

预应力锚索框格梁体系加固破碎岩质边坡 合理间距研究

吕庆, 孙红月, 尚岳全, 朱晗迺
(浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 以金丽温高速公路 K81 边坡为例, 建立分析计算的力学模型, 根据现场试验数据, 通过数值模拟的方法, 研究预应力锚索张拉在破碎岩质边坡坡面的压缩变形和附加应力规律, 并以此为依据探讨了预应力锚索合理间距的问题。研究表明: 对于破碎岩质边坡锚固工程, 考虑到边坡岩体变形模量小, 应采用小张拉力的预应力锚索, 以 500~750 kN 张拉力为宜; 为减少相邻锚索张拉的影响, 锚索间距不应太小; 为避免锚索之间出现应力跌落, 锚索间距也不能过大, 以 4~6 m 为宜。

关键词: 边坡工程; 滑坡加固; 预应力锚索; 破碎岩质边坡; 数值模拟; 锚索间距

中图分类号: TD 824

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)01 - 0136 - 05

STUDY ON PROPER INTERVAL OF PRESTRESSED CABLES IN REINFORCING CRUSH ROCK SLOPE

LU Qing, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan, ZHU Han-ya

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Based on a case of crush rock slope K81 in Jinhua—Lishui—Wenzhou Highway, an analytical mechanical model was developed. According to field testing data, the compression deformation and subsidiary stresses of the crush rock slope under prestressed cables anchorage forces were analyzed by numerical simulation. The results are shown as follows: (1) it is suggested that light-tonnage cables should be employed in crush rock slope reinforcing engineering in consideration of low deformation modulus of the slope. The tensile force of 500 - 750 kN can be adopted; (2) the range interval of the cables should not be too small for the reduction of adjacent cable stretch-draw influence. On the other hand, the interval should not be too large to avoid subsidiary stresses looseness. The proper interval between cables in crush rock slope should be 4 - 6 m.

Key words: slope engineering; landslide reinforcement; prestressed cable; crush rock slope; numerical simulation; cable interval

1 引言

预应力锚索框格梁体系作为一种新型的边坡加

固结构, 近年来被广泛地应用于破碎岩质边坡甚至是土质边坡的加固工程中^[1, 2]。作为一种主动式的加固方法, 预应力锚索框格梁体系通过锚索的预应力将滑动的坡体与稳定的基岩连接为一体, 增加了

收稿日期: 2004 - 09 - 03; **修回日期:** 2005 - 03 - 01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40372118)

作者简介: 吕庆(1978 -), 男, 2001年毕业于浙江大学建筑工程学院结构工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土体稳定性方面的研究工作。
E-mail: lvqing@zju.edu.cn.

岩体各层面的抗滑力, 同时又通过坡面上的框格梁将各个锚索有效地连成一个整体, 形成一个由表及里的被覆式加固体系, 从而达到防止边坡整体失稳的目的。

在边坡预应力锚索框格梁加固结构体系方面, 近年来已开展了大量的研究工作, 已有的研究主要集中在锚固机制研究^[1, 3~5]、锚索预应力损失研究^[6]以及锚索框格梁受力分析研究^[7~9]等几方面。对设计上最为关心的锚索的合理间距与框格梁的合理尺寸等问题研究得较少。目前, 预应力锚索框格梁结构的设计, 大多是依靠设计人员经验, 缺乏理论和规范的指导, 具有一定的盲目性。

锚索间距是边坡锚固工程设计中首先要确定的设计参数。工程实践中锚索间距主要依据工程地质条件、锚固力分区、锚索长度以及单索锚固力来确定, 同时要综合考虑内外锚固段的群锚效应, 总的原则是: 在外锚固段, 应尽量减少后张拉锚索引起的压缩变形对相邻锚索的影响; 在内锚固段, 应不至于产生很大的拉应力集中, 避免在内锚固段形成整体拉裂面, 从而使岩体向临空面方向的位移增加, 造成锚索失效。

对于破碎岩质边坡的锚固工程来说, 在总的锚固力确定后, 应选择小吨位的锚索, 一般采用 500, 750 kN 张拉力预应力锚索^[1]。这样一方面可减少表层坡体的压缩变形, 使锚索群加固坡面的面积增大, 连同框格梁和外锚墩的作用, 在整体上对表层坡体形成被覆式的约束抑制作用; 另一方面, 如果采用大吨位锚索, 要求框格梁和垫墩的尺寸可能过大, 而锚索根数减少, 锚索和框格梁的间距增加, 可能会使锚索之间形成应力跌落区域, 达不到对坡体和滑面的整体锚固效果, 失去群锚的作用。本文以金丽温高速公路 K81 边坡预应力锚索加固工程为例, 在现场实测数据的基础上, 通过数值模拟的方法, 讨论了预应力锚索框格梁体系加固破碎岩质边坡的合理间距问题, 可为类似工程提供参考。

