

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

A STUDY ON THE WEIGHT DROPPING IMPACT TEST AND PREDICTION OF THE IMPACT TRANSMITTED LOAD OF LAMINATED FIBER REINFORCED RUBBER AS A SHOCK ABSORBER FOR 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 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

***工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒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)

Many bridges were severely damaged by the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. Because of this lesson, the fundamental design concept was changed so that the bridge may be prevented from falling down even if the same earthquake will be occurred. To this end, many researchers have studied so far the shock absorber for a bridge restrainer system, from the viewpoints of both the high-energy absorption and the reduction of impact load. The static and high-speed compression tests were performed previously in order to examine the static and dynamic properties of the laminated fiber reinforced rubber. In this study, the weight dropping impact test was carried out to investigate the shock absorber effect of impact load. It is recognized that the laminated fiber reinforced rubber is much better material than the usual rubber with respect to the shock absorber effect of the impact load at high input energy. It is also found that the impact transmitted loads of usual rubber and laminated fiber reinforced rubber can be predicted from the results of static compression test.

Key Words: shock absorber, laminated fiber reinforced rubber, weight dropping impact test, impact transmitted load

キーワード: 緩衝材, 積層繊維補強ゴム, 落錘式衝撃実験, 衝撃伝達荷重

1. 緒言

平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、多くの橋梁構造物が被害を受けた。被害の状況¹⁾を見ると、落橋した高架橋も数多く存在し、落橋により交通の流れが遮断され、地震後の復旧作業において大きな弊害となった。このため、落橋防止装置に対して、より一層の研究開発と具体的な対策が必要であることが提唱されている²⁾。

兵庫県南部地震後に改訂された道路橋示方書³⁾では、落橋を防ぐために、桁かかり長、落橋防止構造、変位制限構造および段差防止構造から構成される落橋防止システムを提案している。さらに、落橋防止システムのうち、落橋防止構造や変位制限構造には、大地震時に衝撃的な力が作用すると考えられるため、ゴムなどの緩衝材を設置することが要求されている。

ここで一般に、大地震発生時において落橋防止構造に取り付けられる緩衝材に要求される機能は、落橋防止構造に作用する衝撃力の低減と高いレベルのエネルギー吸収の2つが挙げられる。作用する衝撃力を低減させるためには、

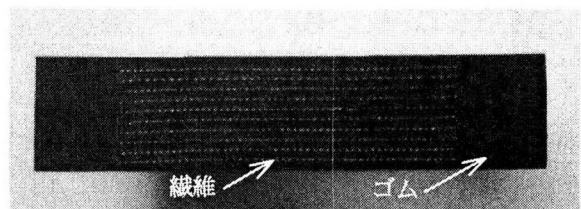


写真-1 積層繊維補強ゴムの断面写真

緩衝材の剛性を小さくかつ変形量の大きい材料とするのが望ましいのに対し、一方の高レベルのエネルギーを吸収するためには、緩衝材の剛性を大きくかつヒステリシスのある材料とするのが望ましく、両者を同時に満たすことは難しい。また、落橋防止システムにおいても、供用期間中に発生する確率の高い中・小規模地震と供用期間中に発生する確率の低い大規模地震に対する2段階設計法の適用が検討されており、設計的な観点からも緩衝材において2段階設計的な考え方が要求される。

以上の観点から、落橋防止システム用緩衝材に要求される機能をまず高レベルのエネルギー吸収で達成させるために、著者らは、ゴムの中に繊維を積層埋設し、剛性を向

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	天然ゴム(NR)系	
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)	20.4(MPa)	10.2(MPa)
破断時の伸び	40(%)	25(%)	20(%)	600(%)	600(%)	600(%)
硬度	—	—	—	65	50	65
構成系	2520(denier)	1260(denier)	1200(denier)	—	—	—

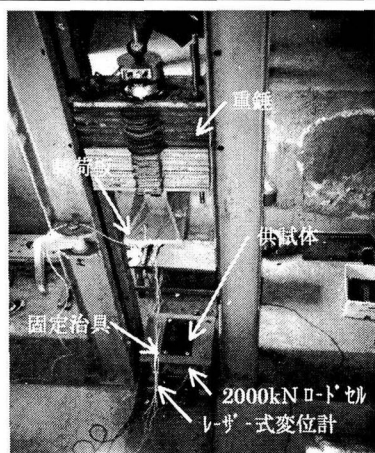


写真-2 落錘式衝撃実験装置

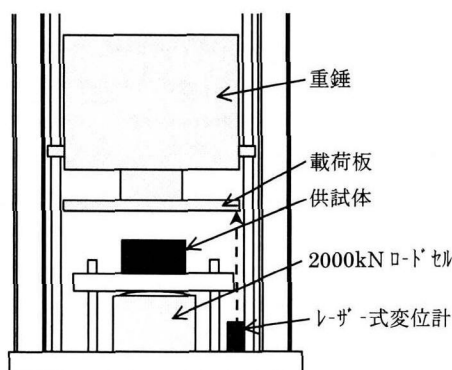


図-1 実験概要と計測装置の取り付け位置

上させた積層繊維補強ゴム(写真-1)に着目し、その静的および動的力学特性を把握した。すなわち、積層繊維補強ゴムに対し静的載荷実験と高速載荷実験を行い、積層繊維補強ゴムが埋設された繊維の影響により通常のゴム(総ゴムという)よりも高い剛性を示すことを確認し、また、埋設された繊維が破断することにより、その時点を積層繊維補強ゴムの降伏点と定義することができた。さらに、繊維の破断が逐次行われていくため、延性的な挙動を示すことや総ゴムに比べて高エネルギー吸収性能を示すという結果を得た^{4), 5), 6)}。

これらの研究を踏まえ、積層繊維補強ゴムを実際に落橋防止システム用緩衝材として適用するにあたり、さらに本研究では、落錘式衝撃実験を実施することにより、落橋防止構造に作用する衝撃力の低減効果や、落橋防止構造に作用するエネルギーの吸収量を測定し、緩衝材に要求される2つの機能に対する評価を行った。また、落橋防止構造を設計するにあたり、緩衝材により落橋防止構造に伝達され

た発生荷重(以下「伝達荷重」という)の推定を試みた。すなわち、静的載荷実験結果および高速載荷実験結果による積層繊維補強ゴムの荷重～変位関係から衝突時に発生する最大伝達荷重の予測を試みたものである。

2. 落錘式衝撃実験

2.1 実験の概要

落錘式衝撃実験を行う目的は、積層繊維補強ゴムを落橋防止システムに適用するにあたり、上部構造と橋台の衝突などの2物体の衝突に際し、一方を完全に固定してその前面に緩衝材を設置した場合を想定し、他方から衝撃力を作用させて、緩衝材による衝撃荷重の低減効果やエネルギー吸収量を調べるためである。写真-2 および図-1 に実験状況を示す。

