

岩石高边坡一种预应力锚索框架型地梁的内力计算

A calculation method for internal force of prestressed anchor-rope and frame beam on foundation on high rock slope

肖世国, 周德培

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 根据岩石高边坡的力学特点, 提出了预应力锚索框架型地梁的内力计算应分锚索张拉阶段和工作阶段分别进行, 同时框架型地梁的计算宜适当拆分成单片梁的形式计算, 在张拉阶段和工作阶段可分别按 Winkler 地基模型和连续梁的方法计算地梁内力, 并以工程实例说明了具体的计算过程。

关键词: 岩石; 高边坡; 预应力锚索; 框架型; 地梁; 内力

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0479-04

作者简介: 肖世国(1973-), 男, 辽宁东港人, 博士研究生, 从事岩土体大变形理论与实践的研究工作。

XIAO Shi-guo, ZHOU De-pei

(The Civil Engineering School of Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: According to the mechanical characteristic of high rock slope, calculation of internal force of prestressed anchor-rope & frame beam on foundation should be respectively completed on pulling anchor-rope status and long term working status on high rock slope. Frame beam on foundation can be split into several single beams for the purpose of calculation. The single beams can be analyzed on the basis of Winkler model on the pulling anchor-rope status. However, The single beams may be analyzed on the basis of continuous beam model on the long term working status. The calculation procedure is provided by a practical project in this paper.

Key words: rock; high slope; prestressed anchor-rope; frame; beam on foundation; internal force

1 引言*

在边坡工程中常遇到的岩石高边坡, 由于岩石受结构面的切割, 常使坡体的力学分析变得比较复杂, 因而寻求合理有效的岩石高边坡支挡加固措施在工程实践中常显得尤为重要。预应力锚索地梁结构是岩石高边坡支挡加固的一种有效结构, 尤其近几年更是广泛地用于工程实际中, 它结构比较简单, 易于施工, 而且提供的挡护力大, 是加固岩石高边坡的一种很有效的方法。根据地梁的不同型式, 可分为单梁型(单片顺坡纵梁)和框架型(纵梁与横梁共同组成的框架结构)两种。框架型地梁通过框架网格结构在合理加固坡体的同时, 能够更加有效地对坡面实施防护, 而且这种结构可以同生态护坡技术相结合, 在框架内进行植被护坡, 达到绿化防护的目的, 因此框架型地梁结构更具有综合效用, 值得推广。然而目前很多设计部门在设计此类结构时, 一般都采用经验类比法来估算地梁内力, 或者简单地按一般建筑基础的方法^[1~4]来计算地梁内力, 没有较为严格地根据岩石高边坡工程中预应力锚索框架型地梁的具体受力特点来设计计算地梁, 其不合理性及弊端是显而易见的。本文将按文克勒尔(Winkler)假定和连续梁方法分锚索张拉阶段与工作阶段来计算地梁内力。

2 地梁型式与基本假定

2.1 地梁型式

地梁结构型式如图1所示, 由两片纵梁和两片横梁组成的框架型结构。在一个框架单位中, 每片纵梁的中点以及纵梁与横梁交点处设有锚索, 横梁对称布置于纵梁两侧。在纵、横梁交点处, 纵梁有一定的外延长度, 而横梁则没有外延。

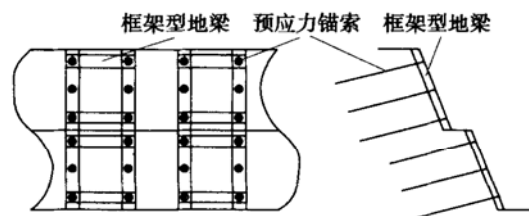


图1 框架型地梁示意图

Fig. 1 Structure of prestressed anchor-rope & frame beam on foundation

2.2 基本假定

①当地梁主动作用压力于坡体时, 坡体对地梁的反作用力按 Winkler 假定计算, 即 $p = ky$, 其中 p 为坡体反压应力, k 为相应的地基弹性系数, y 为坡面在地

梁压力作用下产生的垂直于地梁底面方向的位移。②不考虑纵梁和横梁的扭转效应,即在纵、横梁交点处简化为铰支连接。③不讨论框架结构与岩体地基的相对刚度对地基压力的影响,认为框架地梁具有一定的刚度。

