

软弱围岩隧道锁脚锚杆受力特性及其力学计算模型

罗彦斌, 陈建勋

(长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要: 锁脚锚杆在软弱围岩隧道中应用非常广泛, 为了研究其受力特性, 以包茂线西康高速公路包家山特长公路隧道为依托, 采用现场试验的方法, 对典型断面锚杆轴向应力进行测试, 结果表明: 拱部锚杆受力较小, 最大应力仅为锚杆极限应力的 11.5%, 作用不大; 锁脚锚杆受力较大, 最大应力达到锚杆极限应力的 55.4%, 作用很大; 锁脚锚杆受长度和角度限制, 不能发挥锚固作用。在分析其受力特性的基础上, 采用结构力学和弹性地基梁的方法, 建立了钢架和锁脚锚杆力学计算模型。应用该模型对隧道测试断面处的锁脚锚杆受力进行了分析计算, 给出了锁脚锚杆弯矩分布图。根据弯矩推算锚杆应变值, 并与实测值进行对比, 结果表明: 实测值和计算值规律一致, 在距离孔口最近位置处锚杆应变最大, 随着距离孔口距离增大, 应变逐渐变小。

关键词: 软弱围岩隧道; 锁脚锚杆; 现场测试; 计算模型

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)08-1519-07

作者简介: 罗彦斌(1980-), 男, 陕西千阳人, 讲师, 从事隧道及地下工程科研与教学工作。E-mail: lybzx2008@126.com。

Mechanical characteristics and mechanical calculation model of tunnel feet-lock bolt in weak surrounding rock

LUO Yan-bin, CHEN Jian-xun

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The feet-lock bolt is widely used in weak surrounding rock tunnel. In order to study the mechanical characteristics, based on the Baojiashan extra-long highway tunnel in Baomao line Xikang highway, the field test method was used to test the bolt axial stress at the typical section. The results show that the stress of arch department bolts is small, the maximum stress is only 11.5% of the bolt's ultimate stress and the effect is not big; the stress of feet-lock bolts is larger, the maximum stress is 55.4% of the bolt's ultimate stress and the effect is very big; and the anchorage effect cannot be used very much at the feet-lock bolts as a result of the length and the angle limitations. Based on the analysis of its mechanical characteristic, the mechanical calculation model of the steel frame and feet-lock bolt is established using structural mechanical and elastic foundation beam methods. And the model is used to analyze the stress of feet-lock bolts at the tunnel test section, and the bending moment distribution of feet-lock bolt is given. The strain value of bolt is calculated from the bending moment and compared with measured values. The results show that the calculated values are consistent with the measured ones, that the strain of bolt is the largest at the closest point to the orifice and that the strain decreases gradually with the increasing distance between orifice and anchor body.

Key words: weak surrounding rock tunnel; feet-lock bolt; field test; calculation model

0 引言

控制沉降和大变形是软弱围岩隧道的难点问题, 日本的惠那山(Enasan)公路隧道、奥地利的陶恩(Tauern)隧道和阿尔贝格(Arlberg)隧道、希腊的迈索霍拉(Messochora)公路隧道都因穿越软弱地层而发生了沉降和大变形, 造成巨大的灾害^[1-2]。国内外学者对此非常关注, 进行了许多试验性和工程性的研究。如 21 世纪初, 日本在中佐久间隧道的泥岩破碎带、惠那山隧道的断层破碎带、东北新干线隧道、双层结

构 Oume 隧道中为了防止沉降和崩塌, 采用了拱脚补强锚杆、补强锚固桩、脚部注浆、水平钢管和斜钢管等措施。同时, 对拱脚补强措施控制下沉的效果进行了分析, 认为拱脚补强锚固桩效果极佳^[3]。中国在大量的工程实践中, 也形成了许多工程措施, 如注浆加固地层、增加初期支护强度、仰拱及时封闭、扩大拱

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278063); 中央高校基本科研业务费资助项目(2013G2211001)

收稿日期: 2012-12-30

脚、拱脚补强等^[4]。

这些工程措施中,有些理论研究已经较为成熟,并且在工程实践中得到了长期的应用,有效地解决了软弱围岩隧道的变形问题。例如注浆加固地层,改善围岩物理力学性能,提高围岩自稳能力;增设锚杆或提高钢架强度,增加支护结构强度;仰拱及时封闭,使支护结构及早封闭成环,增强支护结构的整体受力能力等^[5]。但是,有些措施则是近些年才开始得到应用,例如拱脚补强中的锁脚锚杆,而且在工程实践中证明其控制沉降和变形的效果显著。尤其是围岩条件差(Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ级)时,由于围岩本身因素和现场施工条件的限制,在许多情况下,常导致径向系统锚杆作用效果不明显,且给隧道建设造成诸多不利,此时锁脚锚杆的作用则加以凸显^[6-10]。同时,在控制拱脚下沉的工程措施中,注浆和锚固桩相对而言机械化程度要求高,费用昂贵,而锁脚锚杆由于其效果显著、简单易行、经济实用,在软弱围岩隧道中得到了广泛应用。

