

# 基于数值分析的土工格栅加筋陡坡路堤优化设计研究

郭铭倍<sup>1,2</sup>, 宋玲<sup>1\*</sup>, 刘杰<sup>2</sup>, 麻佳<sup>1,2</sup>, 徐岩<sup>2</sup>, 段彦福<sup>1,2</sup>

(1 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 2 新疆维吾尔自治区交通规划勘察设计研究院)

**摘要:**为了探讨土工格栅加筋陡坡路堤设计参数对稳定性的影响,以 G216 线民丰至黑石北湖公路项目土工格栅加筋陡坡路堤工程为例,借助 Midas GTS NX 有限元软件实现土工格栅加筋陡坡路堤的建模,研究路堤构造形式、填土参数、筋材参数对路堤最大水平位移以及路堤稳定性的影响规律。结果表明:填土黏聚力、内摩擦角以及土工格栅弹性模量越大,加筋路堤最大水平位移越小,路堤整体稳定性越好;对于高陡坡路堤,可以通过路堤分级的形式对路堤进行加固;“上疏下密”型布筋方式比“中间密”型以及“均布”型更能有效限制路堤的水平位移;在加筋陡坡路堤设计时,建议土工格栅的弹性模量不低于 7 MPa,筋材布设层间距不大于 60 cm。

**关键词:**土工格栅;陡坡路堤;最大水平位移;稳定性安全系数;潜在滑裂面

## 1 前言

土工格栅加筋陡坡路堤可以使路堤边坡放陡,替代挡墙,从而节省占地、减少工程量,是一种非常有效的前途的路基结构形式。目前,工程设计中土工格栅加筋陡坡路堤常用的稳定性分析方法主要为极限平衡法,这种方法主要是在素土边坡路堤假定滑裂面的基础上,考虑土工格栅拉力对路堤的加固效果。工程实测资料表明极限平衡法计算结果比较保守,一定程度上影响了加筋陡坡路堤经济优势的发挥。包承纲在对国内外现行规范加筋土结构设计方法分析的基础上,指出极限平衡法与有限元分析法共同使用时所得结果最为理想;杨广庆通过对极限平衡法、极限状态法以及数值模拟法 3 种加筋挡土墙设计方法的优缺点分析,指出极限平衡法目前最为常用但偏于保守,建议工程实践中应该考虑不同影响因素的分项材料系数、分项荷载系数和分项破坏形式系数,通过分项系数来代替单一的总体安全系数法;李志勇通过数值计算与现场实测资料,探讨了筋材布设间距与加筋路堤变形的关系,得出土工格栅弹性模量越大加筋作用越明显,筋材布设间距为 60 cm 较为合理;宋雅坤以灰关联分析法为

手段,通过有限元强度折减法计算加筋土挡墙的稳定安全系数,对稳定影响因素的敏感性进行了分析,得出黏聚力和内摩擦角较大的填料可以增加加筋结构的稳定性;米慧杰通过 FLAC<sup>3D</sup> 软件建立数值模型,研究了加筋路堤安全系数与路堤潜在滑裂面的关系,得出加筋可以提高路堤的稳定性,促使路堤边坡滑裂面向路堤深层移动;崔春义通过 ADINA 有限元软件研究了填料性质、筋材弹性模量、筋材布设间距对加筋路堤的影响;EI-Nagger 和 Kennedy 研究了水平和垂直荷载作用下加筋路堤的工作性状,探讨了路堤结构形式、筋材布设间距和筋材长度对路堤位移、筋材拉力以及土体内应力的影响规律。以上研究表明目前以安全系数控制结构体的稳定性较为常用且成熟,在工程实践中,路基变形是工程设计中重要的考虑因素,加筋陡坡路堤产生的水平位移导致加筋结构体产生的失稳现象时有发生,对加筋陡坡路堤进行设计时,不仅要考虑其安全系数,还要将水平位移考虑在内,这样可以减少路堤失稳的概率,因此,有必要以加筋土陡坡路堤变形对稳定性进行控制进行研究。

该文以 G216 线民丰至黑石北湖公路建设项目 K213+080~K213+180 段的土工格栅加筋陡坡路堤为例,通过 Midas GTS NX 建模探讨路堤水平位移对

