

SNS 主动防护条件下边坡绿化及稳定性探讨

罗阳明¹, 雷承弟², 周德培¹, 杨涛¹

(1. 西南交通大学 岩土工程系, 四川 成都 610031; 2. 中国水电顾问集团 成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 主动 SNS 为一种开放式的防护方法, 其安装方便快捷, 施工简单, 防护效果好, 已经在国内多处水电、交通、矿山等领域得到广泛应用。主动 SNS 也给植被防护提供了很大的空间, 但由于条件所限, 国内将主动 SNS 与植被恢复相结合的实例并不多, 相关方面的研究也较少。简要地介绍了现阶段边坡绿化的主要方法, 讨论主动 SNS 与植被恢复相结合的方法。此外, 还讨论主动 SNS 与植被共同作用下边坡的稳定性, 并提出一种简化的计算模型用以验算边坡安全系数。最后, 用一个工程实例对所提出的模型进行验算。

关键词: 边坡工程; 柔性防护系统; 边坡稳定性; 绿化; 植被护坡

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)02 - 0235 - 06

DISCUSSION ON VEGETATION METHODS AND STABILITY OF SLOPES REINFORCED BY SNS ACTIVE PROTECTION SYSTEM

LUO Yang-ming¹, LEI Cheng-di², ZHOU De-pei¹, YANG Tao¹

(1. *Department of Geotechnical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China*; 2. *Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, China Hydropower Consulting Group, Chengdu, Sichuan 610072, China*)

Abstract: SNS(safety netting system) active protection is an open system to reinforce slopes. Considering its merits—easy to install, high efficiency, low cost and artistic effect on slopes, it has been widely used in many fields of domestic industries, such as hydropower station, civil transportation and mining engineering. Though the feasibility of combining herbage protection with the SNS active system does exist, few practical engineering using this method were put into effect. The study on this issue is also scarce. In this paper, the authors summarize the conventional ways to afforest slopes, discuss the feasibility of combining SNS active system with slope vegetation, and suggest that three vegetation ways can be used to the slopes reinforced by the SNS active system. The authors also advise proper amendment of these vegetation ways. A new method of evaluating the stability of the slope protected by the flexible active protection system is put forward. The reinforcing effect of slope protection with herbage at shallow layer is demonstrated; a simplified geometrical model to simulate the situation of the slope is proposed, from which formulas used to calculate safety factor can be deduced; and a practical engineering slope is used to testify the formulas. The results show that the formulas are applicable. The following conclusions can be drawn as follows: (1) the SNS active protection can successfully reinforce slopes; (2) the SNS-herbage protection overcomes the inconvenience of traditional ways to reinforce slopes, improves the effect of the vegetation, and becomes a developing method with ecological and social benefits. So, the SNS combined with herbage protection is recommended.

Key words: slope engineering; flexible protection system; slope stability; vegetation; herbage protection

收稿日期: 2005 - 08 - 21; **修回日期:** 2005 - 09 - 30

作者简介: 罗阳明(1979 -), 男, 2000年毕业于西南交通大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事边坡绿化及稳定性方面的研究工作。E-mail: ymluo2@163.com.

1 引言

SNS(safety netting system)是瑞士布鲁克公司开发研制的一种边坡防护系统，它是利用钢丝(绳)作为主要构成部分来防护崩塌落石危害的柔性安全防护系统。该系统包括主动系统和被动系统两大类型。主动系统是通过锚杆和支撑绳固定方式将钢丝(绳)网覆盖在有潜在崩塌落石灾害的坡面上，阻止塌落石发生和限制崩岩活动范围，防止落石危害；被动系统是一种能够拦截和堆存崩岩的金属柔性栅栏式拦石网，以具有足够高强度和柔性的钢丝(绳)网为主体，以最少量的锚杆和最少量的开挖来实现最快速的施工安装。

