

## 同じ位置エネルギーを与えた場合の積層繊維補強ゴムの衝撃力緩和効果

Impact Force Moderating Effect of Poly Rubber Fiber under Free Drop Tests with Same Potential Energy

石丸和宏\*, 西本安志\*\*

Kazuhiro Ishimaru, Yasushi Nishimoto

\*博士(工学), 明石工業高等専門学校, 都市システム工学科 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3)

\*\*博士(工学), シバタ工業, (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058)

*Key Words: Poly Rubber Fiber, Potential Energy, Impact Force, Moderating Effect*

キーワード: 積層繊維補強ゴム, 位置エネルギー, 衝撃力, 緩和効果

### 1. はじめに

1995年(平成7年)1月17日の午前5時46分頃に明石海峡付近を震源地とする兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)が発生した。M7.3の巨大な地震が都市の直下で発生したことにより、高速道路や新幹線の高架橋が倒壊し、多くの住宅やビルが破壊され、大きな災害を受けた。倒壊した構造物の多くは耐震設計基準が定められた1981年以前に施工されたものに集中していたり、兵庫県南部地震によって、土木鋼構造物ならびに各都市機能が甚大な被害を受けたことに鑑み、土木構造物全体の被害内容やその原因について調査・研究され<sup>2)</sup>、その破壊形式は水平動による破壊形態のものが多かったが、衝撃的な鉛直力によるものと考えられる破壊形態のものもあった。しかしながら、地震計の捉えた兵庫県南部地震の上下動の最大加速度は332.2galであり、それは水平動の最大加速度818.0galの約半分と従来の地震と変わりなく、鉛直力の影響はなかったとされている。ただし、全国各地に設置されている地震計のサンプリングタイムは0.01sec~0.005secであり、衝撃的な鉛直力を捉えられていないことも考えられる。

衝撃的な鉛直力を受けたと考えられる被害の例として、鉄筋コンクリート橋の橋脚部に水平面上に生じた亀裂や、鋼製橋脚の橋脚上部に生じた脆性的な破壊(写真1)、圧縮と考えられる破壊、墓石や岩石の跳躍現象(写真2)などが挙げられる。物体の跳躍現象に関しては、六甲山の岩石の浮き上がり、墓石の飛び跳ね、ピアノや家具の飛び跳ね、車両の飛び上がりなどの証言もある<sup>3)</sup>。これらの現象は地震動による周期的な繰り返し载荷によって発生するものではなく、衝撃的な鉛直力によるものだと考えられる。また、石丸ら<sup>4)</sup>は直下地震で見られる跳び石現象に関する一考察では、水平動により岩石



写真1 鋼製橋脚上部に生じた脆性的な破壊



写真2 岩石の跳躍現象(新潟県中越地震)

の跳躍現象は起こらないと指摘している。

以上のように、地震での構造物への被害が水平動によるものが多くとも、衝撃的な鉛直力が構造物に損傷を生じさせ、それらによって大規模な破壊となる可能性は否定できない。よって、直下地震から構造物を守るために

は、従来までの水平動に対する免震機構に加え、衝撃的な鉛直力に対する免震機構が必要であると考えられる。

これまで、衝撃力の緩衝効果のある素材について、西本<sup>9)</sup>の研究では積層繊維ゴム（以下、PRF と呼ぶ）を取り扱い、基礎的な力学的特性および衝撃力緩和性能について検討されている。また石丸ら<sup>10)</sup>の研究において、PRF の衝撃応答特性を重錘落下実験によって調べ、衝撃伝達荷重-変位曲線を得ることを目的として実験を行っている。しかしながら、計測装置保護のため PRF に作用する衝撃力そのものの計測ができず、そのため、PRF による衝撃力の緩衝効果の割合についてはわかっていない。そこで本研究では、PRF に作用する衝撃力そのものを計測できる装置を作成するとともに、その衝撃力と PRF を介して伝わる衝撃伝達力を比較することで、PRF の衝撃力緩和効果を明らかにし、さらに、PRF の基本性能を調べるためエネルギーに着目し、重錘の重量および落下高さを変えた場合の重錘落下実験を行い、同じ位置エネルギーを与えた場合の PRF の衝撃力緩和効果について調べることを目的とする。

