

# 强度折减法在加筋土高边坡稳定分析中的应用

许雅琦 祝启坤

(武汉工程大学资源与土木工程学院,湖北武汉 430205)

**【摘要】** 在边坡稳定性分析中,极限平衡法和强度折减法得到广泛应用。相比极限平衡法,强度折减法不但可以得到边坡的安全系数,而且可以得到土体塑性应变区及应力位移等结果,但对加筋土的计算则产生较大误差。分析了加筋土加筋机理,根据等效应力法将加筋土视为一个整体,以新的黏聚力来取代原土体黏聚力,从而实现强度折减。以山西某填土高边坡为例,利用极限平衡法计算的结果去调整加筋土的等效黏聚力,对不同高度的边坡计算得到的等效黏聚力进行对比分析,发现边坡高度会对黏聚力增量产生影响,边坡越高黏聚力增量越大。有限元结果可以用来优化边坡设计,同时为加筋土的研究提供一种手段。

**【关键词】** 加筋土边坡;极限平衡法;强度折减法;等效黏聚力;有限元

**【中图分类号】** TU 472.34

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2015.04.007

## Application of Strength Reduction Method in Reinforced Soil Slopes

Xu Yaqi Zhu Qikun

(Wuhan Institute of Technology, School of Resource and Civil Engineering, Wuhan 430205, Hubei, China)

**【Abstract】** In the slope stability analysis, the limit equilibrium method and strength reduction method have been widely applied; Compared with limit equilibrium method, strength reduction method not only can get the safety factor of the slope, but also the soil plastic strain, stress and displacement; However, it cannot be used to calculate the reinforced soil ideality. In this paper, through the analysis of reinforced soil reinforcement mechanism, regard the reinforced soil as a whole according to the equivalent stress method, using a new cohesion to replace the original soil cohesion, so as to realize the strength reduction method. Take a high fill slope in Shanxi as an example, it adjusts the equivalent cohesion of reinforced soil using the result from safety coefficient of limit equilibrium method, then comparative analysis the equivalent cohesion in different height slope, finding out that the slope height will have influence on the increment of cohesion, the higher of slope, the greater of the increment cohesion. The results of finite element method can be used to optimize the design of slope, and to provide a way for research reinforced soil.

**【Key words】** reinforced soil slope; limit equilibrium method; shear strength reduction method; equivalent cohesive strength; finite element

## 0 引言

在岩土工程中,经常会涉及高填方边坡问题。为了保证边坡的稳定性,常用措施就是在土中加入土工格栅形成加筋土边坡。土工格栅可以起到限制土体侧向位移,增强土体的整体性,从而提高了土体抗剪强度<sup>[1]</sup>。目前在加筋土工作机理分析和设计中,极限平衡法和强度折减法为两种常见计算方法<sup>[2]</sup>。极限平衡法可以大致估计筋材所提供的抗力,在此基础上估算加筋土体的安全系数,是规范推荐使用的方法。尽管这种方法简便实用,但无法获得筋材与土各自的应力、应变、结构变形等结果。结

合有限元的抗剪强度折减系数法考虑了土体的本构关系,以及变形对应力的影响,求解安全系数时,不需要假定滑移面的形状,也无需进行条分,就能够反映边坡的滑移面形状<sup>[3-4]</sup>。强度折减法作为设计的辅助手段,越来越受到重视。

高填土边坡工程设计上,仅采用一种方法计算具有局限性和不确定性。在前期的加筋土边坡设计中,发现有限元计算结果与极限平衡法计算结果有较大误差,使得设计师不敢直接采用。如何有效利用有限元进行加筋土边坡分析,快速地得出安全系数、潜在滑移面、应力应变等信息成为边坡设计中一

个亟待研究的课题<sup>[5]</sup>。本文通过对实际边坡工程的计算分析,指出有限元在加筋土计算上的不足,并采用加筋土等效粘聚力的方法进行边坡稳定性的计算,以期使有限元结果吻合极限平衡法所得结果,采用其所得的应力、应变等结果来优化设计方案。