主动 SNS 自 1995 年引入中国以来，已经在多处工程边坡中得以应用，并且取得较好的防护效果。不少与 SNS 相关的资料^[1~10]都显示：主动 SNS 为恢复坡面的植被创造了良好条件，可进行人工植被绿化。尽管如此，由于资金、技术等条件限制，国内相当一部分采用主动 SNS 进行防护处理的坡面都未进行专门的植被恢复，相关方面的研究也较少。本文结合现有的边坡植被恢复技术，讨论适用于在主动 SNS 条件下边坡绿化的方法，分析了各种绿化方法在实际动用中需要进行改进的地方，并对边坡在主动 SNS 加固和植被防护的条件下的稳定性进行了初步的探讨。

2 主动柔性防护的加固原理及特点

主动柔性防护系统是通过锚杆和支撑绳以固定的方式将钢绳网盖在坡面上，从而实现主动防护的

目的。

主动 SNS 布置如图 1 所示。它的机制是通过固定在锚杆或支撑绳上并施以一定预张拉的钢丝(绳)网，以及在用作风化剥落溜坍或塌落防护目的中抑制细小颗粒撒落或土体流失时辅以金属格栅网或土木格栅，对整个边坡形成连续支撑，其预张拉作业使系统紧贴坡面并形成了局部岩坡或土体移动或在发生细小位移后将其裹缚于原位附近的预应力，从而实现其主动防护的功能。该系统在作用原理上类似于喷锚支护和锚钉墙等面层护坡体系，然因其柔性特征能使系统将局部岩土体中下滑力向四周均匀传递以充分发挥整个系统的防护能力，从而使系统承受力提高。

与圬工结构为代表的传统方法相比，主动 SNS 具有柔性和高强度，更适用于抗击集中荷载或高冲击荷载(限于被动系统)。该系统安全可靠，施工作业具有快速和标准化的特点。此外，该系统设置后视觉干扰较小，可最大限度地维持原地貌和植被，美化环境，其在环保方面的社会效益是其他方法所无法比拟的。

3 主动 SNS 适用的绿化方法

3.1 现有绿化方法简介

目前我国岩石边坡工程中进行植被恢复的方法主要有以下 4 类方法：第 1 类是客土植生，其做法是首先在岩石边坡层面营造一定的带养份的有机土层，在此基础上对岩石边坡进行植被恢复。这些方法包括：(1) 植草皮护坡；(2) 植生带护坡；(3) 香根草护坡；(4) 液压喷播植草绿化；(5) 挖沟植草绿化；(6) 有机基材喷播绿化。第 2 类是土工材料绿

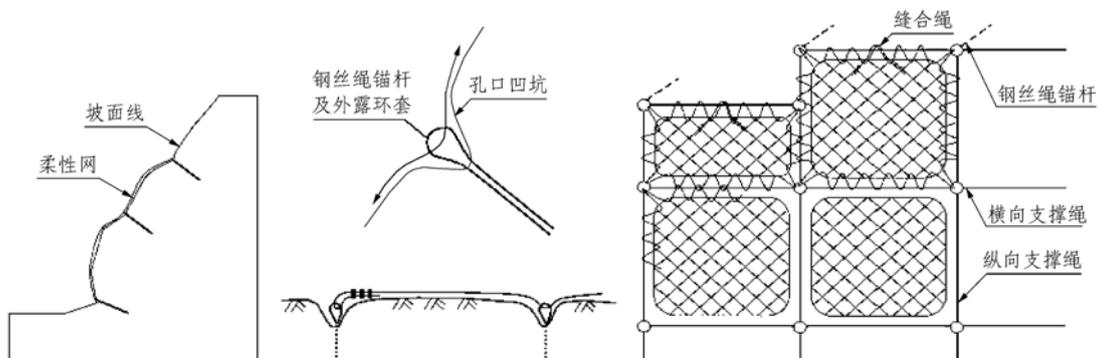


图 1 主动 SNS 布置图

Fig.1 Sketch map of SNS active protection system

化。这类方法是先在坡面上垫上一层土工材料，然后再将含有养份和草种的复合材料喷附到坡面上。土工材料绿化方法主要有：(1) 挂三维网喷播植草绿化；(2) 土工格栅植草绿化；(3) 土工格室植草绿化。第3类是框格客土绿化，其原理与第2类方法相似，主要的不同就在于它采用混凝土框架梁等圬工结构在坡面上做出可容纳客土的空间，在框架内填土再进行植被恢复。这些方法包括：(1) 钢筋混凝土骨架内填土反包植草绿化；(2) 钢筋混凝土骨架内加筋填土植草绿化；(3) 钢筋混凝土骨架内加土工格室植草绿化；(4) 浆砌片石框格植草护坡；(5) 锚索格子梁植草护坡。第4类就是种植攀爬或垂吊植物为主垂直绿化。

