303　海綿骨の力学的特性に及ぼす骨髄の影響

Effect of bone marrow on mechanical properties of trabecular bone

○学　杉浦　享（新潟大）　　学　長浜　博喜（新潟大院）
正　小林　公一（新潟大院）　　正　原　利昭（新潟大）

Tohru Sugiura,Faculty of Engineering,Niigata University,Igarasi 2-8050,Niigata
Hiroki Nagahama,Graduate School of Engineering,Niigata University
Koichi Kobayashi,Graduate School of Science and Technology,Niigata University
Toshiaki Hara,Faculty of Engineering,Niigata University

Key Words:Biomechanics,Trabecular bone,Bone marrow,Mechanical property,Compression test

1　緒言

骨の力学的特性を実験的に評価する場合，より生体内に近い環境を考慮する必要がある．しかしながら，骨を対象にした実験は通常，室温大気中で行われるため，生体内の環境とかなり異なっているものと思われる．海綿骨の場合，考慮すべき生体内環境として静水圧が挙げられる．即ち，海綿骨の骨梁の間には骨髄が存在し，臨床的な経験から骨髄の静水圧は大気圧より高いと言われ，Bryant[1]およびKumaret[2]らはこれを実験的に確かめている．それゆえ，より正確な海綿骨の力学的特性を得るため，試験時に静水圧を考慮することは極めて重要と考えられる．そこで本研究では，静水圧力下および大気圧力下でウシ海綿骨に対し準静的圧縮試験を行い，圧縮荷重時における試験片界面での骨髄拘束力の違いが海綿骨試験片の力学的特性に如何なる影響を及ぼすかについて調査検討した．

2　試料および実験方法

2．1　試験片

試料として新鮮ウシ大腿骨遠位部の海綿骨を用い，機械加工によりϕ８×８㎜の円柱状試験片を切り出した．試験片の長手方向は骨軸と平行とした．試験片加工中は湿潤状態を保ち，採取後は生理食塩水中で冷凍保存した．また，試験片は，室温で約２時間解凍した後に試験を行った．

試験片の見かけの密度は，試験片の重さを測定し，その重さを試験片寸法を基に算出した体積で割ることにより算出した．重さの測定方法は，試験後圧縮エアー，超音波洗浄器を用いて骨髄を取り除き，三日間乾燥させた後に電子天秤を用いて測定した．

2．2　準静的圧縮試験装置

本研究では，インストロン型万能試験機（島津製作所：AUTO-GRAPH　AG-25TD）を用い，準静的圧縮試験を行った．その際の治具の相対変位および荷重をそれぞれ伸び計，ロードセルを用いて測定し，荷重－変位曲線を得た．その荷重－変位曲線をもとに，パーソナルコンピューターを用いて応力－ひずみ線図を算出した．また，試験片に対する静水圧は，密閉容器の中に試験片を入れ，容器内の空気をコンプレッサーにより圧縮して与えた．これらの概略を図１に示す．

2．3　試験条件

試験は室温（２０℃）中で行い，ひずみ速度を0.1 s^{-1}および0.0001 s^{-1}とした．また圧力状態はBryant[1], Kumaret[2]らの研究を参考にし大気圧および大気圧＋0.5atmとした．試験条件は表１に示すとおりであり，これら４つの条件それぞれに３０個の試験片を使用し，計120個の試験片の試験結果を得た．

Table.1 Test Condition

	Strain rate	Pressure	Number of specimen
A	0.0001 s^{-1}	1.5atm	30
B	0.1 s^{-1}	1.5atm	30
C	0.0001 s^{-1}	1.0atm	30
D	0.1 s^{-1}	1.0atm	30