尽管目前锁脚锚杆在软弱围岩隧道工程中已经应用的不少^[11-12],但对其受力特性和力学机理方面的研究很少,仅有的研究也不够深入和系统。从2004年开始,中国的许多隧道工作者针对具体的工程,对锁脚锚杆控制隧道变形的规律进行了分析,给出了锁脚锚杆打设长度和角度的合理建议。但大多数都是根据施工经验和有限元数值模拟分析,对锁脚锚杆的作用原理和荷载传递机理认识不到位。有的甚至将砂浆锚杆的相关理论应用到锁脚锚杆,导致计算得到的软弱围岩隧道锁脚锚杆的合理支护参数也不一致,给工程应用带来一定的盲目性。

笔者通过对包家山特长公路隧道Ⅳ级围岩段锁脚锚杆轴力的测试,发现了锁脚锚杆的受力特点,分析了锁脚锚杆力学作用原理,提出了隧道锁脚锚杆力学分析模型。根据该模型对依托工程锁脚锚杆轴向应变进行了计算,并与实测值进行了对比分析。

1 锁脚锚杆现场测试

以包茂线西康高速公路包家山特长公路隧道为依托,选取Ⅳ级围岩段进行锚杆轴向应力现场测试。

1.1 依托工程概况

现场试验的软弱地层隧道埋深约680 m,围岩主要是软质岩石(ⅡB)绢云母千枚岩夹炭质板岩,夹少量结晶灰岩,微风化,块状镶嵌结构,裂隙较发育,地质情况如图1所示。隧道采用三台阶开挖法,最大开挖跨度12.2 m,施工步骤如图2所示,中台阶开挖时先施作左半部分,然后施作右半部分,下台阶开挖

时先施作右半部分,然后施作左半部分。现场施工如图3所示。



图1 现场地质情况

Fig. 1 Geological conditions in the field

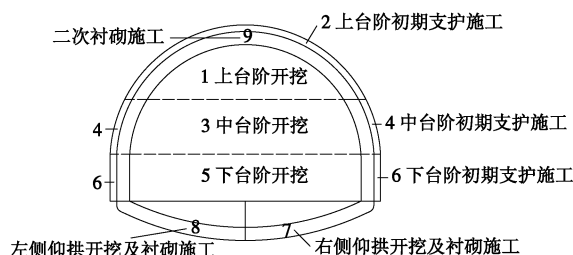


图2 三台阶法开挖步骤

Fig. 2 Excavation steps of three step method



图3 现场施工情况

Fig. 3 Construction conditions in the field

隧道采用复合式衬砌,原设计需要设置系统锚杆,并且必须垂直于隧道岩面。通过研究,软弱岩层中系统锚杆作用效果不大,且拱部锚杆垂直岩面打设难度较大。因此,该隧道取消了系统锚杆,在钢架连接处安设一定数量的锁脚锚杆,锁脚锚杆尾端与钢架焊接牢固。Ⅳ级围岩初期支护设计参数:Φ25 超前锚杆,长度5.0 m,间距40×40 cm;Φ22 锁脚锚杆采用早强砂浆锚杆,长度3.0 m;Φ8 钢筋网,20×20 cm;I16型钢钢架;Φ20 纵向连接筋;22 cm厚C25喷射混凝土。二次衬砌设计参数:40 cm厚C25模筑混凝土。

1.2 现场测试布置

锚杆轴力采用CD型钢弦式测力锚杆,如图4所示。CD型钢弦式测力锚杆,是由若干个钢弦式钢筋应力计、测量线、分线器插头和分线器组成,结构示意如图5所示。一根CD型钢弦式测力锚杆,无论有几个测点,都只有一条多芯电缆线从钻孔中引出,其

中有多根芯线和一根共用零线, 每根芯线对应一个钢筋应力计。测量线末端与分线器插头相联, 分线器上标着每根芯线对应的钢筋应力计。量测时, 将插头插入分线器, 再与频率仪相连, 就可测出每个测点的钢筋应力计中钢弦的频率变化, 从而知其应变和应力。

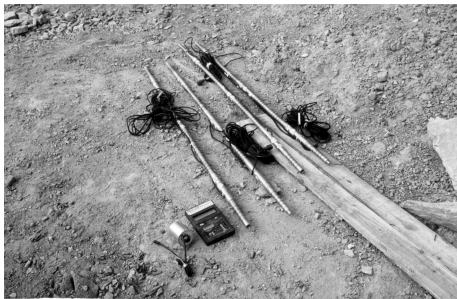
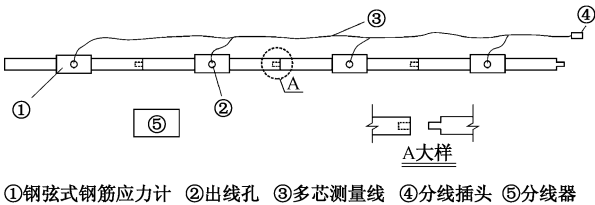


