

# 大変形特性を考慮したゴム緩衝材の衝撃緩衝効果に関する解析的検討

## A STUDY ON THE MITIGATING EFFECT OF RUBBER CUSHION BY THE LARGE DEFORMATION THEORY

園田佳巨\*    ○石井慎二\*\*    彦坂 熙\*\*\*

Yoshimi SONODA, Shinji ISHII, Hiroshi HIKOSAKA

\*工博 九州大学助教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

\*\* 九州大学大学院修士課程 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

\*\*\* 工博 九州大学教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

キーワード：ゴム緩衝材、大変形理論

(rubber cushion, large deformation theory)

### 1. 緒言

ゴムは一般に鋼やコンクリートに比べ2～3桁程度の小さな剛性と非常に大きな非線形弾性域(引張歪み400%程度)を有するため、従来から衝撃緩衝材として防弦材やその他様々な用途で使用されてきた。土木分野でも、免震支承等により橋梁全体系の長周期化が図られる場合には、桁間の水平変位の増大にともなう衝突現象を考慮する必要が生じており、衝突時の荷重低減を目的としたゴム製緩衝装置の検討も行われている。しかし、既往の研究ではゴムの大変形特性を十分に考慮しているとは言い難く、ゴムの非圧縮性が緩衝効果に与える影響についても軽視される傾向にある。

そこで本研究では、大変形特性を考慮したゴム緩衝材の有限要素解析により、ゴムの緩衝効果について解析的に考察するものである。

### 2. ゴムの静的大変形解析

#### 2.1 ゴムの材料モデル

ゴムは大きな非線型弾性域を有する超弾性体として、Mooney-Livlin や Ogden<sup>1)</sup>等の式を用いた

解析が行われている。しかし、通常の弾性構成式を準用した逐次線形化により非線形性を簡易に評価することも可能であると考えられる。本研究では、図-1に示すような単軸引張試験結果を用い、ひずみエネルギー密度  $W$  に応じた弾性係数  $E$  の非線形な評価式を求め、要素積分点におけるひずみエネルギー密度の値をもとに剛性の修正を行う簡易なモデル化を試みた。

#### 2.2 非圧縮性の評価

ゴムの非圧縮性を解析的に評価するために、弾性係数マトリックス  $D$  を式(1)に示すように体積変化に関する部分とそれ以外の部分とに分割した。

$$D = D_s + D_v = 2\mu \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} + \frac{2\nu\mu}{1-2\mu} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $\mu$ ：せん断剛性係数、 $\nu$ ：ポアソン比  
そのうえで、ゴムの非圧縮性にともなう過拘束の問題が生じないように、体積変化に関する項  $D_v$  は要素中心における1点積分を、せん断変形に関する項  $D_s$  は4点積分を行う選択低減積分法を採用

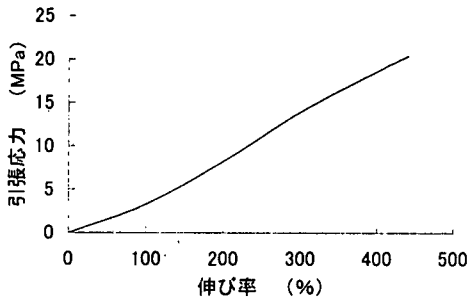


図-1 ゴムの単軸引張試験結果

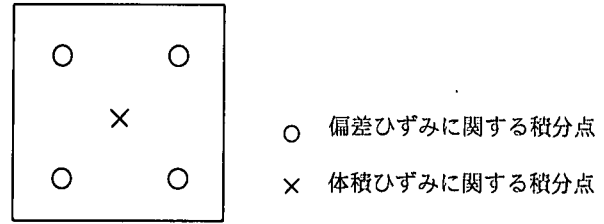
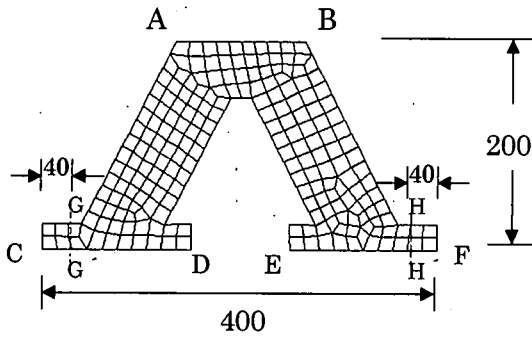
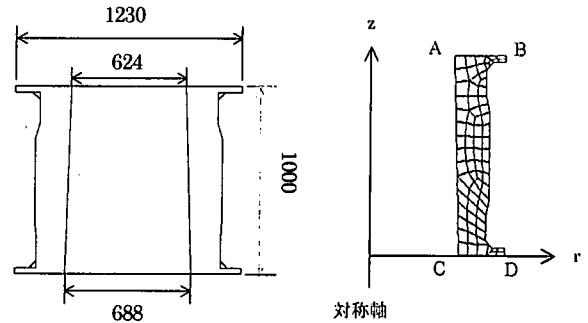


