

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係の 更新と動的荷重への適応性

Updating load-displacement relations of shock absorbers composed of rubber and steel pipes and its application to dynamic load

皆川 勝*
Masaru MINAGAWA

後藤 学**
Gaku GOTO

吉田 郁政*
Ikumasa YOSHIDA

ABSTRACT In this study, the authors conducted weight dropping impact tests of shock absorbers composed of rubber and steel pipes with various loading speed in order to investigate the rate dependency accurately. The experimental results showed that the dynamic effect on the load-displacement relationships of the absorbers are mainly caused by rate dependent characteristics of rubber material. By using the results, we proposed a method to evaluate dynamic load-displacement relationships by means of static load-displacement characteristics and confirmed the validity of the method through comparison with experimental results.

Key Words : 緩衝装置, ゴム管, 鋼管, 荷重-変位関係モデル, 落錘式衝撃実験
shock absorber, rubber pipe, steel pipe,
modeling of load-displacement characteristic, weight dropping impact test

1. はじめに

兵庫県南部地震において、隣接桁間・桁と橋台間の衝突により、大きな衝撃荷重が作用し、桁・橋台、さらには落橋防止構造までもが損壊して、多くの橋梁が落橋に至った結果、人的被害や交通麻痺等の被害が甚大なものとなった。そのため、桁間、桁と橋台間で生じる衝突を緩和するシステムの開発が急務と考えられた^[1]。

この教訓を受けて道路橋示方書が改訂され、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なる落橋防止システムが提案された^[2]。特に、落橋防止構造と変位制限構造においては、落橋や損壊の原因となった衝撃荷重の作用を緩和するための緩衝材を設けることが推奨された。しかし、従来使用されてきた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、落橋防止装置の高性能化・高機能化が必要とされ、さらに、緩衝材は高架橋を構成する主要部材のひとつであ

*工博 武蔵工業大学 工学部都市基盤工学科教授 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

**工修 (株)関電工(〒108-8533 東京都港区芝浦 4-8-33) (投稿時、武蔵工業大学大学院都市基盤工学専攻修士課程)

るという認識のもとで、多数の研究・開発が行われた。

落橋防止構造や緩衝材に関する研究は、落橋防止構造および緩衝材の力学的挙動そのものに着目した研究と、橋梁を構成する一つの要素として落橋防止構造を考え、大地震時に落橋防止構造が橋梁全体の損傷を低減する効果に着目した研究に大別される^[3]。本研究は前者のグループに含まれる。緩衝材の力学挙動に着目している研究では、それぞれ以下のような部材を緩衝材として用いることが提唱されている。すなわち、園田らのゴム緩衝ピン^[4]、潤田らの直方体ゴム^[5]、西本らの積層繊維ゴム^[6]、越峠らの円筒型ゴム^[7]、村田らの二段階ばね^[8]、野々村らのハニカム型^{[9][10]}や頭井らの鋼製ベローズ^{[11][12][13]}等である。これらの研究では、衝撃荷重の低減効果と衝撃エネルギーの吸収性を緩衝材に要求される性能として挙げ、静的載荷・動的載荷・衝撃載荷等の実験を実施してその基本的な性能を把握し、緩衝材としての有効性を検討している。

緩衝材の材質としては、剛性が小さく可逆的な大変形が可能であり、しかも、繰り返し衝突への対処が必要な場合にも適用できる材料として、ゴム材が用いられる機会が多い^[14]。都築らはゴム製の緩衝材より低価格でエネルギー吸

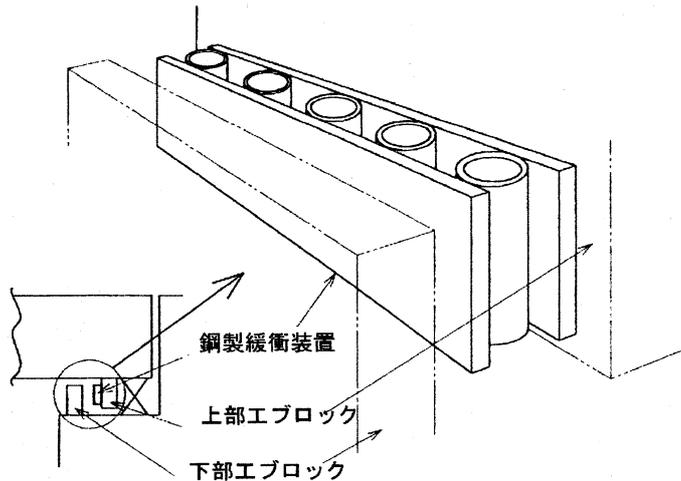
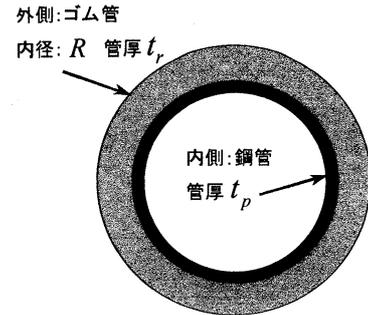


図-1 緩衝装置設置イメージ図^[16]

収性に優れる型鋼を緩衝材として用いることに着目して、その有効性を検討した^[15]。図-1 に型鋼である鋼管を緩衝装置として橋梁に設置するイメージを示す。皆川ら^[16]は種々の型鋼の中でエネルギー吸収性能が相対的に高い鋼管を緩衝材として用いて、緩衝装置を有する免震橋の動的解析によってその有効性を立証している。その結果、鋼管が緩衝材として優れていることが示されたものの、鋼管が破壊した後に、衝撃荷重の低減効果が消失するという欠点が指摘された。この欠点を克服するために、繰り返し衝突に対して安定した緩衝性・エネルギー吸収性を有するゴム材を鋼管の外側に巻く形式のものを皆川ら^[17]は考案した。なお、この研究では、鋼管の内側にゴムを詰める形式についても比較検討され、この場合には、内部のゴムが鋼管の変形を抑制するために、剛性が高くなりすぎるといった欠点があり、緩衝材としては望ましくないことがわかった。

ゴム管タイプの緩衝材としては、船舶の衝突緩衝用防舷材があげられる。船舶の衝突エネルギーは地震時のそれに比べて相対的には大きくないため、防舷材の内部は空洞とするのが一般的である。しかし、皆川が提案した耐震緩衝材の場合、吸収すべきエネルギーが大きいことから、ゴム管の内部に剛性の高い鋼管を挿入してエネルギー吸収能を高めている。また、鋼管の内部の空洞が大きな変形を許す効果を生んでいる。この工夫により、鋼管の降伏前及び鋼管の



