

繰り返し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実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SHOCK ABSORBING EFFECT OF LAMINATED FIBER REINFORCED RUBBER UNDER REPEATED LOAD

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

*修士(工学) 九州大学大学院 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)

**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)

***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)

****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)

*****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 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)

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

(Laminated Fiber Reinforced Rubber, Repeated load, Shock absorbing effect)

1. 緒言

1995 年兵庫県南部地震以後, 道路橋示方書¹⁾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置することが規定されている. そこで著者らは, 高架橋において大地震時に機能を発揮することを期待され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, 静的・高速载荷実験²⁾および落錘式衝撃実験³⁾を行った. これらの実験から, 積層繊維補強ゴムは, 埋設繊維が切れることにより, 総ゴムと比較して高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.

しかしながら 1 回の大地震時においても緩衝材に衝撃力が発生するのは 1 回とは限らず, 複数回作用すると考えられる. 川島ら⁴⁾は, ゴム製緩衝材に対して繰り返し衝撃実験を行い, 力学特性の定量化をおこなっている. よって, 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について検討する必要がある. 特に, 積層繊維補強ゴムの場合は, 1 回の衝撃力の作用により埋設繊維が破断した際には, 衝撃力を大きく低減できることを示したが, 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

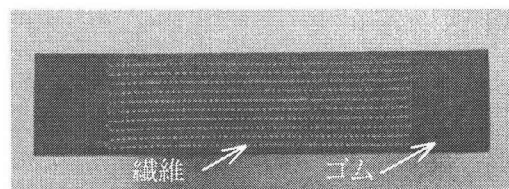


写真-1 積層繊維補強ゴムの断面写真

表-1 材料諸元

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

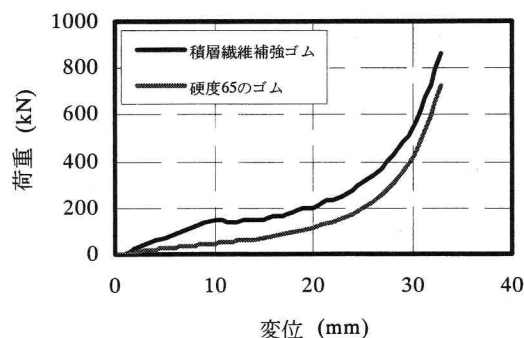


図-1 静的载荷実験結果

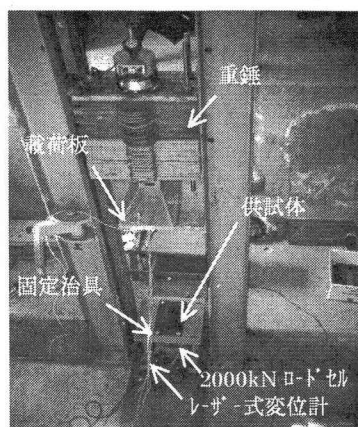


写真-2 落錘式衝撃実験装置

検証する必要がある。

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衝撃緩衝効果を評価することを目的とした。

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^{2), 3)}と同じく縦 150mm×横 150mm×高さ 50mm の直方体形状とした。次に、本供試体に使用したゴムおよび繊維の材料諸元を表-1 に示す。積層繊維補強ゴム製供試体は、表-1 に示すように、繊維の破断時の強度が 588N/cm のビニロン繊維を使用し、硬度 65 のゴムの中に 5 枚積層したものをを用いた。また、積層繊維補強ゴムの比較対照となるゴムについては、硬度 65 の天然ゴムを用いた。本実験に用いた供試体の静的載荷実験結果を図-1 に示す。

3. 繰り返し衝撃実験

3.1 実験概要

繰り返し衝撃実験は、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複数回作用させた。重錘の衝突面の形状は、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変位とロードセルによる供試体背面に発生した伝達荷重である。計測装置として、レーザー式変位計は、㈱キーエンス社製の LB-300 を用い、測定範囲は 20~40cm、分解能 50 μ m、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㈱製の LC-200TE を用い、定格容量 2000kN である。