重錘重量は、実験装置の制約から4.0kN(=408kgf)および5.6kN(=571kgf)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。また、重錘の衝突面の形状は、落橋防止システム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。計測装置の取り付け位置は、図-1 に示したとおりであり、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㈱製のLC-200TEを用い、定格容量2000kNである。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。

2.2 実験供試体

本実験に使用した供試体の形状は、先に実施した静的載荷実験および高速載荷実験^{4), 5), 6)}と同じ、縦150mm×横150mm×高さ50mmの直方体形状とした。ゴム中に埋設した繊維の材料諸元およびゴムの材料諸元は、表-1に示すとおりである。本実験では、繊維の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。供試体の種類は、硬度50の総ゴム、硬度65の総ゴム、硬度65の総ゴムの中に低強度繊維を5枚埋設したもの、低強度繊維を25枚埋設したもの、中強度繊維を5枚埋設したもの、高強度繊維を5枚埋設したものである。なお、繊維はメッシュ状の平織りであり、力が作用する方向

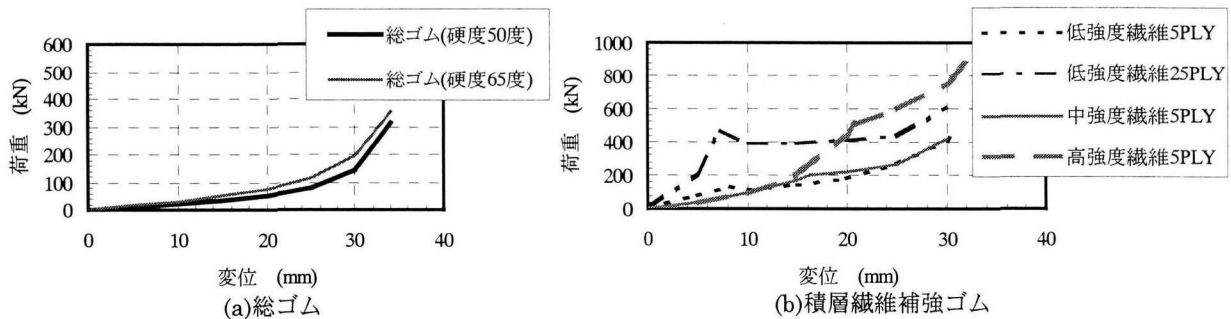


図-2 静的載荷実験より得られる荷重～変位関係

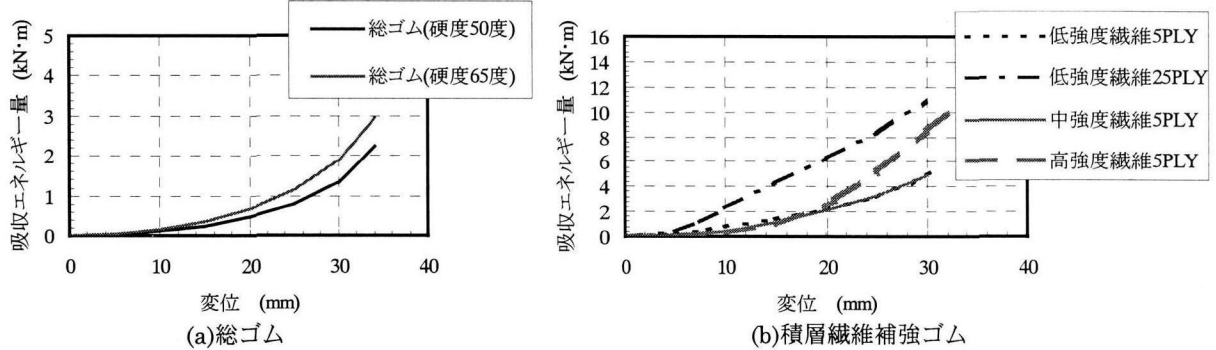


図-3 静的載荷実験より得られる吸収エネルギー量～変位関係

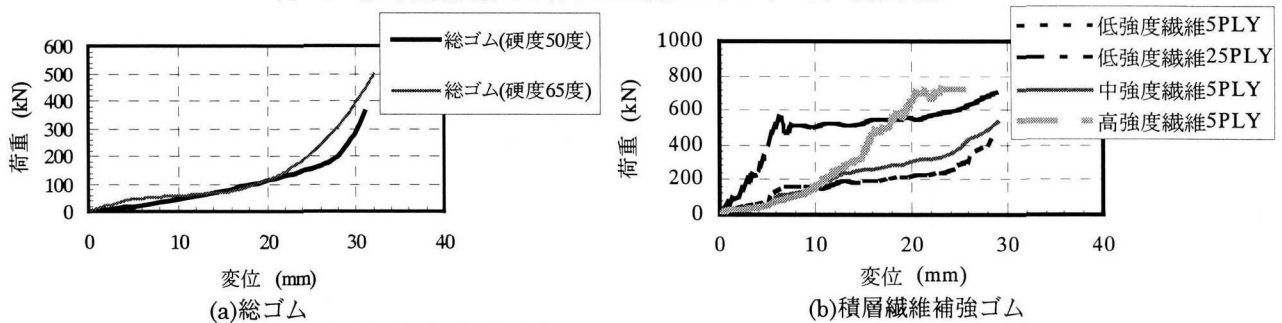


図-4 高速載荷実験 (載荷速度 1.0m/s) より得られる荷重～変位関係

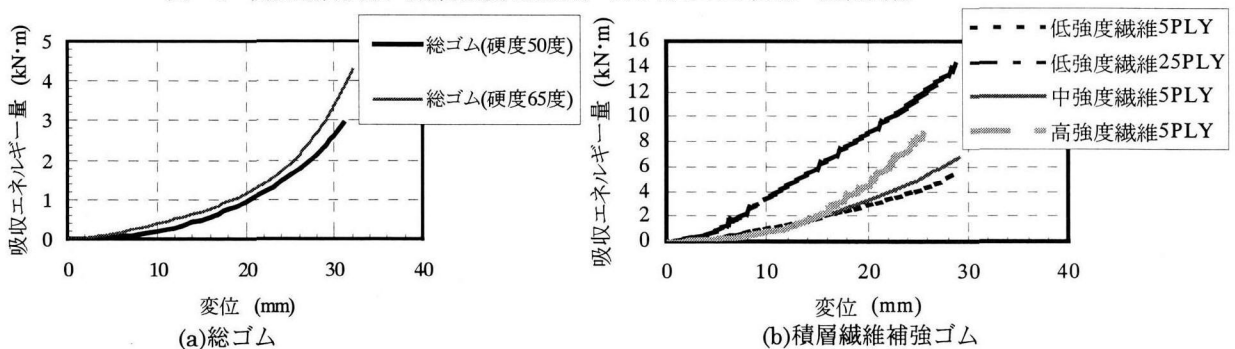


図-5 高速載荷実験 (載荷速度 1.0m/s) より得られる吸収エネルギー量～変位関係

に対し直行方向に積層し、均等に平行して埋設した。また、表-1中に構成系のデニール数(長さ 9000mの繊維の重さが 1g 時の糸の太さ)を示した。ここで、硬度 50 の総ゴムについては、文献 7)に記載されている落橋防止壁用緩衝材である総ゴムの規格値(硬度 55 ± 5 度程度)の低硬度側を採用したものである。

