

四项边坡加固新技术

杨志法, 张路青, 祝介旺

(中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 用于边坡加固的技术多种多样, 而如何因地制宜地利用好这些技术并非易事。由于对地质条件缺乏足够的认识, 或者因加固技术本身存在某些缺陷, 出现了一些失败的边坡加固工程实例, 并带来较大经济损失和社会问题。鉴于边坡加固技术的现状及国内大规模工程建设的需求, 给出了4项可用于边坡加固的新技术, 即纤维束导渗排水孔、预应力锚梁、层状网式钢筋石笼挡墙和预应力抗滑桩。第1项技术是针对传统排水孔存在着的泥砂堵孔问题, 是根据水可以沿着纤维与土和细砂之间的界面渗出的思想而设计的; 第2项技术则是为解决预应力锚杆和预应力锚索等所存在问题(例如, 对某些情况来说, 锚杆或锚索的加固范围太小、难以根据地质条件的不同而调整锚固力等)为目标而发展的; 层状网式钢筋石笼挡墙不仅能保持传统石笼挡墙所具有的就地取材、加固经费低等优点, 而且还能解决因笼间连结力低而导致对边坡加固效果不理想等问题; 预应力抗滑桩是在传统抗滑桩基础上发展起来的一项新技术, 其设计思路是为了达到增加抗滑能力的目的而利用预应力桩来重点加固滑动面分布段。还应指出的是, 上述4项技术都获得了国家发明专利。

关键词: 边坡工程; 边坡加固; 纤维束导渗排水孔; 预应力锚梁; 层状网式钢筋石笼挡墙; 预应力抗滑桩

中图分类号: P 642.2

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)21 - 3828 - 07

FOUR NEW TECHNIQUES IN SLOPE REINFORCEMENT

YANG Zhi-fa, ZHANG Lu-qing, ZHU Jie-wang

(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: Although there are many techniques for slope reinforcement, it isn't easy to utilize them economically or efficiently. Due to the deficiency of geological knowledge or some defects of reinforcement techniques themselves, some slope reinforcement projects are unsuccessful with huge economic losses and social problems. In view of the actualities of reinforcement techniques and great needs of project constructions in China and considering deficiencies of some available techniques for slope reinforcement, four new techniques in slope reinforcement are introduced in this paper, i.e., the fiber bundle seepage-guiding drainage hole, prestressed anchoring beam, layered and reinforced stone-gabion retaining wall and prestressed anti-slide pile. Among the four new techniques, the first one is aimed at drainage hole jammed with soil and thin sand, and designed according to the idea that water can seep through the boundary surfaces between fibers, soil and thin sand. The second technique is developed to overcome some deficiencies of prestressed anchor-bars or anchor-cables. For example, anchor-bars or anchor-cables have smaller reinforcement scopes in some situations, and it is more difficult to adjust their anchoring forces under different geological conditions. Keeping main merits of general stone-gabion retaining walls (including convenient building materials and lower construction costs), the layered and reinforced stone-gabion retaining wall is still characterized by higher reinforcement efficiency, in contrast to weaker linking

收稿日期: 2005 - 06 - 26; **修回日期:** 2005 - 08 - 01

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412701); 中国科学院知识创新项目(KZCX3 - SW - 134, KZCX2 - 306)

作者简介: 杨志法(1944 -), 男, 博士, 1987年于中国科学院地质研究所获博士学位, 现任研究员, 主要从事岩石力学、工程地质方面的研究工作。
E-mail: guogaimei@mail.igcas.ac.cn.

strength and poor reinforcement effects of conventional one. Based on conventional anti-slide pile techniques, the prestressed anti-slide pile is developed with an aim of increasing its anti-sliding capability, which can be achieved by purposely placing one or several pre-stressed pillars near potential sliding planes of a slope. The fact should be noted that the above four techniques have been granted national invention patents.