3 受力分析

基于纵、横梁之间为铰支连接的假设,将地梁框架“分解”开,拆成纵梁和横梁分别单独进行受力分析。鉴于岩石高边坡工程的特点,分锚索张拉阶段和工作阶段分别进行分析。

3.1 张拉阶段

预应力锚索地梁的受力状态首先是在锚索张拉阶段,为简化分析,这里所说的张拉阶段是指张拉刚刚完成的阶段。此时,作用于纵、横地梁上的外力主要有:锚索张拉力、梁下岩体的反压力、地梁重力、梁底摩擦力。由于后两者相对于前两者非常小,故这里只考虑作用于地梁上的两个主要外力:锚索张拉力 T 、梁下岩体的反压力 $q(x)$ 。于是,这时的地梁在形式上可以看成是一个倒扣在坡面上的连续梁,锚索抑制点即为连续梁的“支座”,而在连续梁的下表面则作用着指向梁的地基反压力,纵梁和横梁的受力模式如图 2 所示。

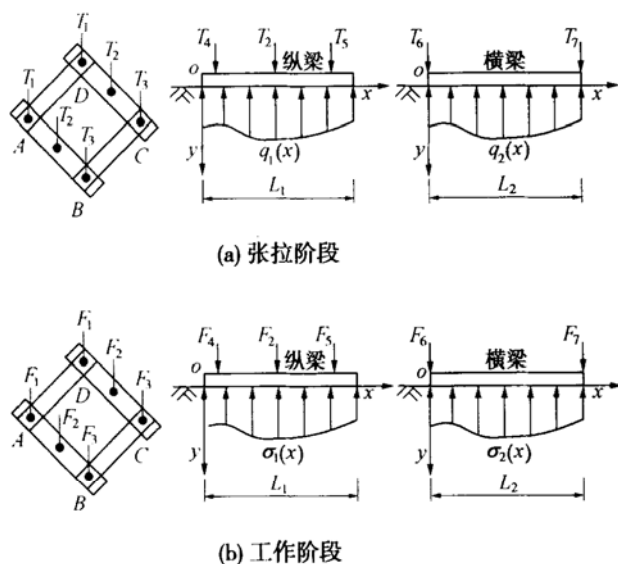


图 2 地梁受力模式图

Fig. 2 Mechanical model of frame beam on foundation

3.2 工作阶段

当锚索预张拉完成并锚固抑制稳定后,预应力锚索地梁便逐渐地进入工作阶段,此阶段是预应力锚索地梁结构的主要受力阶段。这时,作用于地梁上的主要外力虽然仍是锚索张拉力和梁下岩体的压力,但这时梁下岩体的压力的含义是不同的。在张拉阶段,地基反压力主要是由地梁主动压岩体而产生的被动岩体

压力。在工作阶段,由于随着坡体的滑移变形,若没有锚索存在,则地梁会随着坡面岩体一起滑动,但若有锚索存在,由于锚索紧拉地梁而抑制地梁滑动,进而也就抑制坡体滑移,于是便起到加固坡体的作用,所以此时地基反压力则主要是来自地梁下岩体变形压地梁而形成的主动岩体压力。便于简化分析,这里假定坡体滑移方向与坡面外法线方向在水平面上的投影相一致。于是,对于一般硬质岩石边坡,作用于地梁上的主动岩体压力可根据边坡整体稳定分析来确定,如:采用极限平衡法;当坡体主要为软质破碎岩石时,主动岩体压力则可采用滑坡稳定分析中的传递系数法确定,或者近似地按主动土压力理论计算。但是,不论哪种岩石边坡,当施工过程中有现场监测条件时,则应以现场监测资料为主要参考来确定主动岩体压力。锚索张拉力在工作阶段也与前一阶段有所不同,由于地基反力发生变化,所以锚索抑制力也必然发生变化。也就是说,在张拉阶段,作用于地梁上的两个主要外力中,锚索张拉力(在紧固锚头处,下同)是已知的,地基反压力是未知待求的;在工作阶段,地基压力即主动岩体压力 $\sigma(x)$ 则是已知的,而锚索张拉抑制力 F 却是未知待求的。工作阶段的地梁可直接按照倒扣在坡面上的连续梁来计算,对于纵梁来说,是一个超静定结构,而对横梁来说则为一个静定结构,两者受力模式如图 2 所示。

