

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

AN EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC PROPERTIES 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)

Many bridges were severely damaged by the 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 was occurred. To this end, the shock absorber for seismic device system has been studied so far by many researchers. In this study, the static compression test and high speed loading test were carried out in order to examine the shock absorber of the laminated fiber reinforced rubber as a seismic device system. The following results are obtained from this study: 1) Static and dynamic properties of laminated fiber reinforced rubber depends on properties of rubber and fiber ply. 2) The rate effect of laminated fiber reinforced rubber is less than the rate effect of rubber only. 3) It is found that laminated fiber reinforced rubber will be applied to shock absorber for seismic device system.

Key Words: shock absorber, laminated fiber reinforced rubber, high speed loading test, rate effect

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、桁が杓座から逸脱し、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ている。兵庫県南部地震のような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るため、落橋防止装置の衝撃力に対する高機能化や高性能化の必要性が提唱されるようになってきた。

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ている。さらに、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。例えば、衝撃的に作用する地震力を緩和す

る落橋防止システムとしては、チェーンリンク間にゴムを充填したラバーチェーン³⁾や、桁間連結板のピン部に繊維補強ゴムを巻き付けたもの^{4), 5)}など、数多くの研究がなされている。その他にも、落橋防止壁 (鋼製およびコンクリートストッパー) 用の緩衝材に関する研究事例^{6), 7)}などがある。

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。静的圧縮試験から得られた変位～荷重曲線において、圧縮初期にある程度荷重が立ち上がり、その後荷重がほぼ一定の状態に変位のみ増加する傾向を示す材料がエネルギー吸収効果の観点から見ると優れた材料であるという研究報告⁸⁾・

⁹⁾もある。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、本研究では、ゴムに繊維を埋め込むことにより剛性

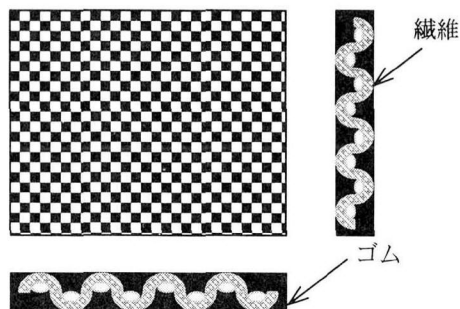


図-1 繊維補強ゴム(FRR)の構造

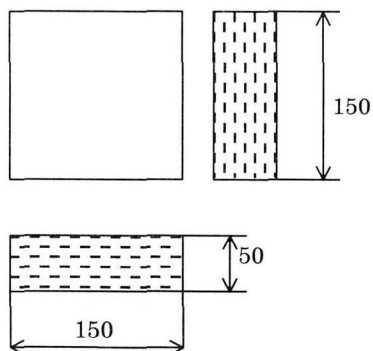


図-3 供試体の形状

と強度を向上させた繊維補強ゴムに着目した。

繊維補強されたゴムは、図-1 に示すように化学繊維材の両面にゴムを圧着させたものであり、一般に FRR(Fiber Reinforced Rubber)と呼ばれている。この FRR をここでは、繊維補強ゴムシートとよぶことにする。この繊維補強ゴムシートを図-2 に示すように、積層一体化したものが PRF 構造(Poly Rubber Fiber 構造)とよばれ、通常、積層繊維補強ゴムというこのことを指す。

積層繊維補強ゴムは、繊維の補強効果によって高い剛性を示し、また、埋設される繊維が逐次破断することにより、高いエネルギー吸収性能を有する他、埋設された繊維の初期破断点が初期降伏点となり、降伏点の明確化が可能であるという特徴を有することが確認されている¹⁰⁾。積層繊維補強ゴムに関してのこれまでの研究^{11), 12), 13)}では、積層繊維補強ゴム自身の物性値については着目されておらず、緩衝効果に関する研究が主体であった。

そこで本研究は、積層繊維補強ゴム(PRF 構造)の力学特性を調べるための基礎的研究として、静的載荷試験および高速載荷試験を実施し、繊維の強度や積層枚数による初期剛性、初期降伏点、エネルギー吸収性能に及ぼす影響を調べ、また各物性値の速度効果について考察することを研究の目的とした。

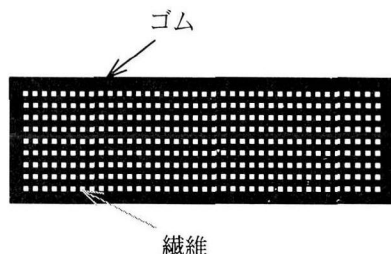


図-2 積層繊維補強ゴム：PRF(Poly Rubber Fiber)構造

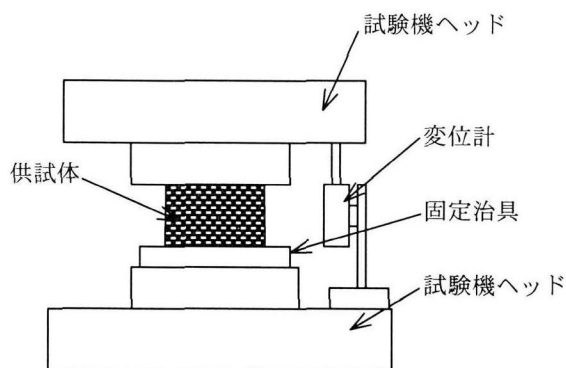


図-4 静的載荷試験の概要

表-1 ゴムおよび繊維の材料諸元

	繊維			ゴム
	高強度	中強度	低強度	
材質	ナイロン	6,6-ナイロン	ビニロン	天然ゴム(NR)系
引張強度	1764(N/cm)	882(N/cm)	588(N/cm)	10.2(MPa)
破断時の伸び(%)	40	25	20	600