2 工程概况与计算模型

金丽温高速公路 K81 边坡地处浙南丘陵山区。山体自然坡度为 $35^{\circ}\sim 42^{\circ}$, 边坡位于公路左侧, 而公路右侧为山间河流。该路段为半挖半填路段, 边坡最大开挖高度约 98 m。边坡区出露的地层为上侏罗统熔结凝灰岩, 岩性单一。受区域性断裂及附近次级断层的共同影响, 边坡区岩体的完整性差, 属

于破碎岩质边坡, 破碎岩体厚度最大一般为 20~25 m。设计采用预应力锚索框格梁体系进行加固。

考虑到计算规模和计算精度的问题, 计算模型取 $20\text{ m}\times 20\text{ m}\times 40\text{ m}$ 的长方体, 预应力锚索框格梁布置在坡面中心位置, 其计算模型如图 1 所示。

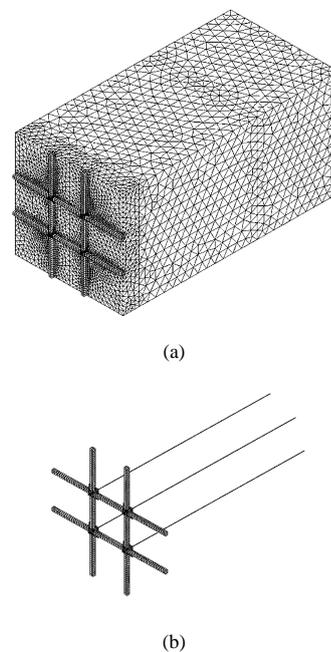


图 1 锚索间距 6 m 时的计算模型

Fig.1 Numerical model with cable interval of 6 m

在模型的上下边界和两侧边界上施加法向位移约束, 在后边界上施加水平和竖直方向的位移约束, 坡面上保持自由。计算模型选择六节点四面体实体单元模拟坡体和混凝土锚墩和框格梁。通过让锚墩、框格梁底面节点和坡面节点的自由度耦合, 以保持锚墩、框格梁和边坡坡体的变形协调。选择二节点杆单元模拟预应力锚索, 实际工程中预应力锚索长 40 m, 其中内锚固段长 9 m, 计算模型中锚索长度取为 35 m。杆单元在外锚墩处与外锚墩表面节点自由度耦合, 而在内锚固段与基岩实体单元节点自由度耦合, 并通过初始应变值来模拟预应力张拉。模型共采用了 70 913 个单元, 15 592 个节点, 并采用 ANSYS5.7 分析软件。

计算模型涉及 4 种材料, 即破碎岩质滑体、基岩、混凝土框格梁及垫墩、预应力锚索。考虑到混凝土和预应力锚索材料的性质稳定和变化较小, 本次计算分析中直接按照相关资料和以往工程的经验取用这 2 种材料的参数。破碎岩质滑体和基岩的物理学参数根据室内外岩石力学试验、声波探测和依据预应力锚索张拉过程中现场原位测试数据反分

析等方法综合确定，具体取值见表 1。

表 1 计算模型物理力学参数取值
Table 1 Physico-mechanical parameters of the calculation model

材料	变形模量 E/MPa	泊松比 ν	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
基岩	5 000	0.23	23
破碎岩体坡体	60	0.31	17
混凝土	30 000	0.22	25
预应力锚索	195 000	0.30	78

在上述模型的基础上，首先计算了 2 种常用的预应力吨位下，不同模量坡体的压缩变形规律；然后分析了锚索间距的变化对坡体附加应力的影响规律。

3 坡体表面的压缩变形规律

根据现场试验数据，对锚索张拉后岩体压缩量进行分析，其结果表明，随着张拉荷载的增加，边坡岩体压缩效应增强，压缩范围扩大。典型锚索压缩变形影响半径如图 2 所示。已有的研究结果^[10]表明，岩体质量对压缩变形的范围和大小影响很大。

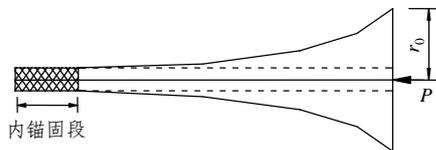


图 2 典型锚索压缩变形影响半径示意图
Fig.2 Plan of typical compression influence radius

图 3 为典型锚索压缩变形影响半径 r_0 与岩体弹性模量 E 关系曲线^[10]。从图 3 中可以看出，岩体弹性模量越低，则锚索张拉引起的坡面压缩变形范围越大。

