

溜砂坡工程固砂机理简析

阙云¹, 王成华²

(1. 同济大学 道路与机场工程系, 上海 200092; 2. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 对溜砂坡中注浆工程固砂和生物工程固砂力学机理进行了阐述。花管注浆本身竖向浆柱和侧向浆脉可起锚固效应, 相邻浆柱间可起土拱效应; 生物工程的植被深根可起锚固效应, 盘结的浅根能起加筋效应。以上 2 种工程措施的有机结合, 将发挥各自的优势, 从而达到对溜砂坡标本兼治的效果。最后对川藏公路中坝段溜砂坡的整治措施作了简单的描述。

关键词: 溜砂坡; 固砂机理; 注浆工程; 生物工程

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2006)06-0044-04

中图分类号: S288

A Brief Analysis of Mechanism of Sand Fixation on Sand-sliding Slope

QUE Yun¹, WANG Cheng-hua²

(1. Department of Highway & Airport Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, Sichuan Province, China)

Abstract: This paper describes the mechanism of sand fixations by grouting engineering and biological engineering. The grouting veins formed by pipe-grouting act as anchors, and adjacent grouting columns work like soil arches. The deep roots resulted from biological engineering act as anchors, and voluminous flat roots present a reinforcement effect. The authors consider that the combination of civil engineering measures with biological engineering measures can make the best of respective advantages, and thus achieve the effect of managing both its root cause and symptoms. Finally, countermeasures on No. 13 sanding-sliding slope in Zhongba section of the Sichuan-Tibet highway are briefly discussed.

Keywords: sand-sliding slope; mechanism of sand fixation; grouting engineering; biological engineering

目前溜砂坡防治工程可分为挡砂工程(如挡砂墙等), 排砂工程(如渡砂槽、棚碛等)以及固砂工程(如注浆工程、生物工程等)3 大类^[1]。从防治角度来说, 挡砂工程与排砂工程属于消极的防治措施, 固砂工程属于积极的防治措施, 可以从根本将砂源区固住, 从而稳定整个砂坡, 达到标本兼治的效果。固砂工程可以分成土木工程措施和生物工程措施两大类。两者各有优势, 可以互相补充。本文对注浆工程和生物工程有关固砂机理作初步探讨, 然后对其在具体工程中的运用作简单描述。

1 注浆工程固砂机理

1.1 基本构想

溜砂坡失稳很大原因是由于基本组成成分为散体, 黏粒含量较少, 若能改变其组成成分(如增加黏粒成分), 则黏聚力势必增大的趋势, 从而能使天然休止角增大, 进而稳固砂坡。从表 1 可以看出: C 值随黏粒的增加而有较大的增幅; φ 值的减幅不大。因

此, 向砂坡内掺入一定比例的黏土含量或水泥浆液, 可以提高砂粒的抗剪强度, 从而使砂坡稳定。

1.2 力学原理简析

花管注浆产生的侧向浆脉能起到侧向锚固效应(如图 1), 本身的竖向浆柱能达到竖向锚固效应, 并且相邻的浆柱间还能产生土拱效应。

1.2.1 斜向锚固效应 如图 2, 设砂坡倾角为 θ , 浆脉长 L , 平均直径为 \bar{d} , 与水平方向夹角为 α , 左端距离砂坡面为 H , 现取微元体 dx , 距离左端为 x , 则微元体所能提供的最大抗拔力为:

$$dT = \gamma \cdot (H + x \cdot \sin \alpha + x \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \theta) \cdot \pi \cdot \bar{d} \cdot f \cdot dx \quad (1)$$

由此得整个浆脉所能提供的最大水平抗拔力为:

$$T_j = \int_0^L dT = \gamma \cdot f \cdot \pi \cdot \bar{d} \cdot [HL + L^2(\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \theta)/2] \quad (2)$$

1.2.2 竖向、水平总锚固力 设一花管注浆, 形成 1 条竖向浆脉, n 条斜向浆脉, 则竖向与水平总锚固力:

表 1 黏粒含量对砂土强度参数的影响

| 试验样品状态 | 不同粒径颗粒组成百分比/% | | | | | | | | | 抗剪强度(快剪) | |
|----------|---------------|------|-------|----------|------------|------------|-----------|------------|---------|------------------------------|-----------------|
| | 砾粒/mm | | 砂粒/mm | | | 粉粒/mm | | | 黏粒/mm | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 内聚力 $C/$ kPa |
| | > 20 | 20~2 | 2~0.5 | 0.5~0.25 | 0.25~0.074 | 0.074~0.05 | 0.05~0.01 | 0.01~0.005 | < 0.005 | | |
| 原样 | 0 | 18.4 | 39.1 | 29.7 | 6.2 | 2.2 | 2.7 | 0.6 | 1.1 | 30.8 | 0.7 |
| 加 5% 黏粒 | 0 | 18.0 | 36.5 | 28.0 | 5.8 | 3.5 | 4.4 | 1.8 | 2.0 | 33.7 | 2 |
| 加 10% 黏粒 | 0 | 16.4 | 36.1 | 26.7 | 4.2 | 4.7 | 5.5 | 3.1 | 3.3 | 32.5 | 3 |
| 加 15% 黏粒 | 0 | 14.4 | 35.1 | 25.7 | 3.2 | 6.2 | 6.7 | 4.6 | 4.1 | 29.5 | 6 |

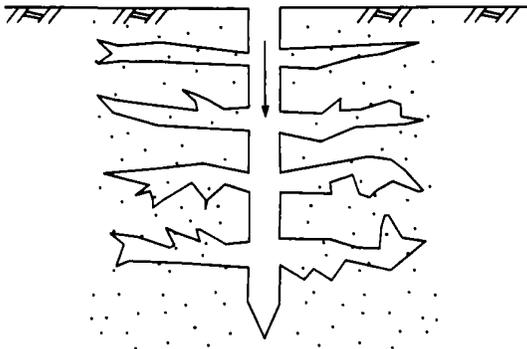


图 1 注浆工程锚固效应示意图

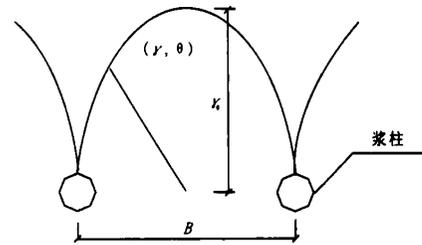


图 3 土拱效应示意图

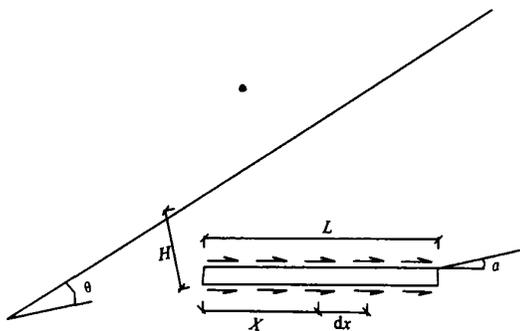


图 2 注浆工程斜向锚固示意图

$$T_{\text{竖向}} = \lambda \sum_{j=1}^{n+1} T_j \cdot \sin \alpha_j \quad (3)$$

$$T_{\text{水平}} = \zeta \sum_{j=1}^n T_j \cdot \cos \alpha_j \quad (4)$$

式中: λ, ζ —— 考虑群锚效应的水平、竖向折减系数, 可通过试验得到。

1.2.3 土拱效应 砂体在自重作用下以浆柱为依托, 在两柱之间形成平衡拱(图 3), 此时平衡拱轴线的方程式为^[2]:

$$(\gamma_0 - \gamma \cos \theta) \cdot B \cdot \text{tg} \varphi / 2\lambda - 0.5 \cdot \gamma^2 \cdot \sin^2 \theta = 0 \quad (5)$$

$$\gamma_0 = 0.25 \cdot \lambda \cdot B \cdot \text{ctg} \varphi / \cos \epsilon \quad (6)$$

式中: γ_0 —— 平衡拱的矢高; γ —— 计算点的向量半径; θ —— 计算点的向量角; B —— 平衡拱的跨长, 即两柱间距; φ —— 砂体内摩擦角; ϵ —— 柱体与垂直线的倾角; λ —— 修正系数, 取 $\lambda = 1.22 + 0.00896\varphi$ 。

