

## (40) クサビ型ダンパーの衝撃実験

## Impact loading test of wedge mechanical rubber device

石橋和佳\*, 片出 亮\*\*, 香月 智\*\*\*, 廣瀬彰則\*\*\*\*, 田中健司\*\*\*\*\*  
Kazuyoshi Ishibashi, Ryo Katade, Satoshi Katsuki, Akinori Hirose, Kenji Tanaka

- \* 防衛大学校理工学研究科学生, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)  
\*\* 修(工),防衛大学校理工学研究科学生, 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)  
\*\*\*\* 博(工), 株式会社エイト日本技術開発, (〒532-0034 大阪府大阪市淀川区野中北 1-12-39)  
\*\*\*\*\* 株式会社ビービーエム, (〒104-0033 東京都中央区新川 2-13-9 美和ビル)

*Key Words: wedge mechanical rubber device, impact loading test, impact load*

キーワード: クサビ型ダンパー, 重錘落下衝突実験, 衝撃力

## 1. 緒言

1995年の兵庫県南部地震以降, 橋梁構造物の耐震設計法の考え方は, 従来の耐力設計から主構造の動的応答や, 非線形応答を期待した性能設計へと移行しつつある<sup>1)</sup>. このような中で, 大地震下の衝撃的応答に対する緩衝装置として, 建設コスト削減の観点からゴム材の圧縮特性で緩和するゴム製緩衝装置が検討されている<sup>2)</sup>. しかし, ゴムの圧縮特性を活用する場合には, ゴム形状と材料による非線形性が生じるが, その非線形性を設計して制御するのは難しい<sup>3)4)</sup>. 一方で, 建築分野で実用技術の成熟している積層ゴムのせん断抵抗力の非線形性は管理手法が確立しており, この基本特性を活用する方法も考えられる. そこで, 本研究は, 積層ゴムを利用した小型で大きな衝撃力吸収性能を期待できるゴムのせん断変形を桁の圧縮変形に変換させるクサビ型ダンパーを提案し, その衝撃吸収効果について基礎的な検討を行うものである.

## 2 実験方法

## 2.1 実験の概要

本研究では, クサビ型ダンパーの試作供試体を一体作製し, まず, 供試体の静的および急速载荷試験を行い, クサビ機構の有効性などについて調べる. さらに, クサビ型ダンパーと同時に, 積層ゴムのせん断変形を生起しないようにした剛結供試体の2体に対して重錘落下衝突実験を行い, それぞれの衝撃力や伝達衝撃力について比較, 考察する.

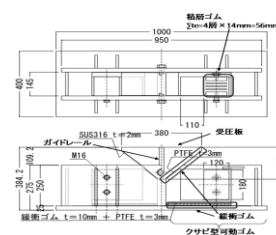


図-1 クサビ型ダンパー



写真-1 クサビ型ダンパー

## 2.2 実験供試体

## (1) クサビ型ダンパー

図-1に, クサビ型ダンパーの基本寸法図を示す. 供試体は, 高さ1000mm, 幅400mm, 高さ384mmであり, 受圧部には先端90°で両方に45°の変位を変換する金属の受圧板を有する. クサビ部はスライダー部に設置され, クサビの上下の動きは, スライダーの水平変位に変換される. 積層ゴムの一端は本体部に固定され, 積層ゴムの他端は本体に固定されている. このスライダーに伴う積層ゴムの変形はせん断変形であり, せん断弾性係数G12の天然ゴムを使用している. また, 受圧板クサビは, SM490Aで, ガイドレールに沿って上下する構造となっており, その質量は47.9kgである. また, スライダーの質量は52.4kg, 積層ゴムは18.0kgである. なお, クサビとスライダーとの摩擦面は, テフロン加工してあり, 摩

