

## Evaluation of Impact Tensile Property of Compact Bone

Hirohito KAWASAKI, Hiroyuki FUJIKI, Masashi DAIMARUYA and Takahiro NISHINO

## 1 緒言

近年、高齢化の進行によって日本国民の約5分の1が65歳以上となっている。高齢者は身体機能の衰えなどによって骨折しやすい状況にあり、高齢者の骨折は寝たきりの原因となる。よって、社会的負担の増大を抑えるためにも骨折予防について考える必要がある。

骨折の主な原因は外部からの衝撃なので、衝撃荷重下における骨の変形挙動を解明することは骨折予防を検討するうえで重要である。しかし、緻密骨の圧縮特性については多方面で研究されているのに対し、引張特性については試験の技術的な難しさから、明確な研究がされていないというのが現状である。そこで、本研究では割裂試験という間接引張試験法による試験を行った。

試験片には人間の骨と機械的性質が比較的近い牛大腿(たい)骨の緻密骨を用いた<sup>1)</sup>。試験条件としては静的および衝撃荷重下の両者について行い、比較のために圧縮試験も実施した。

## 2 試験片

**2.1 応力方向の定義** 緻密骨の異方性について考察するため、骨軸方向と骨軸に対して垂直な方向に引張および圧縮応力を作用させた。本研究では骨軸方向を $\theta=0^\circ$ 方向、骨軸と垂直な方向を $\theta=90^\circ$ 方向と定義した。

**2.2 試験片形状** 牛大腿骨の緻密骨を円柱形に加工し試験片として用いた。Fig.1(a)のように試験片の軸方向が骨軸方向と垂直なものとFig.1(b)のように試験片の軸方向と骨軸方向が一致したものを作製した。Fig.1(b)は $\theta=0^\circ$ 方向の圧縮試験に用い、他の条件においてはFig.1(a)の試験片を用いた。寸法は衝撃圧縮試験時のみ直径および長さを5mmとし、他の試験においては6mmとした。

## 3 割裂試験

**3.1 試験概要** 割裂試験とはコンクリート材などの脆(ぜい)性材料の引張強度を求める際に用いられる間接引張試験法である。Fig.2(a)のように円柱形試験片を横にして加圧板で挟み、圧縮荷重を作用させる。この圧縮荷重によりFig.2(b)に示すように荷重方向に対して垂直な方向に一樣引張応力 $\sigma_{ts}$ が生じ、試験片が割裂を起こす<sup>2)</sup>。本研究では骨が脆性的な材料であるために直接の引張試験が困難であったので、割裂試験を適用した。

作製できる試験片はひずみゲージを貼(は)り付けるには小さく、ひずみゲージによるひずみ測定が不可能であった。そこで割裂試験においては目安のために荷重方向変位を試験片直径で除した値をひずみと定義した。

**3.2 静的割裂試験** 試験装置は万能材料試験装置 INSTRON5566 を使用した。試験条件は $\theta=0^\circ$ および $\theta=90^\circ$ 方向ともにクロスヘッド速度0.2mm/minとした。Fig.3に割裂試験より得られた応力-ひずみ線図を示す(紙面制限のため本図には後述する衝撃割裂試験結果を含む)。図に示すように静的荷重下における $\theta=0^\circ$ 方向の引張強度は $\theta=90^\circ$ 方向に比べ、約40MPa高い値であった。

**3.3 衝撃割裂試験** 試験装置はスプリット・ホプキンソン棒法の衝撃試験装置を使用した<sup>3)</sup>。Fig.4に試験装置の概要図を示す。試験条件は $\theta=0^\circ$ および $\theta=90^\circ$ 方向ともに衝突棒の衝突速度を2.9m/sとして試験を行った。Fig.5には衝撃試験より得られた応力-時間線図を示す。190 $\mu$ secから240 $\mu$ secの付近でGage2およびGage3より測定された応力の波形が重なり合っており、試験片両端における力の釣り合いが取れている。よって、衝撃試験における測定結果は良好であったといえる。

