

## 構造物の自重を考慮した衝撃的鉛直動に対する免震機構の開発

明石工業高等専門学校都市システム工学科 教授 石丸和宏

## 1. 研究目的

兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）は都市部に起きた M7.2 の巨大な直下地震であり、高速道路や新幹線の高架橋が倒壊し、多くの土木・建築構造物が破断された。倒壊した構造物の多くは耐震設計製基準が定められた 1981 年以前に施工されたものに集中していた<sup>1)</sup>。地震計の捉えた兵庫県南部地震の鉛直動の最大加速度は 332.2gal であり、それは水平動の最大加速度 818.0gal<sup>2)</sup> 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。しかし、その破断現象の中には衝撃的な鉛直動（短周期、短波長の波動）に起因すると思われる特徴的な破断形態のものがあった。その例として、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、岩石の跳躍現象（写真 1）などがあげられる。

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。



写真 1 岩石の跳躍現象

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だけでなく、衝撃的な鉛直力が橋脚部のような柱状の構造物に損傷を生じさせ、大規模な破断を起こす可能性は否定できない。したがって、水平動に対する免震だけで構造物の破断を防げない

可能性があるため、特に重要構造物においては鉛直動に対しても免震する必要があると考える。しかしながら、鉛直動の存在に着目し、その免震機構に関して研究した事例は少ないが、直下地震による衝撃的な鉛直動から高架橋の橋脚などの柱状部材を守るための研究として、積層繊維補強ゴム（以後 PRF と呼ぶ）を使用した免震機構の開発をすること等が挙げられる。

石丸ら<sup>4)</sup>は 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た。しかし、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、その計測が今後の課題として挙げられていた。そこで石丸、津田葉、藤綱ら<sup>5)</sup>は計測と治具一体となった装置を作成し、衝撃力を計測するとともに、同じ位置エネルギーを与えたときに PRF のエネルギー吸収について調べた。さらに石丸、松本、水鳥ら<sup>6)</sup>は PRF と総ゴムに同じ衝撃力を与える実験を行い、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性能を有するが、衝撃力が大きい場合は総ゴムに比べ、PRF は衝撃力の緩和効果が高く、PRF を衝撃力緩和装置として用いると、最大 200kN の衝撃力が作用しても、50kN~60kN にまで衝撃力を低減させることがわかった。しかしながら、この PRF を用いることは土木構造物を衝撃的な鉛直動から守るためには有効であるが、実用を考えると、通常時の土木構造物の自重を支えるには、鉛直方向の剛性は低い。

したがって、本研究では通常時は金属で構造物の自重を支え、衝撃的な鉛直動が作用した際には、金属部分が座屈し、PRF でそのエネルギーを吸収する免震機構の開発を行う。実験では、その免震機構として、アルミ円筒内に PRF を挿入させた合成部材を取り扱い、重錘落下実験を行うことで、その衝撃力緩和性能を調べる。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験の概説

本実験で取り扱う合成部材として、アルミ円筒の内部に PRF を入れた合成部材を作成し、重錘による自由落下衝撃実験を行い、その動特性を調べる。

### 2.2 使用機器

実験に用いた機器は、柱部材のひずみを測ることで衝撃力を求める。ノイズ低減のため、(株)東京測器研究所の FLA-5-11-5LS を用いる。このひずみゲージは  $\Phi 3.2\text{mm}$ 、2 心シールド付きビニール線がついており、ノイズを抑えるために、シールドされているのでノイズを低減することができる。ひずみゲージの貼り方は、治具の側面に対角線が直交するように 4 枚貼る。図 1 は、治具の円柱部である。4 枚の平均値を用いることで曲げの影響を打ち消し、軸力のみ計測することができる。アンプとしてはキーエンス社のマルチ入力データロガーアンプ NR-500 を使い、動ひずみ計は NR-ST04 を用いた。

