

CS-30 画像を利用した有限ひずみ場の計測と積層ゴム支承の復元力特性の予測

東京大学大学院 正会員 阿部雅人
 東京大学大学院 フェロー会員 藤野陽三
 東京大学大学院 学生会員 吉田純司

1.はじめに

近年、天然ゴムや高減衰ゴムなど大変形するゴム材料が、免震用積層ゴム支承などの免震・制振デバイスに利用されている。これらのデバイスでは、ゴム材料が主として100%以上の大ひずみを生じることを想定しているため、ひずみゲージではひずみの測定が困難となる。従ってこれまでのところ、ゴム材料に生じるひずみは、数値計算に依存しており、実際に生じているひずみがどの程度なのかわかっていないのが現状である。本研究では、1例として積層ゴム支承をとりあげ、(1)画像を利用し、支承の表面に生じるひずみ場を計測する。(2)計測したひずみ場を利用して、ゴム材料の構成則を検証する。ことを目的とした。

2.画像解析を利用した有限ひずみ場の計測手法

物質点の変形を記録し、それにマッチング法を適用して変位場を算出する。さらに、その変位を内挿して空間的に微分することによりひずみ場を算出した。物質点の変位場の具体的な計測方法は、以下のようである。

(a) **変形の記録** 本研究では、積層ゴム支承の繰り返し載荷実験において、支承表面に白黒のランダム模様を描き、ランダム模様の変形を高精度のアナログカメラにより29ステップに分割して記録した。また、記録した写真を2500×10000画素の白黒256階調のビットマップファイルとしてデジタル化した。

(b) **スケーリングと誤差の補正** 図1のように画像中に黒色を背景とする2つの不動な白い点(以後標点と呼ぶ)を定め、画像での長さを実際の長さを対応させてスケーリングを行った。また、画像は、写真を現像するときならびにスキャナーでデジタル化するとき各写真間で大きさ、方向および色の濃淡等の差が出る。これらの誤差を補正するため、2つ目以降の画像の標点が1つ目の画像の標点と一致するように平行移動、回転、縮小(拡大)し、かつ標点の色の強さが一致するように全体を定数倍した。

(c) **マッチング法**^{1),2)} 2つの画像間の物質点の変位は、以下に示す光度累積逐次棄却法²⁾を用いた。

2つの画像データである位置 (x, y) における階調の値をそれぞれ $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ としたとき、2つの画像間で適切な大きさの領域をもつ範囲について、

$$R(p, q) = \sum_{i=1}^n |f(x_i, y_i) - g(x_i + p, y_i + q)| \quad (1)$$

を計算する。このとき画像が似ていると $R(p, q)$ が小さくなり、そうでない場合には大きな値を取る。従って $R(p, q)$ が最小となる (p, q) が物質点の移動後の位置となる。

(d) **物質点の追跡** 物質点の変位は、無変形状態の画像(1つ目の画像)において変位計測を行う物質点を格子状に定め、各格子点を重心とする矩形領域をマッチング法により追跡して求めた。ただし、物質点を定義するのは最初の画像のみで、2つ目以降は移動後の点を重心とした矩形領域に対してマッチング法を適用した。

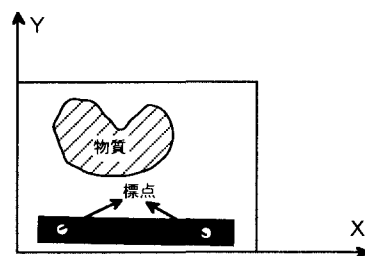
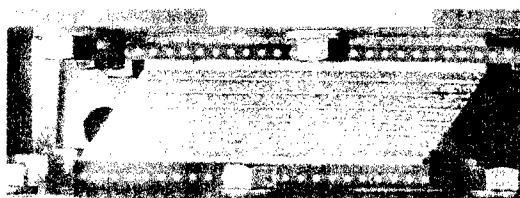
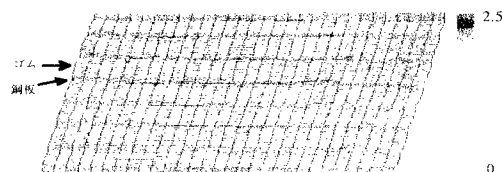


図1 画像中の標点



(a) 変形時の画像



(b) 計測されたせん断ひずみ場(Green-Lagrange ひずみ)

図2 せん断変形100%時の積層ゴム支承の表面ひずみ場

キーワード：有限ひずみ、マッチング法、高減衰積層ゴム支承、構成則

連絡先：〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学 TEL:03-3812-2111ex6099 FAX:03-5689-7292

上述した(a)～(d)を用いて、積層ゴム支承がせん断ひずみ 100%の変形をした場合の支承表面のひずみ場を計測した。その結果を図 2(b)に示す。図 2(b)をみるとゴムに大きなひずみが生じているが、上下フランジならびに内部銅板にはひずみがほとんど生じていないことがわかる。

3. 高減衰ゴムの構成則の検証

ここでは、計測したひずみ場を利用して図 3 に示す手順に従い高減衰ゴムの構成則⁴⁾の検証を行った。ただし、水平 1 方向の荷重では高減衰積層ゴム支承が奥行き方向に同一に変形すると仮定し、平面ひずみ状態とした。また、高減衰積層ゴム支承の復元力は、有限要素法のプロセスを適用し等価節点力ベクトルの和を算出することにより求めた。有限要素法³⁾を用いると現時刻 t における等価節点力ベクトル ${}^t\mathbf{Q}$ は、

$${}^t\mathbf{Q} = \int_V {}^t\mathbf{B}_{L0}^T {}^t\hat{\mathbf{T}}^n dV \text{ (updated Lagrange 法)}, \quad {}^t\mathbf{Q} = \int_V ({}^t\mathbf{B}_{L0}^T + {}^t\mathbf{B}_{L1}^T) {}^t\hat{\mathbf{S}}^n dV \text{ (total Lagrange 法)} \quad (2a)$$