收稿日期:2020-12-26(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51669031);新疆维吾尔自治区交通厅科技项目(编号:2013(19));安徽省自然科学基金资助项目(编号:KJ2014A092)

作者简介:郭铭倍,男,硕士研究生, E-mail: 954761223@qq.com

\* 通信作者:宋玲,女,博士,教授, E-mail: xjsdsl0514@163.com

加筋路堤整体稳定性的影响规律。从增强路堤结构的稳定性和减小路堤水平位移的角度出发,对土工格栅加筋陡坡路堤进行优化设计。

2 工程概况

G216 线民丰至黑石北湖公路建设项目起点位于民丰县内,穿越昆仑山脉,止于黑石北湖 K284+432 处,全长约 285 km,山区段按三级公路标准建设,路面结构采用沥青混凝土路面。该项目大部分段落工程地质分区属构造剥蚀中高山区的构造、剥蚀残丘区,地形起伏较大,深切现象明显,丘陵地貌,海拔一般 4 940~5 040 m,工程施工难度极大。考虑到混凝土圬工工程可施工时间段,K213+080~K213+180 段原地面横坡较陡,采用土工格栅加筋陡坡路堤替代混凝土挡墙收缩坡脚,选取 K213+160 断面作为设计优化断面,其高度为 17.90 m,路堤宽度为 9.54 m,加筋材料为耐低温性能好的高密度聚乙烯单向土工格栅,设计极限抗拉强度为 80 kN/m,综合折减系数为 5,设计容许抗拉强度为 16 kN/m,格栅布设方式见表 1。

表 1 土工格栅层位设计(上疏下密)

格栅层位 (自下向上编号)	格栅层数	层间距/ m	加筋长 度/m
30~34 层	5	0.6	8
22~29 层	8	0.6	14
7~21 层	15	0.4	16
1~6 层	6	0.4	14

3 数值建模

3.1 模型建立

对 K213+160 断面进行数值建模(图 1),模型高度为 17.90 m,路堤宽度为 9.54 m,路堤左边的边坡坡率为 1:1,路堤右边的边坡坡率为 1:1.5,数值模型的材料参数见表 2。

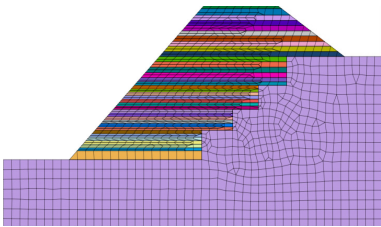


图 1 数值模型

3.2 材料本构关系与参数设置

对加筋路堤进行模拟时,本构模型和计算参数的选取对模拟结果具有决定性的影响。该文模型的模拟对象分为填土、土工格栅和地基土,其中填土和地基土为粗粒土,根据类似土样与土工格栅复合体的大型三轴试验结果,土的本构关系设置为摩尔—库仑模型。土工格栅在工作状态下应力应变关系位于弹性范围内,根据土工格栅的拉伸试验结果,土工格栅的本构关系为弹性模型。

3.3 接触面建立

采用 Midas GTX NX 软件内置的 goodman 单元作为筋土接触单元,其界面接触参数主要有黏聚力、内摩擦角、法向刚度和切向刚度 4 个参数。土工格栅截面和接触特性参数如表 3 所示。

表 2 材料计算参数

材料名称	弹性模量/ MPa	泊松比	填土重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	本构模型
路堤填土	70	0.35	23	3.3	35	摩尔—库仑
地基土	100	0.31	22	4.3	35	摩尔—库仑
土工格栅	950	0.33	—	—	—	弹性

表 3 界面接触参数

材料名称	法向刚度/ (kN·m <sup>-2</sup> )	切向刚度/ (kN·m <sup>-2</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	厚度/ m	类型
界面接触	2.3×10 <sup>8</sup>	2 600	12	35	—	—
土工格栅	—	—	—	—	5.0×10 <sup>-4</sup>	1D