## 1 边坡稳定性分析原理

### 1.1 极限平衡法

极限平衡法是根据作用于土体中潜在破坏面上块体沿破坏面的抗剪力与该块体沿破坏面的剪切力之比,即为坡体的稳定性系数。基于极限平衡法原理的边坡稳定计算有多种方法,主要有瑞典条分法、Morgenstern-Price 法、Bishop 法、Janbu 法等,这里简单介绍应用较为广泛的 Bishop 法原理

Bishop 法为条分法的一种,它考虑了土条侧面的作用力,并假定各土条底部滑动面上的抗滑安全系数均相同,即等于整个滑动面的平均安全系数。由于推导中只忽略了条间切向力,比瑞典条分法更为合理。如图 1 所示, $E_i$  及  $X_{i+1}$  分别表示法向及切向条间力, $W_i$  为条块自重, $Q_i$  为水平作用力, $N_i$ 、 $T_i$  分别为条块底部的总法向力(包括有效法向力及孔隙水压力)和切向力。

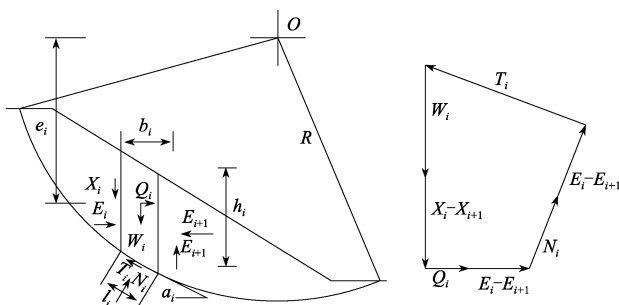


图 1 简化 Bishop 法计算示意图

Bishop 法的安全系数经过一系列的推导变换,最终得出下式:

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{a_i}} \{c'_i b_i + [W_i - u_i b_i] \tan \varphi'_i\}}{\sum W_i \sin \alpha_i + \sum Q_i \frac{e_i}{R}} \quad (1)$$

式中: $c'_i$  为第  $i$  条块有效黏聚力; $u_i b_i$  为孔隙水应力; $\alpha_i$  为  $i$  条块底边与水平夹角; $e_i$  为条块水平作用力与滑弧圆心的竖向距离; $R$  为滑动圆弧半径; $\varphi'_i$  为有效内摩擦角; $m_{a_i}$  为和  $F_s$  有关的参数,其式如下:

$$m_{a_i} = \cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi'_i}{F_s} \sin \alpha_i \quad (2)$$

通过式(1)和式(2)迭代法求解,最终可以得到

安全系数  $F_s$  值。

### 1.2 强度折减法

抗剪强度折减系数  $F_s$  是指边坡土体所发挥的最大抗剪强度与外荷载在边坡内所产生的实际剪应力之比。强度折减法是通过将土体的抗剪强度指标  $c$  和  $\varphi$  除以折减系数  $F_s$ ,如式(3)和式(4)所示,将折减后的抗剪强度指标  $c_F$  和  $\tau_F$  取代原来的抗剪强度指标  $c$  和  $\varphi$ 。

$$c_F = c/F_s \quad (3)$$

$$\varphi_F = \tan^{-1}((\tan \varphi)/F_s) \quad (4)$$

$$\tau_F = c_F + \sigma \cdot \tan \varphi_F \quad (5)$$

式中: $c_F$  为折减后土体虚拟的黏聚力; $\varphi_F$  为折减后土体虚拟的内摩擦角; $\tau_F$  为折减后的抗剪强度。

在有限元计算过程中,设定初始的折减系数  $F_s$ ,采用折减后的抗剪强度进行计算,不断增大  $F_s$ ,折减后的抗剪强度指标相应逐步减小,直到某一个折减抗剪强度下整个坡体发生失稳,即发生塑性破坏,计算不收敛,那么在发生失稳之前的那个折减系数值,也就是该边坡的稳定安全系数。