3.2 现有绿化方法对主动 SNS 的适用性分析

在第1类的绿化方法当中，植草皮护坡和植生带护坡这两种方法一般情况下只应用于坡率应缓于1:1的边坡。铺草皮以后要维持草皮的正常生长，除了后期养护外，还需要足够的土壤来保水和保肥，因此，这种方法仅适合于边坡坡面有一定厚度土壤的情况，对中等强度风化的岩性边坡不适用。此外，由于坡面上已经加一层钢丝网，铺上去的草皮不能贴紧坡面，很容易产生“离析”的现象，因而就无法保证植物的根系的正常生长。加之新铺的草皮和植生带容易遭受各种灾害，如病虫害、缺水、缺肥等，前期管理难度较大；后期浇水、追肥、除虫等工作要及时跟上，而主动 SNS 常用在偏远山区，后期养护工作难以做到，因此，采用主动 SNS 的边坡不宜用这两种方法进行植被恢复。对于香根草护坡和挖沟植草绿化这两种方法，要进行植被恢复首先也都要也要保证原坡面上有一定厚度的土层，并且还要在坡面上开挖一定宽度与深度的沟槽。考虑到现场的条件限制及施工的难度，这两种方法对主动 SNS 经常进行防护的硬质岩边坡显然是不实用的。液压喷播植草绿化与有机基材喷播绿化这两种方法的区别主要在于营造有机土壤层的方式不一样。液压喷播植草绿化主要运用在较缓的边坡，需要原坡面有一定的土层，在一些强风化的坡面也可以运用这种方法。而有机基材喷播绿化方法可以运用在裸露的高陡岩石坡面上，它给坡面营造一层10 cm左右的土壤层，足以让不少草本植物正常生长。由于两者都是通过液压将含有草种的营养混合物喷坡面上，坡面上的主动 SNS 的防护网不会对方法化

产生不利的影晌。在实际工程中，由于直接液压喷播绿化在强风化岩石边坡绿化效果不是很好，因而推荐有机基材喷播方法对边坡进行绿化。

对于第2类方法，其基本原理是相同的：用三维植被网或土工格栅将喷播于坡面的肥料与种子固定，便于植物的生长。三维网内可填种植土和草籽，具有防冲刷和有利于植物生长的两大功能。因为该系统要求在用于防止细碎岩土体剥落时也需要安装铁丝格栅或三维土工网垫，因而可以直接结合主动 SNS 同步安装。但此类绿化方法只适用于坡率为1:1以下强风化岩石坡面，因而实用范围也不是很广。

一般情况下，第3类绿化方法很少与主动 SNS 配套使用。因为这类方法的前提就是要先在坡面是搭筑各类的圬工防护体，如：钢筋混凝土骨加、浆砌片石框格、锚索格子梁等。若已经采用 SNS 主动系统对边坡进行加固，从经济及时间等各方面考虑，不太可能再采用这些方式对边坡进行加固。

第4类方法是指栽植攀援性和垂吊性植物，用以遮蔽坡面或混凝土及圬工砌体表面，达到绿化和美化环境的目的。不少采用主动 SNS 的边坡都比较陡峭，有的坡率甚至在1:0.3以上。在这么陡的边坡上，其他的绿化方法很难达到较好的绿化效果，采用垂直绿化不失为一种不错的选择。主动 SNS 使整个坡面为钢丝网所覆盖，而这些钢丝网所形成的框架为攀援植物提供了一个很好的平台，它们的茎会长出许多卷须，抓住钢丝网，向上攀援。