图 4 CD 型钢弦式测力锚杆
Fig. 4 CD type vibrating-wire force anchor



①钢弦式钢筋应力计 ②出线孔 ③多芯测量线 ④分线插头 ⑤分线器

图 5 CD 型钢弦式测力锚杆结构示意图

Fig.5 CD type vibrating-wire force anchor structural diagram

现场选取 4 个断面进行隧道开挖至二次衬砌施作期间锚杆轴力的测试, 其中 2 个断面 (YK152+469、YK152+475) 测试了拱部锚杆和锁脚锚杆, 另外 2 个断面 (YK152+515、YK152+523) 只测试了锁脚锚杆, 测力锚杆的安装分别如图 6, 7 所示。

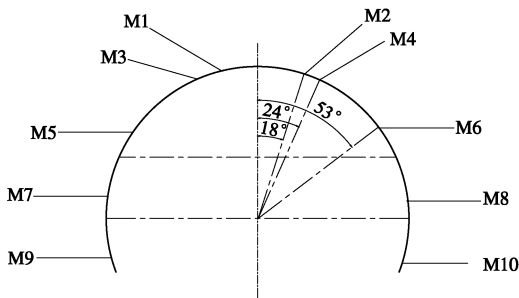


图 6 拱部锚杆和锁脚锚杆测试断面

Fig. 6 Testing section of arch department bolt and foot-lock bolt

图 6 中 M1、M2、M3 和 M4 为拱部锚杆, M5、M6 是上台阶左、右侧的锁脚锚杆, M7、M8 是中台阶左、右侧的锁脚锚杆, M9、M10 是下台阶左、右侧的锁脚锚杆。图 7 中 M1 和 M3、M2 和 M4 是上台阶左、右侧的锁脚锚杆, M5、M6 是中台阶左、右侧的锁脚锚杆, M7、M8 是下台阶左、右侧的锁脚锚杆。上台阶左侧锁脚锚杆和水平方向的夹角约为 5° 。

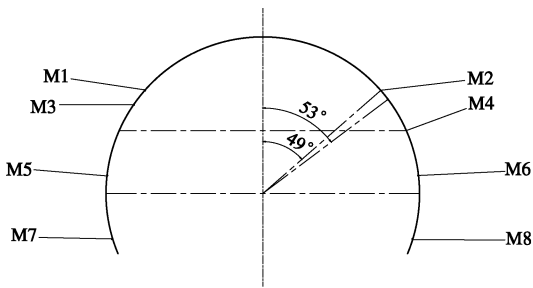


图 7 锁脚锚杆测试断面

Fig. 7 Testing section of feet-lock bolt

1.3 现场测试结果

YK152+469 和 YK152+475 断面锚杆按照图 6 所示布置, YK152+515 和 YK152+523 断面锚杆按照图 7 布置。各断面锚杆最大轴向应力测试结果如图 8~11 所示, “+” 为压应力, “-” 为拉应力。

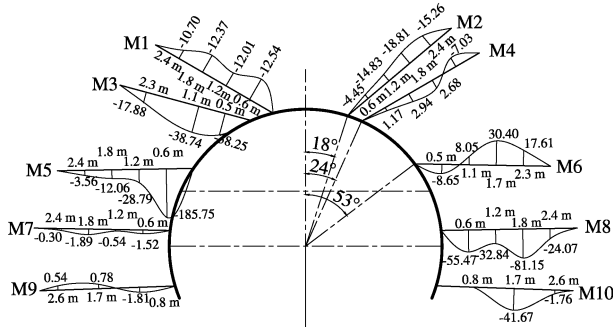


图 8 YK152+469 断面锚杆轴力分布

Fig. 8 Axial force distribution of rock bolt in YK152+469 section

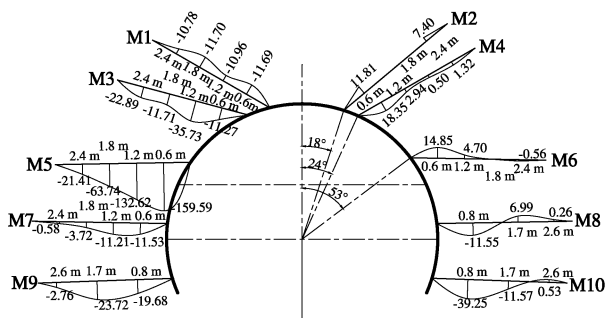


图 9 YK152+475 断面锚杆轴力分布

Fig. 9 Axial force distribution of rock bolt in YK152+475 section

由图 8, 9 可以看出: YK152+469 和 YK152+475 断面拱部锚杆既有拉应力, 也有压应力, 最大应力为 39 MPa, 占锚杆极限应力的 11.5%; YK152+469 和 YK152+475 断面锁脚锚杆大部分产生拉应力, 最大拉应力为 186 MPa, 占锚杆极限应力的 55.4%, 且都出现在上台阶左侧锁脚锚杆处。

由图 10, 11 可以看出: YK152+515 和 YK152+523 断面锁脚锚杆大部分产生拉应力, YK152+515 断面最大拉应力为 137 MPa, YK152+523 断面最大拉应力为

