指関節の衝撃応力に及ぼす軟骨厚さの影響*

皿 井 孝 明^{*1}, 橋 詰 博 行^{*2}Influence of Cartilage Thickness on Impulsive Stress
in Interphalangeal JointsTakaaki SARAI^{*3} and Hiroyuki HASHIZUME^{*3} The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushimanaka, Okayama-shi, Okayama, 700-8530 Japan

Fracture-dislocation of proximal interphalangeal (PIP) joints caused by impact loadings is one of the common injuries in finger joints. The influence of thickness of articular cartilage on the impulsive stress in PIP joints is studied using the dynamic finite element method in the present paper. As the thickness of cartilage decreases, the concentration of equivalent stress is observed in the cartilage. The maximum principal stress is tension in the subchondral bone of the middle phalanx and does not change much with the thickness of cartilage. The thin cartilage layer causes the decrease of the minimum principal stress in the subchondral bone and consequently leads to the concentration of equivalent stress. The influence becomes remarkable when the thickness is reduced to a quarter of normal thickness, indicating that the risk of failure is higher when the cartilage has worn out.

Key Words: Biomechanics, Impulsive Stress, Cartilage Thickness, Interphalangeal Joint, Finite Element Method

1. 緒 言

人の手指の関節は突き指などにより脱臼や骨折を生じることがあり, これらの損傷は衝撃負荷に起因することが多い. 骨・軟骨モデルや海綿骨(多孔質体)における動的応力は考察されているが^{(1)~(4)}, 指のような小さな関節に対する衝撃解析はほとんど行われていない. 前報⁽⁵⁾では圧縮衝撃負荷を受ける指関節の応力解析を有限要素法により行い, 軟骨と軟骨下骨における相当応力や主応力の時間変化を中心に考察した. 一般に関節では軟骨の摩耗が起り, 変形性関節症を発症した場合, 軟骨がほとんど消失することもある. 衝撃応力は軟骨を通過することにより緩和されるが, 軟骨が薄くなると応力波の伝播に影響を及ぼすと考えられる.

そこで, 本研究では関節軟骨の厚さに着目し, 衝撃応力にどのように厚さが関係するかを二次元有限要素モデルにより検討する. なお, 解析は弾性変形に対する有限変形問題とし, 関節面における接触を考慮して動的応力を求めた.

2. 有限要素法による動的応力解析

解析の対象としたのは人の示指の基節骨と中節骨の間にある近位指節間関節(PIP関節)であり, 切断した指から薄片を矢状面中央で切り出し二次元形状を抽出した⁽⁶⁾. 掌を下にして指を真直ぐ伸ばした関節角度が0°の状態の有限要素モデルを図1に示す. 要素分割には4節点アイソパラメトリック要素を用い, 軟骨のあるモデルは厚さに関係なく要素数575, 節点数628, 軟骨のないモデルは513, 566である. 図の左側が掌の中手骨に連結する基節骨(Proximal phalanx), 右側が指先に近いほうの中節骨(Middle phalanx)であり, それぞれ皮質骨(Cortical bone), 海綿骨(Cancellous bone), 関節軟骨(Articular cartilage), 軟骨下骨(Subchondral bone)の各要素から構成される. 要素の詳細図において, 左側が前報⁽⁵⁾で使用した軟骨の厚さが通常モデル, 中央は厚さが1/2, 右側は軟骨なしのモデルである. ここで, 通常軟骨の厚さ a_0 は基節骨側, 中節骨側のいずれも0.5mmであり, 両方の指骨で厚さ a が等しい $a/a_0 = 1.0, 0.75, 0.5, 0.25, 0$ のモデルを用意し, 構造解析汎用プログラムMARC(K6.1)により平面ひずみの条件の下で計算を行った. 解析は軟骨の変形が大きいため有限変形とし, 関節面は両指骨の間に摩擦力の働かない接触状態を仮定した. 境界条件は中節骨の右端(指先側)に設けた剛

* 原稿受付 2002年11月5日.

^{*1} 正員, 岡山大学大学院自然科学研究科(☎700-8530 岡山市津島中3-1-1).^{*2} 正員, 岡山大学大学院医歯学総合研究科(☎700-8558 岡山市鹿田町2-5-1).

