

高速公路膨胀土边坡整治

袁从华¹, 周 健², 杨明亮¹

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 湖北沪蓉西高速公路建设指挥部, 湖北 恩施 445000)

摘要: 在膨胀土边坡整治设计中, 由于膨胀土在稳定性计算分析时有不确定因素, 因此整治设计需结合对膨胀土边坡失稳特点和规律的认识, 再结合类似边坡失稳的分析研究, 使其稳定性计算分析和整治设计有较强的针对性。在总结分析膨胀土特点和规律后, 对 3 个具体的膨胀土边坡失稳原因进行分析, 然后根据襄孝高速公路对膨胀土路堑边坡进行试验研究, 对其采用削坡放缓、抗滑桩加固、锚杆加固、抗滑挡土墙加固四种整治方式, 分别对其进行稳定性分析。在满足稳定性前提下, 从经济和生态环保角度比较各自的优劣, 在 12 m 高以内边坡, 采用削坡放缓整治方式最为经济环保。

关键词: 边坡工程; 膨胀土; 边坡; 稳定性; 整治

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3073 - 06

TREATMENT OF EXPANSIVE SOIL SLOPES BESIDE HIGHWAYS

YUAN Conghua¹, ZHOU Jian², YANG Mingliang¹

(1. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;*

2. *Office of Hurongxi Highway Construction, Enshi, Hubei 445000, China*)

Abstract: For the uncertain factors of expansive soil, the characteristics and regularities of expansive soil slope should be known clearly before its design and treatment, so that the pertinent measures can be taken according to the similar slopes. Based on the tests of cutting slope, analyses of the expansive soil features and the reasons that the three expansive soil slopes fail, slope cutting method, anti-slide piles, anchors and retaining walls are adopted separately; and the stability analysis under the four conditions are also analyzed. On the premise that the slope is stable, the merits and disadvantages of these methods are judged separately from the views of economy and environmental protection. For slopes lower than 12 m, the cutting method should be adopted for reasons of economy and environment. In the procedure of detail design, the in-situ conditions, ecological aspects and the costs should also be considered.

Key words: slope engineering; expansive soil; slope; stability; treatment

1 引 言

孝襄高速公路膨胀土路段长为 86 km, 为冲积平原及垄岗地貌, 地形平缓开阔, 以弱~中膨胀土体为主, 强膨胀土零散分布。路堑边坡切高 12 m 以内, 膨胀土边坡有“湿时塑性很强, 干燥时裂隙发

育, 裂面光滑, 边坡易塌滑”的特点, 膨胀土体的裂隙性破坏了土体的整体性, 为水的浸入和土中水分的蒸发开了方便之门, 土中含水量的波动和胀缩现象的反复发生, 又进一步导致了裂隙的扩展和向土层深部发育, 使该部分土体强度大为下降。在气候影响范围之内, 土体湿胀干缩效应明显, 黏聚力和抗剪强度变化极大, 所以膨胀土边坡失稳是膨胀

收稿日期: 2006 - 03 - 23; **修回日期:** 2006 - 08 - 20

作者简介: 袁从华(1961 -), 男, 1983 年毕业于中国地质大学工程地质专业, 现任副研究员, 主要从事岩土力学测试、路基及边坡方面的研究工作。
E-mail: conghuayuan@sohu.com

土地区一种常见的斜坡变形现象。对膨胀土边坡的稳定计算分析由于还没有很成熟的方法，因此，整治设计需建立在对膨胀土边坡失稳特点和规律的认识以及其他具体的类似边坡的分析研究基础上。

