129 靱帯の組織構造と力学特性に関する研究

Study on Microstructure and Mechanical Property of the Ligaments

正 廣川 俊二 (九州大学大学院工学研究院)

○学 飯塚 恵一 (九州大学大学院工学府)

学 迫下 勉 (九州大学大学院工学府)

S.Hirokawa, K.Iizuka and T.Sakoshita

Department of Intelligent Machinery & Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University

1. 緒 言

本研究では、靱帯の微細構造と力学特性の関係を解明するため、豚後脚膝関節の前・後十字靱帯 (ACL, PCL) を対象に、引張り試験と組織の顕微鏡観察を行った。引張り試験には薄膜試験片、骨・靱帯・骨複合体、コラーゲン線維束 (群) の3種を用いた。まず、靱帯をスライスして作成した薄膜試験片引張り試験結果を基に、十字靱帯の力学特性の部位依存性に付いて検討した。また、骨・靱帯・骨複合体、コラーゲン線維束 (群) の引張り試験結果を基に、靱帯の階層構造と力学特性の関係を検討した。さらには、顕微鏡観察結果を基に、ACL, PCL 両者の特性の違いに付いても検討した。

2. 実 験

2. 1 薄膜試験片での層別引張り試験

膝関節より摘出した靱帯をアクリルブロックに固定し、前方から後方にかけて層状に厚さ約 0.8mm にスライスして、5～8枚の試験片を作成し、各試験片の引張り試験を行った。独自に設計・製作した引張り試験機に試料を取り付け、初期張力のある程度与えた後、試料が破断するまで荷重を加えた。引張り速度は 0.33mm/s とした¹⁾。実験中はデジタルビデオカメラで試験片が伸ばされる様子を撮影しておき、得られた画像からひずみを算出した。また、パソコン内に記録してある引張り荷重から単位時間ごとの応力を求めた。

2. 2 骨・靱帯・骨複合体引張り試験

膝関節部から対象靱帯以外の軟組織と大腿骨頭の一部を除去し、靱帯表面にはマーカーを貼り付け、大腿骨・靱帯・脛骨複合体とした。別途製作した万能引張り試験装置に、靱帯のねじれをなくした状態で複合体試料を取り付けた後、靱帯が破断するまで引張り荷重を加えた。

2. 3 コラーゲン線維束および線維束群引張り試験

層別引張り試験と同一装置を使用し、引張り試験を行った。摘出靱帯をメスを用いて裂いた後、ピンセットで単一コラーゲン線維束または、複数本のコラーゲン線維束群を取り

出した。その後、試料を実験装置に取り付け、破断するまで引張り荷重を加えた。引張り速度は 0.10mm/s とした。

2. 4 顕微鏡観察

マッソン・トリクローム染色を施した ACL, PCL 矢状面のプレパラートを作成し、顕微鏡観察を行なった。プレパラートは、靱帯を幅方向に3等分した各断面の大腿骨側、脛骨側の2箇所から、計6枚作成した。

3. 結 果

実験結果の一例を Fig.1～Fig.4 に示す。Fig.1 は、ACL での層別引張り試験の結果を示し、同図では5～8枚の試験片を最前方部、前方部、後方部の3グループに大別してある。Fig.2 は ACL, PCL での骨・靱帯・骨複合体とコラーゲン線維束の引張り試験結果を示す。Fig.3 は ACL でのコラーゲン線維束群の引張り試験結果であるが、比較のために骨・靱帯・骨複合体とコラーゲン線維束の引張り試験結果も示してある。Fig.4 は ACL, PCL 矢状面の顕微鏡写真を示す。

Fig.1 Stress-Strain curves of the sliced specimens

Fig.2 Stress-Strain curves of the bone-ligament-bone complex and the collagen fascicle

Fig.3 Stress-Strain curves of the bone-ACL-bone complex, a single collagen fascicle and a bunch of collagen fascicles

Fig.4 Micrographs of sagittal sectioning

4. 考 察

●部位による引張り強度の違いについて

ACL 各層の剛性は最前方部・前方部・後方部の順に高い傾向を示し、このような結果が得られた一因として、Fig.4の顕微鏡写真に示されているようなACL線維配向状態の各層ごとのバラツキの違いが考えられる。

●ACLとPCLの違いについて

骨・靱帯・骨複合体ではPCLの方がACLより剛性が高かったが、コラーゲン線維束同士の比較ではACL, PCL両者に有意差が見られないことから、両靱帯の剛性の差は線維束の配向状態の違いによるものであると推察される。事実、顕微鏡観察によれば、PCLの線維束が密に均一に配向しているのに対し、ACLでは配向状態が粗でムラがあることが確認された。

●複合体、線維束（群）の剛性の差について

骨・靱帯・骨複合体とコラーゲン線維束の実験結果を比較すると、骨・靱帯・骨複合体の方が高い剛性を示している。複合体の剛性が最も高いという性質は工業用複合材料には見られない性質であり、一般に、工業用材料において複合材料が繊維素の剛性を上回ることはない。ところが、コラーゲン線維束群になると、単一の線維束よりも、むしろ骨・靱帯・骨複合体に近い特性を示し、線維束が集合することにより剛性が高められることを示している。したがって、靱帯の力学特性には構成要素であるコラーゲン線維束と間質物質の剛性以外に、例えばコラーゲン線維束を被っている皮膜などが関与しているものと考えられる。

5. 結 言

本研究では、靱帯の階層構造に基づいて試験試料を作成し、それぞれの引張り試験を行なった。その結果、靱帯の微細組織構造と力学特性の関連について明らかにすることができた。今後は、荷重負荷時の組織観察などを行い、靱帯の微細構造を解明していく予定である。

参考文献

- 1) Lyon, R.M. et al.: A new device to measure the structural properties of the rabbit femur-anterior cruciate ligament-tibia complex, J. Biomech. Eng., Vol111: 350-354, 1989.