

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.014

多级边坡施工效应的模型试验研究

苏 杭^{1,2}, 周海清¹, 武 松¹

(1. 后勤工程学院 土木工程系, 重庆 401311; 2. 68612 部队, 宁夏 银川 750000)

摘 要: 根据边坡施工后坡体位移的相对变化趋势, 给出了边坡开挖松弛区和预压区的明确定义, 将开挖松弛区和预压区统称为坡体影响区, 并通过大型模型试验模拟了多级边坡的施工过程, 提出了影响区重叠效应的概念。若下级边坡的开挖松弛区(或预压区)与上级边坡的预压区发生重叠, 那么会对上级边坡重叠区域的岩土体产生松弛(或加固)作用, 从而影响该重叠区域支挡结构的受力情况, 重叠范围越大影响越大; 对于重叠区范围之外的支挡结构, 其受力不受影响, 影响区重叠效应是支挡结构受力发生变化的根本原因。

关 键 词: 多级边坡; 松弛区; 预压区; 影响区重叠效应; 模型试验

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)08-2261-09

Model test research on construction effect of the multi-stage slope

SU Hang^{1,2}, ZHOU Hai-qing¹, WU Song¹

(1. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China;

2. The No.68612th Troop of PLA, Yinchuan, Ningxia 750000, China)

Abstract: According to the relative variable trend of slope displacement after its construction, this study declared the definitions of the relaxation zone and pre-compression zone, which are collectively referred to as the influenced zone. The construction process of the multi-stage slope was simulated through a large-scale model test. Meanwhile, the concept of the overlapping effect of influence zone was proposed. If the excavation relaxation zones (or pre-compression zones) of lower slope overlapped with pre-compression zones of the upper slope, it would produce relaxation (or reinforcement) effect on the soil and rock of the overlapped zone which belongs to the upper slope. As a result, the force of retaining structure in the overlap zone was influenced. Furthermore, it is found that the wider the overlapped region was, the stronger influence was. However, the overlapping phenomenon had no effect on retaining structures outside the overlapped region. Therefore, the reason for the force change of retaining structure was essentially caused by the overlapping effect in the influenced zone.

Keywords: multi-stage slope; relaxation zone; pre-compression zone; overlapping effect of influence zone; model test

1 引 言

边坡工程完成的好坏, 对于主体工程的正常运转有着至关重要的作用, 锚索框架和锚索抗滑桩由于其强大的支挡能力广泛应用于一些多级边坡或大型滑坡治理工程。对于多级边坡的施工, 人们非常关心的一个问题是边坡开挖之后引起的松弛区范围和加固之后引起的预压区范围以及下级边坡施工对已完成的上部结构受力的影响。松弛区和预压区的形状与大小的确定是合理选择工程方案、评估边坡整治效果的关键因素。国内对边坡开挖松弛区的研

究比较多, 对坡体预压区的研究比较少。肖世国等^[1]认为, 坡体松动区的内边界是经过一定安全储备后坡体中处于临界破坏状态的点的集合, 利用强度条件来判断坡体开挖松动区。冯学敏等^[2]对于岩体边坡开挖卸荷松弛问题理解为由于边坡开挖卸荷作用, 在开挖坡面附近的一定区域或范围内应力水平急剧降低, 应力释放或转移至深层岩体, 将此区域即称之为边坡开挖卸荷松弛区(或松弛带), 提出以岩石极限拉应变作为卸荷松弛的判别准则。邵江等^[3]从刚体极限平衡法出发给出了土坡开挖相应的简化计算方法, 认为卸载产生的附加应力场是坡体应力

收稿日期: 2015-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41072243, No. 41272356); 国家科技支撑计划项目(No. 2012BAK05B02)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(41072243, 41272356) and the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2012BAK05B02).

第一作者简介: 苏杭, 男, 1989 年生, 硕士, 助理工程师, 主要从事岩土工程稳定性与防灾减灾方面的研究工作。E-mail: sh940454887@126.com

通讯作者: 周海清, 男, 1971 年生, 博士, 教授, 主要从事边坡稳定性及防灾减灾等方面的研究工作。E-mail: zhou_haiqing@163.com

发生变化形成松动区的直接原因,将破坏应力场的坡体附加应力对坡体的影响范围称为开挖松动区。邓建辉等^[4]介绍了利用滑动变形计监测岩石边坡松动区,使用 CSD-60 型滑动变形计在三峡工程永久船闸北坡进行了现场监测试验,通过对试验结果的分析得到了边坡岩体松动区的范围及变形特征。孙书伟等^[5]根据坡体开挖后的应力和位移状态,将已经超出弹性变形范围出现塑性破坏的区域定义为开挖松动区,利用 FLAC^{3D} 有限差分软件对高边坡的开挖松动区进行了数值模拟研究。本文主要采用室内大型边坡模型试验模拟了多级边坡的施工过程,给出了边坡开挖松弛区和预压区的明确定义。将开挖松弛区和预压区统称为坡体影响区,提出了影响区重叠效应的概念,并研究了其规律。

2 边坡模型试验设计

2.1 试验原理

2.1.1 坡体影响区的概念

施加支挡结构之前,先要对坡体进行开挖,而施工开挖将破坏坡体的平衡状态,坡体内的应力场会自行调整,以达到新的平衡状态。要研究坡体开挖的影响范围,从理论上讲,开挖后所有应力或应变状态发生改变的范围都应该视为坡体松弛区,但那样会使得研究的范围过于宽泛。因此,笔者认为,可以将变形相对比较大的范围定义为松弛区,变形相对较小或基本未产生变形的范围视为稳定区,其区分的关键在于松弛区会相对稳定区发生向外、向下的变形。预应力锚索结构施加预应力的过程基本与坡体开挖的过程相反,将产生相对变形较大的预压区和相对不动的稳定区。由于是从研究开挖和预压的影响范围的角度进行定义的,因此,松弛区和预压区均可称为边坡施工影响区。