2 膨胀土边坡推移的主要特点和规律

与其他土质的滑坡相比，膨胀土边坡的失稳形式有其特殊的规律。根据对国内矿山、公路和其他建筑的膨胀土开挖边坡滑动现象的分析，可以将其最基本的特征和共同规律归纳如下：

- (1) 浅层性：发育深度同裂隙发育深度及气候影响范围基本一致，一般在3~6m以内。
- (2) 逐级牵引性：先在坡脚局部破坏，然后向上牵引发展，形成多层次的滑动面或拉裂面。
- (3) 季节性：边坡失稳绝大多数发生在雨季，降雨使非饱和土体饱和，其抗剪强度指标值明显下降，降雨是边坡失稳的主要外部诱发因素^[1, 2]。
- (4) 缓坡滑动：边坡的稳定坡角比一般土质边坡缓，在未进行任何加固的边坡中，坡比在1:6的条件下部分地段仍发生大面积滑坡^[3]。
- (5) 缓慢性与间歇性：滑体滑坡速度缓慢，边坡失稳后，并不是一直产生蠕滑，边坡移动主要在降雨期间或雨后一段时间。
- (6) 较大的膨胀力：膨胀力与膨胀性有关，膨胀性与矿物成分有关^[4]，膨胀力一般在几十至一百多千帕，在许多已加固后失稳的膨胀土边坡中，出现抗滑桩被推断、倾倒或挡墙的整体外推等现象。
- (7) 开挖后有较长的稳定时间：很多膨胀土边坡稳定一年或数年后才失稳。

上述特点使膨胀土边坡的设计方法不能简单采用一般土质边坡的设计方法，而适合其特点的分析方法仍在探索中，膨胀土边坡整治失效的例子十分常见^[5, 6]，往往造成重大损失。因此，对膨胀土边坡失稳的特点和规律进行总结，能对膨胀土的特性认识更深刻，使其膨胀土边坡整治设计更有针对性，减少过度的加固所造成的浪费和认识不足所产生的加固失效造成的损失。

3 膨胀土边坡失效实例分析

3.1 海南铁矿膨胀土边坡

在海南铁矿膨胀土边坡(见图1)中，上部8m以内主要为弱~中膨胀土，8~20m主要为强风化千

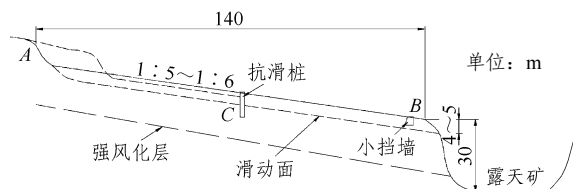


图1 海南铁矿膨胀土边坡示意图
Fig.1 Sketch of swelling soil slope of Hainan open-pit

枚岩。随着露天矿向下开采，边坡有缓慢移动迹象，在中部点C布置约9m长的 $\phi 800$ mm的21根抗滑桩，在点B处布置有钢丝网固定的干砌挡墙。

露天矿深约30m，斜坡坡比为1:5~1:6，在1998年之前的几年能保持相对稳定，1998年春夏的一场暴雨之后，点B处的挡墙向前推移和推倒，点C处的抗滑桩普遍倾倒或折断，点A处向上侵蚀15~20m，整个边坡土体遇雨水即向下滑移，不下雨时则维持相对平衡状态。

该滑坡主要是由于露天矿向下开挖时，地下水渗透路径向下移动，当强降雨使土体饱和后，膨胀土体中加固部分以及以下部分抗剪强度指标显著下降，抗滑桩处在饱水软化带内，挡墙是直接浅层滑动带内，因此在下滑力和膨胀力作用下，边坡失稳造成抗滑桩倾倒，挡墙向外平移。

3.2 潭邵高速公路K90~K96段膨胀土边坡

在潭邵高速公路K90~K96段的左侧膨胀土边坡以弱~中膨胀土为主，坡比一般为1:2.25~1:4，未设坡脚挡墙的边坡全部产生了滑坡现象，残坡积膨胀土深度为6~9m，有的边坡在横向上延伸约100m，还需设置多排抗滑桩，将膨胀土边坡分成几段，通过坡脚挡墙加固和中间的抗滑桩加固(见图2)，只是挡墙基础设置在路基下约1.5m，1~2排抗滑桩嵌入下部稳定带一定深度，按设计加

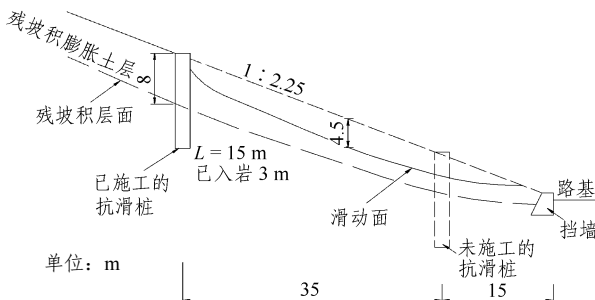


图2 潭邵高速公路K95+030膨胀土边坡示意图
Fig.2 Sketch of swelling soil slope located at section K95+030 of Xiangtan-Shaoyang Highway