## 2. 実験方法

本研究で取り扱った供試体は PRF および比較のための単純な天然ゴム（以下、総ゴムと呼ぶ）である。PRF の構造概略および寸法を図 1 に示す。PRF は化学繊維材を平面状に加工し、その両面にゴムを圧着させた繊維補強ゴムシートを積層一体化したものであり、ゴムの変形を繊維が拘束することで繊維側の剛性および破断強度が支配的となり、ゴム単体と比べて高耐力を示す。また、繊維材が破断する際にエネルギーが吸収され、衝撃的な鉛直力が軽減されると考えられる。

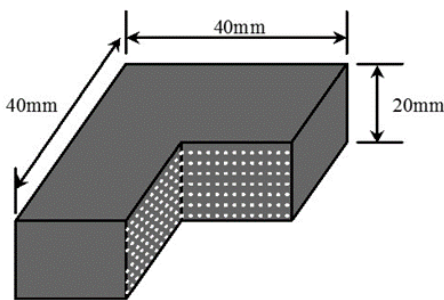


図 1 PRF の構造概略および寸法

本研究の実験の概要図と写真をそれぞれ図 2、写真 3 に示す。衝撃力は重錘の自由落下により発生させる。図 3 は供試体と治具の概要図である。治具円柱部を 1 本から 5 本に増やすことで、大きな衝撃力でも柱が塑性変形しないような治具を作成した。写真 4 に示すように治具を重錘落下装置下の鉄板上に固定し、重錘を供試体上に

自由落下させた際に治具に作用した荷重（以下、衝撃伝達力という）を鋼材（SS400、ヤング率 210kN/mm<sup>2</sup>）の柱のひずみを計測することで求める。1 本の柱につき 4 枚のひずみゲージを向かい合うように貼り付け、4 枚×5 本=20 枚のひずみゲージから得られるひずみを合計することで、曲げの影響を無くし、軸力のみを計測できるようにした。計測において、サンプリングタイムは 20μsec、2500 点計測した。また、変位に関してはレーザー変位計を用いた。衝撃実験では同じ条件において、各 3 回実験を行い、ほぼ同じ結果が得られることを確認した。

