

边坡加固中预应力锚索失效机制与失效效应研究

李英勇^{1,2}, 张顶立¹, 张宏博³, 宋修广³

(1. 北京交通大学 土建学院, 北京 100044; 2. 山东省交通厅公路局, 济南 250002; 3. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘 要: 预应力锚索已广泛应用于边坡加固工程中, 由于其承受高拉应力作用, 并长期埋置于潮湿的岩土环境中, 在综合因素的作用下存在失效的可能性。结合实体工程中的大量监测数据, 对预应力锚固系统长期稳定性的影响因素进行了深入分析, 提出了预应力锚固系统的失效机制; 为了分析锚索失效效应, 确定合理的处理时机, 分别进行了现场卸载试验及数值模拟, 研究了单锚及群锚失效效应, 提出了边坡局部失稳的判据, 其结果可为类似工程提供借鉴。

关 键 词: 预应力锚固系统; 失效机制; 失效效应; 失稳判据

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Research on failure mechanism and effects of prestressed anchor cables for reinforcing slopes

LI Ying-yong^{1,2}, ZHANG Ding-li¹, ZHANG Hong-bo³, SONG Xiu-guang³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Highway Bureau of Shandong Provincial Department of Communications, Jinan 250002, China; 3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Although prestressed anchor cables have been used to reinforce slopes widely, they can happen to fail at some time because they have bear high-tension stress in moist environment and been influenced greatly by many external factors. In order to make sure of failure effects of anchorage system well, failure mechanisms are put forward firstly according to monitor data of an actual slope engineering. Then, unloading test of a cable at site was performed to get the influence on tension-force of neighboring cables. By adopting the numerical simulation, the influence on anchorage force of neighboring cables and stability of slope because of cable failure is analyzed in detail. Finally, failure criterion for part slope is put forward.

Key words: prestressed anchor cables; failure mechanism; failure effects; failure criterion

1 引 言

预应力锚固技术具有对岩土体扰动小、施工快、安全、经济等优点, 在边坡加固工程中得到广泛应用, 并取得了显著的经济和社会效益^[1-3], 其中预应力锚索锚固力大, 可长距离穿越岩土体, 已成为大型工程预应力锚固技术的首选。预应力锚索施加张拉力后将长期埋置于潮湿的岩层或土体中, 并持续承受高拉应力作用, 其使用寿命将取决于锚索的耐久性^[4-5]。在工程实践中, 锚固边坡失稳的事故时有发生^[5-6]。预应力锚索失效后, 将无法保证边坡的稳定性和安全性, 因此有必要对岩土预应力锚固系统稳定性的影响因素及失效效应进行研究, 为边坡的设计、施工和养护工作提供科学的依

据和为前置性处理边坡地质灾害提供理论参考。

本文结合实体工程, 根据锚索预应力长期监测数据及锚索腐蚀的现场试验情况, 对预应力锚固系统稳定性的影响因素进行了较为全面的分析, 分析了锚索失效机制, 同时基于现场试验及数值模拟, 对锚索的失效效应进行深入地分析研究。

2 预应力锚固系统的失效机制分析

2.1 工程概况

济南绕城高速公路南线工程 K23+990~K24+180 段路堑边坡位于济南市南部山区, 山体海拔高度在 460 m 以上, 最大开挖深度达 80 多米。为保证边坡的稳定性, 采用了 30~45 m 预应力锚索、抗滑桩、系统锚杆和挂网喷浆等技术措施予以加固

处理。为了确保工程施工和运行的安全,现场布设了锚索测力计监测锚索预应力的长期变化规律。

2.2 预应力锚固系统长期稳定性的影响因素分析

预应力锚索的耐久性,包括锚索的疲劳强度及锚索防蚀保护,关系到工程的长期稳定性,应满足设计期限的工作要求和安全度^[5]。因此,在工程应用中,应将预应力锚索的长期稳定性作为一项重要内容进行考虑。

2.2.1 环境温度对锚索锚固力的影响

岩石及坡体内注进的水泥砂浆都是热导体,具有热胀性,当温度升高时,组成岩石的颗粒及混凝土体积都会产生膨胀,引起预应力的增加^[7]。

(1) 昼夜温度的影响

随机选取锚索进行了现场实测,测试时环境温度昼夜温差 $5\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$,12:00左右温度最高,24:00左右温度最低。图1表明,锚索拉力值的变化规律与温度变化是相符合的,表现为先增大后减小,变化幅度约为24 kN,占锚索应力值的4.2%,表现出一种较小幅度的循环加载特征。

