

土工格栅加筋边坡稳定分析

周燕锋,陈德立,陈致富
(福建省建筑科学研究院,福建 福州 350025)

摘要:从土工格栅加固土体的机理入手,采用加拿大著名岩土工程软件 Geostuido 进行数值模拟分析,讨论了土工格栅的长度、刚度、竖向间距、铺设方式等参数对加筋边坡的稳定性和永久变形等的影响,得到土工格栅在加筋边坡中的一些重要影响因素以及对应的敏感性,从而为加筋边坡的设计提供参考依据。
关键词:有限元法;土工格栅;边坡稳定;Geostuido;加筋土
中图分类号:TU472.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2015)02-0069-06

土体具有一定的抗压强度和抗剪强度,但抗拉强度却很低,在土体中掺入或铺设一定的拉筋材料后,可以大大改善土体的强度和变形特征,增强土体的稳定性,使土体的整体强度得以提高。目前,这种加筋土技术已广泛应用于边坡、路基、挡土墙、桥台、堤坝等工程^[1-3]。

土工格栅是一种新型的加筋材料,具有重量轻、强度高、易搬运、抗腐蚀、低延伸率、耐久性好和价格低廉等优点^[4],同时,具有防渗、过滤、排水、防护、隔离、加筋和加固等多种功能,近年来被广泛应用于各类岩土工程,特别是在边坡加固工程中应用较多^[5]。由于加筋结构的计算是一个非常复杂的问题,涉及筋材、填料土以及筋土相互作用等因素^[6],使得加筋工程的理论研究远远滞后于其实际应用。本文使用加拿大岩土工程软件 Geostuido 来分析土工格栅加筋边坡稳定性,分别讨论了土工格栅的长度、刚度、竖向间距、铺设方式等对边坡的稳定性和永久变形的影响。

1 有限元模型的建立

先用 SIGMA/W 计算结构的应力场,然后基于这个应力场用 SLOPE/W 对边坡的筋带长度、刚度、竖向间距铺设方式 4 个方面进行有限元效果分析。
以高 $H=10\text{ m}$,坡角 $\beta=45^\circ$ 的简单的均质边坡为算例,其有限元网格模型如图 1 所示,材料参

数见表 1。
边坡土体的本构模型采用理想弹塑性模型,界面单元本构用加拿大岩土工程软件 Geostuido 自带的 Slip Surface 模型(包含界面摩擦角 φ 、界面黏聚力 c 、剪切模量 G 、重度 γ 、泊松比 ν 5 个数),土工格栅用只能抗拉、不具有抗压与抗弯能力的一维梁单元来模拟,并设定其只受拉应力,不承受压应力,同时在梁单元上下两侧设置了界面单元来模拟筋土相互作用。

表 1 土体计算参数表					
Table 1 Material parameter list					
土层	$\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	$c/$ kPa	$\varphi/$ ($^\circ$)	$E/$ MPa	ν -
边坡土	20	0	30	100	0.35
地基	27	100	50	500	0.25
界面单元	0	63.21	23.9	-	0.3

2 加筋边坡稳定分析

采用加拿大岩土工程软件 Geostuido 对加筋边坡的稳定性进行分析。
2.1 不同筋带长度加筋效果分析
以 4、4.5、5、5.5、6、6.5、7、7.5、8、8.5 m 9 种不同筋带长度为例,分析筋带长度对边坡稳定性和永久变形的影响结果如图 2 所示。

