

(39) 積層繊維補強ゴム緩衝材の設計手法に関する一考察

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE DESIGN METHOD OF LAMINATED FIBER REINFORCED RUBBER AS SHOCK ABSORBER

西本安志*, 園田佳巨**, 小野田忠弘***
Yasushi Nishimoto, Yoshimi Sonoda, Tadahiro Onoda

*博士(工学) シバタ工業株式会社 商品企画第2グループ サブリーダー (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾 1058)

**工博 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

***シバタ工業株式会社 商品企画第1グループ グループリーダー (〒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, 衝撃緩衝材, 衝撃実験, 落橋防止
(Laminated fiber reinforced rubber, Shock absorber, Impact test, Bridge restrainer system)

1. 緒言

構造物の供用期間中に作用する外力は様々であり, 構造物を設計する際の重要な要素である. その外力には, 静的に作用する外力や, 地震や落石のように数 m/sec~数十 m/sec の高速度で瞬間的に作用するものまで考えられる¹⁾. 特に高速や超高速で衝撃的に作用する外力に対しては, 構造物を強固に設計することも考えられるが, その衝撃的に作用する外力を直接構造物に作用させるのではなく, ゴムなどの衝撃緩衝材を取り付けることによって, 衝撃伝達荷重を低減させる手法が多く用いられている²⁾.

しかし, 一般的にゴムの衝撃緩衝効果に関しては, 定量的な設計手法が確立されていない場合が多く, あくまでも構造物の副資材として適用される場合が多い. このことは, ゴムの限界性能, すなわち, 破壊荷重が特に圧縮側で不明確であることに起因するものと考えられる. すなわち, ゴムは可逆的な大変形性能やエネルギー吸収性能という, 他の材料にはない長を有しながらも厳密な力学的設計に導入されにくいという課題がある.

そこで, ゴムの長を最大限に活用しつつ, 一般的な土木材料(鋼材やコンクリート)と同様な設計手法に適合させるには, ゴムの圧縮側の降伏もしくは破壊荷重の明確化が必要不可欠であるといえる. それを解決する一手法として, 著者らは, 終局状態があらかじめ明確な繊維材をゴムと複合化することに着目し, 写真-1 に示す積層繊維補強ゴムを開発した.

ここでは, 著者らが過去に実施した積層繊維補強ゴムの静的な力学特性や衝撃的な外力が作用した際の力学特性について述べるとともに, それらの結果から, 積層繊維補強ゴムを衝撃緩衝材として適用する際の定量的な設計手法について提案を行った³⁾.

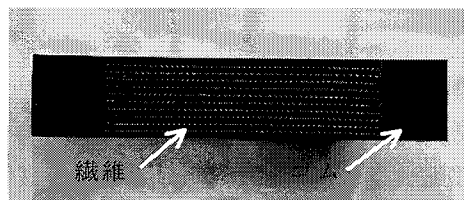
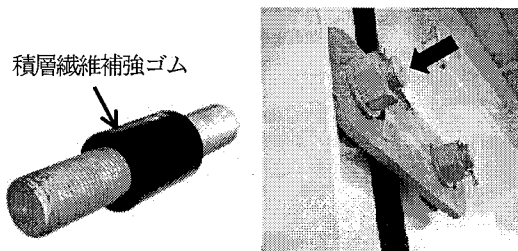