2.3 静的載荷実験^{4), 5)}

ここでは、落錘式衝撃実験を行う前に実施した静的載荷実験結果を図-2に示す。なお、静的載荷実験では、ゴム

および積層繊維補強ゴムの初期降伏点以降に、1mm の変位増分を与えるのに必要な荷重が 50kN に達した時を限界変位量とした⁸⁾。また、変位軸と荷重～変位曲線で囲まれる面積を吸収エネルギー量とし、吸収エネルギー量～変位曲線を図-3に示す。ここで、限界変位量までのエネルギー吸収量を静的限界エネルギー吸収量と定義する。表-2に各供試体の限界変位量、静的限界エネルギー吸収量および初期降伏点までのエネルギー吸収量を示す。

まず、図-2(a)より総ゴムにおいてはゴムの硬度が荷重～変位関係に与える影響は殆ど見られない。

表-2 各供試体のエネルギー吸収量

供試体	静的限界 変位置量 (mm)	静的限界 エネルギー 吸収量 (kN・m)	初期降伏点 までのエネ ルギー吸収 量(kN・m)
硬度 50 の総ゴム	34	2.26	—
硬度 65 の総ゴム	34	2.93	—
低強度繊維 5PLY	31	5.31	0.51
低強度繊維 25PLY	30	10.91	1.13
中強度繊維 5PLY	30	4.95	1.33
高強度繊維 5PLY	32	9.99	2.96

表-3 落錘式衝撃実験の入力条件

入力エネ ルギー (kN・m)	重錘重量 4.0kN		重錘重量 5.6kN	
	落下高さ (m)	衝突速度* (m/s)	落下高さ (m)	衝突速度* (m/s)
1.0	0.25	2.21	0.18	1.87
3.0	0.75	3.83	—	—
5.0	1.25	4.94	0.89	4.17
7.0	1.75	5.85	—	—
10.0	2.50	7.00	1.79	5.92

*衝突速度 $v=(2gh)^{1/2}$ により算出。

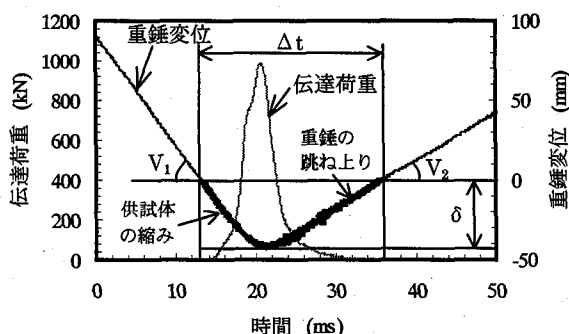


図-6 伝達荷重および重錘変位～時間関係
(硬度 50 の総ゴム, $E=10.0\text{kN}\cdot\text{m}$)

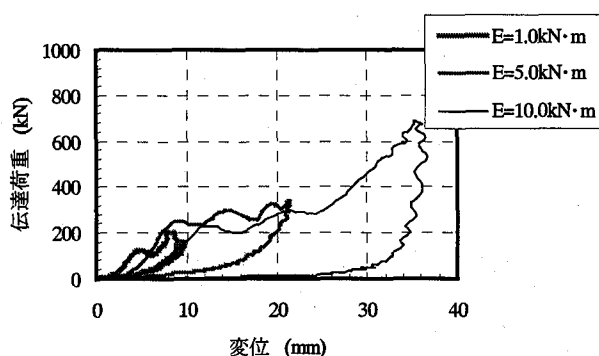


図-7 落錘式衝撃実験で得られた伝達荷重～変位関係
(低強度繊維 5PLY, 重錘重量 4.0kN)

一方、図-2(b)より積層繊維補強ゴムについては、繊維の積層枚数を 25 枚にすると明確に降伏点が現れ、5 枚の時も降伏点は存在するが明確ではない。しかも 25 枚の場合は、初期勾配が 5 枚の時の約 2 倍となる。これは、ゴムの変形を埋設繊維が拘束することにより、通常のゴムより剛

性が高まるため、枚数が増えるとそれだけ剛性（初期勾配）が大きくなるためである。さらに、積層枚数が同じ 5PLY の場合は、繊維強度が大きくなるほど全体の強度が増し、特に高強度 5PLY の場合は途中から勾配が急に上がっている。これは繊維の破断強度のみならず破断時の伸びも増加したためと考えられる。

次に、図-3 より積層繊維補強ゴム（図-3(b)）は、総ゴム（図-3(a)）に比べて約 2.0～5.0 倍エネルギー吸収能に優れていることがわかる。

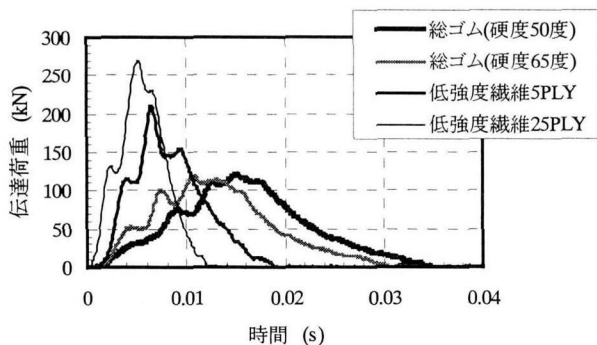
2.4 高速載荷実験^{4), 5), 6)}

次に、動力学特性を把握するために落錘式衝撃実験の前に行った高速載荷実験結果（載荷速度 1.0m/s ）を図-4 に示す。また、静的載荷実験と同じく吸収エネルギー量～変位曲線を図-5 に示す。図-4 および図-5 より静的載荷実験とはほぼ同様な考察が出来る。図-4(b)および図-5(b)で低強度繊維 5PLY と中強度繊維 5PLY で若干の差が認められる。しかし、この差は後の表-5 で示すように大きな入力エネルギーの場合にはほとんど影響なく、両者の差異はあまり認められなかった。また、高速載荷することにより静的載荷に比べて、総ゴムの限界変位置量での強度および限界エネルギー吸収能は、それぞれ約 2.0～2.5 倍および約 1.5～2.0 倍になり、積層繊維補強ゴムの場合は、初期降伏荷重が最高約 1.2 倍、限界エネルギー吸収能が約 1.2～1.4 倍になることがわかった。