Key words: slope engineering; slope reinforcement; fiber bundle seepage-guiding drainage hole; prestressed anchoring beam; layered and reinforced stone-gabion retaining wall; prestressed anti-slide pile

1 引言

当边坡稳定程度不够时,往往需要通过加固来提高稳定性。常用于边坡加固的主要方法有:削坡卸荷、边坡压脚、坡面防护、抗滑桩、锚杆(索)、锚固洞、排水、挡墙、以及综合加固法等^[1~3]。上述加固方法和相应技术在国内大规模经济建设中发挥了很大的作用。然而,如果在加固设计和施工中不能做到因地制宜,则会因加固技术本身存在诸多不足或应用不当而导致加固效果不理想,甚至导致工程事故的发生。为了确保施工期和运营期各类工程边坡的稳定和安全运营,滑坡防治是十分重要的。应当指出,就岩土工程加固(包括地下工程加固、地基工程加固和边坡工程加固等)的巨大需要和研究者的努力,近半年来又得到了很大发展,但文[4~7]所列的仅为其中的一部分而已。总而言之,近年来所发展的边坡工程加固技术要少于地下工程和地基工程的加固技术。在有效地利用现有边坡加固技术的同时,加强滑坡防治新方法和新技术的研究实属必要。

针对现有滑坡防治技术存在的某些不足,提出了纤维束导渗排水孔、预应力锚梁、层状网式钢筋石笼挡墙、预应力抗滑桩等4项新技术,并获得了国家发明专利权。纤维束导渗排水孔技术是针对目前常用的排水孔所存在的被水流带出的土和细砂堵孔的问题而提出的。作者发现,如采用该项技术排水,那么即使排水孔被堵死,水仍可沿着纤维和土、砂之间的界面渗出。可逐步降低边坡中的动水压力和静水压力,从而有利于边坡的稳定。第2项技术是针对常用于边坡加固的预应力锚杆、预应力锚索等存在的加固深度不足、不能根据加固深度范围内地质条件的变化而主动调整加固力以及反作用力不利于边坡稳定等问题而提出来的。通过集加固、排水、监测、补强和地质勘察等功能于一身,被称为锚梁的新技术可望为边坡工程(尤其是存在着裂隙

的高陡边坡工程)的加固提供一个较好的新技术;层状网钢筋石笼挡墙是为了解决国内外都在采用的钢筋石笼挡墙技术所存在的因笼间连结力差、钢筋笼体易锈蚀而造成对边坡加固效果差等问题而提出的新技术。经研究,作者是通过在笼间加水平向和垂直向钢筋水泥砂浆层,但又允许导水的方法来解决上述问题的。另外,新技术还保存了原技术的一些优点(如可就地取材、石笼挡墙所需的工程经费低等)。第4项技术是针对常用抗滑桩所存在的因不能在加固范围内根据滑动所在的位置调整抗滑力,而造成支护效果低等问题而提出来的,在这项新技术中,作者试图通过地质资料确定滑动面位置,并采用一种预应力柱对这些薄弱位置进行重点加固,从而进一步提高边坡加固效果。下文拟对这4项新技术的原理和方法作进一步介绍,以供参考。

2 纤维束导渗排水孔技术

2.1 边坡排水的重要性

理论研究和工程实践表明,水(包括地下水和降雨)往往是引发滑坡、岩崩、泥石流等地质灾害的重要因素。水在地质灾害形成中起十分重要的作用,它的存在不仅弱化工程岩(土)体的强度,还会以静水压力、动水压力、冲刷等形式降低坡体的稳定性。对于边坡工程设计来说,“治坡先治水”是一条重要的经验。有效的边坡排水不仅可大幅度减少软岩、软弱夹层、松散岩体等因水渗入而导致的强度弱化,还可降低相应的动水压力和静水压力,进而使边坡向稳定方向转化。对于其他类型的岩土工程(如隧道工程、基坑工程等)来说,排水同样极为重要。

用于边坡排水的方法很多,如地表截水沟、地下排水洞(排水廊道)、排水孔等。至于地下工程的排水,主要有排水孔和与洞外相通的排水洞(沟)等方法。

2.2 普通排水孔技术

常用的普通排水孔技术通常是由带有多个小孔

的硬塑料管和防止泥砂直接进入管内且包在塑料管外部的土工布等组成。

在实际工程的运营过程中可以看到，普通的排水孔技术在一定条件下效果并不理想。虽然在工程竣工时或运营后一段时间内排水孔确实能够起到应有的排水效果，但经过一段时间后就会发现它们被水携带的泥砂堵塞，甚至孔口长草(见图 1)，进而不再起到排水作用。在一般情况下，排水系统的设计者都认为该排水系统的排水孔可以起到排水、降低静水压力和动水压力的作用。因排水孔的失效或部分失效可以导致坡体内静水压力、动水压力没有降到设计要求的水平，并且软岩或软弱结构岩体的强度也将因较多水的存在而下降。在这种情况下，若未做监测，设计者也未及时对工程进行实地回访考察，则会因排水失效而使边坡向不稳定方向发展，甚至处于危险境地。对于使用现有排水孔技术的其他岩土工程来说，也存在着同样的问题。显然，发展新型排水孔技术是必要的。