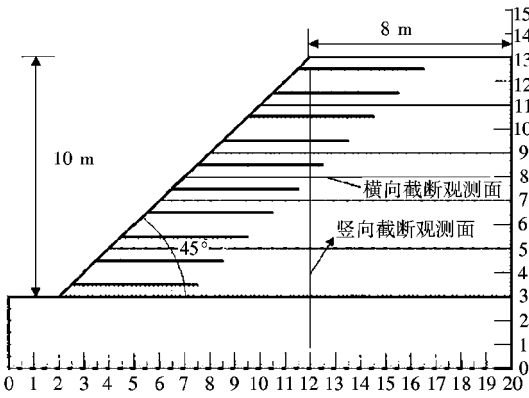


图 1 边坡几何模型及有限元网格

Fig.1 Slope geometry model and finite element mesh

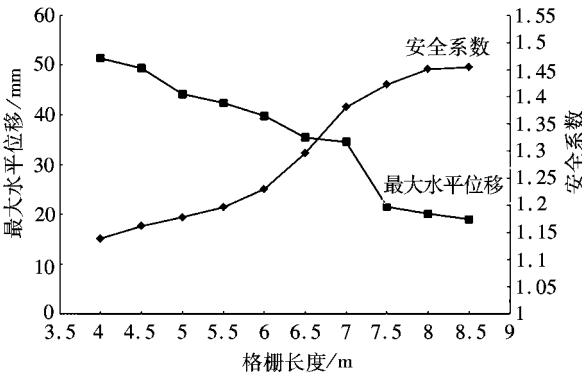


图 2 筋带长度对安全系数和最大水平位移的影响

Fig.2 Affect on safety factor and maximum horizontal displacement of geogrid's length

从图 2 中可知,随着格栅筋带长度的增加,坡体的稳定性不断增强,并表现出起初变化较小,进而变化显著,最后趋于影响不明显的斜“S”型影响效果;坡体的最大水平位移,则随着格栅筋带长度的增加而减小,甚至可能存在某个区间的跳动,如图中 7.5 m,侧向约束效果突然显著加强。由此可见,在设计格栅铺设长度时,应选取适中的格栅长度。一味的增加长度,对控制坡体的稳定性和变形控制并没有起到实际明显的效果,反而造成浪费。因为土工格栅具有很高的刚度和协调变形能力,可以很好地限制土体的侧向变形,同时绷紧的筋带也能降低土体的沉降量,从而使得坡体有较好的稳定性。

图 3 为坡顶正下方的一组竖向断面节点的水平位移和竖向位移。从图 3 中可知,不同筋带长度对坡体永久位移的影响:①筋带越长,坡体的水平位移和竖向位移越小,但是,只有当筋带达到一

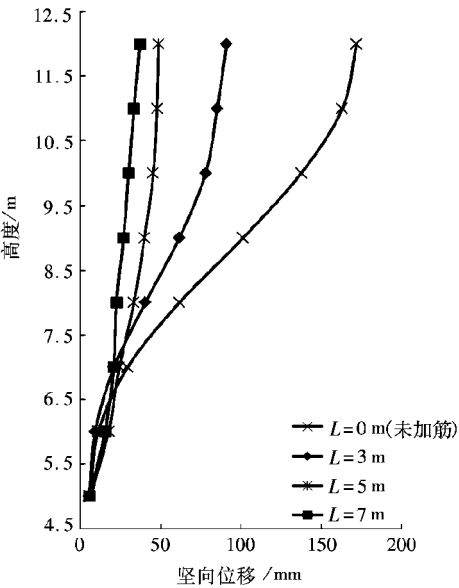
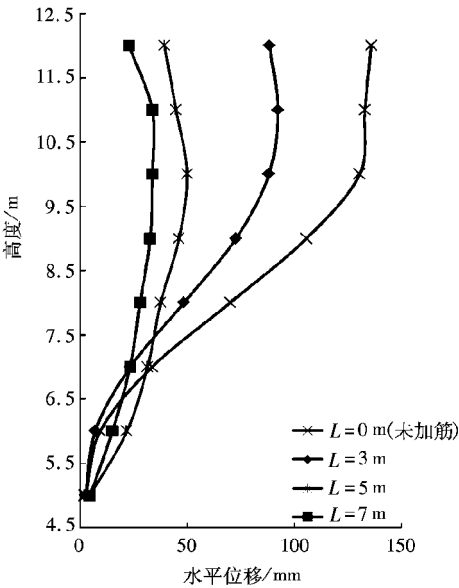


图 3 筋带长度对选取竖向断面永久位移的影响

Fig.3 Affect on safety factor and maximum horizontal displacement of geogrid's length

定长度时,效果才比较明显;②坡体的竖向位移基本呈现上大下小的总体趋势不变。

图 4 为坡面正中间的一组水平断面节点的水平位移和竖向位移。

从图 4 中水平位移可知,加筋能很大程度减少坡体潜在滑动区的水平位移,但随着格栅筋带长度的增加,坡体的水平位移相对来说会有小幅度的增加,坡体的最大水平位移往坡体后方扩散,也就是说坡面的水平位移变得更加均匀,从而坡体的稳定性得到加强。