固的膨胀土边坡都已稳定。

膨胀土边坡的坡脚最易汇集地表雨水, 在饱和过程中, 对边沟产生侧向膨胀力, 使边坡略向上抬和向路中方向移动, 而膨胀土边坡破坏有浅层性和逐级牵引性, 最后导致大范围边坡破坏, 若在横向上延伸较远, 如该处的 K95+030 附近的膨胀土边坡, 在坡脚进行了加固, 坡中间也可形成滑出口(见图 2)。根据调查和补充的钻孔资料, 残坡积土层以中膨胀的灰白色、浅黄红色黏性土为主, 厚度约 8 m, 下部为风化砂岩, 根据计算分析, 建议设置 2 排抗滑桩, 抗滑桩端部进岩层约 3 m, 上部抗滑桩已按建议施工, 下部抗滑桩由于业主的犹豫而未施工, 在 2001 年雨季时产生滑坡, 由于已完成了上部抗滑桩, 将膨胀土体分成 2 段, 抗滑桩上部约 80 m 的土体稳固, 而从抗滑桩下部产生深约 4.5 m 的膨胀土体滑坡, 若不对已滑坡段进行加固, 滑动面将向下发展。因此, 在该高速公路已通车的情况下, 仍在下部补充原已建议的抗滑桩。

3.3 镇江出城公路膨胀土边坡

镇江出城公路膨胀土边坡在出城口附近, 为了追求自然, 在边坡稍加平整后, 上部坡比为 1:5, 靠近公路的斜面坡比为 1:2(见图 3), 没有其他加固措施, 膨胀土体以弱~中膨胀土体为主, 在坡面上种植有草和小灌木, 边坡完成后约 1 a, 点 A 处土体涌向公路旁的人行道, 后逐渐发展至点 B 处, 深度约 3 m, 点 B 处离人行道约 80 m, 此边坡沿公路纵向约有 1 km 长, 在中间某些局部为碎石土的斜坡中, 边坡土体稳定, 没有滑坡现象。

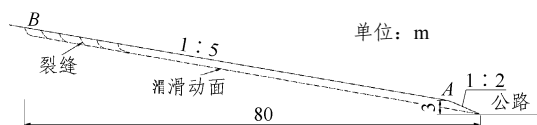


图 3 镇江出城公路膨胀土边坡示意图

Fig.3 Sketch of swelling soil slope along Chucheng Highway in Zhenjiang

该滑坡明显具有牵引性、浅层性、季节性和缓坡滑动特点, 在横向上延伸有 100 m 的膨胀土边坡中, 虽说稍加整理种植了一些草灌植物, 但坡面没有任何排水措施, 在雨水下渗作用下, 逐渐饱和和软化坡体, 使其抗剪强度明显下降, 特别是坡脚 A 处附近, 强度下降后产生移动, 在雨水的继续渗透作用下, 坡体饱和膨胀土滑移逐渐泥化, 而膨胀土体滑动又有牵引性, 在下部失稳条件下, 失稳土体逐

级向上延伸, 而膨胀土体一旦有滑移产生裂隙, 又为雨水下渗提供通道, 很快雨水下渗会使整个滑动面软化、泥化, 最后在点 B 处附近形成密级的滑动拉裂面。

上述 3 个实例说明, 膨胀土边坡失稳的主要原因是对该失稳边坡的主要特点和规律认识不足, 设置的加固部位不妥, 深度不够造成的。因此, 加强对这些失稳边坡的分析研究, 有助于高速公路膨胀土边坡的整治设计。

4 孝襄高速公路膨胀土边坡整治

在膨胀土边坡稳定性计算分析中, 由于膨胀土的机制复杂, 目前还没有一个能揭示膨胀土规律和特征的分析方法, 各种分析方法如何更好地揭示膨胀土体的规律仍在探索中。因此, 在膨胀土边坡整治中, 对膨胀土体失稳的主要特征和规律的认识以及对一些具体的膨胀土边坡失稳分析, 对膨胀土边坡整治将起相当重要的作用^[7~10]。本文对膨胀土边坡的稳定性计算分析主要是采用极限平衡法。