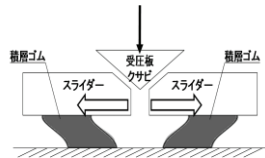


図-2 クサビ型ダンパーの機構模式図

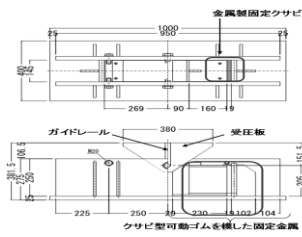


図-3 剛結供試体

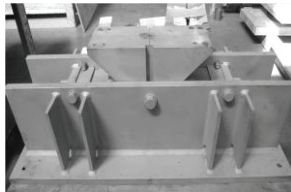


写真-2 剛結供試体

擦係数は0.1程度である。

以上の機構を模式化すると、図-2のようになる。

## (2) 剛結供試体

図-3および写真-2に剛結供試体を示す。クサビ型ダンパーの積層ゴムを固定金属で置き換えた構造であるので、スライド機構は全く機能せず、クサビが固定されたスライダの上に置かれている。本供試体はゴムによるせん断変形の緩衝効果を明らかにするための比較対象として使用する。

## 2.3 静的および急速荷重実験

図-4および写真-3に、静的および急速荷重実験に用いた実験装置の概要を示す。実験は、荷重速度4m/sまでの荷重試験が可能な高速変形荷重装置<sup>4)</sup>を用いて行った。静的実験では、55mmまでの変位を25分間かけて荷重し、除荷は油圧を抜いて、クサビ型ダンパーの反力で自然に戻させたため、約1分ほどでリバースした。

図-5に、急速荷重試験における荷重板の変位～時間関係を示す。公称0.5m/sおよび1.0m/sでは、50mmまではほぼ等速で変位が増加しており、その平均速度は、0.49m/sと0.95m/sである。また、公称1.5m/sでは、変位35mm付近まで等速であるが、その後ブレーキがかかり速度が落ちている。35mmまでの平均速度は、2.28m/sとなっている。

## 2.4 重錘落下衝突実験

図-6および写真-4に、重錘落下衝突実験の概要を示す。重錘は曲率半径0.1mの半球状の衝突部(13.75kg)の上に半径35mmの細首の円接部(26.7kg)を介して方板を重ねた質量部(228.0kg)を接続したものである。この細首部にひずみゲージを貼付して1000kN重錘ロードセル

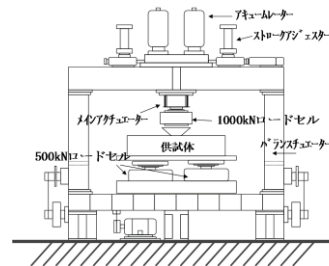


図-4 実験装置概要(静的および急速荷重実験)



写真-3 静的および急速荷重実験セットアップ

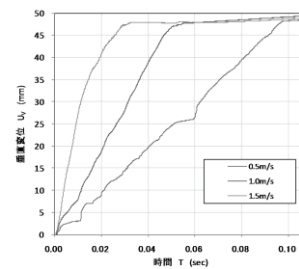


図-5 荷重板変位～時間関係(急速荷重)

を自作した。

測定項目は、入力衝撃力を重錘ロードセルにより、また、供試体の下側に設置した2つの500kNロードセルにより伝達衝撃力を測定した。また、受圧板の垂直方向変位とスライダの水平方向変位を測定範囲±100mmのレーザー式変位計で計測するものとし、急速荷重実験と同様である。

表-1に、全実験における計測項目と設定を示す。なお、計測データはシグナルコンディショナーおよび専用アンプを通した後A/Dコンバータを介してPCにより、20kHzでサンプリングした。

## 2.5 実験ケース

表-2に全実験ケースを示す。静的実験および急速荷重実験は各1回ずつ行った。なお、急速荷重の1.5m/sについて、2回の実験を行ったが、荷重速度や荷重について、ほぼ再現性が保たれていた。

重錘落下衝突実験では、落下高さを1cmの後は2cmから20cmまで2cmずつ、20cmから50cmは5cmずつ増加させ、各2回ずつ実験を行った。

## 3 実験の結果と考察

### 3.1 静的荷重試験

図-7に、荷重と受圧板の垂直変位の関係を示す。これより、増加域荷重と受圧板の垂直変位の関係は概ね線形挙動を示すことがわかる。最大変位の55mmに達し

表-1 計測項目

No.	計測機器	計測項目	記号	備考
1	1000Nロードセル	載荷荷重(衝撃荷重)	$P_m$	落下実験は自作
2	500kNロードセル	伝達荷重	$P_{11}$	ポアホール型
3	500kNロードセル	伝達荷重	$P_{12}$	
4	レーザ式変位計	受圧板の垂直変位	$U_{V1}$	レンジ ±100mm
5	レーザ式変位計	受圧板の垂直変位	$U_{V2}$	
6	レーザ式変位計	スライダの水平変位	$U_{H1}$	
7	レーザ式変位計	スライダの水平変位	$U_{H2}$	
8	加速度計	重錘の落下加速度	$a_1$	500G用
9	加速度計	重錘の落下加速度	$a_2$	