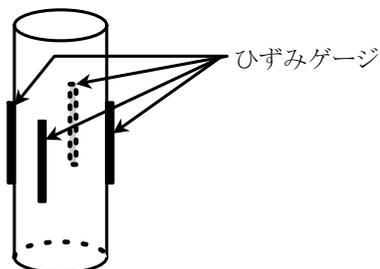


図 1 ひずみゲージの位置

### 2.3 合成部材

本研究では、アルミ円筒 (写真 2) の内部に PRF (写真 3) を入れた合成部材 (写真 4) を使用した。

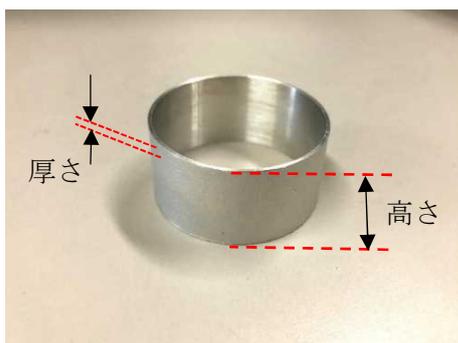


写真 2 アルミ円筒

近畿建設協会研究助成報告書 PRF は、通常のゴムに化学繊維材を埋設したものである。繊維材を 1 枚の布のように平面状に加工し、その両面にゴムを圧着させたものを繊維補強ゴムシートとする。この構造によってゴムの変形を繊維が拘束し、その剛性および破断荷重 (耐力) も繊維側の剛性および破断強度が支配的となるため、ゴム単体と比べて高耐力を示す。



写真 3 PRF



写真 4 合成部材

この繊維補強ゴムシートを積層一体化したものが PRF であり、PRF 構造 (Poly Rubber Fiber 構造) と呼ばれている。今回は 10 層を重ね合わせたものであり、積層密度は 1 層/2mm (厚さ 2mm 毎に 1 層) である。また、使用した繊維材は低強度繊維であり、材質がビニロン、引張強度が 588N/cm である。なお、引張強度は 1 層で 3cm 幅の試験体を引き伸ばし破断したときの力を 3 で除した場合の強度を示している (JIS L 1096)。また、破断時の伸びは 20%、構成糸は 1200denier である<sup>7)</sup>。なお、1denier とは、繊維の太さの単位であり長さ 9000m の繊維の重さが 1g の時の糸の太さである。この埋設し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。

合成部材として、写真 4 に示すようにアルミ円筒

内に PRF を挿入した合成部材を考える。支承として使用することを想定すると、通常時は金属で構造物などの自重を支えるが、鉛直動が作用した際は、金属部分は座屈し、PRF でそのエネルギーを吸収する構造となっている。アルミ円筒は高さ 20mm、直径 40mm であり、厚さの変化による特性を調べるため厚さ 0.4mm、0.6mm、0.8mm、1.0mm の 4 種類に分けて作成した。なお、アルミ円筒のアルミの種類は、A6063 である。

## 2.4 実験装置

本実験の概要図を図 2、写真 5 に示す。合成部材に作用させる衝撃力は重錘の自由落下により発生させる。図 3 は合成部材と治具の概要図である。治具円柱部は 5 本にすることで、大きな衝撃力でも円柱が塑性変形しにくいような治具を作成した。治具を重錘落下装置下の鉄板上に固定し、重錘を合成部