写真-1 積層繊維補強ゴム(PRF 構造)断面写真



(a) 潜水艦用ゴム盤木



(b) 桁連結用緩衝ピン

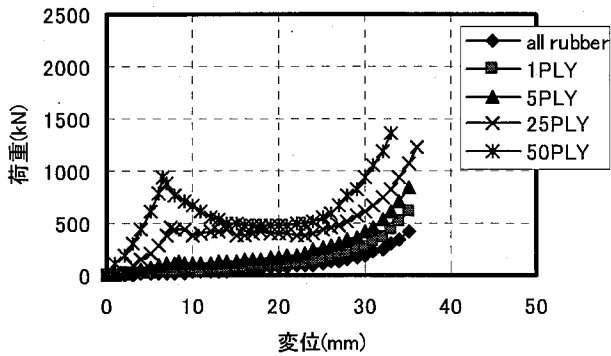
写真-2 PRF 構造の適用事例

2. 積層繊維補強ゴム

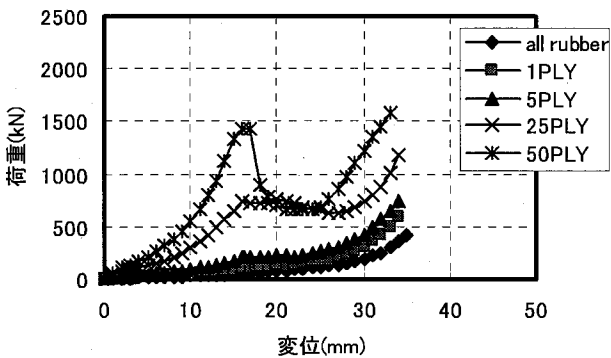
ゴムと繊維の複合化は, 繊維の物理特性とゴムの化学特性を組み合わせた FRR (Fiber Reinforced Rubber), 一

表-1 ゴムおよび繊維の材料諸元

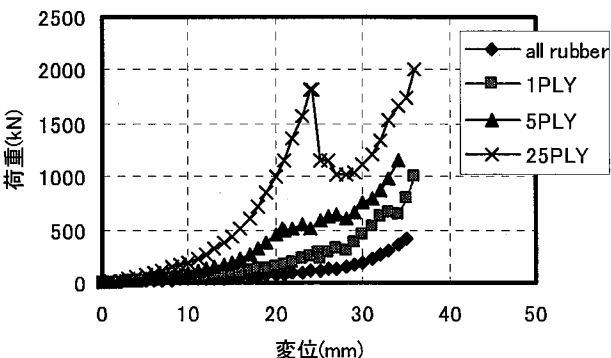
	積層繊維補強ゴム				ゴム	
	高強度繊維	中強度繊維	低強度繊維	ゴム		
材質	ナイロン	6,6-ナイロン	ビニロン	天然ゴム(NR)系	天然ゴム(NR)系	
引張強度	1764 (N/cm)	882 (N/cm)	588 (N/cm)	10.2 (MPa)	20.4 (MPa)	10.2 (MPa)
破断時の伸び	40 (%)	25 (%)	20 (%)	600 (%)	600 (%)	600 (%)
硬度	—	—	—	65	50	65
構成糸	2520 (denier)	1260 (denier)	1200 (denier)	—	—	—



(a) 低強度繊維



(b) 中強度繊維



(c) 高強度繊維

図-1 静的圧縮試験で得られた荷重～変位関係

般的にはゴム引布として、靴や雨具、タイヤの補強層部や搬送用ベルト、物資輸送用のコンテナバック、廃棄物処分場用シートとして使用されている⁴⁾。このFRRを積層一体化したものが積層繊維補強ゴムである。

積層繊維補強ゴムは、金属回転軸の外周部に適用し港湾や漁港の浮体式係船岸の回転機能付き緩衝材として用いられた事例や、写真-2(a)に示すように、直方体の積層構造として潜水艦の定期点検時のドック内での支承材として用いられた事例がある。これらの事例は、あくまでも、ゴムの剛性を向上させるという積層繊維補強ゴムの埋設繊維の破断が生じない弾性範囲内での使用例である。また、埋設繊維の破断まで考慮した使用例として、写真-2(b)に示すように、1995年兵庫県南部地震後、落橋防止システムの桁連結用鋼製ピンの周囲に積層繊維補強ゴスを巻き付け、ゴム緩衝ピンとして用いられた事例もある⁵⁾。しかしながら、本研究のように降伏点の明確化と積層繊維補強ゴム自体に着目し、その特性を活かしたものは実在しなかった。

3. 積層繊維補強ゴムの力学特性

3.1 静的力学特性

積層繊維補強ゴムの静的圧縮実験を行い、静的力学特性を調べた⁶⁾。ここで、埋設する繊維の種類は、表-1に示す破断強度が異なる3種類の汎用繊維とし、ゴムは硬度65の天然ゴムを使用した。試験体の形状は、縦150mm×横150mm×厚さ50mmとし、表-1に示す繊維材を硬度65のゴム中に、1, 5, 25, 50枚積層埋設した。

