

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基礎的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC BEHAVIOR OF LAMINATED FIBER REINFORCED RUBBER
AS SHOCK ABSORBER OF BRIDGE RESTRAINER SYSTEM

西本安志*・梶田幸秀**・石川信隆***・西川信二郎****

Yasushi NISHIMOTO, Yukihide KAJITA, Nobutaka ISHIKAWA, Shinjiro NISHIKAWA

*防衛大学校理工学研究科学生 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

**修士(工学) 防衛大学校助手 土木工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

***工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239-8686 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 明石市魚住町中尾 1058 番地)

キーワード：積層繊維補強ゴム、緩衝材、落橋防止システム、動的力学特性

(laminated fiber reinforced rubber, shock absorber, bridge restrainer system, dynamic behavior)

1. 緒言

平成7年1月17日未明に発生した兵庫県南部地震では、多くの橋梁構造物が大被害を受けたが、その中で、落橋防止装置の多くが損傷を受けて、桁が杵座から逸脱し、落橋防止装置で支えることができず落橋に至ったケースが数多く見られた¹⁾。この落橋現象は、地震により発生した衝撃的な力によって発生したものと推測され、大地震発生時に作用する衝撃的な力に対して、既存の落橋防止装置では、落橋を完全に防止することが困難であり、落橋防止装置の衝撃力に対する高機能化、高性能化の必要性が提唱されるようになった。

兵庫県南部地震後改訂された新しい道路橋示方書²⁾は、落橋という最悪の事態を防ぐために、桁かかり長と落橋防止構造、変位制限構造、段差防止構造による落橋防止システムを提案し、落橋防止システムの性能向上のためには、大地震発生時において衝撃的に作用する力を緩和するためのゴムなどの緩衝材を設置することが考えられている。

一般に、大地震発生時の衝撃的に作用する荷重に対応する緩衝材としては、衝撃荷重の低減効果と衝撃エネルギーの吸収効果が要求される。しかしながら、衝撃荷重を低減させるためには低い剛性でかつ

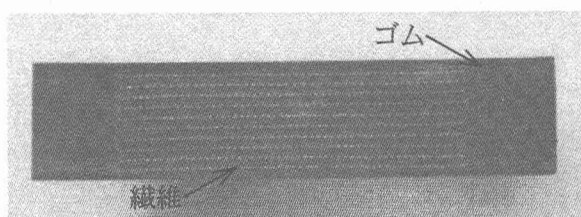


図-1 積層繊維補強ゴムの断面写真

変形量の大きい材料が望ましいのに対し、衝撃エネルギーを吸収させるには高い剛性、あるいは、破壊によるエネルギー吸収能力を有する材料が望ましく、両者を同時に満たすことは難しい。よって、通常のゴム材料のみでは、剛性が低く、緩衝材としての機能を十分に発揮しない可能性がある。

そこで、衝撃荷重の低減効果と衝撃エネルギーの吸収効果を高いレベルで両立させるため、ゴムに繊維を埋め込むことにより剛性と強度を向上させた積層繊維補強ゴム³⁾(図-1)に着目した。

本研究では、積層繊維補強ゴムの落橋防止システム用緩衝材への適用に関する基礎的研究として、静的載荷実験、高速載荷実験、および重錘落下実験を実施し、積層繊維補強ゴムの静的力学特性、力学特性の速度依存性、衝撃荷重の低減効果について考察し、落橋防止システム用緩衝材への適用を提案した。

表-1 ゴムおよび繊維の材料諸元

	積層繊維補強ゴム				ゴム	
	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(NR)系	天然ゴム(NR)系	
引張強度	1764(N/cm)	882(N/cm)	588(N/cm)	10.2(MPa)	10.2(MPa)	20.4(MPa)
破断時の伸び	40(%)	25(%)	20(%)	600(%)	600(%)	600(%)
硬度	-	-	-	65	65	50

表-2 供試体の種類および実験ケース

供試体	静的載荷実験	高速載荷実験	重錘落下実験
総ゴム硬度 50度	○		○
総ゴム硬度 65度	○	○	○
低強度繊維 1PLY	○	○	
低強度繊維 5PLY	○	○	○
低強度繊維 25PLY	○	○	○
低強度繊維 50PLY	○		
中強度繊維 1PLY	○		
中強度繊維 5PLY	○	○	○
中強度繊維 25PLY	○		
中強度繊維 50PLY	○		
高強度繊維 1PLY	○		
高強度繊維 5PLY	○	○	○
高強度繊維 25PLY	○		