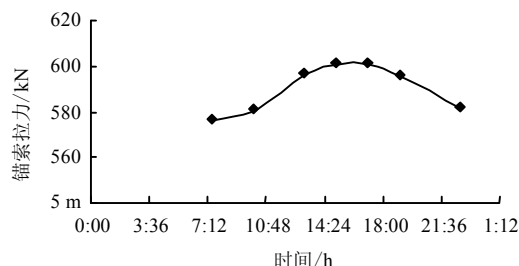


图1 锚索预应力昼夜变化

Fig.1 Prestress variation of cables in 24 h

(2) 季节温度的影响

如图2所示,锚索拉力随季节的不同而有较大幅度的变化,自2005年7月至2006年5月,季节温差约为 $35\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,锚索应力值呈现出明显的周期变化规律,在冬季预应力值较低,而在夏季预应力值较高,其中ML3和ML5变化幅度约40 kN,ML7变化幅度约70 kN。

2.2.2 降雨的影响

如图3所示,二级坡上的ML2、ML3及一级坡上的ML7都处于滑带中心位置,降雨前后锚索拉力值增量约为60~100 kN,最大增幅为18.2%,其余几个监测点的锚索拉力值的增量都介于30~50 kN。这种由于降雨而产生的预应力波动变化频率较低,一般每年3~8次,表现出一种较大幅度的循环加载特征^[8]。

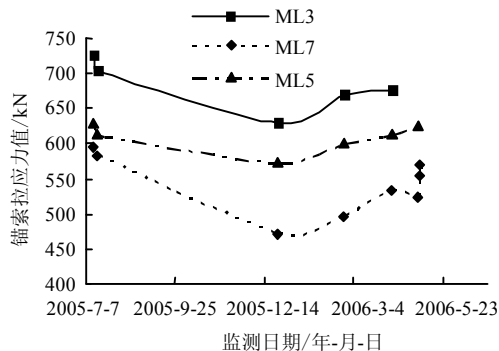


图2 季节温度变化对锚索拉力值的影响

Fig.2 Prestress variation of cables in one year

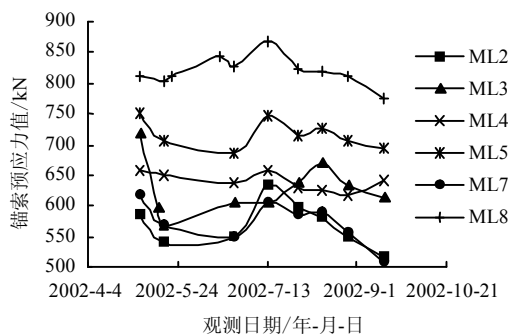


图3 雨季期间锚索预应力的变化规律

Fig.3 Prestress variation of cables during rain season

2.2.3 环境腐蚀作用的影响

预应力锚索长期埋置于潮湿的地层环境中,并持续承受高拉应力作用,环境腐蚀作用不可忽视。对现场卸载剥露的2根预应力锚索(已使用51个月)的实际腐蚀情况分析后,具有如下特点:

①经检测,锚头部位局部腐蚀坑最深处于1.26 mm,平均腐蚀速率为0.28 mm/a,单位长度腐蚀量为0.26 g/cm,占单位长度总质量的17%,腐蚀坑最浅处也有0.26 mm。

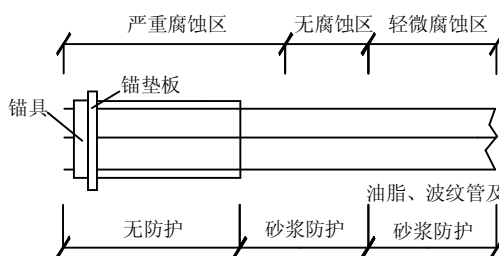


图4 锚索腐蚀的“三段式”表现

Fig.4 Three different corrosion forms along cable

②现场检测表明,索体在腐蚀介质作用下,由于沿轴向存在不同的防护措施,一般将发生“三段式”的腐蚀现象(图4),即从锚头至锚垫板下无任何防护措施的一段距离内腐蚀量最大,为“严重腐蚀”。

区”。在锚垫板下方有水泥浆或砂浆保护,此段初始 5~10 cm 范围内,仍有较为严重的腐蚀现象存在,而其余部位未有显著腐蚀现象发生,出现了间隔性的“无腐蚀区”,其后油脂、波纹管保护段为“轻微腐蚀区”。

2.2.4 预应力锚固系统的失效机制分析

由以上监测数据可知,锚索的轴力呈现出一定范围的交变过程,容易引起疲劳破坏。其原因一般认为是材料内部(金属内部组织的不同)或有外部缺陷(表面缺陷、刀痕、锈蚀等)点产生应力集中,使其产生裂纹,疲劳破坏时的强度随应力变化的幅度($\Delta\sigma$)和循环次数而变^[9]。