表-2 実験ケース

区分	載荷速度/落下高さ	回数	実験名	備考
静的載荷実験	$3.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	1	ST	復路は、自然回復
	0.5m/s	1	H-0.5	
	1.0m/s	1	H-1.0	
急速載荷実験	1.5m/s	2	H-1.5	2回の結果は一致
	落下高さ1cm	2	I-1	
重錘落下衝突実験	落下高さ2cm	2	I-2	
	落下高さ4cm	2	I-3	
	落下高さ6cm	2	I-4	
	落下高さ8cm	2	I-5	
	落下高さ10cm	2	I-6	
	落下高さ12cm	2	I-7	
	落下高さ14cm	2	I-8	
	落下高さ16cm	2	I-9	
	落下高さ18cm	2	I-10	
	落下高さ20cm	2	I-11	
	落下高さ25cm	2	I-12	
	落下高さ30cm	2	I-13	
	落下高さ35cm	2	I-14	
	落下高さ40cm	2	I-15	
	落下高さ45cm	2	I-16	
	落下高さ50cm	2	I-17	

た後に、除荷に移行すると、45kNであった抵抗力がほぼ同一変位で25kNまで低下し、その後は、やはり線形的に抵抗力が失われている。

図-8には、この間の垂直変位  $U_{V1}$  と2つのスライダの水平変位  $U_{H1}$ ,  $U_{H2}$  の関係を示す。両者には、明らかに1:1の関係があり、正常に変位が垂直から水平に変換されている。参考までに、写真-5に変位55mmにおける積層ゴムの変形状態を示す。積層ゴムの平均せん断変形は、図-9に示すように、垂直変位  $\delta=50\text{mm}$  で89.3%となっており、大きな変形を生じていることがわかる。しかし、図-7に示すように、自力で原型に復元する能力を有しており、再現性は保たれている。

以上のことから、事前実験の観察も考慮して、このクサビ型ダンパーの静的復元力特性は図-10のようにモデル化できる。

$$1) \text{ 載荷域: } P = 0.82U_V \quad (1-a)$$

$$2) \text{ 除荷域: } P = 0.48U_V \quad (1-b)$$

$$3) \text{ 遷移域: } P = \infty U_V \quad (1-c)$$

ここで、 $P$ : 載荷荷重(kN),  $U_V$ : 供試体の受圧板の垂直変位(mm)である。

### 3.2 急速載荷試験

図-11に、急速載荷実験により得られた載荷荷重と時間関係を示す。載荷速度0.5m/sの場合には、載荷直後の  $t=0.000\sim 0.005\text{sec}$  に一瞬荷重が大きくなるが、その後は、 $t=0.600\text{sec}$  まで波があるもののほぼ単調に荷重が増えて、 $t=0.100\text{sec}$  以降は50kNに収束している。載荷速度

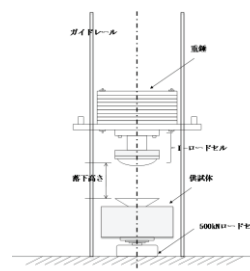


図-6 重錘落下衝突実験概要



写真-4 重錘落下衝突実験セットアップ

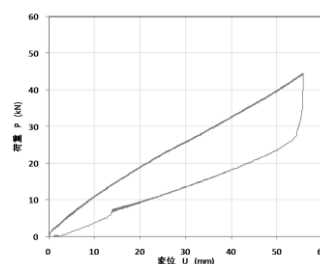


図-7 荷重～変位関係

1.0m/s では、 $t=0.050\text{sec}$  までの一瞬の立ち上がりがさらに大きくなり、その反動で  $t=0.005\sim 0.010\text{sec}$  の間には荷重がほぼ零となっており、再度立ち上がり、 $t=0.020\sim 0.060\text{sec}$  までは、波があるものの単調増加し、やはり50kNに収束する。しかし、載荷速度1.5m/sの場合には、載荷直後の荷重の立ち上がりが顕著になり、 $t=0.010\sim 0.018\text{sec}$  に2度の立ち上がりがあり、 $t=0.180\sim 0.200\text{sec}$  には激しく荷重が増減し、その後荷重が50kNに収束している。

