

# 弾塑性型特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の 衝撃緩衝効果に関する実験研究

越峠雅博<sup>1</sup>・運上茂樹<sup>2</sup>・足立幸郎<sup>3</sup>・長屋和宏<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 横浜ゴム株式会社 工業資材技術部 (〒254-8601 平塚市追分2番1号)

<sup>2</sup>正会員 工博 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ 上席研究員 (〒305-0804 つくば市大字旭1番地)

<sup>3</sup>正会員 工修 阪神高速道路公団 工務部設計課係長 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

<sup>4</sup>正会員 国土交通省 総合政策局国際建設課 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

橋梁の大地震時のフェイルセーフ構造の一つである落橋防止装置は、緩衝機能を有することが求められている。このような緩衝機能を有する構造の一つとして、円筒型のゴム製緩衝装置がある。円筒型ゴム製緩衝装置に圧縮変位を作用させるとある変位でゴムに座屈を生じることから、荷重-変位特性を弾塑性型とすることが可能であり、エネルギー吸収効果に優れた緩衝装置として応用できることが期待される。本論では、円筒型ゴム製緩衝装置に着目し、桁の衝突時における衝撃緩衝効果を把握することを目的として小型模型橋梁を用いた振動台実験を行った。また、円筒型ゴム製緩衝装置の力学モデルを開発し、模型実験の衝突挙動の再現性について動的解析により検証し、さらに落橋防止装置の設計方法について検討した。

**Key Words** : unseating prevention structure, cylindrical rubber shock absorber, pounding, impact force

## 1. 目的

落橋防止構造は、下部構造や支承が破壊し、上下部構造間に大きな相対変位が生じた場合にも、桁かかり長をこえるような相対変位が生じないようにするものである。既往の震災事例では、落橋防止構造において地震動による衝撃的な作用力が原因と推測される破損が見られたことから、落橋防止構造は衝撃的な地震力を緩和するためゴムなどの緩衝材を用いて耐衝撃性を高める構造を用いることが求められている<sup>1)</sup>。このような衝撃的な地震力を緩和するための緩衝装置の構造として各種の構造が提案されており、石川らは鋼製ピンの代わりにゴム被覆したピンを用いた落橋防止連結板に対して衝撃実験あるいは高速載荷実験を行い、衝撃的な外力に対する緩衝効果および荷重分散効果を明らかにしている<sup>2)</sup>。森山らもゴムなどの緩衝材を用いた落橋防止連結板に対して高速引張り載荷実験を行い、衝撃力の低減効果を明らかにしている<sup>3)</sup>。潤田らはゴム被覆した鋼製チェーンに対して引張り載荷実験を行い、ゴム被覆による緩衝性の効果を確認している<sup>4)</sup>。

さらに、圧縮特性を利用した直方体型の構造などに関しても実験的、解析的に研究が行われており、窪田らは落橋防止壁の前面に緩衝材を設ける圧縮型の緩衝構造を提案し、様々な材料に対して衝突実験を行うと

ともに解析的に検討を行っている<sup>5)</sup>。また、川島らはゴムの圧縮特性を利用した緩衝材による桁間衝突の低減効果に関して実験的あるいは解析的に検討を行い、その効果を明らかにしている<sup>6),7)</sup>。

このような緩衝装置の構造の一つとして、ゴムの圧縮特性を利用した円筒型の構造が考えられる。円筒型のゴムを圧縮すると、座屈を生じることにより荷重-変位関係が弾塑性型となることが知られており<sup>8)</sup>、したがって直方体型に比較するとエネルギー吸収効果に優れた緩衝装置として用いることが期待できる。しかし、そのような荷重-変位関係が弾塑性型となる円筒型ゴム製緩衝装置の衝撃緩衝効果に関してはまだ十分に明らかにされておらず、また地震動が作用した場合の、弾塑性型の特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の衝撃緩衝効果に関して実験的に確認を行った例は見当たらない。そこで本論では、円筒型ゴム製緩衝装置の地震時における衝撃緩衝効果を把握することを目的として、振動台を用いた衝突実験を行った結果を報告する。また、円筒型ゴム製緩衝装置のモデル化を行い、動的解析を用いた衝突時の挙動の再現性について検討した。さらに、円筒型ゴム製緩衝装置を用いた場合の落橋防止装置の設計および円筒型ゴム製緩衝装置の設計法について検討を行った結果を報告する。

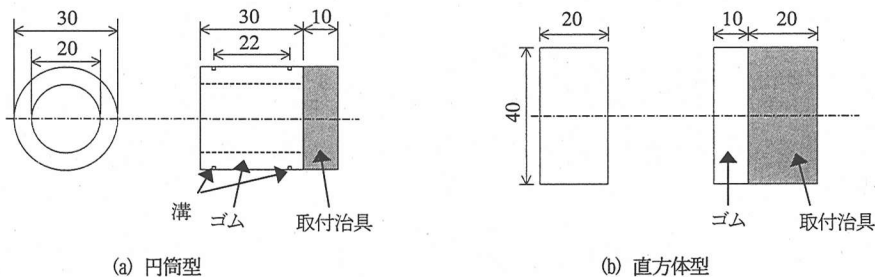


図-1 実験に用いた緩衝装置の構造 (単位: mm)

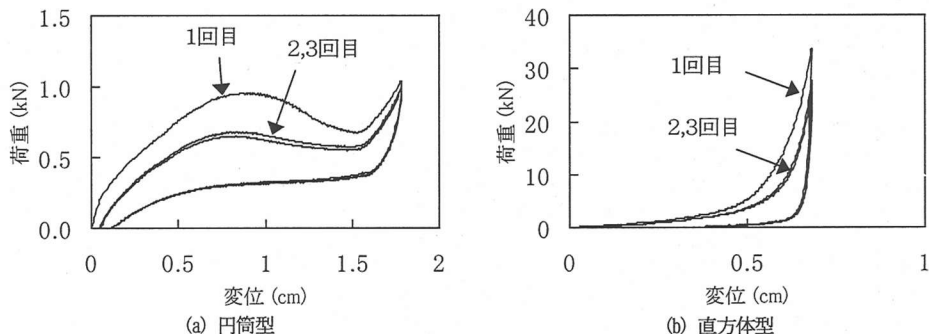


図-2 緩衝装置の荷重-変位特性

## 2. 実験に用いた緩衝装置

実験に用いた緩衝装置の構造を図-1に示す。衝撃緩衝効果の比較のために、直方体型ゴム製緩衝装置も用意した。材質としては、円筒型は座屈荷重を大きくするためにせん断弾性係数が $1.71 \text{ N/mm}^2$ の天然ゴムを用い、直方体型は $0.59 \text{ N/mm}^2$ の天然ゴムを用いた。円筒型は、座屈が安定して生じるようにするため、2箇所、外周に沿って幅 $1 \text{ mm}$ 、深さ $1 \text{ mm}$ の溝を設けた。

円筒型および直方体型緩衝装置の基本的な荷重-変位特性を把握することを目的として、圧縮載荷試験を実施した。試験は、緩衝装置を載荷板の間に設置し、載荷板を動かすことによって圧縮載荷を行い、試験機に内蔵した荷重計と変位計により、荷重と変位を測定した。試験は、JIS K6394-1995 加硫ゴムの動的性質試験方法に則り、雰囲気温度 $22^\circ\text{C}$ 、振動数 $0.1 \text{ Hz}$ の3回加振とした。これは、天然ゴムの力学特性が2回目以降は安定することによる。

直方体型および円筒型緩衝装置の圧縮載荷試験により得られた荷重-変位特性を図-2に示す。図-2(b)より、直方体型緩衝装置の荷重-変位曲線は、変位の増加とともに荷重が増加し、変位が $0.5 \text{ cm}$ を超えるとハードニングの現象を示す。2回目載荷、3回目載荷は、初回載荷と比較すると、変位に対する荷重の立ち上が