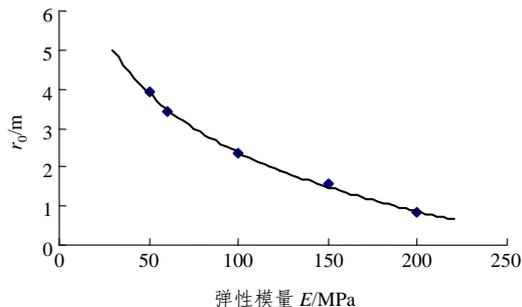


图 3 压缩变形影响半径 r_0 与岩体弹性模量 E 关系曲线
Fig.3 Relationship between compression influence radius r_0 and rock mass deformation modulus E

本次研究在控制相邻锚索张拉引起的预应力损失(也就是控制压缩变形影响半径边缘的压缩量)的基础上，重点研究了 500 和 750 kN 两种张拉力下，不同弹性模量($E = 50, 100, 150$ 和 200 MPa)的坡面压缩变形值的大小。考虑超张拉 10%，实际施加的锚索的张拉力为 550 和 825 kN。在没有预应力损失控制标准的前提下，用 1 mm 的压缩变形作为压缩变形影响半径的控制标准，即认为相邻锚索张拉引起的 1 mm 压缩变形量是可以被忽略的，且不考虑相邻锚索的张拉影响，从而可以确定为了提高群锚在坡体表层的加固效果，锚索安装的间距 D 应不小于 $2r_0$ 。

计算结果表明，压缩变形影响半径 r_0 和岩体弹性模量 E 成对数变化关系(见图 3)，并可用下式拟合：

$$D = 2r_0 = \alpha \ln E + \beta \tag{1}$$

式中： α, β 均为与锚索力相关的锚索张拉影响范围分布系数，可按照表 2 中的数据取用。

表 2 锚索张拉影响范围分布系数 α, β

Table 2 Distributing coefficients of α and β of tensile range of influence of the cable

预应力/kN	α	β/m
500	-2.324 0	12.06
750	-2.190 1	12.46

按照式(1)分析金丽温高速公路 K81 边坡的实际工程，弹性模量 $E = 60 \text{ MPa}$ ，预应力锚索张拉力取 750 kN，计算可得压缩变形影响半径为 3.49 m，实际工程中锚索间距横向为 4 m，纵向为 6 m。施工过程中，对相邻锚索张拉过程影响的监测结果表明，K81 边坡锚固工程中，相邻的锚索张拉影响很小，图 4 为张拉力 825 kN 下现场实测位移和反分析计算位移的比较。从图 4 中实测数据可以看出，锚索张

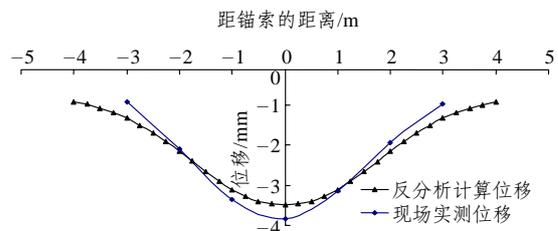


图 4 张拉力 825 kN 下现场实测位移和反分析计算位移的比较
Fig.4 Comparison between testing data and back analysis value of frame beam deformation under tensile force 825 kN

拉在相邻锚索处引起的坡面压缩变形不到 1 mm, 这验证了式(1)的可靠性。

4 锚索间距对坡体附加应力的影响

锚索间距不能过大, 否则锚索之间会存在明显的应力跌落区, 达不到对坡体、滑面的整体锚固效果, 失去了群锚的作用。为了揭示锚索间距变化对坡体附加应力分布的影响规律, 在前面计算分析的基础上, 进一步分析了 3 种锚索间距(即 4, 6 和 8 m 间距)下的附加应力和压缩变形的分布规律, 其结果见图 5~9。

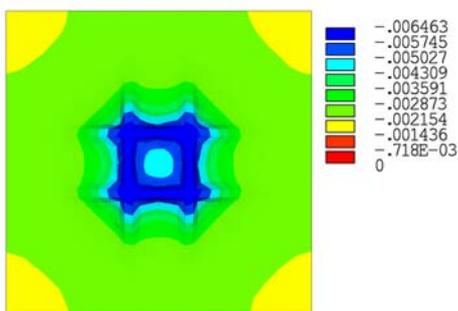


图 5 锚索间距为 4 m 时坡面压缩变形等值图(单位: m)
Fig.5 Contour map of slope surface deformation with cable interval 4 m(unit: m)