R	tp	tr
70	4,5,6,7	10,20,30,40
80	4,5,6,7	15,25,35,45
95	8,10	15,25,35,45
110	8,10	15,25,35,45

単位 (mm)

図-2 試験体の寸法及び形状

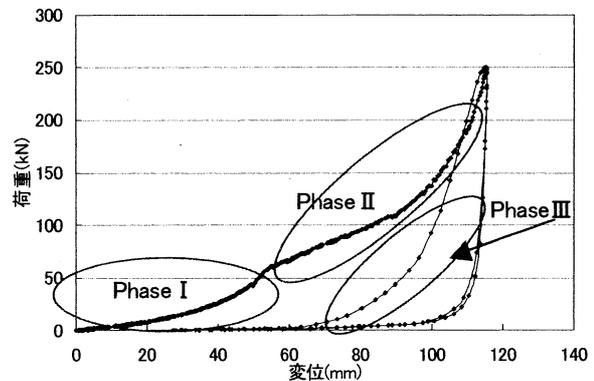


図-3 ゴム鋼併用耐震緩衝材の変形過程の概念図

圧壊後には、ゴム管のみがエネルギー吸収材として働き、大きい衝突エネルギーに対しては、鋼管を降伏させてエネルギーを吸収させることができる。このことから、中小の地震においてはゴム管だけで、大地震では鋼管も併用して地震エネルギーを吸収する二段階設計が可能となる。

皆川らは、まず、基礎特性の把握を目的として、ゴム管及び鋼管の寸法を変化させてパラメトリックに実験を行い、それらの寸法の変化を考慮して荷重-変位関係を推定するモデルを構築した^{[17][18]}。しかし、このモデルでは、鋼管の降伏後の挙動に対して、本来ゴム材料に対して用いられる応力-ひずみ関係式である Mooney-Rivlin 式^[5]を援用していたため、推定精度が低下していたことから、皆川ら^[19]は、2. で述べるように、鋼管の側部の曲げモーメントに注目

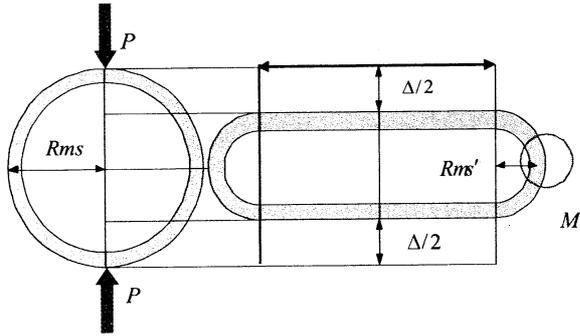


図-4 鋼管の塑性変形モデル

して鋼管の曲げ変形特性を改善した。さらに、落錘式衝撃実験の実施から、高いエネルギー吸収性能の保持と静的荷重実験より構築した荷重-変位関係モデルを動的な現象に適応できることを示した。しかし、皆川ら^[19]が行なった落錘式衝撃実験では、入力条件は緩衝材の終局限界までの静的エネルギー吸収量から決定され、一種類の試験体に対し一つのエネルギーのみが入力されたが、そのため、荷重速度の変化に対する影響が精度良く把握出来なかった。本研究では、上述の実験を補うため、同一形状の試験体に対し、複数のエネルギーを入力する落錘式衝撃実験を実施した。そして、荷重速度の変化に対する影響を調べ、それを考慮した動的荷重-変位関係が推定できることを示す。

2. 静的荷重-変位関係のモデル化^[19]

文献[19]で示された静的荷重-変位関係のモデル化と推定結果の概要を示す。

2.1 実験概要

本研究で想定しているゴム鋼併用型耐震緩衝装置は、鋼管の外側にゴム管を巻いた形式の緩衝装置であり、鋼管の材質はSTKM13A、ゴムの材質はクロロプレンゴム（硬度 60±5）としている。図-2 に寸法及び形状を示す。静的圧縮試験には万能試験機を用い、変位と荷重の測定にはレーザー変位計、荷重計を使用した。

2.2 実験結果

図-3 にゴム鋼併用型耐震緩衝材の変形過程の概念図を示す。

同図に示すように、ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の変形は以下のように進行する。

Phase I : 鋼管の降伏まではゴム管のみが変形し、剛性は低い。

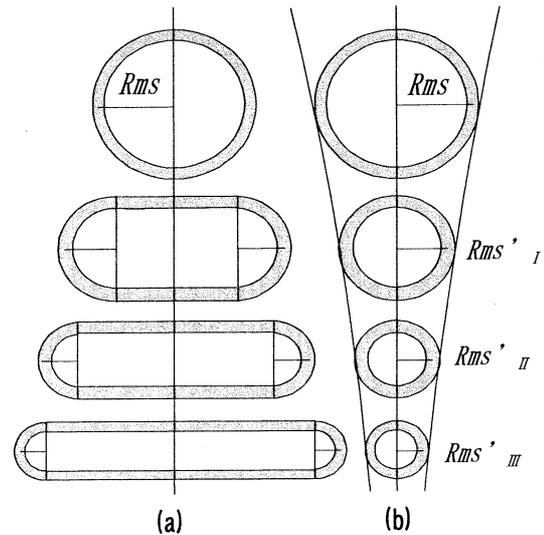


図-5 鋼管の変形形状のモデル

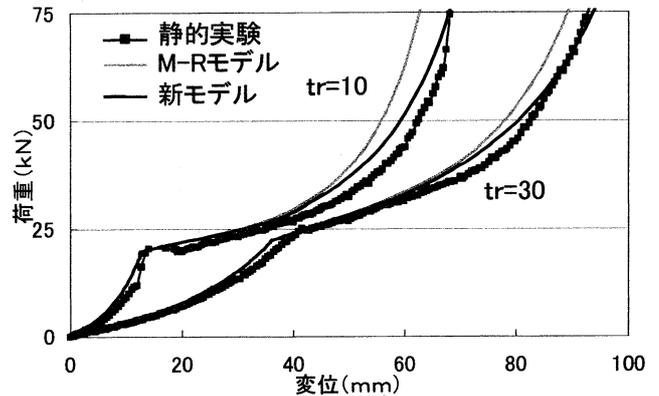


図-6 静的荷重-変位関係の推定例
(鋼管 70×4)