4 计算方法

4.1 张拉阶段

可以把框架型地梁拆分成纵梁和横梁分别进行研究。不论是纵梁还是横梁,将其置于坡面上,在外力作用下地梁-地基系统都必须满足 2 个力学相容关系,即:静力平衡和变形协调。具体针对地梁来说,首先在各外力作用下要满足静力平衡条件;其次在外力作用下要使地梁底面与坡面始终保持接触,即地梁产生的挠度要等于坡面产生的相应方向的位移。由于纵梁与横梁组合成整体框架型式,所以还应满足的一个变形协调条件就是,在纵、横梁交点处(如 A 点,以下均以此点为例)纵梁挠度 ω_1 应与横梁挠度 ω_2 相等。从这些基本的力学条件出发,将纵梁与横梁分别进行计算。在张拉阶段,锚索预张拉力 T_1 是已知的,在纵、横梁交点处分别作用于纵、横梁的压力 T_4 、 T_6 可视作由张拉力 T_1 分别分配而来。于是由力的平衡和变形协调可以得到方程:

$$T_4 + T_6 = T_1 \quad (1)$$

$$\omega_1 = \omega_2 \quad (2)$$

对于单独的纵梁(横梁),在梁上只受集中力作用下,根

据 Winkler 假定以及基本力学相容关系,可以得到梁挠度的表达式^[5]。这样,结合此处纵梁与横梁的具体情况,式(2)又可以进一步写成

$$T_4 \alpha_1 Z_{x1} / (2kb_1) = T_6 \alpha_2 Z_{x2} / (2kb_2) \quad (3)$$

式中 k 为地基弹性系数; b_1, b_2 分别为纵、横梁的宽度; α_1, α_2 分别为纵、横梁的地基柔度系数, $\alpha_1 = \sqrt[4]{kb_1/(4EI_1)}$, $\alpha_2 = \sqrt[4]{kb_2/(4EI_2)}$, 其中 EI_1, EI_2 分别为纵、横梁的抗弯刚度; Z_x 为计算函数, $Z_x = 1 + e^{-2\alpha}(2\cos^2\alpha + 1 - \sin 2\alpha)$; x_1, x_2 分别为交点处 T_4, T_6 至相应梁端的距离。

这样,联立式(1),(3),便可解出 T_4 和 T_6 :

$$T_4 = (\alpha_2 Z_{x2} / b_2) / (\alpha_1 Z_{x1} / b_1 + \alpha_2 Z_{x2} / b_2) T_1 \quad (4)$$

$$T_6 = (\alpha_1 Z_{x1} / b_1) / (\alpha_1 Z_{x1} / b_1 + \alpha_2 Z_{x2} / b_2) T_1 \quad (5)$$

于是纵梁、横梁的挠度 $\omega(x)$ 、弯矩 $M(x)$ 、剪力 $Q(x)$ 以及相应地基反力 $q(x)$ 可根据相应梁的计算类型都能得到解答^[5]。具体计算操作时,可编制电算程序完成计算。

4.2 工作阶段

在此阶段,同样将框架拆分成纵梁和横梁分别计算。这时,由于作用于地梁上的地基压力为已知,而锚索张拉力变为未知,所以计算地梁的问题就可以看成求解倒置于坡面上的连续梁的内力与支座反力(锚索张力)的问题。对于纵梁,由于中间设有锚索,所以其计算模型应是两侧外伸的两跨超静定连续梁;对于横梁,则可看成单跨简支梁,纵、横梁的计算模式如图2所示。具体求解时,纵梁可采用力矩分配法,首先求出弯矩,进而可求出剪力、支座反力等;横梁则直接按简支梁易求解得出梁的内力与支座反力。

5 工程实例

京珠高速公路粤北段某工点处的岩石高边坡拟采用预应力锚索框架型地梁结构来加固坡体。坡体表面为碎石土,其下主要为砂岩和灰岩层,岩层产状为 $200^\circ \sim 240^\circ \angle 40^\circ \sim 50^\circ$ 。坡高约 40 m,在近坡顶处开始开挖坡体,共分 4 级开挖,在 3 级坡及以下开挖坡率为 1:0.75。纵梁长 L_1 为 12.5 m,高 h_1 为 0.6 m,宽 b_1 为 0.8 m,设 3 孔锚索,在中心部位设 1 处,其余 2 处分别设在距梁左、右端各 2.5 m 处,并在此两点分别设置横梁连接两纵梁,横梁长 L_2 为 4 m,宽 b_2 为 0.8 m,高 h_2 为 0.6 m,并且无外伸。锚索预张拉力均为 500 kN。框架地梁由钢筋混凝土制成,所采用的混凝土的弹性模量 E_h 为 2.55×10^4 MPa。现以 2 级坡为例,分张拉阶段和工作阶段两种情况来计算框架地梁的内力。计算横断面如图 3 所示。

