8D35

培養した薄状軟組織の押込みによる柔さ計測

Measurement of the Softness of Thin Sheet of Cultured Soft Tissue by Indentation

正 ○張 月琳 (農工大) 正 佐久間 淳 (農工大)
正 中楯 浩康 (首都大) 正 青村 茂 (首都大)

Yuelin ZHANG, Tokyo University of A&T, 2-24-16 Nakacho, Koganei, 184-8588, Tokyo
Atsushi SAKUMA, Tokyo University of A&T
Hiromichi NAKADATE, Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino, 191-0065, Tokyo
Shigeru AOMURA, Tokyo Metropolitan University

Key words : Material Testing, Thin Sheet, Softness, Cultured Soft Tissue, Indentation

1. 緒 言

人間の頭部に何らかの衝撃が加わった場合、脳には様々な損傷が起きる。これらの損傷に対する迅速な救急処置、さらには後遺症患者に適切な治療を施すために、脳損傷の発症機序を解明することによって症状を正しく予測する必要がある。これまで、頭部外傷の発症メカニズムを解明するために、著者らは、頭部有限要素モデルを用いた頭蓋内の力学応答解析⁽¹⁾および培養した神経細胞を用いた衝撃実験⁽²⁾を実施している。しかし、培養した神経細胞を用いた衝撃実験時の実験条件と頭蓋内の神経細胞の生存条件は異なり、培養した神経細胞で得られた外部入力と損傷の関係をそのままヒト受傷度の評価に利用できなく、早期診断に用いることができない。つまり、外部入力と神経損傷の関係を評価するには、神経線維の適切なモデルを構築し、現存の頭部モデルに組み込む必要がある。そのため、神経線維の微視レベルの力学的特性を明らかにすることが求められている。

ここで、これまでに培養した神経線維および神経線維を含めた組織の厚さは mm オーダー未満のものが多く、薄いシート状のものの力学的特性を計測するために、原子間力顕微鏡 (AFM)⁽³⁾や引張試験⁽⁴⁾を用いた研究が行われている。そこで本研究では、ディッシュ等で培養したままの状態、試料を取り出す必要のない球圧子押込試験法⁽⁵⁾を用いて、微視レベルの神経線維の力学的特性を高精度に計測することを目的とする。本報では、球圧子押込試験を厚さが mm オーダー未満の薄状試料へ適用する計測原理と計測結果を報告する。

2. 球圧子押込試験による Young 率の計測法

2.1 Hertz の弾性接触理論

Hertz の弾性接触理論⁽⁶⁾において、半無限体試料に対して十分に硬い球圧子を押込むとき、球圧子の直径 ϕ と試料 Young 率 E 、ポアソン比 ν を用いて、押込荷重と押込量 δ の関係を式(1)で表現できる。

$$F = \frac{4}{3} \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\phi}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}} = A \delta^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

薄い試料の荷重 $\hat{F}$ は試料厚さの影響を受けるが、この影響を示す係数 B を用いた次式による近似を実施する⁽⁷⁾。

$$\hat{F} = A \{ \delta (1 + B \delta) \}^{\frac{3}{2}} = \hat{A} \delta^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

この式を用いる場合、試料の Young 率に関して以下の関係が成立することとなる。

$$\hat{E} = E (1 + B \delta)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

これは、試料本来の Young 率 E に対して薄い試料の計測値 $\hat{E}$ が高くなることを示している。

そこでこの現象を利用して、Young 率 $\hat{E}$ の 2 次導関数 $\hat{E}''$ と試料厚さ h について関数 f を得ることができれば、接触開始時の情報から試料厚さ h の演算が可能となる。ここで今回の結果を吟味したところ指数関数的関係を示したことから、次式によって試料厚さ h を同定することとする。

$$h = f(\hat{E}'') = H \ln \left(\frac{G}{\hat{E}''} \right) \quad (4)$$

なお、係数は $H = 2.16 \times 10^{-3} \text{ m}$, $G = 3.76 \times 10^9 \text{ Pa/m}^2$ となっている。

2.2 試料厚さの影響を考慮した Young 率

有限体試料では圧子の押込部で試料が著しく変形する現象が観られることから、本研究では押込変形を接触変形と圧縮変形の効果を重ね合わせることを考える⁽⁸⁾。接触の効果は Hertz の接触理論から算出するひずみ $\bar{\epsilon}_H$ で表現し、さらに圧縮は試料の軟らかさによる圧縮変形の領域体積の変化率 $\bar{\epsilon}_V$ で表すものとして、次の関係を定義する。

$$\bar{\epsilon}_1 = \bar{\epsilon}_H + \bar{\epsilon}_V \quad (5)$$

この $\bar{\epsilon}_1$ は、押込過程で試料中に生じる 3 次元的なひずみ分布を等価的な単軸ひずみで表そうとしたものである。詳細については紙面の都合上割愛するが、圧縮変形を受ける領域を圧子と試料底面に挟まれた楕円領域と仮定することでこのひずみ $\bar{\epsilon}_1$ を次式で表現する。

$$\bar{\epsilon}_1 = -\frac{2}{\pi(1-\nu^2)} \left(\frac{2\delta}{\phi} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{\delta}{h} - \frac{2}{3} \ln \left[\frac{2h + 3(\frac{\phi}{2} - \delta)}{2h + \frac{3}{2}\phi} \right] \quad (6)$$