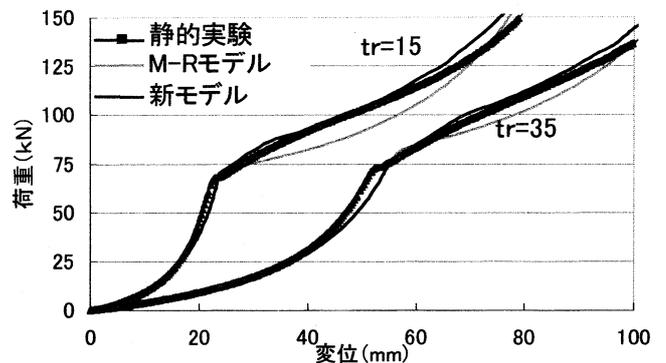


図-7 静的荷重-変位関係の推定例
(鋼管 110×8)

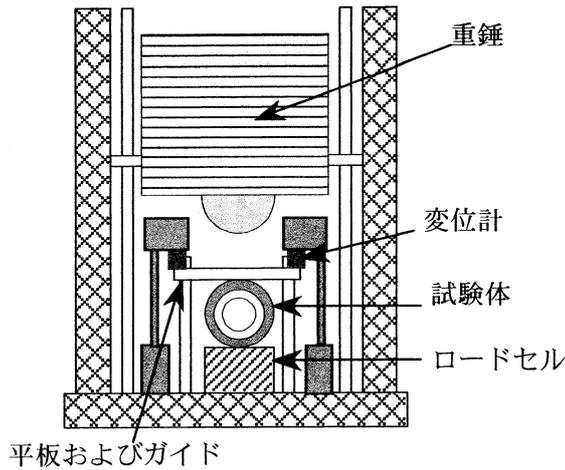


図-8 実験装置概略

Phase II : 鋼管が塑性変形すると共にゴム管の圧縮変形も進行する。鋼管降伏時の変位はゴム厚にほぼ比例し、降伏荷重はゴム管が厚いほど上昇する。

Phase III : ほぼ直方体形につぶれたゴム管の圧縮変位が復元し再変形する経路。

2.3 荷重-変位関係に影響する要因

皆川らは、ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係に影響を与える要因として、以下の基本的特性を挙げて、これらを用いて荷重-変位関係を精度よくモデル化できることを示した。

(a) ゴム管の圧縮変形特性

ゴム管の中に鋼柱を挿入した試験体の静的圧縮試験から得られ、応力-ひずみ関係は Mooney-Rivlin^[5]の式よりモデル化した。

(b) ゴム管の曲げ変形特性

ゴム管単体の静的圧縮試験から得られ、ゴム管内部がほぼ接触するまで若干の曲げ抵抗を示した後、ゴムは直方体に近い形となり、これの圧縮変形に移行する。

(c) 鋼管の曲げ変形特性

図-4 に鋼管の塑性変形、図-5 に鋼管の変形形状遷移のモデルを示す。(a) 図は、実際の変形のイメージであり、徐々に扁平な形状になる。この際、左右側部に注目すれば、(b) 図に示すように、あたかも鋼管の径が次第に小さくなるとみなすことができる。このことと、載荷盤と接する面に荷重が分布することを考慮して、曲げモーメントを荷重 P と変位 Δ の関数として扱うことができ、径厚比を考慮した鋼管の曲げ変形特性をモデル化した。

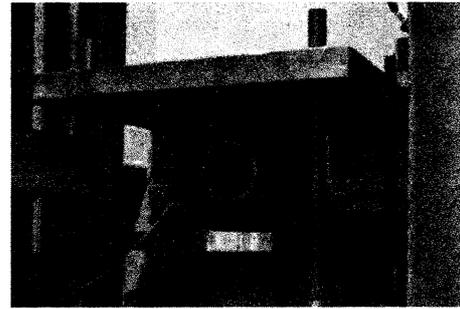


図-9 試験体設置状況

表-1 各試験体の降伏点までのエネルギー吸収量

試験体	降伏点までのエネルギー吸収量 (kN-m)
鋼管80×7ゴム15	0.35
鋼管80×7ゴム25	0.65
鋼管80×7ゴム35	1.02

表-2 落錘式衝撃実験の入力条件

試験体	入力エネルギー (kN-m)	重錘重量 3.95kN	
		落下高さ(m)	衝突速度(m/s)
鋼管80×7 ゴム15	1.0	0.253	2.23
	3.0	0.759	3.86
	5.0	1.266	4.98
	7.0	1.772	5.90
	9.0	2.278	6.69

試験体	入力エネルギー (kN-m)	重錘重量 3.95kN	
		落下高さ(m)	衝突速度(m/s)
鋼管80×7 ゴム25	3.0	0.759	3.86
	5.0	1.266	4.98
	7.0	1.772	5.90
	9.0	2.278	6.69
	11.0	2.785	7.39

試験体	入力エネルギー (kN-m)	重錘重量 3.95kN	
		落下高さ(m)	衝突速度(m/s)
鋼管80×7 ゴム35	5.0	1.266	4.98
	7.0	1.772	5.90
	9.0	2.278	6.69
	11.0	2.785	7.39

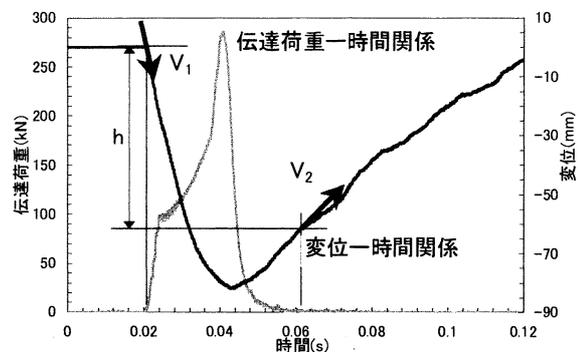


図-10 伝達荷重-時間
および試験体変位-時間関係
(鋼管 80×7 ゴム 25 入力 9)

(d) ゴムから鋼管への力の伝達特性

ゴムから鋼管へ伝達される力は、リングの公式^[20]より鋼管へ伝達される荷重が集中荷重から分布荷重と変わることにより見かけ上鋼管の降伏荷重が増加することを用いて評価した。ゴム厚が増すほど、荷重分布範囲が広がることから鋼管の降伏荷重も増加する。