静的圧縮実験より得られた荷重～変位関係を図-1に示す。図-1に示す荷重～変位関係には、剛性が急激に変化する降伏点が存在する。この降伏点は、ゴムが圧縮されることで、ポアソン効果により作用する横ひずみが繊維への引張力に変換され、それによって繊維が限界ひずみに達して破断するために生じる。その後も埋設繊維が逐次破断することにより、変位が進行してもほぼ一定の荷重レベルを示すことがわかる。

この降伏荷重は、図-2に示すように各繊維強度とも積層枚数と比例関係にあることから、埋設繊維の強度や

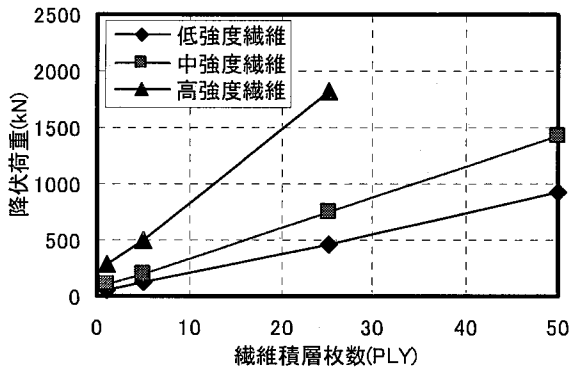


図-2 降伏荷重～繊維積層枚数関係

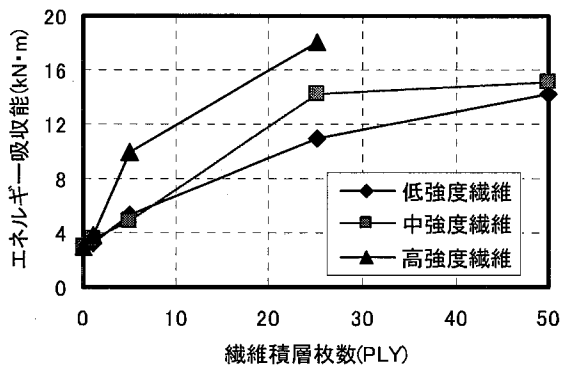


図-3 エネルギー吸収性能～繊維積層枚数関係

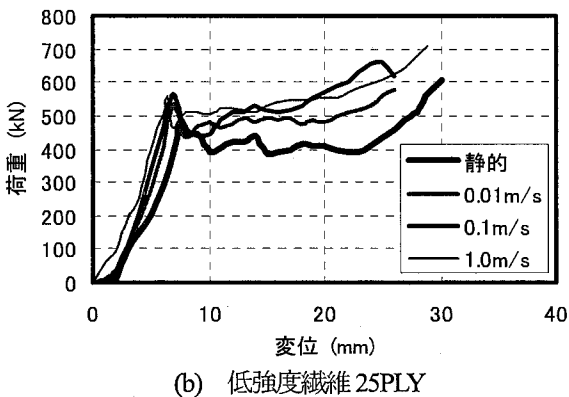
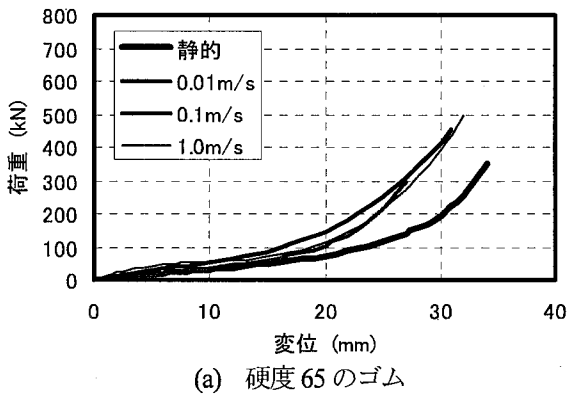


図-4 荷重～変位関係の速度依存性 (高速圧縮)

