

積層繊維補強ゴムとアルミ円筒からなる鉛直免震装置の 静的および衝撃特性

Static and impact characteristics of vertical seismic isolation devices
combined Laminated fiber reinforced rubber with aluminum cylinders

山本隼一朗*, 石丸和宏**, 西本安志***

Junichiro Yamamoto, Kazuhiro Ishimaru, Yasushi Nishimoto

*明石工業高等専門学校, 建築・都市システム専攻 (〒674-8501 兵庫県明石市魚住町西岡 679-3)

**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)

キーワード: 積層繊維補強ゴム, アルミ円筒, 衝撃力, 緩和効果

Keywords : Laminated Fiber Reinforced Rubber, Aluminum Cylinder, Impact Force, Moderating Effect

1. はじめに

兵庫県南部地震, 新潟県中越地震では衝撃的な鉛直動によると見られる構造物の破壊現象(写真 1)や飛び石現象が見られた。地震による構造物の破壊を防ぐためには, これまでの水平動だけで無く, 特に重要構造物に対して衝撃的な鉛直動による力を緩和する免震装置の開発が必要であると考え。



写真 1 鉄筋コンクリート製橋脚の
全周にわたる水平輪切りひび割れ

衝撃力緩和性能を有する積層繊維補強ゴム (PRF) は免震部材として有効であるが, 構造物の自重を支えるには鉛直方向の剛性は低いため, PRF に金属円筒を組み合わせた合成部材を考え, 通常時は金属円筒で構造物の自重を支持し, 衝撃的な鉛直動が作用した際は, 金属円筒が座屈し, PRF で衝撃力を緩和する免震装置を提案する。これまで, 石丸, 西本らは積層繊維補強ゴムを用いた免震機構の開発を行ってきた¹⁾。また, さらに石丸, 松本, 平見ら²⁾の研究において合成部材による衝撃力緩和性能

は, 衝撃力と比べて 50~65%ほど上昇することがわかった。石丸, 花段, 松原ら³⁾の研究では PRF にアルミ円筒とを組み合わせた合成部材の静的特性について実験されている。

したがって, 本研究ではアルミ円筒に PRF を挿入した合成部材を取り扱い, 静的実験では荷重, 変位を計測し, 荷重-変位 (P- δ) を調べるとともに, 衝撃実験では様々な厚さのアルミ円筒の衝撃力緩和性能を調べる。

2. 合成部材について

本研究で取り扱った供試体は PRF およびアルミ円筒と組み合わせた合成部材である。PRF とアルミ円筒を組み合わせた合成部材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。

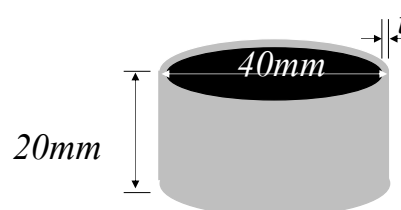


図 1 供試体の構造概略および寸法

3. 静的特性

3.1 実験方法

合成部材の鉛直方向の変位と載荷荷重を把握するため、図2に示すように万能試験機（容量200kN）を用いてアルミ円筒単体、PRF単体そして合成部材の荷重と変位の計測を行う。測定のスAMPLING数は60,000点、サンプリグ周期は20ms（50Hz）に設定。万能試験機の自動変位制御の設定はストローク速度を0.02mm/sec、ストローク上限を15mm、試験力200kNに設定し、実験を行った。

事前実験でばらつきがほぼ無いため、今回はPRF単体を2個、アルミ円筒単体を厚さ0.4mm、0.6mm、0.8mm、1.0mmを各2個ずつ、アルミ円筒厚さ0.4mm、0.6mm、0.8mm、1.0mmの合成部材各2個ずつ実験を行う。