2.4 モデル化の精度

2.3の各特性を併せることで、ゴム鋼併用型耐震緩衝材の荷重-変位関係を推定することができる。推定結果の一部を図-6, 7に示す。同図では、鋼管の曲げ変形特性をMooney-Rivlin式を援用して作成した荷重-変位関係モデル(M-Rモデル)^{[17][18]}と2.3に示した方法^[19]で得られる荷重-変位関係(新モデル)、及び実験により得られた荷重-変位関係を比較している。鋼管が降伏するまではいずれのモデルでも取扱は同一であり、違いはない。しかし、鋼管が初期降伏して以降については、図-4, 5で説明した鋼管の塑性変形遷移のモデル化を反映して精度が向上しており、特に図-7のように鋼管の剛性が比較的高い場合には、鋼管降伏直後の剛性が、実験結果とよく一致している。

3. 入力エネルギーを変化させた落錘式衝撃実験の結果と考察

3.1 実験方法

所定の高さから重錘を自由落下させて、試験体に動的な圧縮力を作用させた。また、試験体が円管形状であり、設置する際に不安定であることと、実際に落橋防止システム用緩衝材として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て、剛体とみなせる平板を介して先端が球面状の重錘を衝突させている。

本実験での計測項目は、試験体上面に設置された平板の変位と試験体背面に発生した伝達荷重であり、各々レーザー変位計及びロードセルで測定した。計測装置の取り付けは、図-8に示したとおりであり、レーザー変位計は、(株)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、日本特殊測器(株)製のLCX-50kNを用い、定格容量500kNである。計測サンプリング時間間隔は0.1msである。

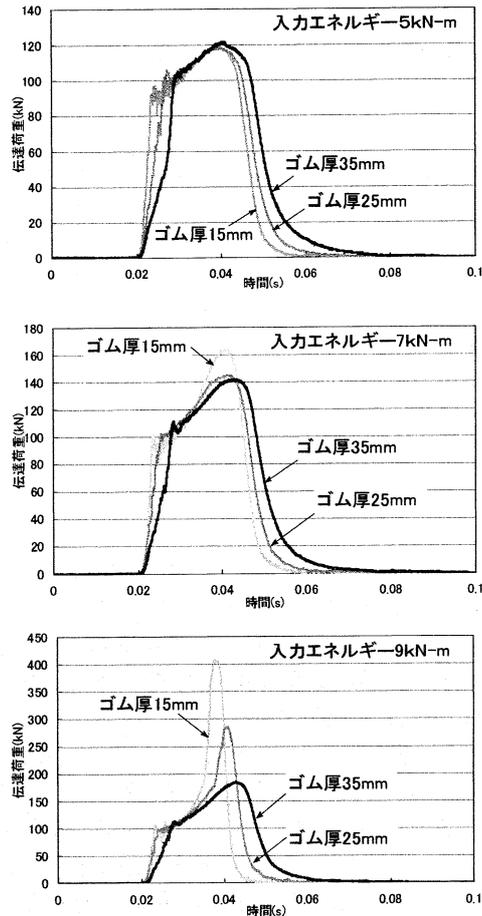


図-11 鋼管 80×7 伝達荷重-時間関係

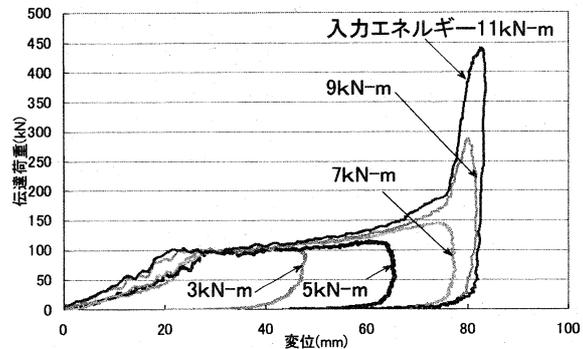


図-12 伝達荷重-変位関係の例
(鋼管 80×7 ゴム厚 25mm)



(a) 鋼管 80×7 ゴム厚 25mm (b) 鋼管 80×7 ゴム厚 25mm

図-13 動的荷重載荷後の試験体

3.2 試験体

前述の静的実験で用いた試験体のうち平均的な強度を持つ鋼管 80×7 (鋼管外径 80mm, 鋼管厚 7mm) を用い, ゴム管厚を 15mm, 25mm, 35mm と変化させた. また, 試験体の奥行きを 100mm とした. 試験体の設置状況を, 図-9 に示す. 皆川ら^[19]は, 数種類の径, 板厚を有する同様の実験を実施し, 動的荷重-変位関係を推定できることを示している. 本研究は, 更に, 荷重速度の影響をより正確に把握することを目的としているが, 文献 [19] によれば荷重速度の影響はゴム材で顕著であることが分かっており, 種々の制約から鋼管の寸法は一種類に限定した.

3.3 入力条件

本実験における入力条件は, 緩衝材の降伏後の弾塑性応答から終局限界までの 2 段階とした. 表-1 に示す静的圧縮荷重実験の結果より, 得られた緩衝材の鋼管の初期降伏までの静的エネルギー吸収量が最も低い鋼管 80×7 ゴム 15 のエネルギー吸収量は 0.35kN-m である. 本研究では, 鋼管の塑性化によるエネルギー吸収に着目していることから, 試験体に用いるすべての鋼管が降伏するよう, 入力エネルギーの最小値を 1.0 kN-m とした. 以降 2.0 kN-m 間隔でそれぞれ 3.0kN-m, 5.0 kN-m, 7.0 kN-m, 9.0 kN-m, 11.0 kN-m のエネルギー量について, 表-2 に示す入力条件で実施した. 荷重条件は, 一つの試験体に対し, 一つのエネルギーを入力する単一荷重とする. また, 重錘重量は, 試験機の容量 (ウインチ容量 500kgf) から 403kgf (=3.95kN) と設定し, 西本・梶田らの研究^[21]より重錘重量の変化に対する最大伝達荷重の違いが現れていないことから, 単一重量で行なうこととした.

