

長周期地震動による大変形を柔に支える緩衝装置の開発

株式会社ビービーエム	正会員	田中 健司
株式会社ビービーエム	正会員	小泉 貴宏
株式会社ビービーエム	正会員	合田 裕一
株式会社ビービーエム	正会員	杉山 洋
株式会社エイト日本技術開発	正会員	廣瀬 彰則

1. 目的

東海・東南海・南海の3連動地震の防災対策強化が求められる中、橋梁構造物等の耐震設計基準の改定が図られている。道路橋においても道路橋示方書¹⁾の改定があり、長周期地震動や強震時間の長期化に伴う構造の大変位応答が課題のひとつとなっている。一方で、新設橋梁の耐震設計や、既設橋梁の耐震補強を計画する場面においては、その橋梁の置かれた社会的環境に適した性能設計を行うために、場合によってはその橋梁の上部構造変位を大きくする場合も考えられる。

このような局面では、過去の巨大地震の被害事例にもあるとおり、橋梁上部構造が隣接上部構造もしくは橋台胸壁に衝突することとなり、被災後の緊急輸送路確保の観点からも耐震性能に着眼した衝撃エネルギーへの対応策・緩衝策が必要である。

また、構造物の新設・既設に関わらず長寿命化も重要課題であり、特に既設社会資本の有効活用という視点では、補修・補強において検討する地震対策が、隣接構造との衝突による衝撃問題を伴う事態へと発展することともなりうる²⁾。

このような背景のもと、巨大地震に伴う構造物の大変位が見込まれる部分（橋梁上部構造の遊間など）に適宜配置して、衝突に伴うエネルギーを吸収する装置の開発・研究の必要性が高まっており³⁾、そのために実施した実験的研究の成果について報告する。従前より構成部材が圧縮破壊することによってエネルギー吸収を図るタイプの緩衝材は存在していたが、対象とする装置は、強震時間が長い状況下で、繰り返しエネルギー吸収を可能とする性能を有するものとしており、その性能を重錘落下試験によって確認している。なお、装置は巨大地震の中で稼動することが求められることから複雑な構造を避け、ゴムのせん断剛性のみに着目したシンプルなものとした。

2. 橋梁等構造物周辺の検討課題

昨今の橋梁等構造物建設もしくは維持管理面において課題となっている検討事項は以下の通りと考える。

新設または既存ストックの維持管理面に関わらず、建設等に関わるコスト縮減が最優先されること。

新設構造物の場合は当然として、既存ストックのメンテナンスにおいても対象構造物の耐用年数の延命化を推進すること。

プレート境界型大規模地震（3連動など）への耐震性能を確保する問題についても、橋梁等構造物が社会基盤の基軸、大規模災害時の復旧・防災・保全

ネットワークの役割も有しており、万一の大災害時においても対応できなければならない。

一方で、このような検討事項に対して橋梁等構造物の計画・設計・メンテナンスの分野では、次にあげるような多くの研究・検討が重ねられてきている。

(1)建設コスト縮減に向けた取り組み

建設等に関わるコスト縮減の具体策としては一例として合理化構造の採用があげられる。

構成部材数の削減や部材の小型化など、技術革新と併せて人的資源管理を容易とし、その結果建設コストの縮減につなげるものがある。

(2)耐震性能および耐震設計法

キーワード 緩衝装置、応答変位、桁間衝突、衝撃エネルギー、延命化、長周期地震動

連絡先 〒104-0033 東京都中央区新川2丁目13番9号 美和ビル 株式会社ビービーエム TEL 03-3523-5864

計算機性能の進化に伴い連たんする多径間橋梁の同時解析が可能となってきた。この結果、大規模な動的非線形応答解析を行うことで部材のエネルギー吸収を考慮した全体としてコストミニマムな設計を行うことが可能となってきた。

しかしながら、このような新設橋梁の計画・設計局面もしくは既設橋梁のメンテナンス局面において、その長寿命化あるいは延命化を検討する場合に「上部構造の桁間衝突」もしくは「上部構造と橋台胸壁との衝突」を考慮しなければならない場面も想定される。