となる。ここに $\hat{\mathbf{T}}^n$ は Kirchhoff 応力ベクトル、 ${}^t\hat{\mathbf{S}}^n$ は第 2Piola-Kirchhoff 応力ベクトルであり、

$$\hat{\mathbf{T}}^n = \{\hat{T}_{11}, \hat{T}_{22}, \hat{T}_{12}\}^T, \quad {}^t\hat{\mathbf{S}}^n = \{{}^t\hat{S}_{11}, {}^t\hat{S}_{22}, {}^t\hat{S}_{12}\}^T \quad (2b)$$

である。また、

$${}^t\mathbf{B}_{L0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^n}{\partial x_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N^n}{\partial x_2} \\ \frac{\partial N^n}{\partial x_2} & \frac{\partial N^n}{\partial x_1} \end{bmatrix}, \quad {}^t\mathbf{B}_{L1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N^n}{\partial X_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N^n}{\partial X_2} \\ \frac{\partial N^n}{\partial X_2} & \frac{\partial N^n}{\partial X_1} \end{bmatrix}, \quad {}^t\mathbf{B}_{L1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial' u_1}{\partial X_1} \frac{\partial N^n}{\partial X_1} & \frac{\partial' u_1}{\partial X_1} \frac{\partial N^n}{\partial X_2} \\ \frac{\partial' u_2}{\partial X_2} \frac{\partial N^n}{\partial X_2} & \frac{\partial' u_2}{\partial X_2} \frac{\partial N^n}{\partial X_1} \\ \frac{\partial' u_1}{\partial X_2} \frac{\partial N^n}{\partial X_1} + \frac{\partial' u_2}{\partial X_1} \frac{\partial N^n}{\partial X_2} & \frac{\partial' u_1}{\partial X_2} \frac{\partial N^n}{\partial X_2} + \frac{\partial' u_2}{\partial X_1} \frac{\partial N^n}{\partial X_1} \end{bmatrix} \quad (2c)$$

である。ただし、 N^n は形状関数であり、 X_i および x_i はそれぞれ時刻 0 および現時刻 t における物質点の位置である。

図 4 に計測したひずみ場に構成則を適用して得られた復元力の予測値と、荷重実験で得られた値とを比較した結果を示す。ここに図 4 は、高減衰積層ゴム支承に面圧 80[kg/cm²]の下でせん断ひずみ 100%の繰返し荷重をおこなった復元力特性である。図 4 をみると荷重実験で得られた履歴曲線の方が、除荷時の剛性が大きくなっているものの、全体として概ね一致していることがわかる。

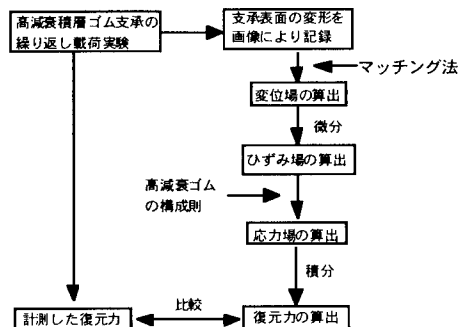


図 3 構成則の検証のプロセス

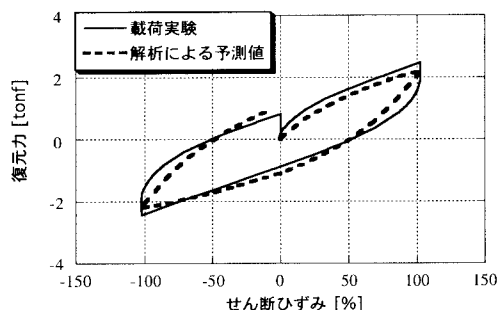


図 4 高減衰積層ゴム支承の復元力の比較

4. まとめ

1) 画像計測を用いてゴム材料のひずみ場を計測した。本計測手法では、比較的容易に入手できる市販のアナログカメラならびにスキャナーを利用しており手軽に計測を行うことができる。今後、有限ひずみを生じる物質や、計測が困難な位置のひずみを計測する際に有用である。

2) 計測したひずみ場に高減衰ゴムの構成則を適用し高減衰積層ゴム支承の復元力特性を算出した。算出した値と、高減衰積層ゴム支承の繰返し荷重実験で得られている値と比較した結果、荷重実験での荷重値を概ね再現できた。このことより、高減衰ゴムの構成則⁴⁾が、積層ゴム支承に適用した場合にも有効であることがわかった。

＜謝辞＞ 荷重実験で利用した積層ゴム支承の設計、製作に当たっては、(株)ブリヂストンの須藤千秋氏、横浜ゴム(株)の遠藤和夫氏、川口金属工業(株)の鶴野禎史氏、オイレス工業(株)の横川英彰氏に協力して頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献 1) 安居院猛, 中嶋正之: 基礎情報工学シリーズ13 画像情報処理, 森北出版, 1991. 2) 加賀昭和, 井上義雄, 山口克人: 逐次棄却法を用いたパターン追跡アルゴリズム, 可視化情報, Vol.13, No2, 1993. 3) 久田俊明, 野口裕久: 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 1995. 4) 吉田純司, 阿部雅人, 藤野陽三: 高減衰ゴムの構成則の構築, 第54回年次学術講演概要集, 土木学会, 1999 (投稿予定)。