3.4 実験結果

図-10に, 試験体の初期衝突時における伝達荷重-時間関係および, 試験体変位-時間関係の一例を示す. 同図は, 縦第1軸に伝達荷重を, 縦第2軸に試験体の上部に設置した平板の位置, 横軸に伝達時間をとっている. 重錘が平板を介して試験体に衝突すると同時に試験体の圧縮変形が始まり, 最大伝達荷重値とほぼ同時に試験体の圧縮変位が最大となる. そして, ふたたび伝達荷重値が0となるのと同時に試験体の復元が終了し (この試験体例では, 0.06sec近辺の荷重値が0になる点に対応), 平板と重錘のみの移動が進行する.

表-3 各試験体におけるエネルギー吸収率

試験体	入力E (kN-m)	No	ΔE(%)
鋼管80×7 ゴム15	1	1	91.8
		2	89.4
	3	1	97.9
		2	95.5
	5	1	98.9
		2	98.9
	7	1	99.0
		2	99.9
	9	1	98.9
		2	99.1
鋼管80×7 ゴム25	3	1	95.4
		2	94.8
	5	1	97.3
		2	98.4
	7	1	98.1
		2	98.5
	9	1	98.2
		2	98.8
	11	1	96.2
		2	97.3
鋼管80×7 ゴム35	5	1	98.9
		2	98.2
	7	1	98.7
		2	97.1
	9	1	99.0
		2	98.2
	11	1	97.9
		2	97.9

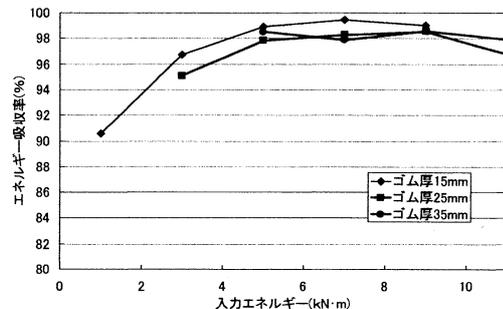


図-14 各試験体のエネルギー吸収率-入力エネルギー関係

表-4 各試験体における力積と重錘の運動量変化

試験体	入力E (kN-m)	No	運動量変化 (kN-t)	力積 (kN-t)
鋼管80×7 ゴム15	1	1	1.01	1.42
		2	1.16	1.42
	3	1	1.63	2.12
		2	1.76	2.12
	5	1	2.19	2.63
		2	2.18	2.64
	7	1	2.62	3.08
		2	2.52	3.03
	9	1	3.06	3.53
		2	3.08	3.54
鋼管80×7 ゴム25	3	1	1.86	2.27
		2	1.89	2.26
	5	1	2.27	2.68
		2	2.24	2.75
	7	1	2.50	3.17
		2	2.56	3.18
	9	1	3.03	3.61
		2	3.00	3.63
	11	1	3.40	4.00
		2	3.37	4.00
鋼管80×7 ゴム35	5	1	2.35	2.91
		2	2.34	2.92
	7	1	2.77	3.35
		2	2.73	3.34
	9	1	3.04	3.74
		2	3.06	3.74
	11	1	3.44	4.12
		2	3.44	4.08

図-11に、入力エネルギー5kN-m、7kN-m、9kN-mにおける伝達荷重-時間関係を示す。

入力エネルギー5kN-mの場合では、各試験体共に鋼管は圧壊しておらず、ゴム厚が厚いほど伝達荷重が大きい。また、ゴム厚35mmの試験体に関しては、立ち上がりが緩やかで、荷重の作用時間が長いことが分かる。

次に、入力エネルギー7kN-mの場合では、ゴム厚15mmの試験体の鋼管が圧壊したため、他の試験体と比べて伝達荷重が増加している。

さらに、入力エネルギー9kN-mの場合では、いずれの試験体も鋼管が圧壊に至っており、全体的に伝達荷重が増加し、荷重の作用時間は短くなった。

図-12に、ゴム厚25mmの試験体の伝達荷重-変位関係を示す。入力エネルギーの変化に対し、降伏荷重はほぼ一定であることが分かる。一方、降伏変位は入力エネルギーが大きくなるほど、低下する傾向が見られる。

図-13に、落錘式衝撃実験終了後の試験体の形状を示す。入力エネルギー7、9、11kN-mに関しては、ほぼすべての試験体で鋼管が圧壊した。

3.5 エネルギーの吸収効果

図-10に示したような、各試験体の初期衝突部における伝達荷重-時間関係および、試験体変位-時間関係から衝撃エネルギーの吸収効果を評価する。重錘質量 m 、衝突直前の重錘速度 V_1 、試験体復元直後の重錘速度（復元直後、0.025秒間の速度を用いている） V_2 、図-10に示す V_1 、 V_2 評価時の高さの差 h を用いて、試験体への衝突現象中の運動エネルギーの変化率を求め、これをエネルギー吸収率とした。表-3に、各試験体におけるエネルギー吸収率を示す。

図-14に、各試験体の入力エネルギーに対するエネルギー吸収率の変化を示す。いずれの試験体も90%以上のエネルギー吸収率を示している。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があり、各試験体において鋼管の圧壊が確認される最も小さい入力エネルギー7kN-m（ゴム厚15mm）と9kN-m（ゴム厚25mm、35mm）が作用した時に、最も高いエネルギー吸収率となっている。

また、図-10に示した各試験体の初期衝突部における伝達荷重-時間および、試験体変位-時間関係から求めた力積と衝突前後の重錘速度から求めた運動量の変化を比較した。表-4に各試験体における力積と重錘の運動量変化を示す。

