

学术探讨

影响腰椎间盘突出内压两大因素的生物力学分析

浙江医科大学附属第二医院(310009) 周 游

腰椎间盘的退变年龄愈趋早化,椎间盘源性腰腿痛患者越来越多。陶甫^[1]曾统计仅约 10~20% 的此类患者需用手术治疗,大多数医者亦主张手术治疗须十分谨慎,将长期保守治疗无效放在手术适应症的首位。如何在发病前积极预防,在保守治疗和手术治疗有效后巩固疗效,降低复发率是当今临床易被忽视又不容忽视的重要问题。以下对腰椎间盘内压众多影响因素中肌力和胸腹腔内压这两大主要因素进行生物力学分析,为椎间盘源性腰腿痛提供有效的防治方法。

腰椎间盘平面力系建立的前提条件

人体直立正面观的正中线通过脊柱,左右同名肌对称分布且相对成组,众多肌肉聚集成互相配合的整体,形成躯干的肌性前后壁^[2],肌性前壁肌(如腹直肌等)产生合力 F_{m1} ,肌性后壁肌(如骶棘肌等)产生合力 F_{m2} ,在左右同名肌对称用力时,两种合力均落在正中矢状面上。本文以 $L_{4,5}$ 为代表的椎间盘受力中心 O 点和过 O 点的水平面以上的人体上半身重心 P 点均落于正中矢状面上。胸腹腔相对正中矢状面左右对称,胸腹腔内压的合力 P 亦落在正中矢状面上,故本文的力学分析均可在正中矢状平面中进行。文中出现的数据均根据全身 CT 和 MRI 成像^[3,4] 的比例,临床 X 线、CT、MRI 成像的测算和有关文献^[5] 的参考而设定。设以下数据相对不变:体重 70kg 则上半身重力(约总体重的 65%) $G=450N$, G 、 F_{m1} 、 F_{m2} 、 P 的力臂分别以 L_G 、 L_1 、 L_2 、 L_P 表示,其中 $L_G=0.02m$, $L_1=0.10m$, $L_2=0.05m$, $L_P=0.04m$ 。其余各值分别以下各节中,各力方向见图示。设 $L_{4,5}$ 椎间盘处于水平状态, N 代表椎间盘内压。

放松直立时腰椎间盘的力学分析

直立平衡时,重心 P 位于脊柱前方,重力线落于 L_4 椎体中心腹侧^[5]($L_G=0.02m$)。放松直立时,理论上仅需 F_{m2} 竖直向下的力矩就可维持最简单的静力平衡(见图 1),此时肌性前壁肌放松不需产生张力。根据平面力系的平衡条件建立平衡方程:

$$\sum_{i=1}^n F_i = 0 \quad (a) \quad -G \times L_G + F_{m2} \times L_2 = 0$$

$$\sum_{i=1}^n m(F_i) = 0 \quad (b) \quad N - G - F_{m2} = 0$$

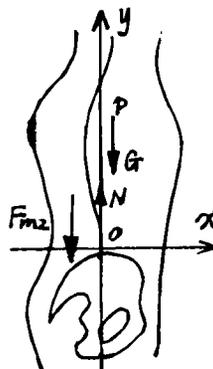


图 1. 放松直立时的平面力系(P 于 O 前方)

代入前述各值得: $F_{m2}=180(N)$, $N=630(N)$,可见当肌性后壁肌向下作等长收缩时,以 0.28G 即可维持静态平衡,而椎间盘受压为 1.4G。肌性后壁肌被动地等长收缩维持平衡,不仅没有起肌力“软支柱”的作用分担重力,反而加重脊柱的负荷(见图 2)。