63 MPa, 且都出现在上台阶左侧锁脚锚杆处。

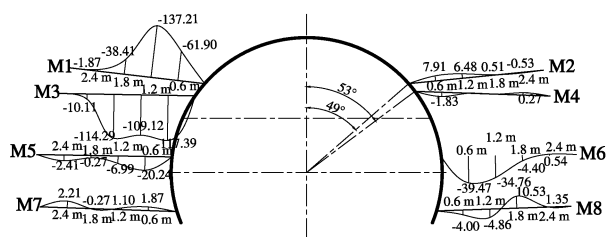


图 10 YK152+515 断面锚杆轴力分布

Fig. 10 Axial force distribution of rock bolt in YK152+515 section

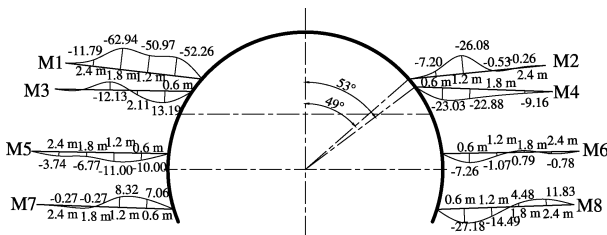


图 11 YK152+523 断面锚杆轴力分布

Fig. 11 Axial force distribution of rock bolt in YK152+523 section

由此可见: 拱部个别锚杆产生压应力, 整体受力较小, 最大应力仅占锚杆极限应力的 11.5%, 说明软弱岩层隧道拱部锚杆作用不大; 锁脚锚杆大部分产生拉应力, 整体受力较大, 最大应力达到锚杆极限应力的 55.4%, 说明软弱岩层隧道锁脚锚杆作用很大。

1.4 测试结果分析

从拱部锚杆既产生拉应力又产生压应力可以看出, 锚杆发挥的并不是锚固作用, 即 3 m 长的锚杆在岩体中的端头并未处在稳定岩层中。锚杆和岩层共同向隧道内位移, 而锚杆另一端头和钢架焊接, 导致锚杆产生压应力。同时, 由于拱部锚杆并不是垂直于岩面打设, 岩层压力使锚杆受弯, 产生拉应力。

锁脚锚杆大部分产生拉应力, 且应力值普遍大于拱部锚杆, 而锁脚锚杆和拱部锚杆长度一样, 说明锁脚锚杆岩体中的端头也未处在稳定岩层中, 发挥的也不是锚固作用。尤其是上台阶左侧锁脚锚杆产生较大的拉应力, 说明岩体的变形对锁脚锚杆受力影响不大, 隧道中台阶左侧的开挖对其有直接影响。中台阶左侧开挖后, 上台阶左侧钢架拱脚处于悬空状态, 而锁脚锚杆和钢架拱脚焊接。因此, 锁脚锚杆受到钢架拱脚的作用力。

2 锁脚锚杆力学作用原理

隧道采用台阶法施工, 上半断面开挖后安设钢架, 钢架直接放置在上半断面的拱脚处, 如果围岩底部具有一定承载力, 则钢架处于稳定状态, 如图 12 (a) 所示; 当下半断面开挖时, 钢架接头处于悬空状态,

如果下半断面一次开挖, 则造成钢架两侧底部接头处全部悬空, 钢架成为不稳定结构, 完全丧失了支护能力, 如图 12 (b) 所示。而此时在拱脚部位打设锁脚锚杆, 将钢架的脚部牢牢锁定在围岩上, 使钢架在整个下半断面开挖和钢架安设过程中始终处于稳定状态。这样锁脚锚杆不但受水平力, 而且还要承受竖向力和弯矩 (转动), 如图 12 (c) 所示。

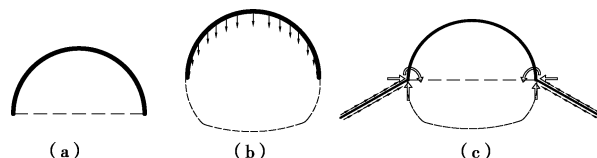


图 12 锁脚锚杆力学作用

Fig. 12 Mechanical functions of foot-lock bolt

3 锁脚锚杆力学计算模型

因此, 要分析锁脚锚杆的力学特征, 必须首先分析钢架的受力特性。台阶法施工时, 上台阶开挖完毕后安设钢架, 此时的钢架可以认为是一个两铰拱结构 (一次超静定结构)。

3.1 钢架力学计算模型

假设钢架承受隧道上台阶开挖后的全部围岩松弛荷载, 且均匀分布。如图 13 (a) 所示, 设钢架跨度为 l , 拱高为 f , 受均布荷载 q 。

建立坐标系 xoy , 如图 13 (b) 所示, 设圆心角为 θ , 钢架的弧度角为 $2\varphi_0$, 圆弧半径为 r , 拱轴切线倾角为 φ , 则拱轴线上任意一点的坐标为 $(r \cos \theta, r \sin \theta)$ 。