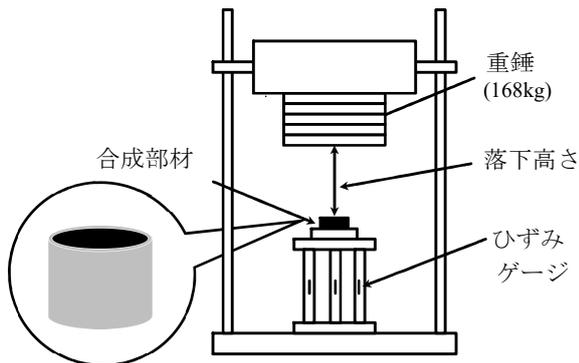


図 2 衝撃実験装置



写真 5 実験装置全体写真

近畿建設協会研究助成報告書  
材上に自由落下させた際に治具に作用した荷重（以下、衝撃伝達荷重という）を鋼材（SS400、ヤング率  $2.1 \times 10^5$  (N/mm<sup>2</sup>)）のひずみを計測することで求める。ひずみゲージで計測したひずみに、フックの法則に従ってヤング率をかけて応力を求める。求めた応力に、ひずみゲージを貼り付けた円柱部分の断面積をかけて衝撃伝達力を求める。

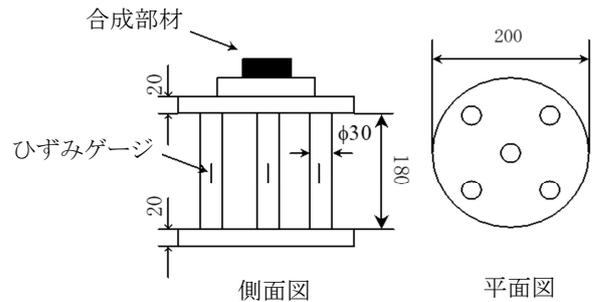


図 3 合成部材と治具の概要図（単位：mm）

合成部材に作用させる衝撃力を計測する際は治具上部には何も設置せず、重錘を落下させることで衝撃力を求める。実験はアルミ円筒の厚さ 0.4mm、0.6mm、0.8mm、1.0mm の合成部材に 150mm、200mm、250mm の落下高さに設定し、高さごとに 4 種類の合成部材で 3 個ずつ実験し、計 36 回の実験を行う。

## 3. 結果と考察

合成部材のアルミ円筒の厚さが衝撃力緩和性能に及ぼす影響を調べるため、重錘落下実験を行った。衝撃伝達荷重は、治具の柱部のひずみを 20μsec ごとに 10000 点の 0.2sec の計測を行うことで求めた。

### 3.1 アルミ円筒の厚さの違いが衝撃伝達荷重に及ぼす影響

合成部材の衝撃力緩和性能を調べるために、重錘落下高さ 150mm から 250mm において作用する衝撃力と合成部材を介して治具の円柱ひずみから得られる衝撃伝達荷重を比較した。図 4 は、アルミ円筒厚さ 0.4mm から 1.0mm のそれぞれの合成部材に 150mm の高さから重錘 168kg を自由落下させた場合における衝撃伝達荷重-時間応答曲線である。落下高さ 150mm における衝撃力の最大値は 137.4kN

様式 7-2

であり、アルミ円筒の厚さ 0.4mm から 1.0mm の合成部材の衝撃伝達荷重の最大値は順に 68.8kN, 70.9kN, 70.7kN, 71.8kN であった。合成部材に作用する最大衝撃力で、最大の衝撃伝達荷重を割った衝撃力緩和性能は 49.9%, 48.4%, 48.5%, 47.7% であった。衝撃力が合成部材に作用し、衝撃伝達荷重が最大値に達するまでの時間はアルミ円筒厚さ 0.4mm から 1.0mm の場合で 0.0057sec, 0.0039sec, 0.0049sec, 0.0057sec と衝撃伝達荷重の作用時間はほぼ同様であった。なお、0.4mm と 0.6mm の実験後の合成部材を解体した後のアルミ円筒は写真 6 と写真 7 に示すように、アルミ円筒は破断しており、さらに、またアルミ円筒の上部が座屈し、下部が少し広がっていた。また、写真 8 と写真 9 に示すように 0.8mm, 1.0mm は破断しなかったが、0.4mm と 0.6mm と同様に上部が座屈し下部は広がっていた。アルミ円筒が破断した場合には①に示すように衝撃伝達荷重が急激に下がる波形であった。

