熱可塑性樹脂およびゴムを用いた緩衝材のエネルギー吸収性能評価

○東北大学大学院工学研究科土木工学専攻　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

緩衝材は，物体の衝突に対して衝撃荷重を低減し，衝撃エネルギーを吸収するために用いられる．実験的には，例えば村田ら [1] が，ゴムの損失係数のピーク高さを用い，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．

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 1 要素モデルを用いた数値試験を行い，非弾性散逸エネルギー量を数値的に算出することで大変形を含めた材料特性としてのエネルギー吸収性能を評価する．また，実際の緩衝材を模擬した緩衝材モデルを用いて数値試験を行い，構造としてのエネルギー吸収性能についても評価する．

2. 材料の力学挙動と構成則

(1) 材料の力学挙動

熱可塑性樹脂は，粘塑性降伏を起こすまで弾性挙動が支配しており，応力は線形弾性的な挙動を示す．一方，降伏後は，降伏応力の低下によって応力の軟化挙動が観察される．しかし，大変形域ではエネルギー弾性が発現し，急激に応力が増加する．また，除荷の後，保持すると粘弾性的なひずみ回復が生じる．一方，ゴムは熱可塑性樹脂に比べて弾性抵抗は小さいが，大変形域では前者と同じく急激に応力が増加する．また，載荷にともなう損傷によって，載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) 材料モデル

熱可塑性樹脂の材料モデルには，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 [2] を用いる．このとき，散逸エネルギー増分 $\phi_{\mathrm{inelastic}}$ を次式を用いて評価する．

$$\phi_{\mathrm{inelastic}} = \dot{\gamma}^{\mathrm{vp}} \|\boldsymbol{M}^{\mathrm{eff}}\| + \sum_{\alpha=1}^{N} \frac{1}{2\tau^{\alpha}} \boldsymbol{R}^{\alpha} : (\mathbb{C}^{\alpha})^{-1} : \boldsymbol{R}^{\alpha} \qquad (1)$$

ここで，$\gamma^{\mathrm{vp}}, \boldsymbol{M}^{\mathrm{eff}}, \tau^{\alpha}, \boldsymbol{R}^{\alpha}$ および $\mathbb{C}^{\alpha}$ はそれぞれ粘塑性乗数，有効偏差 Mandel 応力，Maxwell 要素 α の緩和時間，Maxwell 要素 α の熱力学的応力および Maxwell 要素 α の弾性係数行列である．また，N は Maxwell 要素の総数である．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 [2] には，速度依存性を表現するために粘弾性を採用し，さらに 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 $\phi_{\mathrm{inelastic}}$ は次式を用いて評価する．

$$\phi_{\mathrm{inelastic}} = \sum_{\alpha=1}^{N} \frac{\boldsymbol{R}^{\alpha} : \boldsymbol{R}^{\alpha}}{\tau^{\alpha}\gamma^{\alpha}(1-D)G} + \zeta \dot{D} \qquad (2)$$

ここで，$\gamma^{\alpha}, D, G,$ および ζ はそれぞれ Maxwell 要素 α の相対弾性率，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．

3. 数値試験によるエネルギー吸収性能評価

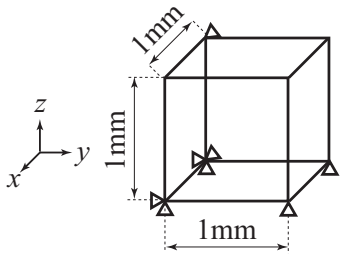
(1) 要素試験による材料特性の評価

寸法 $1 \times 1 \times 1\,\mathrm{mm}^3$ の立方体モデルに対して一軸引張試験を模擬した静的解析を行う．境界条件は，図 1 に示すように拘束し，$+z$ 面に z 方向の変位を与える．ひずみ速度 2 水準 ($0.1\,\mathrm{s}^{-1}$ および $0.001\,\mathrm{s}^{-1}$) で，(i) z 方向に 1.72 mm の強制変位を与え，(ii) 引張りと同じ時間で除荷し，(iii) 引張時間の 3 倍の間保持した．図 2 および図 3 に，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量，粘塑性散逸エネルギー量および全散逸エネルギー量の時間変化をそれぞれ示し，図 4 および図 5 にゴムの粘弾性散逸エネルギー量，損傷散逸エネルギー量および全体散逸エネルギー量の時間変化をそれぞれ示す．