## 2 加筋土稳定性分析机理

### 2.1 加筋土极限平衡法原理

在加筋土边坡的设计中,《土工合成材料应用技术规范》<sup>[6]</sup>推荐的方法是根据未加筋边坡的安全系数  $F_{su}$  和加筋后需要达到的安全系数  $F_{sr}$ ,计算所需要的筋材的总加筋力

$$T_s = (F_{sr} - F_{su}) M_0 / D \quad (6)$$

式中: $M_0$  为未加筋土边坡针对滑动圆心的滑动力矩之和; $D$  为加筋力  $T_s$  的力臂。

通过式(6)即可得到加筋后边坡的安全系数  $F_{sr}$

$$F_{sr} = F_{su} + T_s D / M_0 \quad (7)$$

### 2.2 加筋土有限元分析原理

一般情况下,在有限元数值分析中,对于加筋土的计算有两种方法。一种是将筋材作为独立结构考虑,同时对筋土界面设置接触,通过有限元计算土体的应力与变形、筋材中的受力与变形状态、界面的滑移特性。尽管该方法具有一定的合理性,但在计算中,过多的结构单元和接触容易导致计算不收敛。另一种方式是将加筋土等效为一种复合材料,不再考虑筋土之间的相互作用特性,其等效参数可以通过试验的方式确定。Yang<sup>[7]</sup>最先提出了加筋土等效应力法的概念,将筋材作为作用在土体单元上的等效荷载来进行处理,无需单独模拟筋材本身,介玉新<sup>[8-9]</sup>等人对其进行了完善和改进。Yang 利用试验分析了多层加筋土的破坏,发现土体在加筋前后的

内摩擦角几乎相同,只是增加了黏聚力  $c$ ,加筋前后强度包络线平行(见图 2),并由此给出三轴试验中破坏时附加围压的增量与黏聚力增量的关系为:

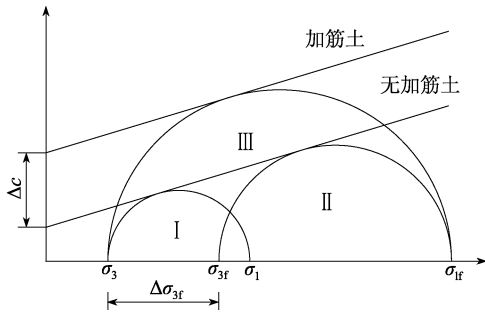


图 2 加筋土试样极限应力圆

$$\Delta\sigma_{3f} = 2\Delta c \tan(45^\circ - \varphi/2) \quad (8)$$

当筋材水平布置时有

$$\Delta c = R_f \sqrt{K_p} / 2\Delta h \quad (9)$$

$$K_p = \tan^2(45 + \varphi/2) \quad (10)$$

式中:  $\Delta h$  为格栅加筋层竖向间距;  $K_p$  为被动区压力

系数;  $R_f$  为筋材破坏时筋材单位宽度上受的力,即抗拉强度。

### 3 实例分析

以山西某边坡工程为例,该区拟建一工厂,原始地势起伏较大;为平整地面,对部分山体开挖,回填低洼处,填筑最高至 45 m。填土采用山体爆破产生的块石,土工格栅极限抗拉强度不小于 130 kN/m,相邻层间距为 0.5 m,通过土工编织袋反包并分层碾压形成加筋土边坡。因该边坡为一级边坡,破坏后毁坏性较大,因此在设计过程中采用了极限平衡法和有限元进行互补分析。

极限平衡法计算所需参数为土体重度、黏聚力、摩擦角、筋土界面特性等参数,强度折减法土体采用摩尔-库伦本构模型,所需参数还包括弹性模量、泊松比等参数。根据厂区勘察报告及工程经验,计算主要土体参数见表 1,其中弹性模量值采用压缩模量  $E_{1-2}$  值的 2.5 倍。

