

山区高速公路陡坡上路基稳定性分析方法与治理对策

罗卫华

(湖南省高速公路管理局, 湖南 长沙 410001)

[摘要] 结合湖南某山区高速公路陡坡上路基工程的特点, 深入探讨了山区陡坡上路基破坏机理与破坏模式, 在综合运用极限平衡分析与离散单元分析方法基础上, 探讨了山区陡坡上高速公路路基稳定性的分析方法, 并在深入研究高速公路路基支护型式与支护效果的基础上, 提出了对山区高速公路陡坡上路基采用反压护道加固路堤、挡土墙加固路基、土工格栅加筋法加固路堤等治理措施与对策。

[关键词] 陡坡; 路基; 极限平衡分析; 离散单元法

[中图分类号] U 416.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-1205(2005)02-0040-05

Analysis and Remediation of Stability of Freeway Roadbed on Steep Slope in Mountainous Region

LUO Weihua

(Hunan Bureau of Highway Administration, Changsha, Hunan 410001, China)

[Abstract] The failure mechanism and modes of roadbed on steep slope in mountain area are deeply discussed by combining with the characteristics of the roadbed engineering of a certain freeway in Hunan province, and then the algorithm for analysis of stability of the roadbed on the steep slope in mountain district is probed based on analysis of limit equilibrium and discrete element method. Finally, the reasonable counter measures such as loading berm consolidated embankment, retaining wall consolidated roadbed and geogrid reinforced embankment, for disposal of the roadbed on the steep slope in mountain district are put forward on the basis of that the modes and effect for disposal of the roadbed of freeway are investigated.

[Key words] steep slope; roadbed; limit equilibrium; discrete element method

随着高速公路建设的快速发展, 高速公路不断向山区延伸, 这给高速公路尤其是陡坡上路基的建设带来了许多困难, 如在湖南省某高速公路建设中, 全线有 100 多处陡坡路基, 高度从几米到几十米, 大多数陡坡路基处在岩质破碎的板岩和泥岩地段。对于这些陡坡地段路基, 如果处理不当, 不仅严重影响路基的稳定性, 而且也会影响公路的交通安全。

本文结合湖南某山区高速公路建设工程实践, 从分析山区高速公路陡坡地段路基型式、破坏机理与模式出发, 探讨其稳定性分析方法, 进而提出山区高速公路陡坡上路基的综合处理方法与治理对策。

1 山区高速公路陡坡上路基破坏模式与机理

一般来讲, 修建在坡度陡于 1:2.5 的山坡坡面上的路基, 称作陡坡上路基。根据山区地形和路基横断面的情况, 可分为全填方陡坡路堤和半填半挖

陡坡路堤, 如图 1 所示。

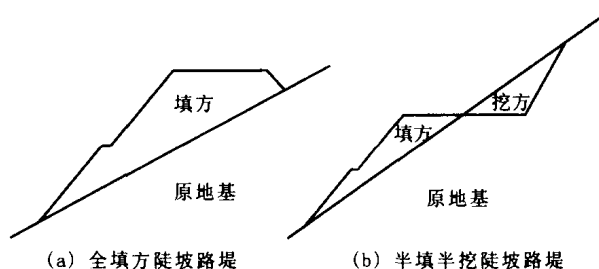


图 1 陡坡路堤的形式

Figure 1 Mode of steep slope roadbed

山区陡坡上路基稳定性主要受山坡的坡度、控制性层面土层强度参数的影响、路基建设的开挖情况等。为了探讨山区陡坡上高速公路路基的综合治理措施与对策, 必须深入探讨其破坏模式与机理。

1.1 陡坡上路基变形破坏模式

山区陡坡路基的破坏模式主要包括: ① 基底

为岩层或稳定山坡,因山坡坡度大,路堤整体沿与山坡接触的坡面产生滑动;② 路基随同山坡面覆盖层沿倾斜基岩面滑动;③ 路基连同下卧软弱土层沿某一圆弧滑动面滑动;④ 路基连同其下的岩层沿某一弱岩层面滑动。