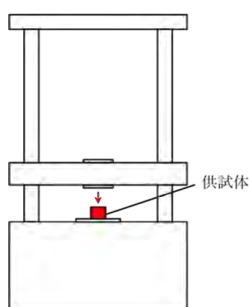


図2 実験概要図

3.2 実験結果

図3はそれぞれアルミ円筒の厚さ $t=0.4\text{mm}$ 、 0.6mm 、 0.8mm 、 1.0mm の場合のP- δ 曲線である。アルミ円筒は複数回局部座屈が生じた。グラフの形はどの厚さにおいても、荷重が上昇し、局部座屈の発生とともに荷重が下がり、その後、再び上昇、異なる箇所でも局部座屈の発生で再び荷重が下落を繰り返している。局部座屈荷重はそれぞれ0.4mmで10.28kN、0.6mmで16.47kN、0.8mmで22.49kN、1.0mmで29.82kNと座屈強度がアルミ円筒の厚さが大きくなるほど上昇していることがわかる。なお、1カ所目の座屈変形が終了し、再度荷重が上昇している。これは座屈変形の終了に伴い、剛性が上昇したためである。

図4にPRFのP- δ 曲線を示す。①において、荷重が

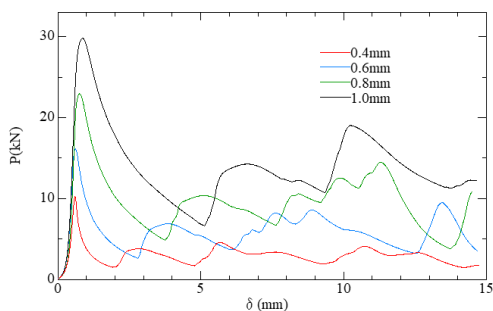


図3 P- δ 曲線（アルミ円筒）

約20kN、変位が約4.9mmの時にPRFの一部の繊維が破断したと思われる音とともに、荷重が急激に低下した。その後も載荷を続けると破断音と同時に荷重が急激に低下するという波形が繰り返された。これは②の点の荷重が65kN、変位が13.5mmの時まで繰り返し起こった。その後、変位が15mmになるまで載荷を続けた。載荷後、破断した部分を観察すると、中の繊維が破断している様子が確認された。しかし破断していない繊維も確認できたため、②の点以降載荷を続けた際も繊維の破断による荷重の低下が確認できると考えられる。

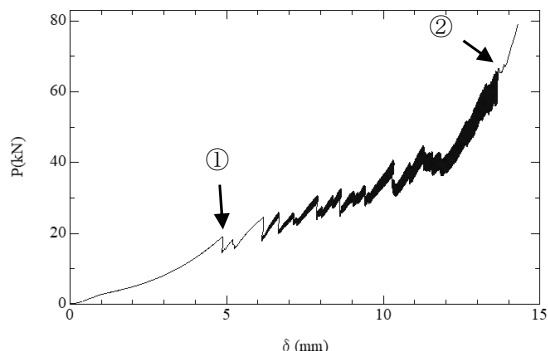


図4 P- δ 曲線（PRF）

図5は $t=0.4\text{mm}$ の合成部材のP- δ 曲線である。図中①において大きく荷重が低下している。これはアルミ円筒の際のグラフと一致していることから、アルミ円筒の局部座屈が起こったためだと考えられる。また、①の点以降、赤線で示すアルミ円筒のグラフと比べると、荷重が大きくなっていることから、PRFに対しても荷重がかかり始めていることがわかる。次に、②の部分で荷重が上昇している。これはアルミ円筒の図中における③の箇所から考察すると、アルミ円筒の局部座屈が終了し剛性が上昇したためであると考えられる。その後、④において荷重の急低下が起きている。これはPRFの繊維の破断が発生したためである。この際PRFの破断音が聞こえた。赤線で示されたアルミ円筒（ $t=0.4\text{mm}$ ）のP- δ 曲線によるとアルミ円筒の最大の荷重は10kNであることから荷重10kNまではアルミ円筒とPRFで荷重を支持していたが、座屈したことにより荷重を支持する分担率が変わり、より多くの荷重をPRFが分担するようになった。PRFが力を分担することにより、PRF内の繊維が破