E-mail: sarai@mech.okayama-u.ac.jp

Fig.1 Model of proximal interphalangeal joint and finite element mesh

Table 1 Material properties of tissues

Tissue	Young's modulus MPa	Poisson's ratio	Density kg/m ³
Cortical bone	15000	0.3	1700
Cancellous bone	1000	0.2	1100
Articular cartilage	5	0.49	1200
Subchondral bone	5000	0.25	1400

体壁に骨軸方向の速度 $v = 1 \text{ m/s}$ を与えるもので、衝撃後の応力波の伝ばを動的陽解法により追跡した。なお、モデルの各組織の材料定数は前報⁽⁵⁾とすべて同じであり、文献⁽⁷⁾⁽⁸⁾を参考に表1のような値とした。

3. 衝撃応力に及ぼす軟骨厚さの影響

3.1 相当応力 軟骨の厚さが $a/a_0 = 1.0, 0.5, 0.25$

のときのMisesの相当応力の伝ばを図2に示す。解析は衝撃後に応力波が基節骨の左端に到達する $20 \mu\text{s}$ まで行い、 $t = 8 \sim 20 \mu\text{s}$ の結果を表した。応力波は中節骨側から伝ばし、皮質骨の応力が $t = 12, 16 \mu\text{s}$ と減少した後、再び増加する。 $a/a_0 = 0.25$ は時間が経過すると中節骨側の軟骨下骨に応力集中が発生し、基節骨へ伝ばする応力が大きくなる。関節面近傍に着目した応力波の伝ばを $t = 14 \mu\text{s}$ から $2 \mu\text{s}$ の間隔で図3に示す。なお、ここでは $a/a_0 = 0$ の軟骨なしの結果も追加した。 $a/a_0 = 1.0$ の通常の厚さは $t = 16, 18 \mu\text{s}$ において中節骨側の軟骨下骨に応力が集中する。 $a/a_0 = 0.5$ は基節骨側も軟骨下骨の応力が大きく、 $a/a_0 = 0.25$ は応力集中が著しくなる。軟骨なしのモデルは関節面の接触部における応力が非常に大きく、時間の経過とともに単調に増加する。

Fig.2 Propagation of equivalent stress wave

図4のような関節面に沿う節点における軟骨と軟骨下骨の相当応力の分布を図5に示す。ここでは、要素のガウス点の応力を節点に外挿した値を用い、図の横軸は節点間の距離を経路に沿って加算し、関節面中央からの距離をモデルの上方(背側)を正として表した。これらは $t = 16 \mu s$ におけるもので、軟骨、軟骨下骨について基

節骨側を○印、中節骨側を●印でそれぞれ表し、軟骨の厚さよる比較を行った。軟骨は $a/a_0 = 0.25$ になると基節骨側、中節骨側ともに関節面の中央付近で応力が大きくなる。軟骨下骨は $a/a_0 = 1.0$ のとき中節骨側の応力集積が大きく、軟骨が薄くなると基節骨側も中央で応力が増加する。

次に、関節面の中央近傍の節点について相当応力が時間とともにどのように変化するかを調べた。図6が着目した節点とその変化であり、軟骨と軟骨下骨について図

Fig.3 Propagation of equivalent stress wave near joint

Fig.4 Nodes used for stress distributions in articular cartilage and subchondral bone

(a) Articular cartilage

(b) Subchondral bone

Fig.5 Distribution of equivalent stress

5と同様に基節骨側, 中節骨側を○, ●印で区別した. 軟骨の応力は時間とともに緩やかに変化し, 軟骨が薄くなると応力が全体に増加する. 特に, 中節骨側は軟骨の厚さの影響が著しく, $a/a_0=1.0$ は基節骨側の応力が中節骨側より大きい, $a/a_0=0.25$ は反対に中節骨側が大きくなる. 軟骨下骨の場合, $a/a_0=1.0, 0.5, 0.25$ は中節骨側で応力の増加と減少を繰返し, 基節骨側は軟骨が薄くなると応力が変動する. $a/a_0=0.25$ になると基節骨側, 中節骨側のいずれも時間とともに応力が大き

Fig.6 Time history of equivalent stress

く増加するなど軟骨が薄いための影響が認められる.

図6の $t=0\sim 20\ \mu s$ における相当応力の最大値と軟骨の厚さ a/a_0 の関係を図7に示す. なお, 図には $a/a_0=0.75$ の値も示した. 軟骨は基節骨側の応力が厚さの減少とともに少し増加し, 中節骨側は $a/a_0=0.25$ になると急に大きくなる. 一方, 軟骨下骨は $a/a_0=1.0, 0.75$

Fig.7 Relation between maximum value of equivalent stress in Fig.6 and cartilage thickness

