

土钉支护软岩高边坡的监测与滑裂面的确定

娄国充

卜建清

(北京交通大学) (石家庄铁道学院土木工程分院)

摘要: 结合某软岩高边坡工程, 对土钉支护结构的受力进行了监测。通过试验数据分析了土钉支护的结构原理和受力状态, 表明土钉支护工作原理既不同于锚杆结构, 又不同于土钉墙, 根据开挖过程中土钉轴力的变化, 分析了软岩高边坡最危险滑裂面的形成过程, 最后给出了软岩高边坡的破坏模式, 并对其稳定性进行了评价。

关键词: 软岩高边坡; 土钉支护技术; 最危险破裂面; 现场测试

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2005) 03-0106-05

FIELD MONITORING OF A HIGH SLOPE OF WEAK ROCKS WITH SOIL - NAILING SUPPORT AND DETERMINATION OF THE SLIP SURFACE

Lou guochong

Bu Jianqing

(Beijing Jiaotong University) (School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute)

Abstract: The monitoring results for the forces and displacements of the soil-nailing support structure of a high slope of weak rocks are introduced in this paper. Analysis of the testing data reveals that the working principle of soil-nailing support is different not only from anchor structure, but also from soil-nailing wall. According to the monitoring result, the most dangerous slip surface in the high slope of weak rocks is provided and the stability of slope analyzed.

Keywords: high slope of weak rock; soil-nailing support; most dangerous slip surface; field test

1 引言

土钉支护作为高边坡支护的一种常用技术, 近年来在全国各地得到了普遍应用, 岩土边坡工程十分常见, 其稳定问题也非常突出^[1]。为了正确的计算评价岩土体的稳定性, 确定岩体加固、开挖和监测方案, 准确确定最不利滑裂面是十分重要的。通常认为, 土体边坡的滑裂面取决于土体中剪应力场的分布, 其形状一般呈圆弧状。而岩体边坡的滑裂面取决于岩体中强度弱面的分布, 即取决于结构面和临空面的组合形式。由于岩体结构的复杂性, 其最危险滑裂面的确定一直是一难题^[2]。软岩高边坡不同于岩石边坡, 也不同于土质边坡, 其破裂面的确定方法目前还没有相关论述。本文通过对土钉受力的分析, 根据试验确定了软岩高边坡最危险破裂面, 并对其稳定性进行了评价, 为软岩高边坡的设计和理论研究提供了依据。

2 工程概况与岩土条件

某高边坡工程所处地区地形起伏较大, 地面自然

横坡为 $10^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。地质结构为: 地表覆盖第四系残积砂粘土 (Q^{dl+el}), 厚 $0 \sim 4.0\text{m}$; 下覆三迭系中统木兰组 (T_2L) 泥岩夹砂泥岩, 风化严重带 (W_3 , 断层带砂泥岩, 重度风化)、极其严重带 (W_4 , 泥岩夹砂岩, 严重风化) 厚 $16.0\text{m} \sim 20.0\text{m}$, 主要力学指标见表1。泥岩为泥质结构、薄至中层状, 质软; 该场地为单斜构造、层理产状为 $N20^{\circ}E/50^{\circ}NW$, 受区域构造影响, 岩体破碎, 扭曲严重, 节理发育。该地区6~9月份为雨季, 雨季降雨量较大, 有少量地下水, 但无地表径流。该线路以路堑形式从斜坡地段通过, 中心最大挖方深度 13.36m , 左侧路堑边坡最高处达 28m 。

表1 土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

土层名称	层厚/ (m)	含水量/ (%)	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	粘聚力/ (kPa)	弹性模量/ (MPa)	泊松比
砂粘土	$0.0 \sim 4.0$	20.5	19.8	20.2	27.6	0.65	0.38
W_3	$9.0 \sim 15.2$	16.6	23.0	38.8	808	233	0.30
W_4	$9.6 \sim 12.4$	21.0	19.4	22.4	28.0	7.83	0.34