4.1 整治

大气地表水对路堑边坡的影响深度有所不同, 一般在路堑上部影响深度为 1.5~2.0 m, 在路堑下部影响深度为 2~3 m, 膨胀土边坡滑塌的形状一般是上部较陡, 甚至直立, 下部为园弧形曲线。自然稳定的膨胀土体坡度一般为 1:4~1:6, 孝襄高速公路段的膨胀土体自然边坡即垄岗地貌也在此范围内, 若表层采用防护、坡脚适当加固以及有系统的排水措施, 膨胀土边坡可在 1:1.75~1:2.5 的坡比间保持稳定, 但不能在横向上延伸太长, 许多膨胀土体边坡整治坡角也为 1:1.75~1:2.5, 甚至更缓。经过一段时间(一个雨季甚至几个雨季)的变化, 主要是雨水沿着局部下渗饱和和软化泥化导致膨胀土坍塌, 如海南铁矿膨胀土边坡。因此, 膨胀土边坡在横向上面积较大时可以采用分割的形式加固, 使其变成若干个单元, 保持各自的稳定。

对于 12 m 高的弱、中膨胀土边坡, 在 1:2.5 的坡比后, 其下滑力和膨胀力一般情况下不超过 120 kN/m, 不需要太大的加固力, 对加固的基础应采取地表排水措施。

结合前述的膨胀土边坡失稳特点、规律以及实例分析, 坡脚部分稳固是膨胀土边坡加固的基础, 防止膨胀土抗剪强度指标 c , φ 值随含水量上升而

下降^[5]是膨胀土整治的关键。孝襄高速公路膨胀土边坡坡高最高不超过 12 m，即不超过 2 级边坡，坡顶平缓。另外孝襄高速公路要求全线生态环保，针对此情况，可以采用以下 4 种方式对膨胀土路堑边坡进行整治：

(1) 削坡放缓方式：将坡体放缓至 1 : 2.5，在坡脚处设置矮挡墙，防止边沟雨水下渗，雨水软化坡脚导致膨胀土滑坡，然后及时在坡面上进行喷混植生防护，减少雨水对坡体的渗透、软化，台阶为浆砌片石砂浆抹面(见图 4)，台阶内侧设置小排水沟。

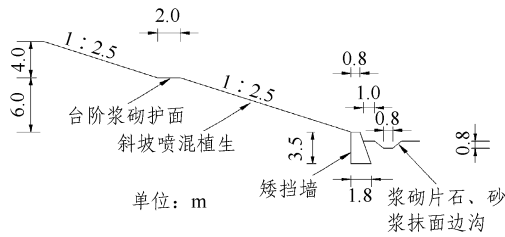


图 4 削坡放缓方式
Fig.4 Cutting slope method

(2) 抗滑桩加固方式：在第一级坡的中部设置抗滑桩，抗滑桩为 1.2 m×1.2 m 的方桩或园桩，桩距 4 m，桩顶设置联系梁，使各桩共同受力，桩长为 8 m，埋入路基下 6 m，整个抗滑桩埋入坡面下。抗滑桩上部原第 1 级坡面坡比改为 1 : 2.5，下部坡面坡比为 1 : 1.5，第 2 级坡面仍为 1 : 2，整个坡面采用喷混植生防护，台阶防护需防雨水渗入(见图 5)。抗滑桩采用隐埋式，是为了便于种植草灌。

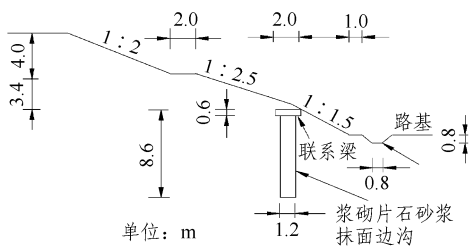


图 5 抗滑桩加固方式
Fig.5 Anti-slide pile reinforcement method

(3) 锚杆加固坡面方式：在坡面设置锚杆，锚杆间排距各为 2.5 m，锚杆长度为 3.5~6.0 m(见图 6)，采用梅花型布置，用钢筋混凝土骨架将锚杆连接成整体，使其对坡面进行整体加固。在台阶上用浆砌片石砂浆抹面，台阶内侧设置小排水沟，坡面采用喷混植生防护。

