

# 植物覆盖下的边坡稳定性分析方法研究

叶建军, 鄢朝勇, 郭声波, 徐福卫

(襄樊学院 土木工程系, 襄樊 湖北 441053)

**摘要:** 近十年来, 边坡生态防护在我国从无到有, 已是蓬勃发展。考虑植物对边坡稳定性的影响, 提出新的边坡稳定性分析方法, 是边坡生态防护事业的迫切需要。在总结前人研究成果的基础上, 提出了一套新的适用于有植被覆盖的沙质土壤边坡的稳定分析方法和步骤。该方法较充分地考虑了边坡植被根系在土中的分布规律和对提高边坡土体抗剪强度的作用, 具有较好的应用前景。

**关键词:** 植被; 生态防护; 边坡; 稳定

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2008)06-0078-04

中图分类号: TD824.7

## Study on Stability Analysis for Solpe Covered with Vegetation

YE Jianjun, YAN Chaoyong, GUO Shengbo, XU Fuxue

(Department of Civil Engineering, Xiangfan University, Xiangfan, Hubei 441053, China)

**Abstract:** In recent ten years, the concept of slope ecological protection has emerged and the relevant practices are booming. It is urgent to develop a new method for analyzing the stability of slope covered with vegetation because the influences of vegetation on the stability of slope have to be considered. Based on the summary of the existed researches, this paper puts forward a new method for stability analysis of sandy soil slope covered with vegetation. As the distribution principle of root in soil and the improvement of soil shearing strength caused by roots are considered in the method, the method could be put into practice in the near future.

**Keywords:** vegetation; ecological protection; slope; stability

近十年来, 边坡生态防护在我国从无到有, 已是蓬勃发展。考虑植物对边坡稳定性影响, 进而提出新的边坡稳定分析方法, 是边坡生态防护事业的迫切需要。传统的边坡稳定性分析无论是用瑞典条分法、毕肖普法等, 还是使用有限单元法、边界元法、离散元法等数值计算方法, 都忽略坡面植被的影响。实际上, 植物, 尤其是植物根系对边坡的稳定性的影响是很大的。本文在总结前人工作的基础上, 提出了有植被覆盖的砂质边坡浅层稳定的方法和步骤。

### 1 植物对边坡的稳定性的影响小结

许多学者研究了植物对边坡的影响作用。Greenway (1987) 较好地总结了植物对边坡的影响<sup>[1]</sup>。植被对边坡的作用可概括为根系的力学效应和植被的水文效应。

#### 1.1 水文效应

(1) 植物枝叶可以拦截雨水, 减少雨水向土壤的入渗量。

(2) 植物根、茎和凋落物可增加地面粗糙度和土壤入渗性。

(3) 植物的蒸腾作用可使土壤丧失水分, 减少土壤孔隙水压力。

(4) 蒸腾作用会造成土壤干裂, 增加土壤的入渗能力。

#### 1.2 力学效应

(1) 根系对土壤的加筋作用, 可以增加土体抗剪能力。

(2) 深根能深入到下层坚硬土层, 对上层土层起到锚固、支撑作用。

(3) 植物自重增加边坡土体载荷, 产生沿滑动面法向和切向分量。

(4) 植物躯干可传递风载荷等给土体。

(5) 根系将约束地表土颗粒, 增加粗糙度, 减轻土壤流失。

对边坡稳定影响最大的是根系对土壤的加筋作用。大量实验证明, 沙土中含有少量的根纤维就能显

著提高沙土的抗剪强度 (Gray and Ohashi, 1983; Mather and Gray, 1990)<sup>[2-3]</sup>。这也被大量实验室和现场实验所证实 (Endo and Tsuruta, 1969; Ziemer, 1981; Riestenberg and Sovonick-Dunford, 1983; Riestenberg, 1994; Nilaweera, 1994)<sup>[4-7]</sup>。