図-12には、この間の垂直変位と水平変位関係を示している。クサビの垂直変位は、滑らかに水平変位に変換されており、変位の変換メカニズムによってこのような荷重の波打ちが生じたのではないことがわかる。

図-13には、載荷点荷重～垂直変位関係を示す。図中には比較のために静的実験の関係も示している。これより、載荷速度0.5m/s, 1.0m/sの場合には、振動のような波が見られるものの、概して静的な載荷の抵抗増加線を下回らない範囲の振動が単調増加している。

しかし、載荷速度1.5m/sの場合には、 $U_V \leq 15\text{mm}$  の載荷直後の抵抗が静的なものとは全く異なり、顕著に大きくなっている。その後  $15\text{mm} \leq U_V \leq 38\text{mm}$  の間は、静的な抵抗とほぼ並行的な増加を示すものの、 $U_V=38\text{mm}$  付近では、何かに衝突したかのような振動波が現れている。

確認のため、図-14には供試体下面の2つのロードセルで計測された伝達衝撃力～変位関係を示す。この場合、 $U_V \leq 10\text{mm}$  以下の小さな波は消えているものの、ほぼ同じ荷重を示しており、載荷荷重は供試体内を伝達されて

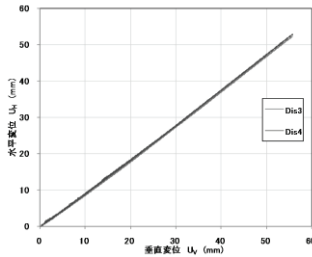


図-8 垂直変位の水平変位への変換（静的）



写真-5 ゴムのせん断変形

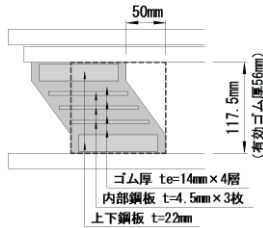


図-9 積層ゴムのせん断変形モデル

いることがわかる。一方、この変位領域の積層ゴムの振動がこれほど大きくなることは考えられない。よって、クサビ部の変位を水平変位に変換させるメカニズムが円滑に働かず、抵抗力は直接金属部だけの経路で伝達されたものと考えられる。

### 3.3 重錘落下衝突実験

#### (1) 衝撃力～時間関係

図-15には、重錘落下高さ  $h=8\text{cm}$  におけるクサビ機構ゴム緩衝装置の衝撃力～時間関係を示す。また、図-16には、同条件の剛結供試体のものを示す。

図-15より、重錘とクサビ型ダンパーの受圧板の間に生ずる重錘衝撃力は、まず、 $t=0.00040\text{sec}$  に急激に立ち上がり、 $t=0.00040\text{sec}$  でピーク値  $150\text{kN}$  を迎え、その後、一旦、零に戻って、 $50\text{kN}$  と  $0\text{kN}$  の間の複雑な波形となっている。一方、供試体下面の伝達衝撃力は、 $t=0.00065\text{sec}$  まで  $0\text{kN}$  が続いている。これは、上面から下面への衝撃力の伝播時間の遅れである。その後、 $t=0.00360\text{sec}$  で最大値を迎え、緩やかに減少して、 $t=0.01055\text{sec}$  でほぼ  $0\text{kN}$  となっている。

図-16の剛結供試体の重錘衝撃力では、クサビ型ダンパーと同じ  $t=0.00040\text{sec}$  に向かって急激に衝撃力が立ち上がり、一旦ピーク値の  $185\text{kN}$  を迎える。その後、 $t=0.00070\text{sec}$  で  $100\text{kN}$  まで下がるが、これに続く時間  $t=0.00400\text{sec}$  まで  $130\text{kN}$  付近の力が継続し、 $t=0.00400\sim 0.00500\text{sec}$  の間ほぼ線形的に  $0\text{kN}$  に向かって減少している。