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。

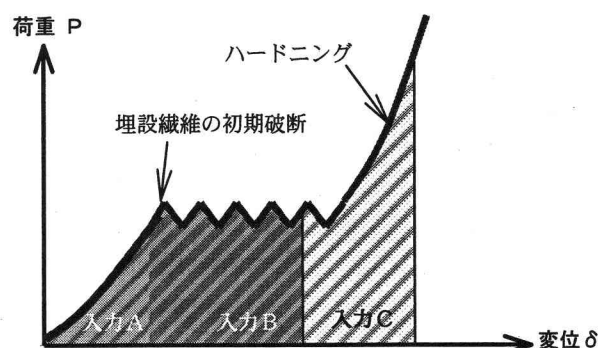


図-2 積層繊維補強ゴムの荷重～変位関係と入力条件の模式図

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 0.1ms である。

3.2 繰り返し載荷の入力条件

繰り返し衝撃実験における入力条件は、先に実施した積層繊維補強ゴムの静的載荷実験結果より、弾性応答、弾塑性応答および埋設繊維の完全破断の 3 段階を選んだ。つまり、図-2 に示すように、静的載荷実験より得られた積層繊維補強ゴムの荷重～変位関係から、最初に埋設繊維が破断する変形量までのエネルギー吸収量を基に、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) とハードニング領域に入る直前の静的限界エネルギー吸収量である 5.0kN・m (入力 B)、ハードニング領域に入る 10.0kN・m (入力 C) の 3 種類を設定した。以上をまとめて、表-2 に示す。

3.3 繰り返し衝撃実験の載荷条件

載荷条件は、積層繊維補強ゴムの供用期間中に複数回の地震動が作用する場合と 1 回の地震動で複数回の衝撃力が作用する場合の 2 種類について検討することを目的として、表-3 に示すように決定した。

まず、積層繊維補強ゴムの供用期間中に複数回の地震動が作用する場合については、中小規模の地震

表-3 載荷方法の決定

載荷条件	載荷順序			目 的
	1 回目	2 回目	3 回目	
①	入力 A	入力 A	入力 A	埋設繊維が破断しないレベル（弾性範囲内）の衝撃力が複数回作用しても、弾性範囲内の挙動を示すか確認する。 →供用期間中に複数回作用する場合を想定した確認実験
②	入力 A	入力 C	—	埋設繊維が破断しないレベル（弾性範囲内）が作用した後に大規模地震動に相当する埋設繊維を破断させるような衝撃力が作用しても、初期品と同等の性能を示すか確認する。 →供用期間中に複数回作用する場合を想定した確認実験
③	入力 B	入力 A	—	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衝撃力が作用した後に、初期状態で埋設繊維が破断しないと想定したレベルの衝撃力が作用した場合にどのような挙動を示すか確認する。 →同一地震時に複数回作用した場合を想定
④	入力 B	入力 B	入力 C	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衝撃力が作用した後に、同レベルの衝撃力が作用し、さらに、初期状態で埋設繊維が完全に破断してハードニング領域に入るレベルの衝撃力が作用した場合にどのような挙動を示すか確認する。 →同一地震時に複数回作用した場合を想定
⑤	入力 B	入力 C	—	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衝撃力が作用した後に、初期状態で埋設繊維が完全に破断してハードニング領域に入るレベルの衝撃力が作用した場合にどのような挙動を示すか確認する。 →同一地震時に複数回作用した場合を想定
⑥	入力 C	入力 A	—	埋設繊維が完全に破断してハードニング領域に入るレベルの衝撃力が作用した後に、初期状態で埋設繊維が破断しないと想定したレベルの衝撃力が作用した場合にどのような挙動を示すか確認する。 →同一地震時に複数回作用した場合を想定
⑦	入力 C	入力 B	—	埋設繊維が完全に破断してハードニング領域に入るレベルの衝撃力が作用した後に、初期状態で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衝撃力が作用した場合にどのような挙動を示すか確認する。 →同一地震時に複数回作用した場合を想定
⑧	入力 C	入力 C	入力 C	埋設繊維が完全に破断してハードニング領域に入るレベルの衝撃力が作用した後に、繰り返し同レベルの衝撃力が作用した場合にどのような挙動を示すか確認する。 →同一地震時に複数回作用した場合を想定

動が作用した場合を想定し、埋設繊維が破断しない衝撃力（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を確認する。

（載荷①）また、供用期間中に中小規模の地震動が作用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。（載荷②）

次に、1 回の地震動で複数回の衝撃力が作用する場合については、初めにどのレベルの衝撃力が作用するかによって、積層繊維補強ゴムの緩衝効果に大きな影響を与えるといえる。初めに作用する衝撃力が、埋設繊維が破断しないレベルの場合は、先の積層繊維補強ゴムの供用期間中に複数回の地震動が作用する場合と同条件である。また、初めに作用する衝撃力が、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（入力 B）の場合は、そのあとに、同じレベル、もしくは、初期状態で埋設繊維が破断しないレベル（入力 A）、初期状態でハードニングに入るようなレベル（入力 C）が作用する場合を考慮した。（載荷条件③、④、⑤）さらに、初めに作用する衝撃力が、埋設繊維が破断してハードニ