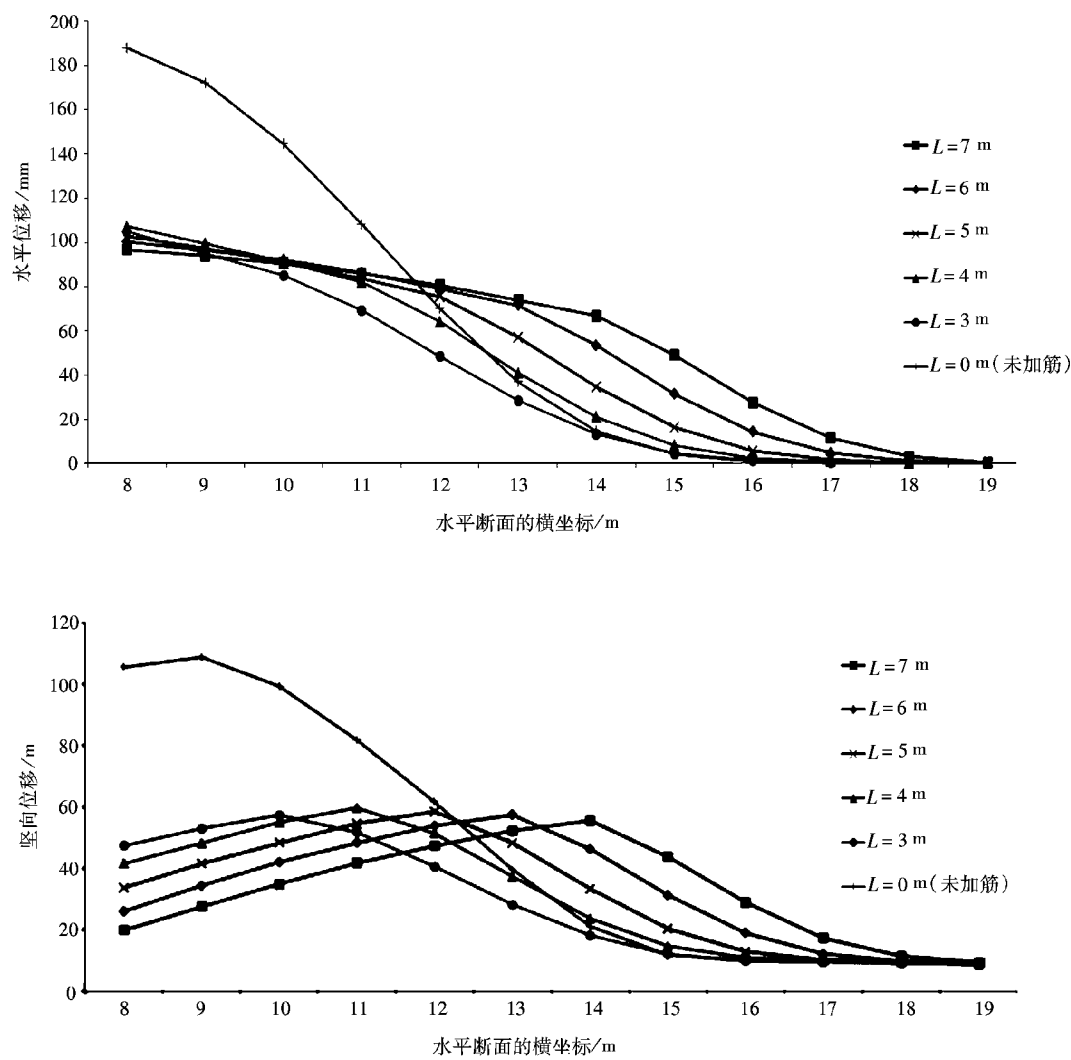


图 4 筋带长度对选取横向断面永久位移的影响

Fig. 4 Affect on the vertical displacement of the cross section of geogrid's length

而从竖向位移分析可知,加筋能很大程度减少坡体潜在滑动区的竖向位移,表现为:在加筋区,筋长越长,对坡体的沉降约束越大,坡体竖向位移越小;加筋区的后面,效果则相反,筋长越长,竖向位移越大,并与远端竖向位移基本一致,但是总体趋势在减小。另外,加筋之后,坡体的竖向位移即沉降比较均匀。

图 5 给出了未加筋及格栅长度分别为 5 m、7 m 的最危险滑裂面位置。从中可以看出,格栅长度对最危险滑裂面的影响不大,只是滑出点略有不同。筋长越长,最危险滑裂面越靠坡面后方,表现出越深层的滑动,体现了土工格栅对坡体加筋效果。