これが単軸変形を等価的に表現できるとすれば、試料に生じた応力 $\sigma = E \bar{\epsilon}_1$ の関係を想定できる。さらに接触部で Hertz の応力分布を同時に考えることが可能であれば、試料の Young 率 E は次式で導出可能となる。

$$E = -\frac{6}{\pi^3(1-\nu^2)^2} \left(\frac{2}{\phi} \right)^2 \frac{\hat{F}}{\bar{\epsilon}_1^3} \quad (7)$$

3. 薄状軟組織の計測装置

3.1 実験概要

多様な薄状軟組織を評価するために、押し込み深さ $10\mu\text{m}$ まで測定できる(株)島津製作所製ダイナミック超微小硬度計 DUH-211(試験力の測定最小単位 $0.196\mu\text{N}$)を用いた。計測装置の外観を図1に示す。

計測に用いる供試材には、市販で特性が安定している硬度は A50 のシリコンゴムシートを用いた。シートの厚さは 0.1mm と 0.2mm で一辺 10mm の正方形のものを使用した。押し込み試験において、直径が 1mm のダイヤモンド($E=1.14\times 10^{12}\text{Pa}$, $\nu=0.07$)の球圧子を用いた。試供材の粘性の影響を低減するために、荷重の負荷速度を装置仕様で最も低速な 0.0015mN/sec とする。試験時の環境条件は気温 18.8°C 、湿度 53% であった。

Fig.1 Measurement Equipments of Thin Soft Tissues. Dynamic Ultra Micro Hardness Tester DUH-211 of Shimadzu Corp. (Low Test Force with Measurement Resolution of $0.196\mu\text{N}$).

3.2 実験結果および考察

実験より得られた押し込み荷重と押し込み量の関係およびそれによって同定した Young 率の結果を図2に示す。同定した Young 率とデュロメーター硬さを Young 率に換算した⁷⁾結果を表1に示す。

各実験結果において、押し込み量が $0.4\mu\text{m}$ になるまでの荷重と押し込み量の関係を用いて Young 率を同定した。図2では、実験結果を細い実線、同定した近似線を太い実線で示している。同定した結果、本実験で用いたシリコンゴムシートの Young 率は 0.1mm と 0.2mm の両方においてともに 8.46MPa であった。Young 率の換算式⁷⁾によって硬さの公称値から供試材の Young 率を計算すると、硬度 50 では 2.53MPa となる。本実験で計測した値はこれの約 3.3 倍であった。これは、薄いシート状の素材を製造する際の工程の影響などが要因として考えられる。

さらに、本実験で Young 率を同定するために必要な押し込み荷重は約 0.1mN 、押し込み量は $0.4\mu\text{m}$ であった(図2)ため、この装置を用いる際に厚さが約 $0.4\mu\text{m}$ 未満の薄状試料の力学的特性も計測可能であることが示唆された。

4. 結言

本研究では、薄状組織の柔さを計測するために、球圧子押し込み試験の原理を適用した。その結果、厚さが 0.1mm レベルのシリコンゴムの Young 率を計測することができた。さらに、実験の結果により、厚さが約 $0.4\mu\text{m}$ の薄状組織を計測することができると考えられる。今後は神経細胞を培養し、神経線維($\phi=0.5\sim 20\mu\text{m}$)の Young 率を計測し、神経線維の有限要素解析を行っていく。

なお本研究は、日本学術振興会の科学研究費・基盤研究(B)(課題番号:22360045)の援助の下で実施している。

(a) $h=0.1\text{mm}$ $E=8.46\text{MPa}$

(b) $h=0.2\text{mm}$ $E=8.46\text{MPa}$

Fig.2 Experimental force-indentation depth curves.

Table 1 Experimental results comparison with durometer hardness

Thickness h 10^{-3}m	Young's modulu E MPa	Durometer hardness A50 MPa
0.1	8.46	2.53
0.2	8.46	2.53

参考文献

- (1) Yuelin Zhang et al., *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol. 6, No. 3 (2011), pp.191-202.
- (2) Yuelin Zhang et al., *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.5, No.2(2010), pp.119-128.
- (3) M. C. Liu, et al., *FMBE Proceedings*, 31,(2010), 1079-1082.
- (4) 柳原辰一郎ら, バイオエンジニアリング学術講演会・セミナー講演論文集(2004), pp.275-276.
- (5) 谷充博ら, 日本機械学会論文集 A 編 (2009), pp.901-908.
- (6) H. Hertz, *Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelle's Journal)*, 92, 156(1882), 156-171.
- (7) 日本ゴム協会, ゴム試験法 第3版, 丸善出版株式会社 (2006), pp.164-206.