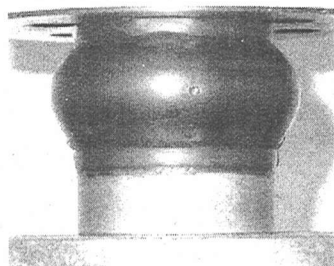


写真-1 円筒型緩衝装置の座屈変形

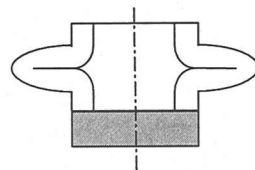


図-3 円筒型緩衝装置の変形状態

りが遅い。

写真-1は、円筒型緩衝装置の圧縮変形状態を示しているが座屈を生じていることが分かる。また荷重-変位特性は、図-2(a)より弾塑性型の特性を有しているのが分かる。2回目載荷、3回目載荷は、初回載荷と比較して座屈荷重の値が小さくなっている。これは、連続して載荷したため、載荷後の変形が完全に戻らない状態で、再び円筒型緩衝装置に対して圧縮載荷が行

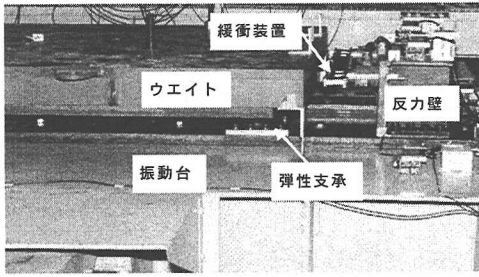


写真-2 実験状況

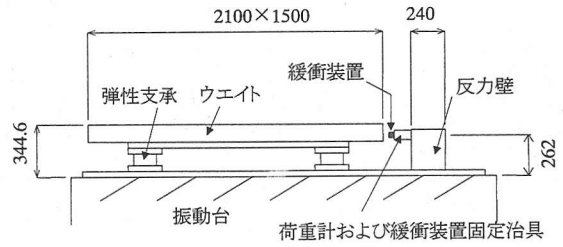


図-4 実験装置の概要 (単位: mm)

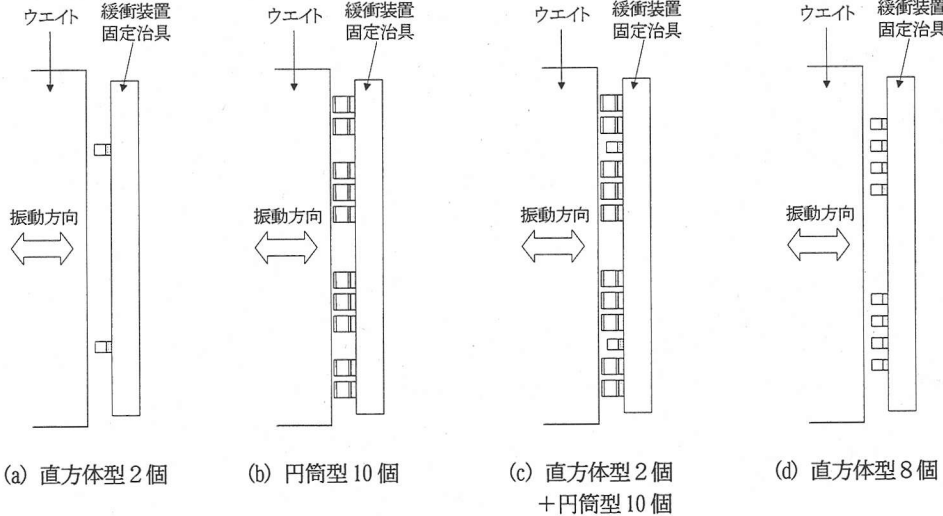


図-5 緩衝装置の取付状況

われ、初期変形を有した状態での座屈となったことによる。また、荷重-変位特性は変位が1.5cm以上になるとハードニングを生じており、これは、図-3に示すように、変位が1.5cm以上になると円筒型緩衝装置の上下面が接触し、変形状態が座屈変形からゴムの圧縮変形に変化したことによる。直方体型および円筒型緩衝装置ともに3回目載荷の曲線は、2回目載荷の曲線とほぼ一致した。

### 3. 振動台実験

橋梁の衝突の状況を得るため、写真-2および図-4に示すような、橋を想定した模型実験装置を振動台上に設置した。橋脚を想定した4基の天然ゴム製弾性支承に、上部構造を想定したウエイトを乗せた。また、振動台上に設置した左右2個の反力壁の前面に2つの荷重計を取り付け、さらに緩衝装置を取り付けるための緩衝装置固定治具を設置した。そして、振動台を加

振することにより、ウエイトを緩衝装置固定治具の前面に取り付けた緩衝装置に衝突させた。ウエイトの重量は39.46kNとし、橋梁の平均的な固有周期である0.5秒程度となるよう、弾性支承の水平剛性を調整した。

緩衝装置の取付状況を図-5に示す。緩衝装置の荷重-変位特性が衝撃緩衝性能に及ぼす効果を把握するため、ハードニング特性を有する緩衝装置としては、直方体型2個の条件を用いた。これは、道路橋示方書より、落橋防止構造の設計地震力は死荷重の1.5倍となることから、本実験での地震力は、ウエイトの重量を39.46kNとすると59.19kNとなる。その荷重が直方体型緩衝装置に作用した場合に、ゴムに生じる応力が2章の実験における最大応力相当の37N/mm<sup>2</sup>となるように設定したものである。また、剛性が異なる場合の効果を把握するために、直方体型8個の条件も用意した。弾塑性型の特性を有する緩衝装置としては、円筒型10個の条件を用意した。これは、本実験での地震力59.19kNに対して、円筒型緩衝装置の1回目載荷の座屈荷重が、1/6の10kN程度になるように設定したものである。また、

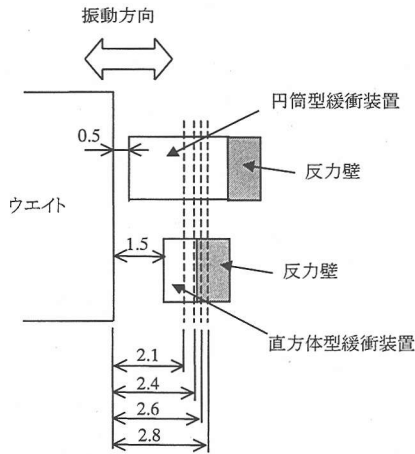


図-6 緩衝装置とウエイトの最大応答変位との関係 (単位: cm)

弾塑性型の特性とハードニング特性を有する緩衝装置の効果を把握するため、直方体型2個と円筒型10個の条件も用意した。直方体型緩衝装置は、ウエイトの変位量が1.5cmに達した時に衝突するように調整し、円筒型緩衝装置は、ウエイトの変位量が0.5cmに達した時に衝突するように調整した。これは、円筒型緩衝装置と直方体型緩衝装置のハードニングを示す変位が、等しくなるようにしたものである。さらに、円筒型緩衝装置の座屈荷重とウエイト重量の比が衝撃緩衝効果に及ぼす影響を検討するために、ウエイトの重量を16.88kNに変更した場合についても実験を行った。

振動台への入力加速度波形は、正弦波と地震波の2種類とした。正弦波は、緩衝装置の基本的な緩衝効果を把握するために、緩衝装置とウエイトを1回だけ衝突させるために1周期の波形を入力した。また、緩衝装置とウエイトの衝突時の衝撃度が変化した場合の挙動を把握するために、ウエイトの最大応答変位が2.1, 2.4, 2.6, 2.8cmとなるように、入力振動数および入力加速度を調節した。図-6に緩衝装置とウエイトの最大応答変位との関係を示す。地震波は、1978年宮城県沖地震において開北橋周辺の地盤上で記録された橋軸直角方向の波形を用い、ウエイトの変位量が正弦波入力時の条件の一つである2.6cmとなるように入力加速度のみを調節した。表-1に実験ケースを示す。測定項目としては、振動台の上部、ウエイトの上部および左右の反力壁の上部に加速度計を取り付け、各点に生じる加速度を記録した。緩衝材と左右の反力壁の間には、荷重計を取り付けて反力壁に作用する荷重を記録し、レーザー変位計を用いてウエイトの変位量を測定した。