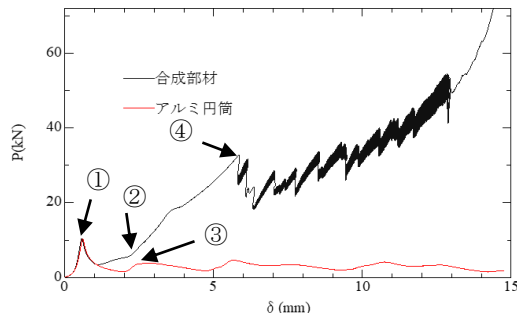


図5 P- δ 曲線（合成部材 $t=0.4\text{mm}$ ）

断するとともに横方向に広がろうとする。そしてさらなる荷重により、アルミ円筒が PRF の横方向への広がり耐えられなくなり、アルミ円筒が切れた。その後、PRF のみで荷重を支持したと考えられる。

4. 衝撃特性

4.1 実験方法

本研究の実験の概要図と写真をそれぞれ図 6、写真 2 に示す。衝撃力は重錘の自由落下により発生させる。図 7 は供試体と治具の概要図である。写真 3 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/mm²）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、5000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回実験を行った。

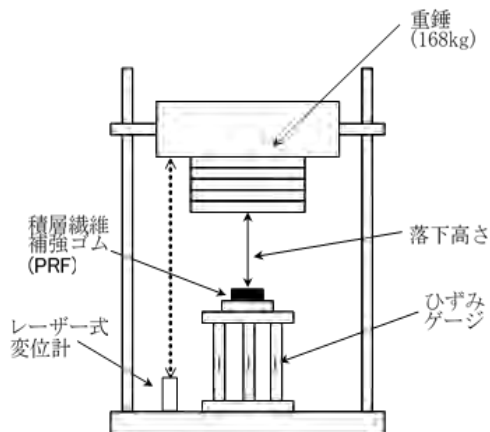


図 6 実験概要図



写真 2 実験装置全体写真

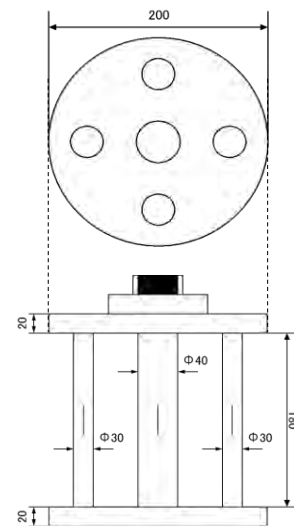


図 7 供試体と治具の概要図

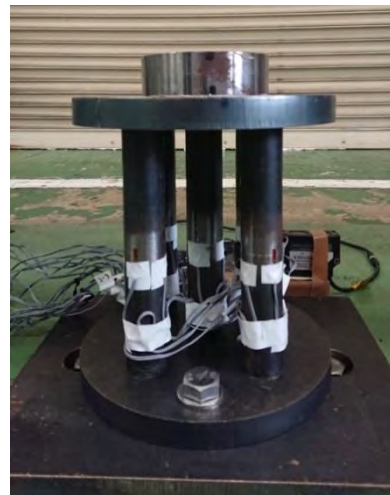


写真 3 ひずみ計測の治具

4.2 実験結果

合成部材のアルミ円筒の厚さを 0.4mm, 0.6mm, 0.8mm, 1.0mm とした場合の重錘落下実験を行った。まず、部材に作用させる力を調べるため、重錘落下高さを 100mm, 150mm, 300mm, 350mm とし、部材を置かずに重錘を落下させ、柱部のひずみを測ることで得られる力を本研究では合成部材に作用する衝撃力とする。衝撃力の最大値を、最大衝撃力とする。次に、合成部材を設置し、先ほどと同様の手順を行い、柱部より得られる力を衝撃伝達荷重とし、最大衝撃力と衝撃伝達荷重の差を最大衝撃力で除して、それに 100 を乗じ百分率で表したものを衝撃力吸収能としている。

