

外固定

胫腓骨折复位固定器治疗骨折断面间断性生理应力分析

中国中医研究院骨伤科研究所 孟和
河北大学教学系 李书岐 河北省科学院 顾志华

骨折复位固定器是中西医结合治疗骨折的新型医疗器械，使用该器械时骨折端获得的恒定性生理应力曾进行过分析⁽¹⁾，本文将讨论该器械给予断面的间断性生理应力。

一、前言

骨科复位固定器除复位、固定等效应力外，还利用装置对骨折端施加应力刺激(如图1示)，从而使骨折断面获得能加速骨重建的生理应力，临床初期，由器械给予的轴向力N和横向力Q(图2示)使骨折端得到恒定生理应力为

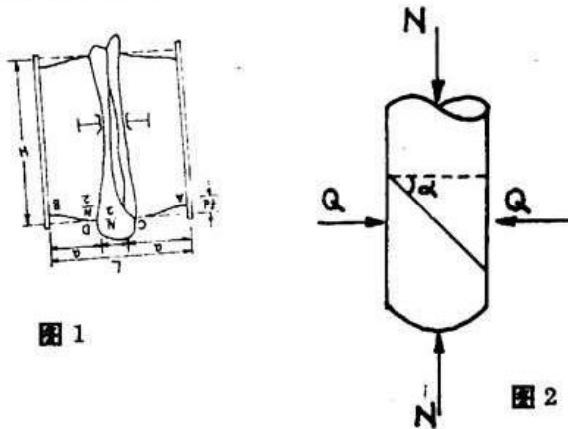


图1

图2

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_Q = -\frac{N}{S_0} \cos^2 \alpha - \frac{Q}{2S_0} \sin^2 \alpha \quad (1)$$

式中 S_0 为断端处横截面积。

为与恒定性生理应力 σ 相区别，本文把由于功能锻炼引起的断端附加应力称为间断性生理应力，记为 σ_e ，并等于

$$\sigma_e = -\frac{F_N}{S_0} \cos^2 \alpha - \frac{F_Q}{2S_0} \sin^2 \alpha \quad (2)$$

经研究， F_N 的取值范围

$$0 < F_N < N_u \quad (3)$$

N_u 为克氏针的屈服荷载， F_Q 的取值范围

$$0 < F_Q < Q_v \quad (4)$$

Q_v 为肌肉的极限压力〔见(1)〕。

在中后期，生理应力不但包括压应力，而拉应力和剪应力也是骨修所必须的。本文重点讨论骨折治疗初期，功能锻炼对愈合的影响。因步行是功能锻炼的基本方式，所以本文将步态对骨折端所引起的应力状态进行分析，并给予定量的讨论。

二、步行中骨折端应力状态分析

步行功能锻炼，可分为负重期和摆动期，下面分别予以讨论。

(一) 负重期，从足跟着地起，以足趾离地止。此时，患肢除受重力外，由于足内部肌、拇长肌；胫骨长肌、腓骨长肌和小腿三头肌均有活动，所以也受肌力的作用。而小腿伸、屈肌均为长肌，且有韧带约束，限制肌肉走向，所以可以假定胫骨上的肌力的合力近似平行于胫骨轴线，并设肌力收缩是缓慢的，且步距较小。

患肢负重期，分双负重期和单负重期，为简单计，从另一足球部至患肢足跟为第一负重期；从患肢足跟至患肢足球部为单负重期；从患肢足球部至另一足跟为第二双负重期。双负重期步行前进动力主要来自于后足足趾蹬地的水平反力；单负重期前进动力来自于重心前移造成身体前倾，重力和地面的反作用力的水平合力。

为方便计，取过患肢脚踝关节轴的垂线与地面交点为坐标原点0，经足跟、原点0及足球部的水平线为

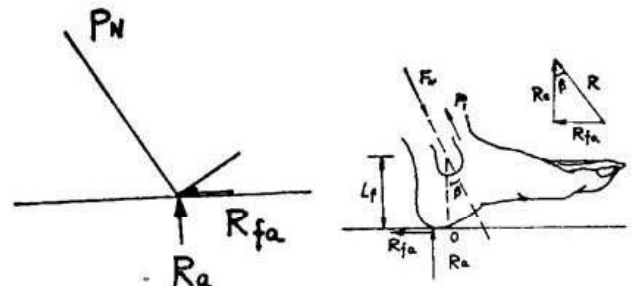


图3(a)