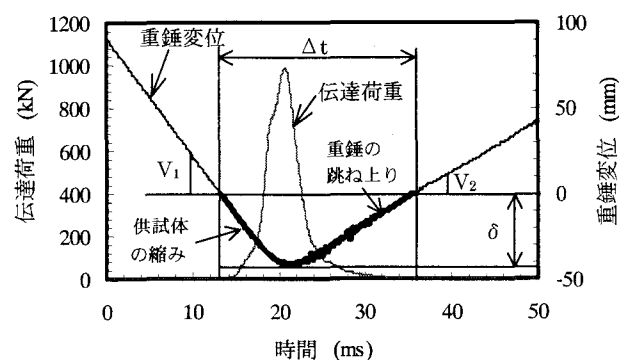


図-3 計測結果の一例

（伝達荷重および重錘変位～時間関係）

グ領域に入るレベル（入力 C）の場合は、そのあとに、同じレベル、もしくは、初期状態で埋設繊維が破断しないレベル（入力 A）、初期状態で埋設繊維が破断するもののハードニングに入らないレベル（入力 C）が作用する場合を考慮した。（載荷条件⑥、⑦、⑧）

以上のことを考慮して、繰り返し載荷の回数は、最高 3 回とし、表-3 に示すように、それぞれの入力条件を組み合わせ、載荷条件を設定した。

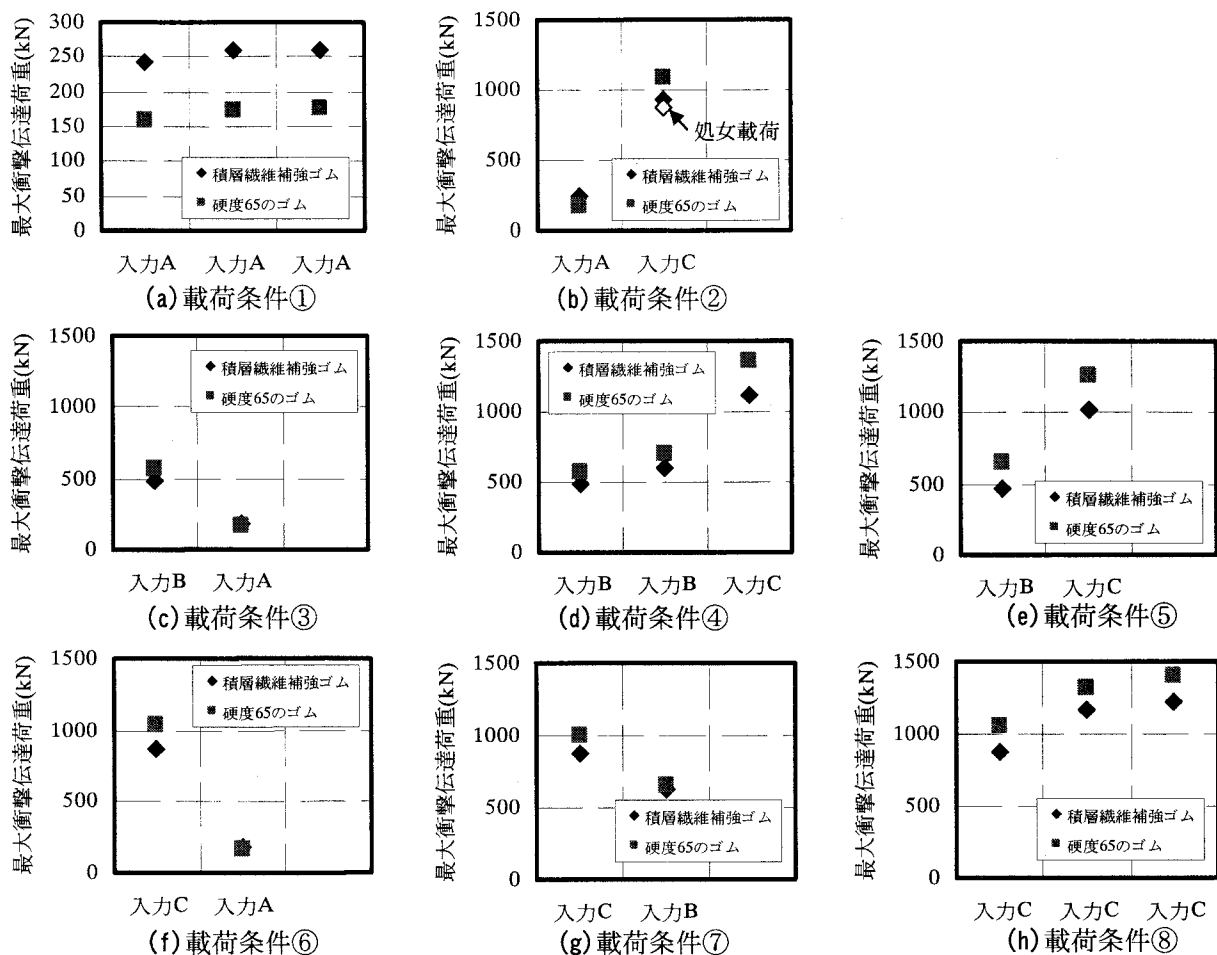


図-4 各载荷条件における最大伝達荷重

3.4 結果と考察

本実験での評価項目は、供試体背面に伝達される最大衝撃伝達荷重および重錘位置の計測結果より算出した衝突前後の重錘の速度変化による衝撃エネルギーの吸収効果である。これらの評価手法に関して、以下に説明する。

まず、本実験で得られた伝達荷重～時間関係および重錘変位～時間関係の一例を図-3に示す。最大衝撃伝達荷重は、得られた伝達荷重～時間関係の最大値と定義した。次に、衝撃エネルギーの吸収効果については、(1)式より求めた。

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

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。

ここで、衝突前後の速度は、図-3に示した重錘変位～時間関係より求めた。衝突前の速度 V_1 は、重錘

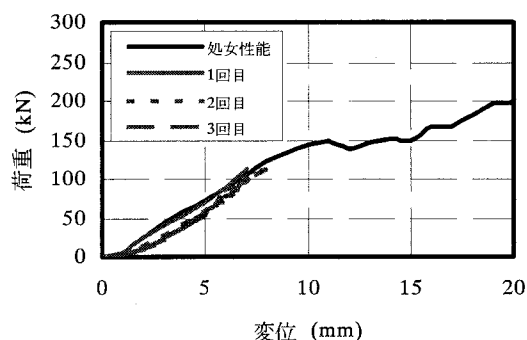


図-5 埋設繊維破断荷重の80%荷重までの繰り返し静的载荷実験結果

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前の重錘位置より求めた。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後の重錘位置より求めた。