2 生物工程固砂机理

2.1 基本原理

生物工程固砂是利用植物根系对砂坡表部砂土进行加固, 其基本原理如下。

(1) 根系在土体内生长时, 根尖要向四周砂体产生轴向压力, 使剪胀力和摩擦力增加。

(2) 砂体中的颗粒与根表接触, 对加大根系与土间的摩擦力有利。

(3) 根系本身的抗拉、抗剪和抗压缩力大于土体许多倍。

(4) 根系在生长过程中分泌一些化学物质, 有助于土壤颗粒的胶结。

2.2 力学原理简析

植物深根伸入砂坡深部, 因而具有锚固效应; 由于浅根大量存在于砂坡表部, 因而具有加筋效应。

2.2.1 锚固效应 如图 4, 由于砂层的剪切作用, 原本竖直方向的根偏离竖直方向一个角度, 此时根受拉力作用。鉴于根本身抗拉力远大于根在砂中的抗拔力, 故只要根与砂体间的摩擦力足够大, 根就不会被拔出, 锚固效应也能体现出来。解明曙采用全株根系抗拔试验法测定根土之间的综合静摩擦系数, 进而得到根对土体抗剪强度的增量^[1]:

$$\mu = \frac{P_{\text{max}} - W_f}{\gamma_s \cdot M \cdot 2\pi r_m \cdot Z_m} \quad (7)$$

式中: P_{max} —— 全株根系被拉至松动的拉力

(kN/m); W_f ——树木根重干重的和 (kN/m); γ_s ——土体容重(kN/m); M ——总根数; Z_m ——根系分布最密处的水平面至地面的距离 (m); r_m ——根据根系分布规律计算的根系半径(m)。

2.2.2 加筋效应 植物的浅根的错综盘结,在砂坡中可视为加筋材料。加筋产生 2 种效果^[3]:一是增加砂土的黏聚力 c ,但内摩擦角 φ 将保持不变;还有就是增加砂土的侧向应力 $\Delta\sigma_3$,反映在摩尔圆中如图 5。

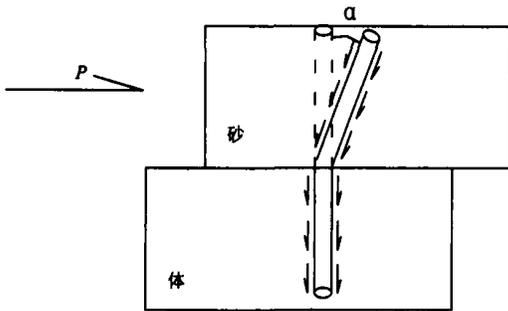


图 4 根系锚固效应示意图

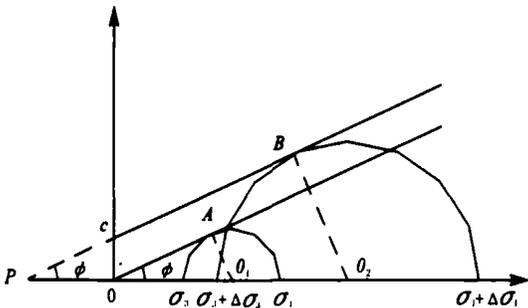


图 5 植物浅根加筋作用的应力摩尔圆

根据图 5 中的几何关系可得:

$$\frac{OO_1}{PO_2} = \frac{O_1A}{O_2B} \quad (8)$$

即

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \Delta\sigma_1 - \sigma_3 - \Delta\sigma_3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\sigma_1 + \Delta\sigma_1 + \sigma_3 + \Delta\sigma_3 + 2c \cos \varphi} \quad (9)$$

由式(9)可得:

$$c = \frac{\sigma_3 \Delta\sigma_1 - \sigma_1 \Delta\sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \tan \varphi \quad (10)$$

根据摩尔—库仑准则得:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (11)$$

对于砂性加筋材料,式(10)可表示为:

$$\sigma_1 + \Delta\sigma_1 = (\sigma_3 + \Delta\sigma_3) \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \quad (12)$$