图 1 边坡排水孔被堵塞并在孔口长草的情形

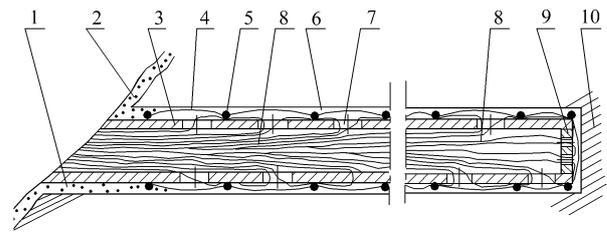
Fig.1 One example of drainage hole being jammed and grass growing in hole mouth

2.3 纤维束导渗排水孔技术的基本原理

利用钻孔内定向排列纤维束的导渗功能来实现排水是本项技术的基本原理(如图 2 所示)。如果采用这项技术，即使发生泥砂堵塞的现象，坡体内的地下水仍可通过排水孔内铺设的纤维束不断地从纤维与泥砂之间的界面渗出，从而达到长期有效排水的设计目的。另外，在花管外侧包有土工布的目的是为了达到防堵塞的双保险的目的。据研究，由于所利用的纤维束通常十分便宜，上述新型排水孔的造价与普通排水孔的造价接近。

2.4 新型排水孔排水效果的试验证明

为了证明上述新型排水孔的排水效果，作者设



1—固定砂浆；2—喷层或砂浆；3—花管；4—土工布；5—捆扎土工布的绳；6—钻孔；7—管壁上的小孔；8—纤维束；9—孔底板；10—岩体

图 2 纤维束导渗排水孔的基本结构示意图

Fig.2 Structural sketch of fiber bundle seepage-guiding drainage hole

计了纤维束导渗装置和无纤维的普通排水孔之间排水效果的对比试验。

作者在试验中设计了 2 个排水模拟装置，其中每个装置都由一根水压管、钻孔模拟管、橡皮弯管、土样、滤布、接水量杯等组成。为了观察水在土样中渗透的情况，采用有机玻璃管模拟钻孔。在 1# 装置的土样中按钻孔模拟管的轴向方向布设 20 根纤维丝，以模拟本项技术。2# 装置的土样未放任何纤维，以模拟普通排水孔技术(见图 3)。另外，2 个装置中的模拟管都被完全相同的等量亚粘土(其密度为 2.35 g/cm³)填满，用以模拟钻孔已被堵塞的情况。



图 3 试验装置的实物照片(左右侧分别为 1#, 2# 装置)

Fig.3 Photo of experiment equipment (No.1 and 2 situated on the left and right, respectively)

试验时分别给它们施加 2 m 高水头的静水压力。对于 1# 装置，在试验开始后 1 min 就可以从透明的钻孔模拟管中观察到水以较快速度向土样中渗透的现象。2 min 后开始从模拟管口部向外排水。排出的水先以水滴的方式滴入位于管口下方的量杯(即图 3 中照片左侧较大的量杯)中，而后形成水流，

如线状不断流出。20 min 后共排出了第 1 个 400 cm^3 的水量。由于在此之后不再向水压管补充水，所以经 3 h 水压管内的水已全部排完。对于土样中未埋设纤维束的 2[#] 装置(见图 3 中照片右侧的装置)，试验开始后，从透明的钻孔模拟管中观察到水以极慢的速度向土样中渗透。试验持续了 30 d，普通排水孔模拟装置仍未见水滴从模拟管口部滴出。

根据上述对比试验结果，作者认为纤维束导渗排水孔装置的排水效果是很显著的。

3 预应力锚梁技术

3.1 现有锚固洞技术

所谓锚固洞，是指将水平长条洞内填满钢筋混凝土而形成的一种用于阻止边坡滑动的加固结构。锚固洞的长轴方向通常与该处边坡全位移方向基本一致。锚固洞结构中的主钢筋(或钢管)起主要抗拉作用。另外，为了保证锚固洞能安全工作，常利用钢筋计等来监测其主筋或钢管的应力变化。与常用的抗滑桩相比，锚固洞具有主筋(或钢管)的抗拉效率高、水平洞易于开挖施工且较为安全等优势。中南勘测设计研究院用它治理五强溪水电站船闸边坡，取得了很好的效果^[3]。