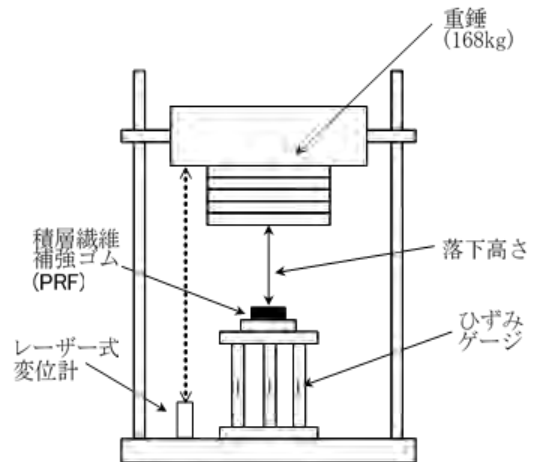


図 2 実験概要図



写真 3 実験装置全体写真

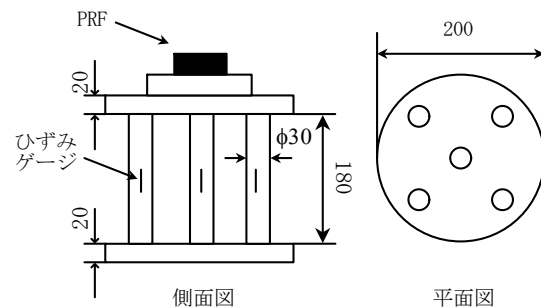


図 3 供試体と治具の概要図

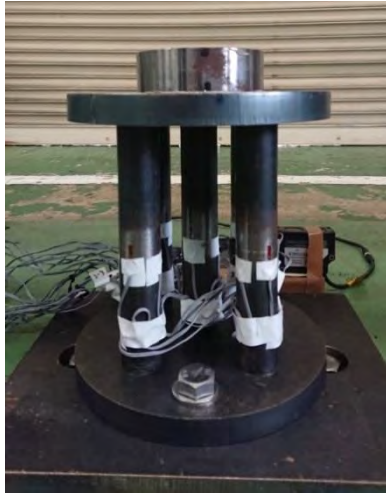


写真4 ひずみ計測の治具

### 3. 結果および考察

#### 3.1 衝撃力の計測

図4は、重錘168kgを落下高さ50mmから250mmで自由落下させた場合における衝撃力-時間応答曲線を比較したもの、表1は各落下高さにおける衝撃力の最大値およびその衝撃作用時間をまとめたものである。両者より、重錘の落下高さが高くなるのに応じて衝撃力の最大値は大きくなっている。最大値を計測した時間は、重錘落下高さ50mm、100mm、150mmと順に短くなるが、落

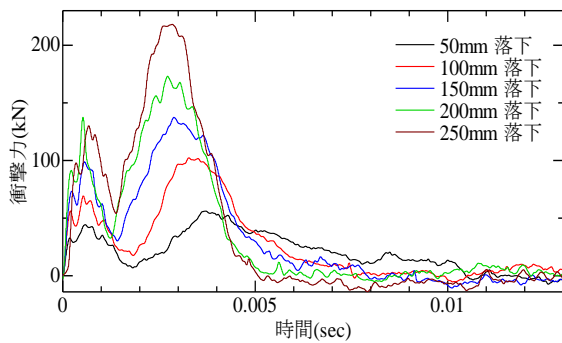


図4 衝撃力-時間応答曲線(落下高さ50mm~250mm)

表1 衝撃力の最大値とその計測時間(落下高さ50mm~250mm)

落下高さ (mm)	最大値 (kN)	計測時間 (s)
50	56.1	0.0037
100	102.3	0.0033
150	137.4	0.0029
200	173.1	0.0027
250	218.1	0.0028

下高さ150mm、200mm、250mmではほぼ同じ時間に最大値となった。

#### 3.2 PRFの衝撃力緩和効果

PRFの衝撃緩和効果を調べるため、重錘落下高さ50mmから250mmにおいて計測された衝撃力が、PRFを使用することでどの程度緩和されるか調べる。治具上に設置したPRFに重錘168kgを各落下高さから自由落下させた場合における衝撃伝達力を縦軸に、時間を横軸に表し、衝撃伝達力-時間応答曲線とする。なお、衝撃伝達力とは治具上に設置したPRFを介して計測された衝撃力のことである。また、比較として天然ゴムで構成された単純なゴム(以下、総ゴムという)の結果を示す。

図5は、落下高さ250mmにおける衝撃伝達力-時間応答曲線である。このときの最大衝撃力は218.1kNであり、PRF使用時の最大衝撃伝達力は60.1kN、総ゴム使用時の最大衝撃伝達力は100.9kNであった。したがって、衝撃力を衝撃伝達力で割った緩和効果はPRFおよび総ゴムそれぞれ72.5%、53.7%であった。作用時間については、PRFおよび総ゴム使用時の両者とも約0.015secであった。

