衝撃荷重時における膝半月板組織の変形挙動とショック吸収機能*

小林 正 典^{*1}, 小林 正 治^{*2}

Study on the Shock-Absorption and Deformation of Meniscus under the Impact Loading Condition

Masanori KOBAYASHI^{*3} and Masaharu KOBAYASHI^{*3} Department of Mechanical Engineering, Daido University,
10-3 Takiharuro-cho, Minami-ku, Nagoya-shi, Aichi, 457-8530 Japan

Although many biomechanical studies have been addressed the shock absorption function of menisci on a knee joint, few reports concerning the behavior of menisci under the impact loading condition are presented. In this study, the impact compression test using the normal porcine knee joint was performed in order to observe the visco-elastic behavior of the meniscus by the high-speed video camera. As a result, the normal meniscus showed the typical visco-elastic property under the high strain rate of meniscus for the dynamic stress. This fact indicated the meniscus could not possess excellent shock-absorbing against the high impact energy to knee joint.

Key Words: Impact Loading Condition, Meniscus, Visco-Elasticity, High-Speed Video Camera

1. 緒 言

人体の膝関節内にある半月板組織は、過去の数々のバイオメカニクスの研究から、関節衝撃時の緩和機能を持つとされている⁽¹⁾。しかしながら、半月板の組織はコラーゲン線維を中心にプロテオグリカンや水分を含有する繊維軟骨であり、その粘弾性特性から衝撃時には強い抵抗を持つとも考えられる。しかしながら shock-absorption に対応する半月板の変形挙動については、肉眼的にまだ十分に確認されていない。

そこで本研究では、高速度カメラを用いて衝撃荷重時の豚の膝関節を撮影し半月板の変形挙動を観察・検討を行った。

2. 実験方法および結果

2.1 実験試料と装置 本実験に用いた実験装置および方法の概略を図1に示す。

衝撃試験には、落錘式衝撃試験装置を使用した。装

置の構造は長さ1600mmのH型鋼(125×125×t6.5mm)を組み合わせて土台とし、その中央部に試料を設置するための正四面体状の空間を設け、その鉛直上に錘を昇降させるためのシームレスパイプを垂直に固定した。また、シームレスパイプ上端に滑車を取り付け、手動ウインチを用いてワイヤを巻くことで錘の落下距離を任意に調節できる構造とした。錘は、一般構造用圧延鋼材(SS400)で、直径130mm、高さ100mm、重さ10kgの円柱形でワイヤに直結している。

図1のように衝撃時の反動を予防し錘が試料に垂直に荷重がかかるように作製した治具にブタの膝関節試

Fig. 1 Impact test machine and sample

* 原稿受付 2009年5月8日。

^{*1} 正員, 大同大学工学部機械工学科(〒457-8530 名古屋市南区滝春町10-3)。

^{*2} 正員, 大同大学大学院工学研究科。

E-mail: mkoba@daido-it.ac.jp

料を固定した後、この落錘式衝撃試験装置を用いて膝関節試料に衝撃荷重を加え、その時の半月板の挙動をハイスピードデジタルカメラによって撮影した。

2・2 撮影条件 本実験ではヒトが日常生活で頻繁に利用しうる階段昇降を想定して、階段の1 step分の高さ(0.20 m)で平均体重 60 kg のヒトの片脚立位時をする時の位置エネルギー $30 \times 9.81 \times 0.20 \div 60 \text{ N} \cdot \text{m}$ を基準に、実際のブタ膝関節の大きさ等を考慮して、その部分荷重となる 1/2, 1/3 を荷重値として設定した。

表 1 に加えた錘の落下距離と位置エネルギーの簡単な物理関係 $E = mgh = 1/2mv^2$ (m は体重 [kg], g は重力加速度 9.81 m/s^2 , h は落下距離) から求めた位置エネルギーと衝突時の落下速度 V [m/s] を示す。

本実験で用意したカメラの本実験での録画速度は 5 000 pps とした。録画速度 5 000 pps 時の有効画素数は 512×500 の 256 000 pixel, 有効撮影範囲は $8.2 \times 6.2 \text{ mm}$ である。撮影時間は衝撃荷重が加わった瞬間から 0.03 s までとした。

2・3 計測方法 画像解析ソフトを用いて impact 時からの半月板の厚さ変化 (impact 付与前にそれぞれが持つ初期厚さからの変化量) を経時的に観察した (図 2)。

