

## 緩衝ゴム試験体に対する静的および重錘落下衝撃載荷実験

Static and drop-weight impact loading tests of shock absorbing rubber specimens

今野久志\*, 佐藤京\*\*, 小室雅人\*\*\*, 岸徳光\*\*\*\*, 久慈茂樹\*\*\*\*\*, 余野智哉\*\*\*\*\*  
Hisashi Konno, Takashi Sato, Masato Komuro, Norimitsu Kishi, Shigeki Kuji, Tomoya Yono

\*博 (工), (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

\*\* (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

\*\*\* 博 (工), 室蘭工業大学教授, 大学院工学研究科もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*\* 工博, 室蘭工業大学特任教授, 大学院工学研究科もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*\*\* 東京ファブリック工業 (株) (〒163-0429 東京都新宿区西新宿 2 丁目 1-1)

\*\*\*\*\* (株) ビー・ビー・エム (〒103-0027 東京都中央区日本橋 3-11-1)

キーワード: 緩衝ゴム, 静的載荷実験, 重錘落下衝撃載荷実験

Keywords: absorbing rubber, static loading test, drop-weight impact loading test

### 1. はじめに

ゴムは、粘弾的な挙動を示し免震構造として優れた性能を発揮することから、我が国では精密機械の防振材としてや、土木・建築構造物の基礎部に多く用いられ、上部工の耐震性向上に大いに寄与している。また、船舶の接岸係留時や船舶同士の接触時の緩衝材としても用いられている。最近では、地震時における落橋防止装置への衝撃緩和のためにも応用されている。このように緩衝ゴムは多岐の分野で使用されているが、その設計は基本的には静的な力学特性に基づいて行われているのが現状である。免震構造のように低周波数領域での適用の場合には、疑似静的問題として対応可能である。しかしながら、載荷時間が非常に短い衝撃的な荷重載荷の場合には、動的な諸特性を把握して対応することが肝要であるものと判断される。このような観点から、本研究では、緩衝ゴムを対象に衝撃載荷時の動的な力学的特性を把握するための基礎的な検討を目的に、断面積が同一で厚さの異なる小型試験体に対する静的載荷実験および重錘落下衝撃載荷実験を実施した<sup>1)2)</sup>。

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体

本研究に使用した試験体は、基礎的な研究であることおよび重錘落下衝撃試験装置の諸元等を考慮し、平面形状を 50mm×50mm、厚さを 12.5mm、25.0mm、50.0mm の 3 種類とした。また、使用したゴム材料は一般に広く使

用されているクロロプレンゴム (CR) であり、硬度は 55 ±5° である。

#### 2.2 静的載荷実験

写真-1 には、静的載荷実験の状況を示している。静的載荷実験は、容量 3,000kN のアムスラーを用いて行った。試験体の変位は接触式変位計を用いて計測したが、バックアップとしてレーザー式非接触型変位計による計測の他、10 fps でのカメラ撮影も行っている。荷重は、基本的に載荷速度約 1kN/s の荷重制御方式で載荷した。本研究では、静的載荷時と衝撃載荷時における各荷重レベルでの応力-ひずみ関係を比較することを目的に、荷重レベル毎に試験体を取り替えて、最低荷重を 100kN、増分荷重を 100kN として最大 500kN までの載荷実験を実施した。