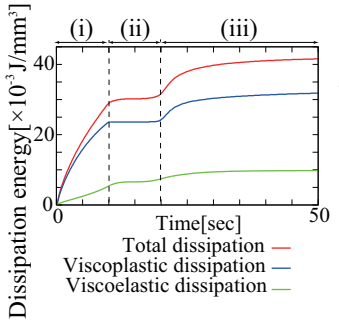
熱可塑性樹脂は，ひずみ速度が大きいと粘弾性，粘塑性散逸エネルギー量ともに大きくなる．また，ひずみ速度による散逸エネルギー量の変化は粘弾性の方が顕著である．さらに，保持期間でもひずみの回復として観察される非平衡状態からの緩和挙動によって散逸エネルギー量が増加する．

一方ゴムは，ひずみ速度 $0.1\,\mathrm{s}^{-1}$ では，粘弾性散逸エネルギー量に対して損傷散逸エネルギー量が小さいが，ひずみ速度 $0.001\,\mathrm{s}^{-1}$ では負荷・除荷での粘弾性散逸エネルギー量と損傷散逸エネルギー量が同程度である．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量が小さくなるのに対し，損傷散逸エネルギー量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が低下するため自由エネルギーの最大値が更新されず，損傷が発展しないため損傷散逸エネルギーが増加しない．

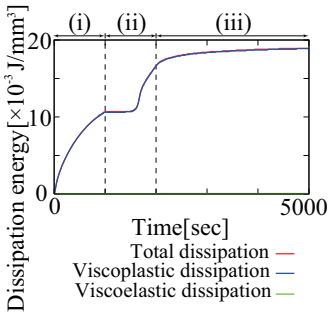
Key Words: ゴム 熱可塑性樹脂 散逸エネルギー　粘弾性　粘塑性　損傷
〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1,TEL 022-752-2132,FAX 022-752-2133



