

緩衝ゴム試験片に関する静荷重及び重錘落下衝撃荷重載荷実験

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

(国研)土木研究所寒地土木研究所	正 員	今野 久志	(Hisashi Konno)
室蘭工業大学	正 員	小室 雅人	(Masato Komuro)
室蘭工業大学	名誉会員	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
東京ファブリック工業(株)	正 員	久慈 茂樹	(Shigeki Kuji)
(株)ビー・ピー・エム	正 員	余野 智哉	(Tomoya Yono)

1. はじめに

ゴムは、粘弾性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舷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や桁端のパラペット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の応用は多岐に渡っているが、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、大きさが50 mm 四方で厚さを変化させた場合における静荷重載荷及び重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施し、ゴム試験体の衝撃荷重載荷時の力学的な諸特性について検討を行うこととした。本研究では、ゴム試験体の上表面積に対する側面積の総和の比として表される形状率を、1, 2, 4 に変化させて実験を行った。また、重錘落下衝撃荷重載荷実験には、300 kg 重錘を用い、衝突速度を $V = 0.25 \sim 4 \text{ m/s}$ まで変化させることとした。なお、本実験に用いたゴム試験体は、クロロプレンゴム (CR) で、硬度が $55 \pm 5^\circ$ である。

2. 実験概要



写真－1 静荷重載荷実験の状況



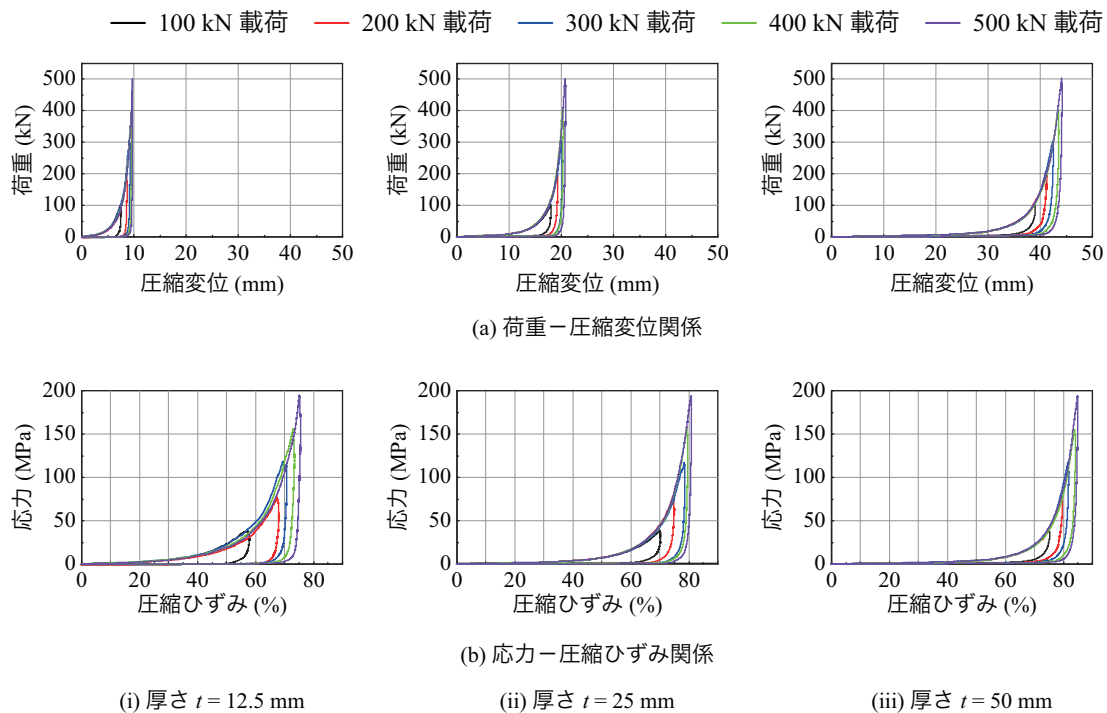
(a) 90 kN 級ロードセルを設置した場合



(b) 490 kN 級ロードセルを設置した場合

写真－2 重錘落下衝撃荷重載荷装置の概要

静荷重載荷実験は、容量 3,000 kN のアムスラーを用いて行った。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、基本的に約 1 kN/s で荷重制御方式で載荷した。本研究では、静荷重載荷時と衝撃荷重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、各荷重レベル