岩土预应力锚固系统的杆体材料多为金属材料,它虽然具有强度高、刚度大等特点,但易生锈钢腐蚀是其一个致命的缺陷^[10-11]。因锚索长期处于潮湿或存在腐蚀介质的环境中及高拉应力状态下,对腐蚀十分敏感,易产生应力腐蚀。应力腐蚀表现为杆体材料在腐蚀介质和拉应力共同作用下产生较大的断面损失,致使杆体材料应力水平增大和局部应力集中,可能在无任何先兆的情况下导致杆体材料断裂破坏。

另外,锚索失效数量与边坡稳定性的相关性,关系到边坡补锚加固的合理时机,有必要对预应力锚索在边坡加固中的单锚及群锚失效效应进行深入研究,为边坡后期加固处理提供科学的决策标准。

3 预应力锚索失效效应的现场试验研究

3.1 试验过程

为了研究单根锚索失效效应,制定了试验方案如图 5、6 所示。由图可见,在 K24+037 处二级坡面上选取出水量较大的预应力锚墩(设为 0[#]),锚索长度为 35 m,锚下为结晶灰岩或灰岩。卸载前首先监测其 2 侧测力计 1[#]和 2[#]的读数,其中 1[#]距 0[#]点 15.2 m,2[#]点距 0[#]点 7.2 m。挖除 0[#]锚头周围部分岩体,释放锚头预应力,同时监测 1[#]和 2[#]的读数。

破除锚头混凝土后,在锚墩 1.5 m×1.5 m×1.5 m 范围内挖除墩下岩土体,锚索应力释放稳定后监测位于其两侧的锚索预应力变化。

锚索失效后,相当于边坡滑移体失去了一个约束点,表层岩体的局部整体性降低,下滑趋势增强。同时,表层岩体的压密效应减弱,岩体变形模量降低,在岩体自重作用下,变形量增大。以上两方面因素造成该点下滑力增大,由于岩体变形具有一定

的扩散效应,会对周围围岩产生推挤作用,造成邻近锚索拉力增大。



图 5 现场锚索布置图

Fig.5 Photo of cables arrangement on site

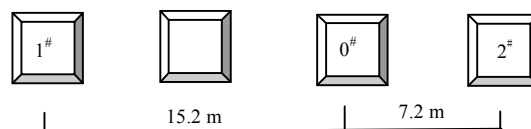


图 6 预应力锚索现场卸荷试验

Fig.6 Unloading test of prestressed cable on site

3.2 监测数据分析

由表 1 可知,2[#]锚索的拉力值增长较大,增幅达到 12.3%,但 1[#]锚索的反应并不显著,这与其所处的地质条件及锚索间距有一定关系。2[#]锚索处于主滑坡区域中,承担的下滑力较大。并且表明,锚墩间距对群锚效应具有显著影响,拉力增量与间距呈非线性关系。另一方面,锚索失效后,在一段时间内坡体内部应力将处于动态调整过程中,周围锚索拉力也在不断变化,变化幅度如表 2 所列。这表明,单锚失效后,周围锚索瞬间拉力增量最大,但随着时间的延长,坡体内部达到新的力学平衡状态,拉力值逐渐降低。

表 1 锚索卸载前后两侧锚索拉力变化值
Table 1 Tension-force variation of neighboring cables because of failure of one cable

| 锚索拉 力变化 | 1 [#] | | | 2 [#] | | |
|------------|--------------------|--------------------|------|--------------------|--------------------|------|
| | 0 [#] 卸载前 | 0 [#] 卸载后 | 增幅/% | 0 [#] 卸载前 | 0 [#] 卸载后 | 增幅/% |
| 拉力值 /kN | 591.5 | 592.8 | 0.2 | 632.8 | 710.9 | 12.3 |

表 2 0[#] 锚索卸荷后 2[#] 点锚索拉力变化
Table 2 Variation of prestressed cable No.2 after one cable failed during 20 days

| 时间/d | 卸荷前 | 0 | 1 | 7 | 18 |
|--------|-------|-------|-----|-----|-----|
| 拉力值/kN | 632.8 | 710.9 | 670 | 665 | 632 |

虽然现场试验数据真实可靠,但由于监测项目单一,不能全面反映锚索失效效应。因此,根据现场岩体力学参数,本文针对预应力锚索的单锚及群锚失效效应进行了数值模拟。

4 预应力锚索失效效应的数值模拟

连续介质快速拉格朗日计算程序(FLAC-3D)采用“显式拉格朗日”算法和“混合-离散分区”技术,能够准确地模拟材料的塑性破坏和流动,最大优点是网格能随单元的变形而更新,使得它能方便处理大变形问题,在国际岩土领域应用广泛^[12-13]。