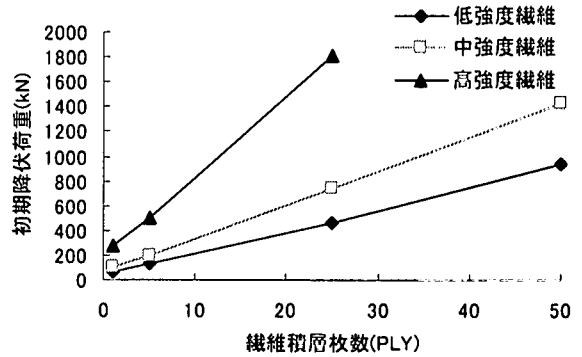


図-3 初期降伏荷重と繊維積層枚数の関係

2. 供試体の種類および実験ケース

本実験に使用した供試体の形状は、積層繊維補強ゴムの基本的な力学特性を把握するために縦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。なお、積層繊維補強ゴムの諸元には選択の余地が大きく、ゴムと繊維のどちらを重要視するかで大きく左右されるが、ここでは、ゴムと比較して強度の大きい繊維の強度をパラメータとして検討する。本実験に選定した繊維は、繊維とゴムの接着技術が確立され使用実績も多い、引張破断強度(単位幅あたりの繊維を引張破断させるのに必要な力)が588N、882N(588N×1.5倍)、1764N(588N×3.0倍)のものである。ここで、引張強度の低いものから、低強度繊維、中強度繊維、高強度繊維と呼ぶことにする。さらに、重錘落下実験においては、文献4)に記載されている落橋防止壁用緩衝材の規格値(硬度55±5度程度)の低硬度側である硬度50度の総ゴム構造についても実施した。