4 参数敏感性分析

在加筋陡坡路堤数值模型基础上,通过在数值计算中改变边坡坡率、填土内摩擦角、填土黏聚力、土工格栅间距、土工格栅弹性模量以及边坡分级方式,分析各参数变化对加筋路堤稳定性的影响规律。

4.1 路堤边坡坡率对稳定性的影响

4.1.1 坡率 1 : 1

对所选取的路堤断面进行筋材的重布设,记路堤土工格栅原布设方式为“上疏下密”型,另外增加“均布”型(间距 60 cm)和“中间密”型土工格栅布设方式(表 4)。

表 4 土工格栅层位设计(中间密)

格栅层位 (自下向上编号)	格栅层数	层间距/ m	加筋长 度/m
28~34 层	7	0.6	12
7~27 层	21	0.4	14
1~6 层	6	0.6	12

3 种筋材布设方式中,“上疏下密”型加筋体的最大水平位移为 6.38 cm,“均布”型为 12.71 cm,而“中间密”型为 10.37 cm,可以看出:当采用“上疏下密”筋材布设方式时,路堤的最大水平位移最小,说明此时路堤变形比其他工况小。

分析 3 种筋材布设方式所对应的路堤潜在滑裂面分布(图 2),可以看出:“上疏下密”型布筋方式下的路堤安全系数最大,说明此时路堤结构最为稳定。安全系数偏大的路堤潜在滑裂面更靠近路堤内部,结合布筋方式对加筋路堤最大水平位移的影响规律,得出“上疏下密”型筋材布设方式可以有效减小路堤结构的整体变形,增大路堤结构的安全性能。

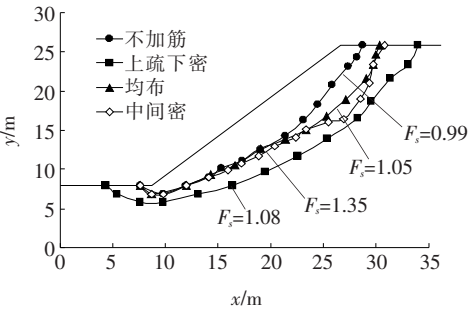


图 2 布筋方式与路堤滑裂面的关系(坡率 1 : 1)

4.1.2 坡率 1 : 0.75

在以上数值分析的基础上,将坡率 1 : 1 设置为

1 : 0.75,其他条件保持不变,加筋路堤最大水平位移见表 5,路堤位移分布规律与坡率 1 : 1 的路堤基本相同。图 3 与图 2 的滑裂面分布规律大体相同,但加筋路堤安全系数较 1 : 1 坡率明显减小,说明路堤边坡较陡时,加筋路堤的稳定性有所减弱,路堤的变形也有所增大。进一步验证“上疏下密”布筋方式的加筋效果更加明显,路堤下部筋材对路堤稳定性的贡献大于上部和中部区域,建议通过减小筋材布设层间距来增强高陡坡路堤的稳定性。

表 5 路堤最大水平位移

格栅布设方式	水平位移/cm	格栅布设方式	水平位移/cm
上疏下密	7.38	中间密	12.08
均布	15.41		

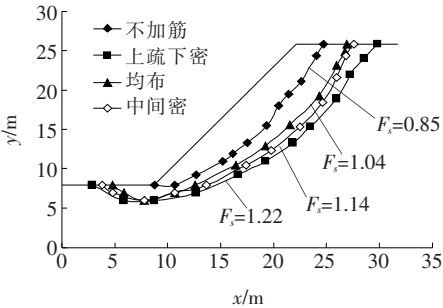


图 3 布筋方式与路堤滑裂面的关系(坡率 1 : 0.75)

图 2、3 说明,加筋前路堤潜在滑裂面靠近边坡坡面,加筋后潜在滑裂面向路堤内部移动较为明显。现行规范通常以不加筋路堤的滑动面作为加筋体的滑动面,而实际上加筋以后,加筋边坡的潜在滑动面的位置发生了变化。因此,建议在土工格栅加筋陡坡设计时,应将加筋后边坡的滑动面作为设计时的潜在滑动面,再确定筋材布设长度。