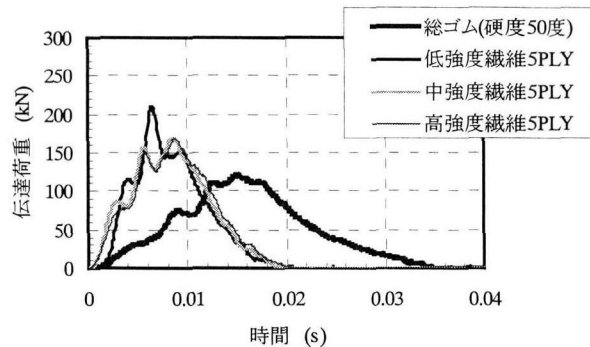
2.5 落錘式衝撃実験の入力条件

落錘式衝撃実験における入力条件は、弾性応答、弾塑性応答および埋設繊維の破断という終局限界の 3 段階を選んだ。つまり、表-2 に示す静的載荷実験より得られた積層繊維補強ゴムの初期降伏点までのエネルギー吸収量から、埋設繊維の破断を生じさせないエネルギー量 $1.0\text{kN}\cdot\text{m}$ と今回用いた供試体の静的限界エネルギー吸収量のほぼ最大値である $10.0\text{kN}\cdot\text{m}$ 、その中間である $5.0\text{kN}\cdot\text{m}$ のエネルギー量を用いることとした。総ゴムについては、追加して $3.0\text{kN}\cdot\text{m}$ および $7.0\text{kN}\cdot\text{m}$ のエネルギー量についても実施した。すなわち、積層繊維補強ゴムの緩衝効果が埋設繊維の破断の有無により、どのように変化するかを把握することを第一の目的とした。

さらに、実験装置の最大重錘重量が 6.0kN 、最大落下高さが 3.0m であることを考慮し、選定したエネルギー量を供試体に作用できるように重錘重量と落下高さを決定した。また、エネルギー量は同じであるが、重錘重量が異なる場合の影響を把握するために重錘重量を 4.0kN および 5.6kN と変化させ、さらに、落下高さについては、エネルギー保存則から、入力する運動エネルギーを重錘の位置エネルギーに換算して落下高さとした。載荷条件は、ひとつの供試体に対し、ひとつのエネルギーを入力する単一載荷とした。以上をまとめて表-3 に示す。

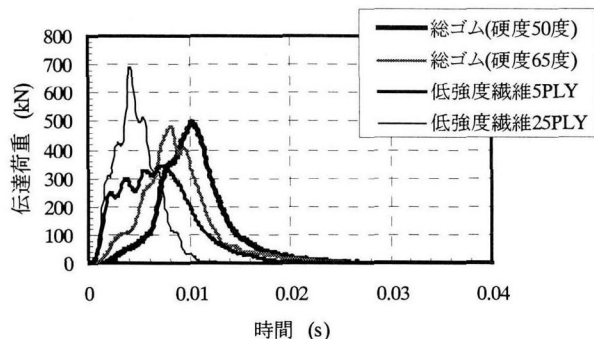


(a) 硬度 50, 硬度 65 の総ゴムと低強度繊維の比較

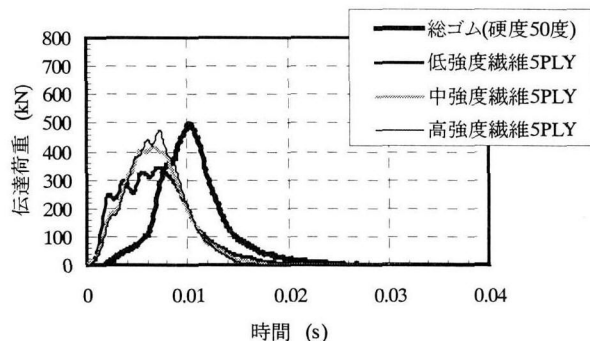


(b) 硬度 50 の総ゴムと積層繊維補強ゴム 5PLY の比較

図-8 入力エネルギーE=1.0kN・m の場合の伝達荷重～時間関係

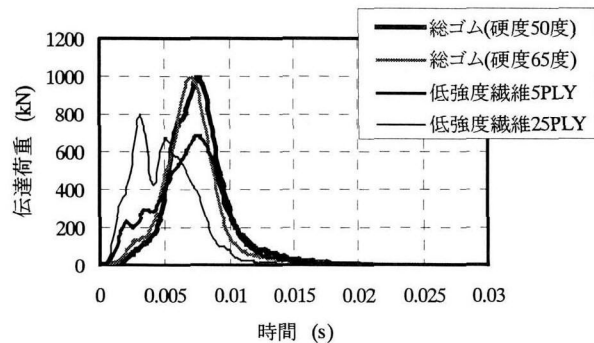


(a) 硬度 50, 硬度 65 の総ゴムと低強度繊維の比較

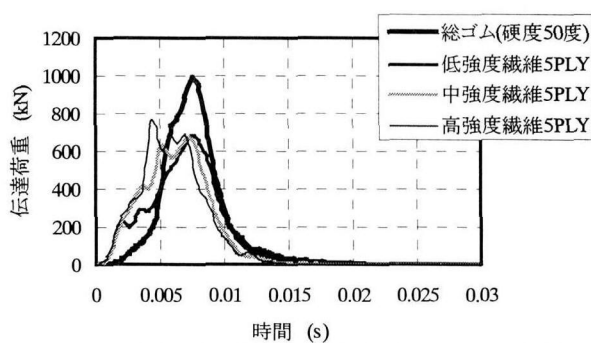


(b) 硬度 50 の総ゴムと積層繊維補強ゴム 5PLY の比較

図-9 入力エネルギーE=5.0kN・m の場合の伝達荷重～時間関係



(a) 硬度 50, 硬度 65 の総ゴムと低強度繊維の比較



(b) 硬度 50 の総ゴムと積層繊維補強ゴム 5PLY の比較

図-10 入力エネルギーE=10.0kN・m の場合の伝達荷重～時間関係

表-4 重錘の運動量の変化と力積の関係

供試体	入力エネルギー (kN・m)	重錘の運動量 の変化 (kN・s)	伝達荷重～時間 関係から 求めた力積 (kN・s)
硬度 50 の総ゴム	1.0	1.45	1.79
	5.0	3.02	3.21
	10.0	3.75	4.59
硬度 65 の総ゴム	1.0	1.33	1.61
	5.0	2.54	3.10
	10.0	3.73	4.22
低強度繊維 5PLY	1.0	1.24	1.49
	5.0	2.31	3.00
	10.0	3.56	4.15
低強度繊維 25PLY	1.0	1.17	1.45
	5.0	2.41	2.9
	10.0	3.43	3.96
中強度繊維 5PLY	1.0	1.15	1.55
	5.0	2.56	3.06
	10.0	3.54	4.11
高強度繊維 5PLY	1.0	1.16	1.57
	5.0	2.72	3.15
	10.0	3.36	4.23