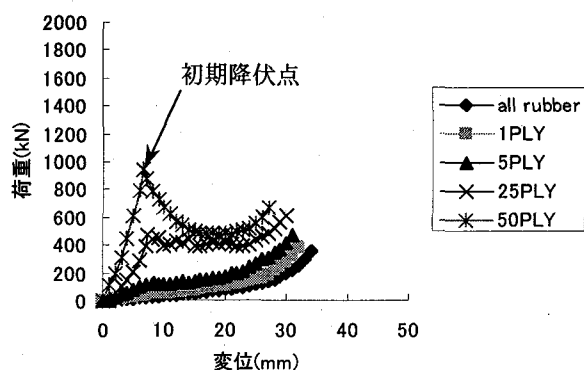
2. 静的載荷試験

2.1 供試体の種類

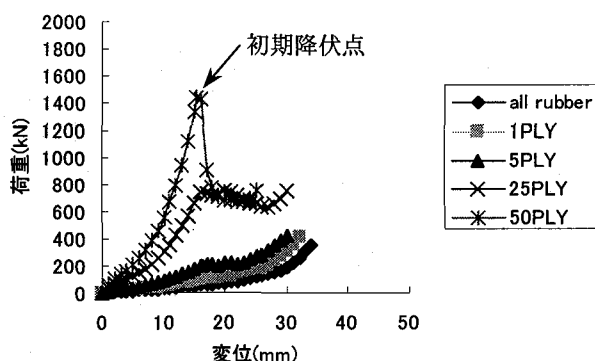
静的載荷試験に使用した供試体の形状を図-3 に示す。供試体形状は、積層繊維補強ゴムの基本的な力学特性を把握するために直方体形状とした。

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。

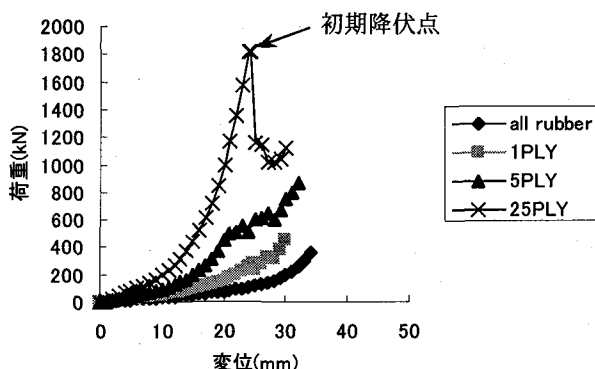
なお、積層繊維補強ゴムの諸元には選択の余地が大きく、ゴムと繊維のどちらを重要視するかで大きく左右される。ここでは、ゴムと比較して強度の大きい繊維の強度をパラメータとして検討する。また、ゴムと繊維の接着には繊維の化学的処理などが必要であり、接着性能は本試験結果に大きな影響を与えられことから、使用実績が多く、ゴムと繊維の接着技術が確立されている破断強度の異なる3種の汎用繊維を選定した。本試験に選定した繊維は、



(a)低強度繊維



(b) 中強度繊維



(c) 高強度繊維

図-5 静的載荷試験における荷重～変位関係

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、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。つまり、破断強度の異なる3種の繊維により、積層繊維補強ゴムの繊維の材料特性による影響および繊維積層枚数(PLY)による影響を把握しようとしたものである。

2.2 試験概要および試験ケース

試験概要を図-4に示す。本試験には、300kN型アムスラー万能試験機（株式会社島津製作所製）および5000kN圧縮

表-2 静的載荷試験ケース

供試体	諸元	形状
① R	総ゴム構造	□150× 50H(mm) (図-3)
② LMF1	低強度繊維 1PLY ^{*1}	
③ LMF5	低強度繊維 5PLY	
④ LMF25	低強度繊維 25PLY	
⑤ LMF50	低強度繊維 50PLY	
⑥ MMF1	中強度繊維 1PLY	
⑦ MMF5	中強度繊維 5PLY	
⑧ MMF25	中強度繊維 25PLY	
⑨ MMF50	中強度繊維 50PLY	
⑩ HMF1	高強度繊維 1PLY	
⑪ HMF5	高強度繊維 5PLY	
⑫ HMF25	高強度繊維 25PLY	

^{*1}PLY：繊維積層枚数を示す。

表-3 積層繊維補強ゴムの初期降伏点および初期バネ特性

繊維強度	繊維積層枚数 (PLY)	初期降伏荷重 (kN)	初期降伏変位 (mm)	初期バネ特性 (kN/mm)
低強度	1	61.9	10.7	5.8
	5	129.4	8.3	15.6
	25	466.5	7.4	63.0
	50	936.9	6.6	142.0
中強度	1	109.8	17.5	6.3
	5	202.9	16.2	12.5
	25	744.3	16.0	46.5
	50	1436.7	15.3	93.9
高強度	1	279.3	24.8	11.3
	5	502.7	20.8	24.2
	25	1819.9	24.1	75.5

試験機（株式会社島津製作所製）を使用し、圧縮速度を5mm/minにて実施した。

初期降伏荷重（埋設繊維の初期破断荷重）が300kN未満の供試体については前者を使用し、それ以上の供試体については後者を使用した。

また、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、荷重の載荷を終了することとした¹⁴⁾。

測定項目は、載荷点荷重、載荷点変位である。また、実験ケースを表-2に示す。

2.3 試験結果と考察

静的載荷試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最初に破断することにより、荷重～変位関係において、剛性が急激に変化する点を初期降伏点と定義した。すなわち、そのときの荷重、変位をそれぞれ初期降伏荷重、初期降伏変位と定義し、図-5(a),(b),(c)に示す点を初期降伏点とした。

図-5(a),(b),(c)は、低強度、中強度、高強度繊維の静的載荷試験より得られた荷重～変位関係を示したものである。また、表-3は、初期降伏荷重、初期降伏変位、初期バネ特性（初期降伏荷重を初期降伏変位で除した値）を