前述のようにFig.3に衝撃割裂試験結果を示すが、衝撃荷重下における $\theta=0^\circ$ 方向の引張強度は $\theta=90^\circ$ 方向に比べ、約20MPa高い値であった。

これより、静的および衝撃荷重下のどちらにおいても緻密骨の異方性が確認できた。さらにグラフの傾きから衝撃荷重下における縦弾性係数の方が高いことが予測でき、ひずみ速度依存性が確認できた。

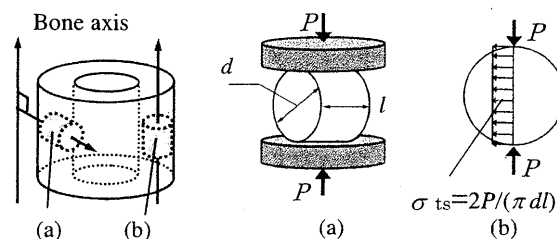


Fig.1 Type of specimens.

Fig.2 Splitting test.

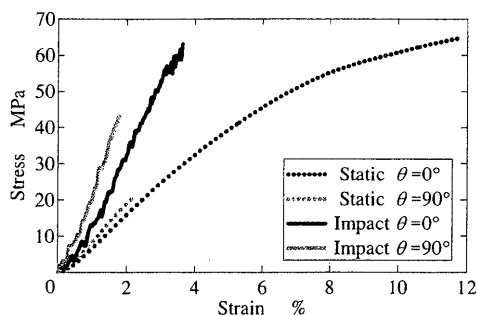


Fig.3 Stress-strain curves in splitting tests.

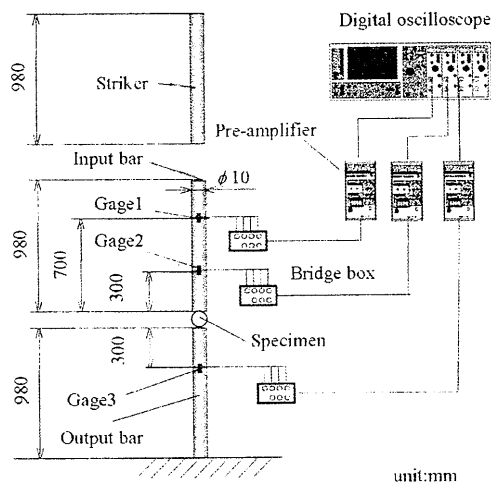


Fig.4 Experimental setup of Hopkinson bar test.

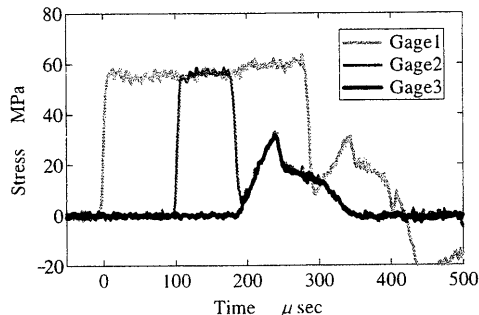


Fig.5 Stress-time curves in impact splitting test.

#### 4 圧縮試験

圧縮試験の試験装置は静的および衝撃試験ともに割裂試験と同じものを用いた。試験条件は静的試験においてはひずみ速度を  $10^{-3}/s$  とし、衝撃試験においてはひずみ速度を  $10^3/s$  とした。また、割裂試験と同様に  $\theta=0^\circ$  および  $\theta=90^\circ$  方向について試験を行った。ひずみは荷重方向変位と試験片長さより算出を行った。

Fig.6 に圧縮試験より得られた応力-ひずみ線図を示す。静的・衝撃荷重下のいずれの条件においても  $\theta=90^\circ$  方向よりも  $\theta=0^\circ$  方向の方が高い圧縮強度を示しており、異方性が確認できた。また、いずれの方向においても静的荷重下よりも衝撃荷重下の方が高い圧縮強度を示している。さらにグラフの傾きから衝撃荷重下における縦弾性係数の方が高いことがわかり、ひずみ速度依存性が確認できた。