3. 実験結果と考察

3.1 伝達荷重の低減効果

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-6 に示す。重錘変位～時間関係を求めるに際しては、伝達荷重～時間関係において荷重が増加しはじめる時間の重錘変位を 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-6 中の重錘変位～時間関係の太線部分が供試体の変形量となる。また、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伝達荷重とし、図中に示す Δt を伝達荷重の作用時間とした。さらに、落錘式衝撃実験における供試体の伝達荷重～変位関係も図-7 のように求めた。図-7 は低強度繊維 5PLY の各入力エネルギーにおける伝達荷重～変位関係を示したもので、入力エネルギー 5.0kN・m および 10.0kN・m で

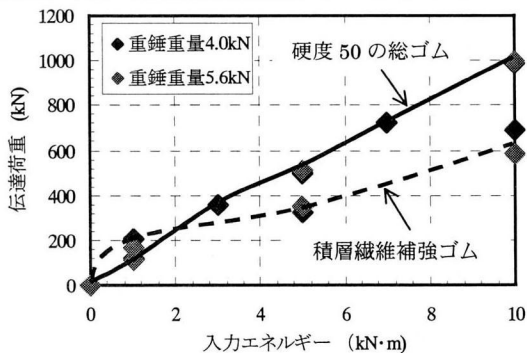
表－5 最大伝達荷重と荷重低減係数

(a)重錘重量 4.0kN

	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}
硬度 50 の総ゴム	120.6	1.00	497.7	1.00	987.7	1.00
硬度 65 の総ゴム	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

(b)重錘重量 5.6kN

	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}
硬度 50 の総ゴム	115.8	1.00	512.0	1.00	996.3	1.00
硬度 65 の総ゴム	114.8	0.99	443.1	0.87	821.8	0.82
低強度繊維 5PLY	167.5	1.45	348.4	0.68	584.7	0.59
中強度繊維 5PLY	157.9	1.36	435.4	0.85	671.8	0.67
高強度繊維 5PLY	155.9	1.35	479.4	0.94	698.6	0.70



図－11 総ゴム硬度 50 度と積層繊維補強ゴム
(低強度繊維 5PLY) の比較

は、静的載荷実験に見られるような剛性が急激に変化する点（初期降伏点）が存在し、埋設繊維が破断していると考えられる。また、入力エネルギーが大きくなると荷重～変位関係の勾配が緩くなっているが、これは、入力エネルギーが大きいと重錘の落下当初（変位が小さい範囲）では、ゴムのみで吸収するため、変位の増大に伴い勾配が大きくなるのは繊維の影響が大きくなるためであると考えられる。

次に、図－8、9、10 に各入力エネルギーレベルにおける伝達荷重～時間関係を示す。

はじめに、図－8、9、10 に示す伝達荷重～時間関係から求めた力積と後述する衝突前後の重錘速度から求めた運動量の変化量を表－4 に示す。表－4 より、重錘の運動量の変化量に比較して、伝達荷重～時間関係から求めた力積の方が約 10～20% 大きいものの、ニュートンの第 2 法則と等価である力積－運動量定理がほぼ成立していることを確認した。また、同じ入力条件であれば、総ゴムおよび積層繊維補強ゴムの力積はほぼ等しい値となった。

図－8 の入力エネルギー 1.0kN・m の場合では、硬度 50 の総ゴムおよび硬度 65 の総ゴムはほぼ等しい伝達荷重となり、荷重の作用時間が長いことがわかる。また、剛性の

大きい硬度 65 の方が荷重の立ち上がりが早いことがわかる。一方、積層繊維補強ゴムは、埋設繊維が破断しない弾性範囲内の応答であるため、総ゴムと比較して剛性が高いために荷重の立ち上がりが早く、伝達荷重が大きな値を示す。

次に、図－9 の入力エネルギー 5.0kN・m の場合では、総ゴムと比較して低強度繊維 5PLY 供試体では、埋設繊維の破断が生じたため、総ゴムと比して伝達荷重が低下し、荷重の作用時間も同程度となっていることがわかる。しかし、低強度繊維 25PLY は、埋設繊維の破断が生じていないため、総ゴムと比べて高い伝達荷重となった。

さらに、図－10 の入力エネルギー 10.0kN・m では、いずれの積層繊維補強ゴムも繊維の破断が生じ、総ゴムに比較して低い伝達荷重となり、荷重の作用時間も総ゴムとほぼ等しくなった。すなわち、最大伝達荷重は、埋設繊維の破断により低減され、荷重の作用時間も埋設繊維が破断することによりゴムの特性に近づくため、総ゴムとほぼ等しくなるものと考えられる。

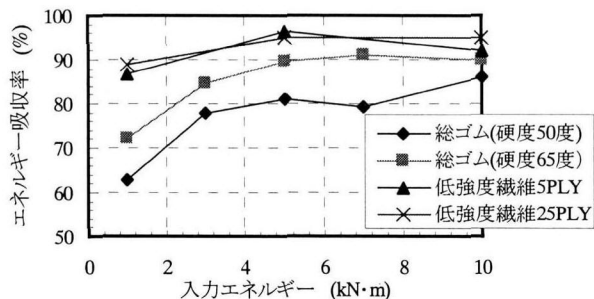
ここで、各入力エネルギーにおける最大伝達荷重を表－5 に示す。さらに、伝達荷重の低減効果を評価するため、式(1)に示す荷重低減係数を定義した。

一般に、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いるが⁹⁾、ここでは、文献 7) 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 の総ゴムを基準として荷重低減効果を評価した。

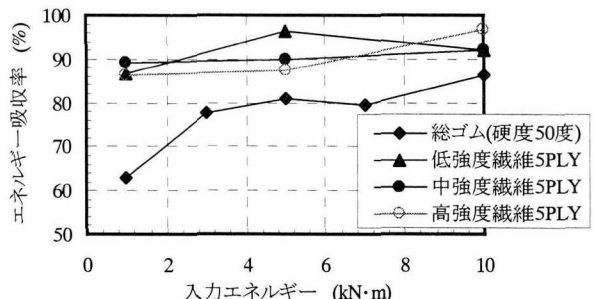
式(1)より求めた荷重低減係数を表－5 に併せて示す。荷重低減係数が 1.0 より小さいときは、硬度 50 の総ゴムよりもさらに荷重を低減する効果があることを示している。また、表－5 中の網掛けは、繊維の破断が確認された供試体を表している。

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

ここで、



(a) 硬度 50, 硬度 65 の総ゴムと低強度繊維の比較



(b) 硬度 50 の総ゴムと積層繊維補強ゴム 5PLY の比較

図-12 エネルギー吸収率の比較 (重錘重量 4.0kN)

K_n : 入力エネルギー($E = n \text{ kN} \cdot \text{m}$)時の荷重低減係数.

P_n : 供試体を設置した場合における入力エネルギー

($E = n \text{ kN} \cdot \text{m}$)時の最大伝達荷重.

P_{R50-n} : 硬度 50 の総ゴムを設置した場合における入力エネルギー($E = n \text{ kN} \cdot \text{m}$)時の最大伝達荷重.