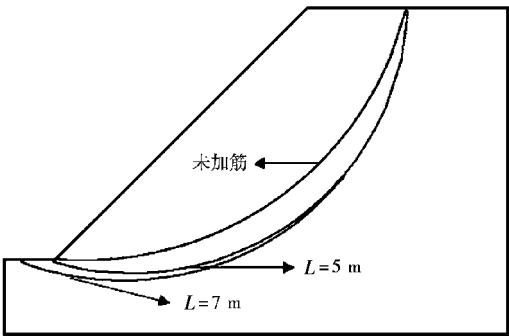


图 5 筋带长度对最危险滑裂面的影响

Fig. 5 Affect on the most dangerous slip surface of geogrid's length

2.2 不同筋带参数加筋效果分析

以 0.3 GPa、1.5 GPa、3 GPa、15 GPa、30 GPa 等 5 种不同弹性模量的土工格栅为例,分析其对坡肩正下方选取的竖向断面节点水平和竖向永久变形的影响。

从图 6 可知,当格栅模量小于 1.5 GPa 时,格栅模量越大,水平位移和竖向位移越小,说明加筋能减少坡体变形;但当格栅模量超过 1.5 GPa 时,其对水平位移和竖向位移的影响并不明显。究其

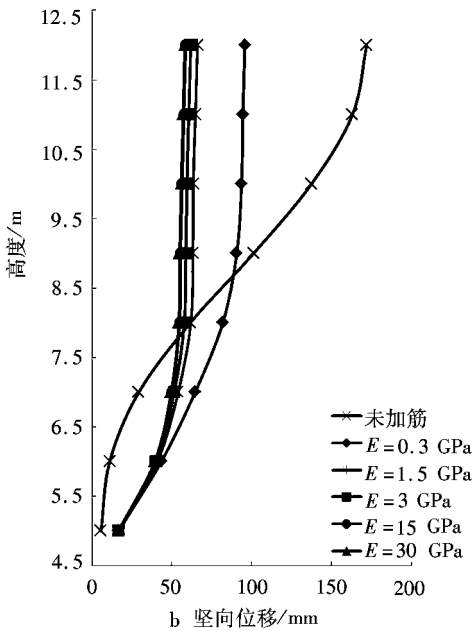
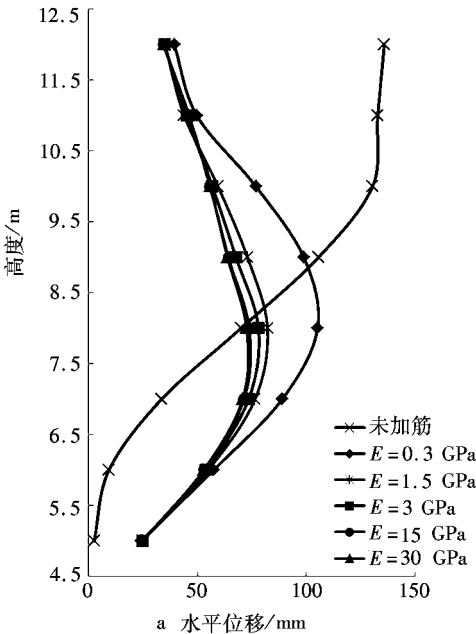


图 6 不同筋带弹性模量对永久变形的影响
Fig.6 Potential slip surface by strength reduction FEM

原因,因为弹性模量体现了土工格栅抵抗变形的能力,只有当它达到一定值时,才能对沉降起到有效的控制作用,而当弹性模量超过一定值后,筋材与坡土的接触面将可能在变形控制中起主导作用。也就是说,筋材的作用效果受制于筋材与坡土的接触面情况,在筋材与坡土接触面强度不能提高的情况下,无限度地增大筋材模量是没有意义的。因此,在实际工程中,究竟选取多大弹性模量的筋材,要根据工程的实际情况具体问题具体分析,从工程安全性和经济性等方面综合考虑。

2.3 不同筋带竖向间距加筋效果分析

以 0.5 m、1 m、1.5 m、2 m、2.5 m、3 m、4 m、5 m 等 8 种不同竖向间距格栅加筋为例,分析不同筋带竖向间距对边坡稳定性安全系数和永久变形的影响,结果如图 7 所示。