2.1.2 坡体影响区判断依据

在边坡中,开挖体通过开挖面与被开挖体连接,其是支承与被支承的关系,二者之间的相互作用是作用力与反作用力。边坡开挖对剩余坡体的影响等效于在开挖临空面处施加一个指向外下侧的等效开挖力系^[6]。在模型边坡中从上到下埋设多排全长黏结锚杆充当测力计串的作用,边坡开挖时,松弛区内的坡体都有向坡面变形的趋势,锚杆周围的岩土体会在锚杆表面作用指向坡面的摩擦力,因此,从坡面向坡内方向,锚杆的轴力是逐渐累积增加的。如果越过了松弛区的边界,则进入了边坡的相对稳定区,锚杆表面的摩擦力反向,锚杆轴力就会逐渐减小。由于松弛区的边界具有以上特点,因此,可

通过全长黏结锚杆轴力增长趋势的突变判断出该处为边坡松弛区的界线,上、下各排锚杆测出的边坡松弛区界线相连,就得到边坡的松弛区范围。判断坡体预压区的方法是一样的,只不过锚杆受压力而已(锚杆轴力以受拉为正,受压为负)。

2.2 模型设计

图 1 为原型边坡示意图:边坡长为 50 m,宽为 7 m,高为 30 m,①表示岩体,②表示土体,边坡分 3 次开挖,②-1 是第 1 次开挖部分,形成第 3 级边坡,(简称 3 级边坡,以下同),开挖高度为 8 m,开挖面坡率 1:0.75,平台宽度为 2 m;②-2 是第 2 次开挖部分,形成第 2 级边坡,(简称 2 级边坡,以下同),开挖高度为 9 m,开挖面坡率 1:0.5,平台宽度为 1 m;②-3 是第 3 次开挖部分,形成第 1 级边坡,(简称 1 级边坡,以下同),开挖高度为 6 m,见图 1(a)。边坡加固后的支挡结构简图如图 1(b)所示:3 级边坡采用预应力锚索框架梁支护,锚索锚固段为 5 m;2 级边坡采用预应力锚索框架梁支护,锚索锚固段为 7 m;1 级边坡采用预应力锚索桩支护,锚索锚固段为 5 m,锚固点位于距桩顶 1 m 处,抗滑桩总长为 11 m,嵌固段为 5 m,锚索锚固角均为 26°。其中,锚索的弹性模量为 195 GPa,横截面积为 556 mm²。框架梁横截面 $b \times h = 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,弹性模量 28 GPa,纵、横梁间距为 4 m,横梁为 7 m,竖梁为 10 m。抗滑桩横截面 $b \times h = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,桩间距为 4 m,弹性模量为 30 GPa。全长黏结锚杆弹性模量为 195 GPa,横截面积为 36 mm²。

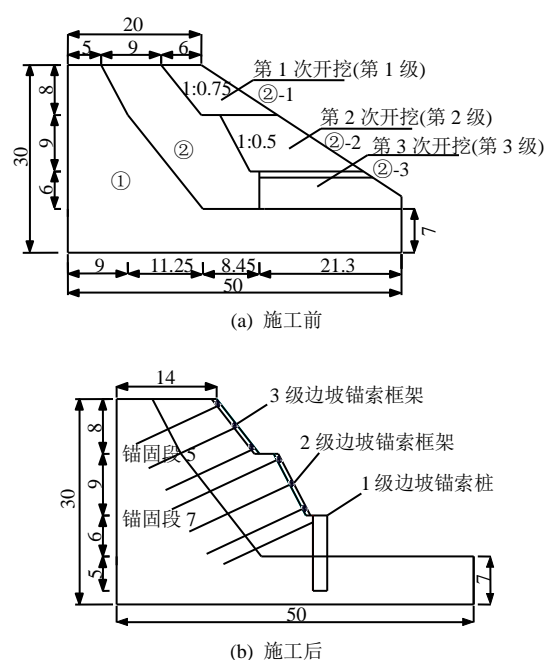


图 1 原型边坡断面图(单位:m)

Fig.1 Schematic of the prototype slope section (unit: m)

2.2.1 测点布置

试验模型箱采用后勤工程学院边坡隧道耦合试验仪，尺寸为：长 5 m、宽 0.7 m、高 3 m。填筑模型边坡时在边坡中心面上从上到下预埋 8 根全长黏接锚杆，3 级边坡和 2 级边坡中各预埋 4 根，长度分别为 1.05、1.25 m，锚杆倾角为 10° ，末端伸入到岩体。这 8 根全长黏接锚杆不妨从上到下依次称之为杆 1、杆 2、……杆 7、杆 8，3 级边坡中每根全长黏接锚杆上布置 7 个应变片，从坡面向坡体内部分别为测点 1、测点 2、……测点 7；2 级边坡中每根全长黏接锚杆上布置 9 个应变片，从坡面向坡体内部分别为测点 1、测点 2、……测点 9，模型边

坡中各测点布置图如图 2 所示。

2.2.2 相似关系

边坡模型试验属于地质力学模型试验的范畴，为了研究坡体开挖支护后边坡变形规律，使模型的变形发展与实际工程相似，根据相似理论^[7]模型与原型需满足几何相似、质量相似、荷载相似、介质物理性质相似和边界条件相似。模型与原型之间的所有同名物理量需满足相应的相似判据，所有的矢量在方向上相应的一致，在数值上相应的成比例。