根据理论分析和应用实践，锚固洞除具有上述优点外，也存在着以下诸多不足：

(1) 锚固洞的钢筋(或钢管)是从洞口到洞底做通长且相同布置，而未按边坡的地质条件进行设计。在这种情况下，容易造成工程地质条件差的部位(如断层等出露的薄弱部位)的洞体强度不足，产生破坏，而在工程地质条件好的部位则可能造成浪费。

(2) 在锚固洞受拉过程中，随着主钢筋(或钢管)的拉长，抗拉强度很低的混凝土将被拉裂。特别是那些因断层等出露的工程地质条件很差的部位，有可能因抗拉强度不足而造成钢筋被拉断，产生相当宽的裂缝，甚至出现大塌方等重大工程事故。漫湾水电站左岸边坡的滑坡即为一个实例。

(3) 被混凝土填满的锚固洞结构，不利于边坡排水，而排水往往在边坡稳定中起着极为重要的作用。

(4) 主要采用钢筋计来监测锚固洞应力变化的方法存在着明显的不足。如果钢筋计安装的部位与将来发生拉裂的部位不一致但接近，则当锚固洞被拉裂后钢筋计的拉应力值不仅不上升，反而下降。结果，有可能产生“锚固洞是稳定的”危险误导。

3.2 预应力锚梁技术

预应力锚梁技术是一种为了解决锚固洞的上述不足，但又保持其优点的新型加固结构。该结构是一种利用与边坡全位移方向相同的水平长条洞(可专门开挖，但提倡兼作地质探洞)构筑的钢筋混凝土结构(见图 4)。在具体设计中，可依据地质条件将之分为重点加固段和一般加固段。根据工程地质条件的不同，可以在预应力锚梁结构的施工过程中做到因地制宜和有的放矢。

与锚固洞相比，这一新型加固技术的加固效率明显较高，主要体现在下述几点：

(1) 一般加固段通常作中空的厚壁钢筋混凝土设计。主钢筋(或钢管)按洞轴方向布置于厚壁中，并通过浇注混凝土使它与洞壁紧密胶结在一起，以便起抗拉作用。

(2) 重点加固段主要设置在断层带和风化带等

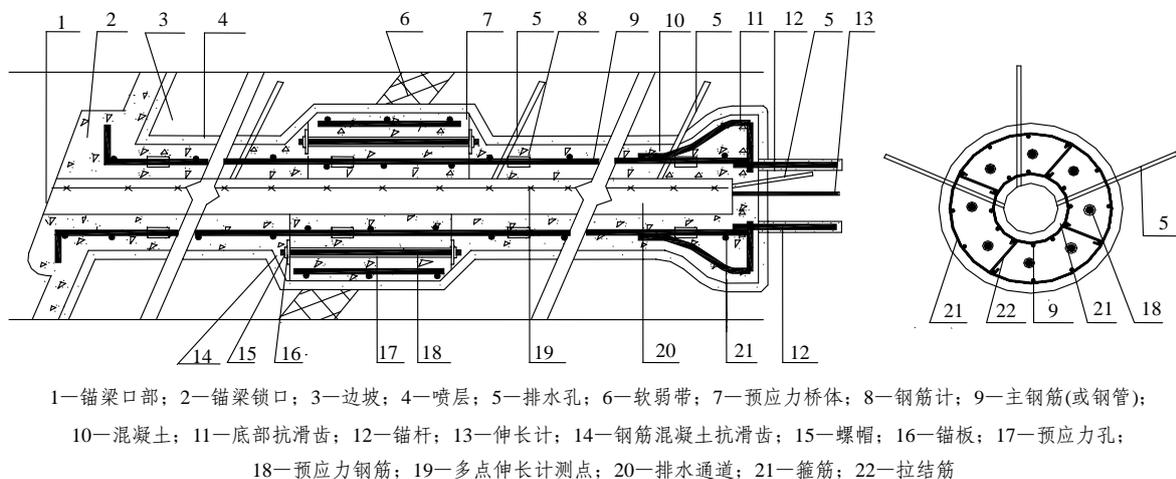


图 4 预应力锚梁结构示意图
Fig.4 Structural sketch of prestressed anchoring beam

出露的地质薄弱段。为达到重点高效的加固目的,专门设置的预应力中空桥体,并横跨将要被重点加固的地质薄弱段(如断层)。将桥体深入到断层中上下盘较坚硬岩体内的足够深度,通过上下盘较坚硬岩体的紧密连结,使该重点加固段的抗拉强度大幅度增加,以便有效地防止薄弱部位被拉开或滑动。