表-1 実験ケース

| 実験ケース | ウエイト重量 (kN) | 入力波形    | 最大加速度 ( $\text{cm/s}^2$ ) | ウエイト想定変位 (cm) |
|-------|-------------|---------|---------------------------|---------------|
| Case1 | 39.46       | 正弦波 3Hz | 166                       | 2.1           |
| Case2 | 39.46       | 正弦波 3Hz | 191                       | 2.4           |
| Case3 | 39.46       | 正弦波 3Hz | 209                       | 2.6           |
| Case4 | 39.46       | 正弦波 3Hz | 224                       | 2.8           |
| Case5 | 16.88       | 正弦波 5Hz | 438                       | 2.1           |
| Case6 | 16.88       | 正弦波 5Hz | 500                       | 2.4           |
| Case7 | 16.88       | 正弦波 5Hz | 542                       | 2.6           |
| Case8 | 16.88       | 正弦波 5Hz | 597                       | 2.8           |
| Case9 | 39.46       | 地震波     | 343                       | 2.6           |

#### 4. 実験結果

##### (1) 正弦波を入力した場合

正弦波を入力した場合における、ウエイトの応答加速度の時刻歴波形を図-7に示す。実験ケースとしてはCase4に相当する。ウエイトが衝突しない場合は、図-7(a)より、応答加速度は正弦波的な振動をしており、最初の1周期における応答加速度の絶対値の最大値は $-476\text{cm/s}^2$ となった。

緩衝装置として直方体型2個を取り付けた場合は、図-7(b)より、ウエイトと反力壁が衝突し、応答加速度が時間とともに急激に立ち上がっており、絶対値の最大値は $-1491\text{cm/s}^2$ となった。円筒型10個の場合は、図-7(c)より、ウエイトと反力壁とは衝突をしているが、応答加速度の時刻歴波形はなだらかな形をしており、絶対値の最大値は $-567\text{cm/s}^2$ と直方体型2個の値に比較して38%に減少した。直方体型2個+円筒型10個の場合は、図-7(d)より、円筒型10個と同様にウエイトの応答加速度の時刻歴波形はなだらかな形をしており、絶対値の最大値は $-683\text{cm/s}^2$ と、直方体型2個の場合に比較して46%に減少し、緩衝効果が見られた。

また、直方体型8個の場合は、図-7(e)より、ウエイトの応答加速度が直方体型2個の場合と同様に時間とともに急激に立ち上がっており、絶対値の最大値も $-1470\text{cm/s}^2$ と、ほぼ等しい値を示した。

実験ケースCase4における最大応答値を表-2に示す。ここでウエイトの応答変位、反力壁の応答加速度および反力壁の衝撃荷重は、左側の反力壁で得られた値を示している。ウエイトの応答変位は、直方体型2個お

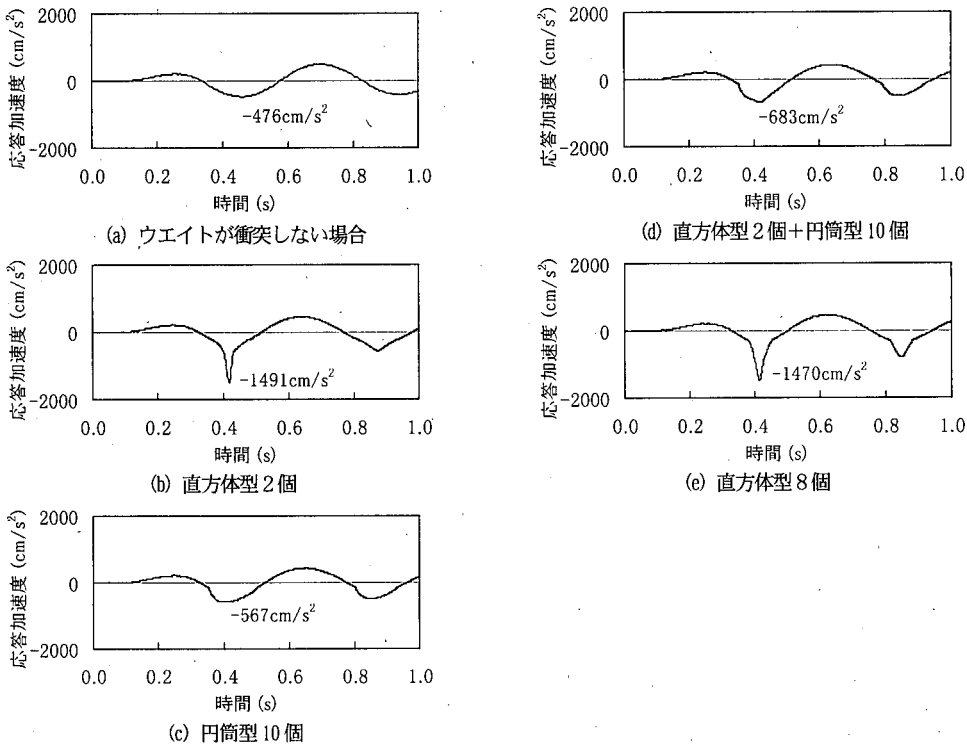


図-7 正弦波衝突実験におけるウエイトの時刻歴波形 (Case4)

表-2 衝突時の最大応答

| 緩衝装置の取付条件     | ウエイトの<br>応答加速度<br>( $\text{cm/s}^2$ ) | ウエイトの<br>応答変位<br>(cm) | 反力壁の<br>応答加速度<br>( $\text{cm/s}^2$ ) | 反力壁の<br>衝撃荷重<br>(kN) |
|---------------|---------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|----------------------|
| ウエイトが衝突しない    | -476                                  | 2.80                  | -                                    | -                    |
| 直方体型2個        | -1491                                 | 2.32                  | 581                                  | 23.1                 |
| 円筒型10個        | -567                                  | 2.11                  | 124                                  | 4.8                  |
| 直方体型2個+円筒型10個 | -683                                  | 2.05                  | 35                                   | 6.0                  |
| 直方体型8個        | -1470                                 | 2.17                  | 108                                  | 21.8                 |

よび直方体型8個の場合には、それぞれ2.32cm, 2.17cmであるのに対して、円筒型10個あるいは直方体型2個+円筒型10個の場合には、2.11cm, 2.05cmとなり、円筒型緩衝装置を用いることにより、衝突時におけるウエイトの応答変位が減少している。反力壁の衝撃荷重は、直方体型2個および直方体型8個の場合には、それぞれ23.1kN, 21.8kNとなるのに対して、円筒型10個あるいは直方体型2個+円筒型10個の場合には、4.8kN, 6.0kNとなり、円筒型緩衝装置を設置することにより衝撃荷重の低減効果が表れている。このように、円筒型緩衝装置を用いることにより、衝突時におけるウエイトの応答加速度、反力壁の衝撃荷重を低減でき、また応答変位も小さくすることが可能であると言える。

さらに、緩衝装置の衝撃緩衝効果を比較するために、

衝突時におけるウエイトの応答加速度と反力壁の衝撃荷重について、緩衝装置の取付条件ごとにまとめたものを図-8に示す。図の横軸は $C_F$ を、縦軸はウエイトの応答加速度比および反力壁の衝撃荷重を示している。ここで、 $C_F$ は反力壁の位置を示すもので、次式で定義する。