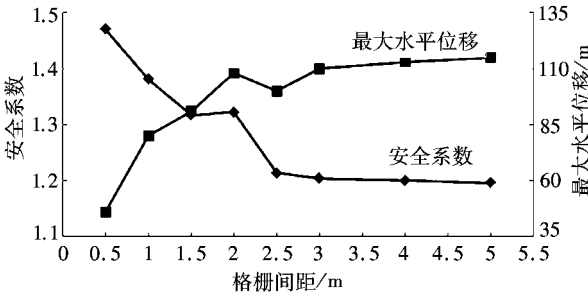


图 7 格栅间距对安全系数和最大水平位移的滑动面
Fig.7 Affect on safety factor and maximum horizontal displacement of geogrid's spacing

从图 7 可知,随着格栅筋带竖向间距的加大,筋带层数减少,单位面积下格栅密度减小,坡体的稳定性不断减小,最大水平位移不断增加。同时当格栅间距较大时,格栅铺设的层数较少、铺设位置变化较大,对坡体稳定性的影响也较大。

图 8 为不同格栅间距对竖向断面节点永久位移的影响。由图中可知:①坡体的水平位移、竖向位移都随土工格栅间距缩短而变小;②通过筋土的相互作用,筋层间距越小,筋带铺设的层数越多,筋带密度越大,筋层土工格栅所承担的荷载就越多,从而对土体的约束作用就越显著,坡体的永久变形就越小,其稳定性也随之增强;③随着加筋层竖向间距的增大,坡面上铺设的格栅层数减少,格栅铺设位置可动性变大,使得观测截面的水平位移波动较大,而竖向位移几乎没有影响。

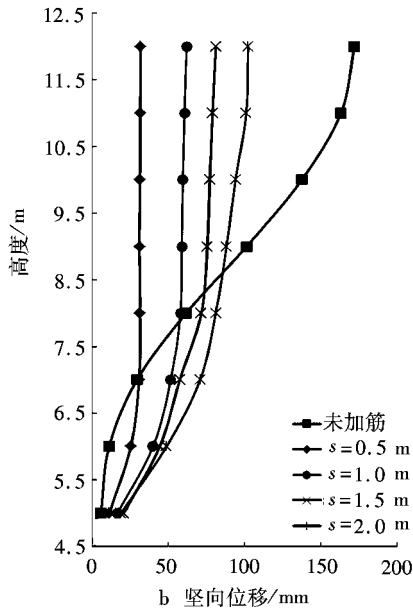
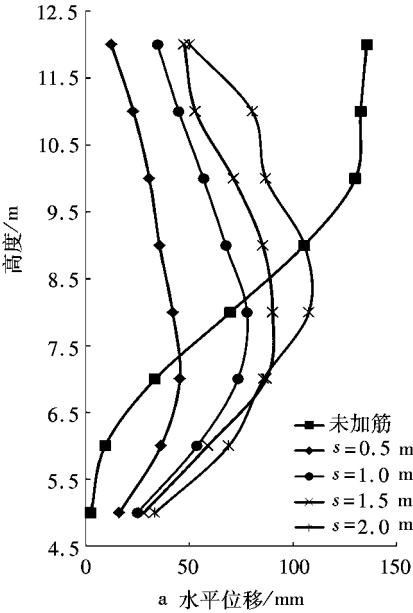


图 8 不同格栅间距对断面永久位移的影响
Fig.8 Affect on different geogrid spacing for sectional permanent displacement

2.4 不同筋带铺设方式加筋效果分析

通过设置一层土工格栅在坡体的不同高度,分析其铺设位置对坡体加筋作用的不同影响,结果见表 2。

由表 2 可知,从上往下,土工格栅对坡体的加筋作用不断增强,说明下层格栅比上层格栅加筋

表 2 一层格栅的不同铺设位置对安全系数的影响

Table 2 A layer geogrid of different laying position influence on safety coefficient

方案	一层格栅铺设位置/6 m		安全系数
	距坝顶/m	距坡趾/m	
方案 1	1.5	8.5	1.043
方案 2	3.5	6.5	1.058
方案 3	5.5	4.5	1.123
方案 4	7.5	2.5	1.153
方案 5	9.5	0.5	0.877

效果好,对坡体抗滑作用较大;但是,在靠近坡趾的某个高度将出现突变,如方案 5 中,距坡脚 0.5 m 处反而出现了坡体不稳定的现象。所以在加筋边坡设计的时候,加筋层应该多铺设在坡体下部,但又不能太靠近坡脚。