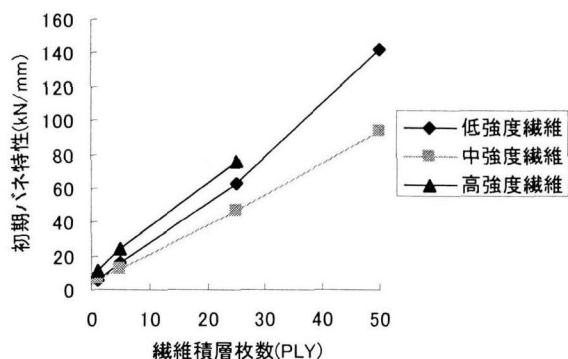


図-6 初期バネ特性と繊維積層枚数との関係

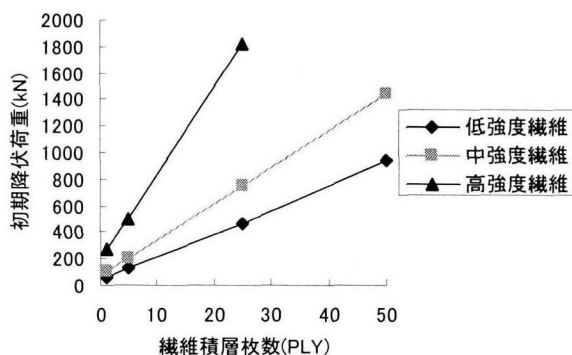


図-7 初期降伏荷重と繊維積層枚数との関係

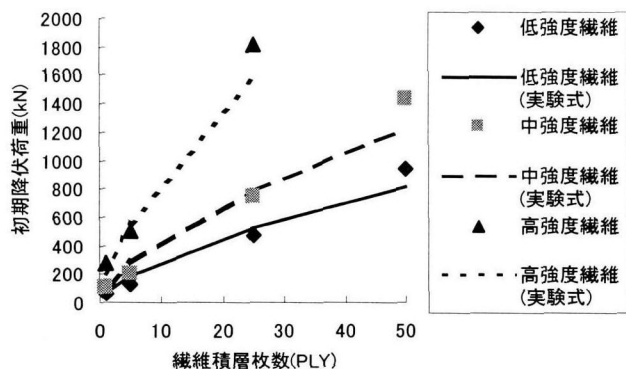


図-8 初期降伏荷重の実験値と
実験式より得られた値との比較

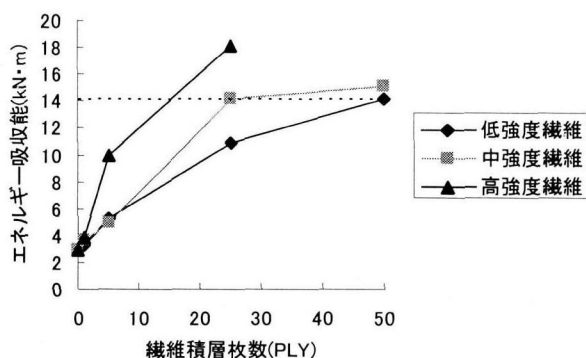


図-9 限界変位量までのエネルギー吸収能
と繊維積層枚数との関係

表-4 初期降伏荷重の実験式に導入したパラメータ値

供試体		初期降伏荷重 P_{max} (kN)	実験係数 α (cm^2/N)	形状率 S	繊維積層枚数 N (PLY)	繊維破断強度 F_{br} (N/cm)	ゴムの破断強度 R_{br} (N/cm ²)	有効幅 L (cm)	
低強度	1	64.8	1.000×10^{-2}	0.75 $A_L=225$ (cm^2) $A_R=300$ (cm^2)	1	588	980	15	
	5	183.8	0.567×10^{-2}		5				
	25	520.2	0.321×10^{-2}		25				
	50	813.6	0.251×10^{-2}		50				
中強度	1	97.2	1.000×10^{-2}		1	882			1764
	5	275.7	0.567×10^{-2}		5				
	25	780.4	0.321×10^{-2}		25				
	50	1220.4	0.251×10^{-2}		50				
高強度	1	194.5	1.000×10^{-2}		1	1764			
	5	551.4	0.567×10^{-2}		5				
	25	1560.7	0.321×10^{-2}		25				

示したものである。図-5 および表-3 より、繊維の強度が増加するに伴い、当然ながら、積層繊維補強ゴムの強度（初期降伏荷重）も増加しており、特に高強度繊維の場合は繊維積層枚数 25PLY で約 1800kN にも達し、しかも初期降伏変位も約 25mm と大きく、他の繊維強度よりも荷重～変位挙動が優れていることがわかる。

また、繊維積層枚数(PLY)の違いによる荷重～変位関係については、枚数が多いほど強度が増加しているが繊維破断後、急激に荷重が低下する。しかし、例えば中強度繊維の場合、50PLY と 25PLY では、繊維破断後の荷重はほぼ

一定値となっている。すなわち、ある繊維積層枚数以上多くすると、埋設繊維の破断後の荷重は、一定値に落ち着くと考えられる。その理由は、未だ切断されていない繊維が残るためと考えられるが、詳細については、今後さらに検討する予定である。

(1)初期バネ特性に及ぼす繊維の影響

初期降伏点までの積層繊維補強ゴムの初期バネ特性を図-6 に示す。

図-6 より、繊維の積層枚数の増加に伴い初期バネ特性

は上昇する傾向を示した。これは、繊維とゴムが積層一体化した積層繊維補強ゴムにおいては、埋設された繊維によってゴムの横ひずみが拘束されるためである。ここで注目すべき結果は、低強度繊維の方が中強度繊維よりも初期バネ特性が大きいことである。初期バネ特性は、繊維強度ならびに繊維自身の破断時の伸び量に依存している。本試験で用いた繊維は接着技術の確立したものであるため、表-1に示すとおり強度が変化すると同時に破断時の伸びも変化している。本試験結果において、低強度繊維の方が初期バネ特性が大きくなったのは、低強度繊維の初期降伏変位が中強度繊維のそれより、約 1/2 も小さくなったためである。つまり、初期バネ特性は、繊維強度と繊維の破断時の伸び量の 2 つのパラメーターの相互作用が影響しているが、もし、繊維の破断時の伸び（初期降伏変位）を等しくし、繊維強度のみを変化させた場合は、バネ特性は繊維強度のみに依存し、繊維強度が大きくなれば、初期バネ特性も大きくなると考えられる。