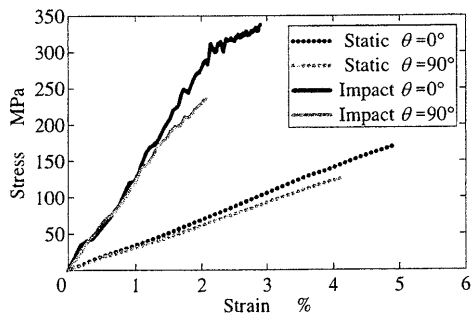


Fig.6 Stress-strain curves in compression tests

Table 1 Mechanical properties of compact bone

		Tensile strength[MPa]	Compressive strength[MPa]	Elastic module[GPa]
Static	$\theta=0^\circ$	$66.7 \pm 4.6$	$171.7 \pm 21.6$	$3.52 \pm 0.37$
	$\theta=90^\circ$	$21.0 \pm 3.1$	$126.8 \pm 19.1$	$2.94 \pm 0.26$
Impact	$\theta=0^\circ$	$64.0 \pm 5.2$	$338.1 \pm 48.0$	$13.3 \pm 2.8$
	$\theta=90^\circ$	$43.4 \pm 10.3$	$232.3 \pm 48.3$	$10.0 \pm 2.8$

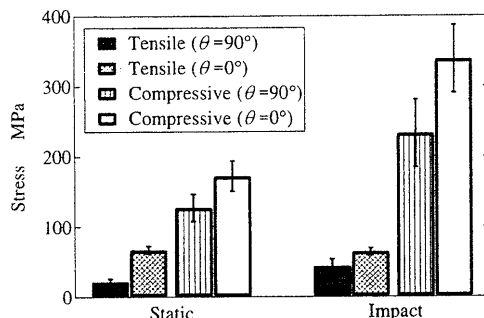


Fig.7 Comparison between tensile and compressive strength

#### 5 考察

Table 1 に各試験より得られた結果をまとめた。また、Fig.7 は静的および衝撃荷重下における引張強度と圧縮強度を比較したものである。ひずみ速度が異なるため、単純には比較できないが、緻密骨の引張強度は圧縮強度に比べて低く、特に衝撃荷重下においてその差は顕著である。これより、圧縮応力より引張応力が骨折の原因となる可能性が高いと推察できる。よって、骨折予防を検討するとき、緻密骨の引張特性の考慮が重要であると考えられる。また、静的および衝撃荷重下ともに  $\theta=90^\circ$  方向の圧縮強度と引張強度は  $\theta=0^\circ$  方向に比べて低く、緻密骨には外力に対して弱い方向が存在するといえる。そのため、緻密骨の異方性の考慮も重要であるといえる。

#### 6 結言

牛大腿骨の緻密骨に対して各条件で試験を行った結果、以下のような結論を得た。

- (1) 緻密骨の引張強度は圧縮強度に比べて低い値を示し、特に衝撃荷重下においてその差は顕著である。これより、骨折予防について検討する際は緻密骨の引張特性を考慮することが重要であるといえる。
- (2) 静的および衝撃荷重下のどちらにおいても  $\theta=90^\circ$  方向の圧縮強度と引張強度は  $\theta=0^\circ$  方向に比べて低い。よって、骨折予防の検討には緻密骨の異方性について考慮することも重要であるといえる。

#### 参考文献

- 1) 立石哲也, 白崎芳夫, 木下好司, 立石和雄, ち密骨の衝撃圧縮特性, 日本機械学会論文集(A 編), **46**, 438(1980)
- 2) 小林一輔, 森北出版, 最新コンクリート工学第5版, 73(2006)
- 3) 横山隆, ホプキンソン棒法の測定原理と種々の構造材料の衝撃変形特性評価, 非破壊検査, **48**, 1(2001)