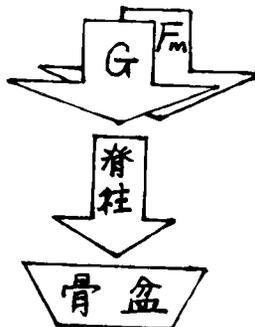


图 2. G 与 F_m 的传导

由于不良的姿势习惯,如“含胸凸肚”时,躯干略后倾,重心 P 落于 $L_{4,5}$ 椎间盘受力中心 O 的后方(设 L_G 值同前),仅需 F_{m1} 产生竖直向下的力矩就可维持最简单的静力平衡(见图 3),此时肌性后壁肌放松无张力。根据平衡方程(a)、(b)得:

$$G \times L_G - F_{m1} \times L_1 = 0$$

$$N^1 - G - F_{m1} = 0$$

代入前述各值得: $F_{m1}=90(N)$, $N^1=540(N)$,可见肌性前壁肌向下作等长收缩,以 0.2G 即可维持平衡,

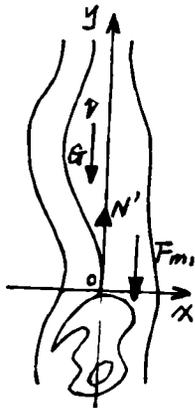


图 3. 含胸凸肚时的平面力系(P 于 O 后方)

椎间盘受压为 1.2G。肌性前壁肌被动地等长收缩维持平衡,没有起肌力“软支柱”作用,反而加重脊柱的负荷(见图 2)。

理论上当重心 P 落于 y 轴上时,没有肌性前后壁合力的作用亦可维持平衡, $G=N$, 不加大脊柱负荷和间盘内压, 实际不能实现。

上述结果显示: 放松直立时椎间盘受压都大于 G(1.4G 和 1.2G), 肌性前后壁肌在维持平衡时均增加了椎间盘内压和脊柱负荷, 未起到肌力“软支柱”的支撑即重力分载作用。对未患病者, 长期维持这两种体态会增加椎间盘的重力积累性损伤, 加速退变; 对已患病者, 加重已突出膨出椎间盘的突出程度, 对保守和手术治疗有效者而言, 病因重返, 复发难免。

肌力“软支柱”作用下腰椎间盘的力学分析

当肌性前后壁肌同时作等张(离心性)收缩时, 产生向上的合力 F_{m1} 和 F_{m2} (见图 4), 将躯干上部托起。根据文献图像^[3,4]及临床影像测定, 设 F_{m1} 与 y 轴成角 $\alpha=15^\circ$, F_{m2} 与 y 轴成角 $\beta=10^\circ$ (收腹挺胸直立时人体前倾较明显, $\alpha>\beta$)。根据平面力系的平衡条件建立平衡方程:

$$\sum_{i=1}^n F_{ix}=0 \quad \sin\alpha \cdot F_{m1} - \sin\beta \cdot F_{m2} = 0 \quad (c)$$

$$\sum_{i=1}^n F_{iy}=0 \quad N + \cos\alpha \cdot F_{m1} + \cos\beta \cdot F_{m2} - G = 0 \quad (d)$$

$$\sum_{i=1}^n m(F_i)=0 \quad -F_{m2} \cdot L_2 + F_{m1} \cdot L_1 - G \cdot L_G = 0$$

$$\text{从(c)(d)得: } F_{m1} = 185 - 0.4N \quad (e)$$

$$F_{m2} = 276 - 0.6N \quad (f)$$

代入前述各值得: $F_{m1} = 354.7(N)$, $F_{m2} = 529.4(N)$, $N = -414(N)$, 可见当肌性前壁的合力为 0.79G, 肌性后壁的合力为 1.2G 时, 可维持躯体静态平衡, 此时 $L_{4,5}$ 椎间盘的压力为负 0.9G, 说明从脊柱上传导的全部重力 G 通过肌性前后壁直接传导致骨盆上, 肌性前后壁替脊柱分载部分甚至全部的躯体重力。在肌性前后壁肌作等张收缩的基础上维持等长收缩, 可使其重力分载作用持续, 即起肌力的“软支柱”作用(见图 5)。