把式(10)代入式(12)中得:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) + \Delta\sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$$

$$c = \frac{\sigma_3 \Delta\sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) - \sigma_1 \Delta\sigma_3}{2\sigma_3 \tan(45^\circ + \varphi/2) + (\sigma_1 - \sigma_3) \cot \varphi} \quad (13)$$

比较式(11)与式(13),可得出 c 值的另一种表达方式:

$$c = \frac{\sigma_3 \Delta\sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) - \sigma_1 \Delta\sigma_3}{2\sigma_3 \tan(45^\circ + \varphi/2) + (\sigma_1 - \sigma_3) \cot \varphi} \quad (14)$$

3 2种固砂工程的关系

3.1 2种固砂工程的强度与时间关系

注浆工程措施与生物工程措施对溜砂坡的治理各有所长,注浆工程一般在修建初期,对于保持砂坡稳定性方面效果十分显著,然而随着时间的推移,砂浆强度将逐渐降低。生物工程则与此相反,开始时作用十分薄弱,但随着植物的不断生长与繁殖,强度将逐渐增加,对保持砂坡的稳定性和减少坡面侵蚀的作用就越来越大。一般说来,随着生物工程所起的作用逐渐增强,注浆工程与生物工程共同作用能长时间维持一定强度,使工程使用寿命得到延长。因此,只要 2 种措施能较好的结合,就能优势互补,达到较理想的长期效应。

3.2 两种固砂工程的局限性

注浆固砂工程的深度可达几十米,对深层砂土能起到很好的锚固效应与土拱效应,因此对深层砂土的稳定能起到很好的效果,而对浅层砂土特别是表部砂土的作用就有限。生物工程中盘结的植被根系可以吸收和蒸发坡体内的水分,降低土体的孔隙水压力,提高砂土的抗剪强度。另外植物能控制地表径流与削弱雨滴的溅蚀,并较大程度减缓风蚀,能有效控制砂粒流流失。生物工程因而能够产生较好的固砂效果。但由于受植物根系深度的限制,对于浅层的砂土能够起到较好的效果,对深层的砂土的效果就有限。一般认为,生物工程对于 2.5 m 范围内的砂土加固效果好^[4]。因此,这 2 种固砂工程各有所长,两者的有机结合,将发挥各自优势,从而达到标本兼治的效果。

4 工程实例

4.1 基本特征

川藏公路中坝段 No.13 溜砂坡位于西藏波密县冬茹弄巴沟东南 3.1 km 处,帕隆藏布江右岸,公路里程桩号为 K3924+480~K3924+840。公路外侧紧靠河床,为江水直冲段。公路外侧建有钢筋石笼和圆木框架石笼挡水墙,高 6 m,有 3 处已冲坏。公路内侧有高 2.5 m 的挡砂护坡墙。后山为高近 200 m 的

花岗岩陡崖,呈微风化状,岩坡还长有许多小树、灌木,已无明显的产砂和坍塌现象。陡崖脚为老溜砂坡,宽100m,长满树和灌丛。靠公路边,因公路开挖拓宽,引起70~100m的砂坡坍塌溜动。砂坡由中、粗砂夹较大岩块组成。2001年砂坡中上部发生一次较大溜砂,近万方砂夹块石向公路溜滑,推垮挡砂墙60m,近千方砂、块石堆在公路阻断交通2d,现约有8000m³的砂夹块石仍堆在砂坡中下部。

