊維補強ゴムの繰返し漸増載荷実験を行った。実験の要領は、変位 5mm まで載荷したのちに除荷、続いて変位 10mm まで載荷したのちに除荷、さ

らに載荷変位を 15mm, 20mm, 25mm と増加させて行った静的載荷実験である。その実験結果を図-7(a) に示す。図-7(a) より、積層繊維補強ゴムは、繰返し荷重が載荷された場合、前回に経験した最大変位時の荷重（最大荷重）を直線的に指向する荷重～変位関係を示し、その後は、処女性能とほぼ同じ荷重～変位関係に移移することがわかる。また、図-7(b) には、積層繊維補強ゴムに対して、ハードニングに入るような圧縮載荷を行った後に再載荷した際に得られる荷重～変位関係と硬度 65 のゴムの荷重～変位関係を示す。ハードニングまで圧縮されたとしても積層繊維補強ゴムの方が、未だ完全に破断していない残存繊維の影響で載荷変位が 20mm より大きくなった辺りから硬度 65 のゴムよりも約 1.2 倍程度大きい剛性を示し、さらに粉々になった残存繊維が剛性を向上させているものと考えられる。

図-7 の結果より、図-5(c)～(h) で得られた結果を考察すると、積層繊維補強ゴムに衝撃力が作用し、埋設繊維が破断した場合、それまでに経験した衝撃力以下の衝撃力が作用した際には処女性能を損失し、硬度 65 のゴムとほぼ同様な緩衝効果を示すと考えられる。次に、それまでに経験した衝撃力と同レベルもしくはそれ以上の衝撃力が作用した場合は、積層繊維補強ゴムは、処女性能と同様な緩衝効果が期待できるため、通常のゴムと比較して、より大きな衝撃伝達荷重の低減効果を示すことが確認された。

3.3 衝撃エネルギーの吸収効果

各載荷条件において、積層繊維補強ゴムと硬度 65 のゴムにおけるエネルギーの吸収効果を式(5)により求めた。

$$\Delta E = \left(\frac{E_1 - E_2}{E_1} \right) \times 100 \quad (5)$$

ただし、 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。

式(2)より求めたエネルギー吸収率を比較したものを図-8 に示す。すなわち、図-8 において、エネルギー吸収率が 100% に近いほど良好な緩衝材であるといえる。なお、過去の単一載荷実験結果⁷⁾より、積層繊維補強ゴムは、埋