図-1 緩衝ゴムの静載荷時における荷重-変位 ($R-D$) および応力-ひずみ ($\sigma-\epsilon$) 関係の比較

毎に試験体を取り替えて、最低荷重を 100 kN、増分荷重を 100 kN として最大 500 kN までの載荷実験を実施した。写真-1 には、実験時の状況を示している。

一方、衝撃荷重載荷実験に関しては、重錘落下衝撃荷重載荷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 1,500 mm の H 形鋼 (H400 $\times$ 400 $\times$ 13 $\times$ 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 500 mm 毎に隔壁を設け、かつウェブ両面にも板厚が 22 mm の鋼板を高さ方向に溶接している。また、架台上面部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 40 mm 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 350 kN 程度以内の場合には 90 kN 級ロードセル 4 個を組み合わせ、それ以上の場合には 490 kN 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 50 mm 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 160 mm 四方であり、厚さは 25 mm としている。さらに、直接重錘が載荷される載荷盤は、最大 100 mm 四方の試験片の載荷が可能となるように 200 mm 四方とし、厚さを 30 mm としている。なお、載荷盤の四方には径が 10 mm のガイド棒およびバネを取り付け、載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。

衝撃荷重載荷実験は、質量 300 kg、先端直径 200 mm 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 、載荷盤と試験体設置盤側面に添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、2,000 fps 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 側面に添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。試験体は載荷中に偏心して変位する場合があることより、各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 静載荷実験結果

図-1 には、緩衝ゴムに関する静荷重載荷実験結果の荷重-変位 ($R-D$)、載荷前の緩衝ゴムの載荷面積及び厚さを基準とした公称応力 (以後、単に応力、 σ) - 公称ひずみ (以後、単にひずみ、 ϵ) 曲線を示している。各図は、試験体を取り替えて、荷重を 100 kN から 500 kN まで 100 kN 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 ($\sigma-\epsilon$) 曲線である。

(a) 図より、載荷時には、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、形状率が 1 で試験体厚が 12.5 mm の場合における応力-ひずみ ($\sigma-\epsilon$) 曲線を見ると、最大荷重が 300 kN 時に他の載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。形状率が 1 以上の場合には、