(1) 最大衝撃伝達荷重

各载荷条件において、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-4に示す。

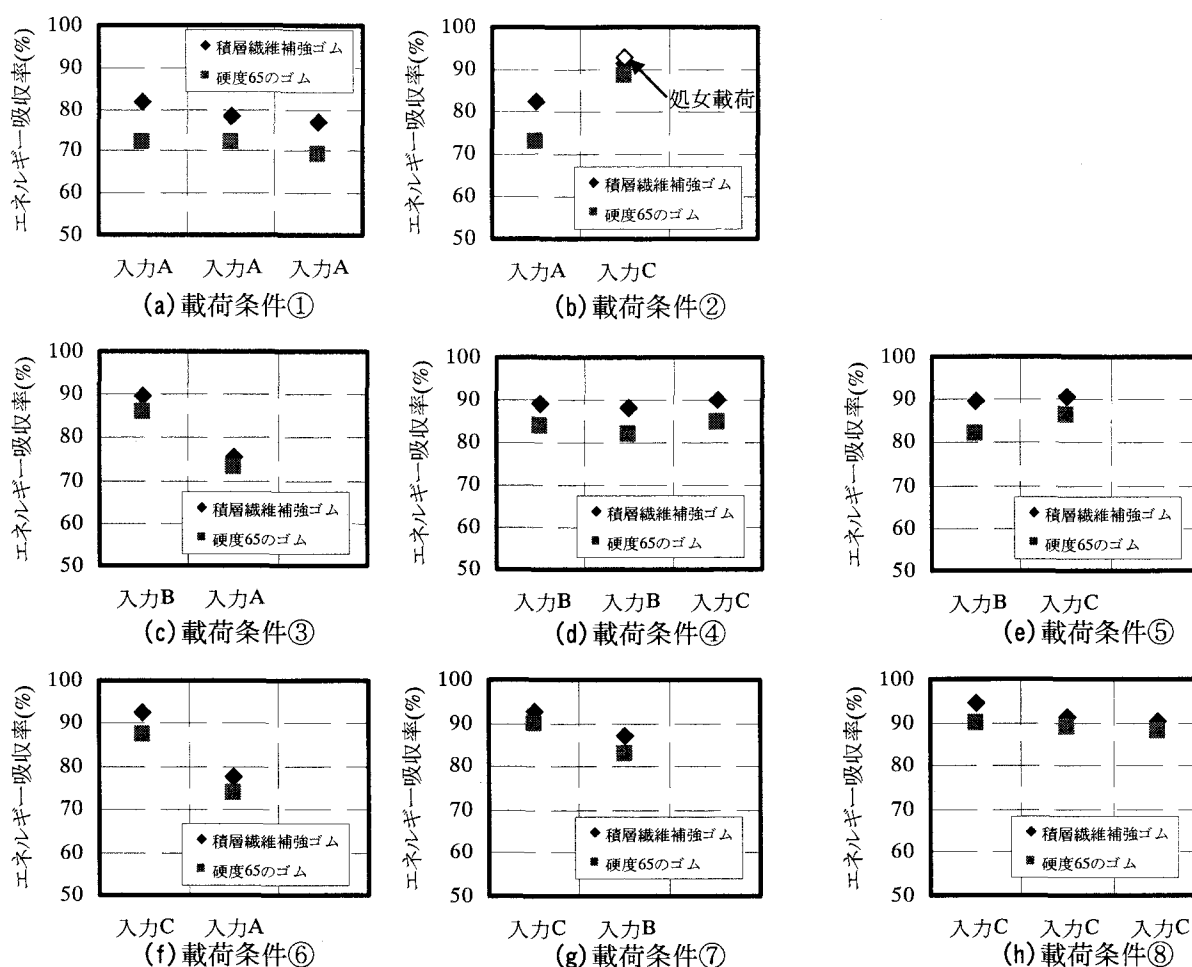


図-6 各载荷条件におけるエネルギー吸収率

図-4(a)より、埋設繊維が破断しない衝撃力（入力A）が作用した場合は、過去の実験と同様³⁾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-5に示す、埋設繊維の破断荷重の80%荷重まで、3回繰り返し静的载荷実験を行った結果から、繊維が破断しない範囲では、繰り返し荷重が作用しても、処女性能とほぼ等しい荷重～変位関係を示すことから判断できる。よって、積層繊維補強ゴムの供用期間中に埋設繊維が破断しないレベルの衝撃力が複数回作用したとしても、繊維の破断は生じないといえる。また、図-4(b)より、埋設繊維が破断しない衝撃力（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衝撃力が作用した場合、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、処女载荷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、埋設繊維が破断しないような衝撃力が作用した後に埋設繊維を破断させるような衝撃が作用しても、処女性能を満足することが確認された。すなわち、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。

次に、図-4(c), (d), (e)より、初めに作用する衝撃力が、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衝撃力の場合は、2回目にその衝撃力より小さい衝撃力が作用した際（図-4(c)）には、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、同レベルの衝撃力、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衝撃力が作用した場合は、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低減する効果を有していることがわかる。これは、過去に繊維が破断するような衝撃力が作用したとしても、同等もしくはそれ以上の衝撃力が作用した場合は、積層繊維補強ゴムの未だ破

断していない残存繊維をさらに破断させるためと考えられる。このことは、図-4(f), (g), (h)より、初めに作用する衝撃力が、埋設繊維が破断してハードニング領域に入るレベルの衝撃力の場合においても同様の結果を示すことからわかる。

以上のことから、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、それ以降に初期に作用した衝撃力以下の衝撃力が作用した場合は通常のゴムと同じ衝撃伝達荷重の低減効果を示し、同レベル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、より大きい衝撃伝達荷重の低減効果を示すことが確認された。

(2) 衝撃エネルギーの吸収効果

各载荷条件において、積層繊維補強ゴムと硬度 65 のゴムの衝撃エネルギーの吸収効果として、(1)式により求めたエネルギー吸収率を比較したものを図-6 に示す。すなわち、図-6 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、過去の単一载荷実験結果³⁾より、積層繊維補強ゴムは、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ことが確認されている。

図-6 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が、図-6(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. 結言

本研究は、積層繊維補強ゴムの繰り返し衝撃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衝撃緩衝効果を評価することを目的としたものである。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) 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た後に、埋設繊維が破断するような衝撃力が作用した場合でも、処女性能および衝撃緩衝効果を保持する。

- (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、それ以降に、初期に作用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じ衝撃伝達荷重の低減効果を示し、同レベル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、より大きい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载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。
- (5) 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。

謝 辞

最後に本研究を実施するにあたり、適切なご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) 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, pp1865-1874, 2000.3.
- 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.
- 4) 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.