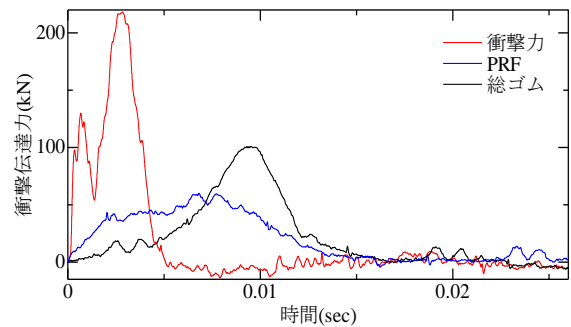


図5 落下高さ250mmにおける衝撃伝達力-時間応答曲線

次に、重錘落下高さ50mmごとの50mm~250mmにおけるPRFの衝撃伝達力-時間応答曲線を図6に示す。落下高さ50mm、100mmでは衝撃伝達力の時間に関しては異なる傾きであるが、150~250mmの場合では、最大衝撃伝達力まではほぼ同様の傾きである。また、150mm~200mmではほぼ同様の最大値の52.5kN、51.2kNとなっている。落下高さ250mmにおいては60.1kNと最大値は再び増加しているが、0.006sec付近までは落下高さ150mmおよび200mmと同じような波形を示している。このことから、PRFは衝撃伝達力のある一定の値まで緩和させるはたらきを有しており、今回用いたPRFではその値は50kN付近であることが推測できる。また、PRFの衝撃力緩和効果には限界があり、今回の実験の結果より50kNから60kNの間がその限界値であると考えられる。

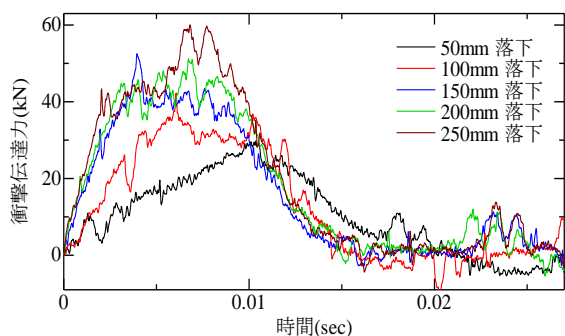


図6 衝撃伝達力-時間応答曲線落下高さ 50mm  
250mm)

衝撃力の最大値および PRF, 総ゴム使用時の衝撃伝達力の最大値と緩和効果をまとめると表2のようになる。この表より、衝撃力は重錘落下高さが高くなるのに応じて増加していくのに対し、PRFを使用した場合、衝撃力の上昇に対し、落下高さ 150mm では衝撃伝達力が 52.5kN, 200mm では 51.2kN とあまり変わらず、その分緩和効果が上昇していることがわかる。それに対し、総ゴムの場合は、重錘落下高さ 50mm の場合を除けば衝撃力を基準として 50~60% の範囲で衝撃力緩和効果が得られていることが分かる。その結果、総ゴムでは衝撃力が上がるにつれ、衝撃伝達力も上がるため、総ゴムよりも PRF の方が緩和効果があることがわかる。

表2 衝撃力および PRF, 総ゴム使用時の衝撃伝達力の最大値と緩和効果(落下高さ 50mm~250mm)

落下高さ (mm)	衝撃力 最大値 (kN)	PRF 使用時		総ゴム使用時	
		衝撃伝達力 最大値 (kN)	緩和 性能 (%)	衝撃伝達力 最大値 (kN)	緩和 性能 (%)
50	56.1	29.8	46.9	34.1	39.3
100	102.3	42.3	58.6	41.9	59.0
150	137.4	52.5	61.8	64.3	53.2
200	173.1	51.2	70.4	86.0	50.3
250	218.1	60.1	72.5	100.9	53.7

図7は、重錘落下高さごとの PRF の衝撃伝達力-変位曲線である。PRF 使用時の衝撃伝達力-変位曲線の特徴として重錘の落下高さ 150mm 以上において変位約 6mm で衝撃伝達力約 40kN が表れた後、衝撃伝達力が約 40±5kN の幅で振れながら変位が増加していることが挙げられる。PRF は埋設された繊維材が破断する際にエネルギーを吸収するので、衝撃伝達力約 40kN において PRF の繊維材が破断を初め、衝撃伝達力を緩和していることが予想される。一方、落下高さ 250mm の衝撃伝達力-変位曲線に着目すると、落下高さ 150mm および 200mm と同様に衝撃伝達力が約 40±5kN で振れた後、変位が 12.5mm を超えたあたりで再び衝撃伝達力が上昇し約 60kN に達