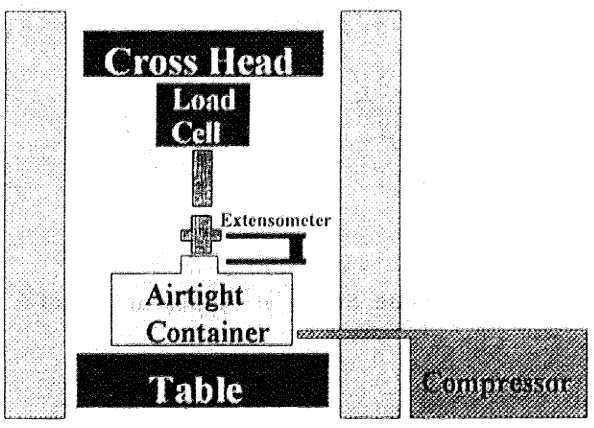

Fig.1 Experimental Set Up

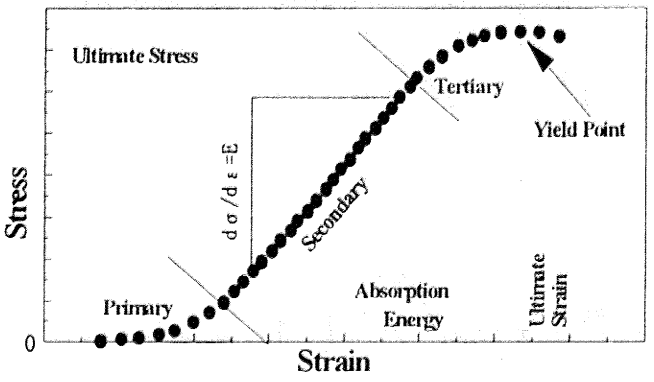

Fig.2 Stress-Strain Curve

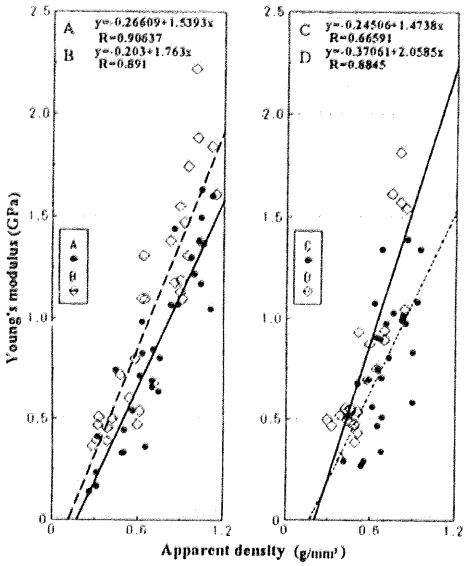

Fig.3 Young's Modulus vs Apprarent Density

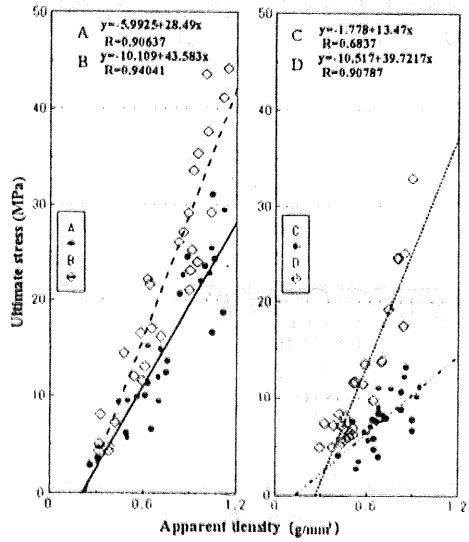

Fig.4 Ultimate Stress vs Apparent Density

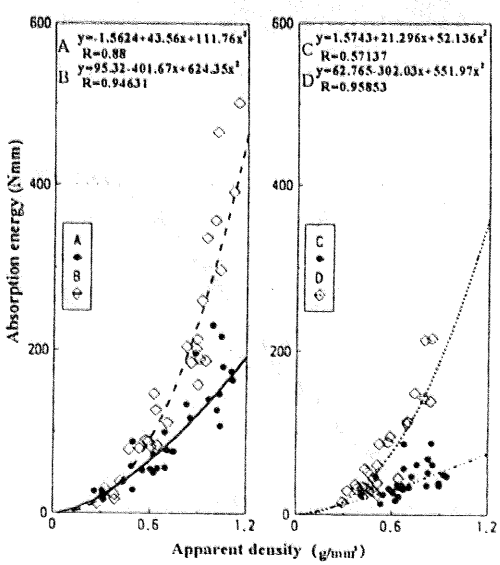

Fig.5 Absorption Energy vs Apparent Density

3　結果および考察

図２に応力－ひずみ線図の一例を示す．応力－ひずみ線図は初期の立ち上がり部，線形部および降伏点付近の曲線部に分けることができる（以後，初期の立ち上がり部を第一部分，線形部を第二部，降伏点付近の曲線部を第三部とする）．第一部のような領域は鉄，アルミニウムなどの一般工業材料では現れない．海綿骨の圧縮試験においてこのような現象が現れる要因として，海綿骨の構造様式が考えられる．海綿骨は格子構造を有しており，試験片端面では骨梁が拘束されておらず，座屈等の影響のため第一部のような非線形部が生じると考えられる．図３から５に見かけの密度とヤング率，最大応力および吸収エネルギーとの関係をそれぞれ示した（ヤング率は，最小二乗法を用い応力－ひずみ曲線の第二部より算出した）．図中には各力学パラメーターと見かけの密度との関係を最小二乗法による近似式で示すと共に，相関係数も同様に示した．図３において，見かけの密度が小さな範囲では各試験群によるヤング率の違いは認められないが，見かけの密度が増加するに従い，ひずみ速度0.1s^{-1}のＢ，Ｄ群がひずみ速度 0.0001s^{-1}のＡ，Ｃ群よりも大きくなる傾向が認められた．