また、供試体の種類および実験ケースを表-2に示す。

3. 静的載荷実験による静的力学特性の把握

3.1 実験概要

静的載荷実験は、5000kN 圧縮試験機を使用し、圧縮速度5mm/min(8.3×10⁻⁵m/s)にて実施した。総ゴム供試体および積層繊維補強ゴム供試体の初期降

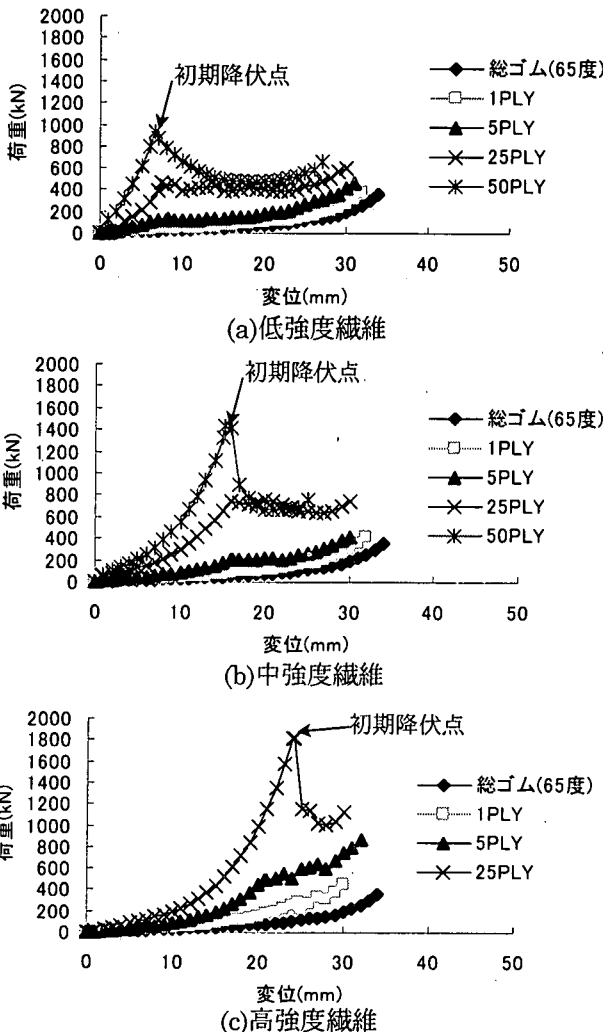


図-2 静的載荷実験より得られた荷重～変位関係

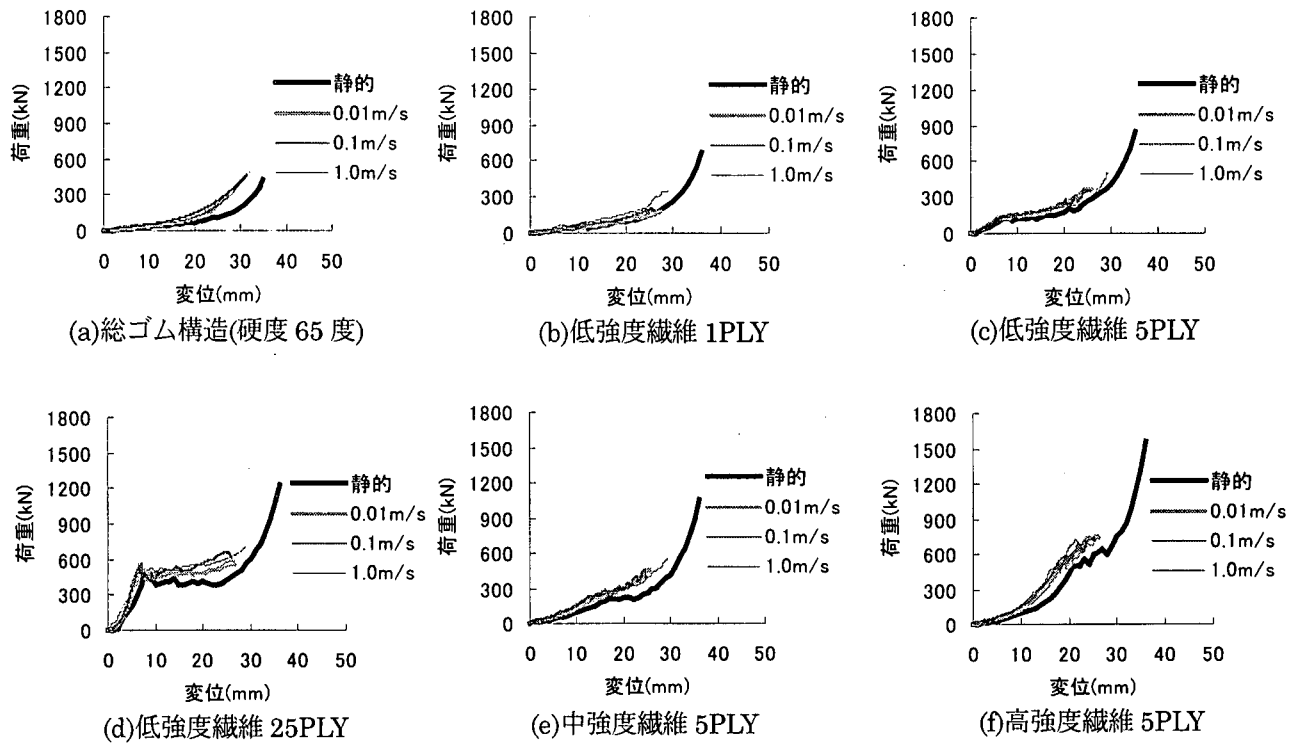


図-4 高速載荷実験より得られた荷重～変位関係と静的載荷実験の結果との比較

伏点後、1mm の変位を与えるのに必要な荷重が 50kN 以上に達したときを供試体の限界変位量とし、荷重の載荷を終了した⁵⁾。測定項目は、載荷点荷重および載荷点変位である。

3.2 実験結果と考察

静的載荷実験の結果をまとめるにあたり、積層繊維補強ゴムの埋設繊維が初期破断し、荷重～変位関係で剛性が急激に変化する点を初期降伏点と定義した。図-2(a),(b),(c)は、低強度、中強度、高強度繊維の静的載荷実験より得られた荷重～変位関係を示したものである。繊維強度および繊維積層枚数の増加に伴い、初期降伏荷重、初期剛性、エネルギー吸収能は増加する傾向を示している。