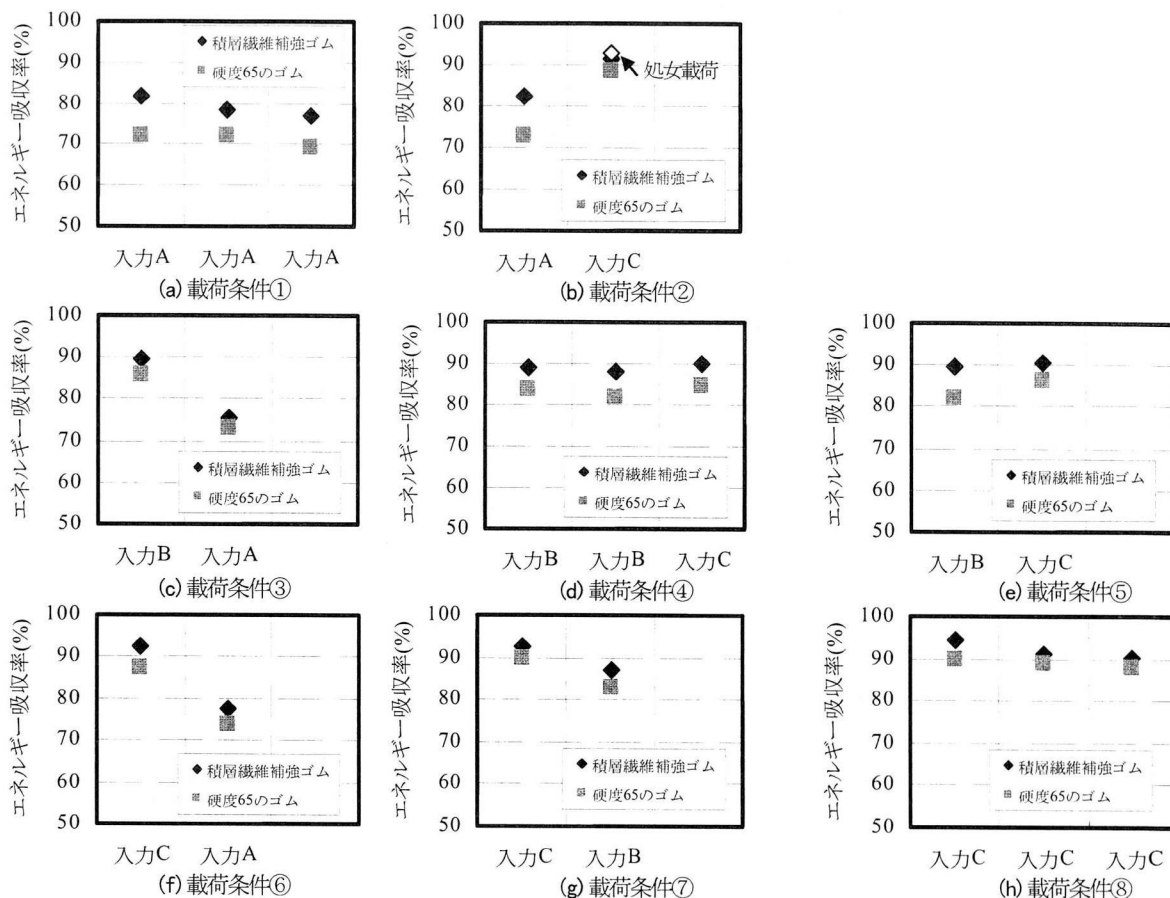


図-8 各载荷条件におけるエネルギー吸収率

設繊維の破断の有無にかかわらず、硬度 65 のゴムと比較して高いエネルギー吸収率を示すことが確認されている。

図-8 より、いずれの繰り返し载荷条件においても、積層繊維補強ゴムの方が、硬度 65 のゴムと比較して、高いエネルギー吸収率を示すことが確認された。また、積層繊維補強ゴムおよび硬度 65 のゴムにおいて、入力される衝撃力が大きくなるほどエネルギー吸収率が大きくなることが確認された。さらに、図-8 (a), (d), (h) より、同じレベルの衝撃力が繰り返し作用した場合は、初期のエネルギー吸収率と比較して、最大 5%程度しか低下しないことが認められた。

4. 繰り返し衝撃実験のシミュレーション解析

4.1 シミュレーション解析のモデル化

本シミュレーション解析では、図-9 に示すように供試体質量 (1kg) は衝突物の質量 (重錘質量 408kg) に比べて非常に小さいことから、供試体質量は無視し、また、供試体のばね剛性を 1 つの換算ばねの剛性で表現することとした。ゴムおよび積層繊維補強ゴムの厚さによっては、内部の慣性力分布等の影響により、1 つの換算ばねでモデル化することの矛盾が顕在化してくるものと考えられ、適用限界が存在することが想定される。園田らは、衝撃緩衝材を 1 つの非線形ばねの剛性でモデル化することの適用限界として緩衝材の厚さが 200mm 程度と報告している¹⁰⁾。

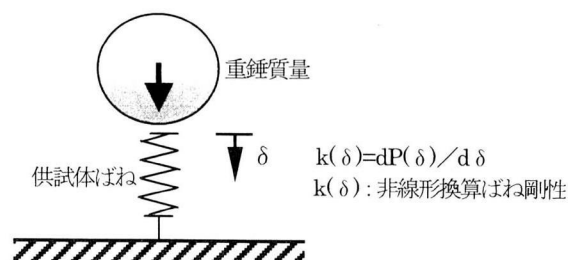


図-9 1 質点系バネモデル

本実験で用いた供試体の厚さは 50mm であり、園田らが提案する適用限界厚さの 1/4 の厚さであり、1 つの非線形ばねの剛性として表現できるといえる。運動方程式は、ニューマークの β 法 ($\beta = 1/6$) を用いて解き、積分時間間隔は $1 \mu \text{sec}$ とした。

4.2 非線形ばね剛性

ゴムおよび積層繊維補強ゴムの剛性について、衝撃力がはじめて作用するときは、図-2 に示した荷重～変位関係を変位の 3 次式で近似し、その式を変位で微分することによりばね剛性を求めた。続いて、埋設繊維が破断した積層繊維補強ゴムの荷重～変位関係は、処女载荷時のそれとは異なることは図-7 (a) で示した。よって、本実験のような繰り返し衝撃実験のシミュレーションを行う場合、1 回目の衝撃荷重载荷時は積層繊維補強ゴムの処女载荷時における静的荷重～変位関係 (図-2) をモデル化することにより対応可能と推測されるが、2 回目以降のばね剛性をどの