3 边坡的设计与监测方案

3.1 软岩高边坡的设计

软岩边坡最危险破裂面的位置和几何形状与土体强度、边坡形状及支护结构形式有直接关系,目前国内应用最多的方法为对数螺旋线法。综合考虑各种实际情况,本次工程采用极限平衡分析方法,取王步云法^[3]的破坏模式进行分析设计。总的设计思想是,在控制变形的条件下,以局部稳定性为前提,既考虑边坡的整体稳定性,又考虑施工过程中的稳定性,以现场拉拔试验确定土钉的粘结强度及以现场动态监测的分析结果为依据进行反馈设计与施工。经过综合考虑,边坡按坡率 1:0.25 分上下两级支护,平均每级高 11m,中间设一宽度为 2.0m 的平台,土钉为 $\phi 20\text{mm}$ 和 $\phi 25\text{mm}$ 螺纹钢筋,间距 1.0m,呈梅花形布置,土钉倾角为 14.04° ,长 8m ~ 10m,喷层厚度为 15cm。边坡支护断面布置见图 1。为了确定和验证设计中所采用的土钉与土体之间的极限摩阻力 τ_f ,进行了土钉原位抗拔试验,试验结果表明,其极限摩阻力 $\tau_f = 152.2\text{kPa}$,而设计时采用的极限摩阻力 τ_f 为 70.4kPa ,满足规范要求。

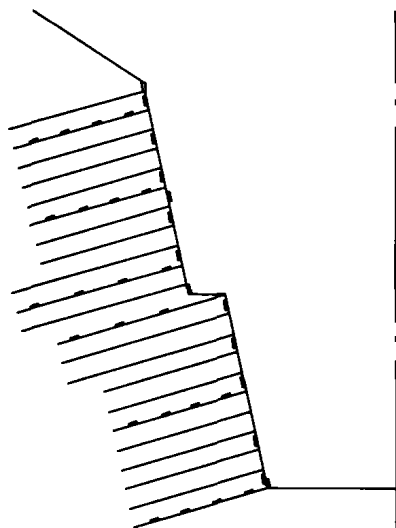


图 1 边坡横断面
Fig.1 Profile of the high slope

3.2 监测点的布置

岩土体是一个复杂的非线性力学体系,施工所要达到的最终状态质量的优劣,不但与边坡设计有关,而且受施工方法和开挖过程的影响。边坡开挖过程中坡体的力学状态和坡体位移的变化直接反映了边坡设计、施工方法和开挖顺序的合理性。因此,在施工过程中做好坡体施工监测是非常重要的。为了在边坡开

挖过程中更好地监测边坡的加固效果及稳定性,我们分别对不同位置的土钉的轴力、坡面的水平位移和喷层后的土压力进行了检测,测试元件布置如图 1、图 2, L_{ti} 为土钉轴力测点, Y_{2i} 为坡面土压力测点, B_{2i} 为喷层位移测点, L_i 为测试土钉编号。为了避免施工干扰,保证测点的长期稳定和测试精度,土钉轴力和喷层后土压力采用钢铰式钢筋应力计和钢铰式土压力盒,坡体位移采用 DM-SZ 型光电测距仪和 J2 经纬仪组成速测仪进行测量。

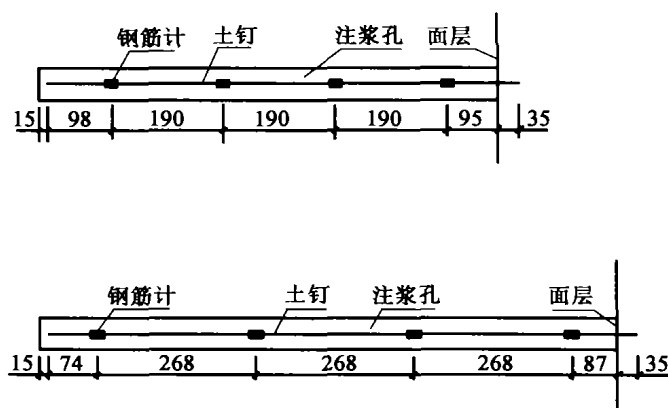
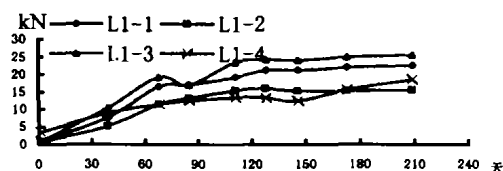