植物对边坡稳定的破坏主要是: 在大风或急流中, 植物 (尤其是树木) 承受的载荷 (Nolan, 1984; Tschantz and Weaver, 1988)<sup>[8]</sup>。极端情况时, 如树木被急流冲倒, 大树被连根拔起等, 对于边坡的破坏是很大的, 有时直接导致边坡失稳, 特别是对小堤坝, 破坏将是毁灭性的。

植物的自重对于边坡的稳定作用是好是坏要根据具体边坡状况而定。边坡的坡度、滑动面的位置和形状、内摩擦角等都会改变其作用性质。因此, 具体到某一特定边坡, 需要做具体的力学分析才能知道植物自重究竟起到何种作用。

植物对边坡的破坏作用可以通过以下的措施加以克服或减小。

- (1) 选择根茎比 (即根的质量与植物躯干质量的比率) 大的植物, 如灌木。
- (2) 选择枝条柔软的物种, 减少风载荷对土体影响。如杨树、柳树。
- (3) 定期对树木进行修剪, 增加根茎比, 减小植物地面植物量和迎风面积。

边坡的破坏按滑动面的深度可以分为深层滑坡和浅层滑坡。考虑到植物根系的影响范围, 本文把滑动面在 2 m 以内的滑坡称为浅层滑坡。论文将主要讨论植物对浅层滑坡的影响, 并且, 忽略植物对边坡的危害, 只考虑植物对边坡稳定的贡献——根系对土壤的加筋作用。由于大量实验成果是建立在沙质土壤上的, 本文的方法和结论适用于沙质土壤的边坡。

## 2 植物根系在沙质土壤中的分布规律

由于根系对氧气的需求, 大部分树根都趋向于集中在土壤表层, 一般地, 树木对土壤的影响范围在 1.5 m 以内, Patric 等 (1965) 在一片火炬松林中做实验证明, 80% ~ 90% 的树根集中在 0.9 m 以内的土层里; 接近地表的树根大部分为水平根, 而 0.9 m 以下的则基本为竖根<sup>[9]</sup>。Watson and O' loughlin (1985, 1990) 通过对一棵树龄为 25 a 的辐射松现场挖掘, 发现, 该树的主要水平根最大延伸距离达 10.4 m, 而竖根的最大延伸达 3.10 m, 但平均深度为 2.4 m<sup>[10-11]</sup>。Shields 和 Gran (1993) 在 Sacramento 河河堤上进行现场实验, 并把树根沿深度的分布, 表示如图 1<sup>[12]</sup>。

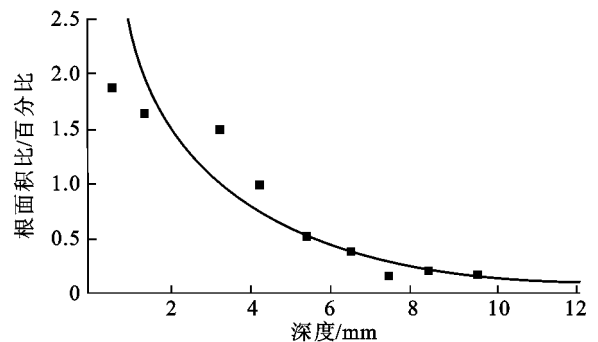


图 1 根系沿深度分布函数图

## 3 植物根系对土体抗剪能力的提高

Ziemer (1981) 在长有松树的沙土上做了原位实验, 实验中, 滑动面上的根直径小于 17 mm<sup>[5]</sup>。他也得到根量与土体抗剪强度大致成直线关系如图 2 所示。

Ziemer (1981) 的实验结果表明, 1 m<sup>3</sup> 土体中含有 1 kg 树根可以提高土体的抗剪强度 3.2 kPa<sup>[5]</sup>。

这些实验结果可以用作估计树根对土体抗剪强度的贡献值。只要知道单位体积土体中树根的含量, 就可以根据上述结果算出树根对土体的抗剪强度的增加值。Nilaweera (1994) 也做了大量现场原地实验, 测出了几种树木的树根抗拉强度并得出了树根随土深度的函数。这些工作也支持了本文的观点<sup>[7]</sup>。