図-2 剛性の評価法



(a) Aタイプ (V字型防舷材)



(b) Bタイプ (サークル型防舷材)

図-3 ゴム製緩衝材の断面寸法

した<sup>2)</sup> (図-2 参照)。なお、ゴムのポアソン比には  $\nu = 0.49$  を用いた。

### 2.3 大変形の考慮

ゴムは塑性化しないとみなされるため、剛性係数への応力の直接的な影響はないが、幾何学的な非線形性の影響を考慮した剛性方程式を用いる必要がある。そこで、本研究では Jaumann 応力速度を想定した以下の構成式を適用した。

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} \quad (2)$$

ここに、 $\dot{\sigma}_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} - \omega_{ij} \sigma_{ij} + \sigma_{ij} \omega_{ij}$ 、 $\sigma_{ij}$ : Cauchy

応力、 $\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ : 回転テンソル

式(2)の Cauchy 応力を以下の仮想仕事の式に代入することで、通常の剛性項と回転の影響による補正項が得られる。そこで、式(3)の右辺第2項を、要素の剛体回転による応力の補正項とみなし、仮想外力増分として左辺の外力ベクトルに加算して解析を行った。

$$F = \int_V B^T \alpha dV = \int_V B^T \{ D\dot{\epsilon} + \sigma_0 + \dot{\omega} \} dV = \left\{ \int_V B^T DB dv \right\} \dot{u} +$$

$$\int_V B^T \{ \sigma_0 + \dot{\omega} \} dV \quad (3)$$

ただし、Cauchy 応力を用いた式(3)は、変形後の配置において成立することから、各増分ステップで変形後の節点座標に関する収束計算を行うことで解析を進めた。

### 3. ゴム製緩衝材の静的大変形解析

検討対象として、実際に防舷材として使用されているV字形のタイプAと円筒形状のタイプBの2種類を選定し、静的変形特性について解析した。両者の断面寸法は図-3に示すとおりで、設置条件が緩衝効果に与える影響を考察するために2種類の境界条件を想定した。すなわち、タイプAの場合にはCD、EF辺を鉛直・水平方向に完全固定する場合(下端拘束)と、GG'、HH'断面をボルトで固定する場合(ボルト固定)の2通りを、タイプBは軸対称問題として定式化し、AB、CD断面の上下端を半径方向に完全拘束した場合と、内側端部のA点、C点のみを半径方向に拘束した場合の2通りで、鉛直方向に圧縮したときの全体挙動を比較した。最初に、タイプAに対して

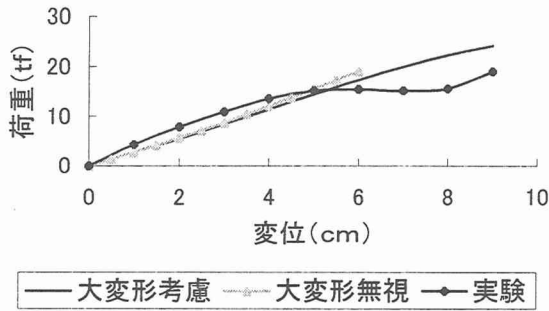


図-4 Aタイプの荷重-変位関係

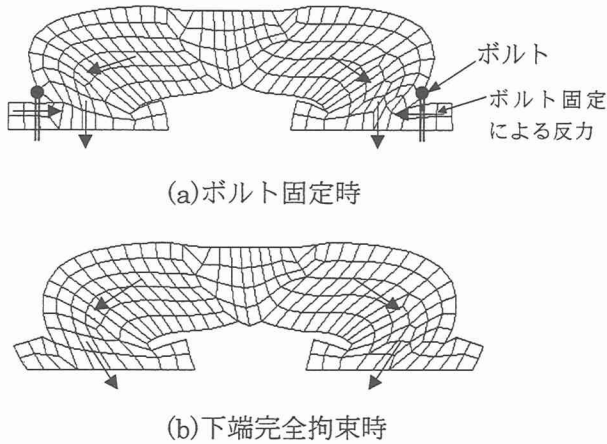


図-7 設置条件の影響 (タイプA)