以上のことから、繊維の積層枚数および繊維強度により初期降伏点までのバネ特性が変化するため、繊維の積層枚数および繊維強度を適宜選択することにより、所望の初期バネ特性を得ることも可能であると考えられる。

(2)初期降伏荷重に及ぼす繊維の影響

表-3 でまとめた各繊維強度における初期降伏荷重と繊維積層枚数の関係を図-7 に示す。繊維強度および繊維積層枚数の増加に伴い、初期降伏荷重は上昇する傾向を示す。特に、繊維強度と繊維積層枚数の間には比例的関係があり、その勾配が高強度になるほど大きくなる。ここで、初期降伏荷重には、形状率、繊維積層枚数、繊維破断強度、ゴムの破断強度、供試体の有効幅が大きく関係していると考えられる。ここで供試体の有効幅とは、直方体形状においては圧縮面の幅、すなわち、圧縮面の正方形の一辺の長さである。また、形状率とは、受圧面積（断面積）を自由表面積（受圧面積以外の側面積）で除したものである。

以上の因子を考慮して、本実験における実験式を式(1)のように仮定し、各パラメータを代入し、実験係数 α を式(2)に示すように求めた。

$$P_{\max} = \alpha \times S \times N \times F_{br} \times R_{br} \times L \quad (1)$$

$$\alpha = 0.01 \times N^{-0.3529} \quad (2)$$

ただし、

$P_{\max}$: 初期降伏荷重(N)

α : 実験係数(cm^2/N)

S : 形状率 ($= A_L / A_R$)

N : 繊維積層枚数

F_{br} : 繊維破断強度(N/cm)

R_{br} : ゴムの破断強度(N/cm²)

L : 有効幅(cm)

A_L : 受圧面積（断面積）(cm²)

A_R : 自由表面積(cm²)

上式に基づき得られた初期降伏荷重を実験値と比較すると図-8 に示ようになる。ここで、式(1),(2)で用いた値を表-4 に示す。図-8 より、実験式による値と実験値はほぼ一致しており、式(1)による積層繊維補強ゴムの初期降伏荷重の算定が本実験の範囲内で可能である。

以上のことから、初期降伏荷重は、繊維積層枚数、繊維強度により変化するため、任意の初期降伏荷重を得ることが可能であると考えられる。

しかし今後さらに、解析的なアプローチにより、破壊メカニズムを考慮した詳細な検討が必要であると考えられる。

(3)エネルギー吸収能に及ぼす繊維の影響

図-9 に限界変位量までのエネルギー吸収能と各繊維強度と積層枚数の関係を示す。繊維強度および繊維積層枚数の増加に伴い、エネルギー吸収能は上昇する傾向にあり、特に高強度繊維の場合は 25PLY で約 18kN・m と最大のエネルギー吸収能を示していることが注目される。

また図-9 より、低強度繊維 50PLY でのエネルギー吸収能は約 14kN・m であり、中強度繊維は 25PLY で同じく約 14kN・m のエネルギー吸収能を示す。一方、この約 14kN・m のエネルギー吸収能を得るには、図-9 より高強度繊維では約 15PLY の繊維積層枚数で得ることが可能であると推測される。

よって、エネルギー吸収能は、繊維強度の異なる繊維を使用しても繊維の積層枚数を適宜選択することにより、同等のエネルギー吸収能を得ることが可能であると考えられる。

3. 高速載荷試験

3.1 供試体の種類

高速載荷試験に使用した供試体形状は、図-3 に示す形状とし、材料諸元についても表-1 に示す静的載荷試験と同じとした。また、試験機の性能上静的載荷試験において、初期降伏荷重が約 600kN 以下の供試体で、繊維の積層枚数に対して変化を持たせることが可能な低強度繊維タイプを中心に実施した。その他の繊維材料については、比較として、中強度繊維および高強度繊維で繊維積層枚数 5PLY について実施した。

3.2 試験概要

試験概要を図-10 に示す。本試験には、1000kN 中速度高圧載荷装置（最大載荷速度 3m/s）を使用し、載荷速度を 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。ここで、供試体に載荷する変位は、ゴム材料の特性から、ある変位に達すると荷重が急激に上昇すること、試験機の性能および速度効果により発生荷重が上昇することを考慮して、静的載荷試験における載荷点荷重が約 600kN に達する変位、もしくは、概ね 25mm と

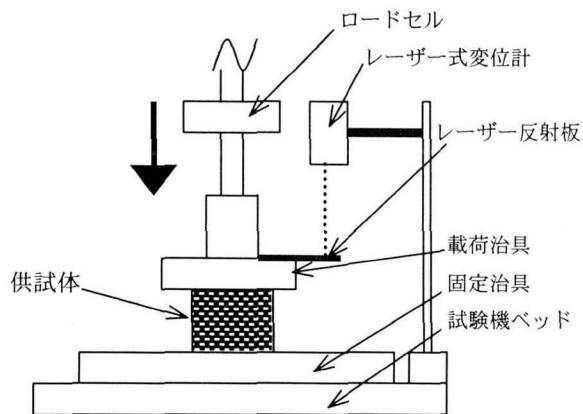
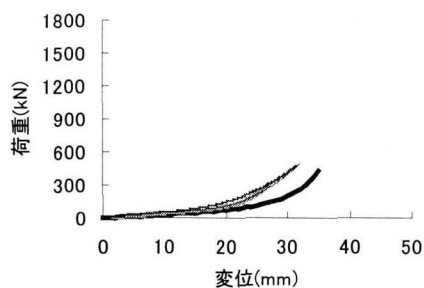