このような状況においては、従来より以下のような緩衝装置が使用されている。

ハニカム型緩衝材^{4),5)}

ゴム緩衝材^{6),7)}

せん断パネル型ダンパー⁸⁾

これらの緩衝装置の多くは復元特性を有しておらず大規模地震時には、その残留変形量の大半が応答変位量の最大値となり、原形に復旧しないものである。

3. 新型緩衝装置開発の必要性

このような環境の中で、たとえば平成24年3月の（道路橋を対象とした）道路橋示方書改定に示されるとおり、橋梁等構造物の耐震設計に関わる基準が見直されており、特に対象とする設計地震波の特長にも以下のようなものがあげられる。

地域別補正係数等の見直し

個別地域の特性をより詳しく評価できるよう補正係数が見直されている。

長周期大規模地震動への対応

L1地震動の継続時間長期化（平成23年東北地方太平洋沖地震 山崎振動観測所地盤上NS成分:主たる振動継続時間=約240秒）への対応も必要となり、構造物によっては極めて大きな変位応答を生じるものも考えられる状況にある。

今後は、橋梁等構造物の水平方向変位応答の大きさとそのコントロール技術が、新設のみならず既設ストックのメンテナンスもしくは災害時の耐震性能も含めた延命化を左右する因子となりうることに注意が払わなければならない。

このような観点で特に橋梁システムについて着目すると、着目する上部構造に作用する慣性力は長周期大規模地震動などにより地盤面もしくは下部構造との相対変位量が極めて大きくなることが予測され、その結果、隣接する上部構造もしくは橋台胸壁と衝突することとなる。

この際の激しい衝撃エネルギーを何らかの形で吸収しなければ、上部構造もしくは橋台胸壁（あるいは下部構造等）の破壊を引き起こし、最悪の場合は落橋事故に至ることも想起できる。

このため、橋梁上部構造の（隣接上部構造もしくは橋台胸壁との）遊間周辺に設置して、この衝撃エネルギーをコントロールするとともに、上部構造の慣性力作用下から開放された後には原形に復元する特性を有することを目的とした新型の緩衝装置を開発することとした。

4. 新型緩衝装置(クサビ機構ゴム緩衝装置)の概要

図-1に、クサビ機構ゴム緩衝装置の概要図を示す。クサビ機構ゴム緩衝装置は、受圧部の先端が金属のクサビ状に加工されており、鉛直変位が作用するとスライダが左右に移動することにより水平変位に変換される。復元装置に積層ゴムを用いており、スライダの水平変位に伴い積層ゴムがせん断変形する構造である。積層ゴムは、一端が本体部に固定され、他端は本体に固定されている。また、受圧板クサビは、ガイドレールに沿って上下する構造となっている。