图 2 土钉轴力测点布置图
Fig.2 Arrangement of the measuring points

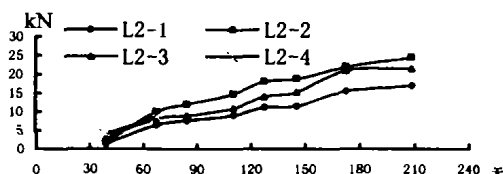
4 监测结果分析

4.1 土钉轴力监测结果分析

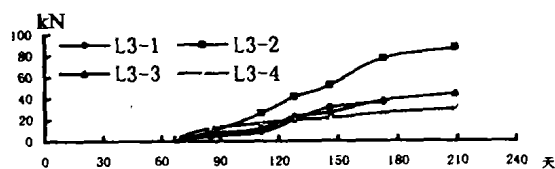
图 3 为各土钉轴力随开挖时间的变化曲线;从图中可以看出:边坡开挖后土钉轴力随之产生,随着施工进度的推进,土钉轴力逐渐增加。在距开挖面较近时土钉轴力增加幅度较大,特别是在开挖面支护前,土钉轴力出现陡增现象。随着支护的完成和开挖面的远离,土钉轴力的增长率逐渐减小,即土钉的受力具有开挖效应。



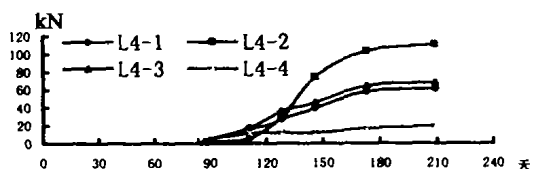
(a) L1



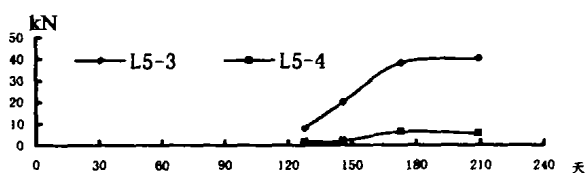
(b) L2



(c) L3



(d) L4



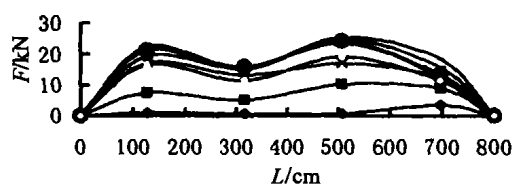
(e) L5

图 3 土钉轴力时程曲线

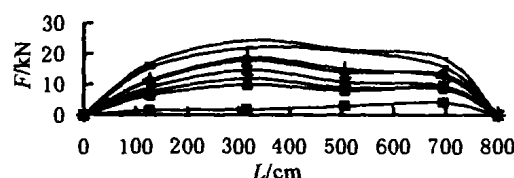
Fig.3 Tensile stress-time curve of the soil nail

从开挖的全过程可以看出, 坡体的上部土钉受到的轴向拉力较小, 而中部土钉受到的轴向拉力较大, 这说明了坡体上部的开挖对土钉的影响不大, 在坡体中部开挖对土钉的轴力和坡体的变形有较大影响, 因此, 在边坡实际施工时, 坡体上部可适当增大开挖深度, 而中下部的开挖应该减小每层的开挖高度。

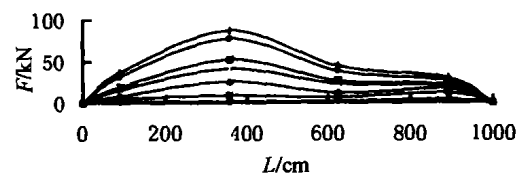
各土钉轴力在不同开挖阶段沿土钉长度的分布如图 4 所示, 在开挖初期, 土钉轴力分布较均匀, 随着边坡开挖的进行, 土钉的轴力分布呈现出中间大、两端小的规律。从实测试验数据分析, 随着边坡开挖深度的加大, 土钉的最大轴力点的位置逐渐向加固范围外移动, 这说明在开挖初期引起的坡体松动较小, 随着开挖的进展, 开挖扰动作用在坡体内产生的松动区逐渐扩大, 土钉的锚固长度逐渐减小, 坡体趋于不稳定。