している。このことから、PRF は衝撃伝達力を 50kN 程度に緩和できるものの、変位が 12.5mm を超えたあたりで全ての繊維材が切断され、緩和効果の限界を迎えるのではないかと予想できる。しかし、本実験では落下高さ 250mm までの測定しか行っていないため、PRF の繊維層がすべて破断したかは不明であり、また、PRF の衝撃伝達力の緩和効果の上限を確認するためには更なる実験が必要である。

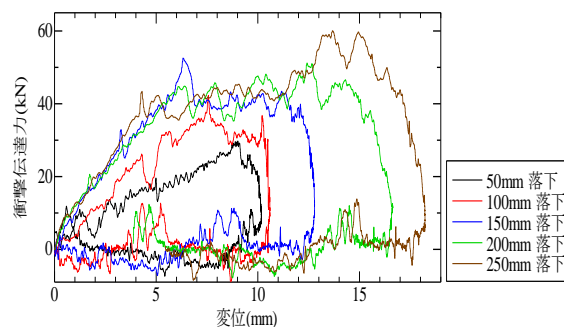


図7 衝撃伝達力-変位曲線(落下高さ 50mm~250mm)

### 3.3 同じ位置エネルギーを与えた場合の PRF の衝撃力緩和効果

図8は、PRF におけるエネルギー 240J の場合の衝撃伝達荷重-時間応答曲線を示している。载荷重量 168kg では高さ 150mm, 118kg では 210mm, 68kg では 360mm の3ケースで実験を行った。実験の結果、衝撃伝達荷重の最大値は载荷重量 168kg, 118kg, 68kg の場合でそれぞれ 50.49kN, 52.07kN, 52.04kN でほぼ等しい。また、PRF の繊維はどの落下高さにおいても破断していた。これよりエネルギー 240J の場合は、载荷重量および落下高さを変えても PRF の衝撃力緩和効果は変わらないといえる。昨年度の研究では、衝撃伝達荷重を約 55kN まで緩和させるはたらきを有している<sup>8)</sup>とされているので、240J の場合では衝撃伝達荷重の最大値の差は少なかったと考えられる。衝撃伝達荷重が最大値に達するまでの時間は载荷重量 168kg, 118kg, 68kg の場合で 0.003sec, 0.0025sec, 0.002sec となっており载荷重量が小さいほど最大値に早く到達することがわかる。これは落下高さが高いほど衝突速度が速くなり、その結果、荷重の伝達が速くなったためであると考えられる。

表3は、落下高さごとの衝突速度、衝突速度から求められる運動エネルギーとその理論値との比較を示している。衝突速度は衝突前の 10 測点分(0.0002sec)の間の変位から求め、理論値は重錘落下前の位置エネルギーである。力学的エネルギー保存則では、重錘落下前の位置エネルギーと衝突直前の運動エネルギーは等しいが、表3より、位置エネルギーと運動エネルギーには多少の誤差がある。これは重錘落下の際の空気抵抗や重錘とガイドとの摩擦抵抗であると思われる。

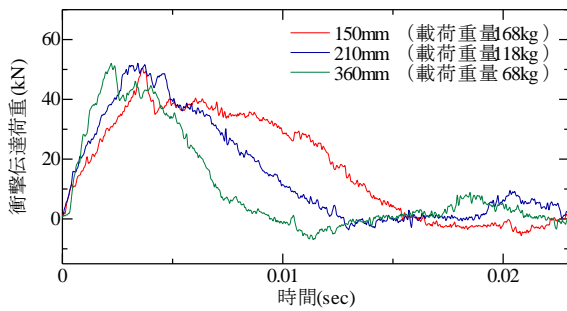


図8 PRFの衝撃伝達荷重-時間応答曲線 240J

表3 衝突速度および運動エネルギー (240J)