试验中原型与模型的几何相似比取为 10，其他物理量的相似比例如表 1 所示。

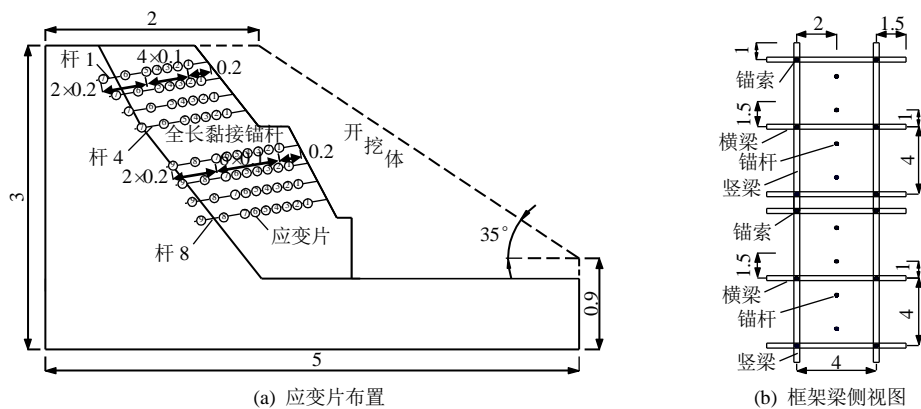


图 2 模型边坡测点布置图 (单位: m)

Fig.2 Arrangement of measuring points in the model slope (unit: m)

表 1 原型与模型的相似关系

Table 1 Similarity relationship between prototype slope and model slope

| 长度 C_l | 重度 C_γ | 应变 C_ϵ | 弹性模量 C_E | 泊松比 C_μ | 位移 C_δ | 应力 C_σ | 内摩擦角 C_ϕ | 凝聚力 C_c | 力 C_F | 抗弯刚度 C_{EI} |
|----------|---------------|-----------------|------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-----------|---------|---------------|
| 10 | 1 | 1 | 10 | 1 | 10 | 10 | 1 | 10 | 10^3 | 10^5 |

2.3 相似材料的制作

2.3.1 岩土体的模拟

相似材料采用均匀试验设计方法进行配比，经过反复试验最终选红黏土（烘干）、重晶石粉、滑石粉、水为基本材料按配合比 0.70: 0.15: 0.05: 0.10 模拟土体，选取红黏土（烘干）、重晶石粉、滑石粉、石英砂、水泥、水为基本材料，配合比 0.30: 0.38: 0.03: 0.10: 0.06: 0.13 模拟岩体，模型边坡相似材料的物理力学参数如表 2 所示。岩体和土体相似材料通过控制相似密度 2.15、1.70 g/cm³ 填入模型箱，模型箱的体积约为 8.08 m³，一组模型试验所耗费的相似材料约 15.4×10³ kg。

2.3.2 锚索的模拟

根据相似比关系，要求锚索模型材料参数为：直径 $d=2.66$ mm，弹性模量 $E=19.5$ GPa，抗拉强

度 $\sigma=186$ MPa，抗拉力 $F=\pi d^2 \sigma / 4=1\ 033.6$ N。若完全按照相似比选择锚索替代材料，不但难以模拟锚索与注浆体及周围岩土体的锚固效果，而且也难以黏贴应变片。因此，通过综合考虑对预应力锚索采用带有丝扣的 8#镀锌铁丝 ($d=4$ mm) 来代替，其抗拉力 $F_m=4.76$ kN，抗拉强度 $\sigma_m=335$ MPa，弹性模量 $E_m=133.87$ GPa。共 14 根锚索，每根锚索在自由段黏贴一个应变片。

表 2 模型边坡相似材料物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of the model slope

| 岩土体 | 重度 γ /(kN/m ³) | 凝聚力 c / kPa | 内摩擦角 ϕ /($^\circ$) | 弹性模量 E / MPa |
|-----|--------------------------------------|------------------|------------------------------|-------------------|
| 土体 | 17.0 | 3.46 | 24.6 | 20 |
| 岩体 | 21.5 | 70.80 | 31.3 | 98 |

2.3.3 框架梁和抗滑桩的模拟

锚索桩和锚索框架梁要承担滑坡推力, 为防止其失效变形, 对抗滑桩和框架梁通过抗弯刚度 EI (I 为惯性矩) 的相似来进行模拟。模型试验中横、纵梁采用横截面 $b_m \times h_m = 30 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 弹性模量 $E_m = 200 \text{ GPa}$ 的钢板代替。抗滑桩采用横截面 $b_m \times h_m = 100 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, 弹性模量 $E_m = 200 \text{ GPa}$ 的钢板代替。抗弯刚度基本满足相似比要求。

2.3.4 全长黏接锚杆的模拟

根据相似比关系, 要求锚索模型材料参数为: 直径 $d = 0.6 \text{ mm}$, 弹性模量 $E = 19.5 \text{ GPa}$, 若完全按照相似比选择锚杆替代材料, 则在锚杆上黏贴应变片、在锚杆周围灌浆均难以实现。因此, 通过综合考虑采用 $\phi 6 \text{ mm}$ 光面钢筋作为全长黏接锚杆的替代材料, 其抗拉力 $F_m = 19.43 \text{ kN}$, 抗拉强度 $\sigma_m = 688.33 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E_m = 190.73 \text{ GPa}$ 。

2.4 预应力施加方案

边坡进行支护时锚索预应力的施加是一个关键环节, 模型试验中力的相似系数 $C_F = 1\ 000$, 若模型试验中施加的预应力为 0.3 、 0.4 、 0.5 、 0.7 、 0.8 kN , 则原型边坡中对应的锚索预应力分别为 300 、 400 、 500 、 700 、 800 kN 。在锚索自由段黏贴应变片, 当锚索在框架梁上使用垫片和螺栓锁定后, 通过扳手拧紧螺栓张拉锚索时应变片数值的变化来确定所施加的预应力的, 即锚索预应力的, 大小是通过锚索自由段上应变片应变的变化来体现的。前期做镀锌铁丝 (锚索) 材料拉伸试验时在其表面黏贴应变片记录了镀锌铁丝在不同拉力下对应的应变, 重复做了 3 组后取平均值得到了镀锌铁丝不同拉力下的拉力-应变关系如表 3 所示。在试验过程中对同一批次需要紧固的螺栓先进行初拧张拉到一定程度, 然后再进行微调。

