

学位論文題名

Biomechanical analysis of the ankle anterior drawer test for anterior talofibular ligament injuries

(前距腓靱帯損傷に対する足関節前方引き出し試験に関する生体工学的研究)

学位論文内容の要旨

足関節内反損傷はスポーツ活動において最も頻度の高い外傷の1つであり、1日あたり10,000人に1損傷の頻度で発生するとされている。足関節内反損傷において前距腓靱帯は最も損傷頻度の高い外側支持機構であり、また足関節の内反外力に対して一次支持組織であることがこれまでの生体力学的研究の結果、明らかとなっている。したがって、足関節内反損傷の治療にあたっては前距腓靱帯損傷の重症度を正確に評価することがきわめて重要と考えられる。

これまでの生体力学的研究より足関節前方引き出し荷重下において前距腓靱帯は一次支持組織であることが明らかになって以来、足関節前方引き出し試験は前距腓靱帯損傷の重症度を評価する上で、簡便かつ信頼性の高い徒手検査の1つとして普及している。しかし、本徒手検査における至適な足関節の肢位および荷重量など不明な点が山積している。本論文の目的は、前方引き出し試験における至適な足関節の肢位および荷重量を決定する上でその指針となるよう、前距腓靱帯切離前後の足関節の前後方向荷重時における足関節の力学的挙動を新鮮凍結屍体標本を用いて検討することである。

実験方法

死亡時年齢平均55.1歳(16-77歳)のヒト新鮮凍結屍体12体12肢(男性6肢、女性6肢)を使用した。これら標本をPMMA骨セメントを用いて、荷重装置に連結する銅管に固定した。その後、足関節周囲の皮膚、皮下組織を切除し、足関節内外側の靱帯組織および関節包が正常であることを肉眼的に確認した。さらに力学試験終了の後に関節包を全周にわたり切開し、足関節および距骨下関節の関節軟骨が正常であることを肉眼的に確認した。

標本を特製の前後方向荷重装置を取り付けた材料試験機に固定し、背屈 10° 、中間位、底屈 10° 、 20° の4肢位にて材料試験機を荷重制御下のもと、 $\pm 60\text{N}$ の前後荷重を標本に加えた。本荷重装置を用い前距腓靱帯切離前後の $\pm 50\text{N}$ の前後荷重時の荷重・変位曲線を求め、以下に示す2つのパラメーターに関して前距腓靱帯切離の影響を検討した。

比較項目として、第1に $\pm 2.5\text{N}$ 前後荷重の移動距離(neutral zone laxity)を求めた。本パラメーターは低荷重域での足関節の挙動を反映する。第2に 10N から 50N 間の前方引き出し力下における足関節の弛緩性を反映する以下の式から算出されるflexibility parameter Cを求めた。

$$U - U_s = C (\ln F - \ln F_s)$$

F: 前方荷重、 F_s : 30N 、U: 前方移動距離、 U_s : 30N 前方荷重時の前方移動距離

本flexibility parameter Cは荷重の対数値を独立変数、変位量を従属変数とした際の直

線の勾配であり、非線形性の荷重・変位曲線においても、荷重値に依存しない関節弛緩性を決定できる。以上の2つのパラメーターに対して2元配置分散解析にて前距腓靭帯切離と足関節屈曲角度の影響を検討した後、paired *t* 検定にて前距腓靭帯切離前後の2つのパラメーターを対して比較した。

結 果

低荷重域での足関節の挙動を反映するneutral zone laxityに関しては前距腓靭帯切離後、切離前に比し背屈10°、中間位、底屈10°、20°にてそれぞれ1.0±1.6mm（平均±標準偏差、*p*<0.05）、1.5±1.1mm、2.3±2.1mm、2.5±1.8mmと有意の増加を示した（*p*<0.005）。また、前距腓靭帯切離および足関節屈曲角度はneutral zone laxityに有意の影響を与えていた（前距腓靭帯切離：*p*<0.005、足関節屈曲角度：*p*<0.005）。