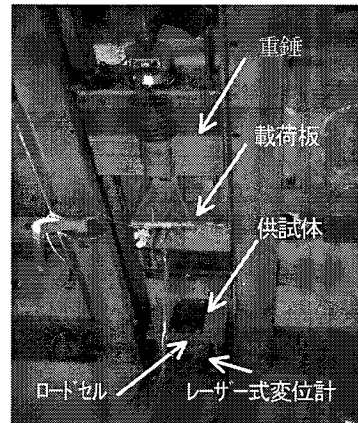


写真-3 落錘式衝撃実験の状況

表-2 落錘式衝撃実験の入力条件

入力エネルギー (kN·m)	重錘質量 400kg	
	落下高さ(m)	衝突速度*(m/s)
1.0	0.25	2.21
5.0	1.25	4.94
10.0	2.50	7.00

*衝突速度 $v=(2gh)^{1/2}$ により算出.

積層枚数を適宜選択することにより、任意に降伏荷重を設定できるといえる。すなわち、積層繊維補強ゴムは、降伏点の存在により、従来の耐力を基にした許容値による設計手法が可能になるとともに、任意に降伏荷重を設定できる非常に設計自由度の大きい材料である。

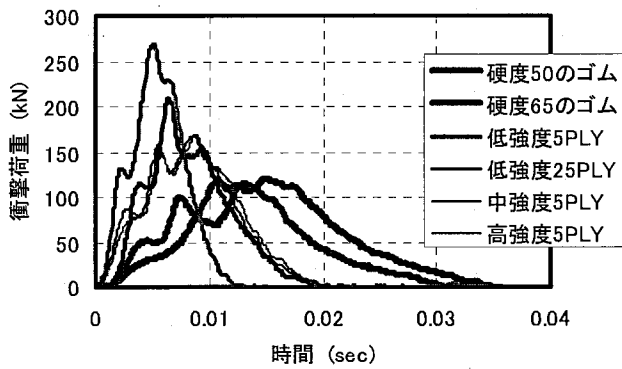
さらに、静的圧縮実験より得られた荷重～変位関係から求めたエネルギー吸収性能と繊維積層枚数との関係を図-3 に示す。繊維強度および積層枚数の増加に伴い、エネルギー吸収性能も増加した。このことは、同じ形状でエネルギー吸収性能を増大できることを示しており、緩衝材としての大幅なダウンサイジングが可能であることを示しており、設置スペースに制約がある場合に非常に有用といえる。

3.2 動的力学特性

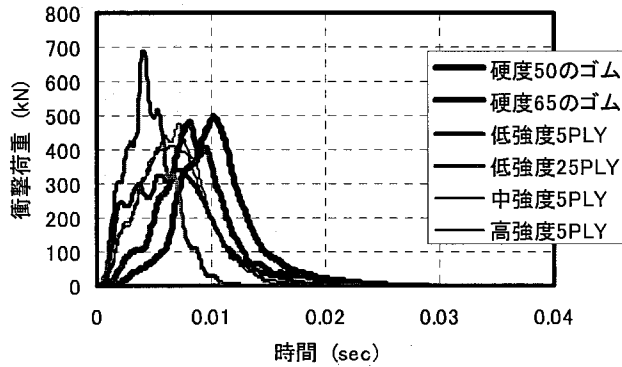
衝撃緩衝材として積層繊維補強ゴムを適用する際には、高速圧縮されると考えられる。そのため、静的圧縮実験と同様の供試体を用いて、载荷速度 $10^2, 10^1, 1.0\text{m/sec}$ にて高速圧縮をおこなった⁷⁾。得られた荷重～変位関係を図-4 に示す。

図-4 より、積層繊維補強ゴムは、降伏点までの荷重～変位関係では通常のゴムと比較して载荷速度の影響が小さく、降伏点以降では、繊維の破断によりゴムの影響が支配的になるため、やや速度依存性が認められた。