(3) 除继续采用钢筋计外,还在锚梁中增设了多点伸长计,以避免出现上述的“危险误导”。

(4) 由于排水在边坡工程治理中十分重要,在锚梁结构中将采用放射状的排水孔和锚梁中空部位组成的边坡地下水排水通道。还应指出,这里所述的排水孔建议采用本文第2节所述的纤维束导渗排水孔装置。

(5) 当出现锚梁将被拉断的征兆时,可及时地把足够的钢筋(或钢管)塞进锚梁的空腔内,并用高标号砂浆将之浇筑,以便达到及时补强的目的。

(6) 中空结构可以省下大量混凝土。

与利用预应力锚索加固高陡边坡相比,预应力锚梁技术具有以下优点:

(1) 用预应力锚索加固边坡时,水平钻孔的深度通常不超过60m,否则施工将遇到很大难度。有些高陡边坡的卸荷裂隙可能出现在60m以外,用预应力锚梁技术进行加固没有施工上的困难。

(2) 如果预应力锚索在边坡面上取得 N kN量值的加固压力,那么它将在山体内出现对局部岩体稳定不利的反作用力,这一反作用力的量值也是 N kN。在预应力锚梁技术中,作用力和反作用力都可起到加固作用。

(3) 若有合适的水平探洞来进行预应力锚梁的加固施工,则可省下洞体开挖的费用。

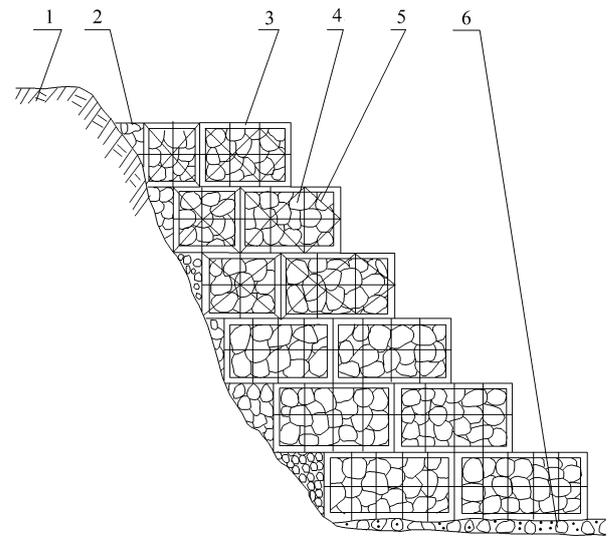
当卸荷裂隙造成高陡边坡的稳定程度不足,而采用其他方法又感到困难时,利用预应力锚梁技术进行加固是非常合适的。由于我国有大量的高陡边坡存在,故它的应用前景是很好的。

4 层状网式钢筋石笼挡墙技术

4.1 现有的石笼挡墙技术

目前,国内已将普通型钢筋石笼挡墙用于公路边坡(如川藏公路沿线的边坡)、水电站边坡(如龙滩水电站左岸近百米高的边坡压脚)的加固,国外也有采用此项技术加固边坡的例子^[8]。普通型钢筋石笼的施工方法为:现场制作成简单的呈长方体状的钢筋笼,将其内部装满碎石而成为普通型钢筋石笼,再将各石笼按成排成层的形态堆砌在边坡需要加固

的位置(见图5)。



1—边坡; 2—边坡与石笼之间的石块; 3—构成石笼架框的钢筋;
4—笼内的碎石; 5—石笼表面的钢丝; 6—挡墙的基础

图5 普通型钢筋石笼挡墙的结构及加固原理示意图
Fig.5 Structure and reinforcement mechanism of common stone-gabion retaining wall

普通型钢筋石笼挡墙的优点至少有以下三点:第一,作为主要材料的碎石可以就地取材,材料成本较低;第二,易于施工;第三,利于排水。

然而,普通型钢筋石笼挡墙也存在着以下多处缺陷:

(1) 普通型钢筋石笼挡墙是由多个钢筋石笼简单堆砌而成,其完整性是靠石笼之间的摩擦力来维持的。在外力作用下各石笼之间很容易产生相对滑动、转动等相对位移,严重者可使钢筋石笼解体。即普通型钢筋石笼挡墙的整体强度较低。

(2) 由于直接接触到空气和水,普通型钢筋石笼的钢筋和钢丝极易被锈蚀。钢筋石笼的强度依赖于钢筋和钢丝制作而成的钢筋笼和内装石块之间的相互作用。如果钢筋和钢丝一旦锈蚀严重,普通型钢筋石笼则将面临解体的危险。也就是说,锈蚀的不断发展将大大降低这种挡墙的整体强度及被加固边坡的稳定性。

(3) 尽管普通型钢筋石笼挡墙本身的排水性能良好,但被加固边坡内部的地下水仍处于自渗状态。当边坡的稳定需要更通畅的排水条件时,普通型钢筋石笼挡墙不能满足设计要求。

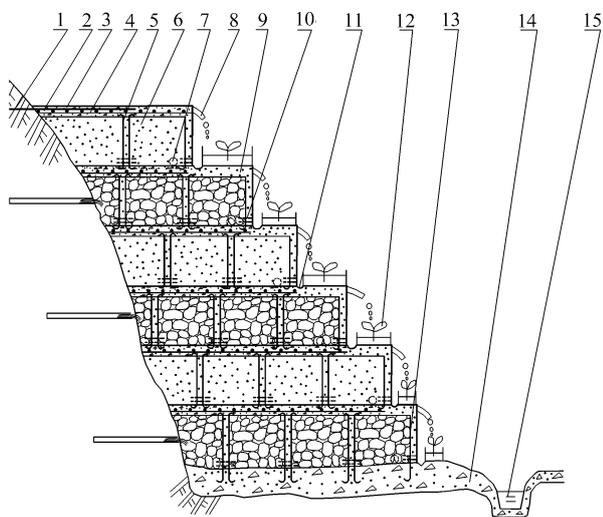
(4) 当考虑到被加固边坡是否处于稳定状态及挡墙本身存在强度和极限变形等问题时,对边坡和挡墙进行监测是十分必要的。但利用普通型钢筋石

笼挡墙来实现监测是比较困难的。

(5) 从环保角度来看,普通型钢筋石笼挡墙因清除或覆盖了被加固边坡坡面上原有的植被而破坏了该段边坡的绿化。

4.2 层状网式钢筋石笼挡墙技术

针对普通型钢筋石笼挡墙存在的上述缺点,作者提出了一种集整体强度高、防锈蚀、有效排水、易于绿化、易于监测等优点的新型钢筋石笼挡墙技术(见图6)。该技术的主要功能是这样实现的:通过石笼框架的竖向钢筋、混凝土层、钢筋网及砂浆将成排成层的钢筋石笼连结成一个整体强度很高的钢筋石笼挡墙;利用混凝土及砂浆对钢筋和钢丝的包裹来实现防锈蚀的目的;利用碎石(或砾石)的空隙和连接各石笼的连通管来排水,必要时可以与边坡内布设的排水孔(也可采用本文第2节所介绍的纤维束导渗排水孔装置)联合来实现高效排水;借助于固定在挡墙台阶上的土槽栽种植物,以求达到对挡墙进行绿化的目的;为进行变形监测可在混凝土层内埋设伸长计(伸长计的各测点分别固定在混凝土层内及边坡内部)。必要时,也可在混凝土层或砂浆层内埋设传感器对挡墙承受的荷载或内部的应力、应变等进行监测。



1—被加固的边坡;2—按实际需要而埋设在挡墙顶部混凝土层内的伸长计;3—混凝土层;4—混凝土层内的钢筋网;5—钢筋石笼框架的竖向钢筋;6—相邻钢筋石笼不同侧面间的砂浆层;7—钢筋石笼内沿边坡走向方向的排水孔;8—滴水管;9—挡墙台阶面上加抹的砂浆层;10—钢筋石笼内沿边坡倾向方向的排水管;11—挡墙台阶面上的集水槽;12—固定在挡墙台阶上的土槽及栽种的植物;13—插入挡墙基座混凝土内部的竖向钢筋;14—挡墙基座的混凝土;15—排水沟