4.1 预应力锚索单元(Cable单元)^[14]

如图7所示,由于粘结力的存在,锚索约束了岩土体的变形,提高了岩土体的稳定性。锚索内锚固段通过砂浆与岩体紧密接触,在自由段与砂浆分离,只提供轴向拉力。自由段防腐保护周围也进行压力注浆,所以锚索体还可提供一定的抗剪能力及抗弯能力,但主要是对岩土体施加轴向压力,使其形成一个有机的整体。

如图8所示,FLAC采用空间弹簧粘结滑移单元来模拟锚索和胶结体之间的传力和滑移特性,以便分析预应力在锚索和岩土体之间传递并在岩体内

传播、扩散的规律。锚索单元和砂浆单元之间以及砂浆单元和岩体单元之间的粘结单元采用双弹簧单元模拟,双弹簧单元由两个互相垂直的虚拟弹簧组成,虚拟弹簧虽然没有几何尺寸,但可以反映粘结滑移的力学效果,这两个方向弹簧的刚度分别用法向刚度 K_v 和切向刚度 K_h 表示。

4.2 计算模型及计算参数的选取

边坡的有限元模型及网格划分如图9所示,其中预应力锚索为矩形布置,假定的锚索失效数量及失效位置如图10所示。根据工程地质剖面图及室内岩体强度试验结果,确定材料参数见表3、4。

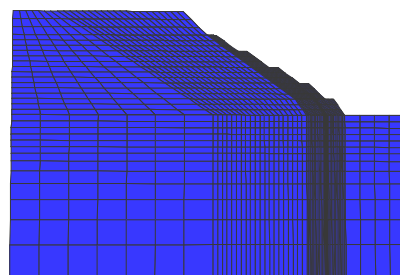


图9 K24边坡的计算网格断面图

Fig.9 Grid for high slope model

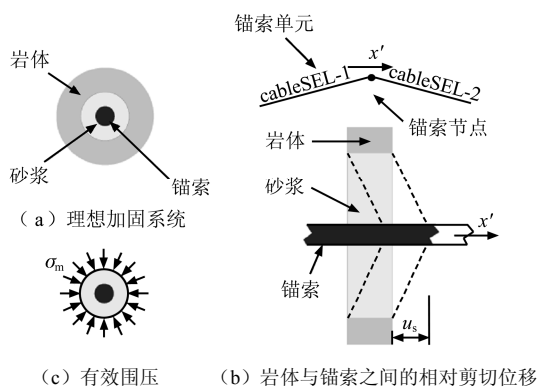


图7 预应力锚索黏聚力作用示意图

Fig.7 Diagram of grouted-cable system

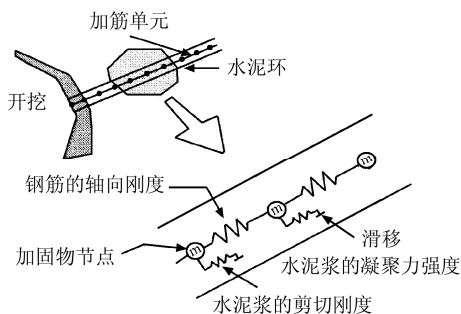


图8 预应力锚索的内锚固段力学模型

Fig.8 Mechanical model of fixed body of prestressed anchor cable

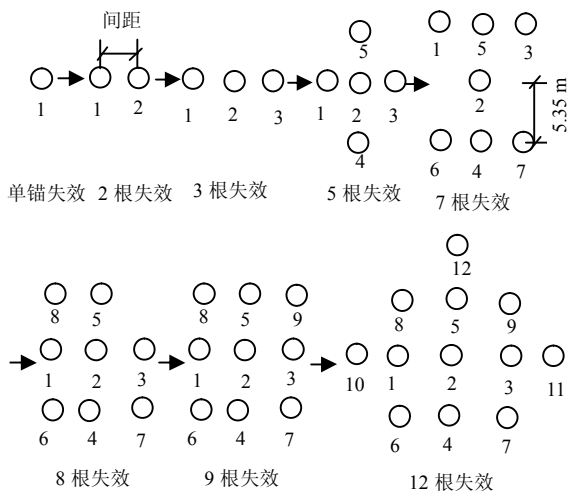


图10 锚索失效数量与失效位置示意图

Fig.10 Location of failure cables

4.3 单锚失效效应

4.3.1 单锚失效后周围锚索拉力值的变化

(1) 单锚失效影响范围及影响因子

由图11可知,单锚失效后,对邻近锚索拉力存在影响,但与现场卸荷试验中的2#锚索点相比,计算得到的拉力增量偏小,分析原因认为,①现场选取试验点位于出水量较大的坡体,试验时岩体强度相对较低,锚索承担的下滑力较大;②表1中所得