5. 新型装置の静的載荷試験

5.1 試験の概要

本研究では、クサビ機構ゴム緩衝装置の基本的特性と、クサビ機能の有効性を確認することを目的と

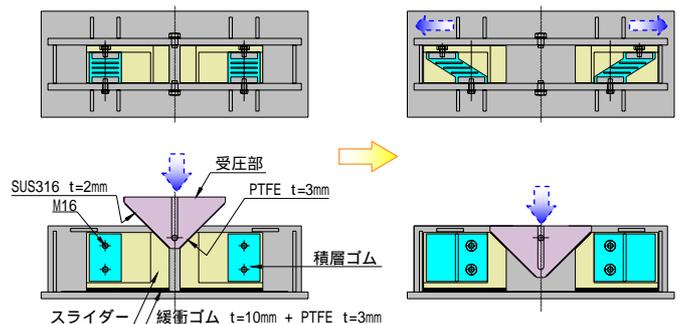


図-1 クサビ機構ゴム緩衝装置の概要図

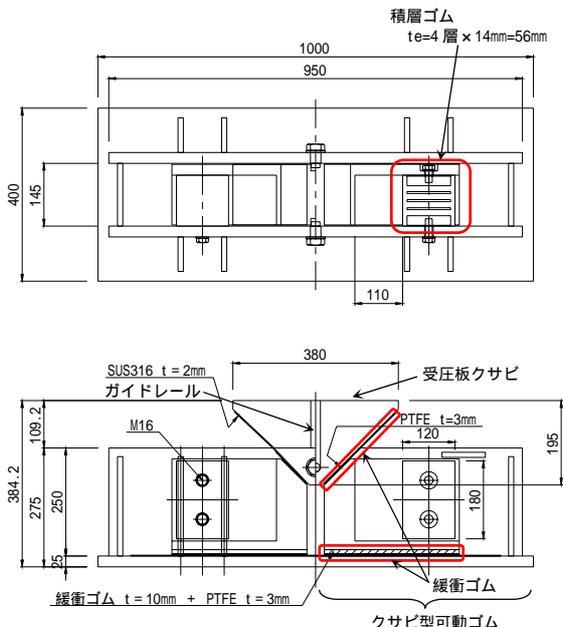


図-2 クサビ機構ゴム緩衝装置供試体

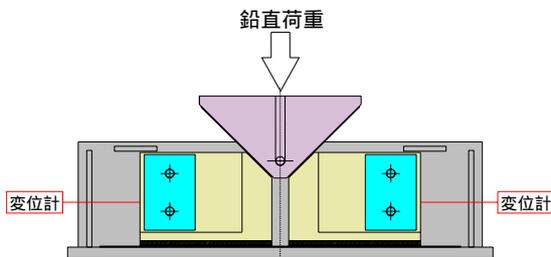


図-3 試験方法

して、単純載荷試験と静的反復載荷試験を行った。

単純載荷試験は、荷重と変位の関係による鉛直荷重と鉛直変位および水平変位の関係から、復元力特性と減衰特性を確認する。

静的反復載荷試験は、鉛直荷重が載荷された後に、鉛直荷重が完全に除荷される前の戻り途中で再び鉛直荷重が載荷されたときの、復元力特性と減衰特性を確認する。

5.2 試験供試体

図-2に、クサビ機構ゴム緩衝装置供試体の基本寸法図を示す。各主要部材の質量は、受圧板クサビは47.9kg、スライダは52.4kg、積層ゴムは18.0kgである。積層ゴムは、せん断弾性係数 G12の天然ゴムを使用している。クサビとスライダとの摩擦面は、それぞれテフロンとステンレス加工とし、摩擦係数は0.1程度である。

5.3 単純載荷試験

(1) 試験方法

表-1 試験結果

	鉛直変位 Dv (mm)	鉛直荷重 Pmax (kN)	水平変位 Dh (mm)	残留変位 (mm)
1サイクル目	100.42	116.33	98.05	10.45
2サイクル目	100.10	108.82	97.45	10.22
3サイクル目	100.40	105.08	97.10	8.90
4サイクル目	98.37	102.27	96.22	3.50

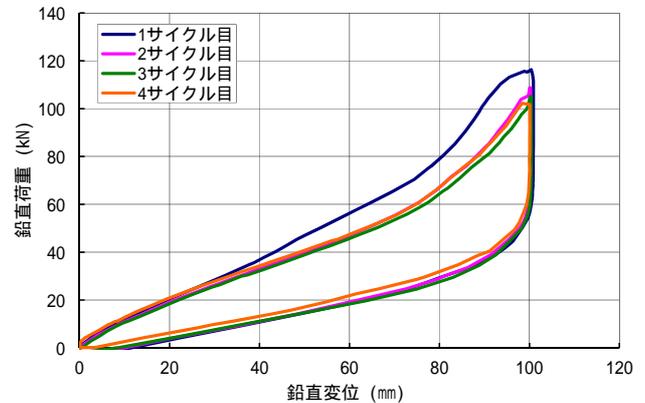


図-4 鉛直荷重と鉛直変位の関係

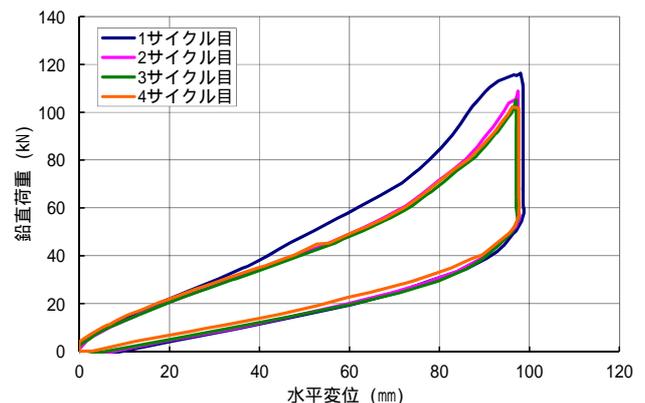


図-5 鉛直荷重と水平変位の関係

図-3に試験方法の概略図を示す。鉛直荷重を鉛直変位が100mmになるまで載荷し、その後0mmになるまで除荷する。これを繰り返し4回行った。

計測項目は、鉛直荷重、鉛直変位および水平変位とし、鉛直荷重をロードセルにより、鉛直変位および水平変位を変位計により測定した。

(2) 試験結果および考察

表-1に試験結果を、図-4および図-5に鉛直荷重、鉛直変位および水平変位の関係を示す。鉛直変位を水平変位に変換するクサビの角度が45°であるため、鉛直変位と水平変位は同じ変位量となるはずである。しかし、表-1に示すように僅かに異なる結果となったが、概ね、1:1に変位が変換されていることが確認できた。なお、僅かな差異は、供試体のガタや製作公差の影響と考えられる。