図-10 高速载荷実験の概要

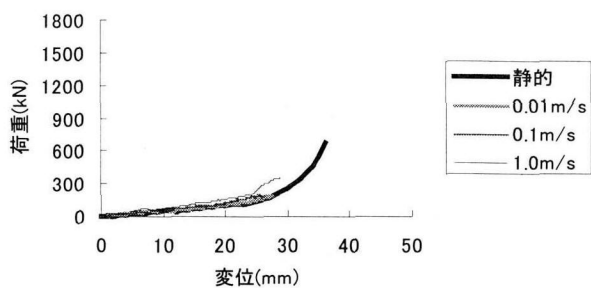
表-5 高速载荷試験ケースおよび試験条件

供試体	諸 元	形 状	試験条件	
			载荷速度 (m/s)	载荷変位 (mm)
① R	総ゴム構造	□150 ×50H (mm) (図-3)	0.01, 0.1, 1.0	30
② LMF1	低強度繊維 1PLY ^{*1}			30
③ LMF5	低強度繊維 5PLY			30
④ LMF25	低強度繊維 25PLY			25
⑤ MMF5	中強度繊維 5PLY			30
⑥ HMF5	高強度繊維 5PLY			25

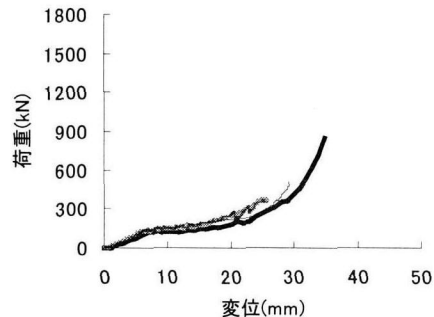
^{*1}PLY：繊維積層枚数を示す。



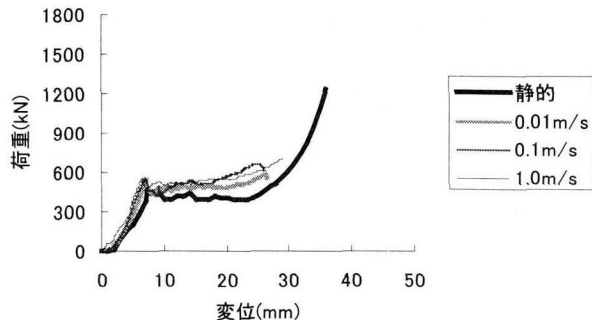
(a)総ゴム構造



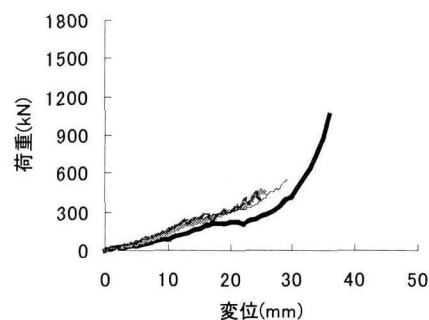
(b)低強度繊維 1PLY



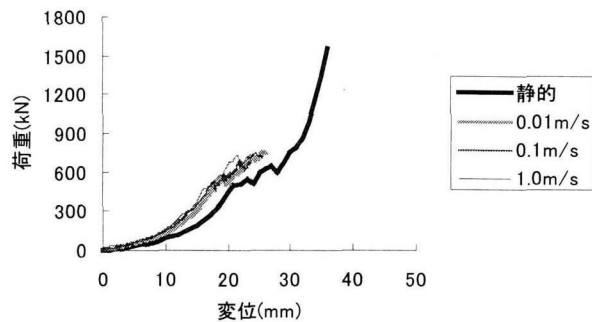
(c)低強度繊維 5PLY



(d)低強度繊維 25PLY



(e)中強度繊維 5PLY



(f)高強度繊維 5PLY

図-11 载荷速度による荷重～変位関係の比較

表-6 載荷速度と初期降伏点および初期バネ特性
(低強度繊維)

載荷速度 (m/s)	繊維積層 枚数 (PLY)	初期降伏 荷重(kN)	初期降伏 変位(mm)	初期バネ特性 (kN/mm)
静的	1	61.9	10.7	5.8
	5	129.4	8.3	15.6
	25	466.5	7.4	63.0
0.01	1	61.7	11.0	5.6
	5	138.8	6.1	22.8
	25	550.3	7.2	76.4
0.1	1	62.7	9.7	6.5
	5	141.6	6.5	21.8
	25	570.0	7.1	80.3
1.0	1	68.4	7.1	9.6
	5	161.3	6.9	23.4
	25	576.6	7.3	79.0

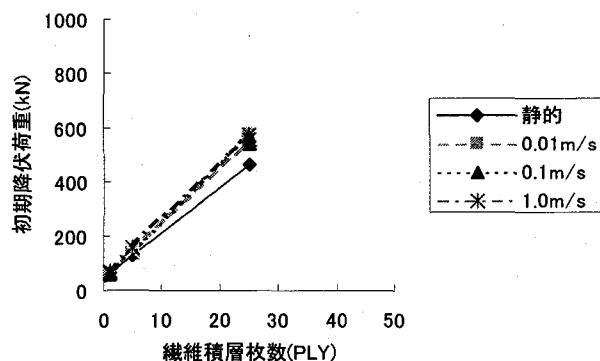


図-13 初期降伏荷重～繊維積層枚数関係
に与える載荷速度の関係 (低強度繊維)

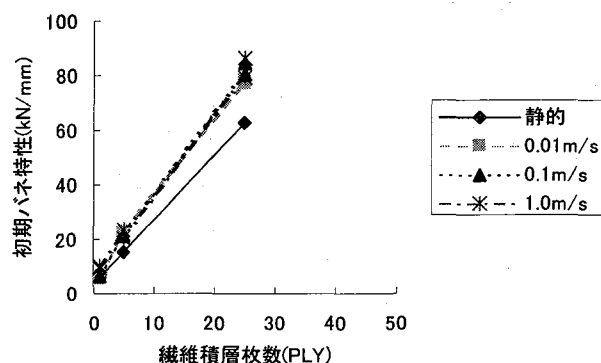


図-12 初期バネ特性～繊維積層枚数関係
に与える載荷速度の影響 (低強度繊維)