ここで、初期降伏荷重と繊維積層枚数の関係を図-3 に示す。いずれの繊維強度においても、初期降伏荷重と繊維積層枚数の間には、ほぼ比例的な関係があることが注目される。よって、初期降伏荷重は、繊維積層枚数、繊維強度を適宜選択することにより、所望の初期降伏荷重を得ることが可能であると考えられる。

4. 高速載荷実験による速度依存性の検討

4.1 実験概要

高速載荷実験は、1000kN 中速度高圧載荷装置を

使用し、載荷速度 10^{-2} 、 10^{-1} 、 1.0m/s にて実施した。測定項目は、載荷点変位および載荷点荷重である。

4.2 実験結果と考察

図-4 は、高速載荷実験より得られた荷重～変位関係を静的載荷実験の結果と比較したものである。ここでは、比較のために縦軸および横軸ともすべて同じとした。図-4 より、積層繊維補強ゴムでは、いずれの供試体においても初期降伏点までの荷重～変位関係は、総ゴム構造と比較して載荷速度の影響は少ないが、初期降伏荷重は最高で約 1.2 倍に増加する。初期降伏点以降の領域では、低強度繊維 25PLY の供試体において、高速載荷実験においてほぼ載荷限界変位である 25mm 変位時の荷重が静的載荷で約 400kN であるのに対して、載荷速度 1.0m/s では約 600kN と約 1.5 倍の荷重が発生している。これは、いずれの積層繊維補強ゴム供試体においても初期降伏点以降は繊維の破断によりゴムの影響が支配的になるため載荷速度による荷重の増加が大きくなっているものと推測される。さらに、エネルギー吸収能の載荷速度による影響は、載荷速度の影響により発生荷重が大きくなるため、静的載荷実験によるエネルギー吸収能と比較すると増加する傾向にある。

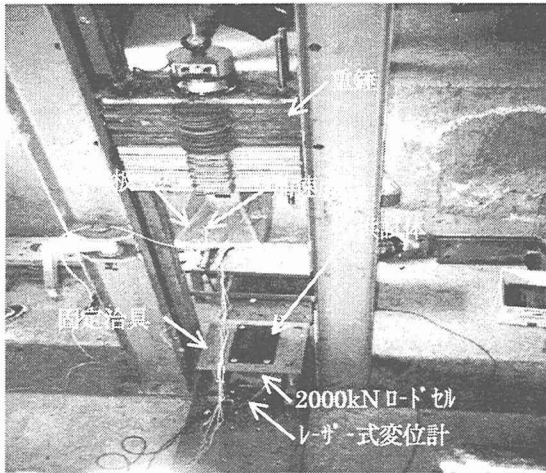


図-5 重錘落下実験概要

表-3 重錘落下実験条件

重錘重量:4.0kN(=408kgf)		
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
3.0	0.75	3.83
5.0	1.25	4.94
7.0	1.75	5.86
10.0	2.50	7.00

*衝突速度 $v=(2gh)^{1/2}$ により算出。

表-4 最大発生荷重と荷重低減効果

	1.0kN・m		5.0kN・m		10.0kN・m	
	$P_{1,0}$ (kN)	$K_{1,0}$	$P_{5,0}$ (kN)	$K_{5,0}$	$P_{10,0}$ (kN)	$K_{10,0}$
総ゴム 硬度 50 度	120.6	1.00	497.7	1.00	987.7	1.00
総ゴム 硬度 65 度	114.8	0.95	482.3	0.97	991.5	1.00
低強度繊維 5PLY	203.8	1.69	326.3	0.66	687.1	0.70
低強度繊維 25PLY	268.9	2.23	690.0	1.39	803.9	0.81
中強度繊維 5PLY	167.5	1.39	414.4	0.83	670.9	0.68
高強度繊維 5PLY	168.4	1.40	474.7	0.95	765.6	0.78

□ : 繊維の破断

5. 重錘落下実験による緩衝効果の検討

5.1 実験概要

重錘落下実験には、落錘衝撃実験装置を使用し、重錘重量を 4.0kN(=408kgf)として、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。