图3(b)

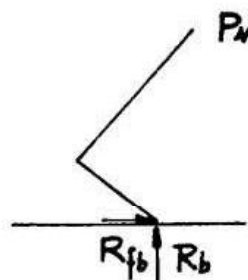


图3(c)

X轴，地面对足跟的反力 R_a 与原点0的距离为 L_a ，反力 R_b 与原点0的距离为 L_b ，胫骨前肌力 P_1 与胫骨轴线距离为 L_1 ，小腿三头肌力 P_2 与胫骨轴线距离为 L_2 (如图3示)。由于步距较小，三种情况中，原点0的位置差别不大，所以取(a)、(c)的原点位置与(b)相同。

1. 第一负重期。重心坐标X的取值范围为
 $-(L-La) < X < -La$ (5)

患肢轴线与铅垂线夹角B为

$$B = \arcsin \frac{|X|}{L_0}$$

其中 L_0 为下肢长度，L为步距（亦即两足踝关节轴之距离）。由于第一双负重期，患肢足为前足，其足跟所受反力 R_a 只与重力P有关。所以，当取人体为研究对象时，只须在C点建立力矩平衡方程式

$$(L+X-Lb)P - (L-La-Lb)R_a = 0$$

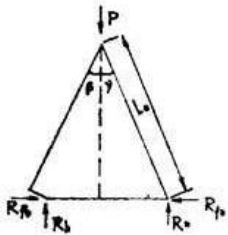


图4

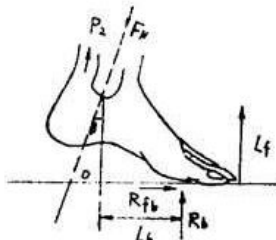


图5

解得

$$R_a = \frac{(L+X-Lb)}{L-La-Lb} P \quad (6)$$

由图5知，脚跟蹬地，作用力沿胫骨轴向，地面对脚跟的反作用力R与作用力大小相等，而方向相反，其分力为铅直向上的反力 R_a 和水平反力 R_{fa} ，为了维持脚的平衡，胫骨前肌产生收缩力 P_1 ，列出对脚踝关节轴的力矩平衡方程并在胫骨轴向投影，得：

$$\begin{aligned} FN &= R_a \cos \beta + R_{fa} \sin \beta + P_1 \\ P_1 L_1 &= R_a L_a + R_{fa} L_f \\ R_{fa} &= R_a \tan \beta \end{aligned} \quad (7)$$

解得：

$$FN = R_a (\cos \beta + \tan \beta \sin \beta + \frac{L_a + \tan \beta \cdot L_f}{L_1}) \quad (1)$$

由式(2)求得间断性生理应力：

$$F_0 = - \frac{R_a}{S_0} \cos^2 \alpha (\cos \beta + \tan \beta \sin \beta + \frac{L_a + L_f \tan \beta}{L_1}) \quad (9)$$

2. 单负重期。重心坐标X的取值范围：

$$-La < X < Lb$$

此时，患肢足底着地，另一足离开地面，进入摆动期，患肢承受体重。随着身体的向前移动，身体重心由足跟移置足球部，如图6(a)、(b)示。由于重力线通过支撑面足底，所以平衡是稳定的。当重力线在胫骨轴后时，有胫骨前肌 P_1 ，当重力线在胫骨轴前时，有小腿三头肌力 P_2 ，取人体为研究对象，由图3及图6，列出平衡方程式

$$\left. \begin{aligned} PR &= R_a + \\ R_b L_b - R_a L_a - PX &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

解得：-

$$R_a = \frac{L_b - X}{L_a + L_b} P, \quad R_b = \frac{L_a + X}{L_a + L_b} P \quad (11)$$

取患肢足为研究对象，分两种情况讨论：

(1) 重力线在胫骨轴后方，重心坐标X取值范围：

$$-La < X < 0 \quad (12)$$

由图3及图6(a)，建立平衡方程

$$\left. \begin{aligned} FN &= (R_a + R_b) \cos \beta + (R_{fa} + R_{fb}) \sin \beta + P_1 \\ P_1 L_1 &= R_a L_a - R_b L_b + (R_{fa} + R_{fb}) L_b \\ R_{fa} &= R_a \tan \beta \\ R_{fb} &= R_b \tan \beta \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