表 3 锚索替代材料拉力-应变对应关系
Table 3 The relationship between force and strain of cable replacement materials

| 力 / kN | 应变 / 10^{-6} | 力 / kN | 应变 / 10^{-6} |
|-----------|-------------------|-----------|-------------------|
| 0.2 | 330 | 0.7 | 1 007 |
| 0.3 | 469 | 0.8 | 1 140 |
| 0.4 | 602 | 0.9 | 1 268 |
| 0.5 | 740 | 1.0 | 1 396 |
| 0.6 | 875 | | |

2.5 试验过程与模拟工况

图 3 是全长黏接锚杆和锚索黏贴应变片、涂抹防水胶、预制浆体、边坡相似材料装填、夯实、成

型的过程, 岩体和土体的替代材料按配比兑制搅拌均匀后用厚塑料布遮盖焖样 24 h 。抗滑桩、全长黏接锚杆和锚索随边坡相似材料预埋在其相应的位置。每级开挖分界面用水泥袋分隔以便后期施工时挖出设计轮廓, 并在废水泥袋上涂撒水泥砂浆增加粗糙度, 以减小人工预留分界面对边坡整体的影响。

按照施工顺序将边坡施工分为 6 种工况:

工况 1: 开挖 3 级边坡;

工况 2: 锚索框架梁对 3 级边坡进行支护, 用扳手拧转锚索端部的螺帽, 对锚索逐级预加载分别至: 0.5 、 0.7 、 0.8 kN ;

工况 3: 开挖 2 级边坡;

工况 4: 锚索框架梁对 2 级边坡进行支护, 用扳手拧转锚索端部的螺帽, 对锚索逐级预加载分别至: 0.3 、 0.4 、 0.5 、 0.8 kN ;

工况 5: 锚索桩对 1 级边坡进行支护, 用扳手拧转锚索端部的螺帽, 对锚索逐级预加载分别至: 0.3 、 0.4 、 0.5 、 0.8 kN ;

工况 6: 开挖 1 级边坡。

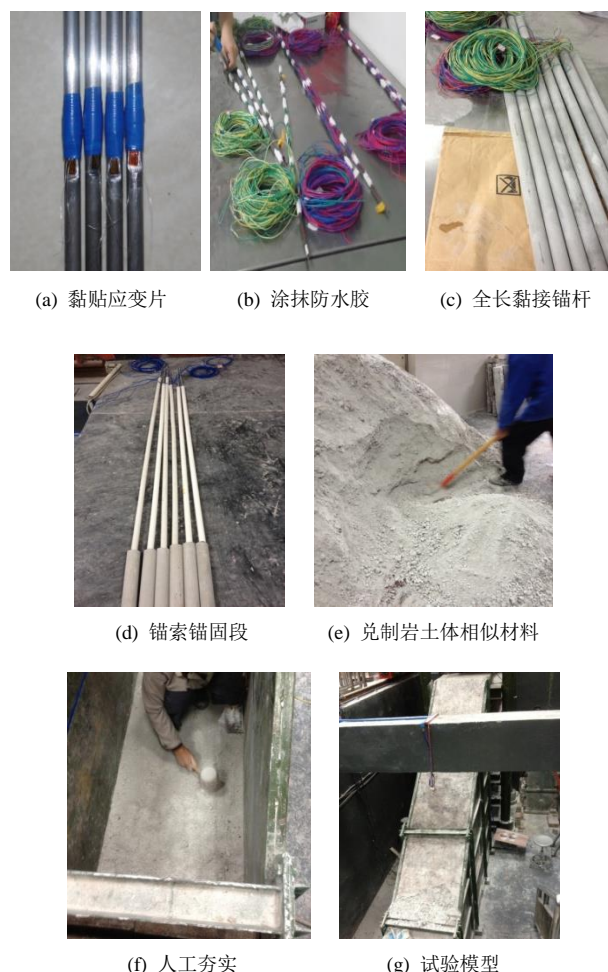


图 3 模型制作

Fig.3 Model producing process

试验中使用的测试系统为多点静态应变测试仪,如图4所示。图4(a)为DH3816型号,用来测量8根全长黏接锚杆的应变值,终端与电脑连接后可自动采集数据,含60个导线接口;图4(b)为DH3818-2型号,用来测量14根锚索的应变值,手动采集数据,含20个导线接口。对应变测试仪进行调试时,发现杆6有5个应变片失效,因此,将杆6整体弃除。此外,还包括杆1的测点3、7,杆2的测点1、2,杆3的测点1、2,杆5的测点1,杆7的测点1、3,杆8的测点7。应变片失效是锚杆在预制期间灌浆受潮所导致的。

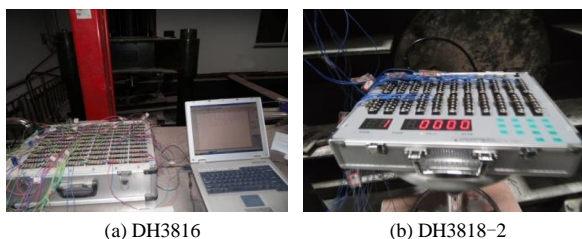


图4 多点静态应变测试仪

Fig.4 Multiple-points static strain testing instrument

3 边坡施工影响区的测定

3.1 3级边坡松弛区和预压区

3级边坡施工后的示意图如图5所示。边坡开挖和支护时,坡体内部应力发生调整,全长黏接锚杆和周围土体协同变形时表面作用不同方向的摩擦力,因而在各个测点上测得的应变也不尽相同。