写真-1 静的載荷実験の状況



(a) 90kN 級ロードセル (b) 490kN 級ロードセル  
写真-2 衝撃载荷実験装置の状況

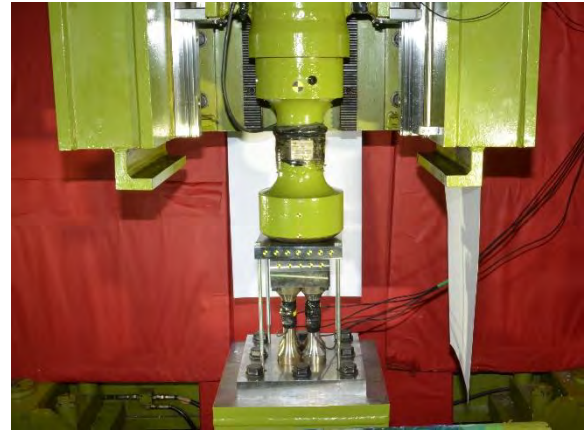


写真-3 衝撃载荷実験の状況

## 2.3 衝撃载荷実験

衝撃载荷実験に関しては、重錘落下衝撃試験装置を設置している箇所がピット形式になっていることから、ピット底盤に高さが約 1,500mm の H 形鋼 (H400 × 400 × 13 × 21) を定着させて実験用架台とした。架台は、重錘落下時に低周波振動成分が励起しないように、高さ 500mm 毎に隔壁を設け、かつウェブ両面にも板厚が 22mm の鋼板を高さ方向に溶接している。また、架台上面にはロードセルからの反力を確実に架台基部に伝達させるために板厚が 40mm の鋼板を溶接している。さらに、反力波形を精度よく計測するために、最大支点反力が 350kN 程度以内の場合には 90kN 級ロードセル 4 個を組み合わせ、それ以上の支点反力の発生が想定される载荷条件の場合には 490kN 級ロードセル 1 個を用いることとした。ロードセル上下盤には、荷重を均等化してロードセルに伝え、ロードセルで確実に衝撃反力が検知できるように板厚が 50mm の鋼板を用いている。また、ロードセル上盤上に設置した試験体設置盤の大きさは 160mm 四方であり、厚さは 25mm としている。さらに、直接重錘が载荷される载荷盤は、最大 100mm 四方の試験片の载荷が可能のように 200mm 四方とし、厚さを 30mm としている。なお、载荷盤の四隅には径が 10mm のガイド棒およびバネを取り付け、载荷盤や試験体の飛び跳ねを防止している。写真-2 には、各ロードセルを設置した場合の実験装置の概要を示している。

写真-3 には、衝撃载荷実験の状況を示している。衝撃载荷実験は、質量 300kg、先端直径 200mm の鋼製重錘を所定の高さからリニアウェイレールを介して自由落下させることにより行っている。重錘の実落下高さ  $H$  は、設定の衝突時速度から換算し、かつ本実験前の校正実験結果に基づいて決定した。本実験の測定項目は、重錘衝撃力  $P$ 、反力  $R$ 、载荷盤と試験体設置盤側面に貼付したターゲットマーカの変位である。なお、重錘衝撃力  $P$  と反力  $R$  は、いずれも起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを用いて計測している。また、ターゲットマーカの変位は、2,000fps の高速度カメラ撮影の下にデータ処

理を施し算定した。最終的な緩衝ゴムの変位  $D$  は、直交する 2 側面に貼付したターゲットマーカの変位波形を用いて評価している。試験体は载荷中に偏心して変位する場合があることより、試験体毎に動画を確認して決定評価することとした。

## 3. 実験結果

### 3.1 静的载荷実験結果

図-1 には、静的载荷実験結果の荷重-変位 ( $R-D$ ) 関係および载荷前の緩衝ゴム試験体の载荷面積および厚さを基準とした公称応力 (以後、単に応力、 $\sigma$ ) - 公称ひずみ (以後、単にひずみ、 $\varepsilon$ ) 関係を示している。各図は、試験体を取り替えて、荷重を 100kN から 500kN まで 100kN 毎に増加させた場合の結果を比較して示している。(a) 図は、荷重-変位 ( $R-D$ ) 曲線であり、(b) 図は応力-ひずみ ( $\sigma-\varepsilon$ ) 曲線である。

(a) 図より、载荷時には、いずれの試験体厚に対しても同様な荷重-変位 ( $R-D$ ) 曲線を示しており、除荷時には非常に大きい剛性勾配で荷重が減少し、変位が残留していることが分かる。