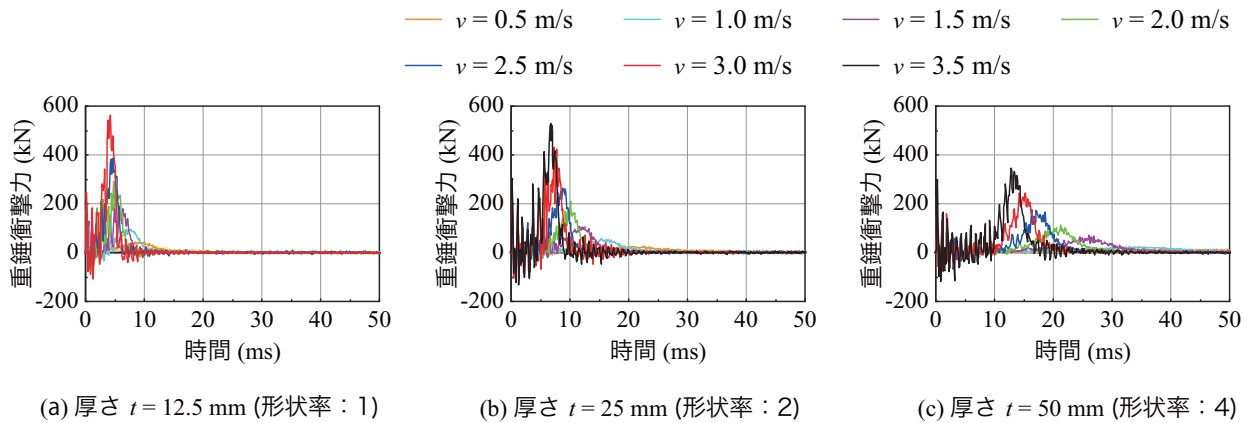


図-2 各ゴム試験体に関する重錘衝撃力 P に関する時刻歴波形の比較

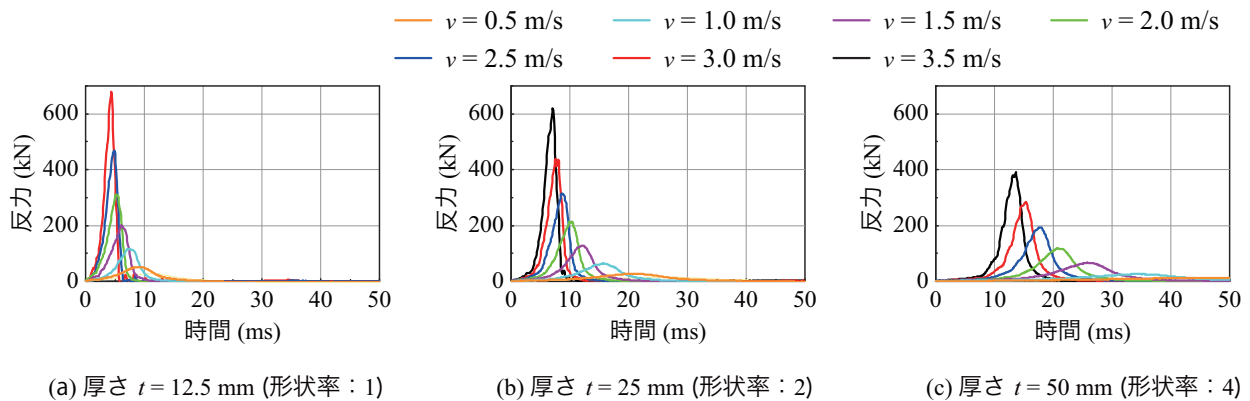


図-3 各ゴム試験体に関する反力 R に関する時刻歴波形の比較

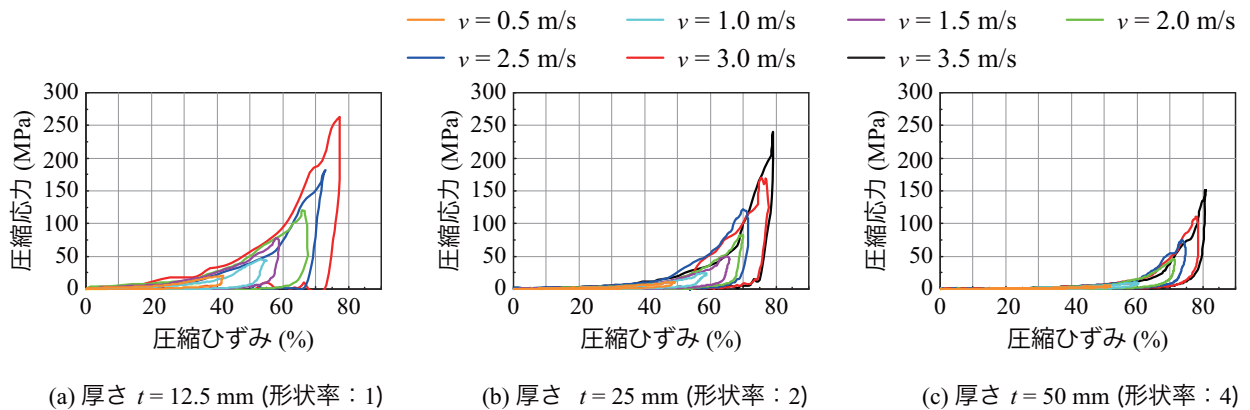


図-4 各ゴム試験体に関する圧縮応力-ひずみ ($\sigma - \epsilon$) に関する履歴曲線の比較

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、形状率が1の場合において、最大荷重が500 kN 载荷時における最大ひずみは75%程度であるのに対して、形状率が2の場合には80%となり、形状率の増加に対応して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、形状率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。

3.2 衝撃荷重载荷実験結果

図-2には、各緩衝ゴム試験体の衝撃荷重载荷時における重錘衝撃力 P に関する時刻歴応答波形を比較して示している。図より、いずれの形状率に対する試験体の波形においても、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、最大衝撃力値は形状率の増加に対応して減少傾向にあり、