1.2 山区陡坡上路基变形破坏机理

山区陡坡上路基变形破坏机理极其复杂,它是陡坡上路基破坏失稳治理的依据。山区陡坡上路基变形破坏的原因除由于山区坡度较大以外,路基填土压实度不足、路基下存在软弱土层、路基变形刚度差异过大、填筑物成分不均、地下水的动态变化等都可能

2 山区陡坡上路基稳定性分析与评价方法

山区高速公路陡坡上路基稳定性分析与评价是其治理的依据,其稳定性分析与评价方法必须反映山区陡坡上路基变形破坏模式与变形破坏机理以及其工程特点。

湖南某高速公路陡坡地段为丘陵地形,植被发育。岩土表层为粘土质砾和粉土质砾:浅黄色,硬塑状,稍湿,含碎石 20 % 左右,少量为块石,碎石多呈强风化状,岩芯松软。下部为硅化板岩,浅黄至浅灰色,强风化,细粒结构,中厚层状,硅质及泥质胶结,风化裂隙发育,裂隙面呈褐色,岩石易破碎,岩体完整性较差。部分地段为褐黑色风化板岩,较破碎,填方高度约 21 m。如图 2 所示,半填半挖路堤,自然坡度约 41°,岩土表面的覆盖层厚 3 m 左右,路堤为分 3 级填筑,第 1 级边坡坡比为 1:2,第 2 级边坡坡比为 1:1.75,第 3 级边坡坡比为 1:1.5。挖方段路堑边坡坡比为 1:0.5。

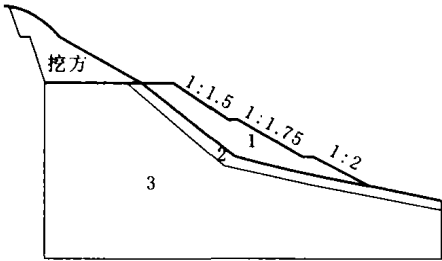


图 2 陡坡路基挖填方剖面图
Figure 2 Cut and fill profile of steep slope roadbed

2.1 山区陡坡上路基极限平衡分析

采用极限平衡理论进行计算,临界滑动面搜索采用简化 Bishop 法编程实现搜索过程。图 3 为加筋边坡稳定性分析力学模型,没有加筋时 $T_i = 0$ 。山坡路基边坡的稳定性安全系数 K 为:

$$K = \frac{\sum (Q_i \cos \alpha_i \tan \phi + CL_i) R + \sum T_i Y_i}{\sum Q_i \sin \alpha_i R} \quad (1)$$

式中: Q_i 为计算土条重; C 和 ϕ 分别为边坡土体粘聚力和内摩擦角; R 为临界滑动圆弧面半径; T_i 为每延米路基内加筋的容许拉力; Y_i 为筋带拉力对滑动面圆心的力臂。

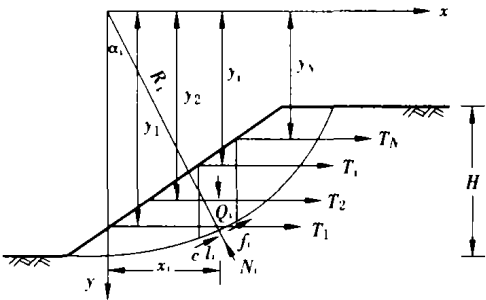


图 3 加筋边坡稳定性分析力学模型
Figure 3 Mechanic model of stability analysis on reinforced slope

表 1 岩土物理力学参数
Table 1 Geotechnical physical mechanic parameters

土 层	容重 / (kN·m ⁻³)	粘聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
填方土	19	20	16
堆积土	18	16	10
原地基	22	150	45
软弱面		16	10