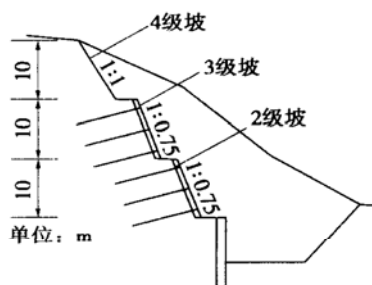


图3 工程实例横断面示意图

Fig. 3 Cross section of a practical project

5.1 张拉阶段

首先计算交点处纵、横梁所受的压力 T_4, T_6 。由式(4),(5)可以算出 T_4, T_6 , 在这里, $I_1 = b_1 h_1^3 / 12 = 0.0144 \text{ m}^4$, $I_2 = b_2 h_2^3 / 12 = 0.0144 \text{ m}^4$, 地梁的弹性模量 E 取为混凝土弹性模量 E_h 的 0.8 倍计算, 则 $E = 0.8 E_h = 2.04 \times 10^4$ MPa。地基弹性系数 k 取为 20×10^4 kN/m³, 于是可算得纵、横梁的地基柔度系数分别为 $\alpha_1 = 0.607 \text{ m}^{-1}$, $\alpha_2 = 0.607 \text{ m}^{-1}$ 。同时这里 $x_1 = 2.5 \text{ m}$, $x_2 = 0$ 。这样,将各参数代入相应式中,算得 $T_4 = 396.57 \text{ kN}$, $T_6 = 103.43 \text{ kN}$ 。然后,再根据单片地梁在集中力作用下的计算公式^[5]并运用叠加原理就可以得到纵梁、横梁的挠度 $\omega_1(x), \omega_2(x)$, 弯矩 $M_1(x), M_2(x)$, 剪力 $Q_1(x), Q_2(x)$ 以及地基反力 $q_1(x), q_2(x)$ 。在计算时,纵梁与横梁的坐标原点都取在两者交点处的各自梁端,而沿各自梁纵轴线方向为计算座标 x 的正方向。张拉阶段纵梁(以左侧梁为例)与横梁(以上侧梁为例)的弯矩 M 、剪力 Q 与地基压力 q 的计算结果如图 4 中所示。

5.2 工作阶段

首先要确定作用于纵、横地梁上的主动岩体压力 $\sigma(x)$ 。在这里,为简化计算,近似认为作用于纵、横地梁上的主动岩体压力 $\sigma(x)$ 成线性分布,计算简图如图 5 所示。根据现场监测资料并结合地应力场判断分析后得到 2 级坡坡顶与坡底的主动岩体压力分别为 $\sigma_1 = 66 \text{ kPa}$, $\sigma_2 = 99 \text{ kPa}$ 。这样,上侧横梁可看成受均布线荷载 $q_a = 58.02 \text{ kN/m}$ 作用的简支梁;下侧横梁可看成受均布线荷载 $q_b = 73.92 \text{ kN/m}$ 作用的简支梁;每片纵梁可看成受梯形分布力荷载作用的两跨外伸连续梁,在上、下两端梯形分布力荷载分别取为 $q_{a1} = 52.8 \text{ kN/m}$, $q_{b1} = 79.2 \text{ kN/m}$ 。然后可分别计算纵梁、横梁内力,纵梁计算可采用力矩分配法,横梁则直接按简支梁计算。此时在纵、横梁交点处,锚索张力为纵、横梁“支座反力”的和,所以此阶段同一竖列的 3 根锚索的张力各不同,由上到下依次分别为 388.74, 167.05, 533.21 kN。工作阶段纵梁、横梁的弯矩 M 、剪力 Q 与

