

# 人体股骨弹性模量与骨矿含量的关系<sup>①</sup>

陈 纲 熊正中

(重庆医科大学解剖教研室, 重庆 630046)

**关键词** 人体股骨干; 弹性模量 (杨氏模量); 骨矿含量; 骨矿含量面密度

## 内 容 提 要

选取正常男性成人股骨 18 段, 制成 5—20mm 测试块 202 个, 用 II 型  $\gamma$  线骨矿分析仪测得骨矿含量面密度分别为 1.324—1.901g/cm<sup>2</sup>, 再用 WE—10(A) 型液压式万能试验机和千分表测得测试块受纵向压应力时所承受的压力及相应的高度变化并计算其弹性模量。结果显示: 骨矿含量在 1.802g/cm<sup>2</sup> 以下时, 弹性模量及力学性能与骨矿含量呈正相关关系, 但超出此范围后, 骨矿含量的增加可能会使骨的力学性能下降。

在解剖学教科书中, 人们习惯于用骨的弹性、抗压力及其所含有有机质、无机质的比例来粗略地描述骨的理化特性。为了定量地描述它们, 近年来人们分别从两个方面对人骨进行了研究: 一方面, 把物理量“弹性模量”(杨氏模量)引入对人骨力学性能的研究, 如孙家驹等 (1981)、王桂伦等 (1980)、Donald 等 (1974)、McElhaney 等 (1965) 对人体股骨中段长轴方向上的弹性模量进行了测定, 得到 300—2816kg/mm<sup>2</sup> 不等的结果; 为了减少测试条件引起的误差, Gdoatos 等 (1982)、王永豪等 (1986) 进行了测试条件对股骨中段弹性模量测试结果影响的研究。另一方面, 人们用多种方法如 X 线测量法、双光子吸收法、康普顿散射法、CT 测量法、中子活化分析法等等 (杨定焯, 1985) 测定人骨的骨矿含量 (即骨内无机质含量), 把以往对骨的无机质含量的定性描述提到定量描述的高度。目前国内较为简便易行的测量骨矿含量的仪器是华西医科大学和成都计量测试研究院共同研制的“ $\gamma$  线骨矿含量分析仪”。虽然有众多科技工作者对人骨的骨矿含量和弹性模量分别进行了研究, 但迄今尚未见有二者定量关系的研究。本文拟对此作一初步的探讨。

## 一、材 料 和 方 法

选取本室存放的 40 岁左右男性股骨标本, 从死亡原因、外观、切面上剔除骨质不正常者, 得到正常股骨中段 18 段, 制成 5—20mm 长方形测试块 202 块 (不平行度 < 0.02mm, 测定每个测试块的长度、宽度以计算受力面积 A、沿长轴方向的高度 H<sub>0</sub>; 先用 II 型  $\gamma$  线骨矿含量分析仪测得骨矿含量, 再在本室的 WE—10(A) 型液压式万能材料试验机上, 沿股骨长轴方向施加载荷, 用千分表同时测得其高度的变化 (精确到 0.01mm) 并用 X—Y 记录仪记录应力和高度变化曲线, 找出比例极限点, 摘录下此点的压力 F 和

<sup>①</sup>收稿日期: 1991—07—22

此时的测试块高度  $H_i$ ；用标本的原高度  $H_0$  减去  $H_i$ ，得到在压应力作用下测试块高度的变化值  $\Delta H$  ( $H_0 - H_i = \Delta H$ )，按弹性模量  $E$  的计算公式  $E = \frac{F/A}{\Delta H/H_0}$  (I 式) 算出每个测试块的弹性模量 (单位为  $\text{kg/mm}^2$ )；骨矿含量有两种表示法：骨矿含量线密度  $\text{g/cm}$  和骨矿含量面密度  $\text{g/cm}^2$ 。本组 202 个测试块的骨矿含量面密度在  $1.324\text{--}1.901\text{g/cm}^2$  范围内。取小数点后 1 位并以  $0.1\text{g/cm}^2$  为组距，可将 202 块测试块分为 7 组，每组测试块的平均弹性模量如表 1：

表 1 本组 202 个测试块的骨矿含量及弹性模量值

The elasticity modulus and the mineral content values of 202 samples					
骨矿含量面密度 ( $\text{g/cm}^2$ )	例数	弹性模量 ( $\text{kg/mm}^2$ )			P 值
		范围	平均值	标准差	
1.3	8	388—434	402	24.36	} > 0.01 } > 0.01 } > 0.01 } > 0.01 } > 0.01 } > 0.01 } < 0.01
1.4	8	446—508	488	26.42	
1.5	10	510—542	518	23.46	
1.6	18	565—638	583	21.86	
1.7	22	634—682	642	22.48	
1.8	26	684—732	708	20.63	
1.9	10	588—680	630	29.08	