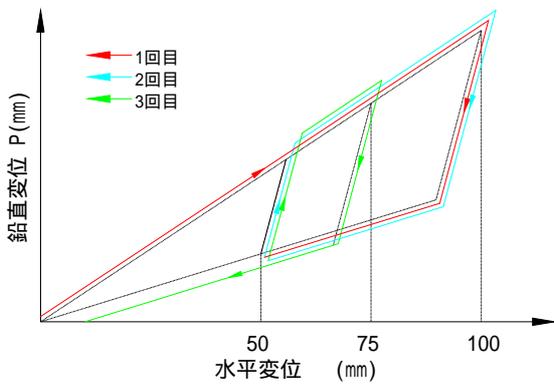


図-6 荷重方法

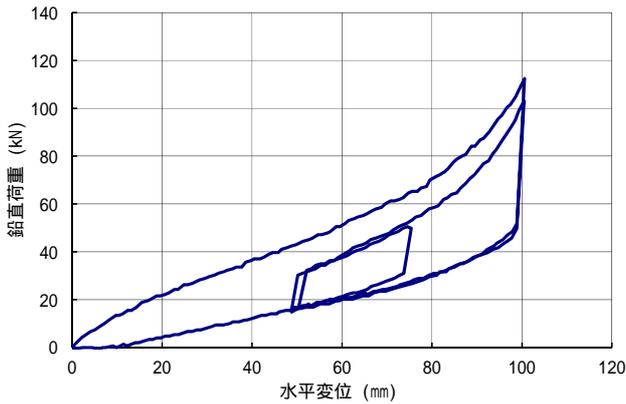


図-7 鉛直荷重-鉛直変位の関係 (1回目)

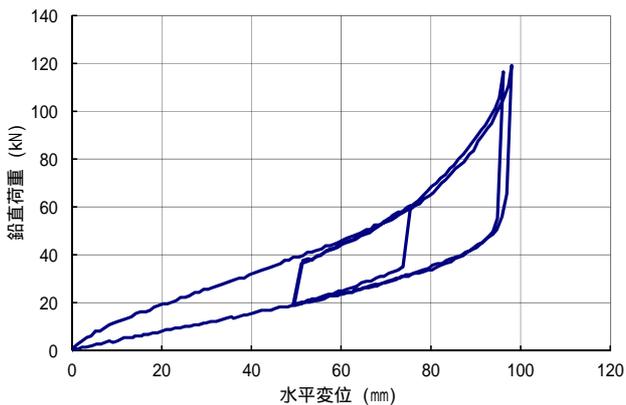


図-8 鉛直荷重-鉛直変位の関係 (2回目)

図-4および図-5に示すように、1サイクル目は鉛直荷重がやや大きめになる傾向にあるが、2サイクル目からは安定していた。また、2サイクル目から4サイクル目までの減衰定数の平均値は8%であった。