表-5 より, 総ゴム構造における荷重低減係数は, 同じ入力エネルギーでも硬度 65 と硬度 50 では, やや硬度 65 の方が低い値を示すもののほぼ等しい伝達荷重となり, ゴム材料単体で硬度を上げて, つまり, 剛性を向上させても荷重の低減効果は, あまり期待できないといえる.

一方, 積層繊維補強ゴムは, 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, 荷重低減係数は約 1.0~2.2 と 1.0 よりも大きな値となる. しかし, 繊維が破断した場合は荷重低減係数が 1.0 よりも小さい値を示す. 例えば, 低強度繊維 5PLY の供試体において, 重錘重量 5.6kN で入力エネルギー 10.0kN·m を作用させた場合は, 伝達荷重が硬度 50 の総ゴムに比べて約 40%低減されている.

また, 重錘重量を約 1.4 倍に変化させても同じ入力エネルギーであれば, 伝達荷重および荷重低減係数がほぼ等しい値となった. すなわち, 本実験程度の重錘重量の変化では, 同じエネルギー量を入力した際の伝達荷重に及ぼす影響はほとんどないことがわかる.

以上のことを, 図-11 に示す硬度 50 の総ゴムと低強度繊維 5PLY の伝達荷重~入力エネルギー関係に比較して示した. 積層繊維補強ゴムは, 繊維が破断しないエネルギー (約 2.0kN·m 以下) を作用させると総ゴムより高い伝達荷重となる. しかし, 約 2.0kN·m 以上の入力エネルギー量から積層繊維補強ゴムの埋設繊維が破断し始めると, 硬度 50 の総ゴムと比較して伝達荷重が小さくなり始める. さらに, 埋設繊維が大きく破断するエネルギー領域 (約 5.0kN·m 以上) では, 積層繊維補強ゴムは, 入力エネルギーに対する伝達荷重の増加率が小さく, 約 10.0kN·m の入力エネルギーのときには, 総ゴムに比して約 40%も荷重が小さいことが認められた.

3.2 衝撃エネルギーの吸収効果

落橋防止システム用緩衝材には, 地震によりあるエネルギーを持って移動する桁と橋台間に設置された緩衝材と

の間で衝突現象が生じた際に, その衝撃エネルギーの吸収効果が要求される.

このエネルギーの吸収効果を評価するため, 式(2)に示すように供試体への衝突前後における重錘の運動エネルギーの変化に着目した. その結果を図-12 に示す.

$$\Delta E = \{(E_1 - E_2) / E_1\} \times 100 \quad (2)$$

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 ($E_2 = (1/2) \cdot m \cdot V_2^2$).

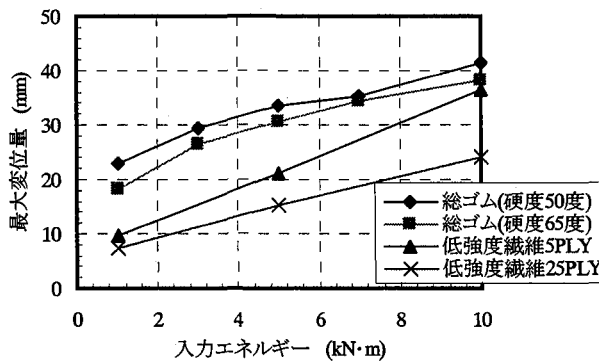
V_2 : 衝突後の重錘速度.

ここで, 衝突前後の速度は, 図-6 に一例を示した重錘変位~時間関係より求めた. 衝突前の速度 V_1 は, 重錘が供試体に衝突した時間における重錘変位とその時間から 10msec 前の重錘変位より求めた. 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変位に達した時間およびその時間から 10msec 後の重錘変位より求めた. なお, 重錘変位~時間関係は, 図-6 に示すように振動していることを考慮して, いずれの場合もその近傍で無作為にデータを 10 回抽出して速度を求めたところ, さほど大きな違いがないことを確認した.

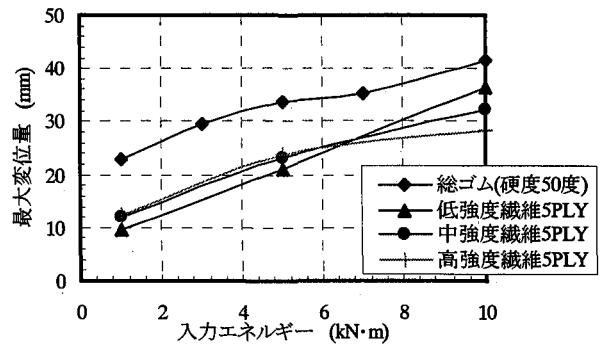
図-12 より, 総ゴムにおけるエネルギー吸収率は, 同じ入力エネルギーでも剛性が大きい硬度 65 の方が大きな値を示している. また, 入力エネルギーが大きくなるほどエネルギー吸収率は増加する傾向を示す.

一方, 積層繊維補強ゴムは, 硬度 50 の総ゴムと比較していずれの入力エネルギーに対しても高いエネルギー吸収率となり, 入力エネルギー 1.0kN·m では硬度 50 の総ゴムが約 62%であるのに対し, 中強度繊維 5PLY は約 89%と約 1.4 倍のエネルギー吸収率を示した.

ここで, 積層繊維補強ゴムのみに着目すると, 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, 繊維が大きく破断しない場合 (約 5.0kN·m 以下) と繊維が大きく破断した後 (約 5.0kN·m 以上) を比較すると,



(a) 硬度 50, 硬度 65 の総ゴムと低強度繊維の比較



(b) 硬度 50 の総ゴムと積層繊維補強ゴム 5PLY の比較

図-13 最大変位量の比較 (重錘重量 4.0kN)

繊維破断後のエネルギー吸収率の方が高い値を示す傾向にある。低強度繊維 5PLY では、繊維が破断しない入力エネルギー $1.0\text{kJ}\cdot\text{m}$ 時にエネルギー吸収率が約 86%であるのに対して、繊維が破断する入力エネルギー $5.0\text{kJ}\cdot\text{m}$ および $10.0\text{kJ}\cdot\text{m}$ ではそれぞれ約 96%および約 92%と約 6%~10%増加している。これは、ゴムのひずみによるエネルギー吸収に加え繊維の破断によるエネルギー吸収が追加されたためと考えられる。

3.3 最大変位量

積層繊維補強ゴムを落橋防止システム用緩衝材として適用する場合には、衝突時の桁の移動量を抑制することが望ましいと考えられる。これを評価するために、本実験において、各入力エネルギーを作用させた際に発生する供試体の最大変位量を求めた。その結果を図-13に示す。

図-13より、総ゴムにおいて同じ入力エネルギーでも剛性が大きい硬度 65 の方が最大変位量が小さい。

また、積層繊維補強ゴムは硬度 50 の総ゴムと比較していずれの入力エネルギーに対しても最大変位量は小さく、特に埋設繊維が破断しない入力エネルギーでは、最大で約 1/3 に低減している。しかしながら、入力エネルギーが増加するほど総ゴムと積層繊維補強ゴムの最大変位量の差は小さくなる傾向にある。これは、入力エネルギーが大きくなるにつれ繊維の破断が進行するためと考えられ、入力エネルギーを増大させれば、最終的にゴムの最大変位量とほぼ等しくなると考えられる。