重錘落下実験概要を図-5 に示す。

本実験における実験条件の選定は、静的載荷実験結果をもとに決定した。静的載荷実験の荷重～変位

関係において、発生荷重を変位で積分した値を緩衝材が吸収できるエネルギー量と仮定して、発生荷重と吸収エネルギー量の関係を求め、積層繊維補強ゴムの初期降伏点近傍の吸収エネルギー量 1.0kN・m、および初期降伏点以降を考慮し 3.0, 5.0, 7.0, 10.0kN・m を、重錘の運動エネルギーとして供試体に作用させることとした。エネルギー保存則から、この運動エネルギーを重錘の位置エネルギーに換算し、重錘の落下高さを選定した。実験条件を表-3 に示す。また、測定項目は、重錘加速度、重錘変位、ロードセル発生荷重である。

5.2 実験結果と考察

実験結果をまとめるに当たり、ロードセルより得られた荷重のピーク値を最大発生荷重とした。各入力エネルギーにおける最大発生荷重を表-4 に示す。また、荷重伝達の低減に関しては、下記に示す式(1)により評価することとした。

$$K_n = P_n / P_{R50-n} \quad (1)$$

ここで、

K_n : エネルギー($E=nkN・m$)を入力したときの荷重低減効果

P_n : 供試体を設置した場合のエネルギー($E=nkN・m$)を入力したときの最大発生荷重

P_{R50-n} : 硬度 50 度の総ゴムを設置した場合のエネルギー($E=nkN・m$)を入力したときの最大発生荷重

なお、ゴムを設置することにより緩衝効果が認められることは知られており、本研究は、ゴム製緩衝材の高機能化・高性能化が目的であるため、文献4)に記載されている落橋防止壁用緩衝材の規格値(硬度 55±5 度程度)の低硬度側である硬度 50 度の総ゴム構造を基準として比較することとした。

式(1)より求めた荷重低減効果を表-4 に示す。

表-4 より、総ゴム構造において、荷重低減効果は、同じ入力エネルギーでも剛性が大きい硬度 65 の方が良好な結果を示している。一方、積層繊維補強ゴムでは、入力エネルギーによって初期降伏点までに達しない場合、すなわち、繊維が破断しない場合の発生荷重は、総ゴム構造硬度 50 度より、約 1.1～2.3 倍高い荷重が発生し、荷重低減効果が低い。しかし、埋設繊維破断後は、発生荷重が総ゴム構造硬度 50 度より低い値を示し荷重低減効果も良好な結果を示す。低強度繊維 5PLY の供試体において、入力エネルギー 10.0kN・m 時では最高で約 30% 発生荷重が低減している。