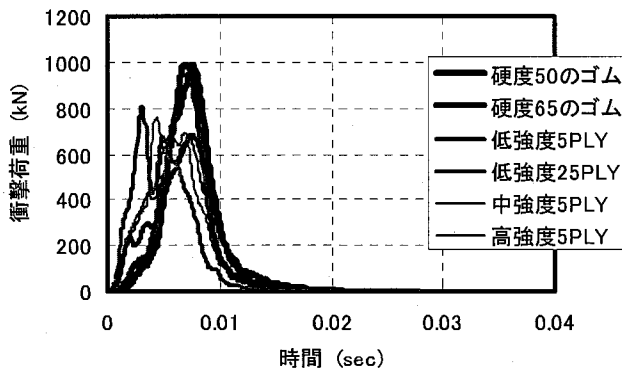
しかし、高速圧縮された場合でも、静的力学特性とほぼ同様の傾向を示すことから、高速度で作用する外力に対しても十分な機能を発揮できるものと考えられる。



(a) 入力エネルギー1.0kN・m



(b) 入力エネルギー5.0kN・m



(c) 入力エネルギー10.0kN・m

図-5 衝撃荷重～時間関係

3.3 衝撃緩衝効果

積層繊維補強ゴムに衝撃的な外力が作用した際の緩衝効果を検証することを目的として、写真-3 に示すように落錘式衝撃実験を実施した^{8), 9)}。

本実験に使用した供試体は、静的圧縮実験と同じとした。実験条件は、重錘質量を408kgとし、表-2 に示す所定の高さから自由落下させた。作用する衝撃的外力(エネルギー)は、積層繊維補強ゴムの埋設繊維が破断しないエネルギー量1.0kN・mと確実に破断するエネルギー量10.0kN・m、その中間値5.0kN・mに相当する。

得られた衝撃荷重～時間関係を図-5 に示す。図-5 より、埋設繊維が破断しない外力レベル(1.0kN・m)では、通常のゴムと比較して、積層繊維補強ゴムの方が剛性が大きいため衝撃荷重が高い値を示すが、繊維が確実に

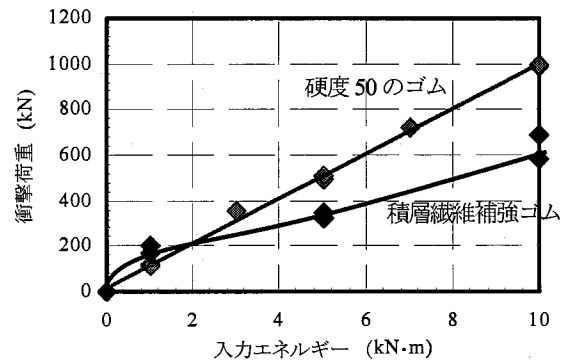


図-6 硬度50のゴム

とPRF構造(低強度繊維5PLY)の比較

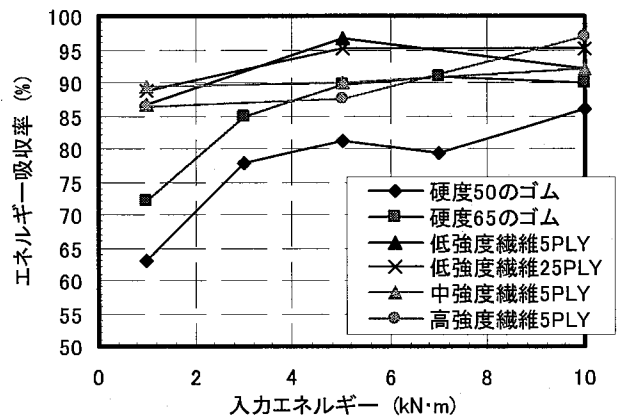


図-7 エネルギー吸収率の比較

に破断する外力レベル(10.0kN・m)では、繊維が破断することで通常のゴムより小さい値を示した。

以上のことを、図-6 に示す硬度50のゴムと積層繊維補強ゴム(低強度繊維5PLY)の衝撃荷重～入力エネルギー関係を比較して示した。積層繊維補強ゴムは、通常のゴムと比較して、あるエネルギー量を境に衝撃荷重が小さくなるのがわかる。さらに、埋設繊維が破断し始める入力エネルギーレベルでは、衝撃荷重の増加率も小さくなり、通常のゴムと比較して、幅広いエネルギーレベルで衝撃荷重を低減する効果を有するといえ、非常に有用な衝撃緩衝材といえる。