一方、伝達衝撃力では、 $t=0.00025\text{sec}$  までは  $0\text{kN}$  が続

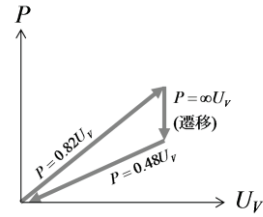


図-10 静的荷重～変位関係モデル

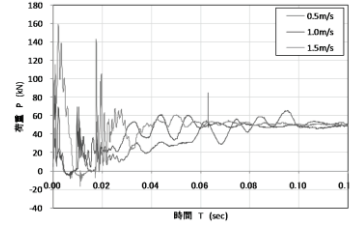


図-11 荷重～時間関係

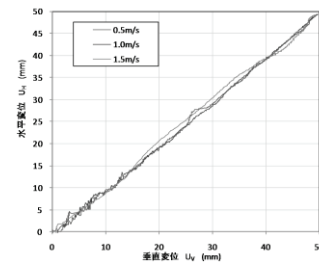


図-12 水平変位～垂直変位関係

いているが、この時間遅れは、クサビ型ダンパーの約  $1/3$  と短くなっている。その後、急に衝撃力は増加して、 $t=0.00300\sim 0.00350\text{sec}$  まで  $190\sim 210\text{kN}$  の緩やかな形状の力が続き、 $t=0.00305\text{sec}$  で最大値を迎えた後は、 $t=0.00500\text{sec}$  に向かって線形的に減少している。

図-15と図-16の比較によると、明らかに重錘衝撃力の力積は剛結型の方が大きくなっている。この力積の大小関係は、伝達衝撃力においても同様である。

#### (2) 衝撃力～変位関係

図-17には、落下高さ  $8\text{cm}$  でクサビ型ダンパーの変位の時刻履歴を示す。これより、垂直、水平変位のいずれも、概して時間とともに単調増加しているが、最初の  $t=0.01500\text{sec}$  ほど、 $U_{H1}$  が、 $t=0.00265\text{sec}$  ほど  $U_{H2}$  が  $0\text{kN}$  の状態が続いており、水平変位への変換時間に遅れが生ずることがわかる。

図-18には、 $U_{H1}$ 、 $U_{H2}$ それぞれの水平変位と垂直変位の（平均）関係を示す。これより、概ね、1:1に変位が変換されており、クサビの垂直変位がスライダ変位へ、そして積層ゴムのせん断変形へと伝達されていることが伺える。ただし、 $U_{H2}$ では、 $1.7\text{mm}$ まで水平変位が生じておらず、平均して垂直変位  $1\text{mm}$ 以下の変位変換が円滑に行われていない。

図-19、20には、それぞれのクサビ型ダンパーおよび剛結型供試体の衝撃力～垂直変位関係を示す。

図-19より、クサビ型ダンパーでは、打撃直後の  $U_v \leq 0.05\text{mm}$  における鋭い山形の衝撃力を除いて、重錘衝撃力は伝達衝撃力を中心として、複雑な波が増減した

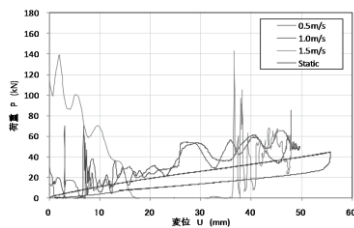


図-13 载荷荷重～垂直変位関係

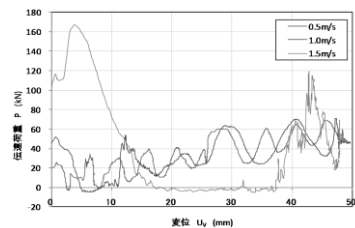


図-14 伝達荷重～変位関係

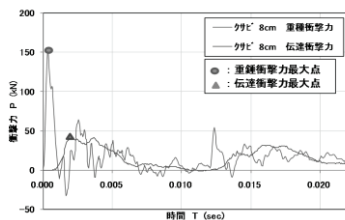


図-15 衝撃力～時間関係 (クサビ, h=8cm)

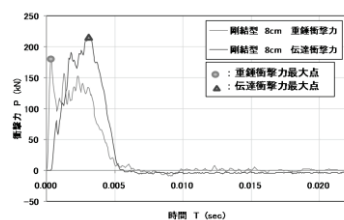


図-16 衝撃力～時間関係 (剛結, h=8cm)