数值模拟结果显示,土工格栅加筋陡坡路堤的坡率越陡,路堤的最大水平位移越大,安全稳定性越差。反之,坡率越缓,路堤的安全稳定性越好,路堤整体变形越小。

4.2 填料参数对稳定性的影响

4.2.1 黏聚力 c

为了探究黏聚力 c 与路堤稳定性的关系,对坡率 1 : 0.75 的不分级边坡进行数值分析,得到填料参数的改变对加筋路堤最大位移的影响规律。加筋路堤填料的黏聚力 c 值分别取 3、3、7、10、14、18 kPa。

通过改变数值模型中填土的黏聚力,得到填土黏聚力变化对路堤滑动面位置的影响不大,填土黏聚力越大,路堤滑裂面越靠近路堤内部(图 4),反之,则靠

近边坡坡面。

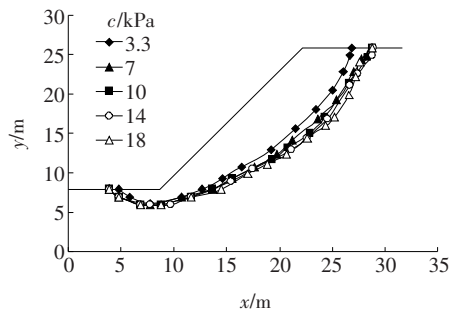


图 4 填土黏聚力  $c$  与路堤滑裂面的关系

由图 4 可知:黏聚力  $c$  为 3.3~14 kPa 时,加筋路堤最大水平位移受到较大的影响,填土黏聚力逐渐增大时,路堤安全系数逐渐增大,路堤最大水平位移减少趋势较为明显,当黏聚力超过 14 kPa 时,加筋路堤最大水平位移和安全系数几乎没有变化(图 5)。

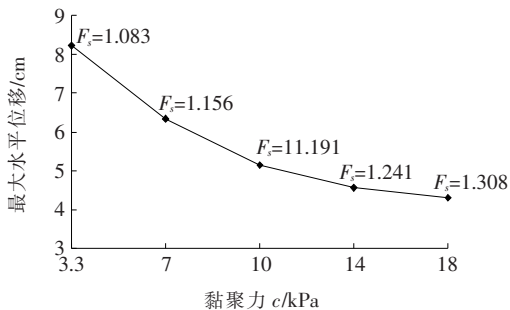


图 5 填土黏聚力  $c$  与路堤位移关系曲线

从图 5 可以看出:增大填土的黏聚力可以提高路堤的稳定性,当黏聚力增加到 14 kPa 时,填土黏聚力继续增大对路堤安全稳定性的贡献逐渐减小。另外,根据准黏聚力理论,填土中加入土工格栅后,由于筋材与土体之间的嵌阻咬合作用,加筋土的内摩擦角  $\varphi$  没变,但黏聚力增加  $\Delta c$ ,土体的强度得到了明显提高。

#### 4.2.2 内摩擦角 $\varphi$

加筋路堤填土内摩擦角  $\varphi$  值依次取  $33^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $38^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $43^\circ$ 。填土内摩擦角对路堤滑裂面的影响规律(图 6)与填土黏聚力反映的规律差别较大。内摩擦角数值越大,加筋路堤滑裂面距离边坡坡面位置越近。

图 7 为内摩擦角与路堤最大水平位移的关系。由图 7 可知,内摩擦角逐渐增大时,路堤最大水平位移逐渐减小,加筋路堤安全稳定性逐渐增大。选用内摩擦角较大的填土可以有效限制路堤的水平位移,提高路堤的稳定性。

结合数值计算结果,当填土其他参数相同时,选用黏聚力较大的填土可以增大路堤的安全稳定性。通常

细粒土的黏聚力大于粗粒土,但细粒土受含水量的影响较大,随着含水量的增加,路堤填土的黏聚力和抗剪强度均呈现较大程度的下降,明显降低路堤的安全稳定性。因此,加筋路堤填料通常选用粗粒土,粗粒土的黏聚力小于细粒土,但摩擦角大于细粒土。路堤填料必须选用细粒土时,可以通过添加掺合料增大路堤填土的内摩擦角。