表 1 给出了图 2 示断面的土体物理力学参数,其中,土体 1 为填方土,土体 2 为坡积土,土体 3 为原地基,软弱结构面法向和切向刚度分别为 83、8.3 MPa·m。参数根据现场调查或相关实验取得。

通过采用上述方法进行计算分析,可得如下基本结论:

① 当堆积土层存在时,路堤的破坏模式为路堤和堆积土层一起沿弧面滑动,滑动面主要发生在堆积土层里,此时,路堤的稳定安全系数为 0.841,处于极不稳定的状态。如图 4 所示。

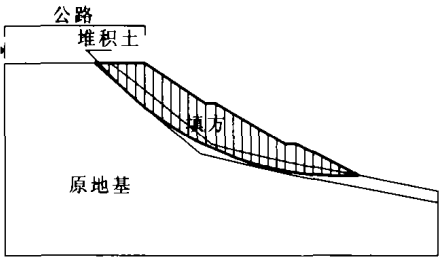


图 4 有软弱层存在时路堤的破坏形式
Figure 4 Damage mode of embankment with soft layer

考虑到堆积土层渗入水后粘聚力会显著降低,因此对安全系数随着堆积土粘结力的减小的变化情

况进行了分析。图 5 为堆积土的粘结力从 C 为 16 kPa 变化到 0 而其它参数不变时,安全系数的变化情况。可以看到,随着堆积土层粘结力的减小,安全系数几乎以线性变化的趋势减小。因此,在填土路堤地段应特别注意防水工作。

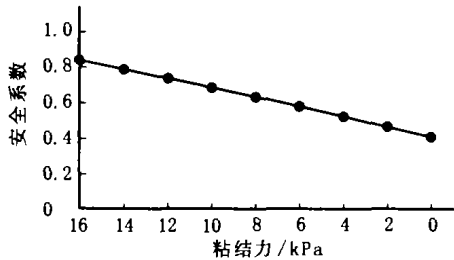


图 5 安全系数随粘结力的变化情况

Figure 5 Variation of safety coefficient from cohesion

② 清除堆积土层后,路堤的破坏模式为路堤沿着填方与原路基交界面滑动,如图 6 所示。此时,路堤的稳定安全系数为 1.177,基本上可以保持稳定,但是根据路堤设计规范的要求,安全系数不小于 1.25,因此仍需要进行加固处理。

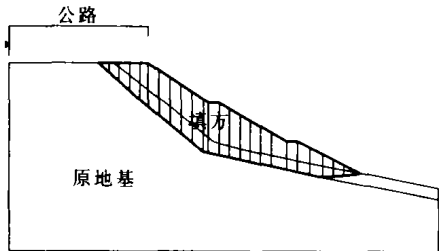


图 6 清除堆积土层后路堤的破坏形式

Figure 6 Damage mode of embankment after clearing accumulation soil layer

2.2 山区陡坡上路基稳定性的二维离散元模拟分析

2.2.1 二维离散元的基本原理

二维离散元法的基本方程由块体运动方程与物理方程所组成。

a. 运动方程。将块体离散化为有限差分三角形,网点即由三角形的顶点所组成,每个网点的运动方程为:

$$\ddot{U}_i = \frac{\int_S \sigma_{ij} \eta_j ds + F_i}{m} + g_i \quad (2)$$

式中: \ddot{U}_i 为网点 i 的运动加速度; σ_{ij} 为应力张量; η_j 为对 S 面的单向法向矢量; F_i 为作用于网点 i 上的外部荷载; g_i 为网 i 的重力加速度。

b. 物理方程。各块体间的接触归纳为角-边接触和边-边接触。力与位移的关系用增量表示,设

法向力增量为 ΔF_n ,切向力增量为 ΔF_s ,与它们对应的位移增量为 ΔU_n 和 ΔU_s ,且:

$$\Delta F_n = K_n \cdot \Delta U_n \quad (3)$$

$$\Delta F_s = K_s \cdot \Delta U_s \quad (4)$$

式中: K_n 与 K_s 分别为不连续接触面上的法向与切向刚度。离散元法本质上属于动力平衡法,据牛顿第二定律:

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = \frac{F}{m} \quad (5)$$

式中: \dot{u} 为网点的速度值; F 为作用力; m 为块体质量; t 为时间。利用对时间的中心差分,式(5)可以变换为:

$$\frac{\partial \dot{u}}{\partial t} = \frac{\dot{u}(t + \Delta t/2) - \dot{u}(t - \Delta t/2)}{\Delta t} \quad (6)$$

综合式(5)与式(6),对于 i 网点,可得到:

$$\dot{u}(t + \Delta t/2) = \dot{u}(t - \Delta t/2) + \frac{\sum F_i^{(t)}}{m} \Delta t \quad (7)$$

对于每一时步,在正常情况下网点的变形、振动及其对应的变形速度、转动速度与该点的位移及位移速度有关。

2.2.2 参数选择及结果分析

a. 参数选择。离散元模拟计算中,采用离散单元法的刚性块体模型,运动过程中单元之间的位移增量等完全由单元的几何尺寸、质心平移和单元绕其质心转角大小来决定。在接触关系上,采用弹塑性无张力角一边接触模型。计算模型的力学参数如表 1 所示。

b. 计算结果分析。① 当堆积土层存在时,其位移矢量图如图 7 所示,表现为沿弧面滑动的位移趋势,其最大位移矢量为 0.019 4 m,发生在路堤右侧顶部。② 清除堆积土层后,其位移矢量图如图 8 所示,表现为沿交界面滑动的位移趋势,其最大位移矢量为 0.010 5 m,发生在路堤右侧顶部。

从图 7 和图 8 中可以看到,当堆积土层存在时,



图 7 堆积土层存在时路堤的位移矢量图

Figure 7 Displacement vector of embankment with accumulation soil layer

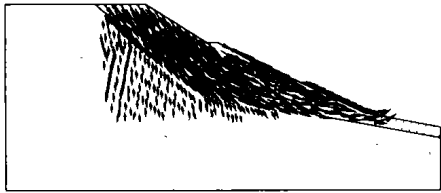


图8 清除堆积土层后路堤的位移矢量图

Figure 8 Displacement vector of embankment after clearing accumulation soil layer

路基的位移趋势是呈弧状向下滑动,底层的弧面在堆积土层中发生;而清除堆积土层后,路堤的位移趋势明显发生了变化,沿着原地基与填方土的接触面向下滑动,与前面计算分析时的滑动模式相同。

3 山区陡坡上高速公路路基综合治理对策

根据分析可知,陡坡路基变形破坏的原因除了坡度较陡外,主要还有坡面软弱土层的影响,因此,在进行综合治理时,首先应清除坡面上的软弱土层,填方时应在坡面上挖台阶,然后根据具体情况选择合适的处治措施,主要有以下几种治理措施与对策。

3.1 反压护道加固路堤

为了防止陡坡路堤填土沿斜坡面发生滑移,采用反压护道的方法稳定路堤。如图9所示,反压护道施工简易,不需要特殊的施工机具,填料可就地取材,经济实用,在路边土地宽时采用。

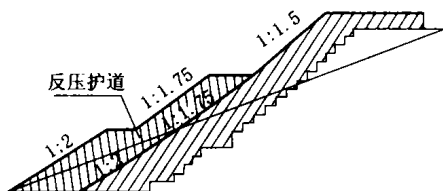


图9 反压护道示意图

Figure 9 Illustration of loading berm

3.2 挡土墙加固路基

挡土墙是目前加固陡坡路基中应用较为广泛而且效果较好的方法,它利用墙体本身的抗滑性能来支挡路基滑体的一部分或全部,同时还可以收缩坡脚,减少占地,防止沿河路基受水流侵害,并能增强路基的稳定性。它包括路堤墙、路肩墙等,在设计时根据具体地形等条件,挡土墙可采用浆砌片石挡墙或锚定板挡墙等多种形式,如图10为某路段的支挡结构图。