4.2.1 落下高さごとの結果

図 8 に落下高さ 100mm の時の衝撃伝達荷重-時間応答曲線を示す。同様に落下高さ 150mm, 300mm, 350mm の時の衝撃伝達荷重-時間応答曲線を図 9, 図 10, 図 11

に示す。図 8 に示す落下高さ 100mm の場合、衝撃力の最大値は 148.2kN、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 47.0kN、49.5kN、55.4kN、57.1kN であった。それぞれの衝撃力緩和性能は 68.3%、66.6%、62.6%、61.4% であった。

図 9 に示す落下高さ 150mm の場合、衝撃力の最大値は 204.9kN、アルミ円筒の厚さ 0.4mm から 0.8mm の合成部材の衝撃伝達荷重の最大値は順に 47.4kN、53.4kN、55.5kN であった。それぞれの衝撃力緩和性能は 76.9%、73.9%、72.9% であった。

図 10 に示す落下高さ 300mm の場合、衝撃力の最大値は 342.9kN、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 54.7kN、56.1kN、69.6kN、76.5kN であった。それぞれの衝撃力緩和性能は 84.0%、83.6%、79.7%、77.7% であった。

最後に、図 11 に示す落下高さ 350mm の場合、衝撃力の最大値は 367.2kN、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 69.1kN、69.3kN、67.1kN、73.4kN であった。それぞれの緩和性能は 81.2%、81.1%、81.7%、80.0% であった。

4.2.2 アルミ円筒厚さごとの結果

図 12 にアルミ円筒厚さ $t=0.4\text{mm}$ の時の衝撃伝達荷重-時間応答曲線を示す。同様にアルミ円筒厚さ $t=0.6\text{mm}$ 、 0.8mm 、 1.0mm の時の衝撃伝達荷重-時間応答曲線を図 13、図 14、図 15 に示す。

図 12 は厚さ $t=0.4\text{mm}$ 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 100mm、150mm、300mm、350mm の順に 47.0kN、47.4kN、54.7kN、69.1kN である。この結果から落下高さの上昇に伴い、衝撃伝達荷重も増加していることがわかる。また落下高さ 350mm の応答曲線で衝撃伝達荷重が上昇した後降下し、その後上昇している。これはアルミ円筒の破断の際にいったん衝撃伝達荷重が降下し、その後すべての衝撃伝達荷重を PRF で受け持ったためであると考えられる。

図 13 は厚さ $t=0.6\text{mm}$ 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 100mm、150mm、300mm、350mm の順に 49.5kN、53.4kN、56.1kN、69.3kN である。この結果から落下高さが高くなることで衝撃伝達荷重が大きくなることわかる。また衝撃伝達荷重は厚さ $t=0.4\text{mm}$ のときよりも大きくなった。これは厚さが厚くなることでアルミ円筒の耐力が大きくなり、アルミ円筒を介して伝達される衝撃力が増加したためであると考えられる。

図 14 は厚さ $t=0.8\text{mm}$ 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 100mm、150mm、300mm、350mm の順に 55.4kN、55.5kN、69.6kN、67.1kN である。ここで衝撃伝達荷重の最大値が 350mm よりも 300mm の方が大きくなっている。