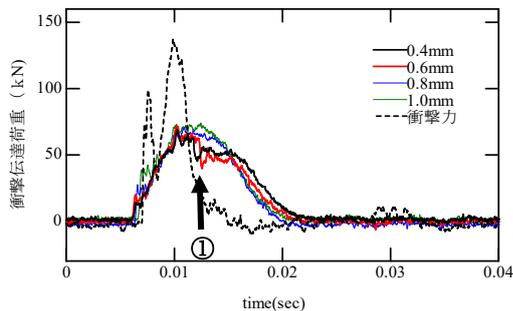


図 4 落下高さ 150mm における衝撃伝達荷重-時間応答曲線の比較

図 5 は、重錘落下高さ 200mm における衝撃伝達荷重-時間応答曲線の図である。落下高さ 200mm における衝撃力の最大値は 173.1kN であり、アルミ円筒の厚さ 0.4mm から 1.0mm の合成部材の衝撃伝達荷重の最大値は順に 72.3kN, 73.2kN, 76.3kN, 79.3kN であった。それぞれの緩和性能は 58.2%, 57.7%, 55.9%, 54.2% であった。衝撃伝達荷重の最大値はアルミ円筒の厚さが厚いほど衝撃伝達荷重が増すことがわかる。落下高さ 150mm と比較すると、アルミ円筒の厚さによる緩和性能の差がわずかに大きくなり、厚さが薄いほど高い緩和性能を示している。また、写真 10 に示すように、0.4mm の実験後



写真 6 0.4mm 実験後のアルミ円筒 (落下高さ : 150mm)



写真 7 0.6mm 実験後のアルミ円筒 (落下高さ : 150mm)



写真 8 0.8mm 実験後のアルミ円筒 (落下高さ : 150mm)



写真 9 1.0mm 実験後のアルミ円筒 (落下高さ : 150mm)

様式 7-2

のアルミ円筒は破断している。そのほかの 0.6mm, 0.8mm, 1.0mm ではアルミ円筒の破断が確認されなかった。また落下高さ 150mm の時に厚さ 0.6mm の合成部材はすべての合成部材が破断したが, 200mm の高さから落下させた場合は 3 つの合成部材のうち, 一つしか破断しなかった (写真 11)。また, 写真 12 はアルミ円筒厚さ 1.0mm の実験後の様子である。この破断状況より, アルミ円筒の上部のみ座屈していることがわかる。写真 13 はアルミ円筒厚さ 1.0mm の合成部材を解体した後の PRF である。この写真の赤い枠線の内部は, ゴムの繊維層が飛び出ており, この部分 (すなわち PRF 上部) では繊維が破断していると考えられる。この二つの写真を観察すると, 重錘からの衝撃力はアルミ円筒と PRF の上部で吸収され, アルミ円筒の厚さが厚かったので, 破断に至らなかったと考えられる。