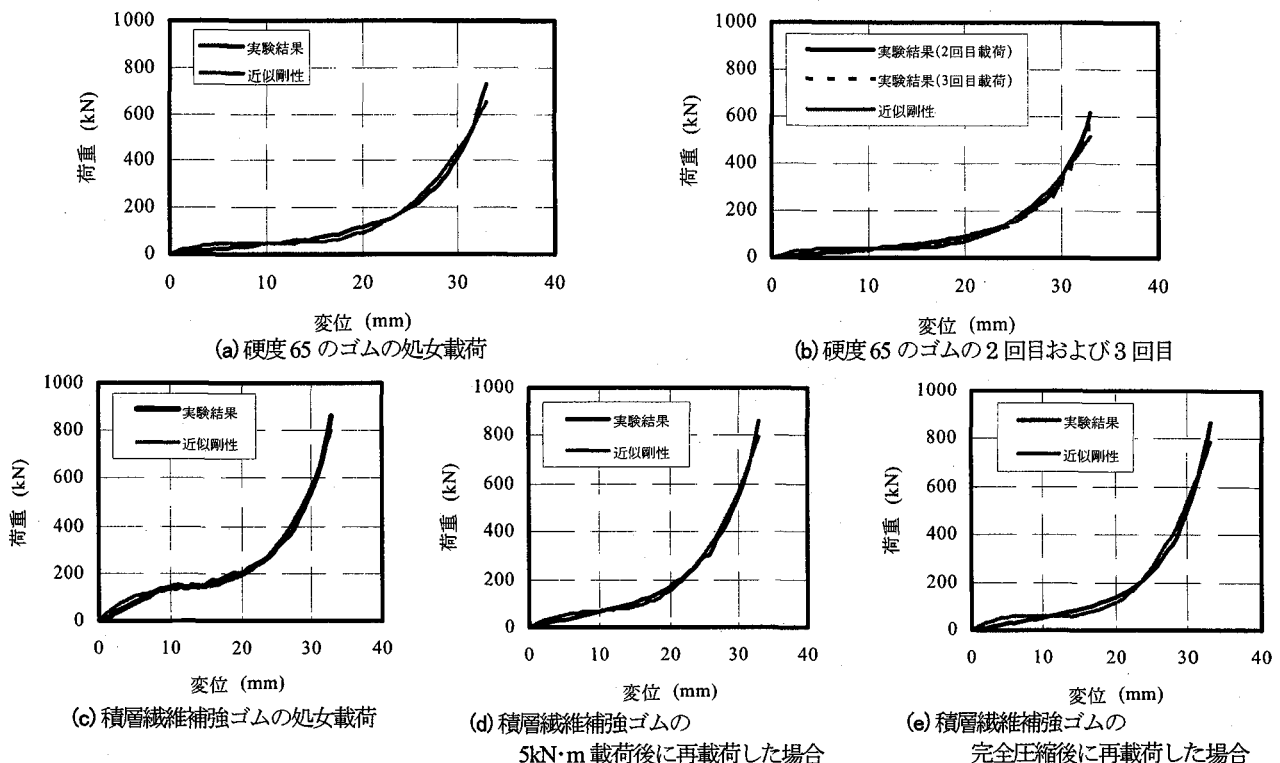


図-10 静的圧縮実験結果とシミュレーション解析に用いる近似式との比較

ように表現するべきか検討する必要があるといえる。そこで本研究では、あらかじめ、図-2 で示した積層繊維補強ゴムの処女載荷時における荷重～変位関係をもとに、積層繊維補強ゴムに与えたエネルギーが 5kN・m および 10kN・m となるような変位量を算定しておき、その変位量まで載荷および除荷した後、再び載荷を行う実験を行い、その実験結果をばね剛性として設定することとした。図-10 にそれぞれ静的圧縮実験結果と 3 次の近似式を合わせて示す。図-10(a) はゴム供試体の処女載荷であり、図-10(b) はゴム供試体の 2 回目の載荷である。ゴム供試体の 3 回目以降については 2 回目と同じものを用いることとした。積層繊維補強ゴムに関しては、図-10(c) は処女載荷であり、図-10(d) は、エネルギー量が 5kN・m (入力 B の場合) に達する変形量を載荷した後に再載荷した時の荷重～変位関係、同様に図-10(e) は、入力 C (エネルギー：10kN・m) が作用した後の荷重～変位関係である。以下に、各条件における荷重～変位関係の 3 次式を示す。