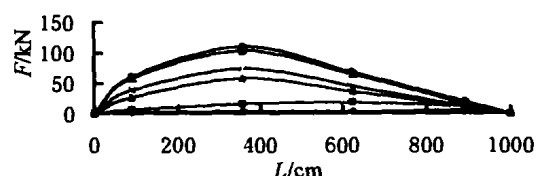
(a) L1



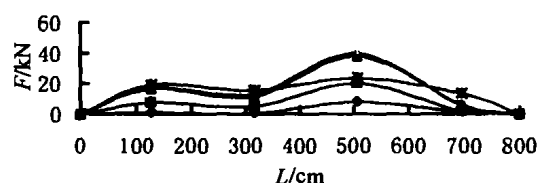
(b) L2



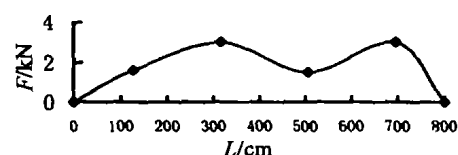
(c) L3



(d) L4



(e) L5



(f) L6

图 4 土钉轴力分布曲线

Fig.4 Tensile stress distribution curve along the soil nail

4.2 边坡面层土压力分析

图 5 为坡面各测点的土压力时程曲线, 由曲线可以看出, 除坡体中部的 Y2-5 点由于其处于边坡土层分界处和平台处, 坡体产生了较大变形, 土钉所受轴力加大, 从而导致土压力较大外, 其他各点土压力都较小, 同时随着施工的进行, 其变化幅度也不是很大, 这说明:

土钉支护不同于锚杆支护, 土钉支护更主要起到加固土体的作用, 通过土钉与土体的粘接, 防止边坡土体的坍塌和滑落, 其对岩土体的锚固力由整根土钉提供, 而不是仅仅来自于土体深层的锚固。

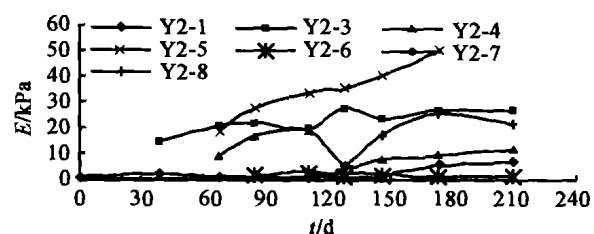


图 5 坡面土压力随时间的变化

Fig.5 Earth pressure-time curve

土钉支护也不同于土钉墙技术, 土钉墙技术主要通过土钉的加固, 使加固体形成一种近似于挡墙的结构,

土钉支护在发挥土钉墙的作用的同时,还对加固体起到锚固的作用,即土钉支护既有支撑作用又有锚固作用。

因此,土钉支护技术中的钢筋网喷射混凝土面层的作用已不再重要,其主要作用是用以防止坡体的局部松动、坍塌以及保护坡面不被风化侵蚀。图6为边坡支护竣工后和竣工后30天的土压力分布曲线,由图可以看出坡体支护后产生的土压力值远远小于由库仑理论计算的土压力值,且很快趋于稳定,这进一步说明了土钉支护技术除了锚固边坡外,还对坡体起加固作用,土体和土钉形成一个复合体,土钉起到横向加筋的作用,而复合体更像一个挡土墙。

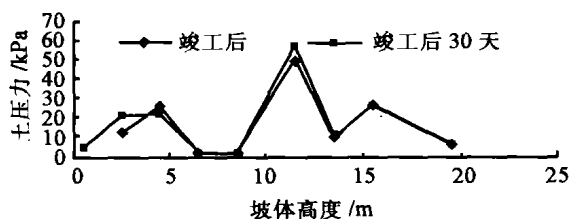


图6 坡体土压力分布图

Fig.6 Earth pressure distribution of the slope

5 破裂面的确定

软岩边坡最危险破裂面的位置和几何形状是确定设计方案的关键,其与边坡土类型、土体强度、边坡形状及支护结构形式有直接关系。目前国内外对土边坡研究较多,最危险破裂面一般近似于圆弧状^[4]。而岩石边坡的最危险破裂面取决于强度弱面的分布,与岩石的构造、节理面、岩石的破碎程度等多因素有关,因此,岩石边坡往往存在多个潜在破裂面^[5]。由于岩石边坡结构的复杂性,其最危险破裂面的准确确定存在很大的难度^[9]。软弱岩石边坡较土质边坡有一定的结构性,但因为其经历了长期的强风化过程,强度和结构性远远小于岩石边坡,其性质介于土质边坡和岩石边坡之间。