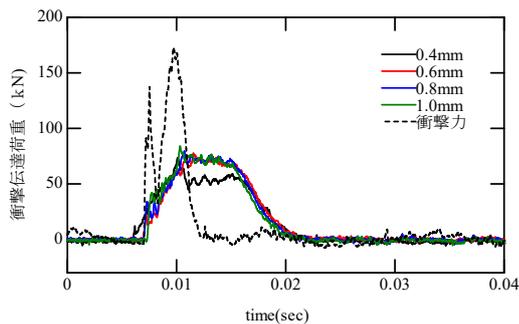


図 5 落下高さ 200mm における衝撃伝達荷重-時間応答曲線の比較

図 6 は, 重錘落下高さ 250mm における衝撃伝達荷重-時間応答曲線である。落下高さ 250mm における衝撃力の最大値は 218.1kN であり, アルミ円筒の厚さ 0.4mm から 1.0mm の合成部材の衝撃伝達荷重の最大値は順に 73.2kN, 79.5kN, 84.6kN, 87.3kN であった。それぞれの緩和性能は 66.4%, 63.5%, 61.2%, 60.0%であった。落下高さ 200mm の場合と同様に, 衝撃伝達荷重の最大値はアルミ円筒の厚さが厚いほど衝撃伝達荷重が増し, 薄いほど高い緩和性能を示している。衝撃伝達荷重が最大値に達するまでの時間はアルミ円筒厚さ 0.4mm から 1.0mm の場合で 0.0041sec, 0.0040sec, 0.0037sec, 0.0066sec となっており, ほぼ等しいことが分かる。0.4mm, 0.6mm の実験後の合成部材 (写真 14, 写真 15) は,



写真 10 0.4mm 実験後のアルミ円筒 (落下高さ : 200mm)



写真 11 0.6mm 実験後のアルミ円筒 (落下高さ : 200mm)



写真 12 1.0mm 実験後のアルミ円筒 (落下高さ : 200mm)



写真 13 合成部材を解体した後の PRF (落下高さ : 200mm)

様式 7-2

アルミ円筒が破断していたが、0.8mm、1.0mm は破断していなかった。

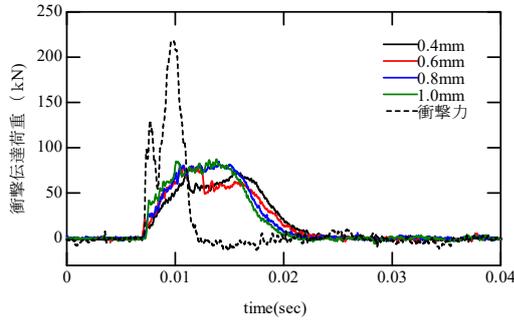


図 6 落下高さ 250mm における衝撃伝達荷重-時間応答曲線の比較



写真 14 0.4mm 実験後のアルミ円筒  
(落下高さ : 250mm)



写真 15 0.6mm 実験後のアルミ円筒  
(落下高さ : 250mm)

以上より、すべてのアルミ円筒の厚さの場合において合成部材の衝撃力緩和性能を確認することができた。さらに、すべての落下高さにおいてアルミ円筒の厚さが薄い方が緩和性能が高いことがわかった。これは、厚さが薄いことにより、円筒上下での局部座屈および円筒破断による衝撃エネルギー

近畿建設協会研究助成報告書

の吸収のためであると考えられる。

3.2 重錘の落下高さの違いが衝撃伝達荷重に及ぼす影響

図 7 はアルミ円筒厚さ 0.4mm の合成部材に異なる重錘落下高さの衝撃伝達荷重-時間応答曲線である。衝撃伝達荷重の最大値は 150mm, 200mm, 250mm の順に 68.8kN, 72.3kN, 73.2kN である。この結果から落下高さが高くなるほど衝撃伝達荷重が大きくなっている。また、すべての応答曲線において、衝撃伝達荷重が上昇した後降下し、再び上昇しているのは、アルミ円筒の破断で一度降下し、その後すべての衝撃力が PRF に作用するためであると考えられる。

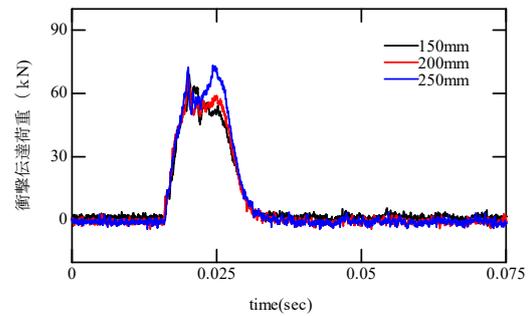


図 7 衝撃伝達荷重-時間応答曲線  
(アルミ円筒厚さ 0.4mm)