れる。図-11(b),(c),(d),(e),(f)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、静的載荷時の荷重～変位関係と比較して変化は少ないが、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、高速載荷試験における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。

した。

試験ケースおよび試験条件を表-5 に示す。

高速変形時の鋼材およびコンクリート材料には、ひずみ速度効果があることはよく知られており¹⁵⁾、ゴムなどの弾性材料についても同じくひずみ速度効果が認められると推測される。しかし、一般にゴム材料は、同じ材料でも供試体の寸法が違えば、応力～ひずみ曲線は一定しないことが知られており、力学特性については荷重～変位関係によりまとめられているため、ひずみ速度効果(ひずみ速度による応力の変化)ではなく、載荷速度による荷重の変化を評価することとした。

3.3 試験結果と考察

(1) 荷重～変位関係に与える載荷速度の影響

図-11 は、高速載荷試験より得られた荷重～変位関係を静的載荷試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。また、表-6 は、低強度繊維の各載荷速度における初期降伏荷重、初期降伏変位、初期バネ特性を示したものである。図-11(a)の総ゴム構造では、他の積層繊維補強ゴム(図-11(c)～(f))に比し、強度が極めて小さく最大でも約 450kN である。しかし、図-11(b)の低強度繊維 1PLY は、高速になると総ゴムよりも小さい強度となっていることが目さ

(2) 初期バネ特性に与える載荷速度の影響

図-12 に低強度繊維 1, 5, 25ply の初期バネ特性に関する載荷速度の影響を示す。図-12 より、静的載荷試験の結果と同じく高速載荷試験においても繊維の積層枚数の増加に伴い初期バネ特性は上昇する傾向を示した。

載荷速度の影響として低強度繊維 1PLY の場合、静的載荷における初期バネ定数は約 5.8kN/mm であり、載荷速度 1.0m/s では約 10kN/mm で約 1.7 倍となった。同じく低強度繊維 5PLY の場合、静的載荷時約 15.6kN/mm、載荷速度 1.0m/s 時約 23kN/mm であり約 1.5 倍となり、低強度繊維 25PLY の場合、静的載荷時約 63.0kN/mm、載荷速度 1.0m/s 時約 80kN/mm であり約 1.3 倍となった。繊維積層枚数が増加するにつれ初期バネ定数の載荷速度による影響が減少していることがわかる。この初期バネ特性の変化は、繊維の積層枚数の増加により、供試体中の繊維の割合が増加しゴムの割合が低下しているため、速度効果による繊維の強度増加はゴムの強度増加より小さいといえる。

よって、積層繊維補強ゴムの初期バネ特性は、載荷速度の影響により、約 1.3～1.7 倍大きくなることが認められる。

(3) 初期降伏荷重に与える載荷速度の影響

図-13 に低強度繊維 1, 5, 25ply の初期降伏荷重に関する載荷速度の影響を示す。静的載荷試験結果と同じくい

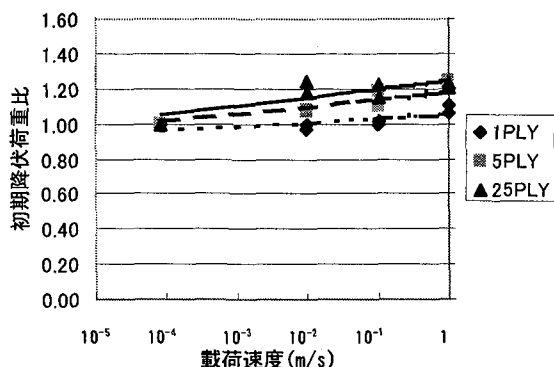


図-14 初期降伏荷重比～载荷速度関係に与える
繊維積層枚数の影響（低強度繊維の場合）

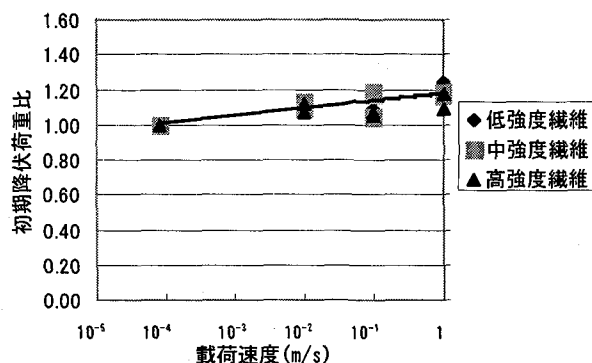


図-15 初期降伏荷重比～载荷速度関係に与える
繊維強度の影響（繊維積層枚数 5PLY の場合）

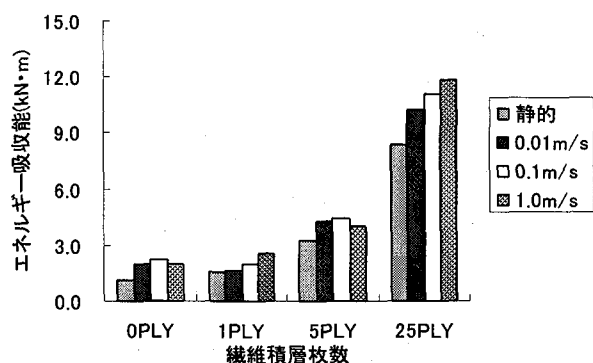


図-16 エネルギー吸収能～繊維積層枚数関係に与える
载荷速度の影響（総ゴム構造および低強度繊維）

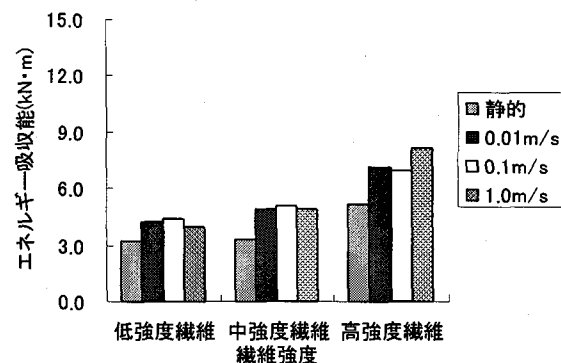


図-17 エネルギー吸収能～繊維強度関係に与える
载荷速度の影響（繊維積層枚数 5PLY の場合）

れの载荷速度においても、繊維積層枚数の増加に伴い、初期降伏荷重は上昇する傾向を示した。载荷速度の影響として低強度繊維 1PLY の場合、静的载荷における初期降伏荷重は約 62kN であり、载荷速度 1.0m/s では約 68kN で約 1.1 倍となった。同じく低強度繊維 5PLY の場合、静的载荷時約 130kN、载荷速度 1.0m/s 時約 160kN であり約 1.23 倍となり、低強度繊維 25PLY の場合、静的载荷時約 470kN、载荷速度 1.0m/s 時約 580kN であり約 1.23 倍となった。