また、積層繊維補強ゴムのみに着目すると、図-13(a),(b)より、繊維積層枚数および繊維強度が増加するほど剛性が大きくなるため、同じ入力エネルギーで最大変位量は小さくなる傾向を示す。

4. 静的および高速載荷実験からの最大伝達荷重の予測

4.1 落錘式衝撃実験における最大伝達荷重の予測

落橋防止システム用緩衝材には、桁の移動に伴う衝撃的なエネルギーが作用すると考えられ、そのエネルギーが緩衝材に作用した際に、落橋防止構造に作用する荷重を予測

することが重要である。窪田⁸⁾は、種々の緩衝材の背面に伝達される荷重の推定を緩衝材の静的載荷実験結果より行っており、その結果として、総ゴムなどの荷重~変位関係が 2 次関数的に増加する材料では、入力された運動エネルギー量が、静的載荷実験におけるエネルギー吸収量に等しいとして、伝達荷重を推定可能であることを提案した。しかし、完全弾塑性的な挙動を示す材料に関しては、その推定が困難であるとしている。

そこで、本実験においては、静的および高速載荷実験による吸収エネルギー量 (静的および高速載荷実験結果における荷重~変位曲線で囲まれる面積) と入力エネルギーとを等しいと置いて、落錘式衝撃実験における最大伝達荷重の予測を試みた。

ここで、落錘式衝撃実験における最大伝達荷重の予測値は、図-3 および図-5 に示す静的および高速載荷実験結果から、まず、吸収エネルギー量~変位関係において、落錘式衝撃実験での入力エネルギーと吸収エネルギーを等しいと置いて変位を求め、次に図-2 および図-4 の荷重~変位関係からそのときの変位に相当な荷重を求めるものである。よって、入力エネルギーに達する変位までに荷重の最大値が存在した場合 (例えば、図-2(b)および図-4(b)の低強度繊維 25PLY のような場合) は、その荷重を予測値とした。

図-14 に落錘式衝撃実験で測定した最大伝達荷重 (図中の○と△印) と静的および高速載荷実験 (載荷速度 1.0m/s) 結果から求めた予測値を比較して示す。

なお、総ゴムの場合は静的および高速載荷実験において、荷重~変位関係が約 $3.0\sim 4.0\text{kJ}\cdot\text{m}$ までの吸収エネルギー量しか得られなかったため、荷重~変位関係において、荷重が急激に上昇するハードニング領域を 2 次曲線で外挿することにより表現した。よって、図-14(a)および(b)において、入力エネルギー約 $3.0\text{kJ}\cdot\text{m}$ 以降は破線で示すような予測値となった。

4.2 予測結果と考察

図-14(a)~(c)および(e),(f)より、総ゴムおよび積層繊維補強ゴムの繊維積層枚数 5PLY 供試体では、静的限界エネルギー吸収量の範囲で、予測値と落錘式衝撃実験による実