4.2 防治措施

(1) 鉴于砂坡中、下部大块危石太多,所以首先清除砂坡的大块危石。

(2) 因砂坡下部太松散,所以需进行深部固砂处理,在原挡砂墙内侧布设6排微型花管树根桩,排距桩间距均为1m,梅花型排列。

(3) 砂坡严重段有60m长,可选用抗滑挡砂棚方案,其余可采用加高原挡砂墙方案,原挡砂墙高2.5m,加高到5m。

(4) 加高后的挡砂墙高5m满足不了抗倾覆稳定性的要求,所以还应对挡砂墙进行加固处理,可采用锚杆挂网喷护混凝土措施。

(5) 坡面基本稳定,不发生溜砂后,应立即实施格梁锚杆植被护坡工程,护坡的宽度20m左右,其余自然恢复植被。

以上防护措施见剖面示意图(图6)。

5 结论与建议

固砂工程作为溜砂坡防治措施的一种,本文对其力学机理作了初步的探讨,得出以下结论。

(1) 注浆工程本身的竖向浆柱可起锚固效应,相邻浆柱间可起土拱效应,产生的侧向浆脉也起锚固效

应,有利于砂坡深部稳定。

(2) 生物工程的植被深根可起锚固效应,盘结的浅根能起加筋效应,有利于砂坡浅部稳定。

(3) 2种固砂措施各有优缺点,有机结合能使溜砂坡得到标本兼治的效果。

(4) 鉴于生物工程需在砂坡停止溜砂后进行,因此溜砂坡的治理可以分两期进行:先实施土木工程,待到停止溜砂后实施生物工程。

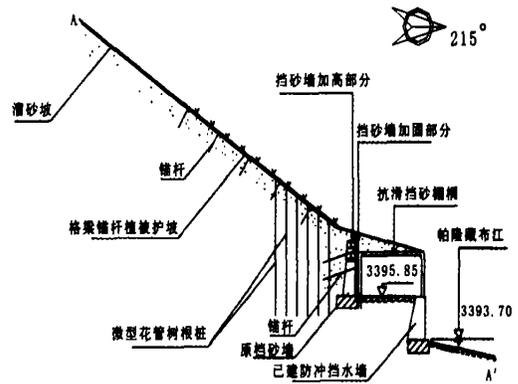


图6 溜砂坡防护措施剖面示意图

[参 考 文 献]

- [1] 王成华,梁光模,张小刚,等.川藏公路中坝段溜砂坡发生机理与防治关键技术示范研究报告[R].2003.60—88.
- [2] 邹越强,李彬.树根桩防治滑坡的研究[J].合肥工业大学学报,1994,17(1):120—124.
- [3] 张俊云,周德培,李绍才.高速公路岩石边坡绿化方法探讨[J].岩石力学与工程学报,2002,21(9):1400—1403.
- [4] 吴积善,王成华,程尊兰.中国山地灾害防治工程[M].北京:科学出版社,1997.220—221.
- [5] 阙云,王成华,程尊兰.川藏公路中坝段溜砂坡发生机理与防治关键技术示范研究报告[R].2003.60—88.
- [6] 邹越强,李彬.树根桩防治滑坡的研究[J].合肥工业大学学报,1994,17(1):120—124.
- [7] 张俊云,周德培,李绍才.高速公路岩石边坡绿化方法探讨[J].岩石力学与工程学报,2002,21(9):1400—1403.
- [8] Kirkby M J, Bracken L J, Shannon J. the influence of rainfall distribution and morphological factors on runoff delivery from dryland catchments in SE Spain[J]. Catena, 2005, 62: 136—156.
- [9] Salles C, Poesen J, Daniel. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity[J]. Journal of Hydrology, 2002, 257: 256—270.
- [10] Horvath S. spatial and temporal patterns of soil moisture variations in a sub-catchment of River Tiszq[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27: 1051—1062.
- [11] 余建英,何旭宏.数理统计分析 with SPSS 应用[M].北京:人民邮电出版社,2003.257—276.
- [12] Ruyschaert G, Poesen J, Verstraeten G, et al. Inter-annual variation of soil losses due to sugar beet harvesting in West Europe[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 107: 317—329.
- [13] Ruyschaert G, Poesen J, Verstraeten G, et al. Soil losses due to mechanized potato harvesting[J]. Soil & Tillage Research, 2005, in press.
- [14] 杨玉海,蒋平安,艾尔肯,等.种植苜蓿对土壤肥力的影响[J].干旱区地理,2005,28(2):248—251.
- [15] Sillon J F, Richard G, Cousin I. Tillage and traffic effects on soil hydraulic properties and evaporation[J]. Geoderma, 2003, 116: 29—46.

(上接第23页)