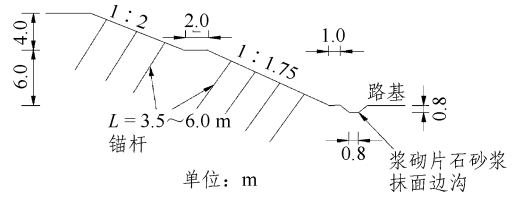


图 6 锚杆加固方式
Fig.6 Bolt reinforcement method

(4) 抗滑挡土墙加固方式：在坡脚设置抗滑挡墙，对挡土墙的截面尺寸，需考虑膨胀土的膨胀力及边坡下滑力对挡土墙的综合作用力。

挡土墙的埋深需考虑自然条件下对膨胀土的影响深度，根据调查和类比资料，对膨胀土的影响深度一般为 1~3 m，在此挡土墙埋深设为 3 m。在施工挡土墙时为避免雨水对挡墙基底浸泡，在底部设置砂浆封底层，挡土墙背后用黏土封堵避免雨水下渗软化挡墙基底，坡表面为 1 : 2~1 : 2.25 的坡比到坡顶，采用喷混植草灌护坡，抗滑挡土墙加固方式见图 7。

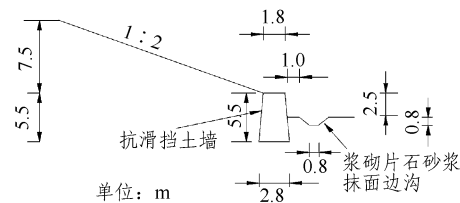


图 7 抗滑挡土墙加固方式
Fig.7 Anti-slide retaining wall reinforcement method

4.2 整治方案比较

孝襄高速公路膨胀土路堑边坡高度不超过 12 m 以上的边坡也需要整治，在此假定整治的边坡高度为 10 m，原设计的 2 级坡比分别 1 : 1.75 和 1 : 2，下部采用矮挡墙，采用整治的加固费用不包括原设计所需土方经费，各项加固整治工程费及每延米预估整治费用见表 1。

4.3 稳定性分析

在进行稳定性分析计算时，需要了解膨胀土的 c ， φ 值与含水量 w 的关系，在进行抗滑工程设计的推力计算时，应作最不利的考虑，即以滑坡产生时滑带土最大含水量时的 c ， φ 值为抗剪强度指标^[5]，据此得到所需的加固力，并设计计算相应的加固工程量。在这里根据上述 4 种加固方式，计算分析能

表 1 各项加固整治工程费及每延米预估整治费用
Table 1 Construction cost and reparation cost per meter for each sub-project

整治方式	整治项目	整治工程量及预估费用情况	每延米预估整治费用/元	每延米加固增加经费/元
削坡放缓	多征地	$5 \text{ m}^2 \times 7.5 \text{ 元/m}^2 = 37 \text{ 元}$		
	多削坡量	$27 \text{ m}^3 \times 10 \text{ 元/m}^3 = 270 \text{ 元}$		
	增加喷混防护	$6 \text{ m}^2 \times 60 \text{ 元/m}^2 = 360 \text{ 元}$	1 486	667
	坡脚挡墙	$4.55 \text{ m}^3 \times 180 \text{ 元/m}^3 = 819 \text{ 元}$		
抗滑桩加固	抗滑桩	$1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 650 \text{ 元/m}^3 \times (1/4) = 1 872 \text{ 元}$		
	桩顶连接梁	$1.2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 600 \text{ 元/m}^3 = 432 \text{ 元}$	2 304	1 485
锚杆加固	锚杆	$3.6 \text{ 根} \times 4.5 \text{ m/根} \times 80 \text{ 元/m} = 1 296 \text{ 元}$		
	钢筋混凝土骨架	$20 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 600 \text{ 元/m}^3 = 1 200 \text{ 元}$	2 496	1 673
抗滑挡	片石混凝土挡墙	$(1/2) \times (1.8 \text{ m} + 2.8 \text{ m}) \times 5.5 \text{ m} \times 220 \text{ 元/m}^2 = 2 783 \text{ 元}$		
土墙加固	增加削坡量	$14 \text{ m}^3 \times 10 \text{ 元/m}^3 = 140 \text{ 元}$	2 923	2 104