表 1 边坡稳定性计算主要土体参数

土体	重度 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	摩擦角 /( $^\circ$ )
填土-碾压	20.8	36	0.28	5	35
填土-强夯	21.8	45	0.26	5	40
①素填土	17	12	0.34	5	20
②粉土	16.5	16	0.32	35.2	26.4
③粉质黏土	18	18	0.3	33.1	26.4
④ <sub>1</sub> 强风化石灰岩	25.6	60	0.27	185	25
④ <sub>2</sub> 中等风化石灰岩	27.8	60	0.25	414	38

土工格栅经过老化、蠕变、施工损伤等折减后其设计强度为 40 kN/m,筋土界面黏聚力为 5 kPa,摩擦角为  $40^\circ$ 。

极限平衡法分析采用边坡稳定性分析软件 Slide,取 Bishop 法计算所得结果,强度折减法采用 Midas/GTS 有限元软件。采用两款软件分别对 6、14、20、30、40、45 m 高边坡进行建模和计算分析,发

现未加筋前二者的安全系数较为接近,而加筋后,二者结果则出现较大偏差。这里以高度为 6 m 的边坡计算结果为例,模型尺寸为 33 m  $\times$  15 m,土工格栅铺设长 12 m。在 Slide 中设置自动搜索滑动面,在 Midas 两侧进行水平约束,底部进行竖向约束,采用 SRM 模块进行强度折减,计算结果见图 3—图 6。

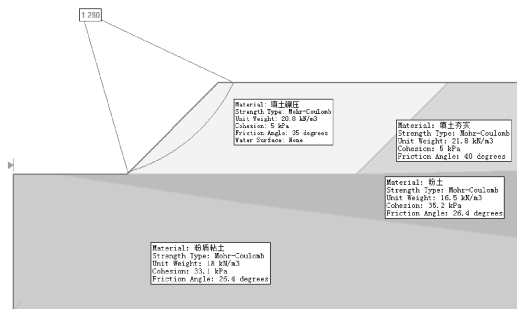


图 3 6 m 高填土边坡极限平衡分析结果

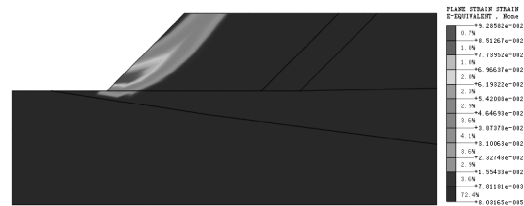


图 4 6 m 高填土边坡有限元分析结果

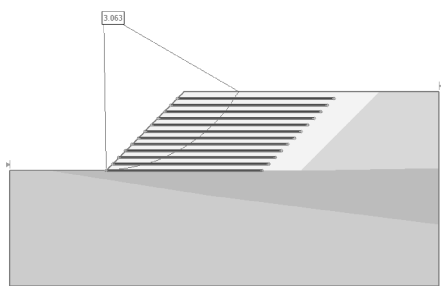


图5 6 m加筋土边坡极限平衡分析结果

从上图中可以看出,6 m高未加筋填土边坡极限平衡法所得到安全系数为1.28,而有限元结果为1.29,误差为0.78%,同时强度折减法所得到的等效塑性应变区和极限平衡法所得的圆弧滑动面较为吻合,同其他学者研究证明了强度折减法计算的可靠性<sup>[10-12]</sup>。加筋后极限平衡法所得到的安全系数

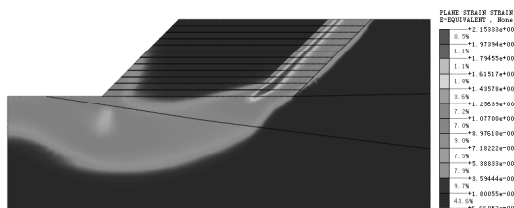


图6 6 m加筋土边坡有限元分析结果

为3.063,而强度折减法计算的结果为3.90,误差为27.3%,并且加筋后的强度折减法计算得到的塑性应变区出现在土工格栅后部,这与极限平衡法计算的结果相差较大,也不符合正常的破坏形式。对比其他高度边坡,采用两种方法计算得到的安全系数结果见表2。