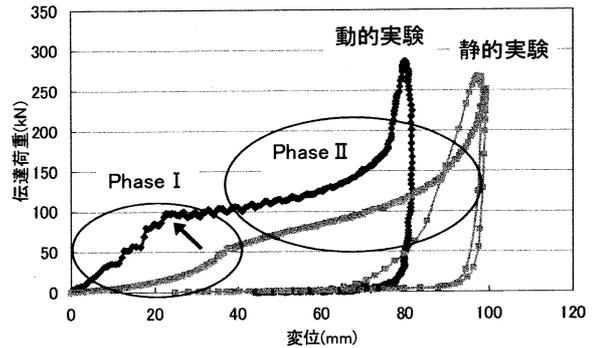


図-15 動的及び静的荷重-変位関係の比較

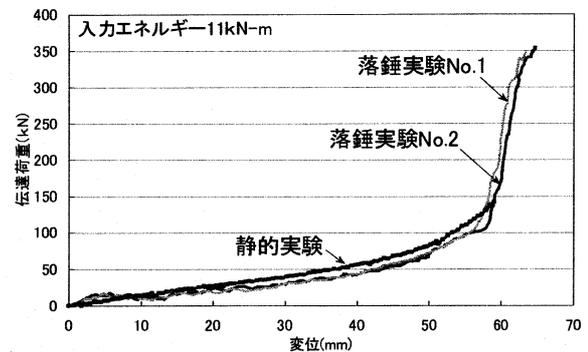
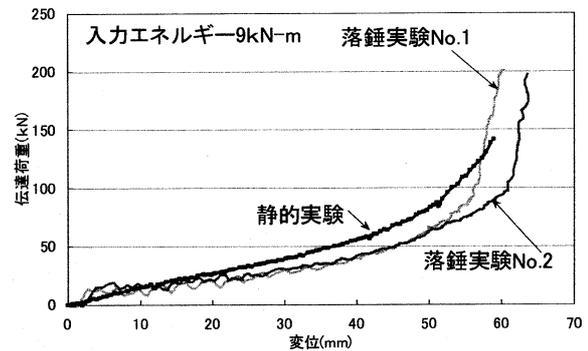
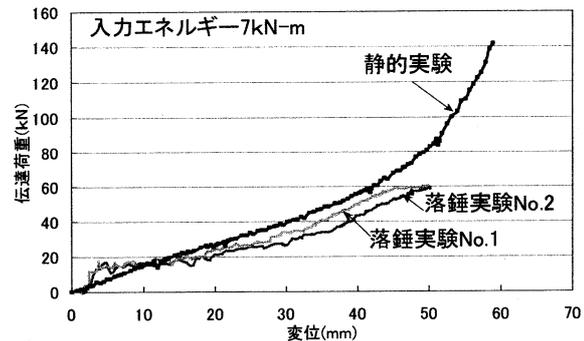


図-16 降伏後荷重-変位関係の例
(鋼管 80×7, ゴム厚 25mm)

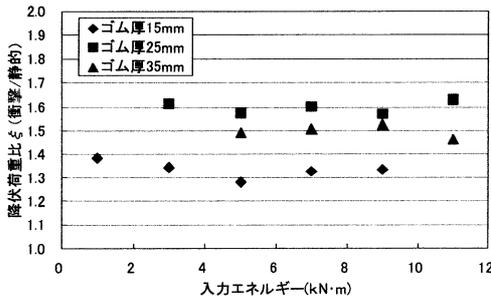


図-17 各試験体の降伏荷重比-入力エネルギー関係

伝達荷重-時間関係から求めた力積の方が 15% から 25%程度大きいものもあるが、全体的には、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。

4. 動的荷重-変位関係の推定

前述のように、ゴム鋼併用型耐震緩衝材の変形は、Phase I, Phase II, Phase IIIのように進行する^[17]。ここで、図-15に示す、静的および動的実験のPhase I, Phase IIを比較する。皆川ら^[19]の研究によれば、Phase IIにおける降伏後の鋼管の大変形が緩衝材の変形の主となる部分では、载荷速度の影響が小さく、荷重-変位関係が一致することが分かっている。本実験においてもそのことが成り立つかどうか確認するために、静的及び動的実験データにおける鋼管の降伏荷重を原点に揃えたものの一例を図-16に示す。同図より、ほぼ全ての試験体で、降伏後の鋼管の大変形が緩衝材の変形の主となる部分では、载荷速度の変化による影響が小さく、荷重-変位関係が同じ傾向を示すことが確認できた。さらにPhase Iにおいても鋼管の载荷速度による剛性の変化が少ないと考えられている。よって、Phase Iにおける荷重-変位関係の相違にはゴムの载荷速度による剛性の変化のみが影響していると推測されている。そこで、動的と静的実験の降伏荷重の比（降伏荷重比： ξ ）と降伏変位の比（降伏変位比： ζ ）を縦軸に、入力エネルギー： E を横軸にプロットしたものを図-17, 18に示す。ただし、各試験体の挙動には、鋼材上降伏点の荷重速度による上昇によると思われる不安定な領域があることから、ここでは、鋼材の下降伏点に担当すると思われる荷重値に着目した。

図-17, 18より、 ξ は入力エネルギーの増減にかかわらず、同じゴム厚毎にほぼ一定となる。

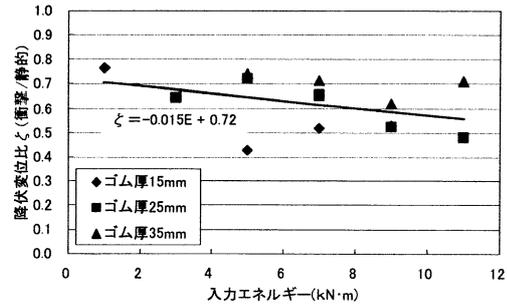


図-18 各試験体の降伏変位比-入力エネルギー関係

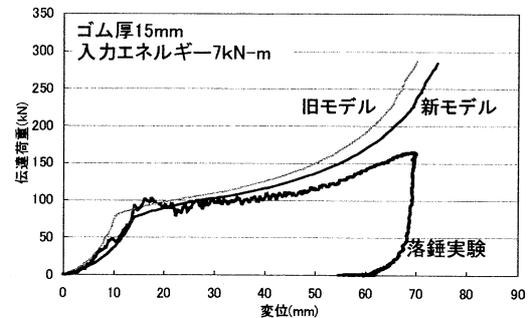
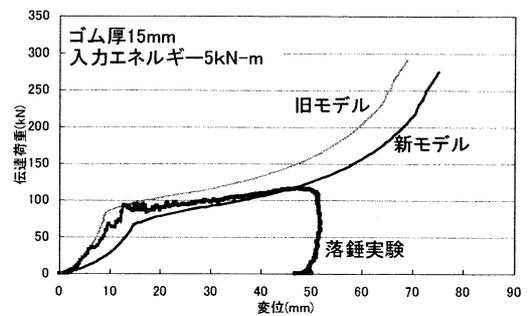
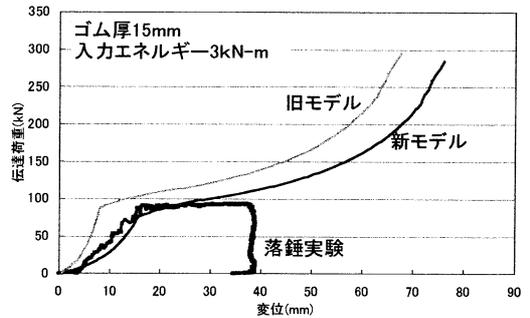
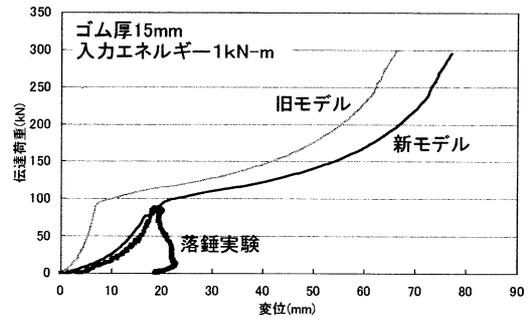