Flexibility parameter Cの荷重非依存性を調べるため、独立変数である荷重の対数値と従属変数である変位量の相関係数を求めた。その結果、すべての試験において危険率0.5%以下の有意の相関を認めた。相関係数は前距腓靭帯切離前では背屈10°、中間位、底屈10°、20°にてそれぞれ0.990±0.004、0.991±0.004、0.990±0.003、0.990±0.003、前距腓靭帯切離後ではそれぞれ0.991±0.006、0.996±0.004、0.989±0.007、0.991±0.003と良好な線形性を呈しており、本パラメーターの荷重非依存性を示していた。また、前距腓靭帯切離および足関節屈曲角度はflexibility parameter Cに有意の影響を与えていた（前距腓靭帯切離：*p*<0.05、足関節屈曲角度：*p*<0.05）。しかし、前距腓靭帯切離前に比し、切離後にflexibility parameter Cが有意の増加を認めたのは背屈10°の肢位のみであった（*p*<0.05）。

考 察

本研究において10Nから50N間の前方引き出し力下の弛緩性を反映するflexibility parameter Cでは足関節背屈10°の肢位以外では有意の前距腓靭帯切離の影響が証明できなかったのに対し、±2.5Nの前後荷重時の挙動を反映するneutral zone laxityでは全ての肢位で前距腓靭帯切離により有意の増加が認められた。このことは前距腓靭帯損傷の評価する上での前方引き出し試験は低荷重の前方引き出し力で十分であることを示唆している。さらに前距腓靭帯切離によるneutral zone laxityの増加量は足関節肢位に著しく影響を受けることが本研究にて示された。つまり、前距腓靭帯切離によるneutral zone laxityの増加は底屈10°および20°位にて顕著であることが明らかとなった。したがって、前距腓靭帯損傷の重症度を評価する上では、前方引き出し試験は軽度底屈位で行うことが望ましいと考えられた。

本研究はヒト新鮮凍結屍体を用いた研究のため、足関節周囲の筋収縮、皮膚および皮下組織の影響などは考慮されていない。したがって、臨床での前方引き出し試験では本研究で示した±2.5Nの荷重量より高い前方荷重量が必要となることが予想される。しかし、過大な前方荷重は足関節内反損傷、ことに急性期では疼痛を誘発し足関節周囲の筋収縮を増大させるため、前方引き出し試験の偽陰性率を増加させる可能性がある。臨床での前方引き出し試験の至適荷重値量を決定するためには、in vivoにおける前距腓靭帯損傷症例に対してその足関節の力学的挙動を検討する必要がある。本研究で使用したneutral zone laxityとflexibility parameter Cは非線形性の荷重・変位曲線においても、荷重値に依存しない定量化が可能であり、またin vivo計測においても応用可能である。よって、in vivoにおける前距腓靭帯損傷症例に対して、本研究で用いた2つのパラメーターを応用することにより、臨床での前方引き出し試験の至適荷重値量を解明することができると期待される。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 田 清 志

副 査 教 授 加 藤 紘 之

副 査 教 授 本 間 研 一

学 位 論 文 題 名

Biomechanical analysis of the ankle anterior drawer test for anterior talofibular ligament injuries

(前距腓靱帯損傷に対する足関節前方引き出し試験に関する生体工学的研究)