以上のことから、クサビ機構ゴム緩衝装置は復元特性を有し、繰り返しエネルギーを吸収する性能を有することが確認できた。

5.3 静的反復荷重試験

(1) 試験方法

鉛直荷重の荷重方法は、図-6に示すように、鉛直変位が100mmになるまで荷重し、その後50mmになるまで除荷し、再び鉛直変位が100mmになるまで載

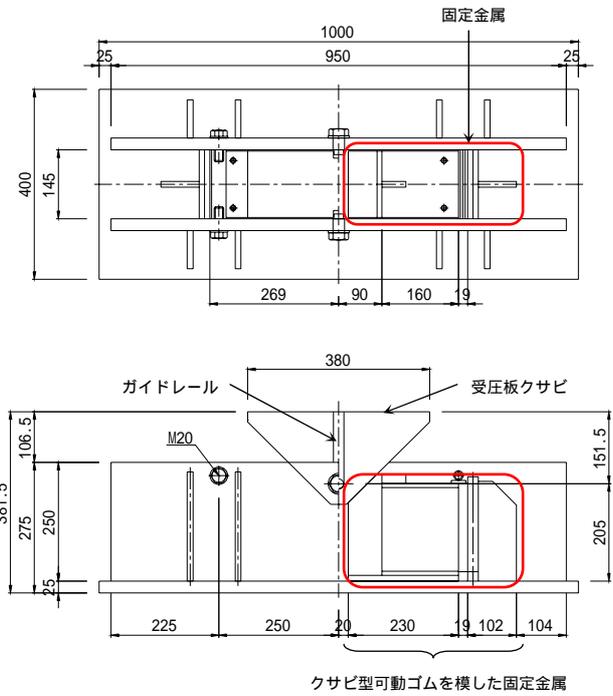


図-9 剛結供試体

荷し50mmになるまで除荷する。その後、鉛直変位が70mmになるまで荷重し、0mmになるまで除荷する。

(2) 試験結果および考察

図-7に示すように、1回目の荷重試験では静的荷重試験と同様に、1サイクル目は鉛直荷重がやや大きめになる傾向にあるが、図-8に示すように、2回目の荷重試験では、2サイクル目以降もほぼ1サイクル目の履歴に重なる結果となった。

以上のことから、クサビ機構ゴム緩衝装置は反復繰返し荷重試験においても復元特性を有し、繰り返しエネルギーを吸収する性能を有することが確認できた。

6. 重錘落下試験

6.1 試験の概要

クサビ機構ゴム緩衝装置の衝撃力の吸収性能を確認する目的として、クサビ機構ゴム緩衝装置と剛結供試体を用いて重錘落下試験を行い、それぞれの衝撃力や伝達衝撃力の違いを確認した。

6.2 試験供試体および試験方法

クサビ機構ゴム緩衝装置供試体は、図-2に示す静的荷重試験で用いたものを使用する。

剛結供試体は、図-9に示すように、クサビ機構ゴム緩衝装置の積層ゴムを固定金属に置き換えた構造

表-2 計測項目

No.	計測機器	計測項目	記号	備考
1	1000kNロードセル	載荷荷重(衝撃荷重)	P_{in}	自作
2	500kNロードセル	伝達荷重	P_{t1}	ボアホール型
3	500kNロードセル	伝達荷重	P_{t2}	
4	レーザー式変位計	受圧板の垂直変位	U_{v1}	
5	レーザー式変位計	受圧板の垂直変位	U_{v2}	
6	レーザー式変位計	スライダの水平変位	U_{H1}	
7	レーザー式変位計	スライダの水平変位	U_{H2}	
8	加速度計	重錘の落下速度	1	500G用
9	加速度計	重錘の落下速度	2	

表-3 試験ケース

区分	落下高さ	回数
重錘落下試験	落下高さ1cm	2
	落下高さ2cm	2
	落下高さ4cm	2
	落下高さ6cm	2
	落下高さ8cm	2
	落下高さ10cm	2
	落下高さ12cm	2
	落下高さ14cm	2
	落下高さ16cm	2
	落下高さ18cm	2
	落下高さ20cm	2
	落下高さ25cm	2
	落下高さ30cm	2
	落下高さ35cm	2
落下高さ40cm	2	
落下高さ45cm	2	
落下高さ50cm	2	

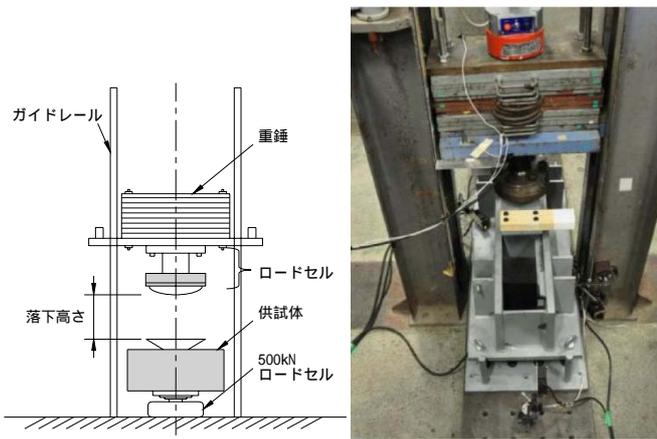


写真-1 重錘落下試験

図-10 重錘落下試験概要 写真-1 重錘落下試験である。スライダ機構は全く機能せず、クサビが固定金属により固定されたスライダの上に置かれた状態である。

図-10 および写真-1 に、重錘落下試験の概要を示す。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 1,000kN 重錘ロードセルを自作した。