如表 1 所示，当骨矿含量面密度在  $1.8\text{g/cm}^2$  以下时，相邻两组间的弹性模量值之间无显著差异 ( $P > 0.01$ )，而当骨矿含量面密度为  $1.8\text{g/cm}^2$  和  $1.9\text{g/cm}^2$  时，二者的弹性模量值均数间有显著性差异 ( $P < 0.01$ )，可见当股骨骨矿含量超过  $1.8\text{g/cm}^2$  时，弹性模量呈下降趋势。

## 二、讨 论

弹性模量 (杨氏模量) 是衡量固体材料弹性和力学性能的物理量，表示固体材料在受到某个方向的应力 (压应力或张应力) 时，该方向长度变化 (形变) 的大小。弹性模量越大，说明该材料的力学性能越好 (赵景员等, 1986)，本文用它来衡量各测试块骨矿含量不同时力学性能的差异。骨矿含量用 II 型  $\gamma$  线骨矿含量分析仪测得，其原理是利用骨内无机质有大量吸收射线的特性，用一束已知强度的  $\gamma$  射线束从一侧照射一段骨，在骨的另一侧用探测器接收剩余的  $\gamma$  射线，如果被测骨的骨矿含量越多，则  $\gamma$  射线被吸收得越多，接收端所感受到的  $\gamma$  射线越弱，通过换算，即可知道该段骨所含的骨矿含量多少，其值称为“骨矿含量线密度”，单位为  $\text{g/cm}$ ；但骨内骨矿含量的多少除与被测样本的种类、长度有关外，还与其横径有关。为了便于各样本之间的比较，往往将所测得的骨矿含量线密度除以该段骨的横径 (由分析仪自动测得)，称为“骨矿含量面密度”，其单位为  $\text{g/cm}^2$  (鄢中付等, 1985)。II 型  $\gamma$  线骨矿含量分析仪所用的放射源为镅<sup>241</sup> ( $\text{Am}^{241}$ )。由于同一段骨在空气中的骨矿含量测量值大于水浴中的测量值和实际值 (张纪淮等, 1985)，而本组标本又是在空气中测量的，故可能高于实际值。再者，限于目前 II 型骨矿含量分析仪尚

不能在体股骨进行测量, 因而尚无正常值以资对照。

以本组标本骨矿含量值为横坐标、弹性模量值为纵坐标作图 1 如下:

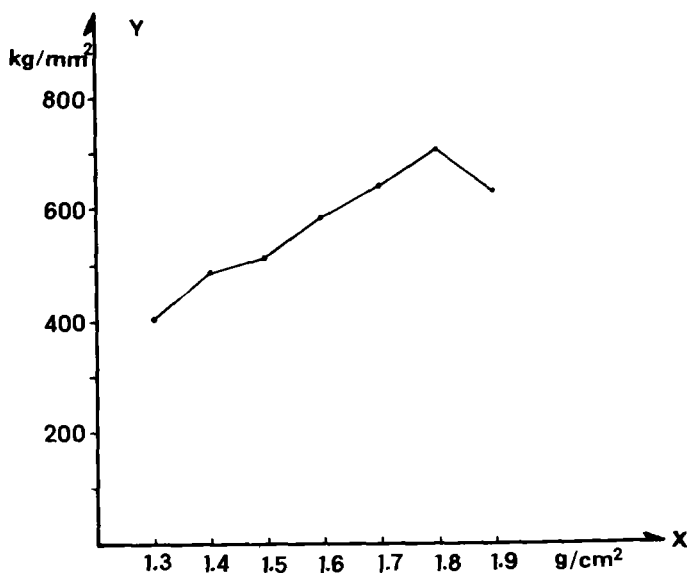


图 1 本组标本弹性模量与骨矿含量的关系  
Relationship between the elasticity modulus  
and the mineral content of human femur

由图 1 可见, 骨矿含量在  $1.8\text{g}/\text{cm}^2$  以下时, 骨矿含量越多, 弹性模量越大, 这似乎与人们的常识相悖, 因为各种有关教材都提到: 随着年龄的增长, 人骨的无机质含量 (骨矿含量) 增多, 则骨的弹性下降、脆性上升。其实, 只要深入分析一下, 即可看出二者并不矛盾: 上述教材中, 以骨内无机质 (骨矿含量) 的多少仅仅描述了骨的力学性能中的一个——弹性; 而弹性模量不仅代表了材料的弹性大小, 更重要的是还显示了材料的刚性、应变性等等综合的力学性能, 这可以从弹性模量的计算公式看出: 上述 I 式  $E$

$$= \frac{F/A}{\Delta H/H_0} \text{ 可以演变为 II 式 } E = \frac{F \cdot H_0}{A \cdot \Delta H}。 \text{ 从 II 式可以看出:}$$