(b) 図より、試験体厚が 12.5 mm の場合における応力-ひずみ ( $\sigma-\varepsilon$ ) 曲線を見ると、300kN 载荷時が他の载荷荷重時よりも若干左方にシフトした分布性状を示しているが、その他の場合には類似した分布性状を示していることが分かる。試験体厚が 25.0mm、50.0mm の場合には、いずれの载荷荷重に対しても、類似の分布性状を示している。また、試験体厚が 12.5 mm の場合において、最大荷重が 500kN 载荷時における最大ひずみは 75 % 程度であるのに対して、試験体厚が 25.0mm の場合には約 80 %、試験体厚が 50.0mm の場合には約 85 % となり、試験体厚の増加に対応して同一圧縮応力時の圧縮ひずみが増加傾向にあることが分かる。応力が 50 MPa 以下の応力-ひずみ曲線を見ると、試験体厚の増加に対応してそのひずみ領域も大きくなっており、吸収エネルギーも増加傾向にあることが窺われる。

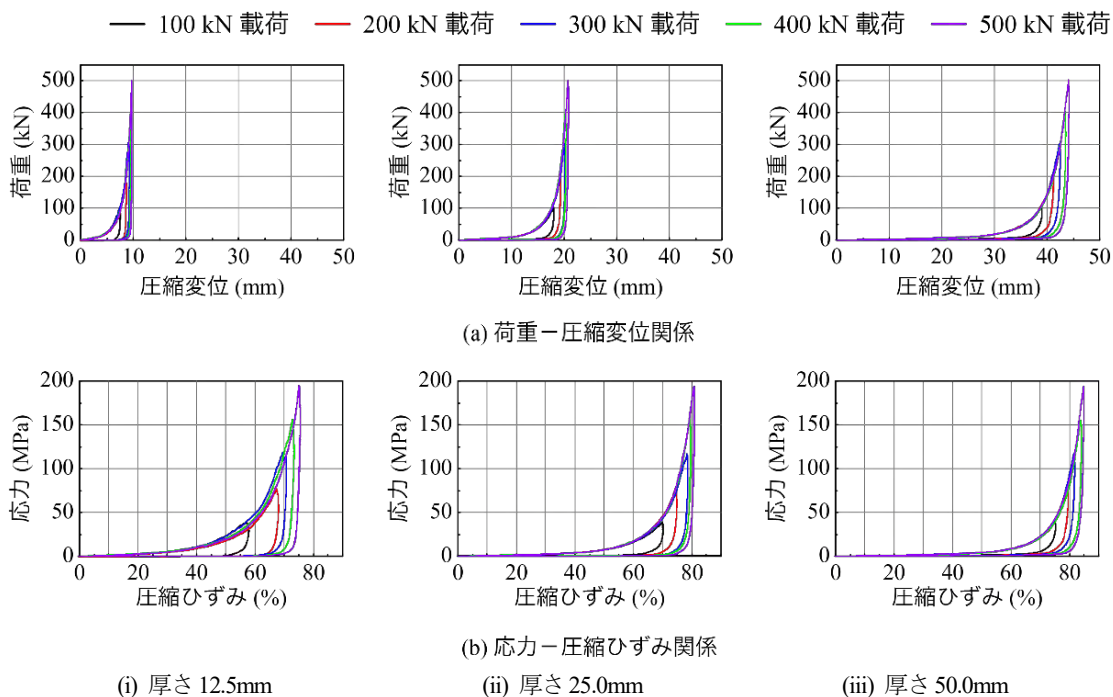


図-1 各緩衝ゴム試験体の静的载荷時における荷重-変位 ( $R-D$ ) および応力-ひずみ ( $\sigma-\epsilon$ ) 関係

### 3.2 衝撃载荷実験結果

図-2には、各緩衝ゴム試験体の衝撃载荷時における重錘衝撃力  $P$  に関する時刻歴波形を比較して示している。図より、いずれの試験体厚においても、载荷初期に高周波成分が励起していることが分かる。これは、重錘が载荷盤に衝突する際に発生する音波に対応した波形であるものと推察される。また、同一の重錘衝突速度において最大衝撃力値は試験体厚の増加に対応して減少傾向にあり、衝撃力の継続時間は延びる傾向にあることが分かる。