表-2 に、計測項目と設定を示す。測定項目は、衝撃力について、入力衝撃力を重錘ロードセルにより、伝達衝撃力を供試体の下側に設置した 2 台の 500kN ロードセルにより測定し、変位については、受圧板の鉛直方向変位とスライダの水平方向変位をレーザー式変位計 (測定範囲 ±100mm) で計測した。また、重錘加速度を鋼板部の下端に設置した加速度計で計測した。

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。

表-3 に試験ケースを示す。重錘落下試験は、落下高さを 2cm から 20cm まで 2cm ずつ 20cm から 50cm は 5cm ずつ増加させ、各 2 回ずつ行った。

6.3 試験結果および考察

(1) 衝撃力と時間の関係

図-11 にクサビ機構ゴム緩衝装置、図-12 に剛結供試体の重錘落下高さ $h=8\text{cm}$ における衝撃力と時間の関係を示す。

重錘とクサビ機構ゴム緩衝装置の受圧板の間に生ずる重錘衝撃力は、図-11 によると、まず、

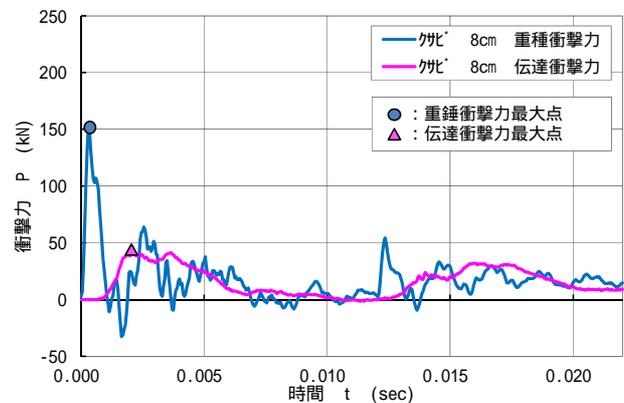


図-11 衝撃力と時間の関係 (クサビ, $h=8\text{cm}$)

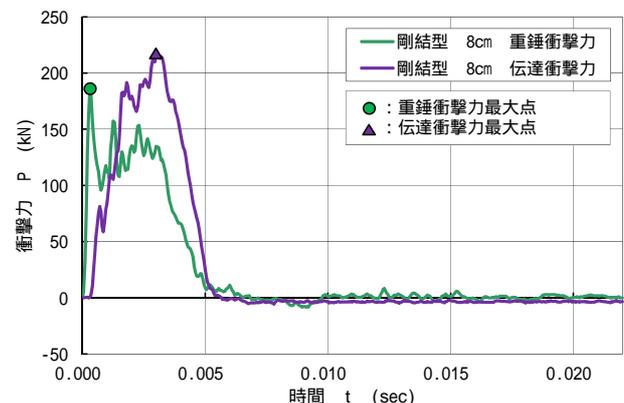


図-12 衝撃力と時間の関係 (剛結, $h=8\text{cm}$)

$t=0.00040\text{sec}$ で急激に立ち上がり衝撃力の最大値 150kN を迎え、その後、一旦、 0kN に戻り、 50kN と 0kN の間で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 0kN 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 0kN となっている。

図-12 によると、剛結供試体の重錘衝撃力は、クサビ機構ゴム緩衝装置と同じ様に $t=0.00040\text{sec}$ に向かって急激に衝撃力が立ち上がり、最大値 185kN を迎え、その後 $t=0.00070\text{sec}$ で 100kN まで下がるが、これに続く時間 $t=0.00400\text{sec}$ まで 130kN 付近の力が継続し、 $t=0.00400 \sim 0.00500\text{sec}$ の間でほぼ線形的に 0kN に向かって減少している。一方、伝達衝撃力は、 $t=0.00025\text{sec}$ まで 0kN が続いているが、この時間遅れは、クサビ機構ゴム緩衝装置の約 $1/3$ 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 $190 \sim 210\text{kN}$ の緩やかな上昇が続き、 $t=0.00305\text{sec}$ 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。