次に、衝突前後の重錘の持つ運動エネルギーから評価した供試体のエネルギー吸収率を図-7 に示す。図-7 に示すエネルギー吸収率とは、衝突前の重錘の有する運動エネルギーが、供試体に衝突することでどれだけ減衰したかを示す指標であり、100%に近いほど良好な緩衝材といえる。図-7 より、積層繊維補強ゴムは、いずれの場合も通常のゴムと比較して高いエネルギー吸収率を示し、特に、繊維が破断するような場合でのエネルギー吸収率は、繊維が破断しない場合と比較して、約5~10%高い値を示した。これは、ゴムの変形によるエネルギー吸収に加え繊維の破断によるエネルギー吸収が合算されたためと考えられる。

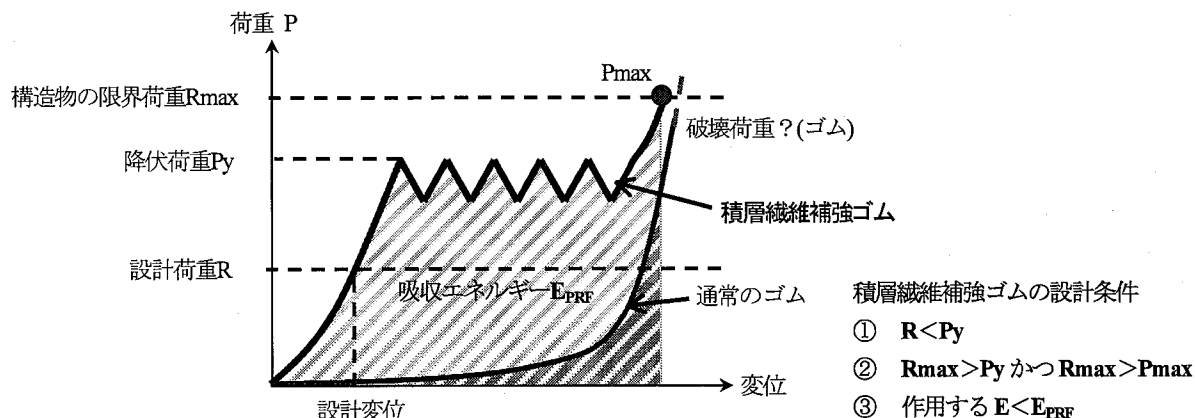


図-8 PRF 緩衝材の設計概念図

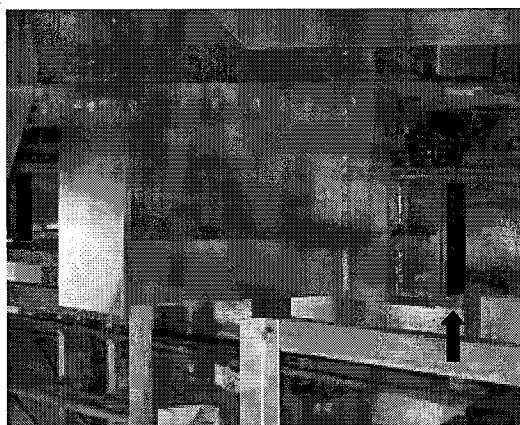


写真-4 PRF 構造の適用事例
(阪神高速湾岸線港大橋耐震補強工事)

4. 積層繊維補強ゴムの設計手法の提案

一般に、ゴムなどの弾性材料では、荷重～変位関係が2次曲線的に増加するため、エネルギー～発生荷重関係も同様の傾向となり、与えられるエネルギーが増加するとともに発生荷重も増加し続ける。このような力学特性では、構造物に想定以上の衝撃エネルギーが作用した場合には、発生する荷重が構造物の設計耐力以上となる可能性が懸念される。

しかし、積層繊維補強ゴムは、ある荷重レベルに達した後に変形が進行しても荷重レベルをほぼ一定値に保つような力学特性を示すため、その荷重レベルを十分に考慮して設計すれば、与えられるエネルギーが増加しても発生荷重をある一定値に抑えることができるといえる。積層繊維補強ゴムでは、この荷重レベルを降伏点（降伏荷重）と設定することで、構造物の安全性を向上させる緩衝材としての機能を確実に発揮するものといえる。