図-3には、各緩衝ゴム試験体の反力  $R$  に関する時刻歴波形を比較して示している。図より、波形の性状は、最大応答値を含め図-2における初期の高周波成分を取り除いた重錘衝撃力波形にほぼ対応していることが分かる。いずれの試験体厚に対する波形においても、重錘の衝突速度すなわち入力エネルギーの増加に対応して最大反力が増加傾向を示し、かつ波動の継続時間が減少傾向にあることが分かる。これより、常識的ではあるが、衝撃荷重が作用する場合には、緩衝ゴム厚を大きくすることによって、最大荷重強度を低下させかつ荷重継続時間を延ばし、荷重を時間的にもより均等化することが可能であることが、数値的にも明らかになった。

図-4には、各緩衝ゴム試験体の圧縮応力-ひずみ ( $\sigma-\epsilon$ ) 関係を比較して示している。図より、各試験体厚の応力-ひずみ ( $\sigma-\epsilon$ ) 曲線を見ると、静的载荷時と同様に衝突速度すなわち入力エネルギーが増加する場合においても類似の剛性勾配を示していることが分かる。また、前述の反力-変位 ( $R-D$ ) 関係と同様に、試験体厚の増加に対応して最大応力は減少傾向にあり、最大ひず

みは増加傾向にあることが分かる。ほぼ線形な応力-ひずみ ( $\sigma-\epsilon$ ) 曲線を示す衝突速度  $v$  を調べると、試験体厚が 12.5mm の場合には衝突速度が  $v=0.5\text{m/s}$  の場合であり、試験体厚が 25.0mm の場合で  $v=0.5\sim 1.0\text{m/s}$  であり、試験体厚が 50.0mm の場合でも  $v=1\text{m/s}$  程度までであることが分かる。また、試験体厚が 50.0mm と厚い場合においても、衝突速度が  $v=2.0\text{m/s}$  以上になると、応力  $\sigma$  が 50MPa 程度まで達することより、想像以上に大きな応力が伝達されることに注意しなければならないものと推察される。

ここで、図-1 (b) と図-4において静的载荷時と衝撃载荷時の応力-ひずみ曲線を比較すると、試験体厚が 12.5mm において圧縮ひずみ 75%における応力は静的载荷時が約 190MPa に対して衝撃载荷時が約 250MPa、試験体厚が 25.0mm において圧縮ひずみ 80%における応力は静的载荷時が約 176MPa に対して衝撃载荷時が約 240MPa、試験体厚が 50.0mm において圧縮ひずみ 80%における応力は静的载荷時が約 87MPa に対して衝撃载荷時が約 130MPa となっており、いずれの試験体厚に対しても同一圧縮ひずみに対する応力は静的载荷時よりも衝撃载荷時の方が3割から5割程度大きく示されることが分かる。

図-5には、各緩衝ゴム試験体に関する最大反力、最大圧縮変位、最大圧縮応力、最大圧縮ひずみと入力エネルギーの関係を示している。本研究では静的および衝撃载荷実験ともに一つの载荷条件に対して3体の試験体を使用して実験を実施している。(a) 図および(c) 図には、それぞれ最大反力および最大圧縮応力の分布特性を示している。最大圧縮応力は、最大反力を载荷面積で除す