(2) 衝撃力と変位の関係

図-13 および図-14 に、クサビ機構ゴム緩衝装置および剛結型供試体の重錘落下高さ $h=8\text{cm}$ における衝撃力と垂直変位の関係を示す。

図-13 によると、クサビ機構ゴム緩衝装置の重錘衝撃力は、打撃直後の $U_v=0.05\text{mm}$ での鋭い山形の衝撃力を除いて、伝達衝撃力を中心として、複雑な波が増減したような衝撃力と変位の関係を示している。一方、図-14 の剛結型の場合には、 $t=0.0003\text{sec}$ 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 0kN まで減少している。この傾向は伝達衝撃力も同じである。それぞれの最大値は、重錘衝撃力が 155kN であるのに対し、伝達衝撃力は 220kN と伝達衝撃力の方が大きくなっている。

図-15 に重錘落下試験を行った全ての最大衝撃力と最大垂直変位の関係を示す。図-13 および図-14 で分かるように、試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。したがって、大きな最大衝撃力を生ずる

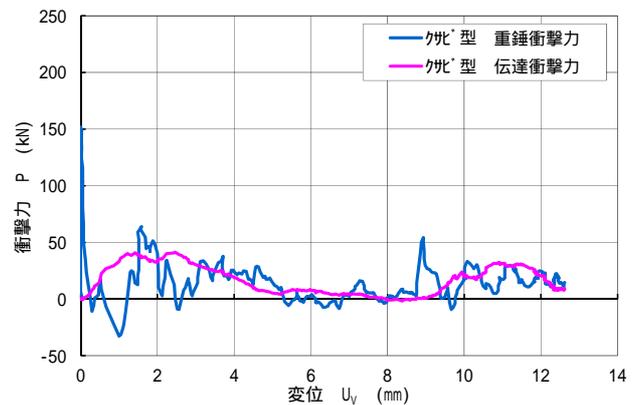


図-13 衝撃力と変位の関係（クサビ型， $h=8\text{cm}$ ）

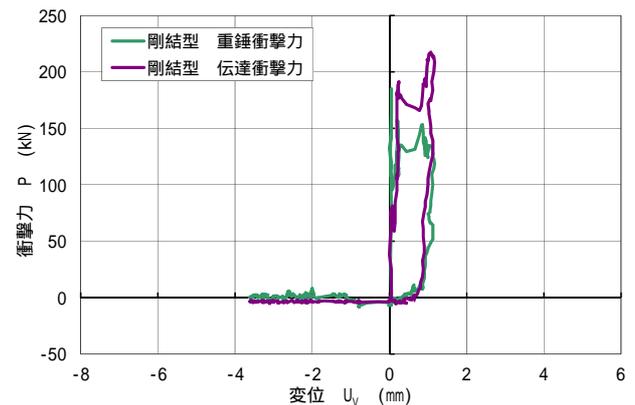


図-14 衝撃力と変位の関係（剛結型， $h=8\text{cm}$ ）

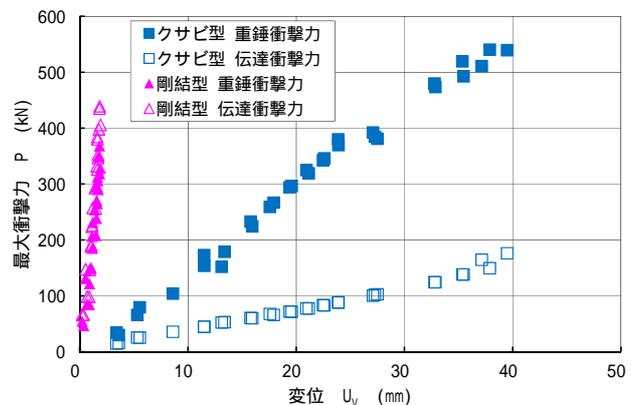


図-15 最大衝撃力と最大垂直変位の関係

試験では、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-16 に重錘落下試験を行った全ての最大衝撃力と落下高さの関係を示す。

図から分かるように、クサビ機構ゴム緩衝装置も剛結型供試体も最大重錘衝撃力に対して、あまり差異がない。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、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およびクサビやスライダ自体の質量が大きいため、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、クサビ機構ゴム緩衝装置の場合では、明らか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-17のようになる。