结合(11)，解得

$$FN = (\cos \beta + \tan \beta \cdot \sin \beta + \frac{L_f \tan \beta - X}{L_1}) P \quad (14)$$

$$F_0 = \frac{P}{S_0} \cos^2 \alpha (\cos \beta + \tan \beta \cdot \sin \beta + \frac{L_f \tan \beta - X}{L_1})$$

由公式(2)求得断面性生理应力：

(2) 重力线在胫骨轴前方，重心坐标X取值范围

$$0 < X < Lb \quad (16)$$

由图3及图6(b)，建立平衡方程式

$$\left. \begin{aligned} FN &= (R_a + R_b) \cos \beta + (R_{fa} + R_{fb}) \sin \beta + P_2 \\ P_2 L_2 &= R_b L_b - R_a L_a + (R_{fa} + R_{fb}) L_f \\ R_{fa} &= R_a \tan \beta \\ R_{fb} &= R_b \tan \beta \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

结合(11)式解得：

$$FN = (\cos \beta + \tan \beta \cdot \sin \beta + \frac{L_f \tan \beta + X}{L_2}) P \quad (18)$$

由公式(2)求得断面间断性生理应力

$$F_0 = - \frac{P}{S_0} \cos^2 \alpha (\cos \beta + \tan \beta \cdot \sin \beta + \frac{L_f \tan \beta + X}{L_2}) \quad (19)$$

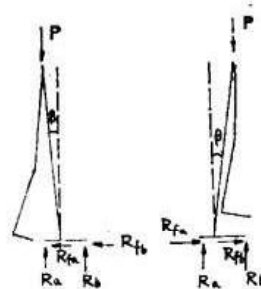


图6(a) 图6(b)

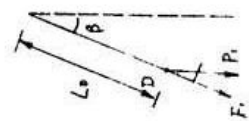


图7

3. 第二双负重期, 重心坐标X取值范围:

$$L_b < X < L - L_a \quad (20)$$

在第二双负重期, 患肢是后肢, 人体前进的动力主要来自于患肢足趾的蹬地, 亦即小腿三头肌的收缩。在患肢足趾蹬地时, 水平力Rfb与另一足跟的水平力Rf的合力为人体前进动力, 如图7示。

由于RD和RfD系由重力P引起, 所以建立B点的力矩平衡方程:

$$R_D(L - L_a - L_b) = P(X - L_b) \quad (21)$$

解得:

$$R_D = \frac{P(X - L_b)}{L - L_a - L_b} \quad (22)$$

$$\text{而 } R_{f0} = R_D \text{tg} \gamma \quad (23)$$

$$\text{其中, } \gamma = \arcsin \left(\frac{L - X}{L_0} \right) \quad (24)$$

由图7建立X方向的运动方程:

$$F = R_{fb} - R_{f0} = ma \quad (25)$$

其中Rfb为重力和小腿三头肌力P2引起的, 人体质量为:

$$m = P/g \quad (26)$$

由于人体行走中的前进动力小于刚起步时的前进动力, 在步距较小时, 为简单计, 视人体的进行运动近似等于刚起步时的动力。由第二双负重期X值范围知, 重力线经过的距离为:

$$S = L - L_a - L_b \quad (27)$$

所以, 由功能原理得

$$FS = \frac{1}{2}mv^2 \quad (28)$$

解得

$$F = \frac{1}{2} \frac{m v_0^2}{S} = \frac{P}{g} \frac{v_0}{2S} \quad (29)$$

其中V0为步行速度, 只要知道V0数值, 即可求得力F。

由公式(25)求得

$$R_{fb} = F + R_{f0} \quad (30)$$

量Rf0由公式(24)、(23)和(22)求得。所以Rfb为

$$R_{fb} = \frac{P}{g} \frac{V_0^2}{2(L - L_a - L_b)} + \frac{d(X - L_b)}{L - L_a - L_b} \text{tg} \gamma \quad (31)$$