图6 层状网式钢筋石笼挡墙的结构及加固原理

Fig.6 Structure and reinforcement mechanism of layered and reinforced stone-gabion retaining wall

层状网式钢筋石笼挡墙除了具有就地取材、施

工方便、成本低廉、可适性强等优点外,与普通型钢筋石笼挡墙相比还具有以下5个主要优点:

(1) 与普通型钢筋石笼挡墙相比,层状网式钢筋石笼挡墙因石笼层间混凝土层及钢筋网的设置、石笼框架竖向钢筋与混凝土的连结、石笼侧面间加抹了砂浆等原因而具有很高的整体强度。另外,对挡墙高宽比和基座的有效设计可以保证挡墙整体的抗滑能力及抗翻转能力。新型钢筋石笼挡墙的这些特点决定了它具有较强的边坡加固功能。

(2) 所有石笼的钢筋和钢丝都被混凝土或砂浆保护层包裹起来,致使这种新型钢筋石笼挡墙具有高效的防锈蚀能力。只有这样,组成挡墙的钢筋和钢丝才能长期保持其应有的强度,并可满足边坡加固的基本要求。

(3) 在设计新型钢筋石笼挡墙时可根据实际需要在边坡内打专门的排水孔,其孔口与石笼内碎石(或砾石)相通。这样,由边坡排水孔、笼内碎石(或砾石)之间的空隙、连通管等可组成多条排水通道,可使该挡墙结构具有高效的排水功能。

(4) 由于挡墙施工时破坏了原有的植被,可利用挡墙台阶上固定的土槽来栽种适合当地环境生长的植物。该挡墙所具有的高效加固功能足以保证土槽的长期稳定,利用土槽进行绿化的同时可避免植物生长对挡墙的不良影响。土槽内植物生长所需的用水主要为雨水,以及从边坡内部渗出并流经石笼中的碎石、连通管、集水槽并由滴水管流出的水。

(5) 在施工过程中可在边坡内打专门的钻孔,以便将伸长计埋设在钻孔和石笼层间的混凝土层内。这样,由获得的变形监测数据可帮助判断边坡或挡墙的稳定性的。

5 预应力抗滑桩技术

5.1 普通抗滑桩技术

普通的抗滑桩是一个混凝土柱体,其主钢筋自上至下作通长布置,并采用圆形箍筋将主筋焊接在一起。当抗滑桩深入到位于边坡主滑动面以下稳定岩体中足够深度时,它可阻止边坡岩体沿滑动面下滑,并达到加固边坡的作用。尽管普通抗滑桩应用得比较广泛,但仍存在着以下不足:

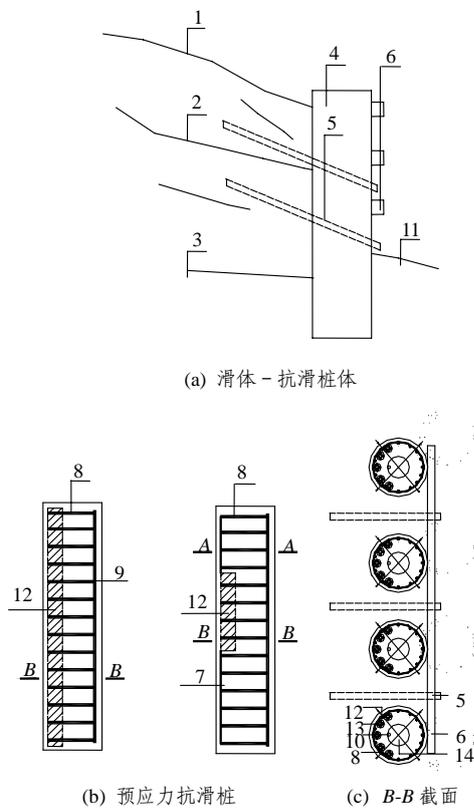
(1) 没有针对潜在滑动面进行设计,且桩体内的钢筋作等量通长布置。这往往会造成潜在滑动面部位的不安全和非滑动部位的浪费。