$$C_F = \frac{d_F}{d_0} \quad (4a)$$

ここに、 $d_F$ =ウエイトと反力壁との間隔、 $d_0$ =自由に振動させた場合のウエイトの最大応答変位である。

したがって $C_F$ が1より小さくかつ緩衝装置がない場合は、ウエイトは反力壁に直接衝突することになる。また、応答加速度比は、衝突時のウエイトの最大応答

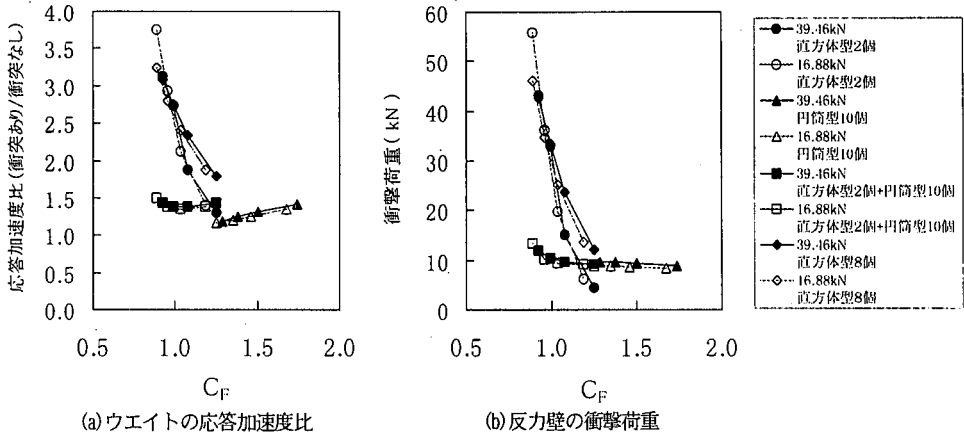


図-8 緩衝装置とウエイトの応答加速度比および反力壁の衝撃荷重の関係

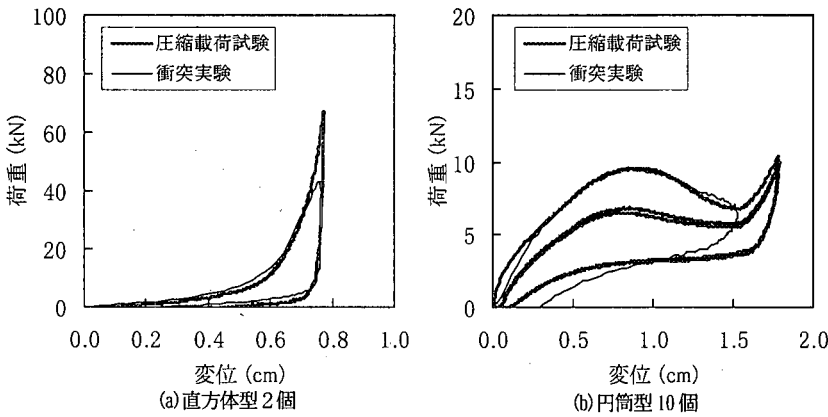


図-9 圧縮荷重試験と衝突実験における荷重-変位曲線 (Case4)

加速度を、自由に振動させた場合のウエイトの最大応答加速度で除したものである。

図-8(a)より、応答加速度比の曲線は、今回の実験の範囲内においては、ウエイトの重量に依存しない。また、直方体型2個および直方体型8個の場合には、 $C_F$ が小さくなるにしたがい応答加速度比が急激に大きくなるが、円筒型緩衝装置を用いた場合には、 $C_F$ が1より小さい場合でも応答加速度比は急激に上昇せず、衝撃緩衝効果が表れている。これは、円筒型緩衝装置の履歴エネルギー吸収効果によって、ウエイトの保有していた運動エネルギーが吸収され、ウエイトの変位がゴムのハードニングする値まで達しなかったことによる。したがって $C_F$ がさらに小さくなり、ウエイトの変位がゴムのハードニングする値まで達するようになると、直方体型2個および直方体型8個の場合と同じく、応答加速度比が急激に上昇するものと考えられる。

また、座屈荷重が大きく履歴エネルギー吸収効果が大きい緩衝装置を用いることにより、より小さい $C_F$ まで応答加速度比を低減することが可能と言える。図-8

(b)より、衝撃荷重もウエイトの応答加速度比と同様の傾向を示しているのが分かる。

図-9は、衝突時における緩衝装置の荷重-変位特性を示したもので、実験ケースCase 4の場合を示している。図の横軸は変位を、縦軸は荷重を示しており、比較の対象として圧縮荷重試験における荷重-変位曲線も示した。ただし、圧縮荷重試験における荷重-変位曲線は、緩衝装置が1個の場合の関係であることから、直方体型2個の場合には荷重を2倍、円筒型10個の場合には荷重を10倍している。図より、直方体型2個、円筒型10個の両条件ともに、衝突時における荷重-変位曲線と圧縮荷重試験における荷重-変位曲線は良く一致しており、衝突時の緩衝装置の荷重-変位特性は、圧縮荷重試験により把握可能と言える。また、円筒型緩衝装置の場合には、圧縮荷重試験における1回目載荷の荷重-変位曲線と良く一致している。

これは、振動台を用いた衝突実験は、緩衝装置の調整等で実験間隔が長くなるため、1回目載荷の荷重-変位曲線と良く一致するものと思われる。

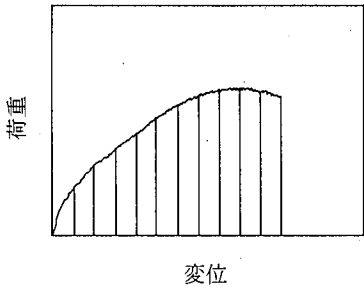


図-10 緩衝装置の履歴エネルギー

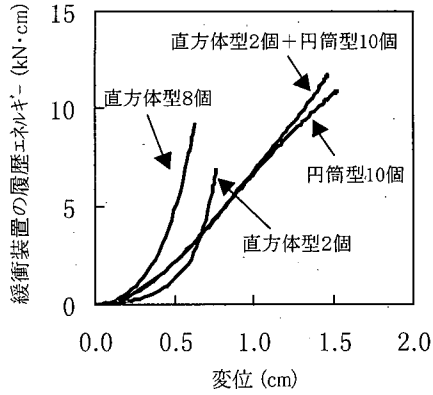


図-11 緩衝装置の変位と履歴エネルギーの関係 (Case4)

### (2) 履歴エネルギーと衝撃吸収特性との関係

図-10に示すように、衝突時における荷重-変位曲線より求まる面積を、緩衝装置の履歴エネルギー $E_s$ とする。図-11は、実験ケースCase4における、各緩衝装置の履歴エネルギーを比較したもので、横軸は変位を、縦軸は履歴エネルギーを示している。図より、直方体型の場合には、変位の増加とともに履歴エネルギーが急激に上昇しているが、円筒型の場合には、履歴エネルギーの増加は緩やかである。しかし、最終的な履歴エネルギーは直方体型に比較すると大きくなる。さらに、衝突時におけるウエイトの最大応答変位を推定するために、エネルギーの釣り合いが成立しているか調査した。即ち、自由に振動させた場合のウエイトの最大応答変位から求まるエネルギーが、衝突時におけるウエイトの最大応答変位から求まるエネルギーと緩衝装置の履歴エネルギーの和に等しいか確認を行った。

$$\frac{1}{2}k \cdot x_0^2 = \frac{1}{2}k \cdot x^2 + E_s \quad (4b)$$

ここに、 $k$  = 弾性支承の剛性、 $x_0$  = 自由に振動させた場合のウエイトの最大応答変位、 $x$  = 衝突時におけるウエイトの最大応答変位、 $E_s$  = 緩衝装置の荷重-変位曲線から求まる履歴エネルギーである。

図-12は、ウエイトが最初に保有するエネルギーを、自由に振動させた場合のウエイトの最大応答変位から求まるエネルギーと仮定し、緩衝装置の圧縮載荷試験における荷重-変位曲線から求まる履歴エネルギーを用いて、衝突時のウエイトの変位を計算で求め、実験値と比較した図である。横軸は計算値を、縦軸は実験値を示している。図より、計算で求めた変位と実験におけるウエイトの変位とは良く一致している。したがって、緩衝装置の荷重-変位曲線およびウエイトが

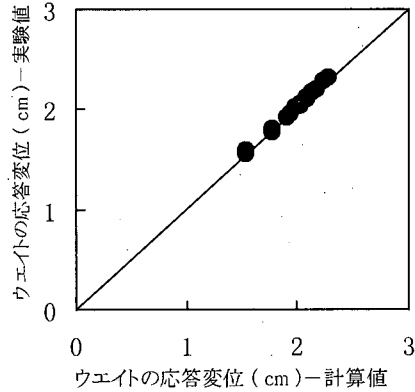


図-12 ウエイトの応答変位の計算値と実験値の比較

最初に保有するエネルギーが既知であれば、衝突時におけるウエイトの最大応答変位は、計算により算出することが可能と言える。

### (3) 地震波を入力した場合

地震波を入力した時の、左壁で得られたウエイトの応答加速度、反力壁の衝撃荷重の時刻歴波形について、図-13~図-15に示す。図は、ウエイトと反力壁との衝突が生じ、衝撃荷重が記録された8.2秒から22秒までの時刻歴波形を示しており、横軸が時間を、縦軸が各々ウエイトの応答加速度と反力壁の衝撃荷重を示している。図-14(b)および図-15(b)の反力壁の衝撃荷重の時刻歴図より、直方体型2個の場合には衝突回数が8回と少ないのに対して、円筒型10個の場合には26回と約3倍も衝突回数が多いことが分かる。