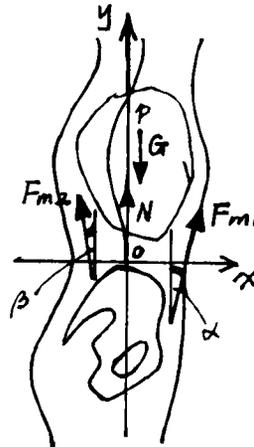


图 4. 肌性前后壁肌力作用下的平面力系

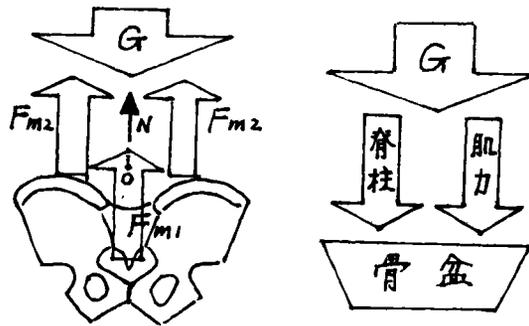


图 5. 肌力的重力分载作用与重力传导

对于病变椎间盘来说负压可使其向椎体中心收缩, 减少甚至消除突膨出引起的占位变, 同时由于椎间复合关节的相关性, 椎间孔扩张, 解除神经根通道在椎管内和椎间孔管部分的狭窄, 消除神经及其周围软组织无菌性炎症及炎症引起的占位变。对未病变的椎间盘而言, 减压和负压是预防突出的关键; 对保守治疗有效和术后患者而言, 重体力劳作和剧烈活动显然禁忌, 但降低腰椎间盘内压以防止积累性自身重力损伤易被忽视, 却是防止复发的关键。临床上骨盆牵引的一般有效力在 400~600N 之间, 当肌性前后壁的合力分别达到 0.85G 和 1.3G 时, 腰椎间盘内的压力即达 -485N, 进入有效牵引力的范围内, 理论上人体不依靠外力仅靠自身肌力的支撑作用同样能达到牵引治疗的目的, 这种牵引作用如同随身携带着一架牵引器, 随时起牵引治疗和预防的作用。

胸腹腔内压作用下腰椎间盘的力学分析

对于胸腹腔内压是否能减轻脊柱负荷和腰椎间盘内压的问题国外颇多争议。设我们支持胸腹腔内压能减轻脊柱负荷和减低腰椎间盘内压的观点: 腹横肌、腹

内外斜肌收缩产生的合力在腹腔内转变为腹内压 $P_{腹}$ ，由于骨盆腔的限制作用 $n_{盆}$ ， $P_{腹}$ 只能向横膈方向传导致胸腔(见图 6)，设当吸气时，胸腔产生负压为 $-P_{胸}$ ，呼气时产生正压为 $+P_{胸}$ ，参照文献⁽⁵⁾，方向竖直向上，可见 P 随呼吸节律变化而变化(变化复杂本文暂不考虑)，参考文献⁽⁸⁾设 $P=120(N)$ 。不考虑肌力的“软支柱”作用，从纯理论角度出发，单纯向上的胸腹腔内压

亦能使躯体维持平衡。根据平面平行力系(见图 7)的平衡条件建立平衡方程：

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n F_{iy} &= 0 & N + P - G &= 0 \\ \sum_{i=1}^n m(F_i) &= 0 & -G \cdot L_G + P \cdot L_P &= 0 \end{aligned}$$

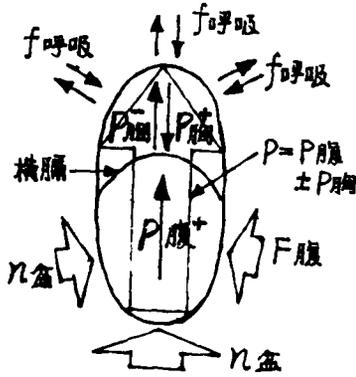
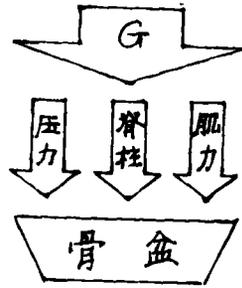


图 6. 胸腹腔(矢状面)的压力传导与重力分载

注： $f_{呼吸}$ ——呼吸肌力 $n_{盆}$ ——骨盆腔约束力 $\uparrow \downarrow$ ——胸壁运动方向 “+”“-”——正负压



7. 单纯胸腹腔内压作用下的平面力系

代入前述各值得： $N=330(N)$ ， $P=225(N)$ ，可见当胸腹腔内压产生向上的力，以 $0.5G$ 即使躯体维持平衡。此时椎间盘的内压为 $0.75G$ ，这支持 Keith⁽⁶⁾ 和 Bartelink⁽⁷⁾ 等关于胸腹腔内压对脊柱的重荷有分载作用，能减少腰椎间盘内压的观点。由于腹壁肌收缩时产生一系列拮抗协同肌的共同变化，使胸腹腔内压与肌性前后壁的合力之间产生平衡协调关系，单纯考虑胸腹腔内压的支撑分载作用失去临床意义。根据平面力系(见图 8)的平衡条件建立肌力和压力共同作用下的平衡方程：