(2) 对抗滑桩内发挥主要作用的抗拉钢筋和发挥辅助作用的抗压钢筋没作区别,同样造成不必要的浪费。

(3) 现有的抗滑桩通常都很粗大，有的桩体宽度可达数米，并形成“肥桩”现象。对于主要起抗滑作用的抗滑桩来说，中性面附近的混凝土所起的作用很小，是一种浪费。

5.2 预应力抗滑桩技术原理

针对普通抗滑桩的不足，作者提出了预应力抗滑桩技术。其原理是：充分利用预应力混凝土抗拉能力较好的优点，采用可以现场制作的预应力柱部分取代普通现有抗滑桩受拉一侧的钢筋，并将之安排在潜在滑动面附近(作为重点加固段)进行重点加固(见图7)。另外，为了提高加固效率和节约混凝土，作者除去了中性面附近的混凝土，形成了具有空腔的抗滑桩。由于预应力柱的抗拉能力较强，所以可以减少抗滑桩的横截面积。



1—坡面；2—潜在滑动面；3—稳定面；4—预应力混凝土抗滑桩；5—排水孔；6—抗滑桩连接梁；7—受拉主钢筋；8—箍筋；9—受压主筋；10—测斜管；11—坡趾；12—预应力柱；13—预应力钢筋；14—抗滑桩中空部分

图7 预应力抗滑桩结构示意图

Fig.7 Structural sketch map of pre-stressed anti-slide pile

6 结 语

作者提出的4项加固新技术可以解决目前边坡加固技术中的许多不足，并且目前都已被授权为国家发明专利。随着我国经济的迅速发展以及西部大

开发的全面展开，大量的边坡工程急需高效加固技术的出现。例如，纤维束导渗排水孔技术可以解决岩土工程中普遍存在的排水孔堵孔问题，预应力锚梁技术可以在高陡边坡卸荷带的加固上发挥其独特的作用。如果上述4项新技术应用得当，则将在我国的工程建设中产生巨大的经济效益与社会效益。

参考文献(References):

- [1] 孙玉科, 杨志法, 丁恩保, 等. 中国露天矿边坡稳定性研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999. 342 - 352. (Sun Yuke, Yang Zhifa, Ding Enbao, et al. Researches on Slope Stability of Strip Mines in China[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1999. 342 - 352. (in Chinese))
- [2] 哈秋龄, 张永兴. 岩石边坡工程——长江三峡工程永久船闸岩石陡高边坡稳定与控制研究[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997. 69 - 87. (Ha Qiuling, Zhang Yongxing. Studies on Stability and Controlling of High and Steep Rock Slopes at Yangtze River Three Gorges Permanent Shiplock[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1997. 69 - 87. (in Chinese))
- [3] 杨志法, 柯天河, 王常敏, 等. 五强溪水电站左岸船闸边坡开挖监控设计的理论与实践[J]. 工程地质学报, 1995, 3(2): 1 - 11. (Yang Zhifa, Ke Tianhe, Wang Changmin, et al. Theory and practice on monitoring design for excavation of shiplock slope at left bank of Wuqiangxi hydroelectric power station[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(2): 1 - 11. (in Chinese))
- [4] 周顺华. 软弱地层浅埋暗挖施工中管棚法的棚架原理[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2 565 - 2 570. (Zhou Shunhua. Principles of pipe roof applied to shallow-buried tunnels in soft ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2 565 - 2 570. (in Chinese))
- [5] 王银梅, 杨重存, 谌文武, 等. 新型高分子材料SH加固黄土强度及机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2 554 - 2 559. (Wang Yinmei, Yang Zhongcun, Chen Wenwu, et al. Strength characteristics and mechanism of loess solidified with new polymer material SH[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2 554 - 2 559. (in Chinese))
- [6] 王 哲, 龚晓南, 程永辉, 等. 劈裂注浆法在运营铁路软土地基处理中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1 619 - 1 623. (Wang Zhe, Gong Xiaonan, Cheng Yonghui, et al. Application of fracturing grouting method to treat soft foundation of operating railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1 619 - 1 623. (in Chinese))
- [7] 倪宏革, 孙峰华, 杨秀竹, 等. 采用粘土固化浆液进行岩溶路基注浆加固研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1 242 - 1 247. (Ni Hongge, Sun Fenghua, Yang Xiuzhu, et al. Experimental study of clay hardening grouts for roadbed reinforcements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1 242 - 1 247. (in Chinese))
- [8] Kandar P M. Use of gabion for localized slope stabilization in difficult terrain[A]. In: Rock Mechanics for Industry[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1999. 1 221 - 1 227.