硬度 65 ゴム、処女載荷：

$$P(\delta) = 0.058\delta^3 - 1.538\delta^2 + 15.23\delta \quad (6a)$$

硬度 65 ゴム、2 回目および 3 回目載荷の剛性：

$$P(\delta) = 0.042\delta^3 - 1.254\delta^2 + 12.56\delta \quad (6b)$$

積層繊維補強ゴム、処女載荷の剛性：

$$P(\delta) = 0.049\delta^3 - 1.582\delta^2 + 24.04\delta \quad (6c)$$

積層繊維補強ゴム、5kN・m 載荷後の剛性：

$$P(\delta) = 0.051\delta^3 - 1.448\delta^2 + 16.09\delta \quad (6d)$$

積層繊維補強ゴム、10kN・m 載荷後の剛性：

$$P(\delta) = 0.061\delta^3 - 1.845\delta^2 + 18.27\delta \quad (6e)$$

ここで、 $P(\delta)$ ：荷重(kN)、 δ ：変形量(mm)である。

なお、以上の式に基づき、硬度 65 のゴムの場合には、1 回目の載荷時のシミュレーションには、式(6a)を用い、それ以降は式(6b)を用いた。積層繊維補強ゴムの場合は、1 回目の載荷は、いずれの入力条件も式(6c)を用いた。次に、1 回目載荷時が入力 A であればそのまま式(6c)を、1 回目の載荷が入力 B であれば 2 回目には式(6d)を用い、3 回目以降では式(6e)を用いた。また、1 回目に入力 C が載荷された場合は、それ以降は式(6e)を用いてシミュレーション解析を行った。本解析では、復元力のヒステリシスは考慮せず、除荷時の剛性は載荷時の剛性と同じとした。この理由は以下の通りである。ゴムの場合、最大圧縮変位によって除荷時の剛性が異なることが報告されている¹¹⁾。また、引張側においても同じことがいえ、ミュリン効果と呼ばれている¹²⁾。除荷時の剛性の違いは、衝突継続時間ならびにゴムが吸収するエネルギー量に影響をおよぼすが、最大荷重に影響をおよぼすことはない。本解析は緒言でも述べたとおり、実用レベルにおいて落橋防止構造に伝わる荷重(実験における最大衝撃伝達荷重)を推定することが目的であるため、除荷時の剛性については、最も簡単な例の一つである載荷時と同じ剛性を用いることとした。

4.3 シミュレーション結果ならびに考察

図-11 は、硬度 65 のゴムを用いた場合における繰り返し衝撃実験のシミュレーション結果の一例を示したものである。図-11 より、いずれの載荷条件においても、立ち上がりのカーブは解析結果と比較して、実験結果の方が大

