

樹脂およびゴムを用いた橋梁用緩衝材のエネルギー吸収性能に関する基礎的研究

○東北大学工学部建築・社会環境工学科 学生会員 岸 正泰
東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 松原 成志朗
東北大学大学院環境科学研究科 村松 眞由
東北大学災害科学国際研究所 正会員 寺田 賢二郎

1. 諸言

橋梁用緩衝材は、地震による橋梁の変位に対して、隣接桁間または桁と下部構造との間での衝突を防ぐために設置される。緩衝材の要求性能は、衝撃荷重の低減および衝撃エネルギーの吸収である。村田ら¹⁾は、ゴムについて損失係数のピーク高さ $\tan(\delta_{max})$ を用い、材料特性の視点からエネルギー吸収性能を評価している。そこで本研究では、従来緩衝材の材料として広く用いられてきたゴムと、緩衝材としての利用が検討されている熱可塑性樹脂に対して材料特性試験を行い、非弾性散逸量を数値的に算出することで材料特性としてのエネルギー吸収性能を比較・評価する。

2. 材料モデル

(1) 材料の微視的挙動

熱可塑性樹脂の真応力-真ひずみ曲線²⁾ およびゴムの公称応力-真ひずみ曲線³⁾ をそれぞれ図1および図2に示す。熱可塑性樹脂は一般に常温でガラス状態であり、分子鎖が熱活性状態でないため、主鎖の共有結合距離を伸ばさなければならず、弾性抵抗は比較的大きい。初期変形域では、粘塑性降伏を起こすまで弾性挙動が支配しており、応力は弾性的な挙動を示す。降伏後は、自由体積が増加し、分子鎖間抵抗力が小さくなるので、応力が低下する。そして、大変形域では分子鎖の伸びきりにより、主鎖の共有結合距離を伸ばさなければならず、応力が立ち上がる。また、除荷の後、保持すると、大域的観察では平衡状態であるが、内部では分子鎖が様々なモードで運動しているため、微視的には非平衡状態であり、ひずみ回復が生じる。

ゴムは、一般に常温でゴム状態であるため、分子鎖は熱活性状態である。したがって、分子鎖セグメントの回転運動の変化が活発であり、熱可塑性樹脂に比べて弾性抵抗は小さい。大変形域では分子鎖の伸びきりによって応力が増加する。また、载荷にともなう損傷によって、分子鎖の破断が生じるために、载荷よりも除荷での応力-ひずみ曲線の傾きが小さくなる (Mullins 効果)。

(2) 各材料モデル

熱可塑性樹脂の材料モデルについては、一様クリープ特性を表現するために粘弾性を、初期降伏後の応力軟化や配向硬化を表現するために粘塑性を考慮したモデルを用いる。

このとき、散逸エネルギー増分 ϕ_{intr} は次式で表される。

$$\phi_{intr} = \dot{\gamma}^{vp} \| \mathbf{M}^{eff} \| + \sum_{\alpha} \frac{1}{2\tau^{\alpha}} \mathbf{R}^{\alpha} : (\mathbb{C}^{\alpha})^{-1} : \mathbf{R}^{\alpha} \quad (1)$$

ここで、 γ^{vp} , $\mathbf{M}^{eff}$, τ^{α} , $\mathbf{R}^{\alpha}$ および $\mathbb{C}^{\alpha}$ はそれぞれ粘塑性乗数、偏差 Mandel 応力、各 Maxwell 要素の緩和時間、各 Maxwell 要素の熱力学的応力および各 Maxwell 要素の弾性係数行列である。式 (1) の第 1 項は粘塑性散逸エネルギー増分および第 2 項は粘弾性散逸エネルギー増分を表している。

ゴムの材料モデルについては、速度依存性を表現するために粘弾性を、Mullins 効果を表現するために損傷を考慮する。このとき、損傷を考慮した散逸エネルギー増分 ϕ は次式で表される。

$$\phi = \sum_{\alpha=1}^N \frac{\|\mathbf{R}^{\alpha}\|^2}{\tau^{\alpha} \gamma^{\alpha} (1-D) G} + \zeta : \dot{D} \quad (2)$$

ここで、 D , G , および ζ はそれぞれ損傷変数、せん断弾性係数および非損傷状態の全自由エネルギーである。式 (2) の第 1 項は粘弾性散逸エネルギー増分および第 2 項は損傷散逸エネルギー増分を表している。

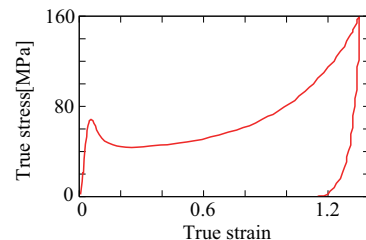


図-1 熱可塑性樹脂の応力-ひずみ曲線

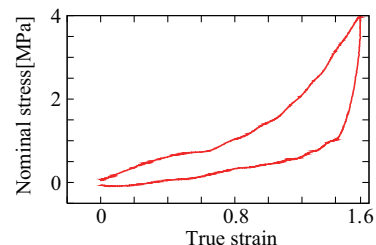


図-2 ゴムの応力-ひずみ曲線

3. 要素試験による材料特性の評価

$1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ の 8 節点六面体モデルに対して一軸引張・圧縮について静的解析を行う。境界条件は、 z 方向に一様変形させることを想定して、 $-z$ 面を z 方向に拘束、その面に対して z 軸方向に伸びる一边を x 方向に拘束、 x 軸方向に伸びる一边を y 方向に拘束し、 $+z$ 面に z 方向の変位を与える。ひずみ速度 2 水準 (0.1 s^{-1} および 0.001 s^{-1}) で、 z 方向変位が 1.72 mm となるまで引張り、引張時間と同じ速さで除荷し、30 秒間保持した。各ひずみ速度での熱可塑性樹脂の粘弾性散逸エネルギー、粘塑性散逸エネルギーおよび全散逸エネルギーを図 3 および図 4 に、ゴムの粘弾性散逸エネルギー、損傷散逸エネルギーおよび全体散逸エネルギーを図 5 および図 6 に示す。