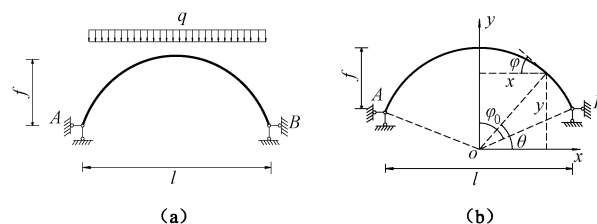


图 13 钢架受力

Fig. 13 Force of steel frame

采用结构力学中的力法进行计算, 可得拱轴上各点的弯矩 M 、剪力 Q 、轴力 N 方程为

$$M = M^0 - x_1 y, \quad (1)$$

$$Q = Q^0 \cos \varphi - x_1 \sin \varphi, \quad (2)$$

$$N = Q^0 \sin \varphi + x_1 \cos \varphi, \quad (3)$$

式中, M^0 , Q^0 为相应简支梁对应的弯矩和剪力, x_1 为水平推力, y 为任意截面处的竖坐标值。

以拱脚处的内力为例, 设拱脚的弯矩、剪力、轴力分别为 M_j , Q_j , N_j , 则

$$\left. \begin{aligned} M_j &= 0, \\ Q_j &= -qr \cos(\pi/2 - \varphi_0) \cos \varphi_0 - x_1 \sin \varphi_0, \\ N_j &= -qr \cos(\pi/2 - \varphi_0) \sin \varphi_0 + x_1 \cos \varphi_0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

隧道中台阶或下台阶开挖时, 先开挖一侧的约束解除, 钢架拱脚的受力全部落在了锁脚锚杆上。因此, 可以认为锁脚锚杆与钢架焊接部位承受的力即为钢架拱脚处的内力。

3.2 锁脚锚杆力学模型分析

锁脚锚杆采用全长黏结型灌浆锚杆, 端头与钢架焊接, 杆体插入预先钻好的孔内, 并用锚固剂填充密实。假设焊接点为刚节点, 且位于孔口位置, 灌浆体与围岩接触密实。如图 14 (a) 所示, 设钻孔直径为 D , 锚杆直径为 d , 以锚杆端口为中心建立水平坐标系 xoy , 锚杆端头受钢架拱脚处的轴力 N_j 、弯矩 M_j 和剪力 Q_j , 锚杆与水平面的夹角为 α , 轴力 N_j 与水平面的夹角为 β 。

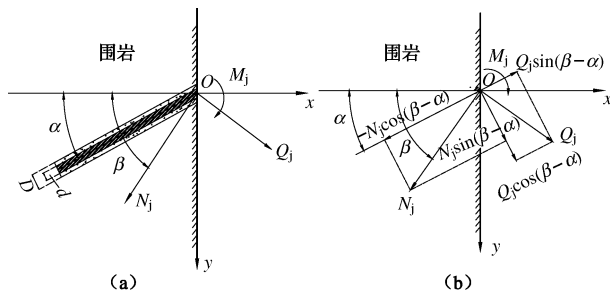


图 14 锁脚锚杆受力

Fig. 14 Force of feet-lock bolt

将锚杆端头的受力进行单独分析, 如图 14 (b) 所示, 轴力 N_j 和剪力 Q_j 分解为沿锚杆轴向的力 N' 和垂直于锚杆轴向的力 Q' , 并规定轴向力受拉为正, 受压为负。根据力的平衡原理, 可得

$$N' = Q_j \sin(\beta - \alpha) - N_j \cos(\beta - \alpha), \quad (5)$$

$$Q' = N_j \sin(\beta - \alpha) + Q_j \cos(\beta - \alpha). \quad (6)$$

因此, 锚杆端头受轴力 N' , 剪力 Q' 和弯矩 M_j 。

对于锚杆体端头受剪力 Q' 和弯矩 M_j 的分析, 可以将锚杆体看作以围岩为基础的弹性地基梁, 简化成如图 15 所示的模型, 坐标系以锚杆轴向为 x 方向, 垂直锚杆为 y 方向。

当锚杆体在外荷载作用下发生挠曲时, 锚杆体上每一点处, 连续分布的反力与该点的竖向变形成正比, 设比例常数为围岩的压缩模量 K , 所以每一点处的应力为 Ky , 锚杆体直径为 D , 则反力为 KDy 。运用梁的微分方程式:

$$E_D I_z \frac{d^4 y}{dx^4} = -KDy, \quad (7)$$

式中, E_D 为锚杆体的弹性模量, I_z 为锚杆体横截面的

惯性矩。

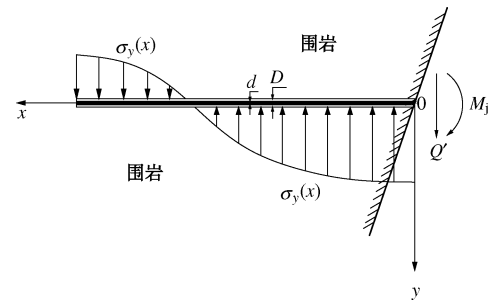


图 15 锁脚锚杆在端头剪力和弯矩作用下的受力分析

Fig. 15 Force analysis of feet-lock bolt under the action of shear force and moment at the end