以上のことを要約すると、積層繊維補強ゴムの設計概念は図-8に示すようになる。図-8より、供用期間中に発生する確率は高いものの比較的小さい外力に対しては、

積層繊維補強ゴムの弾性範囲内で対応し、供用期間中に発生する確率は小さいものの大きな外力に対しては、積層繊維補強ゴムの降伏点以降の変形性能で対応し、想定される構造物の限界強度以下で、かつ、作用するエネルギーを吸収するように設定されることが望ましいといえる。

このような設計概念のもと、積層繊維補強ゴムは、写真-4に示すように大規模地震発生時の落橋防止システム用緩衝材として適用されている¹⁰⁾。

5. 結言

ここでは、積層繊維補強ゴムの力学特性と衝撃緩衝効果について述べ、それを衝撃緩衝材として適用する際の設計手法について検討した。本稿を要約すると以下のようになる。

- (1) 積層繊維補強ゴムは、通常のゴムのみでは破壊荷重が不明確であるのに対し、埋設繊維が最初に破断して剛性が急激に変化する点を降伏点と設定することにより、明確な設計条件を定義できる。
- (2) さらに、繊維強度や繊維積層枚数を選択することによって、同じ形状でも任意に降伏荷重を設定することができる。
- (3) 積層繊維補強ゴムは、高速圧縮した場合、通常のゴムと比較して速度依存性が小さく、静的挙動と同じような挙動を示す。
- (4) 積層繊維補強ゴムは、繊維材が破断することで衝撃緩衝効果を発揮し、変形が進行しても発生荷重がほぼ一定値を示すという高エネルギー吸収性能を示すため、衝撃荷重を低減することが可能である。
- (5) また、通常のゴムと比較して、エネルギー吸収効果を向上させることが可能である。

- (6) 積層繊維補強ゴムを衝撃緩衝材として適用する際の設計手法について提案した。

本稿では、積層繊維補強ゴムの設計手法を提案し、それを基にした、落橋防止システム用緩衝材としての適用事例を示した。今後は、実験的に検証した積層繊維補強ゴムの力学特性に関して、性能照査を汎用的に行えるように、数値解析手法の確立を目指すものである。

謝辞

本研究にあたっては、防衛大学校 石川信隆名誉教授、建設環境システム工学科 大野友則教授、香月智教授に力学特性や衝撃緩衝効果の検証実験についてご指導、ご助言を頂戴しました。また、九州大学彦坂熙名誉教授、梶田幸秀助教授にも本研究に関するご指導、ご助言を頂戴しました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ6，1994.
- 2) 例えば，日本ゴム協会ゴム技術フォーラム編：ゴム材料の土木・海洋用途をさぐる，ポスティコーレーション，1997.01.
- 3) 西本安志，小野田忠弘，園田佳巨：破壊型PRF緩衝材の開発，防衛施設学会平成17年度年次研究発表会講演概要集，pp.29-34，2006.01.
- 4) 日本ゴム協会編：ゴム技術の基礎，社団法人日本ゴム協会，1992.04.
- 5) 園田佳巨，衛藤芳昭，石川信隆，生駒信康，彦坂熙：ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的および動的応答特性に関する実験的考察，土木学会論文集，No.598/I-44，pp.333-346，1998.07.
- 6) 西本安志，梶田幸秀，石川信隆，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの静的特性に関する実験的研究，「材料」Vol.50，No.4，pp.432-439，2001.04.
- 7) 西本安志，梶田幸秀，石川信隆，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究，構造工学論文集Vol.46A，pp.1865-1874，2000.03.
- 8) 西本安志，梶田幸秀，石川信隆，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの落錘式衝撃実験と伝達荷重の予測に関する一考察，構造工学論文集 Vol.47A，pp.1655-1664，2001.03.
- 9) 西本安志，玉井宏樹，園田佳巨，別府万寿博，彦坂熙：積層繊維補強ゴムを用いた緩衝材の衝撃挙動に関する解析的考察，構造工学論文集 Vol.51A，pp.1625-1634，2005.03.
- 10) 下仲結城，金治英貞，大濱浩二，西本安志，浮島徹：港大橋のすべり支承免震システムにおける落橋防止装置用緩衝材の設計と性能，第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2005.02.