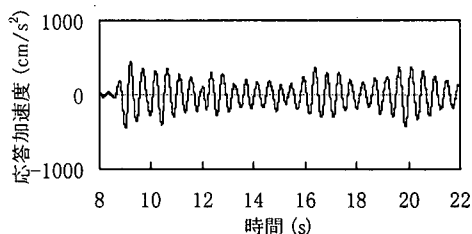
しかし、直方体型2個の場合の最大衝撃荷重が32.8kNなのに対して、円筒型10個の場合には4.6kNと衝撃荷重が15%程度の値となり、円筒型緩衝装置の衝撃緩衝効果が表れている。直方体型2個+円筒型10個の場合も、円筒型10個の場合と同様に衝突回数が多く、1回あたりの

衝撃荷重が小さくなる傾向にあり、最大衝撃荷重が9.4kNと直方体型2個の場合の30%程度であった。さらに、直方体型8個の場合には、衝突回数が16回と、直方体型2個の場合に比較して衝突回数が増えており、また最大衝撃荷重も42.7kNと130%程度に増加していた。

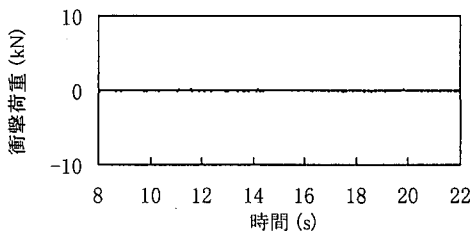
図-14(a)および図-15(a)のウエイトの応答加速度の時刻歴図より、ウエイトの応答加速度も反力壁の衝撃荷重と同様であり、直方体型2個の場合には応答加速度の絶対値の最大値が $-1998\text{cm/s}^2$ であるのに対して、円筒型10個の場合には $-601\text{cm/s}^2$ と、直方体型2個の場合に比較して30%程度の値となり、円筒型緩衝装置の衝撃緩衝効果が表れている。さらに、直方体型2個+円筒型10個の場合には、絶対値の最大値が $-885\text{cm/s}^2$ と、円筒型10個の場合に比較して値が大きくなるが、直方体型2個に比較すると44%程度の値であった。また、直方体型8個の場合には、絶対値の最大値が $-2475\text{cm/s}^2$ と最も値が大きくなり、直方体型2個の場合と比較しても124%に増加していた。このように直方体型8個の場合には、直方体型2個の場合に比較して、衝突回数が増加し、ウエイトの最大応答加速度あるいは反力壁の最大衝撃荷重が大きくなる傾向にある。この原因としては、直方体型8個の場合には、衝突時における緩衝装置の反発力が大きいため、ウエイトが大きく跳ね返され、その結果、加振中のウエイトの応答が大きくなるためと考えられる。

#### (4) 正弦波と地震波の比較結果

正弦波を用いた場合と地震波を用いた場合で緩衝装置の荷重-変位曲線に違いが見られるか、ウエイトの応答変位の時刻歴波形と反力壁の衝撃荷重の時刻歴波形を用いて、緩衝装置の荷重-変位曲線を求め比較を行った。図-16は、衝突時における緩衝装置の荷重-変位特性を示したもので、図の横軸は変位を、縦軸は荷重を示している。正弦波の荷重-変位曲線は、実験ケースとしてCase 4を用いた。図より、直方体型2個、円筒型10個の両条件ともに、正弦波と地震波における荷重-変位曲線は良く一致している。さらに、緩衝装置の衝撃緩衝効果が、正弦波と地震波で同じであることを確認するために、応答値について比較したものを表-3に示す。表より、正弦波および地震波を入力し、ウエイトを自由に振動させた場合における、ウエイトの応答加速度および応答変位の最大値は、ほぼ等しい値を示す。しかし、緩衝装置に衝突させた場合には、円筒型10個の場合の反力壁の衝撃荷重を除いて、ウエイトの最大応答加速度および反力壁の最大衝撃荷重は、地震波を入力した場合のほうが値が大きくなっており、この原因として、衝突時のウエイトと反力壁の相対速度

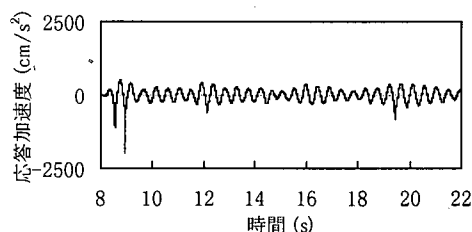


(a) ウエイトの応答加速度

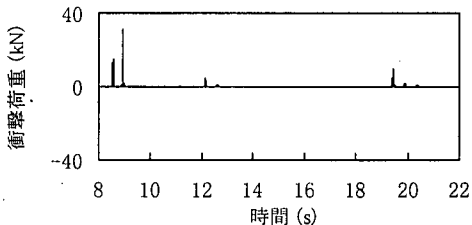


(b) 反力壁の衝撃荷重

図-13 ウエイトが衝突しない場合の時刻歴波形

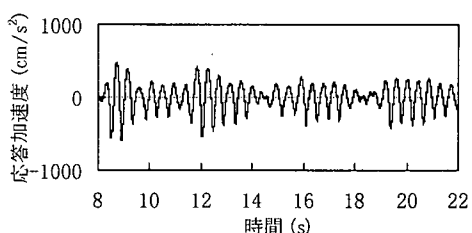


(a) ウエイトの応答加速度

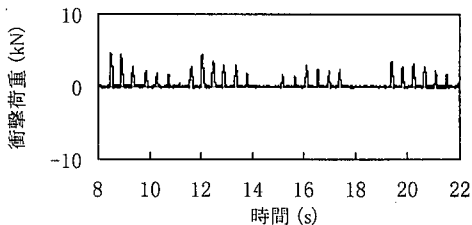


(b) 反力壁の衝撃荷重

図-14 直方体型2個の場合の時刻歴波形



(a) ウエイトの応答加速度



(b) 反力壁の衝撃荷重

図-15 円筒型10個の場合の時刻歴波形



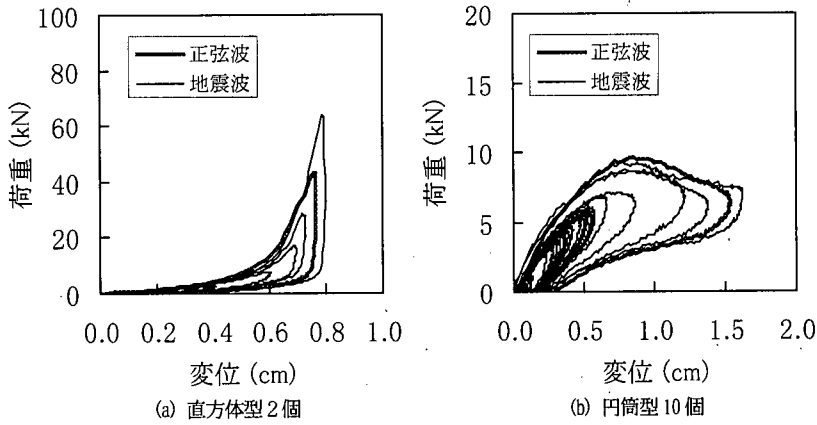


図-16 正弦波衝突実験と地震波衝突実験における荷重-変位曲線

表-3 正弦波と地震波の応答値の比較

| 緩衝装置の取付条件     | 入力波形    | $C_F$ | ウエイトの<br>応答加速度<br>( $\text{cm/s}^2$ ) | 反力壁の<br>衝撃荷重<br>(kN) | ウエイトの<br>応答変位<br>(cm) |
|---------------|---------|-------|---------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| ウエイトが衝突しない    | 正弦波     | —     | -450                                  | —                    | 2.61                  |
|               | 地震波     | —     | -450                                  | —                    | 2.61                  |
|               | 地震波/正弦波 | —     | 1.00                                  | —                    | 1.00                  |
| 直方体型2個        | 正弦波     | 0.992 | -1231                                 | 33.0                 | 2.28                  |
|               | 地震波     | 0.982 | -1998                                 | 63.6                 | 2.35                  |
|               | 地震波/正弦波 | 0.990 | 1.62                                  | 1.93                 | 1.03                  |
| 円筒型10個        | 正弦波     | 1.378 | -562                                  | 9.6                  | 1.95                  |
|               | 地震波     | 1.365 | -601                                  | 9.2                  | 2.24                  |
|               | 地震波/正弦波 | 0.991 | 1.07                                  | 0.96                 | 1.15                  |
| 直方体型2個+円筒型10個 | 正弦波     | 0.992 | -622                                  | 10.4                 | 1.93                  |
|               | 地震波     | 0.982 | -885                                  | 19.1                 | 2.19                  |
|               | 地震波/正弦波 | 0.990 | 1.42                                  | 1.84                 | 1.13                  |
| 直方体型8個        | 正弦波     | 0.992 | -1241                                 | 33.6                 | 2.12                  |
|               | 地震波     | 0.982 | -2475                                 | 82.8                 | 2.23                  |
|               | 地震波/正弦波 | 0.990 | 1.99                                  | 2.46                 | 1.05                  |