采用级数解法可得

$$y = y_0 A_1 + \left(\frac{\varphi_0}{\alpha}\right) B_1 + \frac{M_j}{\alpha^2 E_D I_z} C_1 + \frac{Q'}{\alpha^3 E_D I_z} D_1, \quad (8)$$

式中, $\alpha = \sqrt[4]{\frac{KD}{E_D I_z}}$, $A_1 = \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(\alpha x)^{4k}}{(4k)!}\right]$, $B_1 = \left[\alpha x + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(\alpha x)^{4k+1}}{(4k+1)!}\right]$, $C_1 = \left[\frac{(\alpha x)^2}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(\alpha x)^{4k+2}}{(4k+2)!}\right]$, $D_1 = \left[\frac{(\alpha x)^3}{6} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(\alpha x)^{4k+3}}{(4k+3)!}\right]$ 。将 $x=l$ 代入 A_1 , B_1 , C_1 , D_1 (l 为锚杆体的长度) 表达式中确定了它的值后, 可确定 y_0 , φ_0 的值为

$$y_0 = \frac{M_j}{\alpha^2 E_D I_z} \cdot \frac{A_1 C_1 + D_1^2}{C_1^2 - B_1 D_1} + \frac{Q'}{\alpha^3 E_D I_z} \cdot \frac{B_1 C_1 - A_1 D_1}{C_1^2 - B_1 D_1}, \quad (9)$$

$$\frac{\varphi_0}{\alpha} = \frac{M_j}{\alpha^2 E_D I_z} \left(\frac{-A_1 B_1 - C_1 D_1}{C_1^2 - B_1 D_1} \right) + \frac{Q'}{\alpha^3 E_D I_z} \frac{A_1 C_1 - B_1^2}{C_1^2 - B_1 D_1}. \quad (10)$$

根据位移互等定理, 有

$$\frac{A_1 C_1 + D_1^2}{C_1^2 - B_1 D_1} = -\frac{A_1 C_1 - B_1^2}{C_1^2 - B_1 D_1}, \quad (11)$$

$$\text{令 } A = \frac{B_1 C_1 - A_1 D_1}{C_1^2 - B_1 D_1}, \quad B = \frac{B_1^2 - A_1 C_1}{C_1^2 - B_1 D_1}, \quad C = \frac{A_1 B_1 + C_1 D_1}{C_1^2 - B_1 D_1},$$

则

$$M = \frac{Q'}{\alpha} (D_1 B - C_1 A + B_1) + M_j (D_1 C - C_1 B + A_1). \quad (12)$$

锚杆体若产生弯矩, 根据材料力学理论, 必然有一侧受压, 另一侧受拉。认为锚杆体中灌浆体承受压应力, 锚杆承受拉应力。根据锚杆体的弯矩可以推算出锚杆产生的拉应变。

对于锚杆体端头受到的轴力 N' , 单独进行分析。若受拉, 如图 16 (a) 所示, 轴力 N' 由锚杆灌浆体与围岩的黏结应力 τ 平衡; 若受压, 如图 16 (b) 所示, 轴力 N' 由锚杆体尾端的围岩反作用力 T' 和黏结应力 τ 共同平衡。

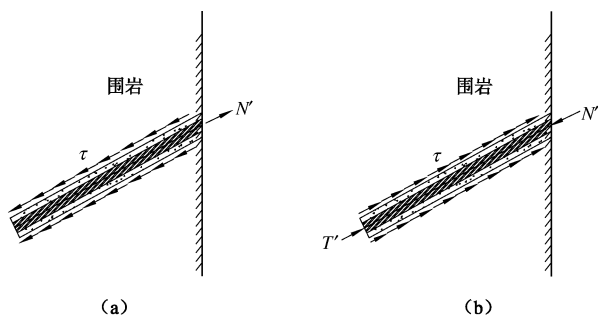


图 16 锁脚锚杆在端头轴力作用下的受力分析

Fig. 16 Force analysis of feet-lock bolt under the action of axial force at the end

假设围岩和水泥砂浆都为弹性材料, 钢筋和水泥砂浆的黏结力高于围岩和水泥砂浆的黏结力, 可按全长注浆锚杆黏结应力进行分析。这里关心的是锚杆体的极限拉力和极限压力, 因为一旦锚杆体的拉力和压力过大, 超过围岩和水泥砂浆的极限黏结应力, 锚杆体就会发生破坏。因此, 这里只计算锚杆的极限拉力或压力 N'_{\max} 。

$$N'_{\max} = 2\pi D\tau_{\max}\sqrt{e/t} \quad (13)$$

式中 e 为常数, $t = E/[(1+\mu)(3-2\mu)D^2E_D]$, μ , E 分别为围岩的泊松比和弹性模量; D , E_D 分别为锚杆体直径和锚杆体弹性模量; τ_{\max} 为围岩和水泥砂浆的极限黏结应力。