落下高さ (mm)	衝突速度 (m/s)	運動エネルギー (J)	位置エネルギー (J)	エネルギー損失 (%)
150 (載荷重量 168kg)	1.650	228.69	246.96	7.4
210 (載荷重量 118kg)	2.000	236.00	242.84	2.8
360 (載荷重量 68kg)	2.600	229.84	239.90	4.2

エネルギー 240J の場合の PRF の変位-時間応答曲線を図9に示す。変位の最大値は載荷重量 168kg, 118kg, 68kg でそれぞれ 14.6mm, 14.9mm, 17.4mm となっている。同一エネルギーを与えた場合、載荷重量が小さいほど変位が大きくなる傾向があると推測できる。また、変位が最大値を示すまでの時間は衝撃伝達荷重と同様に載荷重量が小さくなると早くなっている。変位に関しても、落下高さが高いほど衝突速度が速くなり、PRFの変形が速くなったためであると考えられる。

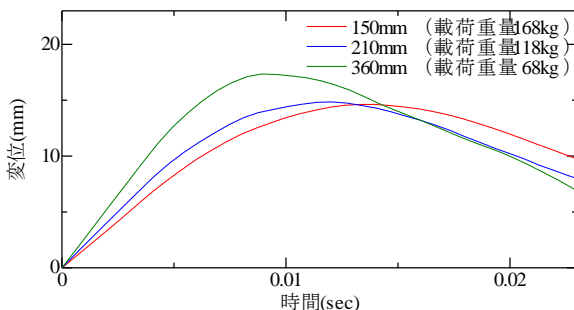


図9 PRFの変位-時間応答曲線 240J

図10はPRFにおけるエネルギー 240J の場合の衝撃伝達荷重-変位曲線を示している。曲線内部の面積は吸収し

たエネルギー量を示しており、載荷重量 168kg, 118kg, 68kg でそれぞれ 422.2J, 409.6J, 458.1J と 240J を大幅に超えている。その原因は判然とせず、さらなる検証が必要である。しかしながら、160J, 80J の場合においても作用させるエネルギーが同じであれば、ゴムの吸収エネルギーもほぼ同じであることがわかった。

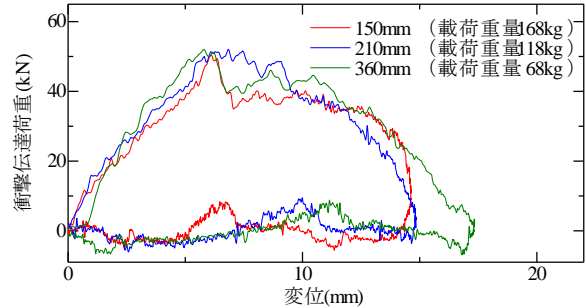


図10 PRFの衝撃伝達荷重-変位曲線 240J

### 3.4 エネルギーと運動量保存則について

本実験の重錘落下のような衝突は非弾性衝突であり、力学的エネルギー保存則は成立しない。しかし、非弾性衝突でも衝突中に外力が作用しなければ力積-運動量の関係は成り立つ。したがって、今回の実験においても重錘落下時は外力が作用していないので力積-運動量の関係は成り立つと考えられる。そこで、衝突速度と跳ね返り速度から運動量の変化を求め衝撃伝達荷重-時間応答曲線の曲線内部の面積を求めることで力積を求め、その結果を表4に示す。エネルギーが80Jの場合、力積と運動量の変化に差が生じている。その原因は、エネルギーが少ないと重錘と衝撃実験装置の柱の摩擦など影響が大きくなるためと考える。しかしながら、エネルギー 240J, 160J の場合は、力積と運動量の変化がほぼ等しいので力積-運動量の関係は成り立つといえる。

