517 頸椎靱帯の機械的特性に関する研究

A Study of Mechanical Properties of Ligament of Rabbit

○正 羽鳥 敦司 (山口大工) 河合 伸也 (山口大医)
 正 桜本 逸男 (徳山高専) 田口 敏彦 (山口大医)
 花崎 陽介 (山口大工) 正 河野 俊一 (山口大工)

Atsushi HATORI, Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube-City, Yamaguchi

Itsuo SAKURAMOTO, Tokuyama College of Technology, 3538, Takajo, Kume, Tokuyama, Yamaguchi

Yousuke HANASAKI, Yamaguchi University

Shinya KAWAI, Yamaguchi University, 1-1, minamikogushi1-chome, Ube, Yamaguchi

Toshihiko TAGUCHI, Yamaguchi University

Shunichi KAWANO, Yamaguchi University

Key Words: Ligament, Mechanical Properties, Cervical spine, Biomechanics

1. はじめに

頸椎性脊髄症や頸椎後縦靱帯骨化症¹⁾等, 頸椎の病気に對する手術の有効性あるいは頸椎の生体材料的特徴を明らかにするためには動物実験は非常に有効な検証手段であり, 著者らは白色家兎により手術方法の妥当性を検討した²⁾. しかし一般に動物実験は高価であり, また動物愛護の意味から軽々しく実施すべきでないことから, 数値シミュレーションが用いられる場合が多い. 数値シミュレーションを行う場合, 頸椎のマクロな機械的特性に加えて, 頸椎を構成している各要素についてもその詳細な特性が必要となるが, 靱帯等の要素は微小かつ低剛性で, また試料作成後の材料特性の経時変化が大きく, 精度良い測定は困難である.

本研究では, 軟組織用引張試験機³⁾を用いて頸椎を構成する要素のひとつである靱帯の引張試験を行い, その機械的特性を測定した. また, その実験データをもとに数値シミュレーションに必要な機械的パラメータの同定を行った.

2. 実験

2. 1. 実験装置

本研究に使用した軟組織用試験装置を Fig.1 に示す. 本試験装置の駆動機構は, 超精密リニアガイドアクチュエータ SKR 型 (THK, SKR3304E+300L1) と AC サーボモータ (安川電機, USAFED-02022KE) から構成されている. AC サーボモータにはパルス数 8192R/P のインクリメンタルエンコーダが取り付けられており, モータ回転量から変位を求めることができる. また, 荷重測定には微小荷重用ロードセル (共和電業, LVS-500GA) を用いている.

2. 2. 試料

山口大学医学部にて実験開始 1 時間以内に屠殺された白色家兎の脊椎から黄色靱帯を採り, 試料とした. 頸椎部の靱帯は非常に小さく, 試験片を採取することが困難であるため, 腰椎部の靱帯を試料とした. 試料寸法は長さ 5mm 幅 2mm 厚さ 2mm である. Fig.2 に試料の様子を示す.

2. 3. 実験方法

以下に白色家兎黄色靱帯の引張試験の手順を示す.

- 1) Fig.2 に示す試料を治具同士の距離が 2.0mm となるようにピンチ型治具ではさみ, 治具を Fig.1(b) のテ

ーブルに取り付けた. 試料を試験機に取り付けた様子を Fig.3 に示す.

- 2) Fig.1(b) のテーブルをリニアガイドアクチュエータにより直動させることにより試料の引張試験を行った. 変位速度は 0.05mm/sec, 0.5 mm/sec および 5 mm/sec とした. それぞれについて, ロードセルおよびリニアガイドアクチュエータに直結した AC サーボモータのエンコーダより荷重および変位データを PC に取り込み, 計測した.

(a) Outline of Machine

(b) Table

Fig.1 Measuring Apparatus for Spinal Strength

Fig.2 Specimen

Fig.3 Specimen in Machine

3. 実験結果

実験は4つの試料について行った。頁数の関係から得られた実験データを平均化処理した真応力-真ひずみ曲線をFig.4に示す。一般に、靱帯の機械的性質はひずみ速度の影響を受けないとされているが、同図より明らかなように粘性を有していることがわかる。

4. パラメータ同定および考察

機械的性質がひずみ速度に依存するという実験結果から、靱帯の力学モデルをFig.5のように仮定する。ここで σ_a 、 ε_a はそれぞれ実験データより求められる真応力、真ひずみである。また添え字eはモデル中の弾性部、添え字cはモデル中の粘弾性部のパラメータを示している。ここで同定するパラメータは次に示す式(1)の σ_s および α 、 β である。

$$\sigma_a = \sigma_s \{1 + \alpha \ln(1 + \beta \dot{\varepsilon}_c)\} \quad (1)$$

実験データを最小二乗法により

$$\sigma_a = a\varepsilon_a^2 + b\varepsilon_a + c$$

として補完し $\sigma_a - \varepsilon_a$ 曲線を求め、また各 σ_a に対する $\dot{\varepsilon}_a$ の値を計算した。この値を用いて、Fig.5のモデルより求めた計算式

$$\dot{\varepsilon}_c = \{1 - \frac{1}{E}(2a\varepsilon_a + b)\} \dot{\varepsilon}_a / e^{\varepsilon_a}$$

より各 σ_a に対する $\dot{\varepsilon}_c$ の値を求めた。ここで、ヤング率は $E=20$ と仮定した。この $\dot{\varepsilon}_c$ の値を用いて、式(1)において $\beta=200$ として各 ε_c に対するパラメータ σ_s 、 α の値を計算するとFig.6およびFig.7に示すようになる。

Fig.6より σ_s は ε_c に対して線形的に変化し、また α はFig.7より一定値に近似した。すなわち

$$\sigma_s = 0.22 \cdot \varepsilon_c [MPa]$$

$$\alpha = 0.1$$

となる。この σ_s 、 α および β を用いて式(1)から σ_a 、 ε_a を逆算した結果をFig.4中に三角印で示す。同図に見られるように、実験結果を同定したパラメータを用い、計算により求めた σ_a 、 ε_a の値は、実験結果と良い一致をみた。このことから、Fig.5に示すような靱帯の力学的モデルおよび式(1)により靱帯の機械的性質を表現できる可能性が示された。

文献

- 1) 宮崎他, 臨整外, 30巻4号(1995), 531 - 542
- 2) 嶋田, 軟組織用引張試験機を用いた脊椎の機械的性質の計測, 山口大学大学院理工学研究科修士論文(1998)
- 3) 羽鳥他, 機講論, No.01-1, Vol.6, (2001), 169 - 170

Fig.4 $\sigma_a - \varepsilon_a$ Curve of Apical Ligament in Rabbit

Fig.5 Model of Ligament

Fig.6 Relationship between σ_s and ε_c

Fig.7 Relationship between α and ε_c