図-19 動的荷重-変位関係の推定結果

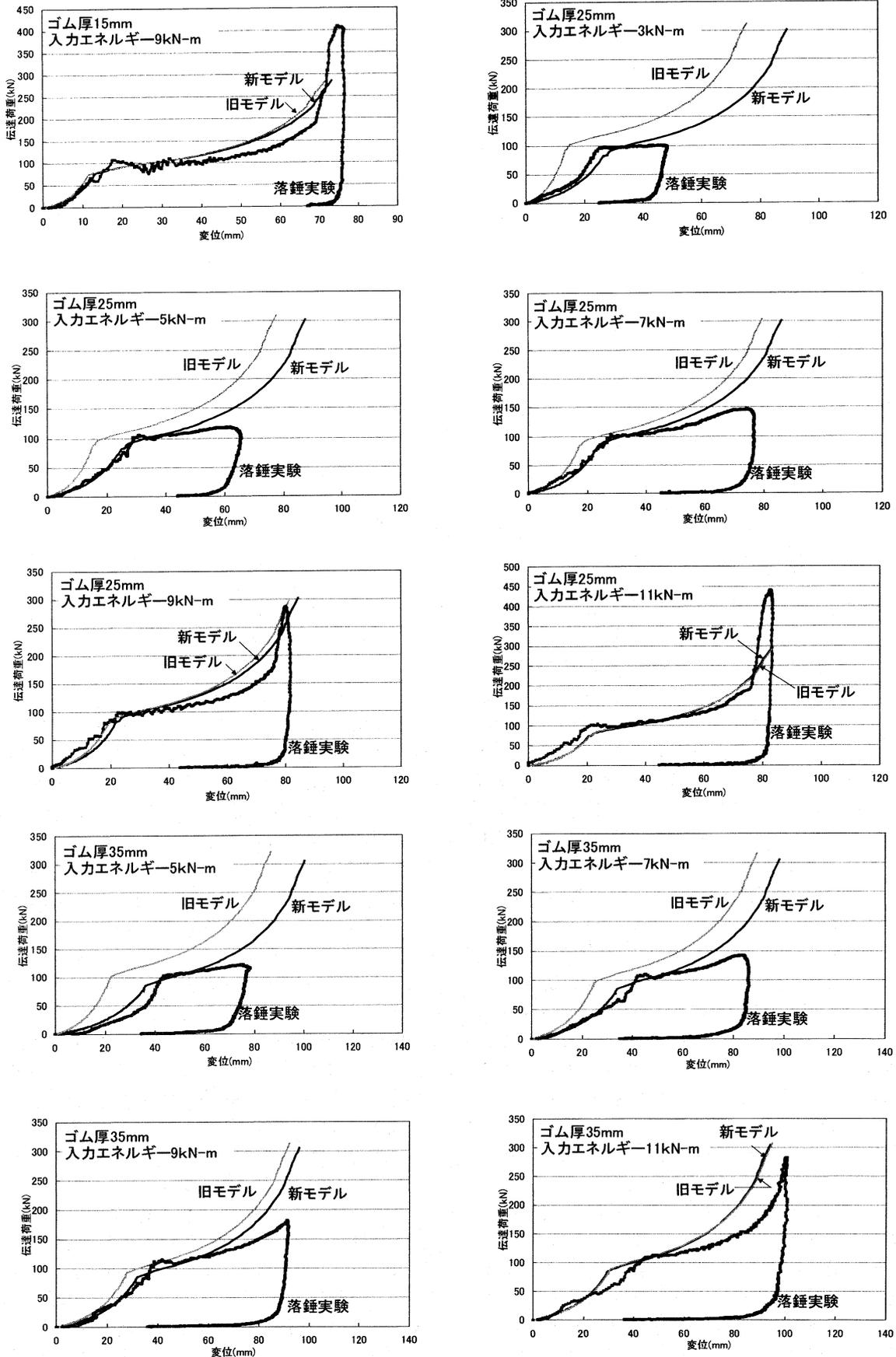


図-19 動的荷重-変位関係の推定結果 (つづき)

さらに、ゴム厚が厚いほど、降伏荷重が大きいことも分かる。このことはゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係に影響する要因の一つである、ゴムから鋼管への力の伝達特性の中に既に含まれており、動的荷重-変位関係に適応させる際にはあらためて考慮しないこととしたが、ゴムの厚さ方向の圧縮変形の影響の最も少ない試験体として、ゴム厚が最も薄いゴム厚15mmの ξ を用いた。一方、 ξ は文献[19]の結果と同様に、入力エネルギーが大きくなるにつれ低下する傾向を示す。

ここで、**同図**より、ゴム厚15mmの降伏荷重比の平均値として ξ を、さらに、降伏変位比 ζ については、入力エネルギーとの間に相関性が見られることから、最小二乗法により、それぞれ以下の(1)、(2)式を算出した。

$$\xi = 1.33 \quad (1)$$

$$\zeta = -0.015E + 0.72 \quad (2)$$

算出された ξ および ζ で静的載荷実験より構築した荷重-変位関係モデルの鋼管降伏荷重までのPhase Iを補正することにより、動的な荷重に対応した荷重-変位関係を導き出した。**図-19**には、落錘実験において測定された荷重-変位関係とモデルによる推定結果(新モデル)、および、皆川ら^[19]が落錘式衝撃実験より導き出した動的荷重-変位関係(旧モデル)を比較して示した。

これらの図より、今回新たに提案したモデル(新モデル)は、動的実験から得られた結果に対し、Phase I、Phase IIを通して、降伏後の荷重が変位に対して著しく増加する付近まで、入力エネルギーの変化に対応して、精度良く推定し得ることが明らかとなった。ゴム鋼併用型の緩衝材の場合、載荷初期にはゴムのみが変形するため、入力エネルギーは載荷初期における変位速度に対応付けることができる。新モデルでは、鋼管の変形が進行中の変位速度の変化は考慮されていないが、第一近似としては変位速度を考慮したモデルを構築できたと考える。