否满足实际膨胀土边坡稳定性要求。

在削坡放缓方式中, 膨胀土体的抗剪强度参数 $\varphi = 10^\circ$, $c = 3 \text{ kPa}$ (实际的试验结果主要集中在 $\varphi = 9^\circ \sim 11^\circ$, $c = 3 \sim 8 \text{ kPa}$), 则能保持削坡后的稳定性。对于膨胀土边坡来说, 若不出现饱和、软化、泥化现象, 其土体内的抗剪强度参数能满足上述要求, 这要求边坡土体不能积水。因此, 削坡放缓后需及时进行喷混生防并保持坡面整形规则。

在抗滑桩加固方式中, 抗滑桩的加固力与抗滑桩的尺寸、埋深、桩周土抗力等有关, 在上述设计截面尺寸下, 根据计算分析和工程经验, 单根桩抗滑力一般为 $500 \sim 800 \text{ kN}$ 。若单根抗滑桩加固力为 560 kN , 在考虑 1.2 倍安全系数条件下, 抗滑桩对坡面的加固力为 117 kN/m 。依据勘察资料和工程经验, 膨胀土在目前的坡比条件下下滑力和膨胀力一般不超过 100 kN , 因此间隔 4 m 的抗剪桩满足坡面所需的加固力。

在锚杆加固方式中, 由于膨胀土滑动面坡深一般为 $1 \sim 3 \text{ m}$, 利用 6 m 深的锚杆, 锚杆孔径为 110 mm 条件下, 其锚固力一般不低于 30 kN (实际试验结果不低于 40 kN)。在 10 m 高的膨胀土边坡中, 以 2.5 m 间距布置锚杆, 平均每延米有 3.6 根锚杆, 因此, 锚杆对整个坡面的加固力在 110 kN/m 左右。由于锚杆对坡面不仅有加固作用, 而且还有分隔作用, 减少了坡面的整体下滑力。膨胀土下滑力在目前坡比条件下一般不超过 80 kN , 因此锚杆按 2.5 m 间隔布置可以加固整个膨胀土坡面。

在抗滑挡墙加固方式中, 可以计算出抗滑挡土墙的主要控制因素为抗滑力, 抗倾覆情况满足设计

要求。在抗滑因素中, 主要受挡土墙与基底的摩擦因数控制, 在黏性的硬塑到坚硬土中, 摩擦因数 μ 一般为 $0.25 \sim 0.40$, 在这里, 假定 $\mu = 0.35$, 抗滑挡土墙所提供的抗滑力为 105 kN 。依据抗滑挡土墙要求抗滑稳定安全系数为 1.3 的规定, 实际提供的抗滑力只能考虑到 80 kN/m 。依据目前的膨胀土特征和其路堑坡比, 根据计算分析和类比分析, 下滑力一般不超过 50 kN/m , 其膨胀力在有一定工程措施条件下一般不超过 35 kN 。将抗滑挡土墙所提供的抗滑力和膨胀土边坡可能产生的下滑力进行比较发现, 稳定性系数 k 达到设计要求, 即抗滑挡土墙满足加固要求。

上述 4 种加固方式, 在孝襄高速公路边坡整治中都有试验段。在进行挡土墙加固时, 由于对膨胀土影响深度认识不足, 在挡土墙埋深为 1.8 m 时, 出现了整体挡土墙外推的现象, 这是由于在此深度范围内膨胀土受自然条件影响, 其强度会下降。同条件、同截面挡土墙埋深为 3.0 m 时, 坡面稳定。其他加固段和加固方式经过 3 a 多时间检验, 都保持稳定, 没有发现明显的变形破坏现象。

由表 1 可知, 从经济角度考虑, 削坡放缓整治膨胀土边坡费用最少, 3 种加固方式中费用有一定差别。从边坡稳定性方面考虑, 在图 4~7 的加固方式中, 都满足边坡稳定性要求。从孝襄高速公路公司要求全线生态环保方面考虑, 削坡放缓方式较佳, 一是坡面较缓, 有利于草灌生长, 容易形成立体生态防护; 二是向处延伸的 5 m 扩大征地量都是以草灌的形式恢复, 与全线绿色长廊带一致。此外, 抗滑桩和锚杆加固方式次之。抗滑桩加固部分都为