取患肢足为研究对象, 由于步行功能锻炼时, 步

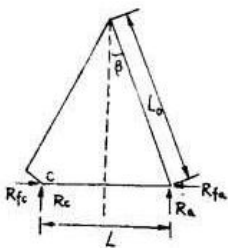


图8

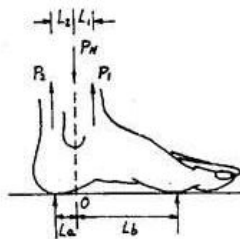


图9

距小, 所以在足趾蹬地时, 足底面与地面夹角很小, Rb和Rf的力臂可近似取作Lb和Lf。由于Rfb已求得(如(31)式), 由图8建立平衡方程式

$$F_N = R_b \cos \beta + R_{fb} \sin \beta + P_2$$

$$P_2 L_2 = R_b L_b + R_{fb} L_f \quad (32)$$

$$R_b = R_{fb} / \text{tg} \beta$$

解得:

$$F_N = R_{fb} \left(\frac{\cos \beta}{\text{tg} \beta} \sin \beta + \frac{L_b / \text{tg} \beta + L_f}{L_2} \right) \quad (33)$$

由公式(2)求得断面间断性生理应力:

$$F_6 = \frac{-R_{fb}}{S_0} \cos^2 \alpha \left(\sin \beta + \frac{L_b / \text{tg} \beta + L_f}{L_2} \right) \quad (34)$$

(二) 摆动期

1. 摆动期是在人体重心坐标 X = L - La 时, 即通过重力线另一足跟时, 患肢在屈髋、屈膝的基础

$$2\beta_0 = 2 \arcsin \frac{L}{L} \quad (35)$$

且在足趾离地和足跟着地患肢是伸直的, 为简单计, 取小腿绕膝关节转动角度为2β0。摆动所需时间恰为人体重力线通过另一足底的时间, 即

$$t_0 = \frac{L_a + L_b}{V_0} \quad (36)$$

若假定患肢小腿绕膝关节轴为匀速转动, 则平均角速度为

$$\omega = \frac{2\beta_0}{t_0} \quad (37)$$

如取胫骨断面C以下部分的质心为D和距膝关节轴的距离为LD, 质量为m1, 则质心D绕膝关节轴的转动速度为

$$v = L_D \omega \quad (38)$$

作用在质心D上的外力, 除重力

$$P_1 = m_1 g \quad (39)$$

外, 还有法向惯性力

$$F_1 = m_1 L_D \omega^2 \quad (40)$$

由公式(2)求得胫骨断面拉应力

$$F_N = m_1 g \cos \beta + m_1 L_D \omega^2 \quad (41)$$

$$F_Q = m_1 g \sin \beta$$

如图9示, 在胫骨轴向和横向投影为

$$F_6 = \frac{1}{S_0} m_1 \cos^2 \alpha (g \cos \beta + L \omega^2) \quad (42)$$

而横向力FQ不大(因为β0不会大), 且施加在复位固定器压板上。

2. 患肢停止摆动后, 患肢在重力m2f作用下足跟着地, 如果取足跟距地面高度为h, 足跟着地时的速度为v2, 由功能原理有

$$m_2 g h = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (43)$$

解得

$$V_2 = (2gh)y_2 \quad (44)$$

如果取足着地时间为 t_2 ，则由动量定理有

$$F_2 t_2 = m_2 v_2 \quad (45)$$

上，由股四头肌力使小腿向前摆动。因为患肢由足趾离地到摆动结束后的足跟着地，其转角为

则地面对足跟的冲力

$$F_2 = m_2 v_2 / t_2 \quad (46)$$

由于患肢落地时，与铅垂线夹角为 β_0 ，且足跟距地面高度 h 不大，所以，近似取力 F_2 与胫骨轴线夹角为 β_0 ，该力在胫骨轴向和横向投影：

$$\begin{cases} F_N = F_2 \cos \beta_0 \\ F_Q = F_2 \sin \beta_0 \end{cases} \quad (47)$$