足関節内反損傷において前距腓靱帯は最も損傷頻度の高い外側支持機構であり、また足関節の内反外力に対して一次支持組織であることがこれまでの生体力学的研究の結果、明らかとなっている。したがって、足関節内反損傷の治療にあたっては前距腓靱帯損傷の重症度を正確に評価することがきわめて重要と考えられる。足関節前方引き出し試験は前距腓靱帯損傷の重症度を評価する上で、簡便かつ信頼性の高い徒手検査の1つとして普及している。しかし、本徒手検査における至適な足関節の肢位および荷重量など不明な点が山積している。本論文は、前方引き出し試験における至適な足関節の肢位および荷重量を決定する上でその指針となるよう、前距腓靱帯切離前後の足関節の前後方向荷重時における足関節の力学的挙動を新鮮凍結屍体標本を用いて検討したものである。実験方法としてヒト新鮮凍結屍体12肢を使用し、これら標本を前後方向荷重装置に固定し、背屈10°、中間位、底屈10°、20°の4肢位にて材料試験機を荷重制御下のもと、±60Nの前後荷重を標本に加えた。本荷重装置を用い前距腓靱帯切離前後の±50Nの前後荷重時の荷重・変位曲線を求め、以下に示す2つのパラメーターに関して前距腓靱帯切離の影響を検討した。第1に±2.5N前後荷重の移動距離 (neutral zone laxity) を求めた。本パラメーターは低荷重域での足関節の挙動を反映する。第2に10Nから50N間の前方引き出し力下における足関節の弛緩性を反映する $U - U_s = C (\ln F - \ln F_s)$ から算出される flexibility parameter C を求めた (F: 前方荷重、 F_s : 30N、U: 前方移動距離、 U_s : 30N前方荷重時の前方移動距離)。その結果、低荷重域での足関節の挙動を反映する neutral zone laxity に関しては前距腓靱帯切離後、切離前に比し背屈10°、中間位、底屈10°、20°にてそれぞれ $1.0 \pm 1.6\text{mm}$ (平均 ± 標準偏差、 $p < 0.05$)、 $1.5 \pm 1.1\text{mm}$ 、 $2.3 \pm 2.1\text{mm}$ 、 $2.5 \pm 1.8\text{mm}$ と有意の増加を示した。Flexibility parameter C の荷重非依存性を調べるため、独立変数である荷重の対数値と従属変数である変位量の相関係数を求めた。相関係数は前距腓靱帯切離前では背屈10°、中間位、底屈10°、20°にてそれぞれ 0.990 ± 0.004 、 0.991 ± 0.004 、 0.990 ± 0.003 、 0.990 ± 0.003 、前距腓靱帯切離後ではそれぞれ 0.991 ± 0.006 、 0.996 ± 0.004 、 0.989 ± 0.007 、 0.991 ± 0.003 と良好な線形性を呈しており、本パラメーターの荷重非依存性を示していた。また、前距腓靱帯切離前に比し、切離後に flexibility parameter C が有意の増加を認めたのは背屈10°の肢位のみであった。本研究の結果は前距腓靱帯損傷の評価する上での前方引き出し試験は低荷重の前方引き出し力で十分であることを示唆している。さらに前距腓靱帯切離

によるneutral zone laxityの増加は底屈10° および20° 位にて顕著であることが明らかとなった。したがって、前距腓靭帯損傷の重症度を評価する上では、前方引き出し試験は底屈位で行うことが望ましいと考察された。加藤教授から、靭帯部分断裂症例に対する応用、生体反応の影響、標本の年齢の影響、標本入手方法についての質問があった。次いで本間教授からflexibility parameterの増加が前方移動量増加に及ぼす程度、前距腓靭帯の機能、標本の性差の影響について、金田教授から実際の前距腓靭帯損傷症例における筋収縮の影響および関節包損傷の合併の影響について、宮城助手より臨床上での前方荷重量について、鈴木助手より関節可動域と前方移動量との相関についての質問があった。いずれの質問に対しても、申請者は過去の生体工学的研究および前距腓靭帯損傷に関する臨床的研究を引用し、申請者の臨床経験、豊富な知識に基づいて明解に回答した。

さらに本研究で用いた2つのパラメーターをin vivoにおける前距腓靭帯損傷症例に対して応用することにより、臨床での前方引き出し試験の至適荷重値量を解明することができると期待される。

審査員一同は、これらの臨床への応用が可能な前距腓靭帯損傷に対する足関節前方引き出し試験に関する生体工学的研究の成果を高く評価し、申請者が博士（医学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。