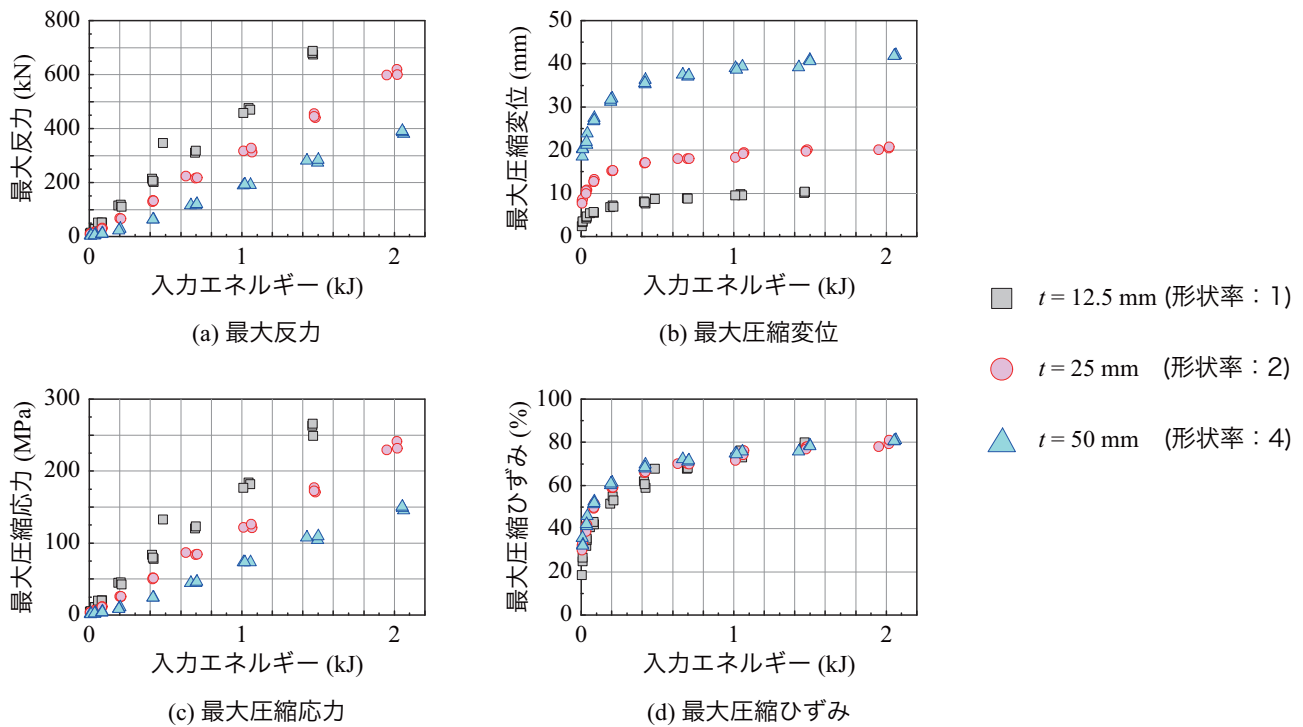


図-5 各ゴム試験体に関する入力エネルギーに対する各種最大応答値の分布比較

荷重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 に関する時刻歴応答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。いずれの形状率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。また、各形状率間の結果を比較すると、上述の重錘衝撃力波形と同様に形状率の増加に対応して最大反力は減少傾向を示し、継続時間は延びる傾向にあることが分かる。ここで、衝突速度 $V = 2 \text{ m/s}$ の場合における各形状率の結果を見ると、最大反力は形状率に対応して減少傾向にはあるが反比例的な性状は示していない。一方で、継続時間は形状率1の場合が 10 ms であるのに対して、形状率が増加する場合にはほぼ係数に対応して比例して延びていることが分かる。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、形状率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、各緩衝ゴムの圧縮応力-ひずみ($\sigma - \epsilon$)関係に関する比較を示している。図より、各形状率の場合における応力-ひずみ($\sigma - \epsilon$)曲線を見ると、静荷重載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、形状率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(σ

$-\epsilon$)曲線を示す衝突速度 V を調べると、形状率が1の場合にはほぼ衝突速度が $V = 0.5 \text{ m/s}$ の場合であり、形状率が4の場合でも $V = 1 \text{ m/s}$ 程度までであることが分かる。 $V = 1.5 \text{ m/s}$ には形状率が4の場合で、応力 σ が 50 MPa 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。

図-5には、各試験体に関する最大反力、最大圧縮変位、最大圧縮応力、最大圧縮ひずみを入力エネルギーを横軸に取って整理している。本研究では、各パラメータに関して、3試験体について実験を行っている。(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、最大反力を載荷面積で除す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、厚さが $t = 12.5 \text{ mm}$ の場合である形状率1の場合の1試験体を除き各パラメータに対するばらつきも少なく、各3試験体とも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、最大反力及び圧縮応力は、各形状率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、試験体厚すなわち形状率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、入力エネルギーは形状率に拘わらず圧縮ひずみに対してほぼ放物線状に分布していることが明らかになった。