数值为卸荷瞬间拉力增量,而计算结果为应力平衡后所得值,二者存在一定差距;③现场卸荷试验过程中对岩体产生的撞击力也加剧了局部坡体的滑移量。图 11 表明,①单锚失效后的影响范围最大为 15~18 m;②锚索间距越大,影响因子越小,这是由于锚索间距越大,周围锚索的约束效应越小。

表 3 材料主要物理力学参数
Table 3 Parameters of various materials

| 材料类型 | 弹性模量 /MPa | 泊松比 μ | 密度 ρ /(g/cm ³) | 凝聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$ |
|-------|-------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------|
| 滑带物质 | 80 | 0.35 | 1.89 | 40 | 18 |
| 风化泥岩 | 320 | 0.3 | 1.89 | 50 | 22 |
| 风化灰岩 | 400 | 0.28 | 1.89 | 80 | 25 |
| 基岩 | 4.2×10^3 | 0.2 | 2.10 | | |
| 锚墩 | 35×10^3 | 0.2 | 2.25 | | |
| 混凝土喷面 | 1×10^3 | 0.2 | 2.10 | | |
| 锚索 | 195×10^3 | 0.15 | 7.90 | | |

表 4 锚索及内锚固段砂浆材料参数
Table 4 Parameters for grout and cables

| 砂浆粘结强度 c_g/MPa | 砂浆剪切刚度 $k_g/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ | 砂浆内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$ | 锚索孔径 d/mm | 锚索直径 ϕ/mm | 锚索极限抗拉强度 /GPa |
|----------------------------|--|--------------------------------|--------------|--------------------------|------------------|
| 3.5 | 5.35×10^6 | 30 | 110 | $6 \times 7 \Phi 5$ | 1.86 |

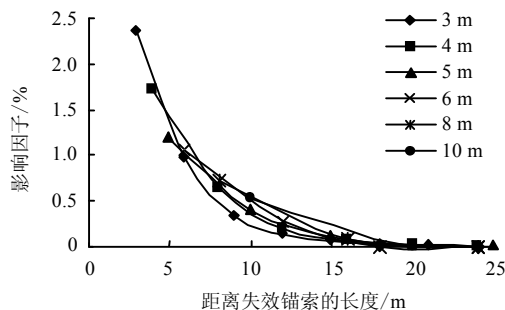


图 11 单锚失效后对周围锚索的影响

Fig.11 Influencing factor on tension of surrounding cables

(2) 锚索间距对周围锚索最大拉力增量的影响

锚索失效后,周围锚索最大拉力增量与锚索间距的关系如图 12 所示,其变化表现为 2 个特征:①两侧锚索拉力增量随锚索间距的增大而减小,比如间距 3 m 与间距 10 m 相比,后者拉力增量仅为前者的 30%作用;②失效点下排锚索拉力增量相对较大,而上排锚索拉力增量最小。

4.3.2 单锚失效后岩体位移及塑性区扩展

锚索失效后,沿坡体横向及纵向均出现岩体位移,影响区域约 20 m。边坡位移量与锚索间距有显著的关系,间距越大,位移量相对越大,最大位移约 1 mm。同时,单锚失效后,一、二级坡体的内

部均有多处岩体发生了局部塑性屈服,以剪切破坏为主,但尚未贯通。

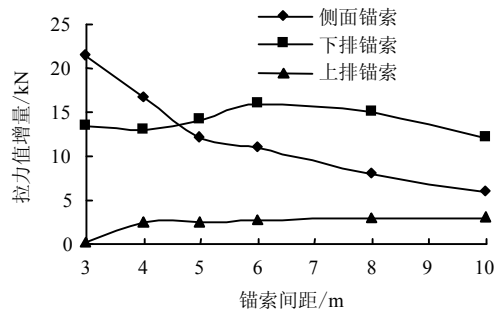


图 12 单锚失效后不同位置锚索拉力的最大增量

Fig.12 Maximum increment tension of surrounding cables in different locations

4.4 群锚失效效应

4.4.1 群锚失效后邻近锚索拉力的变化

图 13 表明,邻近锚索拉力增量随锚索间距的增大而减小,随失效锚索数量的增多而增大,如 3 根锚索失效时,间距为 3 m 的最大拉力增量为 38 kN,而间距为 10 m 时仅为 11 kN,相差 27 kN。对于间距为 3 m 的布置方式,3 根锚索失效时为 38 kN,8 根失效时为 61 kN,相差 23 kN。随着失效锚索的增多,周围锚索承担的下滑力增大,但当失效锚索多于 8 根时,周围锚索拉力增量呈减少趋势,表明失效锚索区域坡体受周围锚索的约束作用减弱。