次に、重錘落下実験における最大発生荷重と静的

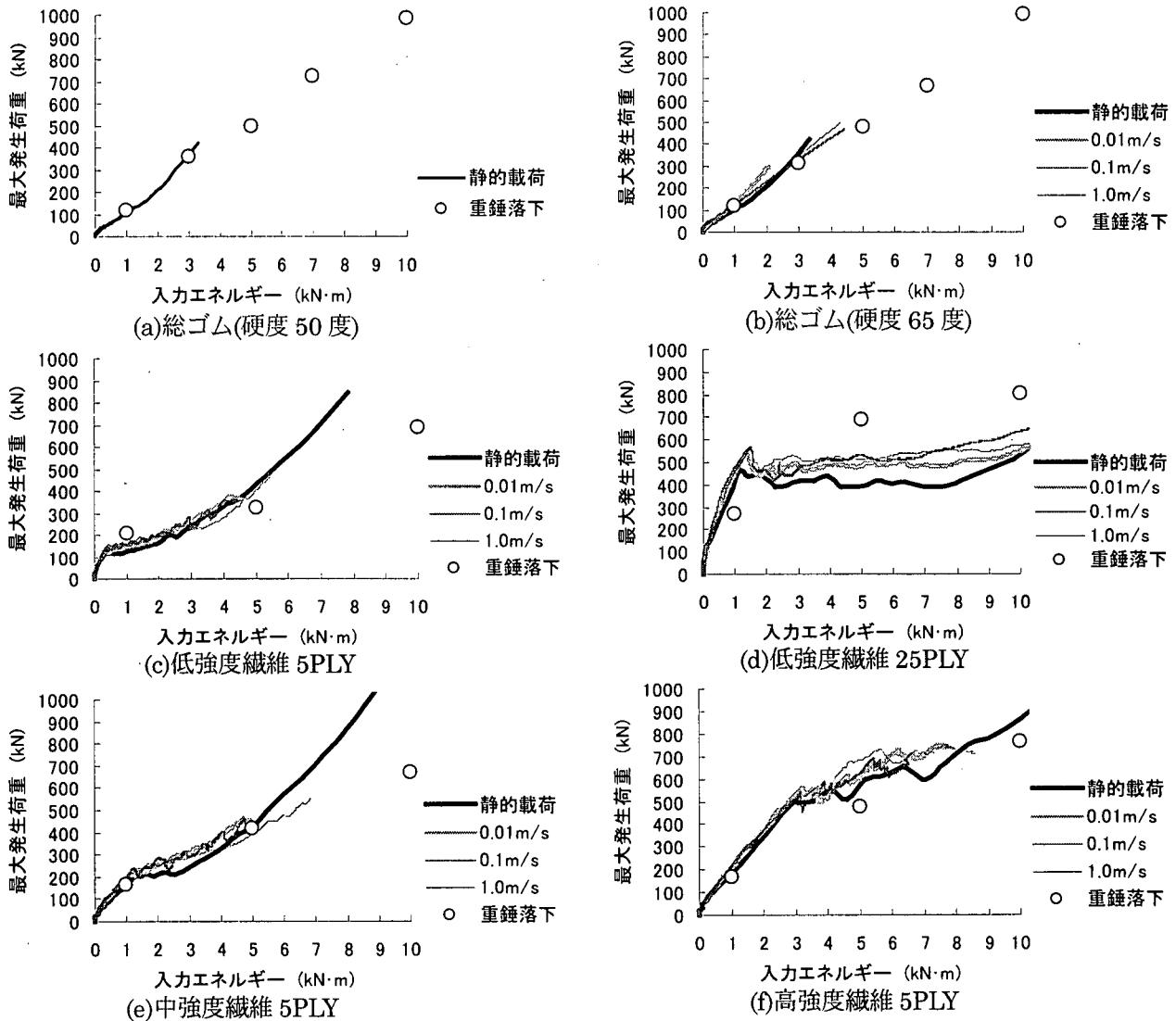


図-6 重錘落下実験における最大発生荷重と静的載荷実験結果

および高速載荷実験における発生荷重～入力エネルギー関係の比較

載荷実験結果から求めた発生荷重～入力エネルギー関係を比較したものを図-6 に示す。なお、高速載荷実験を実施した供試体については、高速載荷実験結果から求めた発生荷重～入力エネルギー関係を合わせて示す。

図-6 より、総ゴム構造および積層繊維補強ゴムの繊維積層枚数 5PLY 供試体では、静的載荷実験における吸収エネルギー量 (入力エネルギー) 5.0kJ・m までは、静的載荷実験における発生荷重～入力エネルギー関係と重錘落下実験による最大発生荷重はよく一致している。それ以降では、重錘落下実験の方が低い発生荷重となる。これは、速度効果を考慮した高速載荷実験結果から求めた発生荷重～入力エネルギー関係において入力エネルギー5.0kJ・m までは、静的載荷実験より求めたものとほぼ等しいためと考えられる。しかし、それ以降の入力エネルギーでは、高速載荷実験より求めた発生荷重～入力エ

ネルギー関係の方が静的載荷実験より低い値を示す傾向にあるためと考えられ、高い入力エネルギーでは、高速載荷実験における発生荷重～入力エネルギー関係が重要となる。

しかし、低強度繊維 25PLY では、入力エネルギー1.0kJ・m までは、静的載荷実験における発生荷重～入力エネルギー関係とほぼ一致しているが、それ以降では、他の供試体と異なり重錘落下実験による最大発生荷重の方が大きくなる傾向を示す。これについては、繊維の積層枚数の増加による剛性の向上、繊維とゴムの比率などが影響していると考えられ、今後の検討課題であるが、初期降伏点以降において、高速載荷実験から求めた発生荷重～入力エネルギー関係の方が静的載荷実験より大きい値を示すことも一つの要因であると考えられる。