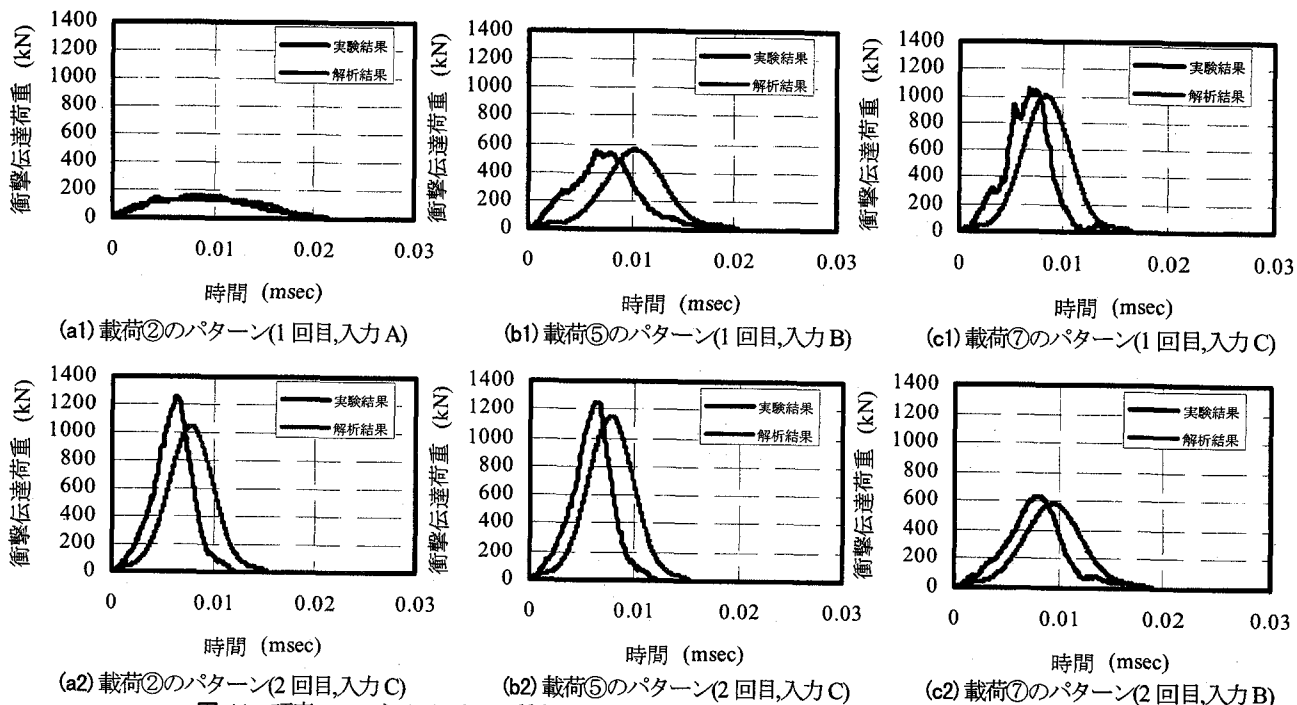


図-11 硬度65のゴムにおける1質点系バネモデルによるシミュレーション解析結果の一例

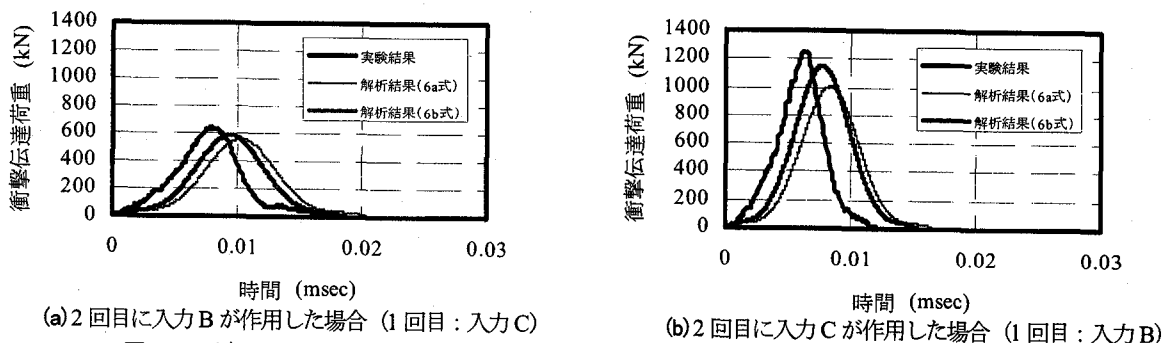


図-12 硬度65のゴムにおいて2回目のシミュレーション解析に用いる近似式の相違による比較

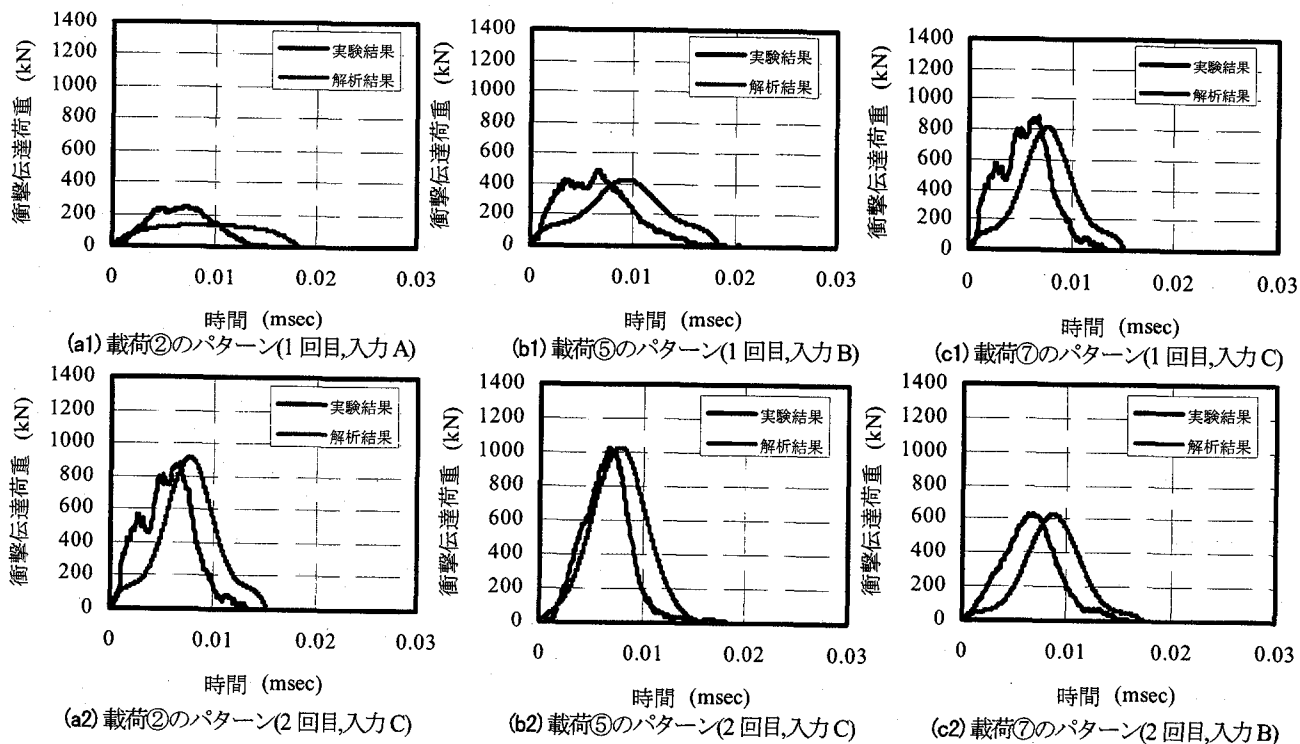
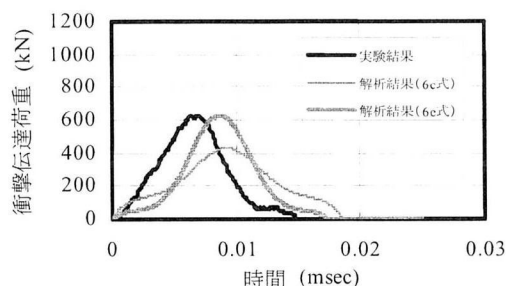