一般认为,土钉支护边坡潜在破裂面发生在土钉所受轴力最大的位置。由土钉轴力测试结果(图3)可以看出,每次开挖支护后,各土钉轴力大小不同,土钉最大轴力出现在边坡的中部,上下都很小。随着进一步开挖,土钉最大轴力点的位置逐渐向坡体内移动,当开挖完成后,其轴力最大点的位置相对稳定。图7为边坡平台上部开挖完成后和整个边坡开挖完成后土钉最大轴力作用位置,可见在开挖边坡不同部位,其潜在破裂面是不一样的,对于整个边坡来说,坡体内部存在两个最危险滑裂面。从图4中也可以看出,平台上部开挖时,上部土钉轴力较小,轴力最大处靠近坡面,随着平台下部的开挖,土钉轴力出现双峰值现

象,从另一个方面说明了双破裂面的存在。为了便于理论分析,提高其实用性,潜在破裂面1可以采用对数螺旋线法确定,而潜在破裂面2可以简化为折线形式,即最危险破裂面的上部与上坡面平行,折点在平台处,破裂面距离坡面 $0.33H_0$, H_0 为坡面高度,折点与坡脚的连线为下部破裂面,如图7(a)、(b)。

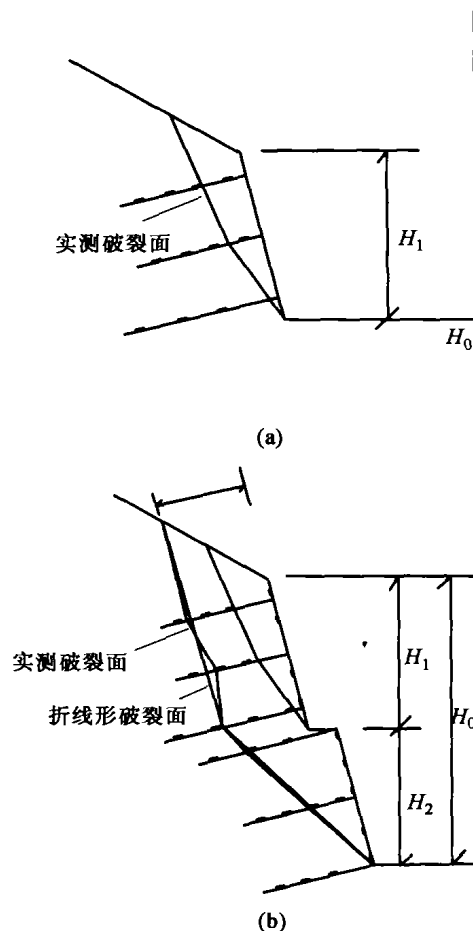


图7 软岩边坡最危险破裂面图

Fig.7 The most dangerous slip surface of the weak rock slope

6 边坡稳定性评价

软岩高边坡整体稳定性评价除与合理的支护参数、施工阶段各开挖土层的安全稳定性系数与变形控制、开挖深度控制、支护时间控制等因素有关外还体现在边坡坡壁在不同的开挖深度的情况下水平位移的控制及位移时程曲线的变化^[6,7]。通过对本边坡在施工过程的监测发现,开挖第一步时边坡水平位移即开始,每一步的开挖都会加大水平位移,特别是在上一步支护结束,下一步开挖面暴露时水平位移有明显的加大,增长量一般为 $0 \sim 4.3\text{mm}$ 。当开挖边坡坡体的中部平台附近时,水平位移出现陡增,特别是边坡的上部,增加值在 $6.4\text{mm} \sim 17.4\text{mm}$ 之间,从土钉的监