一方、皆川らの推定モデル(旧モデル)に関しては、9kN-m、11kN-mといった比較的大きい入力エネルギーを作用させた時は、新たに推定したモデルと同様に、実験値を精度良く推定することが出来たが、それ以外に入力エネルギー作用時には、Phase I、Phase IIの全般を通して、大きな誤差が生じた。これは、皆川らが対象と

した入力条件が、緩衝材の終局限界までの静的エネルギー吸収量のみであったことによる。

5. 結論

本研究では、ゴム鋼併用型耐震緩衝材に、異なる入力エネルギーを加える落錘式衝撃実験を実施した。得られた主な結論を以下に示す。

- 本緩衝材の動的荷重-変位関係において、入力エネルギーの変化に対し、降伏荷重はほぼ一定であるが、降伏変位は入力エネルギーが大きくなるほど、低下する傾向がある。
- 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があり、鋼管の圧壊が確認される最も小さい入力エネルギーが作用した時に最もエネルギー吸収率が高いことが分かった。
- 降伏後の鋼管の大変形が緩衝材の変形の主となる部分では、載荷速度の変化による影響が小さく、荷重-変位関係が同じ傾向を示すことが確認できた。
- 載荷速度の変化が、荷重-変位関係に及ぼす影響を把握して、静的載荷実験より構築した荷重-変位関係モデルを動的な現象に適応させることが可能となった。

本研究で提案されている、ゴム管と鋼管を併用した緩衝装置の荷重-変位特性は、文献[17]、[18]、[19]および本論文で示してきたように、それぞれの基本的な力学特性および、それらの間の荷重伝達特性を用いて、使用する管の管厚、管径などの基本的な諸元により定量的に評価することができる。具体的には、ゴム管の圧縮変形特性、曲げ変形特性、鋼管の曲げ変形特性はすべて諸元から求めることができる。また、ゴム管から鋼管への荷重伝達特性も部材寸法から決定できるようにモデル化されている。動的効果を加味した上で、これらの基本特性を並列・直列ばねとして組み合わせることで容易に緩衝装置としての動的力学特性を評価できる。

実際の橋梁へ適用する際には、所要の衝撃力低減性能およびエネルギー吸収性能を満たすように、上記の諸元および部材長、管の所要個数を決定することになる。本装置では外側にゴムが配置されているため、免震橋梁で問題となる遊間を減らすことにも効果があると考えている。実橋梁に適用する効果については、文献[16]における数値解析により事前に確認しているが、その後の知見を加味して再度、本装置の有効性

を確認するとともに、設計方法を具体的に定めることが今後の課題である。

謝辞：実験の実施にあたり、防衛大学の香月智先生、白石博文氏には多数のご助言、ご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 土木学会関西支部：緩衝型落橋防止システムに関する調査研究，土木学会関西支部講習会テキスト，2001. 7.
- [2] 日本道路協会：「道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編」，1996. 12.
- [3] 梶田幸秀，杉浦邦征，渡邊英一：緩衝型桁間連結ケーブルを用いた高架橋の地震応答性状，土木学会論文集，No. 710/ I -60，pp. 297-310，2002. 7.
- [4] 園田佳巨，衛藤芳昭，石川信隆，生駒信康，彦坂熙：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] 潤田久也，川島一彦，庄司学，須藤千秋：高面圧を受ける直方体ゴム製耐震緩衝装置の圧縮特性の推定法に関する研究，土木学会論文集，No. 661/ I -53，pp. 71-83，2000. 10.
- [6] 西本安志，梶田幸秀，石川信孝，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] 越峠雅博，運上茂樹，足立幸郎，長屋和宏：弾塑性型特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の衝撃緩衝効果に関する実験研究，土木学会論文集，No. 689/ I -55，pp. 99-112，2001. 4.
- [8] 村田清満，高山智弘，後藤貴士，山田正人，生駒信康，浮島徹：エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置による耐震補強効果，土木学会論文集，No. 689/ I -57，pp. 275-288，2001. 10.
- [9] 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，I 部門，pp. 316-317，1998. 10.
- [10] 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装置システムの検討，土木学会第 53 回年次学術講演会，I 部門，pp. 318-319，1998. 10.
- [11] 頭井洋，中野将志，大谷修，岡本安広：単純鋼桁・橋脚系のエネルギー吸収型落橋防止構造の等価線形化法に関する設計法，鋼構造論文集，第 7 巻第 28 号，pp. 33-44，2000. 12.
- [12] 頭井洋，濱野涼子，大谷修，岡本安広：エネルギー吸収型桁連結装置の鋼連続桁橋への適用，鋼構造論文集，第 8 巻第 31 号，pp. 107-117，2001. 9.
- [13] 頭井洋，大谷修，岡本安広：エネルギー吸収型桁連結装置としての鋼製ベローズの力学特性，鋼構造論文集，第 9 巻第 24 号，pp. 77-86，2002. 6.
- [14] 西本安志，園田佳巨，石川信隆，彦坂熙，西川信二郎：落橋防止用矩形状ゴム緩衝材の設計法に関する一考察，土木学会論文集，No. 689/ I -57，pp. 335-360，2001. 10.
- [15] 都築昭夫，長嶋文雄，中田宏治，金子修，大竹省吾：鋼製緩衝材の荷重変形特性に関する実験的検討，鋼構造年次論文報告集，第 7 巻，pp. 9-14，1999. 11.
- [16] 皆川勝，高寄太一，土井雄司，藤谷健：ゴム鋼併用型緩衝装置をもつ免震橋の地震応答解析，鋼構造年次論文報告集，日本鋼構造協会，Vol. 9，pp. 293-300，2001. 11.
- [17] 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.
- [18] 皆川勝，土井雄司，石黒聡：ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係のモデル更新，鋼構造年次論文報告集，第 12 巻，pp. 47-54，2004. 11.
- [19] 皆川勝，石黒聡，後藤学：ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係の更新と衝撃荷重への適応性，構造工学論文集，Vol. 52，pp. 327-338，2006. 3.
- [20] 土木学会：構造力学公式集，1986. 6.
- [21] 西本安志，梶田幸秀：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.

(2006年3月10日原稿受理)