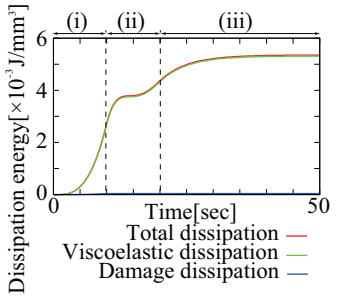
図–1 8 節点六面体 1 要素モデル



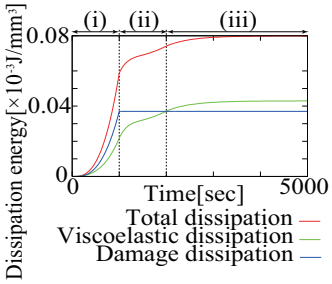
図–2 ひずみ速度 0.1 s^{-1} での熱可塑性樹脂の散逸エネルギー量



図–3 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量



図–4 ひずみ速度 0.1 s^{-1} でのゴムの散逸エネルギー量



図–5 ひずみ速度 0.001 s^{-1} でのゴムの散逸エネルギー量

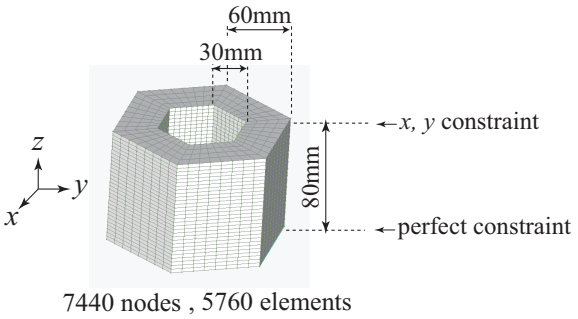
(2) 緩衝材モデルを用いた評価

実際の緩衝材として用いられている構造物を模擬した緩衝材モデル [3] を用いて圧縮変形を動的に与える数値試験を行った．ここで，緩衝材モデルと境界条件を図 6 に示す．強制変位は，地震荷重を想定して +z 面に 0.13 秒間で −z 方向に 14.4 mm を与えた．図 7 に，熱可塑性樹脂の粘弾性散逸エネルギー量，粘塑性散逸エネルギー量および全体散逸エネルギー量の時間変化を示し，図 8 に，ゴムの粘弾性散逸エネルギー量，損傷散逸エネルギー量および全体散逸エネルギー量の時間変化を示す．

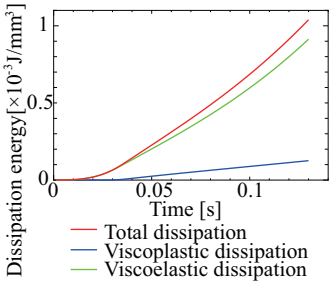
熱可塑性樹脂では，粘弾性散逸エネルギー量が粘塑性散逸エネルギー量より大きくなった．これは，ひずみ速度が要素試験と比較して非常に速く，ひずみ速度による粘弾性散逸エネルギー量の増加が粘塑性散逸エネルギー量の増加を上回ったためであると考えられる．

一方，ゴムは損傷散逸エネルギー量が粘弾性散逸エネルギー量と比較して非常に小さくなった．これは，変形が小さいため，損傷がほとんど発展しなかったためであると考えられる．

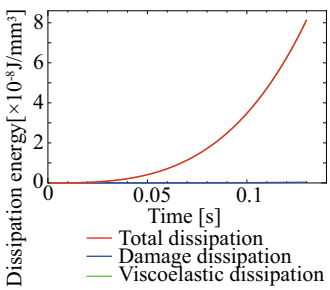
熱可塑性樹脂の粘弾性散逸エネルギー量とゴムの粘弾性散逸エネエルギー量を比較すると，ゴムの方が 10^4 程度オーダーが小さい．これは，変形が小さいときのゴムの粘弾性散逸エネルギー量の増加が熱可塑性樹脂よりも小さいためであると考えられる．



図–6 緩衝材モデル



図–7 熱可塑性樹脂の散逸エネルギー量



図–8 ゴムの散逸エネルギー量

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試験を行い，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吸収性能を比較・評価した．熱可塑性樹脂とゴムの粘弾性散逸エネルギー量を比較すると，変形が小さい場合にはゴムの粘弾性散逸エネルギー量が非常に小さかったが，大変形領域では両者の粘弾性散逸エネルギー量は同程度であり，粘塑性変形や損傷によるエネルギー散逸量の違いが材料のエネルギー吸収性能の違いとして現れた．緩衝材モデルを用いた数値試験では，熱可塑性樹脂の方がエネルギー吸収量が大きくなった．しかし，熱可塑性樹脂は脆性的に破壊するものと考えられるため，繰り返し荷重を受けるような場合は，ゴムの方が優れていると考えられる．

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，52A (2006), pp.547-556.
2) 松原成志朗，寺田賢二郎: 変形勾配の粘塑性・粘弾性乗算分解による熱可塑性樹脂のレオロジー的構成則，機械学会論文集 (投稿中).
3) 根岸聖司，野々村千里，山下勝久，鎌田賢，荒木良夫，松山雄二郎: 熱可塑性エラストマー成形品の変形挙動 (1) -円筒型成形品の静的圧縮変形挙動の観察-，プラスチック成形加工学会誌「成形加工」，12 (2000), pp.451-456.