隐埋式, 可见坡面部分都可采用喷混植草灌的生态防护。锚杆加固方式中的钢筋混凝土骨架在草灌生长一定时间后也基本覆盖骨架部分, 相对生态环保角度来说, 抗滑挡土墙形成一条灰色长廊, 与整个绿色长廊环境协调性稍差。

5 结 论

通过本文的研究发现对膨胀土边坡失稳规律和特点的认识以及其他类似边坡的研究对膨胀土边坡整治尤其重要, 它使整治设计的具体重点部位有针对性, 避免发生由于认识不足而产生加固失效或过于保守, 并增大加固工作量的现象。

目前, 对坡高 12 m 以内的膨胀土边坡整治以放缓坡率和矮挡土墙的整治方式为主, 高速公路对生态环保要求较高, 具体的加固设计要考虑其便于生态环保及绿化要求, 必不可少的加固措施可以采用隐埋式或矮墙式, 同时还要结合地形地貌特点, 对加固方案进行多方面的比较, 选择既有利于环保, 又可减少工程造价的加固方式。

参考文献(References):

- [1] 姚海林, 郑少河, 李文斌, 等. 降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1 034 - 1 039.(YAO Hailin, ZHENG Shaohe, LI Wenbin, et al. Parametric study on the effect of rain infiltration on stability of unsaturated expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1 034 - 1 039.(in Chinese))
- [2] 詹良通. 非饱和和膨胀土边坡中土水相互作用机理[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(3): 494 - 500.(ZHAN Liangtong. Study on soil-water interaction in unsaturated expansive soil slopes[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2006, 40(3): 494 - 500.(in Chinese))
- [3] 廖济川, 陶太江. 膨胀土的工程特性对开挖边坡稳定性的影响[J]. 工程勘察, 1994, (4): 18 - 22.(LIAO Jichuan, TAO Taijiang. The effect of expansive soil on slope stability[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1994, (4): 18 - 22.(in Chinese))
- [4] 邵梧敏, 谭罗荣, 张梅英, 等. 膨胀土的矿物组成与膨胀特性关系的试验研究[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 11 - 29.(SHAO Wumin, TAN Luorong, ZHANG Meiyong, et al. The relation between mineral composition and swelling character of swelling soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(1): 11 - 29.(in Chinese))
- [5] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(LIU Tehong. Problems of expansive soil in engineering construction[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1997.(in Chinese))
- [6] 何家昆, 刘润华. 皖西膨胀土及边坡问题的研究[J]. 工程勘察, 1997, (4): 16 - 18.(HE Jiakun, LIU Runhua. Study on expansive soil in West Anhui and its slope problem[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1997, (4): 16 - 18.(in Chinese))
- [7] 卫 军, 谢海洋, 李小对, 等. 膨胀土边坡的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2 865 - 2 869.(WEI Jun, XIE Haiyang, LI Xiaodui, et al. Analysis of slope stability of expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 2 865 - 2 869.(in Chinese))
- [8] 王文生, 谢永利, 梁军林. 膨胀土路堑边坡的破坏型式稳定性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(1), 20 - 24.(WANG Wensheng, XIE Yongli, LIANG Junlin. Classification of expansive clay slope on road cutting[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science), 2005, 25(1): 20 - 24.(in Chinese))
- [9] 王小军. 南昆线膨胀土(岩)边坡堑坡结构设计研究[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(4): 111 - 114.(WANG Xiaojun. The expansive soil or rock cutting slope structure design of Nanning—Kunming Railway Line[J]. China Railway Science, 2003, 24(4): 111 - 114.(in Chinese))
- [10] 杜 英. 高速公路膨胀土路堑边坡的设计与施工技术研究[J]. 公路, 2005, 7(7): 118 - 121.(DU Ying. Design of cutting slopes of expansive soil of expressways and research on construction technology[J]. Highway, 2005, 7(7): 118 - 121.(in Chinese))