从上面的分析可知，可以与主动 SNS 结合对坡面进行植被恢复的绿化方法主要有：(1) 有机基材喷播绿化；(2) 挂三维网植草绿化；(3) 垂直绿化。

4 SNS 主动系统与植被共同作用下边坡的稳定性分析

用植被对边坡进行措施防护具有比较独特而良好的防护效益、景观效益和经济效益。但客观而言，单纯利用植被防护的初期效果要差一些，因为由于生物在生长初期时根系发育有限，难以迅速充分地同表层土壤有效结合，形成抵御雨水冲刷的防护面；其次，纯生物护坡存在着易受强降雨或常年坡面径流的冲蚀而形成沟槽的问题，因此，可将植被的防

护系统与主动 SNS 相结合，形成一种新型的柔性防护系统。该系统不仅可以承受较大的下滑力，同时也可植物配套实现植被防护，使植物根系的固土作用与坡面防护系统结为一体，从而起到抑制坡面破坏和水土流失。

4.1 植物根系加筋作用的定性分析

由草本植物根系的分布特征可知，根系在土中分布的密度自地表向下逐渐减小，逐渐细弱。在根系盘结范围内，边坡土体可看作由土和根系组成的根-土复合材料，草本植物的根系如同纤维的作用，因此可按加筋土原理分析边坡土体的应力状态，即把土中草根的分布视为加筋纤维的分布，且为三维加筋。这种加筋为土层提供了附加“黏聚力” Δc ，它使原土体的抗剪强度向上推移了距离 Δc ，同时又因限制了土体的侧向膨胀而使 σ_3 增大到 σ'_3 ，在 σ_1 不变的情况下使最大剪应力减小，这两种作用使边坡土体的承载能力提高。根系对土层的加筋作用如图 2 所示。

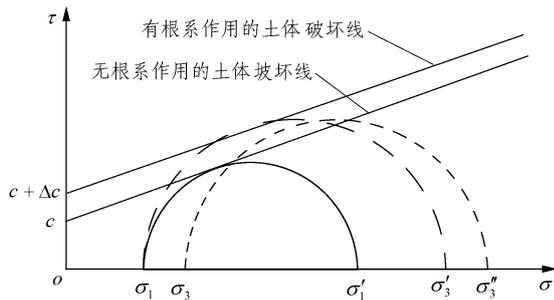


图 2 根系对土层的加筋作用
Fig.2 Reinforcement of roots to soil

土中根的含量不同，根对土的加筋作用的效果不同，从而植物对边坡稳定性的影响程度就不同。根是随着深度增加在土中的含量越来越少的。衡量根在土中的含量的一个关键的指标是根的面积比率，它指的是在一个土层断面上(水平断面或垂直断面)根的截面面积占总断面面积的比率。对土体而言，植被完全覆盖后，20 cm 以内土体的抗剪强度提高了 70%，50 cm 以内土体的抗剪强度提高了 30%^[3]。

4.2 主动 SNS 对边坡稳定性的影响

主动 SNS 所防护的边坡一般只是浅层的局部失稳，勘察时可确定可能下滑的块体。在进行系统安装时也会对这些块体进行特殊处理，通常是用一整块钢丝网将其包紧在内。因此，本文只分析局部

溜塌的失稳状态。边坡浅层失稳计算图如图 3 所示，用以分析坡体浅层稳定性。假设坡体表层破坏深度为 D ，沿 a, b, c 三段发生塌滑，容重为 γ 。各段滑体的重力分别为 W_1, W_2, W_3 ，相应下滑力为 T_1, T_2, T_3 ；相应抗滑力分别为 R_1, R_2, R_3 。坡角为 θ 。假设单位宽度主动 SNS 钢丝网所提供的拉力为 S 。设滑体的内摩擦角为 φ ，黏聚力为 c 。