表4 運動量の変化と力積の関係

エネルギー (J)	落下高さ (mm)	衝突速度 (m/s)	跳ね返り速度 (m/s)	運動量の変化 (N·s)	力積 (N·s)
240	150	1.650	-0.65	352.8	360.5
	210	2.000	-0.75	319.2	329.5
	360	2.600	-0.95	241.4	234.0
160	100	1.350	-0.65	336.0	348.7
	140	1.650	-0.85	295.0	302.1
	240	2.150	-0.90	207.4	193.9
80	50	1.000	-0.45	243.6	291.7
	70	1.100	-0.65	206.5	227.0
	120	1.550	-0.75	156.4	147.9

#### 4. 結論

本研究は、PRFに作用する衝撃力を計測できる装置を作成し、その衝撃力とPRFを介して伝わる衝撃伝達力を比較することで、PRFの衝撃力緩和効果を明らかにすることを目的に重錘落下実験を行った。その結果、作用する衝撃力を計測することができ、衝撃力-時間応答曲線を得ることができた。また、治具上にPRFを設置して同様の実験を行い、PRFの衝撃伝達力-時間応答曲線、および衝撃伝達力-変位曲線を得ることができた。これらをまとめると以下ようになる。

1. ひずみゲージを用いて、大きな衝撃力を計測できる治具を作成し、供試体に作用する衝撃力そのものを計測することができた。
2. 衝撃力が小さい場合はPRFと総ゴムは同程度の衝撃力緩和効果を有するが、衝撃力が大きい場合は総ゴムによる衝撃力の緩和は期待できない。
3. PRFはある限度までの衝撃力が作用した際に衝撃伝達力を一定の値にまで緩和させ、作用時間を延ばす効果がある。
4. PRFに埋設された繊維がゴムに対して拘束力を発揮することで、変位が抑制される。
5. PRFは総ゴムに比べて衝撃伝達力-変位曲線の初期の傾きが大きいため、高い初期弾性係数を有する。
6. PRFの変位が12.5mmを超えたあたりで緩和効果の限界を迎えるのではないかと考えられるが、今後詳細な実験を行い確認する必要がある。
7. 今回の実験において、作用させるエネルギーが同じであれば、ゴムの吸収エネルギーもほぼ同じであることがわかった。
8. 作用させるエネルギーは、ゴムの吸収エネルギーと一致しなかったが、力積-運動量の関係は成り立つことがわかった。

#### 謝辞

本研究は、公益財団法人関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の助成を受けて行いました。また、本研究に協力していただいた国立明石工業高等専門学校都市システム工学科津田葉涼太君（現神戸大学）、藤綱里帆さん（現大阪ガス）、松本拓実君（現専攻科）、水鳥皓平君（現阪急設計コンサルタント）に厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] 鈴木祥之：兵庫県南部地震による被害報告，京都大学防災研究所年報第38号A，pp.69-97，1995.
- [2] 鋼構造委員会鋼構造震災調査特別小委員会：阪神・淡路大震災における鋼構造物の震災の実態と分析，土木学会論文集，土木学会，No.647/I-51，pp.17-30，2000.
- [3] 園田恵一郎，小林治俊，永野圭：兵庫県南部地震一初期上下動の証言について，大阪市立大学工学部紀要・震災特別号，p.187-231，1997.
- [4] 石丸和宏，長谷川尚輝，浅田宗磨，山内理絵：直下地震で見られる跳び石現象に関する一考察，第70回年次学術講演会，土木学会，I-226，2015.
- [5] 西本安志：PRFの衝撃緩衝効果に関する基礎的研究，九州大学博士論文，2004.
- [6] 菅原巧，山本玲於奈，西本安志，石丸和宏：積層繊維補強ゴムの衝撃力低減効果，第73回年次学術講演会，土木学会，I-317，2018.