図-17の剛結型供試体では、落下高さ1~20cmまで、ほぼ1.2倍程度となっているのに対して、クサビ機構ゴム緩衝装置では、落下高さ1cmで0.55倍であったものが、落下高さ10cmで0.2倍まで緩やかに減少し、落下高さ40cmまで0.25程度と一定である。その後、やや増加傾向となり50cmで0.35倍となっている。いずれにしろ、剛結型供試体に比べて明らかに伝達衝撃力の低減による緩衝効果があることがわかる。

7. 結論

- ・軸方向衝撃力を45°（直角方向）に配置したゴムのせん断剛性を用いた緩衝装置の効果を確認した。
- ・入力した衝撃力に対して受圧側構造物への伝達衝撃力は、20~30%程度に抑えられることが確認できた。
- ・下部・基礎構造などの補強が容易でない構造等の補強手法ともなり得る。
- ・重錘落下試験でも装置のゴムに載荷後の復元特性が残存している。
- ・繰返し発生するであろう予震等への対応にも適切な配置を検討することが可能である。
- ・装置の減衰特性は静的載荷試験の結果を基に定めているが、この特性を採用する構造全体の適切なモデル化を組合せることで、構造等に衝突を考慮した解析を行うことも可能となる。

なお、本研究・実験の推進にあたっては、
香月 智 防衛大学校教授の多方面にわたるご指導をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，2012.3.
- 2) 小倉祐介，運上茂樹：地震時に桁の衝突を受ける橋台の挙動特性，土木学会地震工学論文集，Vol.27，2003.12.

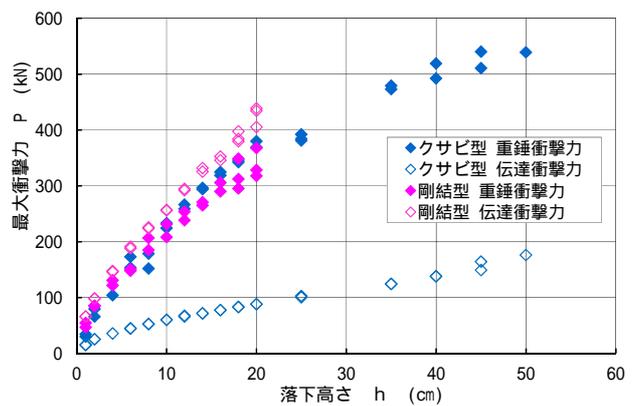


図-16 最大衝撃力と落下高さの関係

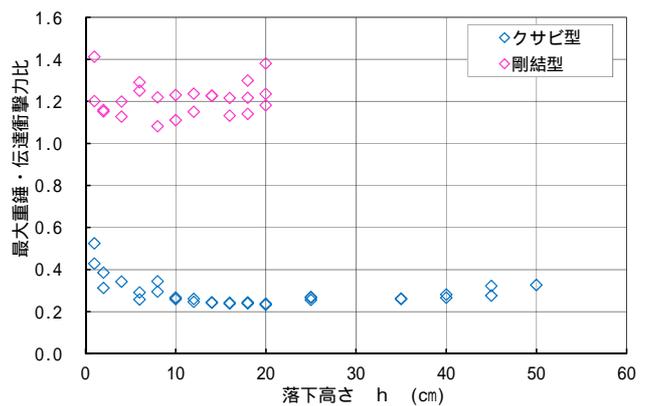


図-17 重錘・伝達衝撃力比と落下高さの関係

- 3) 北原武嗣，田中賢太郎，松本力，梶田幸秀，西本安志：桁間衝突用緩衝材ゴムの簡易設計手法に関する検討，土木学会地震工学研究発表会論文集，2009.5.
- 4) 紫桃孝一郎，上東泰，野島昭二：落橋防止システム用緩衝材の開発，EXTEC，Vol.13，No.3，pp50-52，1999.12.
- 5) 野島昭二，上東泰，石田博，野々村千里：緩衝材を併用した落橋防止システムの検討，Vol.53/-B159，pp318-319，1998.10.
- 6) 濱本朋久，森山卓郎，西本安志，石川信隆：PC橋の桁衝突におけるゴム緩衝材の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp979-984，2005.6.
- 7) 財団法人 土木研究センター：落橋防止構造設計ガイドライン（案），2005.7.
- 8) 小池洋平，谷中聡久，宇佐美勉，葛漢彬，尾下里治，佐合大，鶴野禎史：高機能補剛せん断パネル型ダンパーの開発に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.54A，pp372-381，2008.3.