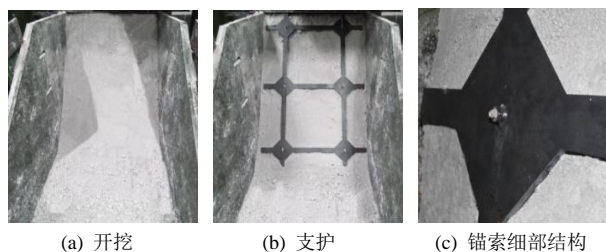


图5 3级边坡施工过程

Fig.5 The construction process of the third slope

将试验中采集得到的3级边坡全长黏接锚杆各测点处的应变换算成轴力为

$$F = \varepsilon EA \quad (1)$$

式中: ε 为各测点的应变; E 为钢筋的弹性模量 (Pa); A 为钢筋的横截面积 (m^2)。

工况1时埋置在3级边坡中的4根全长黏接锚杆的轴力如图6所示,从图中可以看出,4根全长黏接锚杆的轴力变化从坡面向坡体内部呈先增大后减小的趋势,锚杆上轴力的最大值点也就是锚体剪

力的中性点,杆1~4轴力峰值依次增大。图7是锚索预应力分别为0.5、0.7、0.8 kN时全长黏接锚杆的轴力变化情况,从图中可以看出,3级边坡支护

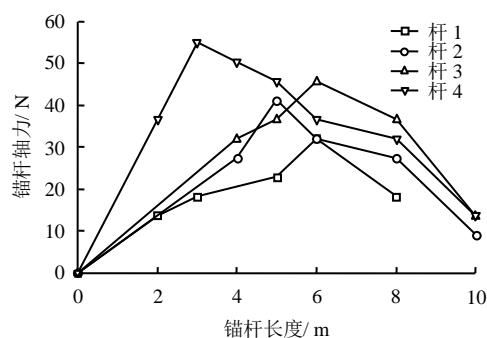


图6 工况1全长黏接锚杆轴力

Fig.6 The axial force of the wholly grouted anchor in the first condition

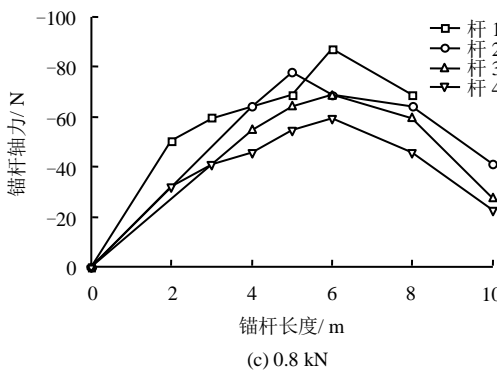
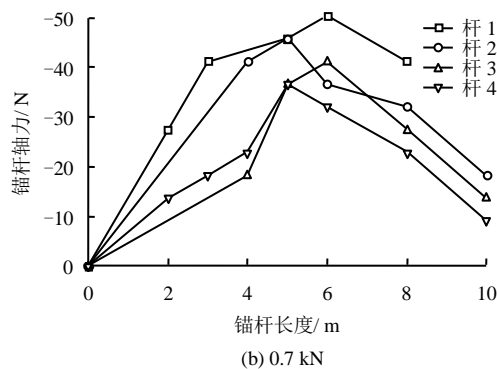
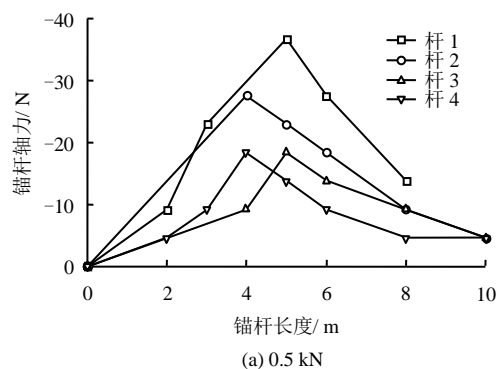


图7 工况2不同预应力作用下全长黏接锚杆轴力

Fig.7 The axial force of the wholly grouted anchor under different pre-stresses in the secondary condition

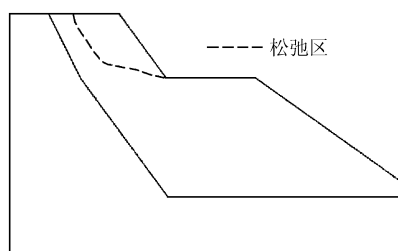
时全长黏接锚杆的轴力为负值,说明坡体处于受压状态,施加的锚索预应力越大,挤压坡体变形时作用在全长黏接锚杆表面的摩擦力越大,从而锚杆受到的压力越大。

如果将模型边坡中的试验结果通过相似关系反推到原型边坡,则 3 级边坡施工中全长黏接锚杆轴力发生突变的位置如表 4 所示,将每根锚杆轴力最大值的位置从上到下依次相连便得到坡体的影响区范围。图 8(a)为工况 1 引起的坡体松弛区范围,图 8(b)是工况 2 时不同预应力作用下的坡体预压区,从坡面向坡体内部方向依次是预应力为 500、700、800 kN 时的预压区边界。从表 4 可以看出,当 3 级边坡锚索预应力为 700 kN 时,坡体预压区范围大于松弛区范围,基本可抵消边坡开挖引起的不利影响,说明锚索预应力结构具有非常好的控制边坡松弛变形的作用。

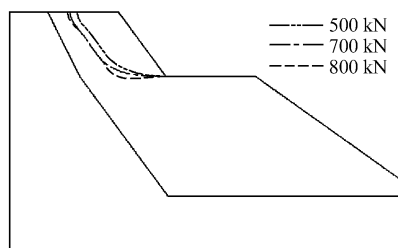
表 4 3 级边坡施工后全长黏接锚杆轴力发生突变的位置
(单位: m)