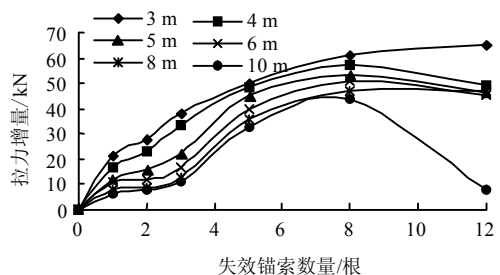
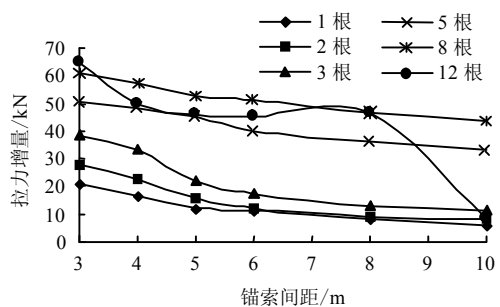


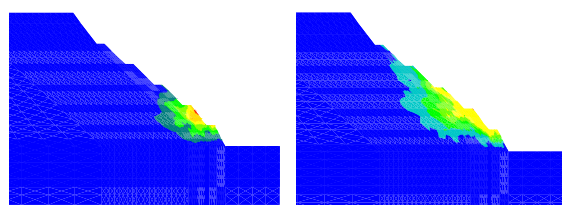
图 13 群锚失效时锚索最大拉力增量与锚索间距及锚索失效数量的关系

Fig.13 Relationship of maximum tension of surrounding cables with space or number of failure cables

4.4.2 群锚失效对边坡位移的影响

(1) 坡体内部位移分布情况

对比图 14 (a) 和 14 (b), 随着锚索失效数量的增多, 坡体内部变形区域逐渐扩大, 其中 5 根锚索失效时, 岩体变形区域分布于一级坡中部至三级坡顶部, 12 根锚索失效时分布于一级坡底部至五级坡中部。



(a) 5 根锚索失效

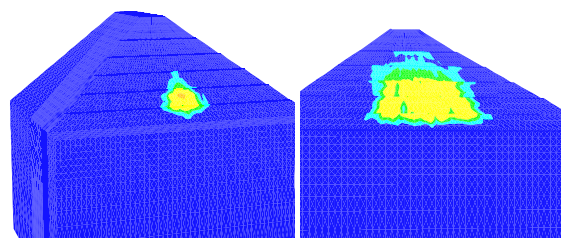
(b) 12 根锚索失效

图 14 锚索失效后坡体内部位移等值线图 (间距为 5 m)

Fig.14 Displacement contours of cross section in the center of slope after group cables failure (cable space is 5 m)

(2) 沿坡体走向 (横向) 分布情况

如图 15 所示, 多根锚索失效后坡体变形区域不仅沿坡体纵向扩展, 沿坡体横向也有大面积的扩展, 如 12 根锚索失效后, 沿边坡走向的变形区域宽度约为 60 m, 远超过失效锚索所在区域 (宽 20 m)。



(a) 5 根锚索失效

(b) 12 根锚索失效

图 15 群锚失效后坡体表面位移等值线图 (间距为 5 m)

Fig.15 Displacement contours on the surface of slope after group cables failure (Cable space is 5 m)

(3) 群锚失效后坡体最大位移量变化情况

如图 16 所示, 无论锚索间距大小, 边坡最大位移量随失效锚索数量的增多而逐渐增大, 特别当失效锚索数量超过 8 根以后, 边坡位移量骤然增大, 如锚索间距为 8 m 的工况, 坡体最大位移量由 8 根失效时的 3.9 mm 增大到 11.8 mm。边坡位移量与锚索间距也有一定关系, 锚索间距大, 位移量也相对较大, 坡体发生整体失稳的几率越大。