3.3 土工格栅加筋法加固路堤

土工格栅是由高密度的聚乙烯材料制成,具有非亲水性,耐腐蚀性能好,一般是由整体冲孔板制成,因此肋与条间的连接牢固,抗拉强度大。韧性

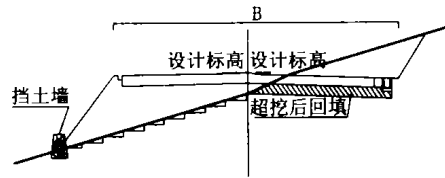


图10 挡土墙加固示意图

Figure 10 Illustration of retaining wall consolidation

好,与土的连锁作用强,摩擦系数大,在变形较小的范围内发挥其加筋作用。近些年来,它广泛地应用在加固路堤的工程中,并取得了良好的效果。

根据前面的分析及计算结果,采用土工格栅加筋法对陡坡路堤进行加固处理,确定的加筋边坡结构如图11所示。

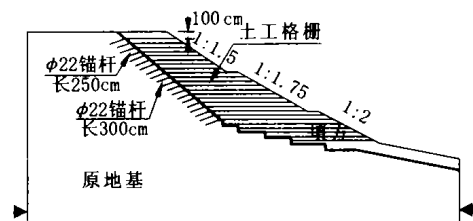


图11 试验模型平面示意图

Figure 11 Plane illustration of test model

加筋后经计算得出此路基的稳定安全系数为1.277,如图12所示,满足稳定性要求。

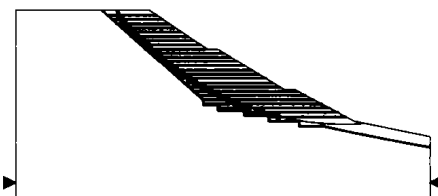


图12 加筋路堤稳定性计算图

Figure 12 Calculation of reinforced embankment stability

土工格栅加固路基效果不仅取决于合理的设计方法,同时施工质量对加固效果也有很大的影响,因此在施工中应注意以下事项:

① 填挖交界处应将挖方段挖成1 m的台阶,对于填挖交界处挖台阶较困难的岩石挖方处,台阶宽度可适当减小,用锚钉将土工格栅固定在挖方台阶上;

② 铺设土工格栅前,需清出开挖面浮土,整平开挖面后碾压,严禁有碎石、块石等尖硬凸出物,在距土工格栅8 cm以内的填料其最大粒径不得大于6 cm;

③ 铺设土工格栅时,沿路中心线方向10 m,土工格栅长边顺路线方向铺设,横向相撞处重叠30

cm, 铺设不允许有褶皱, 应人工拉紧, 并用 $\phi 6$ 钢筋制作 U 形钉将两边和搭接处锚固, 锚钉间距为 1.5 m;

④ 铺设土工格栅后, 应用符合要求的土进行填筑, 每层松铺不超过 30 cm;

⑤ 每层填土均应检查压实度, 以达到路基要求的压实标准。

4 结论

结合湖南某山区高速公路陡坡上路基工程的特点, 深入探讨了陡坡上路基变形破坏模式与机理以及其稳定性分析方法, 在此基础上, 提出了山区陡坡上路基综合治理的措施与对策, 并得到如下结论:

① 若陡坡上存在软弱层时, 首先考虑清除其软弱层, 挖台阶后进行填筑;

② 在进行设计时, 必须计算所有可能存在的路基滑坡安全系数;

③ 当陡坡路基的填方密实度得到保证时, 潜在

滑坡在填土与山坡基底交界面发生;

④ 土工格栅在陡坡路基处理中可以很好地发挥作用, 是处理陡坡路基的较好方法。

[参考文献]