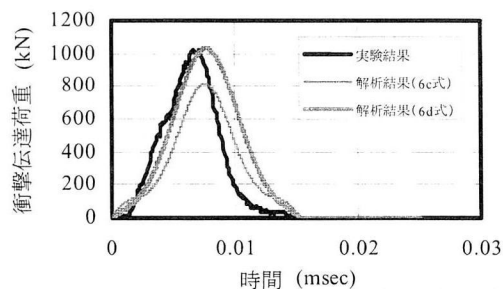


図-13 積層繊維補強ゴムにおける1質点系バネモデルによるシミュレーション解析結果の一例

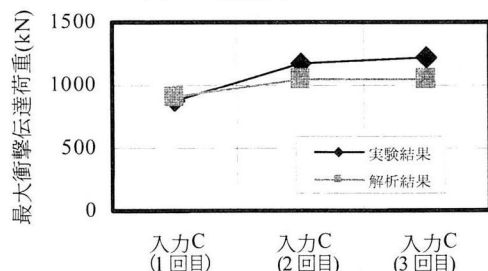


(a) 2 回目に入力 B が作用した場合 (1 回目: 入力 C)

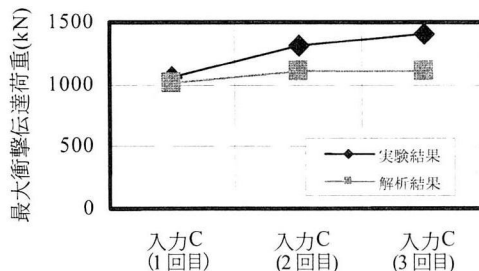


(b) 2 回目に入力 C が作用した場合 (1 回目: 入力 B)