Table 4 The location of mutated axial force of the wholly grouted anchor after the third construction (unit: m)

| 锚杆号 | 工况 1 | 工况 2 (不同预应力/kN) | | |
|-----|------|-----------------|-----|-----|
| | | 500 | 700 | 800 |
| 杆 1 | 6 | 5 | 6 | 6 |
| 杆 2 | 6 | 5 | 6 | 6 |
| 杆 3 | 6 | 5 | 6 | 6 |
| 杆 4 | 3 | 4 | 5 | 6 |



(a) 工况 1 引起的坡体松弛区



(b) 工况 2 不同预应力作用下的坡体预压区

图 8 3 级边坡施工后的坡体影响区

Fig.8 The influenced zones after the third slope construction

3.2 2 级边坡松弛区和预压区

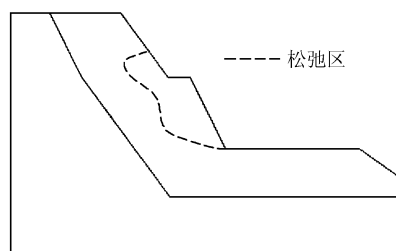
2 级边坡施工后,边坡中的 8 根全长黏接锚杆的轴力也表现出先增大后减小的趋势,其中轴力发生突变的位置见表 5。将每根锚杆轴力最大值的位置从上到下依次相连便得到坡体的影响区范围。杆 1、2 轴力最大值位置与工况 2 相比未发生变化,因此,表中不予列出。图 9(a)为工况 1 引起的坡体松弛区范围,图 9(b)是工况 4 时不同预应力作用下的坡体预压区,从坡面向坡体内部方向依次是预应力为 300、400、500、800 kN 时的坡体预压区边界。从表 5 可以看出,在相同的锚索预应力作用下,2 级边坡锚索框架预压区范围大于 3 级边坡锚索框架预压区范围,说明 2 级边坡锚索的支护效率更高;2 级边坡锚索预应力为 300 kN 时,坡体预压区范围大于松弛区范围,坡体预压区范围随着锚索预应力的增加而增大。

表 5 2 级边坡施工后全长黏接锚杆轴力发生突变的位置
(单位: m)

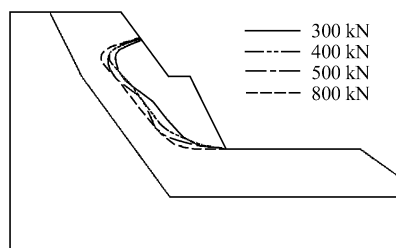
Table 5 The location of mutated axial force of the wholly grouted anchor after the secondary slope construction (unit: m)

| 锚杆号 | 工况 3 | 工况 4 (不同预应力/kN) | | | |
|-----|------|-----------------|-----|-----|-----|
| | | 300 | 400 | 500 | 800 |
| 杆 3 | — | 4 | 5 | 5 | 6 |
| 杆 4 | 4 | 5 | 5 | 6 | 6 |
| 杆 5 | 5 | 6 | 7 | 7 | 8 |
| 杆 7 | 6 | 5 | 6 | 7 | 7 |
| 杆 8 | 4 | 4 | 4 | 5 | 6 |

注:“—”为与紧前工况相比轴力最大值位置未发生变化。



(a) 工况 3 引起的坡体松弛区



(b) 工况 4 不同预应力作用下的坡体预压区

图 9 2 级边坡施工后的坡体影响区

Fig.9 The influenced zones after the secondary slope construction

3.3 一级边坡松弛区和预压区

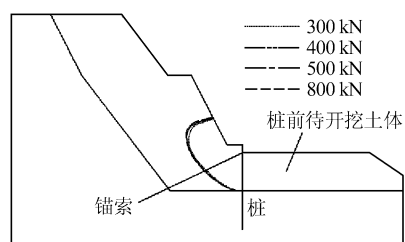
一级边坡锚索桩支护（工况 5）时，杆 8 的轴力最大值位置发生了转移，具体见表 6，杆 1~7 的轴力最大值位置与工况 4 相比未发生变化，因此，表中不予列出。1 级边坡桩前土体开挖后（工况 6）杆 5~8 的轴力最大值位置发生了转移，具体见表 7，杆 1~4 的轴力最大值位置与工况 5 相比未发生变化，因此表中不予列出。图 10(a)不同预应力作用下的坡体预压区，从坡面向坡体内部方向依次是预应力为 300、400、500、800 kN 时的坡体预压区边界，图 10(b)是工况 6 引起的坡体松弛区范围。所有施工完成后的模型边坡如图 11 所示。

表 6 工况 5 全长黏接锚杆轴力发生突变的位置
Table 6 The location of mutated axial force of the wholly grouted anchor in the fifth condition

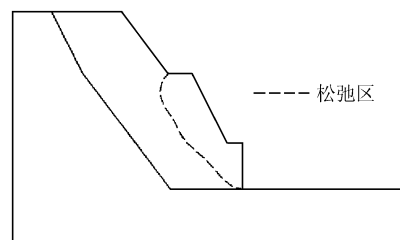
| 预应力 / kN | 突变位置（杆 8） / m |
|-------------|------------------|
| 300 | 3 |
| 400 | 4 |
| 500 | 4 |
| 800 | 4 |

表 7 工况 6 全长黏接锚杆轴力发生突变的位置
Table 7 The location mutated axial force of the wholly grouted anchor in the sixth condition

| 锚杆号 | 突变位置 / m |
|-----|-------------|
| 杆 5 | 5 |
| 杆 7 | 5 |
| 杆 8 | 5 |



(a) 工况 5 不同预应力作用下的坡体预压区



(b) 工况 6 引起的坡体松弛区

图 10 1 级边坡施工后的坡体影响区
Fig.10 The influences zone after the primary slope construction