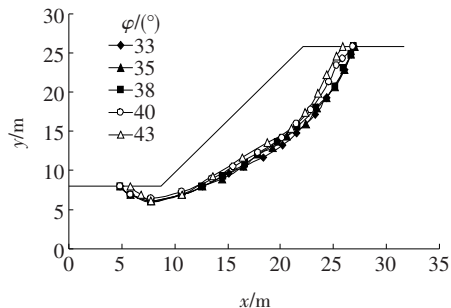


图 6 填土内摩擦角  $\varphi$  与路堤滑裂面的关系

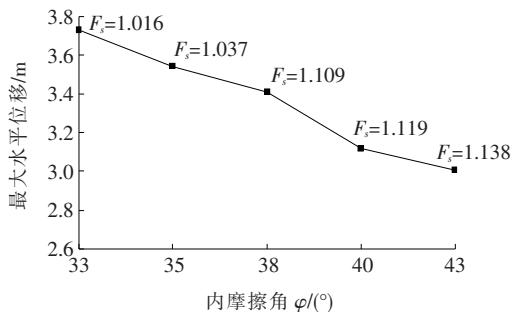


图 7 填土内摩擦角  $\varphi$  与路堤位移关系曲线

#### 4.3 筋材强度分布对稳定性的影响

采用极限平衡法进行加筋陡坡设计时,通常是通过筋材整体强度来提供边坡的抗滑力,无法考虑每层筋材对边坡稳定的贡献,例如,选择强度较高的筋材则筋材层间距较大,反之,选择强度较低的筋材则筋材层间距较小。实际上,土工格栅布筋方式不仅对工程造价产生重要的影响,更将直接影响路堤结构的稳定性和安全性。此外,根据影响带理论,通过在土体中布设筋材,可以对筋材上下一定范围内的土体产生一定的加固效应,筋材布设间距超过一定距离,加筋效果不明显。筋材布设间距过小,筋材对土的加固范围存在一定程度的重叠,增加施工工作量,影响加筋陡坡路堤的经济优势。

图 2、3 都说明采用“上疏下密”的布筋方式,路堤整体稳定性更好,路堤不易发生变形。将“上疏下密”与“均布”布筋方式进行对比,发现下部结构筋材布设间距对路堤的安全稳定性影响较大。基于此,控制上



级路堤筋材布设间距为 60 cm,对下级路堤筋材布设间距进行调整,对加筋路堤进行数值分析,探讨总抗拉强度不变的情况下筋材强度分布对路堤稳定的影响规律。

#### 4.3.1 加筋间距

对 1:1 与 1:0.75 两种坡率的路堤分别进行不同筋材布设间距的数值模拟,控制下级路堤铺设筋材总抗拉强度保持不变,下级路堤筋材布设间距分别取 0.4、0.5、0.6、0.7、0.9、1.2 m。分析路堤筋材布设间距的变化对路堤最大水平位移以及加筋体整体稳定性的影响(图 8、9)。当路堤分级且坡率为 1:1 时,不同筋材布设间距下的路堤稳定性强于其他工况,路堤最大水平位移明显小于其他工况。

图 10 为 6 种筋材布设间距下所对应的加筋路堤滑裂面位置,由图 10 可以得到:路堤分级后的滑裂面位置向内部移动较为明显,坡率 1:1 的路堤滑裂面比坡率 1:0.75 的滑裂面平缓。下级路堤筋材布设间距越大,路堤的滑裂面位置越靠近边坡坡面,反之,滑裂面越靠近路堤内部。