表2 不同高度边坡稳定性计算结果

边坡	计算方法	坡高/m					
		6	14	20	30	40	45
未加筋土边坡	极限平衡法	1.28	1.106	1.061	1.017	0.998	0.995
	强度折减法	1.29	1.12	1.10	1.06	1.03	1.02
加筋土边坡	极限平衡法	3.063	1.946	1.699	1.382	1.357	1.390
	强度折减法	3.90	2.60	2.33	1.95	1.68	1.72

从表中可以看到,不同高度未加筋边坡两种方法计算的结果均接近,而加筋边坡计算结果中,强度折减法所得结果要明显大于极限平衡法所得结果。这是因为强度折减法是对土体抗剪强度进行折减,而土工格栅一般采用弹性模型,其本身无法进行抗剪强度折减,滑面易出现在筋材后端,因此计算结果会偏大。

#### 4 等效黏聚力对比分析

根据 Yang 试验所得结论,加筋土并未提高土体的摩擦角而是提高了黏聚力,为此根据有效应力法,将加筋土体视为一个整体,以新的黏聚力来取代原土体黏聚力,从而实现强度折减。依据极限平衡法所得到的结果来调整加筋土的黏聚力,使强度折减法得到的安全系数与其近似相等,这时的黏聚力即为加筋土的等效黏聚力。对六个不同高度的边坡分别计算分析,得到各个边坡的等效黏聚力,结果见表2

表3 不同高度加筋土边坡等效黏聚力计算结果

坡高/m	6	14	20	30	40	45
等效黏聚力/kPa	22	23	23.5	24	28	30

等效黏聚力减去原土体黏聚力即为黏聚力增量,将各个高度边坡的黏聚力增量进行统计,得出如图7图形数据。

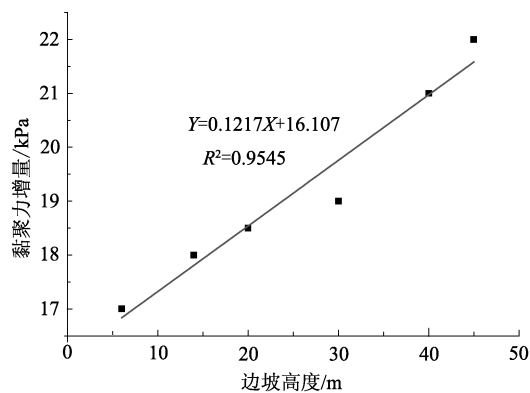


图7 不同高度边坡黏聚力增量拟合曲线

从图中可以看出,黏聚力增量随着边坡的高度增大而增大,其趋势线为:

$$Y=0.1217X+16.107 \quad (11)$$

而根据式(9)、式(10), $\varphi$ 取 $35^\circ$ , $R_f$ 取 $40 \text{ kN/m}$ , $\Delta h$ 取 $0.5 \text{ m}$ ,那么 $\Delta c$ 的计算值为 $20.8 \text{ kPa}$ 。可以知道,强度折减法和理论公式得出来的黏聚力增量有一定差距,主要表现在理论公式所得到的定

值,而强度折减法所得到的粘聚力增量是变化的,说明加筋土的性质随着高度会发生变化,其破坏模式也不单纯是土工格栅拉断破坏。

这里选取 45 m 高加筋土边坡极限平衡结果和采用等效黏聚力法有限元计算结果,见图 8 和图 9:

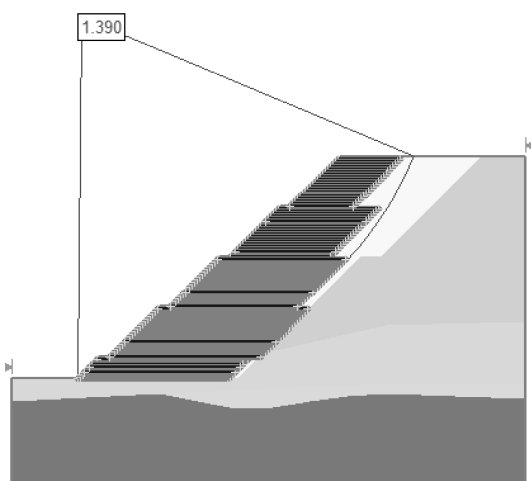


图 8 45 m 高加筋土边坡极限平衡结果

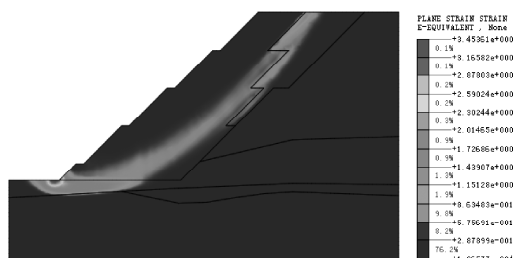


图 9 45 m 高加筋土边坡等效塑性应变云图

可以看出 45 m 高加筋土安全系数为 1.39,满足规范 1.35 的要求。而从有限元计算结果来看,坡脚粉质黏土处出现了较大的塑性应变区,必须对其进行加固处理。在最终的设计方案中,选择了清除坡脚粉质黏土层,同时采用强夯处理基底,并设置了四层格宾石笼,保证坡脚土体的强度。在边坡实际施工过程和结束后,其稳定性都取得了较好效果。

## 5 结论

通过分析加筋土高边坡极限平衡法和强度折减法计算结果,得出以下结论:

1) 强度折减法较极限平衡法可以得出土体的应力应变及潜在滑动面的塑性区域,但其在计算加筋边坡时却产生较大的误差,不能直接用于加筋土的

设计。

2) 根据等效应力法将加筋土体视为一个整体,以新的黏聚力来取代原土体黏聚力,可以实现加筋土的强度折减,得到与极限平衡法较为相近的结果。

3) 相比理论公式计算的黏聚力增量,有限元计算得出的黏聚力增量随着边坡的高度增大而增大,说明加筋土的高度对土工格栅加筋效果具有一定影响,边坡的破坏模式也不单纯为土工格栅拉断破坏。

4) 借鉴有限元计算结果,可以服务于设计,优化方案,并对加筋土的研究提供一种手段。

## 参考文献

- [1] 包承纲. 土工合成材料应用原理与工程实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [2] 杨广庆. 土工格栅加筋土结构理论及工程应用[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [3] 郑颖人,赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报,2005,38(1):91-98.
- [4] 郑颖人,赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(19):3381-3388.
- [5] 胡敏萍. 极限平衡法和有限单元法分析复杂边坡的稳定性[D]. 杭州:浙江大学,2004.
- [6] 刘宗耀,杨灿文. 土工合成材料工程应用手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [7] Yang Z, Singh A. Strength and deformation characteristic of reinforced sand[D]. ASCE Natl Water ResourEng Meet, Los Angeles, CA, USA, 1972.
- [8] 介玉新. 加筋土的等效附加应力法分析及模型试验研究[D]. 北京:清华大学,1988.
- [9] 介玉新,李广信. 加筋土数值计算的等效附加应力法[J]. 岩土工程学报,1999,21(5):614-616.
- [10] 林小谷,宗全兵. 基于 M-C 准则的强度折减法分析边坡稳定性研究[J]. 岩土工程技术,2006,20(5):13-16.
- [11] 刘立鹏,陈奇,张彬. 基于 FLAC 强度折减理论的边坡稳定性研究[J]. 岩土工程技术,2008,22(1):6-10.
- [12] 李鹏飞,谌文武. 基于有限元强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩土工程技术,2009,23(5):223-226.

收稿日期:2015-04-07