また、図-14 に低強度繊維 1, 5, 25PLY における初期降伏荷重比と载荷速度の関係を示す。ここでは、いずれの繊維積層枚数においても静的载荷試験における初期降伏荷重を 1 と比較した。図-14 より、载荷速度による初期降伏荷重の増加傾向は、繊維の積層枚数が増加するほど大きくなる傾向にある。

さらに、図-15 に繊維積層枚数 5PLY における载荷速度と初期降伏荷重比の関係を示す。ここでも、いずれの繊維強度においても静的载荷試験における初期降伏荷重を 1 と比較した。図-15 より、载荷速度に関する初期降伏荷重比の増加傾向は同じ積層枚数、すなわちゴムと繊維の比率が同じであれば、中強度繊維および高強度繊維においてもほぼ等しい値となる。つまり、このことは、载荷速度の

違いによる積層繊維補強ゴムの初期降伏荷重の増加率は、埋設された繊維の強度に依存しないと考えられる。

载荷速度による初期降伏荷重の増加は、図-14 および図-15 より、静的载荷時と比較して载荷速度 1m/s 時では約 1.2 倍に増加していることがわかる。よって、積層繊維補強ゴムの初期降伏荷重は、载荷速度の影響により、約 1.2 倍増加することが認められた。

(4)エネルギー吸収能に与える载荷速度の影響

ここでは、積層繊維補強ゴムの埋設繊維が破断することを前提とした落橋防止システムに適用した場合を想定して、初期降伏点以降を考慮したエネルギー吸収能を求めて評価した。初期降伏点以降の変位については、高速载荷試験機の性能上いずれの供試体においても载荷変位が約 25 ～ 30mm 程度であったため、25mm 変位量までのエネルギー吸収能で評価した。図-16 に総ゴム構造および低強度繊維 1, 5, 25PLY の载荷速度とエネルギー吸収能の関係を示す。また、図-17 に繊維積層枚数 5PLY における各繊維強度のエネルギー吸収能と载荷速度の関係を示す。静的载荷と同じく繊維積層枚数の増加および繊維強度の増加に伴い、エネルギー吸収能は上昇する傾向にある。また、载荷

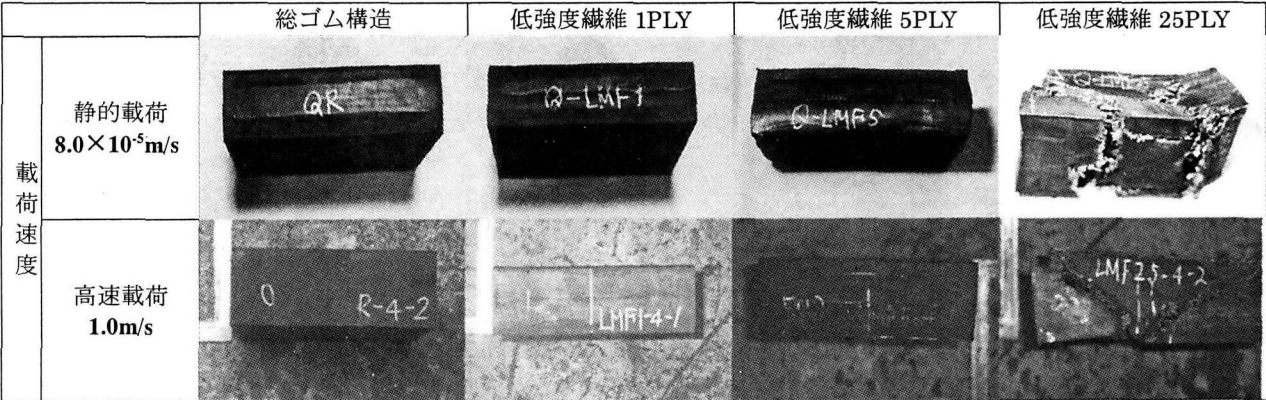


写真-1 静的載荷実験および高速載荷実験後の供試体の状態

速度の影響として低強度繊維 1PLY の場合、静的載荷におけるエネルギー吸収能は約 $1.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$ であり、載荷速度 1.0 m/s では約 $2.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ で約 1.6 倍となった。同じく低強度繊維 5PLY の場合、静的載荷時約 $3.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、載荷速度 1.0 m/s 時約 $4.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$ であり約 1.3 倍となり、低強度繊維 25PLY の場合、静的載荷時約 $8.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 、載荷速度 1.0 m/s 時約 $11.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$ であり約 1.4 倍となった。これは、初期降伏点以降の領域では、いずれの積層繊維補強ゴム供試体においても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関する影響が大きくなっているものと推測される。例えば、低強度繊維 25PLY の供試体において 25 mm 変位時の荷重が静的載荷で約 400 kN であるのに対して、載荷速度 1.0 m/s では約 600 kN と約 1.5 倍の荷重が載荷速度の影響により発生しているためである。