またＢ群とＤ群およびＡ群とＣ群に差が認められないことから，骨髄の拘束力変化に伴うヤング率の変化はないと推察される．図４から，ひずみ速度が大きくなると，最大応力が増加する傾向が認められた．また，Ａ群とＣ群の直線の間にも差が認められた．Ａ群とＣ群のヤング率の違いが認められなかったことから，静水圧が低くなるに伴い，海綿骨試験片は応力－ひずみ線図の第三部に到達から降伏までの応力上昇が小さくなることを示している．しかし，Ｂ群とＤ群を比較した場合ではこのような傾向は認められないことから，ひずみ速度の低い領域にのみ静水圧による変化が現れると推察される．また，図５において吸収エネルギーの近似式が見かけの密度の二次式に良く一致することから，最大ひずみも見かけの密度と正比例の関係があると推察される．さらに，ひずみ速度0.1s^{-1}であるＢ，Ｄ群の曲線は，ひずみ速度0.0001s^{-1}のＡ，Ｃ群の曲線よりも見かけの密度の増加に伴い，急激な上昇傾向を示し相関係数も増加している．このことからひずみ速度の増加に従い，見かけの密度と最大ひずみの関係はより正比例の関係に近づくと考えられる．また，Ａ群とＣ群では差が認められ，応力－ひずみ線図の第三部が静水圧の違いによる影響を受けていると推察される．しかし，Ｂ群とＤ群では差が認められないことからも，静水圧による影響は，低いひずみ速度の領域でのみ有効であると考えられる．

4　結言

以上の結果をまとめると次のようになる．
ひずみ速度の小さな領域において静水圧は最大応力および吸収エネルギーに影響を及ぼすが，ひずみ速度の大きな領域で静水圧は，海綿骨試験片のヤング率，最大応力および吸収エネルギーに影響を与えない．

参考文献

(1)Bryant, J. D., The effect of impact on the marrow pressure of long bone in vitro, J. Biomech., 16 (1983), 659-665
(2)Kumar, S. et al., Bone-marrow pressure and bone strength. Acta orthop. scand. (1979) 507-512