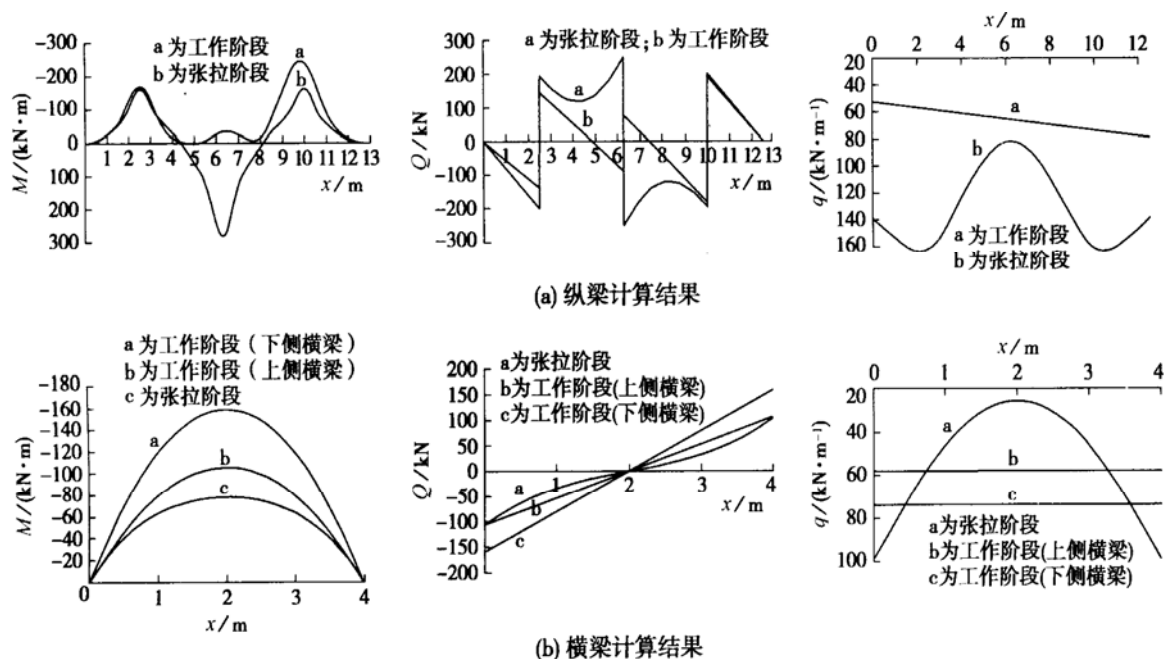


图4 工程实例计算结果

Fig. 4 Calculated results of a practical project

地基压力 q 的计算结果如图4所示。

从图4中可以看出,纵、横梁在工作阶段和张拉阶段的内力值在大小和方向上都存在一定的差异,因此为了得出合理的地梁设计结构,就必须综合考虑这两个阶段的内力分析结果,即工作阶段和张拉阶段都需要进行内力计算。应该注意的是,在传统的此类问题计算中,并未根据工程实际的力学特点把地梁内力计算分为工作阶段和张拉阶段分别分析,而是仅考虑了相当于本文中工作阶段的情况,再由此工程实例同样可以看出,以该计算结果来设计地梁显然是片面不足的,所以本文的计算方法是更为符合实际的。

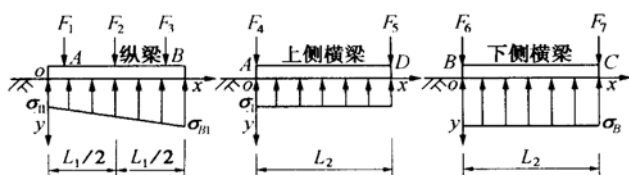


图5 工程实例工作阶段计算图示

Fig. 5 Calculation model of practical project on long term working status

6 结论及建议

(1) 预应力锚索框架型地梁计算时宜拆成单片梁的形式分别计算,根据岩石高边坡的力学特点,应分锚索张拉阶段和工作阶段分别计算地梁内力,并在此基础上综合比较分析,进行合理结构设计。

(2) 在张拉阶段,将地梁视为在上部集中力(锚索预张力)作用下置于坡面上的连续梁,此时锚索预张力已知,而地基反力未知,可按 Winkler 地基模型计算地梁内力。

(3) 在工作阶段,将地梁视为在线分布力作用下倒置于坡面上的连续梁,此时梁下主动岩体压力已知,而锚索张拉力未知,可按力矩分配法等计算地梁内力。

(4) 工作阶段作用于地梁上的主动岩体压力宜通过现场监测分析确定,在无监测资料时,可以根据岩体种类由边坡整体稳定分析或近似按主动土压力理论来确定。当然,在具体处理过程中,还会涉及到锚索预应力损失等问题,就需要根据一定的经验来处理了。

参考文献:

- [1] Yin Jiar-Hua. Closed-form solution for reinforced Timoshenko beam on elastic foundation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(8): 868-874.
- [2] Gendy A S. Effective modeling of beams with shear deformations on elastic foundation[J]. Structural Engineering and Mechanics, 1999, 8(6): 607-622.
- [3] Liu C H. Analysis of a cracked beam-column on an elastic foundation[J]. International Journal of Computer Applications in Technology, 2000, 13(6): 273-279.
- [4] 铁道部第三勘测设计院. 桥梁地基和基础[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. 252-307.
- [5] 吴湘兴, 杨小平, 温耀霖, 等. 建筑地基基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1997. 276-281.