

大変形特性を考慮したゴム製緩衝材の緩衝効果に関する基礎的考察

九州大学 学生員 石井 慎二
九州大学 正会員 彦坂 熙

九州大学 正会員 園田 佳巨

1. 序論

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

ゴムは一般に大きな非線形弾性域を有する超弾性体として Mooney-Livlin や Ogden 等の式を用いて解析が行われる。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 大変形の考慮

ここでは Jaumann 応力速度を用いた以下の構成式を適用した。

$$\dot{\sigma}_{ij} = D_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl} \quad (1)$$

ここに $\dot{\sigma}_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} - \omega_{ij} \sigma_{ij} + \dot{\sigma}_{ij} \omega_{ij}$: Jaumann 応力速度、

σ_{ij} : Cauchy 応力、 $\omega_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} - u_{j,i})$: 回転テンソル

式(1)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(2)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。

$$F = \int_V B^T \sigma dV = \int_V B^T \left\{ D \dot{\varepsilon} + \sigma_0 + \dot{\omega} \right\} dV = \left\{ \int_V B^T D B dV \right\} \dot{u} + \int_V B^T \left\{ \sigma_0 + \dot{\omega} \right\} dV \quad (2)$$

キーワード : ゴム製緩衝材、大変形理論

連絡先 : 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学 工学研究科建設システム工学専攻 TEL092-642-3262

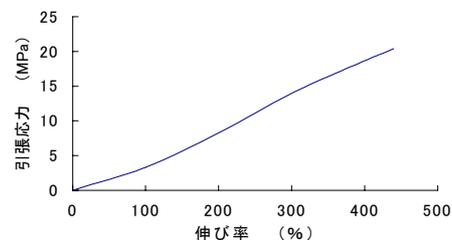


図-1 ゴムの単軸引張試験結果

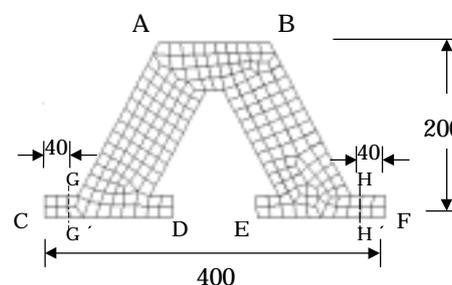


図-2 V字型緩衝壁解析モデル

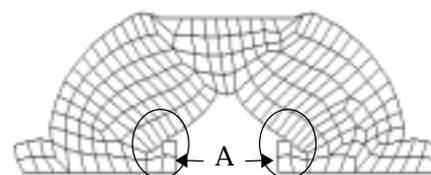


図-3 大変形無視の場合の変形状況(35%ひずみ時)



図-4 大変形考慮の場合の変形状況(35%ひずみ時)

ただし、Cauchy 応力を用いた式(2)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いながら解析を進めた。

2.3 非圧縮性の評価

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、剛性マトリックスを求める際、体積変化に関する項は要素中心における 1 点積分を、せん断変形に関する項は 4 点積分を行う選択低減積分法を採用した¹⁾。なお、ゴムのポアソン比には $\nu = 0.49$ を用いた。

3. ゴム製緩衝材の静的解析結果

3.1 ゴム製緩衝材のモデル化

図 - 2 に示すような可撓性に富むゴム製 V 字型緩衝材を解析対象とし、設置方法がその耐力特性に与える影響について 2 通りのケースで検討した。すなわち、図 - 2 において 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 通りで比較した。载荷については AB 辺に鉛直下向きに強制変位を与えるものとした。

3.2 大変形を考慮した解析

下端拘束の条件で大変形の影響を比較した変形状況を図 - 3, 4 に示す。大変形を考慮しない場合、ひずみが 30%(変位 6cm)の段階で、図 - 3 の A 部に示すように脚部の変形に現実には発生しないフォールディングが発生し、以後の解析は不可能となった。このように、大変形を考慮しないと現実とは異なる挙動が得られるなど、ゴム製緩衝材の力学特性評価に大変形の影響を考慮する必要性が確認された。

3.3 設置条件(拘束条件)の影響

ゴム製緩衝材の変形特性は、設置条件により大きく変化するものと思われる。そこで V 字型緩衝材に対して拘束条件を変えた場合の解析結果を比較した。図 - 5 は、下端拘束とボルト固定の 2 ケースで荷重 - 変位関係を比較したもので、この図より 45% 圧縮時(9cm 変位時)に両者に 35% の耐力の相違が認められた。また、図 - 6, 7 は 45% 圧縮時の変形状況を比較したもので、この図より拘束条件の相違が脚下部の変形に大きな影響を与え、水平方向力に対して全く異なる力の釣り合い状況になることが確認された。

4. ゴム製緩衝材による衝突荷重の低減効果

図 - 8 に示す 3 径間 PC 連続桁橋を対象として橋台 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、ゴム製緩衝材の特性は図 - 5 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(種地盤)を用い、遊間は 5 cm 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 - 9 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。

<参考文献> 1) 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

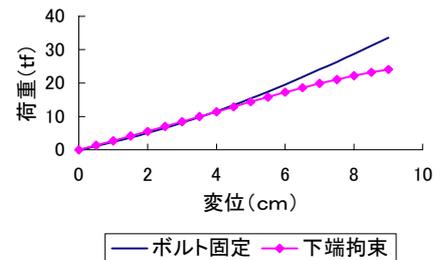


図 - 5 設置条件の影響

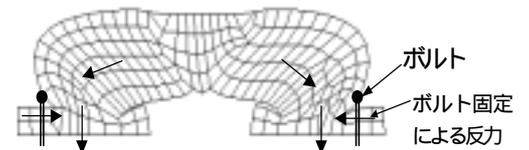


図 - 6 ボルト固定時の変形状況

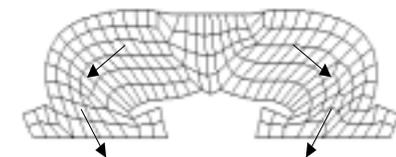


図 - 7 下端拘束時の変形状況

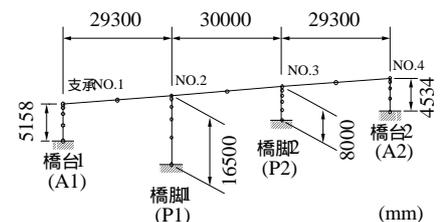


図 - 8 検討対象とした橋梁

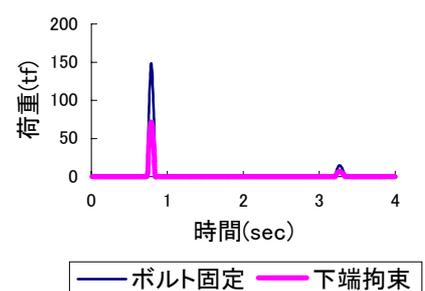


図 - 9 衝突荷重 - 時間曲線