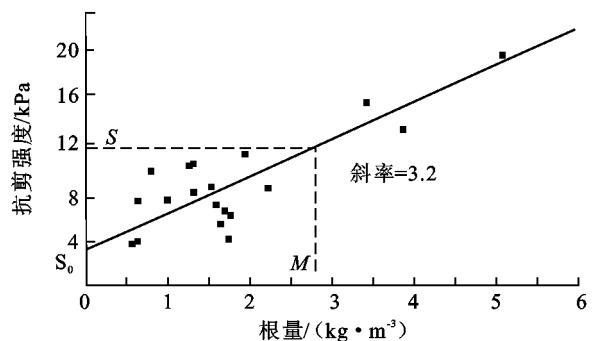


图 2 沙土抗剪强度与根量关系图

## 4 有植被覆盖的边坡浅层稳定分析

浅层滑坡主要发生在风化坡积物的边坡上, 土质呈现沙质特点。这种滑坡一般具有以下几个特点。

- (1) 土壤一般松散, 黏聚力小。
- (2) 诱因一般为暴风雨, 即由于雨水的下渗造成的土壤强度下降和土壤空隙水压力的增加和渗流作用的加强。
- (3) 滑动面为近似平面, 一般位于松散土体与坚硬基础的接触面附近。

(4) 滑动面深度一般小于 2 m。

为方便计算, 利用 Lambe and Whitman (1969) 提出的无限边坡模型 (infinite slope model), 将浅层滑坡问题简化成平面问题<sup>[13]</sup> (图 3)。笔者考虑渗流力的作用和孔隙水应力的作用, 将该模型作了进一步修改, 并与前面的知识配合, 提出了边坡浅层稳定分析方法和步骤。

边坡稳定需满足下式

$$G \sin \theta + J \leq C_s + C_R + \sigma' \sec \theta \tan \phi \quad (1)$$

式中:  $J$  —— 渗流力;  $G$  —— 单位厚度土体重量;  $C_s$  —— 土壤黏聚力;  $C_R$  —— 根引起的黏聚力;  $\phi$  —— 土壤内摩擦角;  $\sigma'$  —— 有效正应力;  $\theta$  —— 滑动面倾角。

显然, (1) 式右边比一般土壤抗剪强度表达式多了一项  $C_R$ , 这被认为是根对土壤强度的贡献值。这一项可以通过做现场原位试验得到。具体步骤如下。首先做现场原位试验, 作出树根沿深度的分布用函数图 (见图 1), 再作出抗剪强度与根量关系图 (如图 2)。此时, 注意将横坐标的单位由  $\text{kg}/\text{m}^3$  转化成根面积比。根据这两个图, 就可以求出  $C_R$ 。如要知道某深度处由根系引起的  $C_R$ , 可以查图 1, 得到在该深度处的根面积比。再由这个根面积比查图 2, 经换算, 这个根面积对应的横坐标是  $M$ , 由图 2 得到图上该点的纵坐标是  $S$ 。则  $S$  与  $S_0$  之差就是  $C_R$ 。

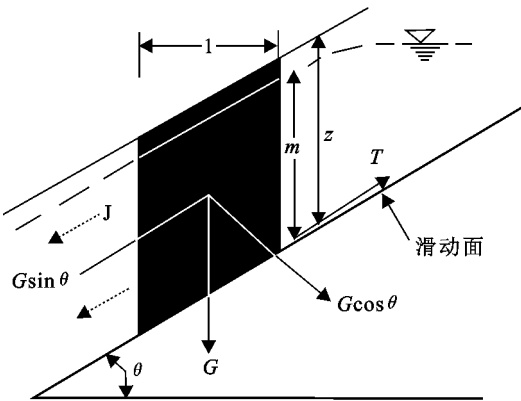


图 3 无限边坡滑动模型

(1) 式中  $J$  是渗流力, 由下式给出

$$J = \gamma_w i A \quad (2)$$

式中:  $i$  —— 水力梯度, 因水顺坡渗流, 等于  $\sin \theta$ ;  $A$  —— 渗流截面积, 等于  $m$ 。

故上式可变形为

$$J = \gamma_w m \sin \theta \quad (3)$$

式(1)中  $G$  由下式给出

$$G = [m \gamma_{sat} + (z - m) \gamma] \cos \theta \quad (4)$$

式中:  $m$  —— 渗流面高度;  $\gamma_{sat}$  —— 土壤的饱和容重;