图 11 施工完成后的模型边坡
Fig.11 The model slope after construction

4 影响区重叠效应

由于下级边坡施工时会对已完成的上部结构的受力产生一定的影响，本节为了便于描述和符号的统一，对下列符号释义进行规定： F_i 为第 i 次支护时的锚索初始预应力（ $i=1, 2, 3$ ）； ΔF_{jk} 为工况 k 完成后与工况 j 相比锚索轴力的增量， j 为 k 的紧前工序（ $j=2, 3, 4, 5$ ； $k=3, 4, 5, 6$ ）。

4.1 2 级边坡施工后锚索轴力增量

从理论上分析，工况 2 坡顶、坡腰、坡脚锚索施加预应力后会各自产生相应的预压区，而笔者通过试验得到的边坡支护后形成的预压区是各级预应力锚索引起的预压区总的叠加效应。

在工况 3 完成后，3 级边坡锚索轴力的变化量如表 8 所示。坡顶和坡腰锚索轴力未发生变化，坡脚锚索轴力增大了 3 550 N。这是因为 2 级边坡开挖松弛区和 3 级边坡锚索框架预压区的部分区域发生重叠，如图 12(a)阴影部分所示。3 级边坡坡脚锚索轴力增大是因为 2 级边坡开挖松弛区向上延伸至 3 级边坡坡腰附近，与 3 级边坡坡脚预应力锚索引起的预压区重叠，致使重叠区域内的岩土体发生松弛，锚索被拉伸，从而轴力随之增大；而坡顶和坡腰预应力锚索各自形成的预压区未与 2 级边坡开挖松弛区发生重叠或重叠区域很小，致使锚索未受到明显拉伸，因此，轴力未发生变化。这是下级边坡开挖松弛区与上级边坡预压区的重叠效应，本文称之为影响区重叠效应。

表 8 工况 3 完成后 3 级边坡锚索轴力增量
Table 8 Axial force increments of cables of the third slope after the third condition

| 锚索位置 | 锚索轴力增量 ΔF_{23} / N |
|------|-------------------------------|
| 坡顶 | 0 |
| 坡腰 | 0 |
| 坡脚 | 3 550 |

在工况 4 完成后, 3 级边坡锚索轴力的变化量如表 9 所示, 坡顶锚索轴力未发生变化, 坡腰和坡脚锚索轴力增量为负值。这是因为 2 级边坡锚索框架预压区和 3 级边坡锚索框架预压区的部分区域发生重叠, 如图 12(b)阴影部分。3 级边坡坡脚和坡腰锚索轴力减小是因为 3 级边坡坡脚、坡腰预应力锚索各自形成的预压区和 2 级边坡锚索框架预压区发生重叠, 致使重叠区域内的岩土体被挤压, 从而减轻了锚索的受力; 而 3 级边坡坡顶预应力锚索形成的预压区未与 2 级边坡锚索框架预压区发生重叠或重叠区域很小, 使锚索未受到明显影响, 因此, 轴力未发生变化。若锚索预应力 F_2 越大, 则重叠区面积越大, 3 级边坡锚索轴力的变化量就越大。这是下级边坡预压区与上级边坡预压区的重叠效应, 是另一种影响区重叠效应。

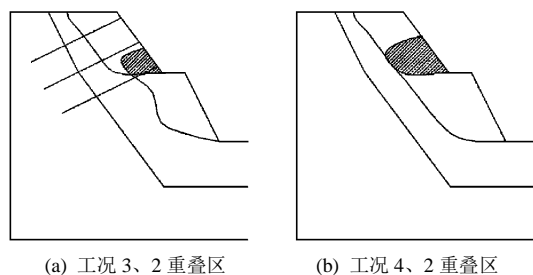


图 12 2 级边坡施工后形成的影响重叠区

Fig.12 The overlap of influenced zones after the secondary slope construction

表 9 工况 4 完成后 3 级边坡锚索轴力增量

Table 9 Axial force increments of cables of the third slope after the forth condition

| 预应力 F_2 / kN | 锚索轴力增量 ΔF_{34} / N | | |
|-------------------|----------------------------|--------|--------|
| | 坡顶 | 坡腰 | 坡脚 |
| 300 | 0 | -1 420 | -4 970 |
| 400 | 0 | -2 130 | -6 390 |
| 500 | 0 | -2 840 | -7 810 |
| 800 | 0 | -3 550 | -9 940 |

4.2 1 级边坡施工后锚索轴力增量

在工况 5 锚索桩对 1 级边坡支护后, 3 级边坡

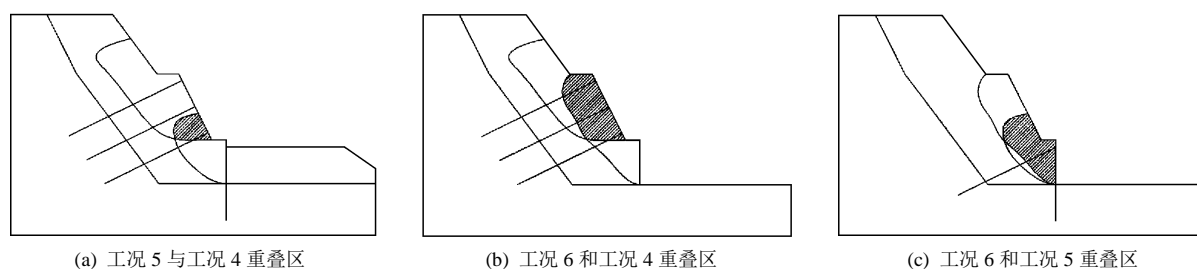


图 13 一级边坡施工后形成的影响重叠区

Fig.13 The overlap of influenced zones after the primary slope construction

的锚索轴力未发生变化, 2 级边坡的锚索轴力如表 10 所示。从表可看出, 坡顶和坡腰的锚索轴力未发生变化, 而坡脚锚索轴力有所减小, 锚索预应力 F_3 越大, 2 级边坡坡脚锚索轴力的变化量就越大。这是因为 1 级边坡锚索桩预压区和 2 级边坡锚索框架预压区的部分区域发生重叠, 如图 13(a)阴影部分。坡脚锚索轴力增量为负值, 说明 1 级边坡锚索桩支护后减小了 2 级边坡锚索框架的受力, 二者形成一种协同变形、共同承担滑坡推力的联合支挡结构。