Fig.8 Propagation of principal stress wave near joint

Fig.8 Propagation of principal stress wave near joint

Fig.9 Distribution of principal stress in articular cartilage

のとき基節骨側の応力が中節骨側より小さく応力が緩和されるが、軟骨が薄くなると両者の値が接近し急激に増加する。

3.2 主応力 関節面近傍の最大主応力と最小主応力の伝ばを $a/a_0 = 1.0, 0.25$ について図8に示す。最大主

Fig.10 Distribution of principal stress in subchondral bone

応力は正負の値が混在するため両者を別にし、最小主応力は大半で圧縮となるため同じ図に表した。圧縮衝撃負荷を受けるときにも最大主応力はかなりの部位で引張りとなり、軟骨が薄いほうが引張りの領域が広がる。一方、最小主応力は $a/a_0 = 0.25$ のとき関節面中央において圧縮の応力集中をもたらし、時間とともに集中が大きくなる。

相当応力と同様に図4の節点における最大および最小主応力の分布を軟骨と軟骨下骨にわけて図9、図10に

Fig.11 Time history of principal stress

示す。これらは $t = 16 \mu s$ の結果であり、軟骨の最大と最小の主応力は厚さが減少すると少し差を生じ、関節面中央で圧縮応力として集中する。軟骨下骨の最大主応力は中節骨側で引張りを示し、軟骨が薄くなると基節骨側、中節骨側ともに最大主応力はあまり変化せず、最小主応力が中央で小さくなる。

図6と同じ関節面中央の節点について主応力の時間に伴う変化を図11に示す。軟骨は最大と最小の主応力が圧縮となり、厚さが減少すると絶対値が増加する。軟骨下骨は中節骨側の両主応力が対応するように増減し、この部位の最大主応力はほぼ引張り側で変化する。この場合、軟骨が薄くなると基節骨側、中節骨側のいずれも最小主応力が減少し、それに伴って図6(b)のように相当応力が大きくなる。

相当応力や主応力の変化は $a/a_0 = 0.25$ と 0.5 で大きく異なり、軟骨がこの程度に薄くなると影響が現れる。中節骨側の軟骨下骨は最大主応力が引張りとなり相当応力も大きいのでこの部位が損傷を受けやすく、特に軟骨の厚さが通常の $1/4$ になると相当応力が全体に大きくなることから、同じ衝撃負荷に対しても骨折などの危険度が増すと考えられる。実際、臨床的にみられる骨折は中節骨の関節面の中央付近からが多く、本解析結果との対応が確認される。なお、衝撃速度の影響については前報⁽⁵⁾に示しており、弾性変形を対象とするため衝撃応力は速度にほぼ比例するが、時間の経過が長くなると比例関係が失われる。

4. 結 言

指関節(PIP関節)の衝撃応力を指関節モデルと動的陽解法による有限要素法を用いて解析し、応力波の伝ばや応力集中に及ぼす関節軟骨の厚さの影響を調べた結果、以下のことが明らかになった。

(1) 軟骨は薄くなると関節面の中央付近に相当応力が集中し、軟骨下骨も軟骨の厚さが減少すると関節面中央で応力集中が大きくなる。

(2) 軟骨の相当応力は時間とともに緩やかに変化し、軟骨が薄くなると中節骨側の応力が基節骨側より大きくなる。軟骨下骨の相当応力は中節骨側で時間とともに増減を繰り返す、基節骨側は軟骨が薄くなると応力が変動する。

(3) 軟骨の最大と最小の主応力は軟骨が薄くなると少し差を生じ、関節面中央で圧縮応力として集中する。軟骨下骨は中節骨側の最大主応力が引張りとなり、軟骨の厚さが減少すると基節骨側、中節骨側ともに最小主応力が関節面中央で小さくなる。

(4) このような軟骨の厚さの影響は厚さが通常の $1/4$

になると顕著になり、骨折など損傷の危険性が高くなる。

文 献

- (1) Ducheyne, P., Heymans, L., Martens, M., Aernoudt, E., De Meester, P. and Mulier, J. C., *J. Biomech.*, 10 (1977), 747-762.
- (2) 尾田十八・坂本二郎・富田勝郎・末吉泰信・木田外明, 機論, 58-551, A (1992), 1048-1054.
- (3) 尾田十八・坂本二郎・木田外明・柿島浩之, 機論, 58-551, A (1992), 1055-1059.
- (4) 小林公一・田辺祐治・原 利昭, 機論, 63-616, A (1997), 2624-2630.
- (5) 皿井孝明・永山則之・橋詰博行, 機論, 67-662, A (2001), 1696-1701.
- (6) Akagi, T., Hashizume, H., Inoue, H., Ogura, T. and Nagayama, N., *ACTA MED OKAYAMA*, 48-5 (1994), 263-270.
- (7) 林 晃・田中清介, 堤 定美, 日整会誌, 65-7 (1991), S 1178.
- (8) 村瀬晃平・池内 健, 堤 定美, 上坂裕之, 岡 正典, 日本機械学会第74期全国大会講演論文集 (I), No. 96-15 (1996), 165-166.