4.4.3 群锚失效后塑性区的扩展规律

塑性区贯通判据是边坡失稳的必要条件, 而非充分条件, 但考虑到边坡的安全度要求, 采用该判据可起到预警的必要作用, 因此采用该判据结合坡

面位移突变进行局部失稳分析。

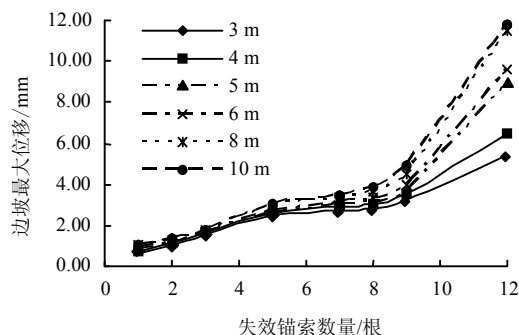


图 16 边坡最大位移量与失效锚索数量的关系

Fig.16 Relationship of maximum displacement of slope with number of failure cables

(1) 边坡滑弧中心位置坡体内部塑性区扩展

失效锚索数量增多, 坡体内部塑性区面积逐渐扩大。如单锚失效时, 塑性区分布于局部区域, 各部分之间互无关系, 对边坡局部稳定性并无影响。当发生 5 根锚索失效时, 塑性区面积迅速扩大, 各局部失效区域已基本贯通。当 12 根锚索失效时, 无论坡体表面还是坡体内部, 塑性区域均完全贯通, 边坡局部已失稳。

由以上分析可知, 坡体内部塑性区面积扩展规律表现为: ①失效锚索数量少时, 坡体内部发生多点局部破坏; ②失效锚索数量多时, 坡体表现为贯通性大面积塑性屈服, 破坏方式以剪切破坏为主。

依据计算结果, 对主滑坡中心纵断面的塑性区面积进行了统计, 如图 17 所示。由图可以发现, 边坡塑性区的扩展规律存在门槛值, 即达到该值之前, 塑性区面积扩展速度较快; 而超过门槛值后, 发生塑性屈服的面积扩展速率明显减缓, 坡体内部塑性区域基本贯通。图 17 还表明, 锚索间距为 3 m 时, 对应门槛值为 8 根; 锚索间距为 5 m 时, 门槛值为 5 根; 锚索间距为 8 m 时, 门槛值为 3 根。

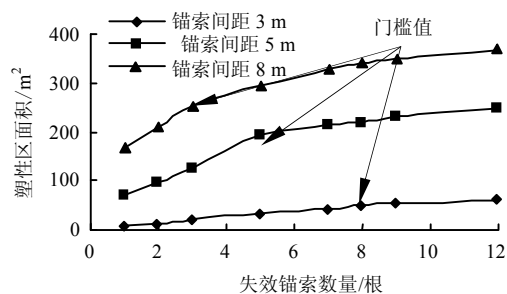


图 17 坡体滑弧中心断面塑性区面积扩展规律

Fig.17 Expanding pattern of plastic area in the center of slope

(2) 高边坡坡体表面塑性区扩展规律

与坡体内部塑性区扩展规律类似, 群锚失效后, 坡体表面也发生了明显的塑性区扩展。单锚失效时, 坡体表面塑性区面积很小, 仅失效点所在局部区域发生了部分塑性破坏。当 5 根锚索失效时, 塑性区面积明显扩大, 一至三级坡均有区域发生了塑性屈服; 当 12 根锚索失效时, 则塑性区域不仅在高度方向上延伸, 宽度上也有了更大范围的扩展。

图 18 为坡体表面塑性区面积随锚索失效数量增加的扩展规律, 坡体表面塑性区的扩展也存在突变值, 与图 17 基本类似。

根据现场监测的可能性和实际应用的可行性, 对于研究的实际工程, 提出如下结论和判据: ①坡体位移和邻近锚索拉力增量随锚索间距的增大和失效锚索数量的增多而增大, 位移在早期增长速率较慢。当失效锚索达到一定数量, 位移迅速增大、邻近锚索拉力增量反而降低, 岩土体纵向塑性区与临空面贯通, 岩土体发生局部失稳。②局部坡体失稳与失效锚索数量或坡体表面塑性区面积具有显著关系。对于作为研究对象的实际边坡工程, 当失效锚索多于 8 根或坡体表面塑性面积超过 200 m^2 时可认为发生局部失稳。

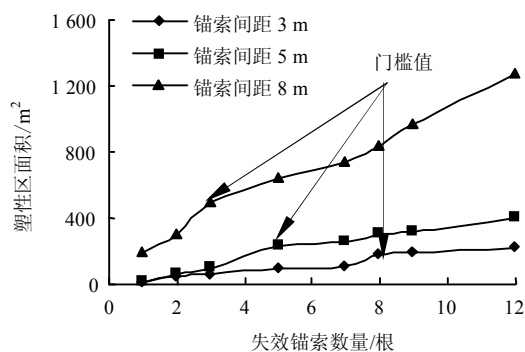


图 18 坡体表面塑性区面积扩展规律

Fig.18 Expanding pattern of plastic area on the surface of slope

5 结 论

在各种因素影响下, 预应力锚索存在失效的可能性。通过现场监测数据分析, 现场卸载试验和数值模拟分析, 提出如下结论:

(1) 预应力锚固系统埋置于岩土层后, 将受到众多因素的影响, 如降雨、环境温度、施工质量、环境腐蚀等因素, 这些因素对锚索的耐久性具有显著影响, 造成预应力锚固系统发生疲劳破坏或应力腐蚀破坏, 锚索腐蚀具有“三段式”特征。

(2) 数值模拟的锚索失效效应是岩土体内部应力重分布后的状态, 邻近锚索拉力增量小于现场卸荷试验瞬间的增量值, 但符合现场监测的规律, 采用实际材料参数进行数值模拟研究锚索失效效应是可行的。

(3) 预应力锚索失效后, 失效效应主要表现在两方面, 一是对邻近锚索的受力产生不利影响; 二是会降低边坡稳定性, 其影响程度与锚索所处的位置、地质条件、锚索间距等均有关系。

(4) 锚索失效后, 坡体位移变化及塑性区扩展规律表明, 坡体稳定性与锚索失效数量及锚索布置间距具有显著关系, 并由此提出边坡局部失稳的判据, 可为类似工程参考。

参 考 文 献

- [1] 程良奎, 刘启琛. 岩土锚固工程技术的应用与发展[M]. 北京: 万国学术出版社, 1996.
- [2] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7-12.
CHENG Liang-kui. Present status and development of ground anchorages[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 7-12.
- [3] 何思明. 预应力锚索作用机理研究[博士学位论文 D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [4] NAK-KYUNG KIM. Performance of tension and compression anchors in weathered soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12): 1138-1150.
- [5] 曾宪明, 陈肇元, 王靖涛, 等. 锚固类结构安全性与耐久性问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2235-2242.
ZENG Xian-ming, CHEN Zhao-yuan, WANG Jing-tao, et al. Research on safety and durability of bolt and cable-supported structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2235-2242.
- [6] 曾宪明, 雷志梁, 张文巾, 等. 关于锚杆“定时炸弹”问题的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 22(1): 143-147.
ZENG Xian-ming, LEI Zhi-liang, ZHANG Wen-jin, et al. Discussion about “Time bomb” question for bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 22(1): 143-147.
- [7] 张发明, 邵蔚侠. 岩质高边坡预应力锚固问题研究[J]. 河海大学学报, 1999, 27(6): 73-76.
ZHANG Fa-ming, SHAO Wei-xia. Prestressed anchor cables used in high rock slopes[J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(6): 73-76.

- [8] 朱晗迺, 孙红月, 汪会帮, 等. 边坡加固锚索预应力变化规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2756—2760.
ZHU Han-ya, SUN Hong-yue, WANG Hui-bang, et al. Analysis of prestress state of cable applied to rock slope reinforcement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(16): 2756—2760.
- [9] 朱焕春, 吴海滨, 赵海斌. 反复张拉荷载作用下锚杆工作机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 662—665.
ZHU Huan-chun, WU Hai-bin, ZHAO Hai-bin. Experimental study of bolting mechanism under cyclic tensile load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 662—665.
- [10] 李铀, 白世伟, 方昭茹, 等. 预应力锚索锚固体破坏与锚固力传递模式研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 686—690.
LI You, BAI Shi-wei, FANG Zhao-ru, et al. Research on failure mechanism and anchoring force transmission of prestressed cable[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 686—690.
- [11] GAMBOA E, ATRENS A. Environmental influence on the stress corrosion cracking of rock bolts[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2003, (10): 521—558.
- [12] 邹栋, 郑宏. 快速拉格朗日法及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(5): 80—83.
ZHOU Dong, ZHENG Hong. Fast lagrangian method and its applications to slope stability analysis[J]. **Mining Research and Development**, 2005, 25(5): 80—83.
- [13] 丁秀美, 黄润秋, 藏亚君. 预应力锚索框架作用下附加应力的FLAC-3D数值模拟[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(4): 339—345.
DING Xiu-mei, HUANG Run-qiu, ZANG Ya-jun. Three dimension simulation with FLAC-3D on the subsidiary stress induced by frame beam with prestressed cable[J]. **Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)**, 2003, 30(4): 339—345.
- [14] Itasca Consulting Group. FLAC-3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions)[M]. USA: Itasca Consulting Group, 1997.