以上のことから、繊維積層枚数 5PLY 程度までであれば、重錘落下実験において、入力された運動工

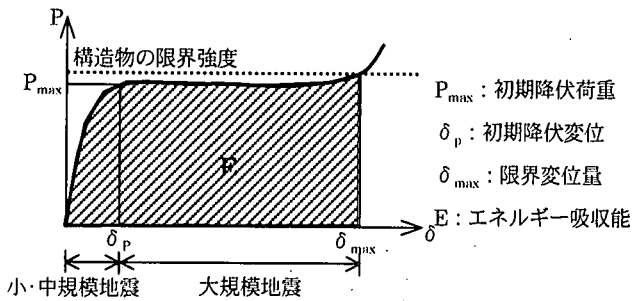


図-7 積層繊維補強ゴムの

落橋防止システム用緩衝材への適用概念図

エネルギーによって発生する荷重は、静的載荷実験および高速載荷実験におけるエネルギー吸収量が、入力された運動エネルギー量に到達したときの発生荷重とほぼ一致するため、高速載荷実験および静的載荷実験からの予測が可能であると考えられる。また、静的載荷実験と高速載荷実験の発生荷重～入力エネルギー関係を比較し、重錘の衝突速度を考慮して、高速載荷実験による載荷速度の影響を考慮する必要性があると考えられる。

6. 結言

本研究は、積層繊維補強ゴムの落橋防止システム用緩衝材への適用を目的に、その基礎的段階として積層繊維補強ゴムの静的載荷実験、高速載荷実験、および重錘落下実験を実施し、積層繊維補強ゴムの静的力学特性、力学特性の速度依存性、衝撃荷重の低減効果に注目したものである。ここで得られた成果を要約すると以下の通りである。

- (1) 静的載荷実験により、積層繊維補強ゴムは繊維積層枚数および繊維強度の増加により、初期降伏荷重およびエネルギー吸収能が増加する。また、繊維強度、繊維積層枚数を適宜選択することにより所望の初期降伏荷重を得ることができる。
- (2) 高速載荷実験により、積層繊維補強ゴムは、総ゴム構造と比較して載荷速度の影響は少ないが、積層繊維補強ゴムの初期降伏荷重は、載荷速度の影響により約 1.2 倍に増加する。さらに、積層繊維補強ゴムの初期降伏点以降は、埋設繊維の破断により、ゴムの特性が支配的となるため、載荷速度の影響が初期降伏点までと比較してさらに顕著となる。
- (3) 重錘落下実験により、積層繊維補強ゴムは、入力エネルギーに対して、弾性範囲内では、総ゴム構造に比して高剛性となるため、初期降伏点までの応答では、約 1.1～2.3 倍高い発生荷重となり、荷重低減効果も低いが、埋設繊維破断後は、総ゴム構造と比較して最高で約 30%発生荷重が低減し、荷重低減

効果が大きい。

(4) また、繊維積層枚数 5PLY 程度までであれば、入力された運動エネルギーによって発生する荷重は、静的載荷実験および高速載荷実験における発生荷重～入力エネルギー関係において、重錘落下実験によって入力された運動エネルギー量に到達したときの発生荷重とほぼ一致するため、静的載荷実験および高速載荷実験からの予測が可能であると考えられる。

以上の得られた成果より、落橋防止システム用緩衝材への適用として、図-7 に示すように中小規模の地震動に対しては、初期降伏点までの弾性範囲内で対応し、大規模な地震動に対しては、初期降伏点以降の埋設繊維の逐次破断による高エネルギー吸収性能により対応することが可能であると考えられる。

特に、積層繊維補強ゴムの初期降伏点、エネルギー吸収能に着目すると、構造物の限界強度以下で積層繊維補強ゴムの初期降伏点を生じさせ、それ以降については、埋設繊維の破断によるエネルギー吸収能により対応することが可能であり、そのエネルギー量を上部構造の移動に伴うエネルギーより大きくすることが望ましいと考えられる。その際、積層繊維補強ゴムは、繊維強度や繊維積層枚数を変化させることにより材料特性を変化させることの可能な自由度の大きい材料であるといえる。

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土木工学科大野友則教授、香月智助教授ほか、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) 神田昌幸：道路橋における支承および落橋防止構造の被災の総括、橋梁と基礎, pp.156-162, 1996.8
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.
- 3) 西川信二郎, 西本安志, 小谷美和：P R F 構造緩衝材, 繊維学会予稿集, 2B18, pp.G-106, 1999.5
- 4) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧仕様に係る仕様」の準用に関する参考資料(案), pp.III-41, 1995.6
- 5) 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, 日本路公団実験研究所報告, Vol.34, pp.98-104, 1997.11