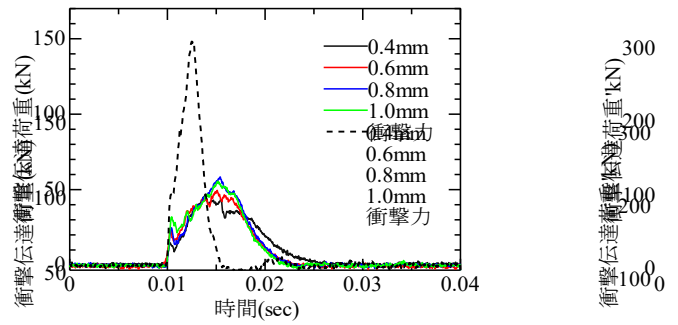


図 8 落下高さ 100mm の衝撃伝達荷重-時間応答曲線

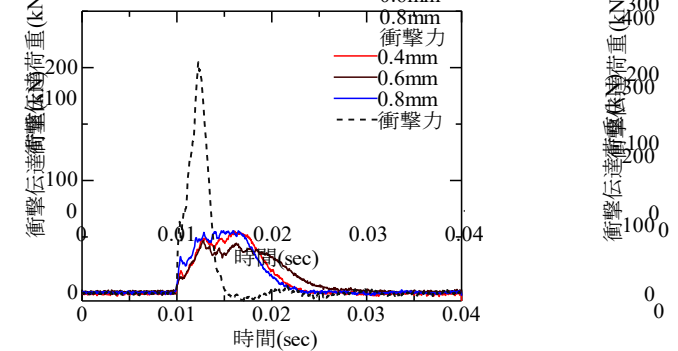


図 9 落下高さ 150mm の衝撃伝達荷重-時間応答曲線

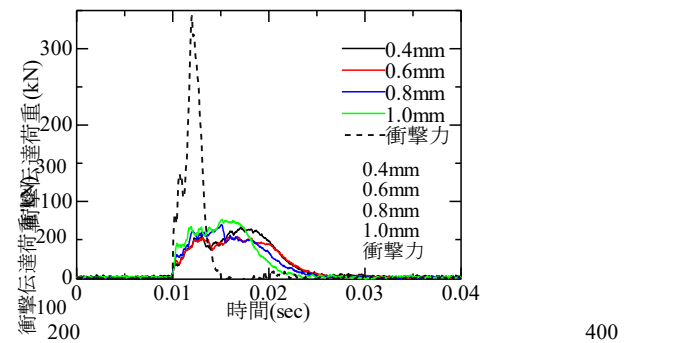


図 10 落下高さ 300mm の衝撃伝達荷重-時間応答曲線

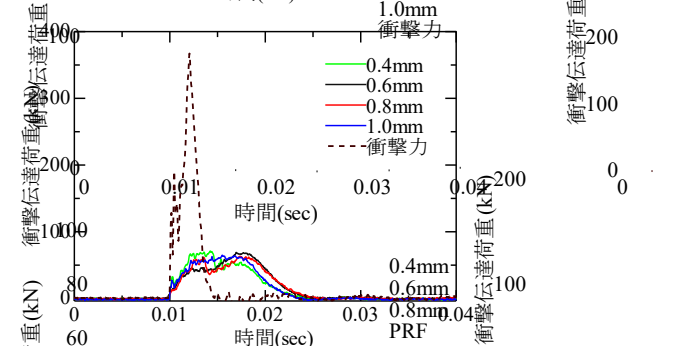


図 11 落下高さ 350mm の衝撃伝達荷重-時間応答曲線

通常落下高さが高くなると、衝撃伝達荷重は大きくなる傾向にあるが、アルミ円筒の厚さが厚くなるた、それ

変位(mm)