次に、アルミ円筒厚さ 0.6mm の落下高さを変えた場合の衝撃伝達荷重-時間応答曲線を図 8 に示す。衝撃伝達荷重の最大値は 150mm, 200mm, 250mm の順に 70.9kN, 73.2kN, 79.5kN と、落下高さが高くなるほど衝撃伝達荷重が大きくなっている。衝撃伝達力が最大値に到達するまでの時間は順に 0.0039sec, 0.0040sec, 0.0041sec とほぼ等しい時間となった。

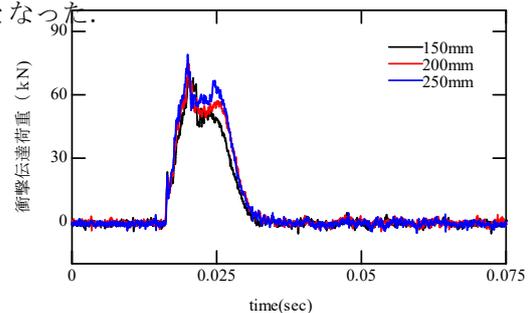


図 8 衝撃伝達荷重-時間応答曲線

(アルミ円筒厚さ 0.6mm)

図 9 はアルミ円筒厚さ 0.8mm の落下高さを変えた場合の衝撃伝達荷重-時間応答曲線である。衝撃伝達荷重の最大値は 150mm, 200mm, 250mm の順に 70.7kN, 76.3kN, 84.6kN と、高さが高くなるほど衝撃伝達荷重が大きい。衝撃伝達力が最大値に到達するまでの時間は順に 0.0049sec, 0.0037sec, 0.0032sec であった。また、写真 16 に示すように、アルミ円筒は破断しなかった。

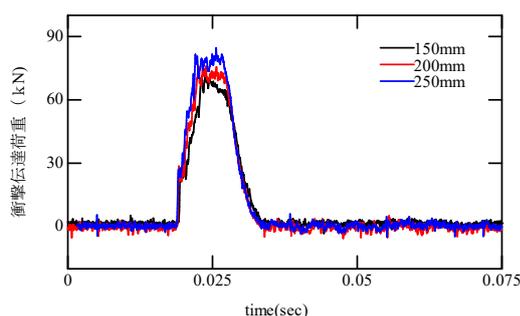


図 9 衝撃伝達荷重-時間応答曲線  
(アルミ円筒厚さ 0.8mm)



写真 16 0.8mm 実験後のアルミ円筒  
(落下高さ 250mm)

最後に、図 10 はアルミ円筒厚さ 1.0mm の落下高さを変えた場合の衝撃伝達荷重-時間応答曲線である。衝撃伝達荷重の最大値は 150mm, 200mm, 250mm の順に 71.8kN, 79.3kN, 87.3kN と、高さが高くなるほど衝撃伝達荷重が大きくなるのが分かる。衝撃伝達力が最大値に到達するまでの時間は順に 0.0057sec, 0.0066sec, 0.0028sec になった。また写真 17 に示すように 1.0mm の厚さの円筒は高さを変えても破断しなかった。

以上より、全ての厚さにおいて、重錘の落下高さ

近畿建設協会研究助成報告書を高くすると、衝撃伝達荷重は上昇した。PRF はある範囲の衝撃力が作用すると、内部の繊維が切れることでエネルギーが吸収され、衝撃伝達荷重がほぼ一定になることがわかっている。しかしながら、4種類のアリミ円筒の厚さの合成部材の衝撃伝達荷重-時間応答曲線から、落下高さが高くなるにつれ、衝撃伝達荷重が大きくなっており、これまでの PRF のみの実験で見られた衝撃伝達荷重の最大値が一定になることがなかった。以上のことから合成部材