2・4 実験結果 図 3 にカメラで撮影した半月板の衝撃荷重時の経時的変形挙動を示す。

図 4 にこの画像から得られた位置エネルギーとその時の大腿骨顆部最下端での半月板の変形率 (= 変形量 / もとの厚み) との関係 (a), 半月板の最大変形までの到達速度と位置エネルギーとの関係 (b) を示す。

この実験では、半月板の水平方向への滑りや関節下

の海綿骨の変形もあるため、確実な評価は難しいが、全体的に位置エネルギーが高くなっても半月板のひずみ量はあまり増大せず、位置エネルギーの増大につれ

Fig.3 Images of meniscus deformation under the impact loading

(a) The correlation between impact energy and strain of meniscus

(b) The correlation between impact energy and strain rate of meniscus

Fig.4 The correlation between impact energy and mechanical properties of meniscus

Table 1 Experimental impact energy conditions

Fall [m]	Energy [N · m]	V_i [m/s]
0.2	$\div 20$	$\div 2.0$
0.4	$\div 40$	$\div 2.8$
0.6	$\div 60$	$\div 3.5$

Fig.2 Measure point of specimen

Fig. 5 The image of meniscus rupture case

て観測された半月板のひずみ速度の増加量も停滞していく傾向が見られた。

また、図5に実験中1例に見られた半月板断裂の画像を示す。この症例では他の試料以上に半月板の水平方向への移動が少なく、圧縮方向の半月板の厚みがほとんど変化しないまま脆性破断した。

3. 考察および結論

半月板組織が関節運動の安定化や潤滑機能の保持など数々の生体力学的機能を持つことは基礎研究から明らかになっており⁽²⁾、膝関節への衝撃緩和機能もまた、スポーツ学分野や臨床も含めた整形外科分野では一般的に受け入れられている⁽³⁾。

しかしながら、半月板の組織はコラーゲン線維を中心にプロテオグリカンや水分を含有するゲル状の高分子材料である。このような材料に見られる特有のレオロジー特性として、既にMaxwellモデルやVoigtモデルで説明されているように⁽⁴⁾、衝撃荷重時すなわち、ひずみ速度 $d\gamma/dt$ が大きい時に変形に要する力は、以下の粘性則の項 S が大きく影響して

$$S = \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} \quad (\eta: \text{粘性率})$$

高い弾性率および抵抗力を持つことになる。このことは、強い衝撃荷重時の半月板は shock-absorption として機能しないばかりか、むしろ相対する関節軟骨に大きな反力をかける結果につながることを示唆している。

高ひずみ速度時の半月板自体の粘弾性挙動のデータは今まで報告されていなかったが、今回の実験結果では、半月板の変形がこのレオロジー理論に従った機械的特性を示すことが初めて確認された。

過去の半月板の衝撃吸収機能を報告した研究は、In vitro, In vivo 含めて多くは、膝関節遠位での荷重計測や床反力を観測したものであり、海綿骨や軟骨など他の組織が関与している可能性が高いと考えられる。この衝撃実験でも、膝関節試料下での衝撃値を計測したが、上記の半月板以外の組織の機械的性質やせん断方向への半月板のすべりが複雑に関与するため、半月板にかかる衝撃と計測数値との関係の解析はまだ十分でない。しかしながら、この画像観察結果からは、半月板がどのような環境下でも十分な衝撃荷重の緩和機能を有しているわけではなく、スポーツ活動などの膝関節衝撃による半月板損傷や変形性膝関節症の発症メカニズムに大きく関与している可能性が推察された。

文 献

- (1) Voloshin, A. S. and Wosk, J., Shock absorption of meniscectomized and painful knees: a comparative in vivo study, *J. Biomed. Eng.*, Vol. 5 (1983), pp. 157-161.
- (2) Brindle, T., Nyland, J. and Johnson, D. L., The meniscus: Review of Basic Principles with Application to Surgery and Rehabilitation, *J. Athletic Training*, Vol. 36 (2001), pp. 160-169.
- (3) Hirohata, K. and Terayama, K., *Standard Textbook Orthopedics Surgery*, Vol. 4 (1990), pp. 491-492. Igakushoin.
- (4) Murakami, K., *Basic Rheology, JSME Data Handbook: Heat Transfer*, (1998), pp. 75-145, Sangyotosyo.