工况 6 完成后 3 级边坡锚索轴力未发生变化, 2 和 1 级边坡锚索轴力均均有不同程度的增大, 如表 11 所示。2 级边坡锚索轴力增大是因为 1 级边坡开挖松弛区与 2 级边坡各级锚索引起的预压区发生重叠, 如图 13(b)所示, 从而使重叠区域的岩土体发生松弛, 锚索被拉伸进而轴力发生变化。1 级边坡锚索轴力增大是因为 1 级边坡开挖松弛区与锚索桩预压区发生重叠, 如图 13(c)所示。从表 11 可看出, 锚索轴力增量从上到下依次增大, 2 级边坡坡腰锚索轴力增量是坡顶的 2 倍, 坡脚锚索轴力增量是坡顶的 4 倍, 1 级边坡锚索轴力增量是 2 级边坡坡顶

表 10 工况 5 完成后 2 级边坡锚索轴力增量

Table 10 Axial force increments of cables of the secondary slope after the fifth condition

| 预应力 F_3 / kN | 锚索轴力增量 ΔF_{45} / N | | |
|-------------------|----------------------------|----|--------|
| | 坡顶 | 坡腰 | 坡脚 |
| 300 | 0 | 0 | -710 |
| 400 | 0 | 0 | -1 420 |
| 500 | 0 | 0 | -2 130 |
| 800 | 0 | 0 | -4 260 |

表 11 工况 6 完成后锚索轴力增量

Table 11 Axial force increments of cables after the sixth condition

| 2 级边坡锚索 | 锚索轴力增量 ΔF_{56} / N |
|---------|----------------------------|
| 坡顶 | 1 420 |
| 坡腰 | 2 840 |
| 坡脚 | 5 680 |
| 1 级边坡锚索 | 12 780 |

锚索轴力增量的9倍。这说明距开挖区域越近,受开挖扰动的影响越大,坡体位移变形越大,锚索受拉伸的程度越大;同时间接说明开挖引起的破坏是从临空面下部开始逐渐向上延伸;由开挖引起的滑坡推力绝大部分由距开挖面最近的支挡结构承担。

5 结 论

(1) 在边坡中从上到下埋设多排全长黏结式锚杆充当测力计串的作用,通过全长黏接锚杆轴力的变化趋势判断边坡施工引起的坡体松弛区或预压区范围,采用模型试验验证了这种方法的合理性和可行性。

(2) 当锚索预应力增加到一定程度时,坡体预压区范围将大于由于开挖引起的松弛区范围,基本可抵消边坡开挖引起的不利影响,说明锚索预应力结构具有非常好的控制边坡松弛变形的作用。在相同的锚索预应力作用下,2级边坡锚索框架预压区范围大于3级边坡锚索框架预压区范围,说明2级边坡锚索的支护效率更高。

(3) 提出了影响区重叠效应的概念。若下级边坡的开挖松弛区(或预压区)与上级边坡的预压区发生重叠,那么会对上级边坡重叠区域的岩土体产生松弛(或加固)作用,从而影响该重叠区域的锚索的受力情况,使锚索轴力相应增大(或减小),重叠范围越大,锚索轴力变化量越大;对于重叠区域之外的锚索其轴力则不受影响。影响区重叠效应是锚索轴力发生变化的根本原因。

参 考 文 献

- [1] 肖世国,周德培. 开挖边坡松动区的近似解析[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1700—1704.
XIAO Shi-guo, ZHOU De-pei. Approximate analysis of relaxation zone for some cutting slopes by elastic wedge body theory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1700—1704.
- [2] 冯学敏,陈胜宏,李文纲. 岩石高边坡开挖卸荷松弛准则研究与工程应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 452—456.
FEN Xue-min, CHEN Sheng-hong, LI Wen-gang. Research on unloading relaxation criterion of high rocky slope excavation and its engineering application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(Supp.2): 452—456.
- [3] 邵江,周德培,谢红强. 土质边坡开挖松动区的简化分析[J]. 岩土工程界, 2004, 7(10): 71—73.
SHAO Jiang, ZHOU De-pei, XIE Hong-qiang. Simplified analysis of relaxation zone for soil slope under excavation[J]. **Geotechnical Engineering World**, 2004, 7(10): 71—73.
- [4] 邓建辉,王浩,姜清辉,等. 利用滑动变形计监测岩石边坡松动区[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 180—184.
DENG Jian-hui, WANG Hao, JIANG Qing-hui, et al. Monitor of disturbed zone for rock slope by sliding deformer[J]. **Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(2): 180—184.
- [5] 孙书伟,朱本珍,张忠平. 顺层高边坡开挖松动区的数值模拟研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(5): 74—79.
SUN Shu-wei, ZHU Ben-zhen, ZHANG Zhong-ping. Study on the disturbed zone of a cut bedding high rock slope by numerical simulation[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2008, 30(5): 74—79.
- [6] 王敏强,许原. 有限元分析中开挖释放荷载的讨论[J]. 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(1): 56—59.
WANG Min-qiang, XU Yuan. Discussion of released loads in calculation of excavation by finite element method[J]. **Engineering Journal of Wuhan University (Engineering and Technology Edition)**, 2001, 34(1): 56—59.
- [7] 罗先启,葛修润. 滑坡模型试验理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
LUO Xian-qi, GE Xiu-run. Theory and application of landslide model test[M]. Beijing: China Water Power Press, 2008.