完全拘束の条件で大変形を考慮した場合と考慮しない場合の荷重-変位関係を図-4に示す。この図より、変位5cmまで両者の耐力に殆ど相違はない。しかし、大変形を考慮しないケースでは圧縮ひずみが約30%(変位6cm)になると、図-5のA部に示すように、脚部に現実には発生していないフォールディングが起り、以後の解析は不可能となった。一方、大変形を考慮した解析では図-6に示すように現実の挙動に近い結果が得られた。したがって、大変形の影響を考慮しないと現実とは異なる挙動が得られる場合があり、この種のゴム製緩衝材の評価に大変形を考慮する必要があることが確認された。なお、本計算例では図-4に見られるように、6cm以降の荷重-変位関係に実験結果との大きな相違が生じている。この原因として、本来の超弾性構成式を用いていないことや載荷面に摩擦の影響を考慮していないことが考えられる。次に、A、B両タイプの設置条件が変形特性に与える影響について検討した。

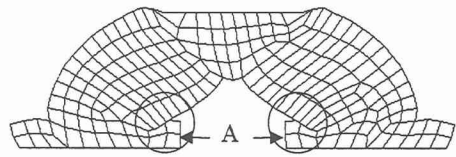


図-5 変形状況 (大変形無視: 35%ひずみ時)

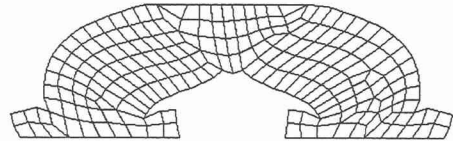
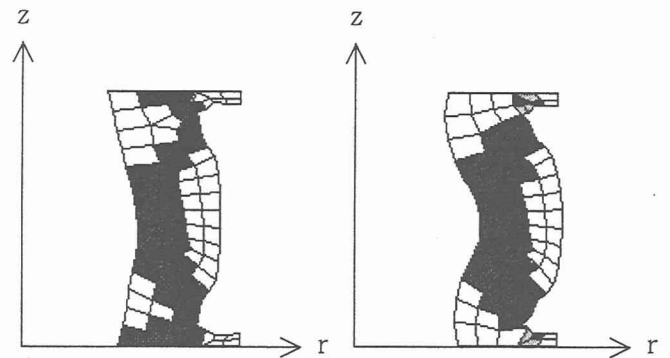


図-6 変形状況 (大変形考慮: 35%ひずみ時)



(a)ボルト固定時

(b)下端完全拘束時

図-8 設置条件の影響 (タイプB)

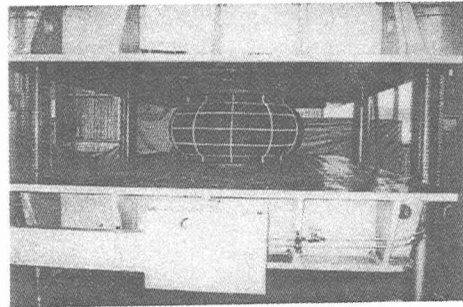
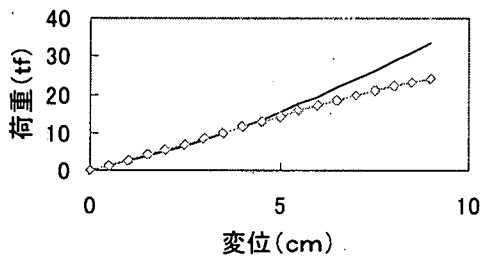