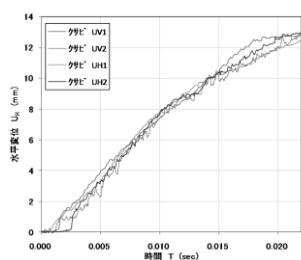


図-17 変位～時間関係

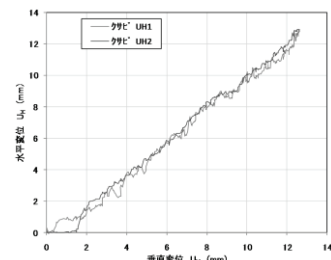


図-18 水平変位～垂直変位関係

ような衝撃力～変位関係を示している。一方、図-20の剛結の場合には、 $t=0.0003\text{sec}$ までの急激に大きくなった重錘衝撃力は、 $t=0.00035\text{sec}$ まで継続しており、その後一気に $0\text{kN}$ まで減少している。この傾向は伝達衝撃力も同じである。それぞれのピーク値は、重錘衝撃力が $155\text{kN}$ であるのに対し、伝達衝撃力は $220\text{kN}$ と伝達衝撃力の方が大きくなっている。

参考までに、図-21には、全重錘落下実験の最大衝撃力～最大垂直変位関係を示す。図-19、図-20で観察されるように、実験における最大力発生時間と最大変位発生時間は異なるため、この2つのデータの直接的因果関係はないものの、概して線形関係が成立している。つまり、大きな最大衝撃力を生ずる実験では、最大変位応答も大きくなっている。

### (3) 伝達衝撃力緩衝効果

図-22には、全重錘落下衝突実験による最大衝撃力～落下高さ関係を示す。これより、クサビ型ダンパーも剛結型供試体も最大重錘衝撃力に関しては、あまり差異がないことがわかる。これは、クサビ型ダンパーにおいても重錘衝撃力の最大値は衝突直後のクサビが十分に動き始める前に生起しているためである。これは、急速載荷実験の $1.5\text{m/s}$ の結果でも考察された動き始めのクサビとスライダの円滑な変位変換がなされていない可能性が考えられる。また、クサビやスライダの質量が大きい場合、その慣性力の影響も考えられる。しかし、伝達衝撃力の最大値では、剛結型では重錘衝撃力とほとんど変わらないのに対して、クサビ型ダンパーの場合では、

明瞭に小さくなっている。そこで、これらの最大伝達衝撃力との比を求めると、図-23ようになる。

図-23の剛結型供試体では、落下高さ $1\sim 20\text{cm}$ まで、ほぼ $1.2$ 倍程度となっているのに対して、クサビ型ダンパーでは、落下高さ $1\text{cm}$ で $0.55$ 倍であったものが、落下高さ $10\text{cm}$ で $0.2$ 倍まで緩やかに減少し、落下高さ $40\text{cm}$ まで $0.25$ 程度と一定である。その後、やや増加傾向で $50\text{cm}$ で $0.35$ 倍となっている。いずれにしても、剛結型供試体に比べて明瞭に伝達衝撃力の低減に関する緩衝効果があることがわかる。

### (4) 衝突後の運動エネルギー減殺効果

図-15および図-16に示したように各落下実験では、重錘の受けた反作用の時刻歴が得られる。これより、衝突後の重錘の速度が推定できる。

$$v_2 = v_1 - \frac{I}{m} \quad (2)$$

ここで、 $v_2$ : 衝突後の速度、 $v_1$ : 衝突前の速度 ( $\sqrt{2gh}$ )、 $m$ : 重錘質量、 $I$ : 力積である。

よって、重錘の衝突前後に失った運動エネルギーが推定できる。

$$\Delta E = \frac{1}{2} m(v_1^2 - v_2^2) \quad (3)$$

ここで、 $\Delta E$ : 失った運動エネルギーである。

図-25に、(2)式より求めた落下速度および衝突後速度～落下高さ関係を示す。これよりクサビ型ダンパーおよび剛結供試体において、衝突前の落下速度は大きな違いが生じておらず、また、衝突後の速度についても、両者

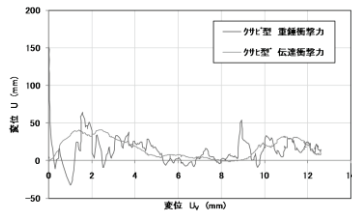


図-19 衝撃力～変位関係 (クサビ型,  $h=8\text{cm}$ )