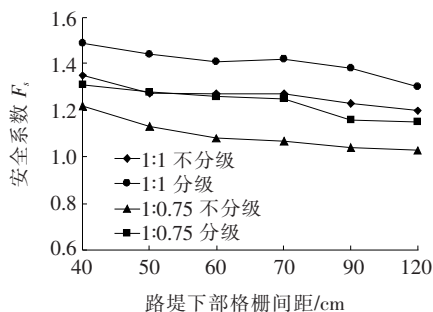


图 8 筋材布设间距与安全系数关系曲线

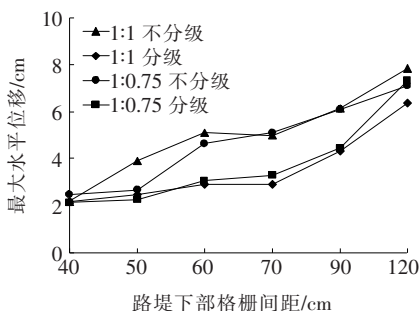
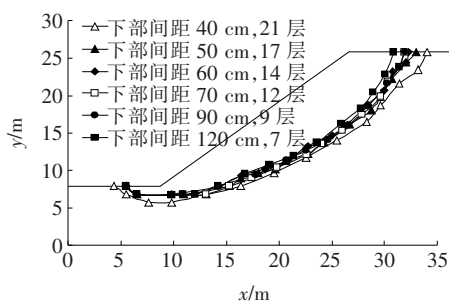
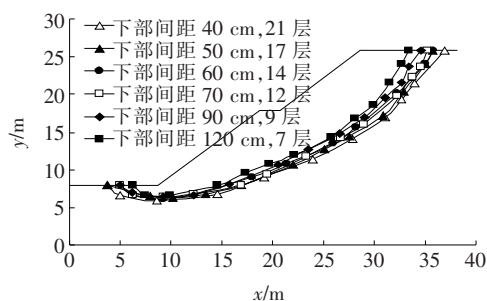


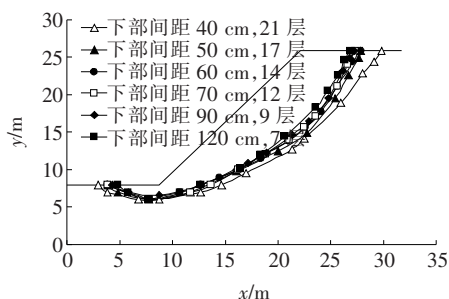
图 9 筋材布设间距与路堤最大水平位移关系曲线



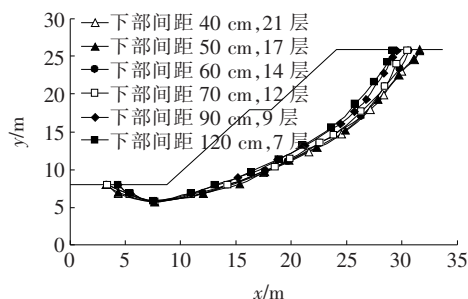
(a) 坡率 1:1, 不分级



(b) 坡率 1:1, 分级



(c) 坡率 1:0.75, 不分级



(d) 坡率 1:0.75, 分级

图 10 筋材强度分布与路堤滑裂面关系

#### 4.3.2 土工格栅弹性模量

通过改变原工况数值计算中的弹性模量数值,得到筋材弹性模量与路堤最大水平位移的关系(图 11)。

由图 11 可知:土工格栅弹性模量为 9.5 MPa 时的路堤最大水平位移为 8.5 cm,筋材弹性模量小于 9.5 MPa 时,路堤最大水平位移明显增大,大于 9.5

MPa 时,路堤最大水平位移逐渐减小。当土工格栅弹性模量较小时,筋材自身强度较小,铺在土体中不能对路堤起到明显的加固作用。土工格栅弹性模量数值大于 20 MPa 时,路堤最大水平位移基本不再变化,说明筋材强度过剩。

在土工格栅加筋陡坡路堤设计时,应该兼顾土工

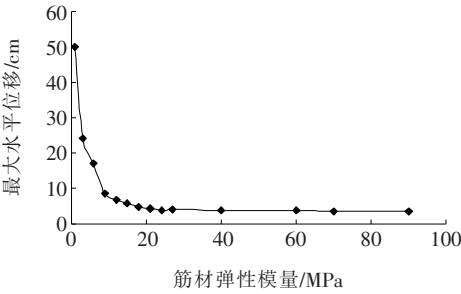


图 11 筋材弹性模量与与路堤位移关系曲线

格栅强度与筋材铺设层距离,土工格栅的强度不宜低于 7 MPa,筋材的铺设层距离不宜取值过大,不宜大于 60 cm。对于高陡坡路堤,宜选用高强度的土工格栅提高路堤的稳定性。