- [1] 梁富权, 刘毓栋. 路基路面工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [2] 杨锡武, 欧阳仲春. 山区高等级公路加筋高路堤陡边坡研究[J]. 公路交通科技, 2001, (1): 17~20.
- [3] 杨锡武, 欧阳仲春. 加筋高路堤陡边坡离心模型的研究[J]. 土木工程学报, 2000, (5): 88~91.
- [4] 林 彤, 王迪友, 郑 轩. 土工格栅加筋陡坡路堤在三峡库区道路建设中的应用[J]. 水利水电快报, 2002, (23): 3~6.
- [5] 蒋 鑫, 魏永幸, 邱延峻. 斜坡软弱地基路堤填筑全过程稳定性[J]. 交通运输工程学报, 2003, (1): 30~34.
- [6] 熊传治, 徐 诚. 富家坞露天矿边坡稳定性的二维离散元分析[J]. 矿冶工程, 1999, (1): 14~17.
- [7] 汪益敏, 等. 路基边坡问题研究现状[J]. 中南公路工程, 2004, (2).

(上接第 39 页)

表 3 已有的抗折强度与抗压强度经验式^[2]

Table 3 Existing empirical formulas of compression strength and flexural strength^[2]

单 位	石子种类	水泥品种	经验式
交通部公路所等 1988 年 8 月	砾石	525 #, 425 #, 325 #	$f_f = 1.30 + 0.00f_c$
交通部公路所等 1989 年 9 月	砾石	525 #, 425 #, 325 #	$f_f = 1.15 + 0.121f_c$
唐山市交通局	砾石		$f_f = 1.09 + 0.134f_c$
山西省交通厅公路局		325 #, 425 # 早强	$f_f = 1.146 + 0.182f_c$
河南省交通厅公路设计院在 107 国道现场			$f_f = 3.36 + 0.058f_c$

度之间是否存在相关性, 分析了试验所得数据的相关性, 如表 4 所示。从表 4 分析的数据来看, 相关性最高的是 7 d 龄期的抗折强度与抗压强度, 为 0.947 246 727, 最低的是 3 d 龄期的抗折强度与劈裂抗拉强度, 为 0.703 073 509。总体看来, 强度之间还是存在一定的相关性。

表 4 强度实验数据相关性

Table 4 Correlation of strength test data in

龄期/ d	强 度		
	抗折 f_f 与抗压 f_c	抗压 f_c 与劈裂 f_{ts}	抗折 f_f 与劈裂 f_{ts}
3	0.703 073 509	0.715 079 288	0.764 905 389
7	0.947 246 727	0.818 258 502	0.843 648 895
14	0.719 951 881	0.725 208 561	0.856 949 232
28	0.854 483 442	0.895 049 536	0.920 650 843

5 结语

试验得出的是水泥混凝土路面施工时实际强度之间的关系。由于受现场各种条件和因素的限制, 只取了 41 组试验组数, 相对来说少了些, 在以后的

试验研究中可以增加实验组数, 以得到更多的数据。从以上数据分析来看, 水泥混凝土强度之间还是存在着一定的相关性, 有的相关性高达 0.947, 这对于与施工现场同等养护条件下, 是非常好的相关性。本次实验所得混凝土强度关系, 对施工及管理人员及时掌握混凝土质量情况具有一定的参考价值。

[参考文献]

- [1] 明德斯(英), J. 弗朗西斯(美). 混凝土(中译本)[M]. 北京: 中国建筑出版社, 1989.
- [2] 蔡正咏, 李世琦. 路面水泥混凝土抗折强度的经验关系[J]. 中国公路学报, 1992, 1.
- [3] 冯伟森. 泥结砾石路面改建水泥混凝土路面的技术参数[J]. 中南公路工程, 2004, (1).
- [4] 刘清芳. 水泥稳定碎石半刚性基层材料的抗裂性能分析[J]. 中南公路工程, 2004, (2).
- [5] 袁青山. 影响水泥混凝土路面抗折强度有关问题的试验分析[J]. 湖南交通科技, 2002, (2).