表-4 衝突時におけるウエイトおよび反力壁の応答速度

| 緩衝装置の取付条件     | 正弦波                       |                          |                           | 地震波                       |                          |                           | 相対速度の比<br>(地震波/<br>正弦波) |
|---------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
|               | ウエイト<br>( $\text{cm/s}$ ) | 反力壁<br>( $\text{cm/s}$ ) | 相対速度<br>( $\text{cm/s}$ ) | ウエイト<br>( $\text{cm/s}$ ) | 反力壁<br>( $\text{cm/s}$ ) | 相対速度<br>( $\text{cm/s}$ ) |                         |
| 直方体型2個        | 15.8                      | -10.8                    | 26.6                      | 25.4                      | -14.6                    | 40.0                      | 1.5                     |
| 円筒型10個        | 24.2                      | -5.9                     | 30.1                      | 30.5                      | -15.1                    | 45.6                      | 1.5                     |
| 直方体型2個+円筒型10個 | 24.0                      | -6.6                     | 30.5                      | 28.8                      | -14.3                    | 43.1                      | 1.4                     |
| 直方体型8個        | 16.3                      | -9.8                     | 26.1                      | 25.0                      | -14.6                    | 39.5                      | 1.5                     |

が、正弦波と地震波では異なるためと考えられる。

表-4は、正弦波と地震波を入力した衝突実験により得られた、ウエイトおよび反力壁の応答加速度の時刻歴波形を積分し、衝突時のウエイトと反力壁の応答速度を求めたものである。表より、正弦波と地震波の衝突時における相対速度を比較すると、地震波のほうが約1.5倍も大きく、衝突エネルギーが大きいとと言える。

したがって、地震波を入力した場合のほうが、緩衝

装置の変形が大きくなり、直方体型の場合には、ウエイトの応答加速度および反力壁の衝撃荷重が大きくなる。一方、円筒型の場合には、荷重-変位曲線が弾塑性型の特性を有しているために、緩衝装置の変形が増えてもウエイトの応答加速度および反力壁の衝撃荷重は増加せず、円筒型緩衝装置を用いたほうが、直方体型に比較すると、予期しない変位が生じた場合にも有利であると言える。

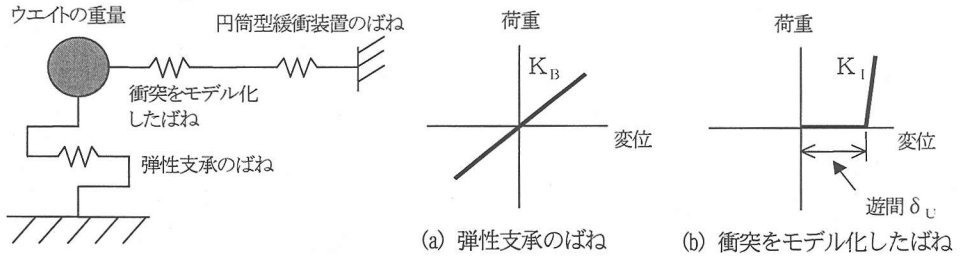


図-17 衝突実験のモデル化

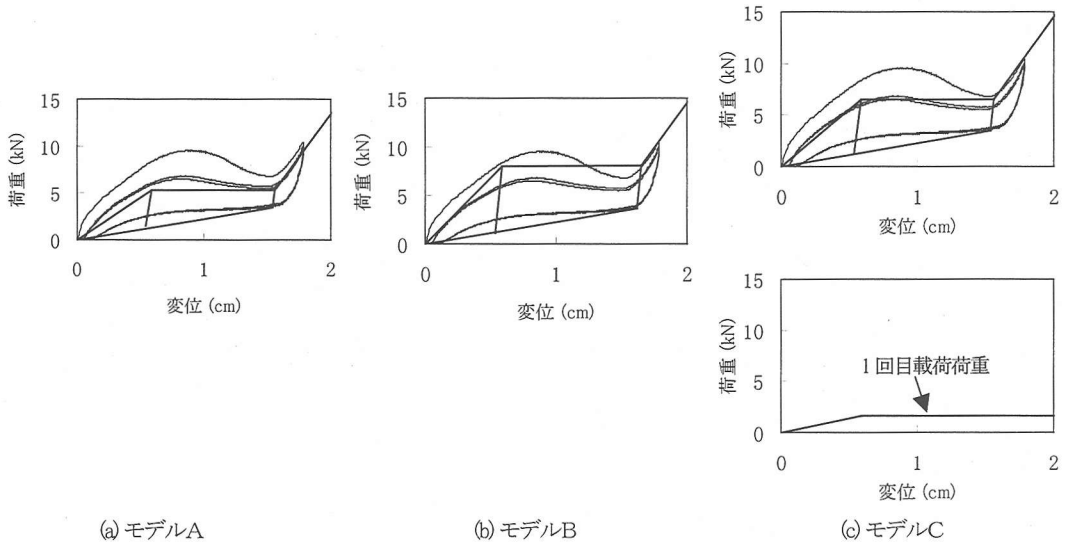


図-18 円筒型緩衝装置のモデル化

## 5. 動的応答解析

円筒型の緩衝装置を設置した場合の地震時における衝突時の挙動が動的応答解析により把握可能か検討を行った。図-17は、衝突現象のモデル化を表したもので、ウエイトは質点に置換し重量として39.46kNを与えた。弾性支承は、線形ばねモデルにモデル化し、ばね定数 $K_B$ および減衰定数 $h_B$ は、実験により得られた荷重-変位曲線を基に、6.86kN/cmおよび0.025とした。衝突現象は、非線形ばねモデルにモデル化し、ばね定数 $K_I$ は、衝突時における反力壁の変位とその時に測定された荷重から求める荷重-変位曲線を基に12464kN/cmに設定した。さらに、円筒型緩衝装置は、図-18に示すような3つにモデル化して比較検討を行った。モデルAおよびモデルBは、それぞれ圧縮荷重試験において得られた2回目載荷および1回目載荷の曲線をもとにモデル化したものであり、モデルCは、1回目載荷と2回目載

荷の荷重-変位曲線が異なることから、スリップモデルを並列に追加したモデルである。すなわち、モデルCは、1回目載荷時にはスリップモデルの1回目載荷荷重が作用するが、2回目載荷以降は、スリップモデルの荷重が0となるモデルである。入力波形は、地震波を入力した実験ケースCase 9において、ウエイトが反力壁に衝突しない場合に、振動台上の加速度計で得られた加速度波形を使用した。積分手法としては、 $\beta = 0.25$ のNewmarkの $\beta$ 法を用いた。解析ケースとしては、円筒型緩衝装置のモデルA、B、Cを用いた場合を、解析ケースA、ケースB、ケースCとした。図-19は、それぞれの解析ケースにより得られた、ウエイトの応答加速度、ウエイトの応答変位、反力壁の衝撃荷重の時刻歴波形を示したものである。図-19の解析ケースAに着目すると、ウエイトの応答加速度は、衝突実験結果の波形と解析結果の波形とが良く一致している。ウエイトの応答変位および反力壁の衝撃荷重においても衝突実験結果と解析結果とは波形が良く一致しており、これは解析ケースBおよび解析ケースCでも同様であ