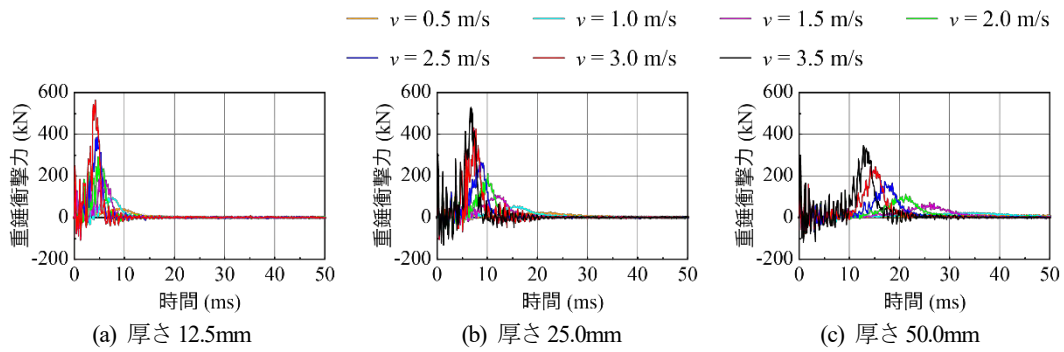


図-2 各緩衝ゴム試験体に関する重錘衝撃力  $P$  の時刻歴波形

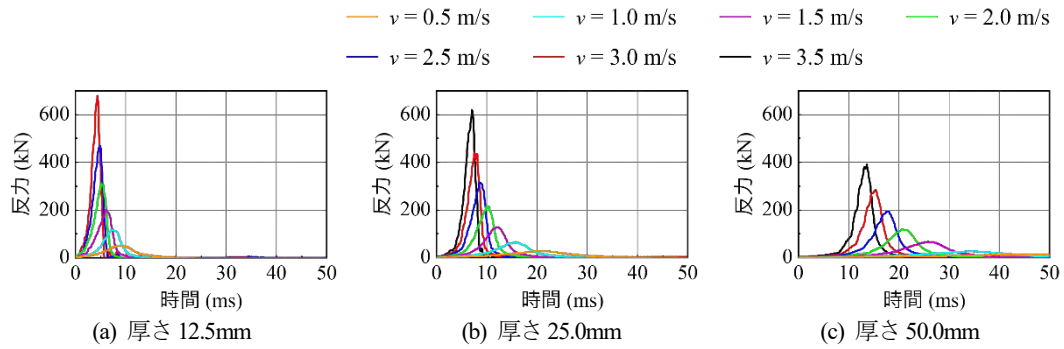


図-3 各緩衝ゴム試験体に関する反力  $R$  の時刻歴波形

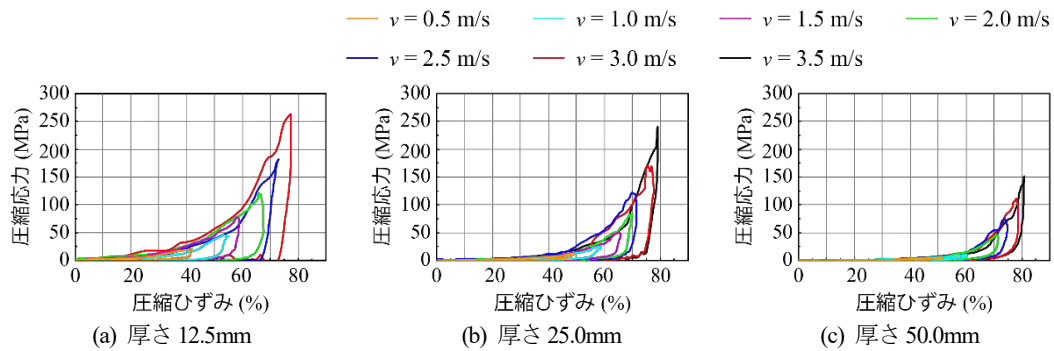


図-4 各緩衝ゴム試験体に関する圧縮応力-ひずみ ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) の履歴曲線