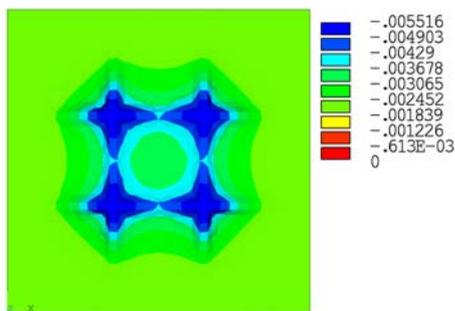


图 6 锚索间距为 6 m 时坡面压缩变形等值图(单位: m)
Fig.6 Contour map of slope surface deformation with cable interval 6 m(unit: m)

在锚索间距为 4 m 时, 锚索之间以及框格梁之间不存在由于应力分离造成的应力明显降低区, 在坡体表面, 锚索和框格梁之间的压缩变形是一致的, 锚索之间的框格梁呈现出刚性地基梁的变形特点, 锚索框格梁体系在张拉力的作用下在整体上对坡体有抑制作用(见图 4)。

当锚索间距为 6 m 时, 锚索以及框格梁之间有附加应力跌落的现象(见图 9), 825 kN 张拉力作用

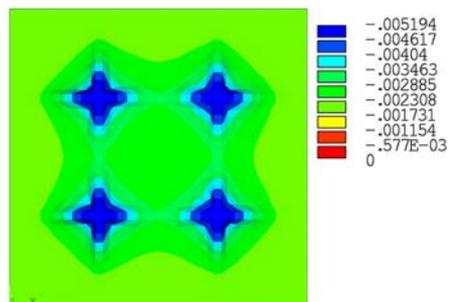


图 7 锚索间距为 8 m 时坡面压缩变形等值图(单位: m)
Fig.7 Contour map of slope surface deformation with cable interval 8 m(unit: m)

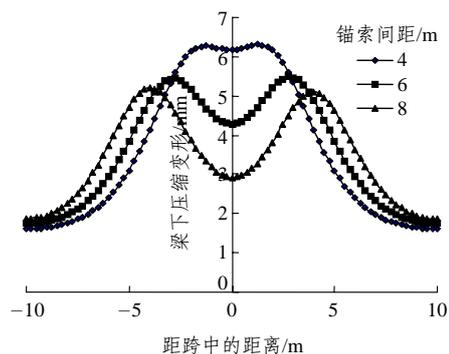


图 8 框格梁下不同锚索间距坡面压缩变形比较
Fig.8 Comparison curves of slope surface compression deformation under different cable intervals

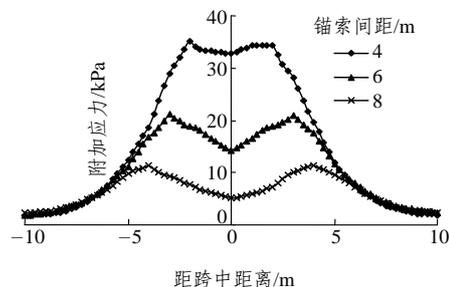


图 9 沿锚索 3 m 深度处不同锚索间距附加应力比较
Fig.9 Comparison curves of slope subsidiary stresses in 3 m-deep along the cable under different cable intervals

下, 在沿锚索 3 m 深度处, 框格梁跨中处的附加应力值为 21 kPa, 在 2 根框格梁之间的中间位置处, 附加应力为 14 kPa, 减少了 33%。从图 6 中也可以看出, 在锚索间距为 6 m 时, 框格梁下的坡面压缩变形已经不像 4 m 间距那样基本一致了, 而是呈现出 2 个和锚索相连的梁端压缩变形大, 框格梁跨中压缩变形稍小的特点, 这时的框格梁可以看成是弹性地基梁。另外, 从图 6, 8 中还可以看出, 在框格梁跨中和梁之间的坡面压缩变形明显减少。

当锚索间距为 8 m 时, 锚索及框格梁之间附加应力跌落的现象更加明显(见图 9), 825 kN 张拉力作用下, 同样在沿锚索 3 m 深度处, 框格梁跨中处的附加应力为 11 kPa, 在 2 根框格梁之间的中间位置处, 附加应力为 5 kPa, 减少达 55%。从图 8 中可以看出, 在锚索间距为 8 m 时, 框格梁对坡体的抑制作用已经大大削弱了。4 根张拉锚索下坡体的压缩变形和单墩垫墩下变形更为相似(见图 7, 8)。锚索之间框格梁的变形呈现出柔性长梁的变形特点, 说明这时框格梁体系已经达不到对坡体被覆式整体加固、抑制变形的效果了, 因而影响了群锚的作用效果。