对于面积  $A$ 、原高度  $H_0$  和所受应力  $F$  均相等的几种固体材料来说, 每种材料的弹性模量与形变大小成反比, 即形变越小的材料弹性模量越大, 力学性能越好。以人们熟知的钢和铅来说明这个道理就容易明白了: 众所周知, 钢的弹性、刚性、抗压抗拉性等力学性能均大大优于铅, 而钢的弹性模量为  $20 \times 10^{10}$  牛顿/米<sup>2</sup>, 铅则为  $1.5 \times 10^{10}$  牛顿/米<sup>2</sup>, 说明在比例极限内, 当二者的面积、高度、所受应力大小、方向都相同时, 钢的形变仅及铅的  $1.5/20$ , 即约十三分之一。

综上所述, 本组测试块测试的结果表明: 在骨矿含量面密度  $1.8\text{g}/\text{cm}^2$  以下时, 人股骨的弹性模量和力学性能随骨矿含量的增加而上升 (见图 1 曲线中的前段), 呈正相关关系, 相关系数达 0.75; 当骨矿含量高于  $1.8\text{g}/\text{cm}^2$  时, 弹性模量则有下降的趋势 (见图 1 曲线的末段)。经统计学处理, 二者的差异显著 ( $P < 0.01$ ), 并非测试误差所致。根据上述实验和计算得到这样的结果: 男性成人股骨力学性能和弹性模量优劣的分界点可能在骨矿含量面密度  $1.8\text{g}/\text{cm}^2$  左右。将这个结果推而广之, 可以提出这样的假设: 各类骨的骨矿含量面密度可能都有一个临界点, 在这个临界点以下时, 随着骨矿含量面密度的增多, 该骨的弹性模量和力学性能增强; 超过时则下降。由于本文对此问题仅为初次探索, 所用标本全为 40 岁左右男性股骨, 尚未涉及不同部位、不同性别和不同年龄的人骨骨矿含量与弹性模量之间的关系, 也未涉及骨矿含量与有机质比例的变化对弹性模量的影响, 无法

定出各种正常值和最佳骨力学性能的年龄段，这些问题将在今后逐步进行探讨。

### 参 考 文 献

- 王永豪、王世迪, 1986. 人体股骨中段的力学性能. 生物医学工程学杂志, 3 (1): 18—23.
- 王桂伦等, 1980. 长管状骨抗压抗弯强度测定. 中国解剖学会1980年学术年会论文汇编 (第一集), 249—250. 中国解剖学会, 成都.
- 孙家驹等, 1981. 长骨性能. 全国第一届生物力学学术会议论文汇编A卷, 1—7. 北京.
- 杨定焯, 1985. 人活体骨矿含量的测量 (综述). 《 $\gamma$ 线骨矿含量测试方法及骨矿分析仪》的科研成果鉴定资料汇编, 1—12. 华西医科大学, 成都.
- 赵景员、王淑贤, 1986. 力学. 第一版. 379—382, 高等教育出版社, 北京.
- 张纪淮等, 1985.  $\gamma$ 线吸收法骨矿分析仪测量骨矿含量精度的探讨 (一), 《 $\gamma$ 线骨矿含量测试方法及骨矿分析仪》的科研成果鉴定资料汇编, 24—28. 华西医科大学, 成都.
- 鄢中付等, 1985.  $\gamma$ 线吸收法骨矿分析仪的物理设计及性能. 《 $\gamma$ 线骨矿含量测试方法及骨矿分析仪》的科研成果鉴定资料汇编, 13—23. 华西医科大学, 成都.
- Donald, T. *et al.*, 1974. The mechanical properties of cortical bone. *Jt. Bone and Jt. Surg.*, 56A(5):1001—1010.
- Gdoatos, E. E. *et al.*, 1982. A critical review of the biomechanical stress analysis of the human femur. *Biomaterials*, 3(2—8).
- McElhaney, J. H. and E. Byars, 1965. Dynamic response of biological materials. ASME 65 WA / HUF 2—9.

## RELATIONSHIP BETWEEN THE ELASTICITY MODULUS AND THE MINERAL CONTENT OF THE SHAFT OF HUMAN DRY FEMUR

Chen Gang      Xiong Zhengzhong

(Department of Anatomy, Chongqing University of Medical Sciences, Chongqing 630046)

**Key words**      Shaft of human femur; Elasticity modulus (Youngs modulus); Mineral content of bone; Area density of mineral content of bone

### Abstract

In order to clarify the relationship between the elasticity modulus (Youngs modulus) and the mineral content of the shaft of human femur, the present authors chose 18 normal male dry femurs around 40 years of age cut into 202 slices as testing samples around 5—20 mm. The mineral content of every sample was measured by the  $\gamma$ -ray mineral content of bone analysis apparatus and the longitudinal stress by the WE-10(A) Universal Test Machine in the elasticity limitation of femur; the change of thickness of every sample was measured by the micrometer. Then the elasticity modulus of each sample was computed. The results are as follows: the area density of mineral content of femur shaft varies from 1.3g / cm<sup>2</sup> to 1.9g / cm<sup>2</sup>. The elasticity moduli vary directly with the mineral content under 1.8g / cm<sup>2</sup> while inversely with it when above 1.9g / cm<sup>2</sup>.

Finally their relationship as well as significances has been discussed.