図-14 積層繊維補強ゴムにおいて 2 回目のシミュレーション解析に用いる近似式の相違による比較



(a) 積層繊維補強ゴム



(b) 硬度 65 のゴム

図-15 载荷パターン⑧における最大衝撃伝達荷重のシミュレーション結果

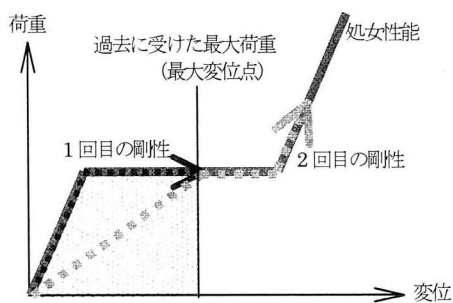


図-16 積層繊維補強ゴムのモデル化の提案

きい傾向を示したものの最大衝撃伝達荷重については、概ね実験結果と一致する傾向を示した。さらに図-12 には、2 回目の载荷においても 1 回目の载荷剛性、すなわち式(6a)で計算した場合の結果を示した。図-12 より、2 回目の载荷において、式(6b)を用いた方が、処女载荷の近似式である式(6a)を用いた場合に比べて、実験結果を良好にシミュレーションしていることがわかる。

図-13 に積層繊維補強ゴムを用いた場合におけるシミュレーション結果の一例を示す。図-13(a) より、1 回目の衝撃力が作用した場合を比較すると、入力される衝撃力が小さい場合 (入力 A) は、衝撃伝達荷重の作用時間が解析結果の方がやや長い傾向を示した。図-13(a), (b) より、本解析では、非線形ばねの剛性を 2 次式でモデル化したために入力される衝撃力が小さい場合 (入力 A および入力 B) は、釣鐘状の波形となり起ち上がり時のカーブに実験結果と相違が見られる。しかし、衝撃力が大きくなるほど、その差異は小さくなり、いずれの载荷条件においても、最大衝撃伝達荷重を概ね良好にシミュレートしていることがわかる。

図-14 に 2 回目の载荷において、処女载荷の近似式 (式(6c)) を用いた場合と、再载荷用の近似式 (式(6d), 式(6e)) を用いた場合の解析結果の比較を示す。図-14 より明らか

に、2 回目の载荷においては、再载荷用の近似式を用いた場合の方が実験結果を良好にシミュレートしているといえ、繊維の破断が生じるような衝撃力が作用した直後に再び衝撃力が作用する場合は、埋設繊維の破断を適切に表現したばね剛性を与えることが必要であるといえる。

次に、図-15 に载荷⑧の 패턴の時の最大衝撃伝達荷重を示す。図-15 より、与える非線形ばねの剛性を変化させることにより 1 回目から 2 回目の最大衝撃伝達荷重の増加をある程度表現できたものの、2 回目から 3 回目にかけての最大衝撃伝達荷重の上昇を的確に表現することは困難であった。特に、この傾向は、硬度 65 のゴムの方が顕著であった。これに関しては、2 回目と 3 回目で同じばね剛性を用いてシミュレーション解析を行ったためであるが、繰り返し衝撃力が作用した場合の緩衝材の損傷度なども大きく関連しているものと考えられ、今後の検討課題といえる。

以上をまとめると、積層繊維補強ゴムに繰り返し衝撃力が作用する場合には、埋設繊維の破断を適切に表現しなければ、最大衝撃伝達荷重を良好にシミュレートできないといえる。すなわち、直後に作用したエネルギー量に達する変形量を载荷した後に再载荷した静的荷重～変位関係を非線形ばねの剛性として与える必要がある。

本解析では、あらかじめ静的载荷実験を行ったデータを入力データ (式(6d), 式(6e)) として用いたが、実際の解析では、供試体に作用する最初のエネルギー量はわからないことが多い。すなわち、あらかじめ実験データを確保しておくことは難しいといえる。そこで、我々の提案として、図-7(a) に示した積層繊維補強ゴムの繰り返し漸増载荷実験により得られた荷重～変位関係から、積層繊維補強ゴムは、繰り返し荷重が载荷された場合、処女性能上で過去に経験した最大変形量における荷重レベルに追いつくよう

な荷重～変位曲線を示し、その後は、処女性能とほぼ同じ荷重～変位曲線へと推移することが得られている。よって、図-16に示すように過去に経験した最大荷重を指向する荷重～変位関係を直線または2次曲線で近似し、最大荷重到着後は処女載荷と同じ荷重～変位関係を得るような復元力特性を仮定すると積層繊維補強ゴムの繰り返し載荷シミュレーションを上手く表現できると考えている。