当轴力 N' 为拉力, 且 $N' < N'_{\max}$, 则锚杆体承受围岩给它的摩擦力, 处于平衡状态; 当轴力 N' 为拉力, 且 $N' > N'_{\max}$, 则锚杆体被拔出破坏; 当轴力 N' 为压力, 且 $N' < N'_{\max}$, 则锚杆体承受围岩给它的摩擦力, 处于平衡状态; 当轴力 N' 为压力, 且 $N' > N'_{\max}$, 则锚杆体和围岩之间开裂, 锚杆体端头提供反作用力 T' , 锚杆体的稳定为压杆稳定问题。

对于轴力 N' 为压力, 且 $N' > N'_{\max}$ 的情况, 可以按照弹性地基梁的压杆问题进行处理, 简化成如图 17 所示的模型。

由图 17 可以看出: 由于围岩的弹性刚度远小于锚杆体的弹性刚度, 因此在轴力 N' 的作用下, 锚杆体不会产生压应变。

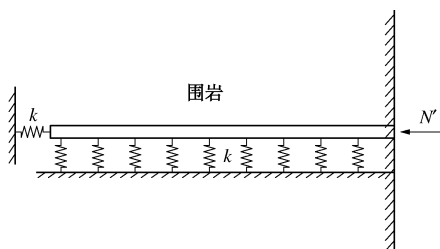


图 17 基于弹性地基梁的压杆模型

Fig. 17 Model of pressure bar based on the theory of elastic foundation beam

4 锁脚锚杆受力计算

隧道所处地层围岩为 IV 级, 围岩重度 γ 取 $20 \sim 23 \text{ kN/m}^3$, 上台阶开挖宽度 $l=10.55 \text{ m}$, 高度 $f=3.2 \text{ m}$, $r=5.95 \text{ m}$, 根据松散荷载理论计算荷载 $q=111.96 \sim 128.75 \text{ kN/m}^2$ 。

根据钢架力学模型计算式 (4) 可以得到拱脚左侧的弯矩 $M_j=0$ 、轴力 $N_j=736.71 \sim 847.19 \text{ kN}$ 、剪力 $Q_j=135.63 \sim 155.97 \text{ kN}$ 。

根据锁脚锚杆力学分析模型, 锚杆体的水平夹角为 $\alpha=5^\circ$, 轴力 N_j 的水平夹角 $\beta=62.5^\circ$, 根据式 (5)、(6) 可得沿锚杆体轴向的力 $N'=-281.45 \sim -323.65 \text{ kN}$, 垂直于锚杆体轴向的力 $Q'=694.21 \sim 798.32 \text{ kN}$ 。

锚杆体的直径 D 取钻孔直径 0.042 m , 锚杆直径 $d=0.022 \text{ m}$, 锚杆的弹性模量取 210 GPa , 砂浆的弹性模量取 15 GPa , 根据等效换算法得锚杆体弹性模量 $E_D=68.5 \text{ GPa}$ 。围岩的弹性模量 $E=7 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu=0.4$ 。围岩和水泥砂浆的极限黏结强度 $\tau_{\max}=0.9 \text{ MPa}$ 。由式 (13) 可以得到锚杆体的极限拉力或压力 $N'_{\max}=90.3 \text{ kN}$ 。

首先分析锚杆体上的轴力 N' , $N'=-281.45 \sim -323.65 \text{ kN}$, 为压应力, 且 $N' > N'_{\max}$, 则锚杆体和围岩之间开裂, 锚杆体端头提供反作用力 T' , 锚杆体的稳定为压杆稳定问题。由于围岩的弹性刚度 k 远小于锚杆体的弹性刚度, 因此在轴力 N' 的作用下, 锚杆体不产生压应变。

然后分析锚杆体上的剪力 Q' 和弯矩 M_j 。根据式 (12), 将 $Q'=694.21 \sim 798.32 \text{ kN}$, $M_j=0$ 代入, 可计算得到沿锚杆体上的弯矩分布如图 18 所示。

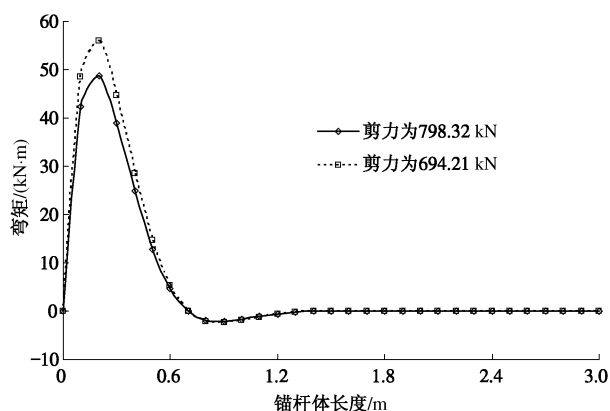


图 18 锚杆体弯矩分布

Fig. 18 Moment distribution of bolt

根据锚杆体的弯矩可以推算出锚杆产生的拉应变, 将剪力取最大值 798.32 kN 时的锚杆拉应变和实测锚杆应变进行对比, 如图 19 所示。

由图 19 可以看出: 在 0.6 m 位置处, 锚杆应变计算值要大于实测值, 这是由于计算值是在理想状态下

得到的, 认为钢架承受全部围岩荷载, 必然导致计算值偏大; 在其余位置处, 锚杆应变计算值和实测值相差不大; 实测值和计算值规律一致, 在距离孔口 0.6 m 位置处锚杆应变最大, 随着距离孔口的距离增大, 锚杆应变逐渐变小。