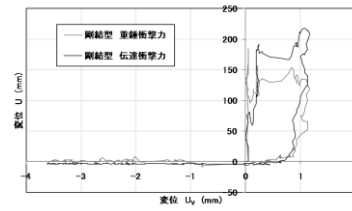


図-20 衝撃力～変位関係 (剛結型,  $h=8\text{cm}$ )

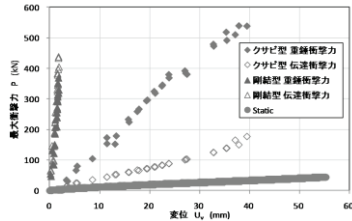


図-21 最大衝撃力～最大垂直変位関係

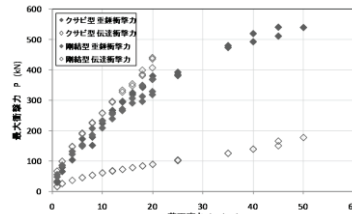


図-22 最大衝撃力～落下高さ関係

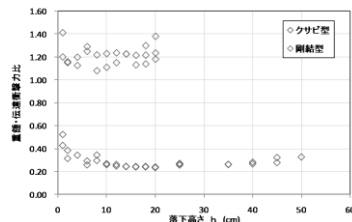


図-23 重錘・伝達衝撃力比～落下高さ関係

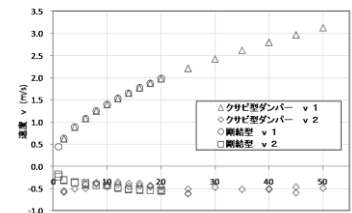


図-25 速度～落下高さ関係

に大きな差は生じていない。

図-26に、(3)式より求めた消失エネルギー～入力エネルギー関係を示す。これより、クサビ型ダンパーと剛結型供試体も消失エネルギーに関してはあまり差がないことがわかる。これは剛結型供試体であっても、内部に複雑な衝突箇所が存在すると、エネルギー逸散が生起するためと考えられる。また、図中には、反発係数が零に相当する100%消失を破線で示しているが、明らかに衝突エネルギー1500J以下の全実験ケースで、95%以上のエネルギーが消失していることがわかる。

#### 4. 結論

本研究は、建築分野で使用が進んでいる積層ゴムのせん断抵抗性能を活用したクサビ型ダンパーに対して、静的載荷試験、急速載荷試験および重錘落下衝突実験を実施し、緩衝効果について検討したものである。得られた結果を要約すると、以下ようになる。

- 1) クサビ型ダンパーでは、衝撃受圧面の最大衝撃力を背面の伝達衝撃力において大幅に低減できる。特に橋梁構造の桁遊間として、一般的な20cm程度を想定した落下高さでは、23%に低減できることが明らかになった。
- 2) 45°滑面を介してクサビ型受圧板の変位を90°変換する機構は、概ね期待性能を発揮する。
- 3) 積層ゴムのせん断変形は、総ゴム厚の89.3%程度までの繰り返し使用をしても、性能は保持される。
- 4) 今後は、実験パラメータを拡大した性能確認や、橋梁システムにおける本装置の効果に関する解析的検討

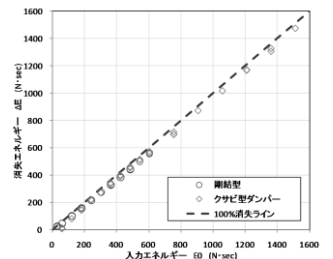


図-26 消失運動エネルギー～入力エネルギー関係

が必要である。

#### 謝辞

本実験を行うにあたり、防衛大学校理工学研究科後期課程渋谷一氏、同前期課程堀口俊行氏の協力を得た。これに対して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002
- 2) 北原武嗣，梶田幸秀，西本安志，香月智：鋼材質量を考慮したゴム製緩衝材の衝撃力低減効果に関する桁間衝突実験，Proc.28th JSCE Earthquake Engineer Symposium, 2005
- 3) 吉田純司，阿部雅人，藤野陽三：高減衰ゴム材料の構成則，土木学会論文集 No.710/I-60,209-224, 2002,7
- 4) 大田貞次，黒木勇人，香月智，石川信隆：高速載荷を受ける鋼・コンクリート合成梁の動的弾性挙動に関する一考察，土木学科論文集 Vol.45A, 1999,3

(2010年11月15日受付)