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n F_{ix} &= 0 & \sin\alpha \cdot F_{m1} - \sin\beta \cdot F_{m2} &= 0 & (g) \\ \Rightarrow & & & & \\ \sum_{i=1}^n F_{iy} &= 0 & N + \cos\alpha \cdot F_{m1} + \cos\beta \cdot F_{m2} + P - G &= 0 & (h) \\ \sum_{i=1}^n m(F_i) &= 0 & P \cdot L_P + F_{m1} \cdot L_1 - F_{m2} \cdot L_2 - G \cdot L_G &= 0 & (i) \end{aligned}$$

代入前述各值($P=120N$)得结果(1)： $F_{m1}=165.5(N)$ ， $F_{m2}=247.1(N)$ ， $N=-73.2(N)$ ；当 $P=60(N)$ 时得结果(2)： $F_{m1}=260.1(N)$ ， $F_{m2}=388.2(N)$ ， $N=-258.3(N)$ ；从方程(g~i)得：

$$F_{m1} = 354.7 - 1.6P \quad (j)$$

$$F_{m2} = 529.4 - 2.4P \quad (k)$$

$$N = 2.9P - 414 \quad (L)$$

从结果(1)(2)和方程(J~L)得出以下结论：(1)由

(j)(k)可见胸腹腔内压 P 越高，肌性前后壁合力 $F_{m1,2}$

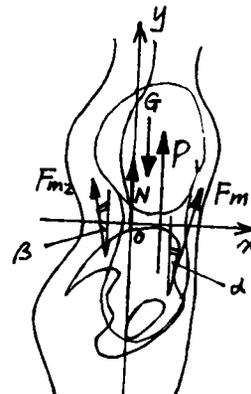


图 8. 肌力、胸腹腔内压作用下的平面力系

的值越小，这与 Keith⁽⁶⁾ 在本世纪二十年代初首次提出胸腹腔内压能减轻腰椎柱负荷和躯干肌紧张的观点和其后 Bartelink⁽⁷⁾ 等的研究相符。(2)由(L)可见胸腹腔内压越高椎间盘内压越高，椎间盘脊柱和内含胸腹腔的躯体的刚度越高，提高了腰椎柱和躯干的稳定性⁽⁵⁾，增加其所能承受的自身重力或外加载荷的能力，即胸腹腔内压的“压力支柱”的重力分载作用(见图 6)，这与 Nachemson⁽⁸⁾ 和 Krag⁽⁹⁾ 的实验和理论研究结论：胸腹腔内压增加，腰椎柱的负荷增加，腰椎间盘内压增加相一

致。这从平时人们扛抬重物时憋气和患者打喷嚏时腰腿痛麻症状加重上即可映证。问题在于临床上如果采用提高胸腹腔内压的“压力支柱”作用来减轻自身重力和外加载荷,易使病变椎间盘的压力增高,使治愈病例的椎间盘很容易重新突出,故不可取。结合结论(1)可找到有效的防治方法以避免结论(2)带来的不利影响:增加 $F_{m_{1,2}}$,降低胸腹腔内压使腰椎间盘内压减低,前述方程(e)(f)亦予支持; $F_{m_{1,2}}$ 越大则腰椎间盘内压越小。简示: $F_{m_{1,2}} \uparrow \Rightarrow P \downarrow \Rightarrow N \downarrow$ 。故临床上应嘱咐患者增加肌性前后壁肌力,时刻维持躯体收腹挺胸挺拔向上的姿态,避免含胸凸肚的躯干松弛姿态,同时尽量减少腹横肌、腹内外斜肌胸廓肌的收缩以降低胸腹压,使脊柱的重力载荷能力增加但腰椎间盘又尽可能呈负压。

当患者前倾(设为 45° 角)时,我们又可见到另一种情况:设 F_{m_2} 方向与 y 轴平行(见图 9), L_G 增至 $0.25m$,根据平衡方程(h)(i)(未计腰椎间盘剪力)得:

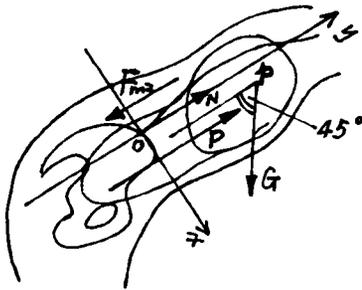


图 9. 前屈 45° 时的平面力系

$$N = 2568 - 1.8P \quad (m)$$

$$F_{m_2} = 2250 - 0.8P \quad (n)$$

$$F_{m_2} = 1109 + 0.4N \quad (r)$$

结果(1):在没有胸腹腔内压($P=0$)的情况下 $F_{m_2} = 2250(N)$, $N = 2568(N)$, F_{m_2} 为放松直立时的 12.5 倍, N 为 4.1 倍。结果(2):在胸腹腔内压 P (设为 $120N$) 的影响下: $F_{m_2} = 2154(N)$, $N = 2352(N)$, F_{m_2} 为放松直立时的 12.0 倍, N 为 3.7 倍。设 $P = 60(N)$ 时, $F_{m_2} = 2202(N)$, $N = 2460(N)$, F_{m_2} 为放松直立时的 13.7 倍, N 为 3.5 倍。与放松直立时相比,上述结果中 N 与 F_{m_2} 均成倍增加,是因为前屈时 G 力臂成倍增加的结果,故患者应尽量避免前屈弯腰,当前屈搬重物时更应尽可能地减小重力矩。从结果(2)和方程(m~r)可见:当身

体前屈时,胸腹腔内压 P 与椎间盘内压 N 和 F_{m_2} 呈负相关, F_{m_2} 与 N 呈正相关,简示: $F_{m_2} \uparrow \Rightarrow P \downarrow \Rightarrow N \uparrow$ 。可见对于未患、已患和治愈的椎间盘源性腰腿痛的人而言,在日常不得不前屈并搬重物时,必须尽量增加胸腹腔内压以降低椎间盘内压,发挥“压力支柱”的重力分载作用。

另外,坐位时腰椎间盘内压较站立时约增加 30%⁽²⁾,笔者以为这是由于坐位时腰椎失去了固定下肢的腰大肌的支撑作用,所以坐位时更应突出肌性前后壁的肌力“软支柱”作用挺直坐以减小弯腰坐时急增的重力矩,弯腰坐时应尽可能增加胸腹腔内压以降低腰椎间盘内压。

以上腰椎间盘在典型姿态下的生物力学分析并不能替代活体测定的结果,但它以生物力学的方法间接地提供了椎间盘源性腰腿痛防治方法的理论依据,并得到我们日常实践和临床的有效验证。

参考文献

1. 陶甫. 有关腰椎间盘纤维环破裂症一些问题的探讨. 中华骨科杂志 1981;13(1):69.
2. B. S. Epstein. The Spine. 殷承祥译,第 1 版,上海科学技术出版社. 1987;8、9.
3. 陈星荣,等. 全身 CT 和 MRI,第 1 版,上海医科大学出版社. 1994;734.
4. 胡有谷. 腰椎间盘突出症. 第 2 版. 人民卫生出版社. 1995;204.
5. 顾志华,等. 骨伤生物力学基础. 第 1 版. 天津大学出版社. 1990;208~209.
6. Keith A. Man's posture: Its evolution and disorders. Lecturer IV; The adaptation of the abdomen and its viscera to orthograde posture. Br Med J 1923. 7;587-590.
7. Bartelink DL. The role of abdominal pressure in relieving the pressure on the lumbar intervertebral discs. J Bone Joint Surg 39B 1957. 718-725.
8. Nachemson AI. Andersson - BJ; Schultz - AB; Valsalva maneuver biomechanics. Effects on lumbar trunk loads of elevated intraabdominal pressures. Spine 1986 Jun;11(5):476-9.
9. Krag MH, Gilbertson L, Pope MH. Intra-abdominal and intrathoracic pressure effects upon load bearing of the spine. 31st Annual ORS Meeting. Las Vegas, Nevada. 1985.

(收稿:1996-06-10;修回:1996-10-04)