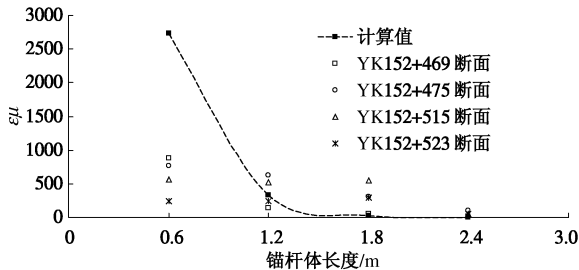


图 19 计算和实测锚杆应变对比

Fig. 19 Comparison between calculated and measured bolt strain

5 结 论

(1) 在软弱岩层隧道中, 拱部锚杆受力较小, 最大应力仅为锚杆极限应力的 11.5%, 作用不大; 锁脚锚杆受力较大, 最大应力达到锚杆极限应力的 55.4%, 作用很大。因此, 软弱岩层隧道中应该取消拱部锚杆, 加强锁脚锚杆。

(2) 软弱岩层隧道中, 锁脚锚杆受长度和角度限制, 并不能发挥锚固作用。锁脚锚杆端头和钢架焊接, 受到钢架施加的轴力、剪力和弯矩。锁脚锚杆深入到岩体中的部分在端头力作用下会产生弯曲, 而岩体对其又产生反作用力。

(3) 采用结构力学和弹性地基梁的方法, 建立了钢架和锁脚锚杆力学计算模型。应用该模型对隧道测试断面处的锁脚锚杆受力进行了分析计算, 给出了锚杆弯矩分布图。根据弯矩推算锚杆应变值, 并与实测值进行了对比, 结果表明实测值和计算值规律一致, 在距离孔口 0.6 m 位置处锚杆应变最大, 随着距离孔口的距离增大, 锚杆应变逐渐变小。

参考文献:

- [1] KOTOGIANNI V, PAPANTONOPOULOS C, STIROS S. Delayed failure at the messochora tunnel, greece[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(3): 232 - 240.
- [2] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖法技术通论[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 2004. (WANG Meng-shu. An introduction of shallow tunnel construction in underground engineering[M]. Hefei: Anhui Education Press, 2004. (in Chinese))
- [3] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003. (GUAN Bao-shu. Construction points set in tunnel engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [4] 关宝树, 赵 勇. 软弱围岩隧道施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (GUAN Bao-shu, ZHAO Yong. Tunnel construction technology in weak surrounding rock[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [5] HOEK E. Tunnel support in weak rock[C]// Symposium of Sedimentary Rock Engineering, Taipei, 1998: 1 - 12.
- [6] 陈建勋, 杨善胜, 罗彦斌, 等. 软弱围岩隧道取消系统锚杆的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 15 - 20. (CHEN Jian-xun, YANG Shan-sheng, LUO Yan-bin, et al. Field test research on elimination of systematic rock bolts in weak rock tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 15 - 20. (in Chinese))
- [7] 陈建勋, 乔 雄, 王梦恕. 黄土隧道锚杆受力与作用机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1690 - 1697. (CHEN Jian-xun, QIAO Xiong, WANG Meng-shu. Stress and action mechanism of rock bolt in loess tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1690 - 1697. (in Chinese))
- [8] 陈建勋, 王 超, 罗彦斌, 等. 高含水率土质隧道不设系统锚杆的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(5): 815 - 819. (CHEN Jian-xun, WANG Chao, LUO Yan-bin, et al. Experimental research on high-water-content soil tunnel without systematic bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(5): 815 - 819. (in Chinese))
- [9] 徐 晨. 软弱围岩隧道中锁脚锚杆支护效果研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. (XU Chen. Study on feet-lock bolt supporting effect for tunnels in soft surrounding rock[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese))
- [10] 张 涛. 软弱围岩隧道锁脚锚杆(管)支护特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2011. (ZHANG Tao. Study on supporting characteristic of tunnel feet-lock bolt(pipe) in weak surrounding rock[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese))
- [11] BOBET A, EINSTEIN H H. Tunnel Reinforcement with Rockbolts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(1): 100 - 123.
- [12] 黄明琦. 锁脚锚杆作用机理及其在厦门翔安隧道中的应用研究[J]. 铁道建筑技术, 2009(7): 86 - 89. (HUANG Ming-qi. Feet-lock bolt mechanism and its application in Xiamen Xiang'an Tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2009(7): 86 - 89. (in Chinese))