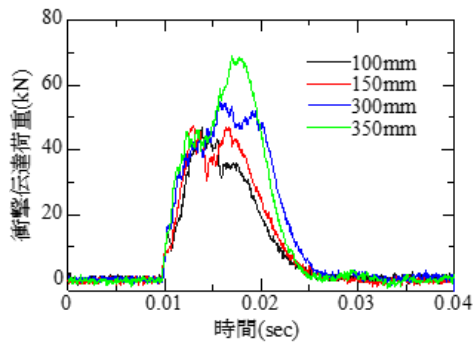


図12 円筒厚さ0.4mmの衝撃伝達荷重-時間応答曲線

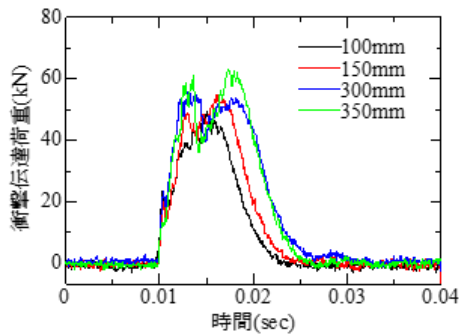


図13 円筒厚さ0.6mmの衝撃伝達荷重-時間応答曲線

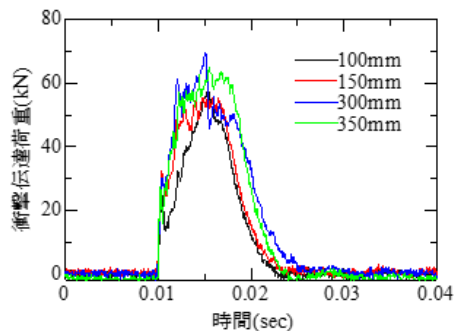


図14 円筒厚さ0.8mmの衝撃伝達荷重-時間応答曲線

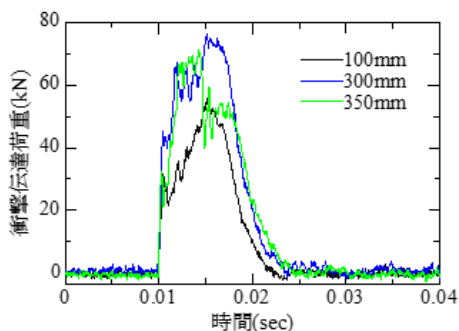


図15 円筒厚さ1.0mmの衝撃伝達荷重-時間応答曲線

を座屈させるために衝撃力が使われたのか、ばらつきのためなのか、どちらかであると考えられる。

図15は厚さ $t=1.0\text{mm}$ 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。なお、高さが

150mm の場合は、装置の不具合で計測できなかった。衝撃伝達荷重の最大値は 100mm, 300mm, 350mm の順に 61.4kN, 76.5kN, 73.4kN である。さて、この場合においても衝撃伝達荷重の最大値が 300mm の方が大きくなっている。図14の厚さ $t=0.8\text{mm}$ の場合と同様に、円筒を座屈させるために衝撃力が使われたのか、ばらつきのためなのかかわからないが、今後は実験回数を増やすことが必要であると考えられる。

5 結論

静的実験では、PRF にアルミ円筒を組み合わせた合成部材に変位制御で載荷を行うことで P- δ 曲線を得ることができた。以下にその結果をまとめる。

- ・アルミ円筒が座屈するまで合成部材はアルミ円筒のみの場合と同様の P- δ 曲線を示す。
- ・アルミ円筒の座屈後、合成部材はアルミ円筒と PRF で荷重を支持するため PRF 単体より大きな荷重を示す。
- ・アルミ円筒の破断後、合成部材は PRF 単体の場合と同様の P- δ 曲線を示す。

衝撃実験では、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。これにより、以下のことがわかった。

- ・アルミ円筒の厚さが厚いほど、合成部材は大きな衝撃力を伝える。
- ・アルミ円筒の厚さが薄く、落下高さが高いほど合成部材は高い吸収能を示す。
- ・落下高さが高くなるほど衝撃伝達荷重が大きくなる。
- ・合成部材による衝撃力緩和性能は 60~80% ほどである。

謝辞

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内海太樹君(現 西日本旅客鉄道(株)), 花段彩華(現 西日本旅客鉄道(株)), 澤田尚樹君(現 九州大学), 高瀬忠郁君(現 大阪大学), 松原慶悟君(現 横浜国立大学)に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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
- 2) 平見樹哉, 松本知香, 西本安志, 石丸和宏: 積層繊維補強ゴムに金属円筒を組み合わせた合成部材の衝撃力緩和性能, 土木学会第75回年次学術講演会, 土木学会, I-156, 2020.9
- 3) 松原慶悟, 石丸和宏, 西本安志, 花段彩華, 山本隼一郎: 積層繊維補強ゴムを用いた鉛直免震部材の静的載荷実験, 土木学会第76回年次学術講演会, 土木学会, CS10-39, 2021.9