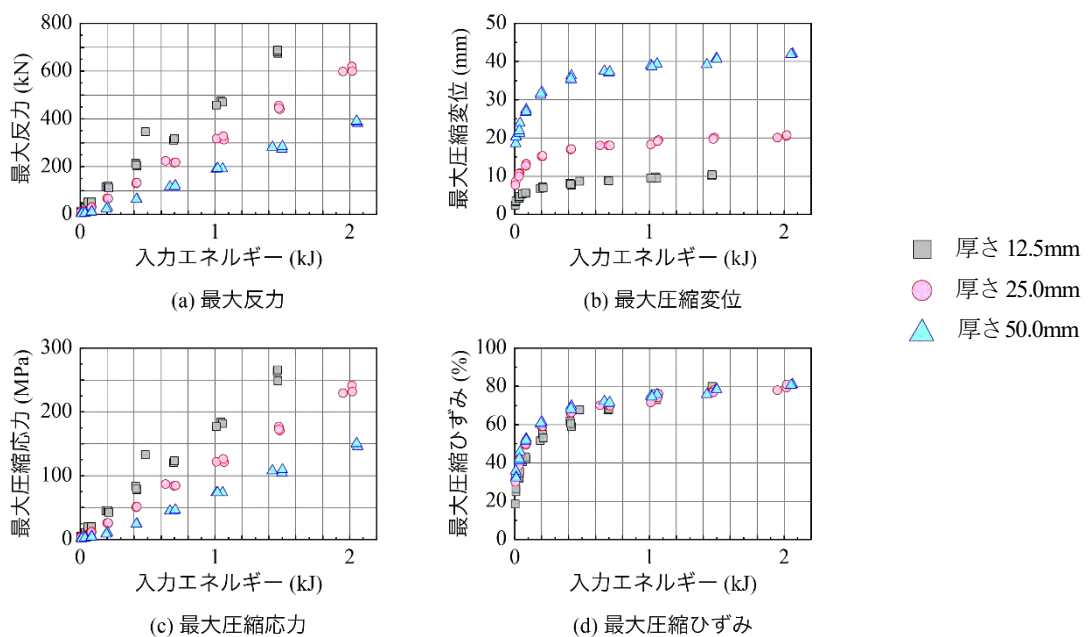


図-5 各緩衝ゴム試験体に関する各種最大応答値と入力エネルギーの関係

ことで得られることより、等しい分布特性を示していることが分かる。両図より、試験体厚が 12.5mm の場合の 1 試験体を除き各载荷条件に対する 3 体の実験結果は、ばらつきも少なく、類似の値を示していることから、試験体の製作も含めて実験の精度は比較的良好であるものと判断される。両図より、最大反力および最大圧縮応力は、試験体厚毎に入力エネルギーに対して線形な分布性状を示すことが分かる。

(b) 図には、最大圧縮変位に関する分布図を示している。図より、最大圧縮変位は緩衝ゴム試験体の厚さに対応して大きくなっており、入力エネルギーが大きくなると一定値に漸近することが分かる。

(d) 図には、最大圧縮ひずみに関する分布図を示している。図より、試験体厚に関わらず類似の分布性状を示していることが分かる。すなわち、最大圧縮ひずみは試験体厚に拘わらず入力エネルギーが大きくなると一定値に漸近することが分かる。本試験体では圧縮ひずみは 80%程度に収束する結果となった。

#### 4. まとめ

本研究では、緩衝ゴムを対象に衝撃载荷時の動的な力学的特性を把握するための基礎的な検討を目的に、断面積が同一で厚さの異なる小型試験体に対する静的载荷実験および重錘落下衝撃载荷実験を実施した。本研究の範

囲内で明らかとなったことは以下のとおりである。

- 1) 同一の入力エネルギーに対して、重錘衝撃力および反力は試験体厚の増加とともに最大値が減少傾向にあり、継続時間は増加傾向にある。また、同一の試験体厚で比較すると、入力エネルギーの増加に対応して最大値が増加するとともに、波形の継続時間が短くなる。
- 2) 同一の圧縮ひずみに対する応力は、いずれの試験体厚においても、衝撃载荷時が静的载荷時よりも大きい。
- 3) 最大反力は入力エネルギーに対して線形に分布し、その勾配は試験体厚が大きいほど小さい。
- 4) 最大圧縮ひずみは試験体厚に拘わらず入力エネルギーが大きくなると一定値に漸近する。

#### 参考文献

- 1) 今野久志, 小室雅人, 岸徳光, 久慈茂樹, 余野智哉: 緩衝ゴム試験片に関する静荷重及び重錘落下衝撃荷重载荷実験, 令和 2 年度土木学会北海道支部論文報告集, 第 77 号, 2021.
- 2) 今野久志, 安中新太郎, 小室雅人, 岸徳光, 久慈茂樹, 余野智哉: 緩衝ゴム試験体の衝撃荷重载荷時における力学的特性に関する基礎的な検討, 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, 2021.