(5)破壊状況

静的載荷試験および高速載荷試験後の供試体の状態を写真-1 に示す。

写真-1 より、載荷速度による破壊状況の変化は認められなかった。しかし、静的載荷試験および高速載荷試験のいずれにおいても繊維積層枚数が 5 枚の供試体については、外観上の損傷は認められず、埋設された繊維の破断のみが生じている。一方、繊維積層枚数が 25 枚の場合は、繊維の破断とともに繊維積層間のゴムの破断も生じている。これは、繊維積層枚数が増加するに伴い繊維積層間のゴムの厚さが薄くなるため、ゴムの引張破断力が減少しているためと考えられる。

よって、写真-1 より複数回の力が作用すると考えられる場合は、繊維の積層枚数を減少させ、ゴムの緩衝効果を残存させる方が望ましいと考えられる。また、高い初期降伏荷重が必要な場合は、高強度繊維を使用し繊維積層枚数を減少させる方が望ましいと考えられる。なお、一回の力によりエネルギーを完全に吸収する、もしくは、複数の緩衝装置と連動し、要求される機能を完全に満足するのであれば、繊維積層枚数を多くすることによる対応も可能であると考えられる。

4. 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試験および高速載荷試験を実施し、静的および動的特性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)静的載荷試験においては、繊維積層枚数の増加および繊維強度の増加により、初期バネ特性、初期降伏荷重およびエネルギー吸収能が増加する。また、初期降伏荷重は、繊維強度、繊維積層枚数などの諸因子により明確化が可能であるという特徴を有することが確認された。さらに、本実験における初期降伏荷重は、実験式の導入により予測可能となった。
- (2)また、繊維積層枚数の増加により、初期降伏荷重は増加するが、埋設繊維破断後の強度については、繊維積層枚数を増加させてもある一定値に収束することがわかった。
- (3)高速載荷試験により、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バネ特性は、載荷速度の影響により、約 1.3~1.7 倍増加し、初期降伏点荷重は約 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。また、ゴムと繊維の載荷速度の影響を比較すると、ゴムの方が載荷速度の影響が大きい。
- (4)載荷速度に関するエネルギー吸収能は、載荷速度が上昇するにつれ増加する傾向にあり、静的載荷試験によるエネルギー吸収能を用いると安全側での評価となるため、静的載荷試験により得られたエネルギー吸収能により評価することが可能であると考えられる。
- (5)落橋防止システム用緩衝材への適用を考慮すると、複数回作用すると考えられる中小規模の地震力に対し適用する場合は、高強度繊維を使用し、繊維積層枚数を減少させ

る方が、試験後の積層繊維補強ゴムの破壊状況から判断して望ましいと考えられる。ただし、一回の大規模な地震力によるエネルギーを完全に吸収する、もしくは、複数の落橋防止システムと連動し、要求される機能を完全に満足するのであれば、低強度繊維で繊維積層枚数を多くすることによる対応も可能である。

落橋防止システム用緩衝材は、橋梁構造物の限界強度以内に確実に緩衝機能を発揮することが重要であると考えられる。以上の得られた成果より、積層繊維補強ゴムの落橋防止システム用緩衝材の適用として初期降伏点、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、その際できる限りエネルギー吸収能の大きいものとするのが望ましいと考えられる。その際、積層繊維補強ゴムは、繊維の材料特性、繊維積層枚数を変化させることで任意の初期降伏点を得ることが可能であり、その選定された繊維強度および繊維積層枚数のうち、エネルギー吸収能の最も大きいものがよいと判断される。このように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、本試験結果は落橋防止システム用緩衝材として、有用な資料を提供できたものとする。

なお、今後の検討課題として、落橋防止システム用緩衝材への適用にあたり、①解析的なアプローチによる破壊メカニズムを考慮した詳細な検討（初期降伏点の明確化）②実際の使用条件に適した重錘落下試験による積層繊維補強ゴムの緩衝効果についての検討を実施し、積層繊維補強ゴムの動的力学特性の把握がさらに必要であると考えられる。

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) 伊藤敏弘, 石川智男, 石川信隆, 池田啓士, 加藤正実, 生駒信康：供用下の高架橋における落橋防止システムの設計・施工、橋梁と基礎, pp.45-50, 1999.4
- 4) 園田佳巨, 衛藤芳昭, 石川信隆, 生駒信康, 彦坂照：ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的および動的応答特性に関する実験的考察, 土木学会論文集 No.598/I-44, pp.333-346, 1998.7
- 5) 園田佳巨, 彦坂照, 穴水宏和, 生駒信康, 石川信隆：ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的弾性および衝撃弾性応答特性に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1645-1654, 1999.3
- 6) 野々村千里, 鎌田賢, 上東泰, 野島昭二：落橋防止装置用熱可塑性エラストマー緩衝材の圧縮変形挙動, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, I-B158, pp.316-317, 1998.10
- 7) 野島昭二, 石田博, 上東泰, 野々村千里：緩衝材を併用した落橋防止システムの検討, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, I-B159, pp.318-319, 1998.10
- 8) 窪田賢司, 菅野匡, 飯束義夫, 堀江啓夫：落橋防止装置に用いる緩衝材の実験的研究, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, I-B307, pp.614-615, 1996.9
- 9) 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撃実験および効果の検証, 第52回年次学術講演会講演概要集, I-B209, pp.418-419, 1997.9
- 10) 西川信二郎, 西本安志, 小谷美和：PRF構造緩衝材, 繊維学会予稿集, 2B18, pp.G-106, 1999.5
- 11) 喜多龍一郎, 生駒信康, 川上千歳, 小暮幹太, 藤掛一典：弾性支持された鋼管支柱の衝撃応答について, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.175-179, 1996.5
- 12) 田嶋仁志, 船本浩二, 山崎俊樹, 金井良助, 中村敏夫：支承サイドブロックの衝撃破壊実験, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集, I-B171, pp.342-343, 1998.10
- 13) 石川信隆, 竹本憲介, 彦坂照, 佐藤浩明, 生駒信康：ゴム巻きピンを用いた落橋防止連結板の衝撃緩衝効果について, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.169-174, 1996.5
- 14) 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
- 15) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法, 構造工学シリーズ6, pp.82-84.

(1999年9月17日受付)