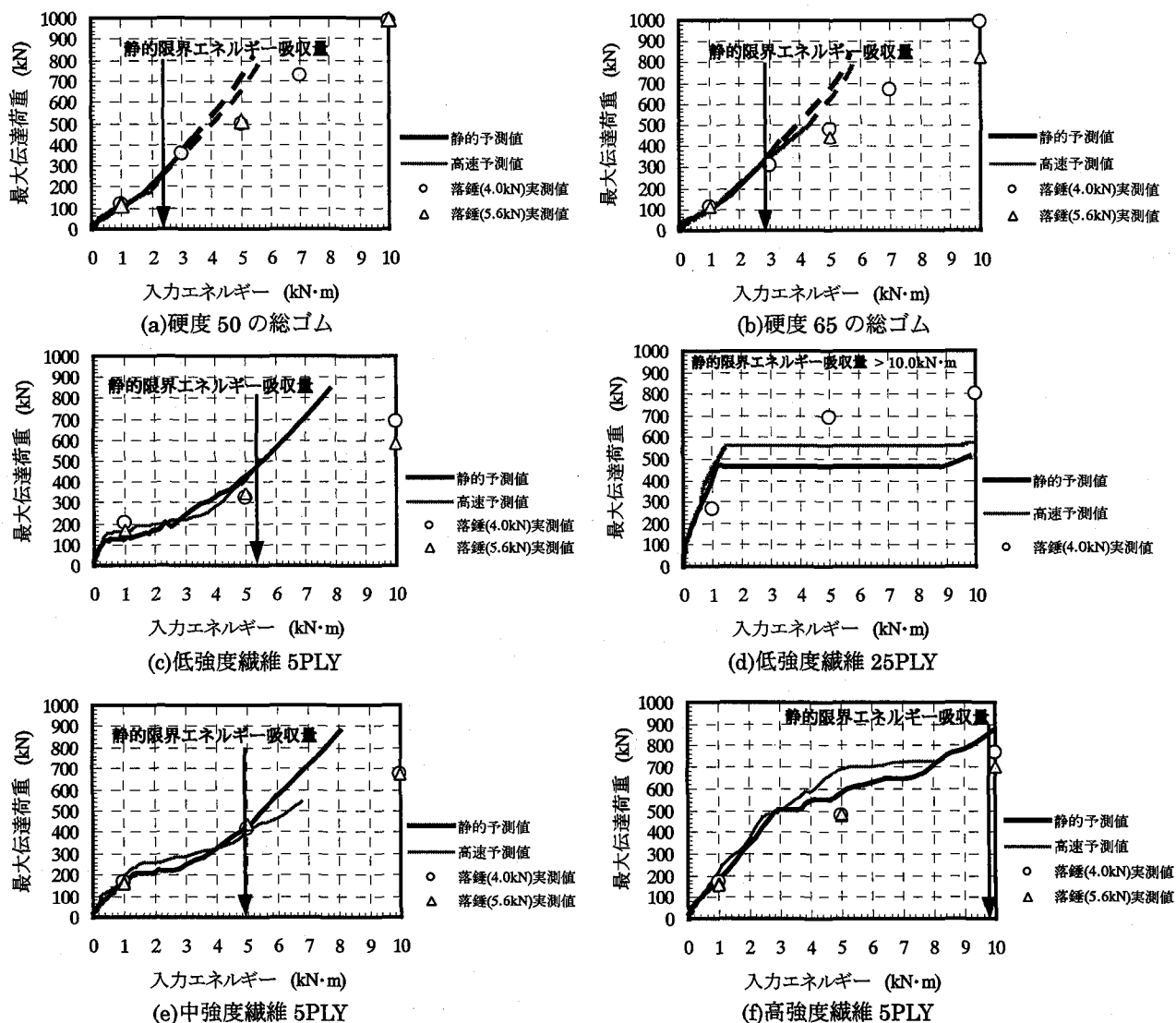


図-14 落錘式衝撃実験における最大伝達荷重と静的および高速荷重実験による予測値との比較

測値はよく一致する。しかし、それ以上の入力エネルギーでは、予測値よりも落錘式衝撃実験による実測値の方が低い値となる。

すなわち、落錘式衝撃実験における最大伝達荷重を静的限界エネルギー吸収量までの範囲で予測可能であることがわかった。その理由としては、落錘式衝撃実験における衝突後の重錘速度が 0 となったとき、つまり、供試体の最大変位量に達した時点までに得られた吸収エネルギー量と重錘の運動エネルギーとがほぼ等しくなることに起因すると考えられる。例えば、低強度繊維 5PLY の場合では、入力エネルギー 1.0, 5.0, 10.0 kJ·m を作用させたとき、図-7 より、最大変位量に達したときの吸収エネルギー量は 0.93, 4.3, 9.8 kJ·m となり、供試体はそのエネルギーを一旦は完全に吸収するように変形できることがわかる。

しかし、静的限界エネルギー吸収量を超える入力エネルギーの場合は、静的および高速荷重実験より求めた予測値と落錘式衝撃実験における実測値が一致しない。その理由は、荷重が急激に増加する領域（ハードニング領域）となり、過剰なエネルギーが入力されたためと推測される。よ

って、総ゴムおよび積層繊維補強ゴムの繊維積層枚数 5PLY 供試体の最大伝達荷重は、静的荷重実験および高速荷重実験において静的限界エネルギー吸収量までの範囲、つまりハードニングが生じるまでのエネルギー量までが予測可能な範囲と考えられる。

次に、低強度繊維 25PLY では図-14(d)より落錘式衝撃実験における最大伝達荷重は、埋設繊維が破断しない入力エネルギー 1.0 kJ·m のとき予測値と比較して約 30% 下回っている。さらに、5.0 kJ·m および 10.0 kJ·m では、静的限界エネルギー吸収量以下であるにもかかわらず、落錘式衝撃実験による最大伝達荷重の方が予測値より約 1.2~1.4 倍大きくなる傾向を示す。この理由として、低強度繊維 25PLY は図-2(b)および図-4(b)に示すように、繊維積層枚数 5PLY 供試体と異なり、明確な初期降伏点が存在し、総ゴムの挙動とは大きく異なる完全弾塑性の挙動を示すためと考えられ、このことは、窪田らの研究⁸⁾と一致する。しかし、初期降伏点およびそれ以降において、高速荷重実験から求めた予測値の方が静的荷重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。さらに、

25PLY の場合は繊維の積層枚数の増加による剛性の向上および繊維の混入割合が5PLY(ゴム1に対して繊維0.07)と比較して繊維が増加(ゴム1に対して繊維0.67)することにより、繊維とゴムの複合効果が増大することなどが影響しているとも考えられ、今後検討すべき課題である。

以上のことから、衝撃実験における緩衝材背面に作用する最大伝達荷重は、窪田らの研究⁸⁾と同じく、総ゴム供試体では静的載荷実験結果からの予測が可能であるが、その予測が可能な範囲は、ハードニングが生じるまでの領域であることがわかった。また、積層繊維補強ゴム供試体でも繊維積層枚数 5PLY 程度で、図-2(b)および図-4(b)に示すように、初期降伏点に達した後も変位の増加に伴い荷重も増加するような、比較的総ゴムに近い弾塑性的挙動を示す場合は、総ゴムと同じく静的および高速載荷実験結果からの予測が可能であるということがわかった。

5. 結論

本研究は、積層繊維補強ゴムを落橋防止システム用緩衝材に適用するための基礎的研究として、落錘式衝撃実験を実施し、緩衝材に要求される機能である荷重低減効果、重錘衝突時のエネルギー吸収率および最大変位量について考察した。また、落錘式衝撃実験における衝突時の緩衝材背面での伝達荷重について、静的および高速載荷実験からの予測を試みた。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)落錘式衝撃実験により、積層繊維補強ゴムは総ゴムと比較して高剛性であるため、埋設繊維が破断しない小さな入力エネルギーのときには、最大約 2.2 倍の伝達荷重となり、荷重低減効果は期待できない。
- (2)しかし、繊維の破断が生じる大きな入力エネルギーを与えると荷重低減係数が 1.0 より小さくなり、総ゴム構造と比べて最大で約 40%伝達荷重が低減する。
- (3)積層繊維補強ゴムは、初期降伏点までの荷重低減効果を犠牲にしても、埋設繊維が破断する入力エネルギー領域では、総ゴムよりも伝達荷重の増加率が小さく、荷重低減効果も大きいので、全体としては有用な緩衝材といえる。
- (4)重錘重量を変化させた場合、総ゴムおよび積層繊維補強ゴムに対して、同じ入力エネルギーを作用した際の最大伝達荷重はあまり変わらない。したがって、本実験の範囲内では、最大伝達荷重は、重錘重量ではなく入力エネルギー量に大きく影響を受けると推測される。
- (5)積層繊維補強ゴムは、特に埋設繊維が破断した際には、作用したエネルギーの吸収効果が大きいことが確認された。
- (6)積層繊維補強ゴムは、一般に、総ゴムと比較して、変形量を抑制することができる。特に、埋設繊維が破断するまではその傾向が顕著である。
- (7)総ゴムおよび積層繊維補強ゴムの繊維積層枚数 5PLY 程

度の場合、静的限界変位量までの入力エネルギーの範囲(ハードニングに入る前の領域)で、静的載荷実験から伝達荷重の予測が可能である。

なお、積層繊維補強ゴム緩衝材を実際の落橋防止システムに適用するにおいて、橋梁の規模や条件に応じた積層繊維補強ゴムの諸元(断面寸法、繊維の積層枚数、繊維強度など)の決定方法についての検討が今後の課題である。

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システム工学群建設環境工学科 大野友則教授、香月智助教授、各実験にご協力いただきました別府万寿博助手、政枝憲太郎研究科学生、竹本憲介研究科学生、および、供試体の製作にご協力いただきましたシバタ工業株式会社 小谷美和研究員ほか、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) 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) 西川和廣、神田昌幸：道路橋の支承部構造および落橋防止システムの今後の動向、橋梁と基礎、pp.163-167, 1996.8.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、1996.
- 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、第 27 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集、pp.100-101, 2000.3.
- 5) 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.
- 6) 西本安志、梶田幸秀、石川信隆、小谷美和、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速度依存性に関する実験的研究(1)、日本ゴム協会 2000 年年次大会研究発表講演会講演要旨、pp.8, 2000.5.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 例えば、越峠雅博、運上茂樹、足立幸郎、長屋和宏：落橋防止構造における緩衝材の効果に関する検討、第 2 回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.423-426, 1998.

(2000 年 9 月 14 日受付)