由公式(2)求得断面间断性生理应力

$$F_6 = -\frac{1}{S_0} F_2 \cos \beta_0 \cos^2 \alpha \quad (48)$$

由于 β_0 角不大，所以 $\sin \beta_0$ 不大，且力 F_Q 施加在横向压板上， F_Q 不考虑。

三、结果讨论

为了便于讨论步态过程的分析结果，且不失一般性，可取患者的各种数据为

$$\begin{aligned} P &= 60\text{kg}, L_a = 0.04\text{m}, L_b = 0.14\text{m}, L_f = 0.07\text{m} \\ L_1 &= 0.02\text{m}, L_2 = 0.03\text{m}, S_0 = 2.29\text{cm}^2, \\ L_0 &= 0.9\text{m} \\ P_1 &= 0.0527P/2 + 0.0129 = 2.355\text{kg} \\ L_D &= (0.3375 \times 0.0527P/2 + 0.0179P \times 0.457) / P_2 \\ &= 0.38\text{m} \\ P_2 &= (0.1158 + 0.0527 + 0.0179)P = 11.184\text{kg} \end{aligned}$$

摆动期：

$\beta = -0.5108157$	(rad)	$F_6 = 0.6507084$	(kg/cm ²)
$\beta = -0.2554078$	(rad)	$F_6 = 0.7059026$	(kg/cm ²)
$\beta = 0$	(rad)	$F_6 = 0.7247073$	(kg/cm ²)
$\beta = 0.2554078$	(rad)	$F_6 = 0.7059026$	(kg/cm ²)
$\beta = 0.5108157$	(rad)	$F_6 = 0.6507084$	(kg/cm ²)
$h = 0.05$ (m);	$t_2 = 0.1$ (s)	$F_6 = -1.287539$	(kg/cm ²)

若将 $L = 0.44\text{m}$, $V_0 = 0.44\text{m/s}$, $h = 0.05\text{m}$, $t_2 = 0.1\text{s}$ 的负重期和摆动期以图表示，如图11(a), (b)所示，由此有如下结论：

1. 负重期骨折断面的应力状态为压应力，而摆动期则为拉应力，冲力引起的断面应力为压应力。

2. 压应力的最大值为

$$F_6 = -79.20929(\text{kg/cm}^2)$$

当取 $L = 0.44\text{m}$, $V_0 = 0.44\text{m/s}$, $h = 0.05\text{m}$, $t = 0.1\text{s}$ 时，求得：

第一双负重期：

$x = -0.2999$ (m)	$F_6 = -2.165714$ (kg/cm ²)
$x = -0.2933$ (m)	$F_6 = -1.432422$ (kg/cm ²)
$x = -0.22$ (m)	$F_6 = -15.77508$ (kg/cm ²)
$x = -0.1467$ (m)	$F_6 = -27.74817$ (kg/cm ²)

单负重期

$x = -0.04$ (m)	$F_6 = -41.35334$ (kg/cm ²)
$x = -0.02$ (m)	$F_6 = -29.31682$ (kg/cm ²)
$x = 0$ (m)	$F_6 = -13.10019$ (kg/cm ²)
$x = 0.07$ (m)	$F_6 = -46.09176$ (kg/cm ²)
$x = .14$ (m)	$F_6 = -79.20929$ (kg/cm ²)

第二双负重期：

$x = 0.1401$ (m)	$F_6 = -19.16468$ (kg/cm ²)
$x = 0.1467$ (m)	$F_6 = -22.52921$ (kg/cm ²)
$x = 0.22$ (m)	$F_6 = -37.74869$ (kg/cm ²)
$x = 0.2933$ (m)	$F_6 = -33.59108$ (kg/cm ²)
$x = 0.4$ (m)	$F_6 = -15.1153$ (kg/cm ²)

由公式(19)知，该值与步距 L 和速度 V_0 无关；由公式(42)知，拉应力最大值与步距 L 和步行速度 V_0 有关，在 $L = 0.44\text{m}$, $V_0 = 0.44\text{m/s}$ 时，

$$F_6 = 0.7605134(\text{kg/cm}^2)$$

与压应力比较小的很多；冲力引起的断面应力为压应力，与高度 h 和时间 t_2 有关，即冲力与高度 h 平双根成正比，与时间 t_2 成反比。

黄芪五物汤治疗颈肩臂痛症的临床体会

江西中医学院附院 涂小红 涂文辉

笔者在涂老的临床指导下，运用黄芪五物汤加葛根，制草乌治疗大量的颈肩臂痛症，临床运用，屡感应手，今就临床治验，作一简介，不当之处，请批评指正。

病例介绍：

梁××、女性、48岁、工人、单位江西新华印刷厂。

主诉：颈肩臂右侧疼痛已三个月余。

病史：颈肩臂右侧疼痛，放射右肩胛骨部，颈项部牵痛，逐渐加重，以致发展右手指发麻，右上肢活动受限、三角肌萎缩，经中西医治疗、按摩、针灸、理疗及内服中、西药，均未见明显改善，特来我院门诊医治。