5. 結言

本研究では、硬度 65 のゴムおよび積層繊維補強ゴムに対して繰り返し衝撃載荷実験を行うことにより、積層繊維補強ゴムに繰り返し衝撃力が作用した場合の緩衝効果を評価し、硬度 65 のゴムおよび積層繊維補強ゴムの静的載荷実験から、その圧縮変形特性を非線形ばねに置換した 1 質点系ばねモデルによる衝撃応答解析により、実験結果を実用レベルで推定可能かどうかについて評価した。

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) 積層繊維補強ゴムは、埋設繊維が破断しないような衝撃力が複数回作用しても、最大衝撃伝達荷重はほぼ等しい値を示し、埋設繊維の破断も生じない。
- (2) 積層繊維補強ゴムは、埋設繊維が破断しないような衝撃力が複数回作用しても、処女性能を保持する。
- (3) 積層繊維補強ゴムに繰り返し衝撃力が作用し、埋設繊維が破断したとしても、これまで経験した衝撃力より小さい衝撃力が作用した場合は通常のゴムと同程度の衝撃伝達荷重の低減効果を示す。また、同じもしくはそれ以上の衝撃力が作用した場合は、通常のゴムと比較して、より大きな衝撃伝達荷重の低減効果を示す。
- (4) 積層繊維補強ゴムは、どのような繰り返し載荷条件および埋設繊維の破断の有無にかかわらず、硬度 65 のゴムと比較して、高いエネルギー吸収率を示す。また、積層繊維補強ゴムにおいて、たとえ埋設繊維が破断した状態でも、エネルギー吸収率は処女状態に比べ、5%程度の低下しか認められない。
- (5) 硬度 65 のゴムを用いた繰り返し衝撃実験のシミュレーション解析結果から、処女載荷とそれ以降の繰り返し静的載荷実験における圧縮変形特性を非線形ばねの剛性としてモデル化することにより、1 質点系ばねモデルにて、繰り返し衝撃力が作用する場合の最大衝撃伝達荷重を概ね良好にシミュレートできる。
- (6) 積層繊維補強ゴムを用いた繰り返し衝撃実験をシミュレーション解析する場合は、静的繰り返し載荷実験によって、処女載荷と直前に作用する衝撃力により生じる埋設繊維の破断を適切に表現した圧縮特性を用いる必要がある。すなわち、直前に作用した衝撃エネルギー量に達する変形量を載荷した後に再載荷した静的圧縮特性を非線形ばねの剛性として与える必要がある。
- (7) また、その積層繊維補強ゴムの圧縮特性を非線形ばねとしてモデル化することにより、硬度 65 のゴムと同

様に 1 質点系ばねモデルにて、繰り返し衝撃力が作用した場合の最大衝撃伝達荷重を概ね良好にシミュレートできる。

謝辞

最後に本研究を実施するにあたり、適切なお指導およびご助言をいただきました防衛大学校建設環境工学科大野友則教授、香月智助教授、九州大学大学院工学研究院建設デザイン部門園田佳巨助教授、繰り返し衝撃実験をご支援いただいた防衛大学校理工学研究科白石博文学生、シバタ工業株式会社 崎畑康典研究員ほか、ご協力いただきました関係者の方々に謝意を表します。

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，1996。
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002。
- 3) 窪田賢司，菅野匡，上東泰，石田博：緩衝効果を有する落橋防止装置の衝突実験および地震時応答解析，日本道路公団試験研究所報告，Vol.34，pp.98-104，1997.11。
- 4) 川島一彦，庄司学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.129-142，1999.01。
- 5) 皆川勝，藤谷健：ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発に関する研究，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.343-353，2001.10。
- 6) 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。
- 7) 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錐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。
- 8) 庄司学，川島一彦，渡邊学歩，河野哲也：高面圧下におけるゴム製緩衝装置の地震時繰り返し圧縮特性，土木学会第 53 回年次学術講演会，I-B160，pp.320-321，1998.10。
- 9) 川島一彦，庄司学，越峠雅博，島ノ江哲：落橋防止機能を有する耐震伸縮装置の開発，第 2 回免震・制震コロキウム講演論文集，pp.201-208，2000.11。
- 10) 園田佳巨，西本安志，石川信隆，彦坂熙：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。
- 11) 金光明，梶田幸秀，香月智，石川信隆：ゴム製緩衝材を用いた桁間衝突実験のシミュレーション解析，構造工学論文集 Vol.48A，pp.887-898，2002.3。
- 12) (社)日本ゴム協会：ゴム技術の基礎，pp.23-25，1992。

(2002年9月13日受付)