4.4 边坡形式对稳定性的影响

当陡坡路堤高度较大时,通常采用分级的形式对路堤进行分级修筑,对路堤断面进行分级,下级加筋路堤的高度为 10 m,上级高度取 7.9 m,分级平台宽度为 3 m,筋材铺设方式仍为上述 3 种(图 12)。土工格栅加筋陡坡路堤分级后的最大水平位移分布规律与不分级路堤整体相同(表 6),且分级路堤的最大水平位移整体偏小,其中路堤分级后最大水平位移相比不分级路堤最多减少 29.9%。相同高度、相同的布筋方案,分级陡坡路堤相比不分级路堤路基稳定性更高,边坡的水平位移更小。路堤边坡较陡且高度较大时,填土的黏聚力作用会有所减弱,对路堤边坡进行分级,可

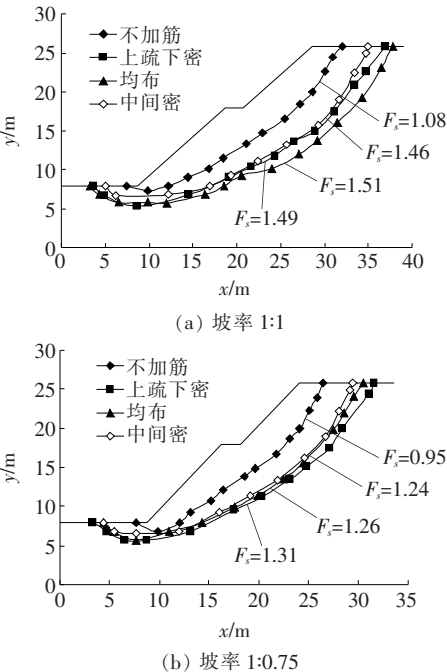


图 12 布筋方式与分级路堤滑裂面的关系

表 6 分级路堤最大水平位移

格栅铺设方式	水平位移/cm	
	坡率 1 : 1	坡率 1 : 0.75
上疏下密	5.18	6.01
均布	9.61	10.79
中间密	7.32	8.48

以较大程度发挥填土黏聚力对路堤稳定性的影响,这与介玉新通过离心模型试验和有限元数值分析所得的结论一致。

建议对安全性要求高,高度较高,设计条件复杂的陡坡路堤设计时进行分级,对于为节省占地,无法进行边坡分级设计的情况,可优先采用“上疏下密”型的布筋方式,也可以达到路堤结构安全稳定的相关要求。

5 结论

(1) 土工格栅加筋会改变路堤潜在滑动面的位置,加筋后潜在滑裂面会向路堤内部移动,在土工格栅加筋陡坡路堤设计时,应将加筋后边坡的滑动面作为设计时的潜在滑动面,再确定筋材铺设长度。

(2) 土工格栅加筋陡坡中路堤下部筋材对路堤的稳定性贡献大于边坡中部和上部筋材,对于高度较高的土工格栅加筋陡坡路堤设计时,可优先采用“上疏下密”型的布筋方式,采用“均布”布筋方案时,可适当提高边坡下部土工格栅设计强度。

(3) 填土内摩擦角、黏聚力以及土工格栅弹性模量越大,加筋效果越明显。在土工格栅加筋陡坡路堤设计时,应该兼顾土工格栅强度与筋材铺设层间距,建议土工格栅的弹性模量不宜低于 7 MPa,从“准黏聚力理论”和“筋材影响带理论”角度出发,筋材的铺设层间距不宜大于 60 cm。

(4) 土工格栅加筋陡坡路堤可以提高路堤的稳定性,对安全性要求高、高度较高、设计条件复杂的陡坡路堤设计时进行分级,对于为节省占地,无法进行边坡分级设计的情况,可优先采用“上疏下密”型的布筋方式,这样也可以达到路堤结构安全稳定的要求。

参考文献:

[1] 胡幼常,孙云龙,毛爱民,等. 土工格栅加筋粗粒土坡—机理及应用[M]. 北京:知识产权出版社,2019.  
[2] 包承纲,丁金华,汪明元. 极限平衡理论在加筋土结构设计中的评述[J]. 长江科学院院报,2014(3).