(下转第114页)

长趋势稳定后,可以诊断其传力过程基本完成。应该指出的是,此时二衬不能承受过高荷载,否则会和设计思想背道而驰。

参 考 文 献

[1] 韩瑞庚. 地下工程新奥法 [M]. 北京: 科学出版社,

1987

- [2] 二滩水电开发有限责任公司. 岩土工程安全监测手册 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1999
- [3] 夏才初, 李永盛. 地下工程测试理论与监测技术 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1999

王建秀 博士后。研究方向: 地下结构、岩土工程与地质工程。通讯地址: 200092 同济大学 地下建筑与工程系

朱合华 教授, 博士生导师。同济大学土木工程学院副院长, 地下建筑与工程系主任。研究方向: 地下结构、岩土工程数值方法、土木工程信息化等。

唐益群 教授, 博士生导师。同济大学城市工程地质与环境地质研究所所长。研究方向: 地质工程、环境地质、地面沉降控制等。

(上接第 109 页)

测数据可以看到土钉的轴向拉力也有较大增长, 这主要是因为每部边坡开挖深度过大, 边坡得不到及时支护, 开挖面较长时间暴露, 从而岩土体的扰动区逐渐扩大, 土钉的锚固作用减小, 使扰动区发生松动。

为了提高坡体的稳定性, 在施工过程中对设计方案和施工方案进行调整, 即将接近中部平台处的第 9、10、11、12、13、14 排的土钉长度由 8.0m 增长到 10.0m, 同时减少每次开挖深度, 由原来的每次开挖 2.0m 减小为每次开挖 1.0m, 开挖完成后立即进行支护, 减少开挖面的暴露时间, 从而较好地控制了边坡的水平位移。开挖完成后, 边坡的最大水平位移与坡高的比值为 2.8‰, 未超过边坡最大位移允许值 3.0‰, 坡体是稳定安全的。

7 结 论

(1) 实践表明, 土钉支护技术支持软岩高边坡是可行的, 其工作性能和受力机理既不同于锚杆支护, 也不同于土钉墙, 较适用于支护高边坡等永久性支护工程。设计时应遵循“保住中部, 稳定坡角”的原则, 施工时应及时支护, 中部以下控制每层开挖深度。

(2) 软弱岩质边坡的破坏模式是复杂的, 工程设计已走在了理论计算的前面。通过对土钉轴力的监测

表明阶梯软岩高边坡具有两个最危险破裂面形式。

(3) 软岩边坡的整体性和稳定性除与边坡的设计参数有关外, 还与开挖顺序、开挖深度及支护时间有关。由于软岩的强度低, 开挖深度大, 或开挖后不能及时支护, 边坡陡会产生很大的变形, 使松动范围扩大, 因此开挖深度和支护时间是控制软岩高边坡变形的重要环节, 在施工过程中应该尽可能多地收集施工信息和观察信息, 根据实际情况进行合理的调整。

参 考 文 献

- [1] 陈肇元. 土钉支护技术 [R]. 深基坑开挖土钉技术研讨会, 北京: 清华大学, 1996: 1 ~ 10
- [2] 王在泉. 复杂边坡工程系统稳定性研究 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000: 10 ~ 18
- [3] 苏立群, 韩波, 廖宏建等. 土钉支护体系的稳定性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (增 1): 1269 ~ 1273
- [4] 吴国雄等. 土钉加固路堑边坡设计新思路 [J]. 重庆交通学院学报, 2000, 119 (4): 51 ~ 54
- [5] 周维垣等. 岩石高边坡的稳定与治理, 岩土工程的回顾与前瞻 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 37 ~ 46
- [6] 周德培. 软岩高边坡工程信息化施工 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (4): 373 ~ 377
- [7] 李元海, 朱合华. 岩土工程施工监测信息系统初探 [J]. 岩土力学, 2002, 123 (1): 103 ~ 106

娄国充 副教授, 主要从事岩土工程、道路与铁道工程专业的教学与科研工作。通信地址: 050043 石家庄铁道学院土木工程分院

卜建清 副教授, 主要从事道路与交通工程的教学与科研工作。