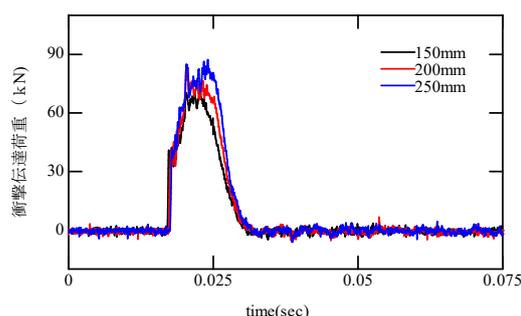


図 10 衝撃伝達荷重-時間応答曲線  
(アルミ円筒厚さ 1.0mm)



写真 17 1.0mm 実験後のアルミ円筒  
(落下高さ 250mm)

はまだ衝撃力を吸収する能力(衝撃吸収能)を有すると考えられる。特に円筒厚さを薄くすることで、円筒上下で局部座屈させ、さらに円筒破断による衝撃エネルギーの吸収が PRF 単体のみよりも期待できることがわかった。

したがって、この合成部材のさらなる衝撃吸収能を調べるためには、今回の実験に用いたアルミ円筒の厚さを薄くしたり、合成部材に作用させる衝撃荷重を重たくする、落下高さを高くすることにより衝撃力をさらに上げて実験する必要があると考える。

## 結論

本研究は、合成部材に作用する衝撃力を計測できる装置と積層繊維補強ゴムに金属円筒を組み合わせた合成部材を作成し、通常時は金属で自重を支えるが、鉛直動が作用した際には、金属部分は座屈し、PRF でそのエネルギーを吸収するような鉛直動免震機構の開発を行うことを目的に衝撃実験を行った。衝撃実験としては、重錘落下実験を行い、合成部材の衝撃伝達荷重-時間応答曲線を得ることができた。これらより、以下のことが分かった。

- ・衝撃力は円筒の座屈を含むすべての塑性変形および PRF 内の繊維破断により緩和された。
- ・アルミ円筒の厚さが薄いほど、高い緩和性能を有する。
- ・合成部材は一度アルミ円筒が座屈して、PRF でその後、衝撃力を吸収する。
- ・衝撃伝達荷重が最大値に達する時間はアルミ円筒の厚さを変えても、ほぼ等しい。

合成部材の最大衝撃吸収能は、衝撃伝達荷重の最大値が衝撃力を上げるとそれに伴い上がっているため、今回の衝撃力では調べることができなかった。したがって、今後の課題として、合成部材の高さを低くしたり、荷重を大きくすることで衝撃緩和効果の上限を調べたり、繊維が破断したときの PRF の衝撃緩和性能の変化を調べることがあげられる。またすべての実験において、同じ材質の PRF を用いたため、PRF に埋設された積層繊維の層数及び繊維の種類、ゴム層等の変化による衝撃力緩和性能の変化を調べることも挙げられる。

## 謝辞

本研究は、近畿建設協会研究助成および日工記念財団研究助成を受けたものです。本研究に協力していただいたシバタ工業（株）西本安志様、西村佳樹様、明石工業高等専門学校都市システム工学科平見樹哉さん、松本知香さん、小森山友大さん、中村友哉さん、森岡拓磨さん、建築・都市システム工学専攻松本拓実さん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) [http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo\\_nanbu/index.html](http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/hyogo_nanbu/index.html)，（2020 年 1 月 9 日取得）
- 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. 187，1997
- 4) 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，土木学会第 73 回年次学術講演会，土木学会，I-317，2018. 8
- 5) 津田葉涼太，藤綱里帆，西本安志，石丸和宏：同  
一エネルギーを与えた場合の積層繊維ゴムの衝撃力緩和性能，2019 年度土木学会関西支部年次学術講演会，土木学会，I-35，2019. 5
- 6) 松本拓実，水鳥皓平，西本安志，石丸和宏：重錘落下実験による積層繊維補強ゴムの衝撃力緩和性能，土木学会第 74 回年次学術講演会，土木学会，I-260，2019.9
- 7) 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