$\gamma$  —— 土壤容重;  $z$  —— 滑动体厚度;  $\theta$  —— 滑动面倾角。

式(1)中的  $\sigma'$  是滑动面上的有效应力, 它由下式给出:

$$\sigma' = m \gamma' + (z - m) \gamma \quad (5)$$

式中:  $\gamma'$  —— 土壤浮容重。

式(1)中  $C_s$  和  $\phi$  值是土壤的强度参数, 一般通过直接快剪实验得到。

式(1)没有考虑直根的锚固作用和水平根的作用。这对小面积浅层滑坡来说是不合理的。直根锚固作用由于很难事先知道根系的分布情况, 一般不予考虑。但水平根对于小块边坡稳定的影响一般需要考虑。许多学者 (Riestenberg and Sovonick-Durford, 1983) 对水平根的作用问题提出看法<sup>[14]</sup>。综合他们的观点, 可得滑坡临界平衡公式

$$A_b G \sin \theta + J =$$

$$A_b (C_{sb} + C_{rb}) + A_L (C_{sL} + C_{rL}) + A_b \sigma' \tan \phi \quad (6)$$

式中:  $A_b$  —— 滑动面面积;  $A_L$  —— 滑动土体周围表面积;  $G$  —— 单位面积滑动土体的重量;  $\sigma'$  —— 有效正应力;  $\phi$  —— 土壤内摩擦角;  $C_{sb}$  —— 滑动面土体黏聚力;  $C_{rb}$  —— 滑动面上根引起的黏聚力;  $C_{sL}$  —— 滑动土体周围表面的土壤黏聚力;  $C_{rL}$  —— 滑动土体周围表面上因根引起的黏聚力;  $J$  —— 渗流力;  $\theta$  —— 滑动面倾角。

式(6)中的  $A_L$  是指滑动体上方和左右两侧的面积, 其上的土壤黏聚力和根系对滑动体有阻止作用。 $C_{sL}$  和  $C_{rL}$  是滑动体上方和左右两侧的表面上的平均黏聚力。

上式中多个参数如  $\phi$ ,  $C_{sb}$ ,  $C_{rb}$ ,  $C_{sL}$  和  $C_{rL}$  需要做现场原位实验获得。因太复杂, 实际用一般很少使用。一般地, 当滑坡面积大于  $500 \text{ km}^2$  时, 可不考虑周边黏聚力。

把(1)式变形, 表示成安全系数的形式来判定边坡的稳定状况。

$$F_s = \frac{C_s + C_R + \sigma' \sec \theta \tan \phi}{G \sin \theta + J} \quad (7)$$

分析步骤: 利用(7)式分析边坡稳定性一般有如下几个步骤。假定滑动面平行于坡面, 即  $\theta$  等于边坡坡度。

(1) 做现场原位实验, 确定植物根系随土壤深度分布图线, 即图 1。

(2) 做现场直剪实验, 确定土壤抗剪强度的提高与根面积比的关系曲线, 即图 2。

(3) 做实验室实验, 确定土壤的  $\gamma$ ,  $\gamma'$ ,  $\gamma_{sat}$ ,  $C_s$  和  $\phi$  值。

(4) 现场确定地下水位。

(5) 任选取一滑动面深度  $z$ , 通过查植物根系随土壤深度分布图, 确定根面积比  $A_R/A$  的值。

(6) 根据  $A_R/A$  的值, 查土壤抗剪强度的提高与根面积比的关系图线, 得  $\Delta s$ , 即为  $C_R$ 。

(7) 利用第 3, 4, 5 步结果, 代入式(4) 求出  $G$ 。

(8) 利用第 4, 5 步结果, 代入公式(3), 求  $J$ 。

(9) 将上述步骤求出的  $C_S, C_R, \phi, G, J$  以及  $\theta$  代入公式(7), 即得滑动面深度为  $z$  的安全系数  $F_S$ 。