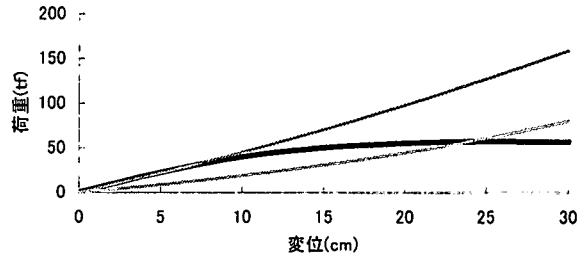
写真-1 タイプBの圧縮試験状況

図-7および図-8はそれぞれ2種類のゴム緩衝材を下端完全拘束した場合と1箇所拘束(ボルト固定)した場合の変形状況を比較したものである。図-7は、Aタイプを45%圧縮した時の変形状況を比較したもので、拘束条件により脚下部の変形に大きな相違が見られ、水平方向には全く異なる力の釣り合い状況にあることが推察された。一方、図-8はBタイプを30%圧縮した時の変形状況を比較したもので、下端を完全拘束した方が顕著に湾曲した変形を示すことがわかる。また内部応力分布を比較すると、上下端外側に大きな応力集中



— ボルト固定 —◇— 下端拘束

図-9 拘束条件の影響 (Aタイプ)



— 実験値 — 上・下端完全拘束 — ボルト固定

図-10 拘束条件の影響 (Bタイプ)

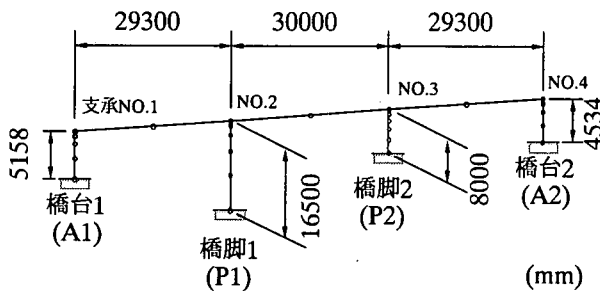
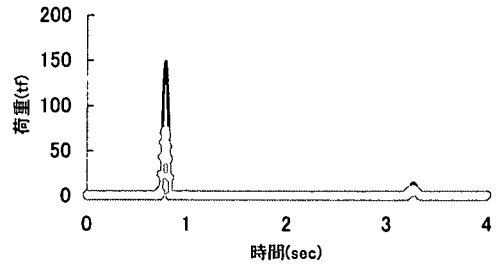


図-11 検討対象とした橋梁

が生じていることがわかった。写真1の実験は、タイプB供試体に特別な水平拘束を与えることなく圧縮したもので、上下端面の摩擦力で端面水平変位が抑制されていると考えられ、図-8(b)に近い挙動を示している。図-9、10は、設置条件が荷重-変位関係に与える影響を比較したもので、タイプAで45%圧縮時に約20%、タイプBで30%圧縮時に約2倍の耐力の相違が見られ、設置条件がゴム緩衝材の変形特性に大きな影響を与えることが確認された。また、タイプBの場合、初期変形時は実験値が完全拘束を仮定した解析値とほぼ一致しており、端面摩擦で載荷当初は完全拘束に近い条件下にあったことが推察された。しかし、変形量増加にともなう剛性低下を再現できず、適切な構成式の選定と現実の挙動に見合う境界条件を設定する必要があると考えられる。

#### 4. ゴム製緩衝材による衝突荷重の低減効果

図-11に示す3径間PC連続桁橋を対象に、橋台1、2の両端に、先に検討したAタイプのゴム製緩衝材を10個設置した場合を想定した地震応答解析を行った。本解析では桁および橋脚は曲げと軸力を考慮した骨組要素とし、ゴム製緩衝材の



— ボルト固定 —◇— 下端拘束

図-12 衝突荷重-時間曲線

特性は図-9に示す荷重-変位曲線を与えた。入力地震波形は保有水平耐力法レベルの入力地震(Ⅱ種地盤)を用い、遊間は5cmとし、設置条件の相違が緩衝効果に与える影響を比較した。図-12は、緩衝材1個当りに発生した衝突荷重-時間曲線を示したもので、同一緩衝材でも設置条件が異なれば衝突荷重が半減するなど、緩衝効果が大きく変化する可能性があるため、設置条件を考慮した検討が必要であることが認められた。

#### 5. 結論

本解析により、ゴム製緩衝材の全体挙動と緩衝効果を把握するには大変形解析が不可欠であることが確認された。なお、本法ではタイプBの大変形挙動を正確に求めることはできなかった。今後、ゴムの動的特性も含めた適切な構成式の選択と境界条件の設定が必要であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) R.W.Ogden: Non-Linear Elastic Deformation, Dover, 1997
- 2) 久田俊明、野口裕久: 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 平成7年