初诊日期：1988年8月9日

就诊情况：患者颈肩臂右侧疼痛，放射右肩胛部，抽痛，患肩沉重、患肢乏力、肩部至肢端串痛伴酸麻。

体征：消瘦体质，精神软弱，颈部活动障碍，右提肩胛肌压痛明显，弹拨时有清脆响音，右上肢外展受限，压颈试验阳性、臂丛牵拉阳性。摄片：X线号：45873 颈椎生理曲线变直、颈5、6、7椎体缘呈唇状形改变。

实验检查：血沉6mm/小时，抗“O”500单位以

下。治疗：选用黄芪五物汤加葛根12g，制草乌5g、连服7付，每日一剂煎服，并配合颈部练功法，作“回头望月，与颈争力”动作，每日2—3次，每次10分钟左右。

复诊日期：1988年8月18日。

患者服药及治疗后，颈肩臂痛明显减轻，肩部沉重好转，抽痛及发麻改善，仍有颈僵及肢端串痛，压颈试验好转，其它无特殊。治疗守上方7剂，加重黄芪20g，继续作颈部练功法。

再诊日期：1988年8月26日

患者经治疗后，精神如常，颈肩臂痛基本消失，颈部旋转活动尚好，左上肢可适当活动，但无串痛及指端发麻，未见颈部根痛体征。继续服上方五剂，二个月后随访患者，颈肩臂痛消失，已恢复正常工作。

体会：

颈肩臂痛症，是中老年的常见疾病。多因气血不足，营卫失调，筋失濡养的退化所致，加之劳伤或感受风寒湿邪侵袭，使气血通畅障碍，故不通则痛及运动受限。笔者在临床上选用黄芪五物法，方中重用黄芪以治营卫气血不足，改善血运，疏通痹阻，助气通痹。桂支，葛根以解肌表之邪，而通经络，大枣养胃气而助气血通络，更有制草乌温通经络而止痛，能治骨节风寒湿痹，本方故能治愈本病。

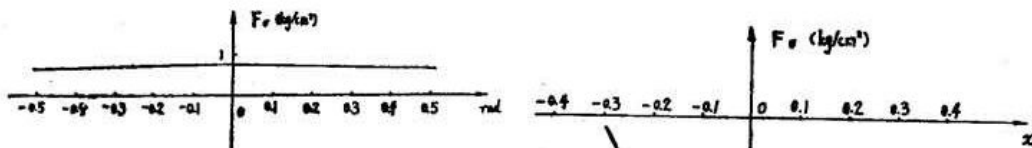
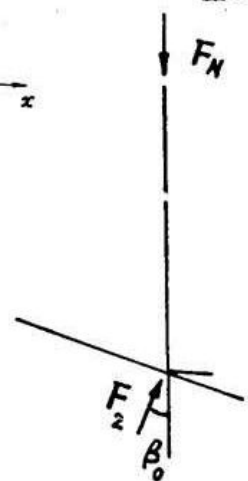


图11(b)

图11(a)

图10



由于手术初期，患者拄双拐，患肢实际承重小于体重，即胫骨断面最大压应力远比 $F\delta = -79.20929 \text{ kg/cm}^2$ 为小，符合间断性生理应力的要求；在步行速度慢，步距小的情况下，胫骨断面的拉应力比上面计算的结果还要小，在手术初期对骨折愈合没有什么影响，而在中后期是必须的。

参考文献

1. 孟和等。《胫腓骨折复位固定器治疗骨折断面的生理应力分析》，中国生物医学工程学报，1989(3)。
2. 孟继懋主编《骨与关节损伤》，人民卫生出版社，1980
3. 中国医科大学主编《人体解剖学》，人民卫生出版社，1982

4. 顾志华等，《骨折复位固定器整复骨干骨折的力学研究》，骨伤科研究。