5 结 语

锚索间距的确定应该综合考虑边坡坡体的岩体质量、锚索张拉的相互影响以及张拉力大小等综合因素的影响。

对于破碎岩质边坡, 考虑到边坡岩体变形模量小以及预应力张拉引起的坡体表层的压缩变形大, 所以应尽量采用小张拉力的预应力锚索。为了考虑相邻锚索张拉的相互影响, 引入了坡体压缩变形影响半径, 并在现场试验和数值分析的基础上给出了 500 和 750 kN 两种张拉力下的压缩变形影响半径的估算公式, 可供设计采用。

压缩变形影响半径给出的实际上是锚索间距控制的下限值, 锚索间距也不能过大。若锚索间距过大。会在坡体中形成明显的应力跌落区域, 达不到边坡加固的整体效果, 从而失去群锚的加固作用。

综上所述, 作者认为, 对于破碎岩质边坡以 500~750 kN 张拉力预应力锚索为宜, 且锚索间距以 4~6 m 为宜。

参考文献(References):

[1] 蒋忠信. 预应力锚索加固松散体滑坡的机制与实践[J]. 铁道工程学报, 1999, 61(1): 72 - 77.(Jiang Zhongxin. Mechanism and practice on reinforcing loose bed landslide with prestressed anchoring rope[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1999, 61(1): 72 - 77.(in Chinese))

[2] 吴金生, 吴和政, 王全成, 等. 框格梁式预应力锚索在公路滑坡治理中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(增): 308 - 312.(Wu Jinsheng, Wu Hezheng, Wang Quancheng, et al. The application of framed prestressing anchor cable to the treatment of highway landslide[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and

Control, 1998, 9(Supp.): 308 - 312.(in Chinese))

[3] 丁秀丽, 盛 谦, 韩 军, 等. 预应力锚索锚固机制的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 980 - 988.(Ding Xiuli, Sheng Qian, Han Jun, et al. Numerical simulation testing study on reinforcement mechanism of prestressed anchorage cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 980 - 988.(in Chinese))

[4] 李 宁, 韩 焜, 陈飞熊. 预应力群锚加固机制数值试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 60 - 66.(Li Ning, Han Xuan, Chen Feixiong. Numerical model test on strengthening mechanism of prestressed bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(5): 60 - 66.(in Chinese))

[5] 朱杰兵, 韩 军, 程良奎, 等. 三峡永久船闸预应力锚索加固对周边岩体力学性状影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 853 - 857.(Zhu Jiebing, Han Jun, Cheng Liangkui, et al. Research on rockmass properties near anchor with prestressing for TGP's permanent shiplock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 853 - 857.(in Chinese))

[6] 张宏博, 李英勇, 宋修广. 边坡锚固工程中锚索预应力的变化研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2002, 32(6): 574 - 577.(Zhang Hongbo, Li Yingyong, Song Xiuguang. On prestress variation of cable in reinforcement engineering of slope[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2002, 32(6): 574 - 577.(in Chinese))

[7] 丁秀美, 黄润秋, 臧亚君. 预应力锚索框架作用下附加应力的 FLAC^{3D} 模拟[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(4): 339 - 345.(Ding Xiumei, Huang Runqiu, Zang Yajun. Three-dimensional simulation with FLAC^{3D} on the subsidiary stress induced by frame beam with prestressing cable[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science and Technology), 2003, 30(4): 339 - 345. (in Chinese))

[8] 杨 明, 胡厚田, 卢才金, 等. 路堑土质边坡加固中预应力锚索框架的内力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 383 - 1 386.(Yang Ming, Hu Houtian, Lu Caijin, et al. Calculation of internal forces for prestressed anchor cable frame used in reinforced roadcut soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1 383 - 1 386.(in Chinese))

[9] 肖世国, 周德培. 岩石高边坡一种预应力锚索框架型地梁的内力计算[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 479 - 482.(Xiao Shiguo, Zhou Depei. A calculation method for internal force of prestressed anchor-rope and frame beam-on-foundation on high rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 479 - 482. (in Chinese))

[10] 张发明. 岩质边坡预应力锚固效应及应用研究[博士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2000.(Zhang Faming. Study on prestressed anchoring effect and it's applications to rock slope[Ph. D. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2000.(in Chinese))