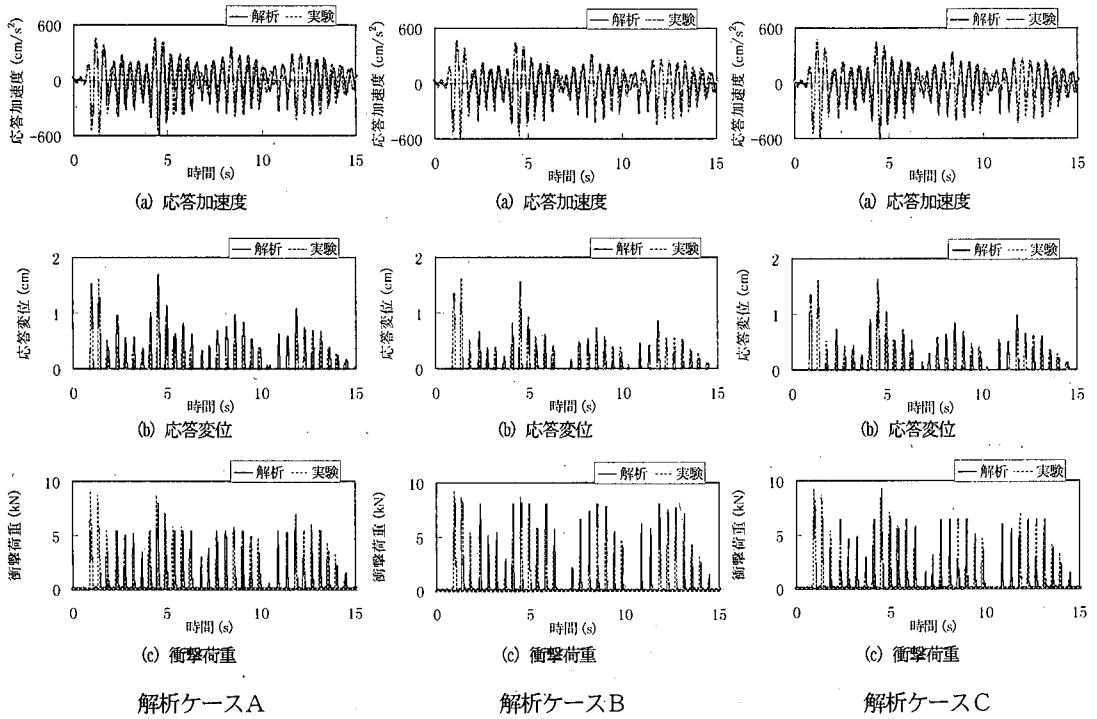


図-19 解析ケースA, B, Cにおける解析値と実験値の比較

表-5 解析ケースによる $\alpha$ の比較

| 解析ケース | ウエイトの<br>応答加速度 | ウエイトの<br>応答変位 | 反力壁の<br>衝撃荷重 | 平均    |
|-------|----------------|---------------|--------------|-------|
| A     | 0.181          | 0.380         | 0.348        | 0.303 |
| B     | 0.154          | 0.294         | 0.320        | 0.256 |
| C     | 0.155          | 0.320         | 0.281        | 0.252 |

る。ここで、解析値と実験値とがどの程度1:1に対応しているか確認するために、次式で求められる $\alpha$ を定義する。

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \sqrt{\left|1 - \frac{\text{実験値}}{\text{解析値}}\right|^2} / n \quad (5a)$$

$\alpha$ は、解析値と実験値が1:1に対応しているほど0に近づくことになる。表-5は、 $\alpha$ を解析ケースごとに比較したものであるが、ウエイトの応答加速度は、解析ケースBと解析ケースCの $\alpha$ が小さく、実験値と解析値が1:1に近いことが分かる。

ウエイトの応答変位は、解析ケースBが最も $\alpha$ の値が小さく、反力壁の衝撃荷重は解析ケースCが最も値が小さくなる。また、 $\alpha$ の平均で見ると、解析ケースBあるいは解析ケースCが実験値と解析値の対比が良いことが分かり、円筒型緩衝装置のモデルとしては、モデルBあるいはモデルCが妥当と考えられる。この

ように、円筒型緩衝装置の衝突時におけるウエイトの応答加速度、ウエイトの応答変位および反力壁の衝撃荷重は、動的解析により再現可能と言える。しかし、本モデルでは、反力壁の衝撃荷重にしきい値ができてしまうことから、詳細に衝突時の現象を再現するためには、円筒型緩衝装置の荷重-変位曲線をより精度良く表現するようなモデル化を行うことが必要と言える。

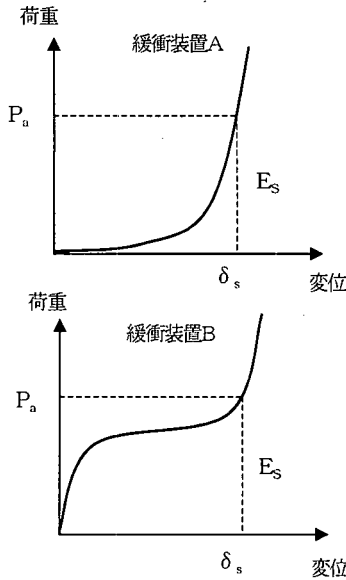
## 6. 円筒型緩衝装置を用いた落橋防止装置の設計

### (1) 緩衝装置を用いた設計方法

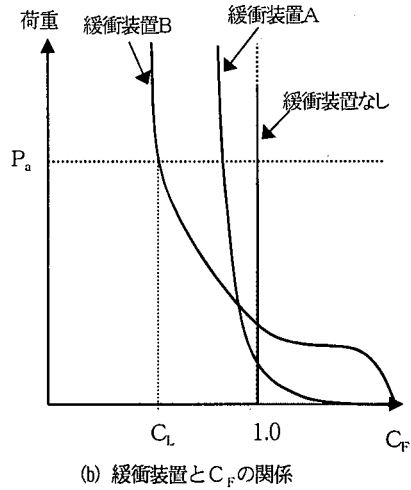
円筒型緩衝装置は、直方体型に比較すると衝撃緩衝効果に優れていることが分かった。ここでは、円筒型緩衝装置を用いた場合における、落橋防止装置の設計方法について検討する。橋脚の耐力が非常に大きく降伏をしないでかつ支承が破壊しないと仮定すると、上部構造が最初に保有するエネルギーを、 $E_B$ とすると式(4b)より次のエネルギーの釣り合い式が成立する。

$$E_B = \frac{1}{2} k \cdot x^2 + E_S \quad (6a)$$

ここで $E_B$ は、上部構造と支承からなる系の等価固有周期 $T_{eq}$ と等価減衰定数 $h_{eq}$ を因子とする加速度応答スペ



(a) 緩衝装置の荷重-変位曲線



(b) 緩衝装置とCFの関係

図-20 緩衝装置の設計法の概念

クトル  $S_A(T_{cq}, h_{cq})$  を用いて、次式により求められる。

$$E_B = \frac{1}{2} \frac{W}{g} \left( \frac{S_A(T_{cq}, h_{cq})}{\omega} \right)^2 \quad (6b)$$

ここに、 $g$  = 重力加速度、 $\omega$  = 固有振動数である。一方、図-20(a)に示すような荷重-変位特性を有する緩衝装置Aと緩衝装置Bがあるものとし、それらを荷重と  $C_F$  との関係で表すと、図-20(b)のようになる。緩衝装置がない場合には、ウエイトと反力壁が直接衝突する  $C_F = 1$  において、荷重は急激に立ち上がる。しかし、履歴エネルギー  $E_S$  を有する緩衝装置を設置した場合には、 $C_F$  が1より小さい場合においても、荷重の立ち上がりは緩やかであり、 $E_S$  が大きいほど緩やかとなる。図-20(b)より、反力壁の前面に緩衝装置を設置した場合には、 $C_F = C_L$  において、荷重  $P$  が反力壁より求まる許容耐力  $P_a$  より小さくなるように、履歴エネルギー  $E_S$  を決定すれば良いと言える。式で表すと次式のようになる。

$$\begin{aligned} E_S &= \int_{C_L}^{\infty} P dC_F \\ P &\leq P_a \\ C_L &\leq \delta_c \end{aligned} \quad (6c)$$