熱可塑性樹脂は、ひずみ速度が小さいと粘弾性、粘塑性散逸エネルギーともに小さくなる。そして、ひずみ速度による散逸量の変化は粘弾性の方が顕著である。また、保持期間でもひずみの回復として観察される非平衡状態からの緩和挙動によって散逸エネルギーが増加する。

一方、ゴムは、ひずみ速度 0.1 s^{-1} では、粘弾性散逸エネルギーに対して損傷散逸エネルギーが小さいが、ひずみ速度 0.001 s^{-1} では負荷・除荷での粘弾性散逸エネルギーと損傷散逸エネルギーが同程度である。これは、ひずみ速度が小さくなると粘弾性散逸エネルギーが小さくなるが、損傷は速度によってほとんど変化しないためである。また、損傷の発展を非損傷状態の全自由エネルギーで規定しており、除荷と保持期間は弾性エネルギーの低下が原因となつて自由エネルギーの最大値が更新されず、損傷が発展しないので損傷散逸エネルギーが増加しない。

熱可塑性樹脂とゴムの粘弾性散逸エネルギーは同程度であり、ゴムの損傷散逸エネルギーは熱可塑性樹脂の粘塑性散逸エネルギーに比べて非常に小さい。したがって、熱可塑性樹脂とゴムのエネルギー吸収性能の違いは主に熱可塑性樹脂の粘塑性変形に起因することがわかる。このことから、初期変形域ではエネルギー吸収性能は同程度であり、熱可塑性樹脂の降伏挙動が起こった場合には、粘塑性変形が生じ、熱可塑性樹脂のほうがエネルギー吸収性能が高くなる。

4. 結論

熱可塑性樹脂の材料挙動を表現する粘弾性・粘塑性モデルとゴムの材料挙動を表現する損傷を考慮した粘弾性モデルを用いて数値解析を行い、解析から得られた非弾性散逸エネルギー量を比較することで材料特性としてエネルギー

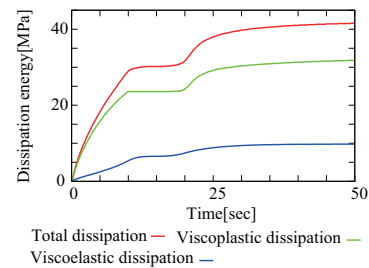


図-3 ひずみ速度 0.1 s^{-1} での熱可塑性樹脂の散逸エネルギー

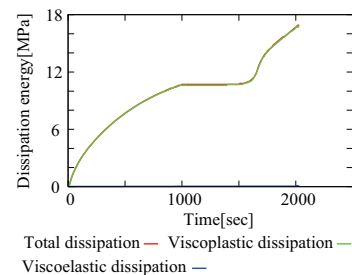


図-4 ひずみ速度 0.001 s^{-1} での熱可塑性樹脂の散逸エネルギー

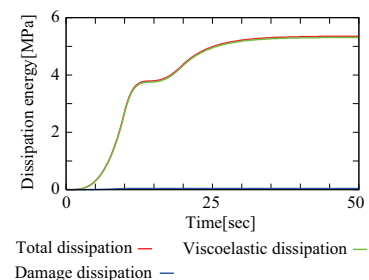


図-5 ひずみ速度 0.1 s^{-1} でのゴムの散逸エネルギー

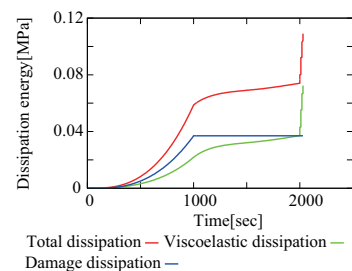


図-6 ひずみ速度 0.001 s^{-1} でのゴムの散逸エネルギー

吸収性能を比較・評価した。同モデルを用い、供試体に対する実験を模擬した試験条件で数値解析を行えば、構造としてのエネルギー吸収性能も同様に評価することが可能となる。

参考文献

- 1) 村田昌祥, 丸山健司, 長田剛, 飯島正徳, 皆川勝: 熱量測定によるゴムのエネルギー吸収性能評価に関する研究 構造工学論文集 Vol.52A (2006), pp.547-556
- 2) Vikas Srivastava, Shawn A. Chester, Nicoli M. Ames, Lallit Anand: A thermo-mechanically-coupled large-deformation theory for amorphous polymers in a temperature range which spans their glass transition, *International Journal of Plasticity*, 26 (2010) pp.1138-1182.
- 3) 2005年度ゴム分科会: 公開データベース (<http://www.jancae.org/cgi-bin/gatex/annex2005DB/gatex.cgi>)