(10) 新选取一个  $z$ , 重复(5), (6), (7), (8), (9) 步骤, 得到一个新的  $F_S$ 。多次重复, 比较所有的  $F_S$ , 最小的一个即为边坡的稳定系数。

上述步骤适用于事先不知道滑动面位置的边坡稳定分析, 对于已知滑动面位置的边坡, 只需进行(1) —(9) 步即可。

尽管有上述量化分析方法, 由于有植物覆盖的边坡的稳定问题是很复杂的, 上述分析也基本是近似估计。原因主要有以下几点。

(1) 现场原位实验得到植物根系随土壤深度分布图线只是近似曲线。这主要是由于挖掘和测量的难度造成的。另外, 用某一位置得到曲线代替整个边坡的根系分布规律, 难免有出入。

(2) 上述方法没有考虑根系的锚固作用。

(3) 根面积比与土壤抗剪强度提高的关系曲线也只是近似描述。

(4) 选取的计算模型是理想模型, 与实际的差别较大。

尽管如此, 上述计算方法对于评价植物对边坡稳定影响有积极作用, 值得应用和推广。

## 5 结语

定量地考虑植物对边坡稳定性的影响, 并设计出方便使用的有植被覆盖的边坡稳定分析方法和步骤, 是近年来边坡生态防护事业蓬勃发展的迫切需要, 希望本文能起到抛砖引玉的作用, 吸引国内更多同行参与进来, 以便早日完善边坡生态防护工程中稳定分析理论体系。

### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] Gray D H, Ohashi H. Mechanics of fiber reinforcement in sands [ J ]. Journal of Geotechnical Engineering

( ASCE ), 1983, 109(3): 335—353.

- [ 2 ] Patric J H, Helvey J D, et al. Soil water absorption by mountain and piedmont [ J ]. Forests Soil Science of America proceedings, 1965, 29: 303—308.
- [ 3 ] Endo T, Tsuruta T. The effect of tree roots upon the shearing strength of soil [ R ]. Annual Report of the Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station, 1969, 18: 168—179.
- [ 4 ] Greenway D R. Vegetation and Slope Stability [ M ] // Slope stability, edited by M. G. Anderson and K. S. Richards. New York: Wiley, 1982.
- [ 5 ] Maher M, Gray D H. Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers [ J ]. Journal of Geotechnical Engineering ( ASCE ), 1990, 116 ( 11 ): 1661—77.
- [ 6 ] Nilaweera N S. Effects of tree roots on slope stability: the case of Khao Luang Mountain area, so. Thailand. Dissertation No. Gt- 93- 2 [ D ]. Thesis submitted in partial fulfillment of requirements for degree of Doctor of Technical Science, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, 1994.
- [ 7 ] Rensterberg M M. Anchoring of thin colluvium by roots of sugar maple and white ash on hillslope in the Cincinnati [ R ]. US Geological Survey Bulletin 2059- E, U. S. Government Printing Office, Washington, DC, 1994.
- [ 8 ] Shields F D. Woody vegetation and riprap stability along the Sacramento River mile 84. 5 to 119 [ J ]. Water Resources bulletin, 1991, 27(3): 527—536.
- [ 9 ] Shields F D, Gray D H. Effects of woody vegetation on the structural integrity of sandy levees [ J ]. Water Resources Bulletin, 1993, 28(5): 917—931.
- [ 10 ] Tschantz B A, Weaver J D. Tree growth on earth dams: A survey of state policy and practice [ R ]. Civil Engineering Department, University of Tennessee, 36.
- [ 11 ] Watson A J, O' loughlin C L. Morphology, strength and biomass of Manuka roots and their influence on slope stability [ J ]. New Zealand Journal of Forestry Science, 1985, 15(3): 337—348.
- [ 12 ] Watson A J, O' loughlin L C. structural root morphology and biomass of three age classes of *Pinus radiata* [ J ]. New Zealand Journal of Forestry Science, 1990, 20(1): 97—100.