ここに、 $P_a$  = 反力壁より求まる許容耐力、 $\delta_c$  = 上部構造の設計最大移動量である。道路橋示方書においては、落橋防止構造の設計地震力は、上部構造の死荷

重反力  $R_d$  の1.5倍であり、また設計最大移動量は、桁かかり長  $S_E$  の0.75倍であることから、 $P_a$  および  $\delta_c$  は次式となる。

$$\begin{aligned} P_a &= 1.5 \cdot R_d \\ \delta_c &= 0.75 \cdot S_E \end{aligned} \quad (6d)$$

## (2) 円筒型緩衝装置の設計法

円筒型緩衝装置の設計においては、円筒シェル座屈式を用いる。図-21に示すような円筒シェルの限界圧縮応力は、次式により求まる<sup>9)</sup>。

$$\sigma_k = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{1}{\gamma} \quad (6e)$$

ここに、

$\sigma_k$  : 限界圧縮応力

$E$  : ヤング率

$\nu$  : ポアソン比

$t$  : 円筒シェルの肉厚  $= (d_0 - d_1)/2$

$\gamma$  : 円筒シェルの半径  $= (d_0 + d_1)/2$

$d_0$  : 円筒シェルの外径

$d_1$  : 円筒シェルの内径

ゴムは、非圧縮性であることから、ポアソン比  $\nu$  は0.5となり、またヤング率  $E$  とせん断弾性係数  $G$  の関係は、 $E = 3G$  となる。

円筒型緩衝装置の座屈時のひずみ  $\epsilon_k$  は、上式を変形して次式により算出する。

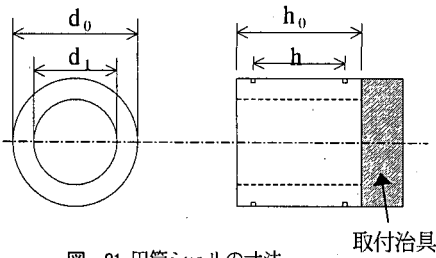


図-21 円筒シエルの寸法

$$\varepsilon_k = \frac{\sigma_k}{E} = \frac{l}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{t}{r} \quad (6f)$$

したがって、座屈荷重  $F_k$  および座屈変位  $\delta_k$  は、次式により求まる。

$$\begin{aligned} F_k &= A \cdot \sigma_k \\ \delta_k &= h \cdot \varepsilon_k \\ A &= \frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_1^2) \end{aligned} \quad (6g)$$

ここに、 $A$  = 円筒型緩衝装置の断面積、 $h$  = 円筒型緩衝装置の変形する部分の高さである。

さらに、円筒型緩衝装置を圧縮すると、上下面が接触し荷重が上昇を開始する。この場合の荷重が上昇するときの変位  $\delta_s$  は、次式により算出するものとする。

$$\delta_s = h_0 - (h_0 - h + 2 \cdot t) \cdot 0.8 \quad (6h)$$

ここに、 $h_0$  = 円筒型緩衝装置の高さ、0.8は図-1(b)より、ゴムの圧縮荷重においてはゴム厚さの20%程度より荷重が立ち上がっていることから決定したものである。

また、その場合の剛性は、図-1(a)より、円筒型緩衝装置のハードニングを生じる変位が、円筒型緩衝装置の高さ  $h_0$  の50%であることから、座屈剛性  $K$  の2倍とする。図-22は、設計式により求まる荷重-変位曲線と圧縮荷重試験により得られた荷重-変位曲線を比較したものであるが、設計式の座屈変位および荷重が増加する変位は、圧縮荷重試験の値とほぼ一致している。また、設計式の座屈剛性は、2回目載荷試験あるいは3回目載荷試験の剛性にほぼ等しいことが分かる。これは、設計式に用いるせん断弾性係数を求める試験においては、試料に3回目の変形を与えた状態でせん断弾性係数を算出したために、設計式の座屈剛性と2回目あるいは3回目載荷試験の剛性が等しくなるものと思われる。

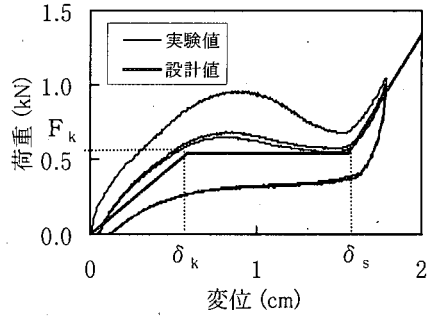


図-22 円筒型緩衝装置の荷重-変位曲線

## 7. 結論

弾塑性型の特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の衝突時における衝撃緩衝効果を把握することを目的として、振動台を用いた衝突実験を行った。また、円筒型緩衝装置のモデル化を行い、動的解析を用いた衝突時の挙動の再現性について検討した。さらに、円筒型緩衝装置を用いた場合の落橋防止装置の設計および円筒型緩衝装置の設計法について検討を行った。本検討結果をまとめると、以下ようになる。

- 1) 円筒型の緩衝装置は、弾塑性型の特性を有するために、直方体型の緩衝装置と比較して、衝突時に反力壁に作用する衝撃荷重あるいはウエイトの応答加速度を低減する効果大きい。
- 2) 緩衝装置の荷重-変位曲線およびウエイトが最初に保有するエネルギーが既知であれば、衝突時におけるウエイトの最大応答変位は、エネルギーの釣り合いの式により算出することが可能である。
- 3) 円筒型緩衝装置を弾塑性型のばねにモデル化することにより、緩衝装置を設置した場合の地震時における衝突時の挙動を、動的解析により把握可能である。
- 4) 円筒型の緩衝装置を用いた場合における、落橋防止装置の設計方法および円筒型の緩衝装置の設計法について示した。

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、1996.12.
- 2) 石川信隆、園田佳巨、彦坂熙、生駒信康、衛藤芳昭：ゴム緩衝ピンを用いた新しい落橋防止装置の耐震補強効果について、耐震補強・補修技術・耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集、pp.175-180、1997.7.
- 3) 森山卓郎、依田照彦、小澤典生、宮本英治：落橋防止連結板の

- 衝撃力緩和に及ぼす緩衝材の効果に関する実験的研究, 第53回年次学術講演会講演概要集, pp. 338-339, 1998. 10.
- 4) 潤田久也, 西岡敬治, 金治英貞, 宇野裕恵: 緩衝性のある落橋防止装置, 第51回年次学術講演会講演概要集, pp. 616-617, 1996. 9.
- 5) 窪田賢司, 菅野匡, 飯束義夫, 堀江啓夫: 制震効果を有する緩衝材を併設した落橋防止壁の一提案, 第一回免震・制震コロキウム講演論文集, pp. 217-224, 1996. 11.
- 6) 庄司学, 川島一彦, Anal Ruangrassamee, 運上茂樹, 足立幸郎, 長屋和宏: 桁間衝突の影響に対するゴム製緩衝装置の有効性に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 891-902, 1999. 3.
- 7) 庄司学, 川島一彦, 渡邊学歩, 河野哲也: 高面圧化におけるゴム製緩衝装置の地震時繰返し圧縮特性, 第53回年次学術講演会講演概要集, pp. 320-321, 1998. 10.
- 8) 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, pp. 305-307, 1994.
- 9) 土木学会: 構造力学公式集, pp. 401, 1986.

(2000. 2. 17 受付)

## ENERGY ABSORPTION PERFORMANCE OF THE CYLINDRICAL RUBBER SHOCK ABSORBER

Masahiro KOSHITOUGE, Shigeki UNJOH, Yukio ADACHI  
and Kazuhiro NAGAYA

Unseating prevention structure shall have a higher impact resistance by employing a shock absorber to reduce the impact-like force. This paper describes model test results to verify the energy absorption performance of a cylindrical rubber shock absorber which has the elastic-plastic force-displacement characteristics. Then non-linear time history response analysis to simulate the test results was carried out and the model of the shock absorber and the accuracy was studied. Finally, the design method of the unseating prevention structure which has the cylindrical rubber shock absorber is proposed.