通过设置两层等长的土工格栅坡体在 4 个不同的位置铺设,分析其对坡体稳定性的影响,结果见表 3。

表 3 两层等长格栅的不同铺设位置对安全系数的影响

Table 3 Two layers geogrid of different laying position influence on safety coefficient

格栅铺设位置	两层等长土工格栅铺设/6 m					
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
第 1 层	✓	✓	✓			
第 2 层	✓			✓	✓	
第 3 层		✓		✓		✓
第 4 层			✓		✓	✓
安全系数	1.075	1.147	1.171	1.150	1.188	1.193

由表 3 可知,方案 3、5、6 比方案 1、2、4 加筋效果较好,说明格栅铺设在坡体中下部加筋效果较显著。

再考虑多层土工格栅不同长度设计方案对坡体稳定性的影响,以求得最优化的多层铺设方案。表 4 共设置了 5 种方案,格栅总长度保持不变。

从表 4 求得的安全系数可知,方案 2 即格栅上短下长铺设对坡体稳定性贡献最大;相反,方案 3 的上长下短的铺设方案是最不利的,因而在设计时应当避免。

表 4 多层格栅的不同铺设方式对安全系数的影响

Table 4 Multilayer geogrid of different laying way influence on safety coefficient					
格栅铺设位置	土工格栅铺设长度/m				
	方案 1 (等长)	方案 2 (上短下长)	方案 3 (上长下短)	方案 4 (中部长)	方案 5 (中部短)
第 1 层	7	5	9	5	9
第 2 层	7	6	8	8	6
第 3 层	7	7	7	9	5
第 4 层	7	8	6	8	6
第 5 层	7	9	5	5	9
安全系数	1.246	1.338	1.178	1.253	1.318

3 结论

(1) 在土体中铺设土工格栅,以其作为抗拉的加筋材料,与土体产生相互摩擦,增大筋材与土

体的摩阻力,使土工格栅上下两侧的土颗粒受到约束,能够限制土体的侧向变形,有利于提高坡体的整体稳定性,减少土体的不均匀变形。

(2) 土工格栅铺设长度、间距以及筋材模量对边坡加筋效果影响显著。在一定范围内,土工格栅铺设长度越长,间距越小,筋材模量越大,边坡加筋效果越好,坡体变形减小、稳定性越高;但当超过一定值时,这种加筋效果将变得不那么明显。因此,在实际工程中,要根据实际情况控制格栅的模量,以取得较好的安全度和经济性,而不能一味地增加格栅长度、层数和强度。否则既不经济实用,效果也可能不太理想。

(3) 土工格栅在坡体下部加筋效果比上部好。在加筋边坡设计时土工格栅应适当布置在坡体中下部,并采用下部长上部短的铺设方式,从而得到最佳铺设效果。

参考文献:

[1] 万智,李志勇,万剑平,等. 加筋路堤稳定性分析与优化设计[J]. 中南公路工程,2006,31(2):18-20.
[2] 朱亚林. 地震时高土石坝的弹塑性分析和抗震措施研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
[3] 郭洪亮. 基于有限元滑面应力法的深基坑土钉支护结构稳定性分析[D]. 大连:大连理工大学,2009.
[4] 范臻辉,王永和. 土工格栅加筋高路堤边坡稳定性的弹塑性有限元分析[J]. 中南大学学报:自然科学版,2005,36(5):904-910.
[5] 徐林荣, 华祖焜. 加筋边坡承载力和位移模型试验及结果分析[J]. 铁道学报,1999,21(1):72-76.
[6] 季大雪,杨庆,栾茂田. 加筋均质边坡稳定影响因素的敏感性研究[J]. 岩土力学,2004,25(7):1 089-1092.

The Stability Analysis or the Geogrid-reinforced Slope

ZHOU Yanfeng, CHEN Deli, CHEN Zhifu
(Fujian Academy of Building Research, Fuzhou Fujian 350025, China)

Abstract:Based on the mechanism of geogrid reinforced soil and combined with the famous Canadian geotechnical engineering software Geostuido, to do some numerical simulation analysis is carried out. Considering the impact of the geogrid's length, vertical spacing, arrangement manner, stiffness and other parameters of geogrid for reinforced slope's stability and permanent deformation, and eventually get some of the important factors for geogrid reinforced slope and the corresponding sensitivity are gotten to provide a reference for the design of reinforced slope.
Keywords:finite element method; geogrid; slope stability; Geostudio; reinforced soil

(责任编辑:孙新华)