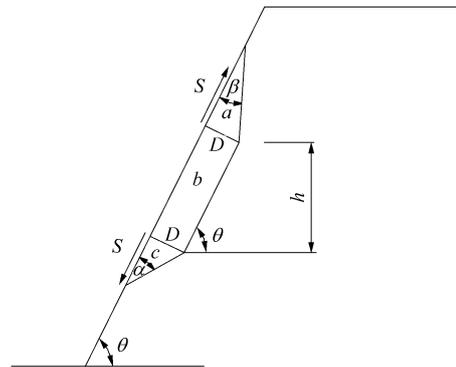


图 3 边坡浅层失稳计算图

Fig.3 Calculation sketch of slope stability analysis with SNS

各段重力：

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= D^2 \gamma \cot(\beta/2) \\ W_2 &= Dh \gamma / \sin \theta \\ W_3 &= D^2 \gamma \cot(\alpha/2) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(1) 未考虑钢丝网作用的下滑力：

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= W_1 \sin(\theta + \beta) \\ T_2 &= W_2 \sin \theta \\ T_3 &= W_3 \sin(\theta - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

抗滑力：

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= W_1 \cos(\theta + \beta) \tan \varphi \\ R_2 &= W_2 \cos \theta \tan \varphi + ch / \sin \theta \\ R_3 &= W_3 \cos(\theta - \alpha) \tan \varphi + cD / \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

总的下滑力 $T = T_1 + T_2 + T_3$ ，总的抗滑力 $R = R_1 + R_2 + R_3$ ，因此，可得边坡的安全系数为

$$F = R/T = (R_1 + R_2 + R_3)/(T_1 + T_2 + T_3) \quad (4)$$

(2) 考虑钢丝网作用的下滑力：

$$\left. \begin{aligned} T'_1 &= W_1 \sin(\theta + \beta) \\ T'_2 &= W_2 \sin \theta \\ T'_3 &= W_3 \sin(\theta - \alpha) + SD \cot \alpha \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

抗滑力:

$$\left. \begin{aligned} R'_1 &= [W_1 \cos(\theta + \beta) + SD \cot \beta \sin \beta] \tan \varphi + \\ &\quad SD \cot \beta \cos \beta \\ R'_2 &= W_2 \cos \theta \tan \varphi + ch / \sin \theta \\ R'_3 &= [W_3 \cos(\theta - \alpha) + SD \cot \alpha \sin \alpha] \tan \varphi + \\ &\quad cD / \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

同理, 可得到在钢丝绳网加固定作用下边坡的安全系数为

$$F' = R' / T' = (R'_1 + R'_2 + R'_3) / (T'_1 + T'_2 + T'_3) \quad (7)$$

若坡体产生局部溜塌的深度只是 50 cm 左右, 此范围内的在植物根系仍较发达, 在计算坡体的稳定性时应该考虑植被根系对它的影响。由节 4.1 的分析可知滑体的内摩擦角和黏聚力将由 φ , c 增加为 φ' , c' 。由式(2)~(4)可知, 即便是未加上主动 SNS, 植被护坡后坡体的稳定性亦能得到一定提高。若坡体产生局部溜塌的深度到了 1 m 以下, 此范围内的植被的根系已经比较稀疏, 在计算时可以不考虑根系对坡体稳定性的影响。此时主动 SNS 将对坡体稳定性起到关键的作用。比较式(4)与(7)可知, 由于钢丝绳拉力拉一方面直接给滑体的提供了抗滑力, 另一方面也加大了滑体与底面的摩擦力, 因而滑体的安全系数也有一定幅度的提高。

因此, 采用主动 SNS 与植被防护共同边坡进行加固, 若同时考虑植被根系对滑体内摩擦角和黏聚力的提高及钢丝绳对坡体的作用力, 边坡的稳定性将可得到明显的提高。

4.3 算例分析

宝兰二线宝天段叻水河大桥与老柴窝 2 号隧道进口之间左侧山坡, 位于渭河右岸。自然坡上陡下缓, 高达百余米。山体上部为坡率 1:0.3 的陡峭山崖, 基岩裸露、植被稀疏, 且存在倾向线路的不利结构面, 倾角约为 30°。受风化作用影响, 坡面岩体节理裂隙发育, 裂隙宽度最大可达 0.4 m, 一般深 1~2 m, 局部 3~4 m, 间距 1.5~4 m。裂隙内大部分为松土、树根杂草填充, 少部分无填充。此工程边坡采用了 GPS2 型 SNS 主动柔性系统进行防护。钢丝绳网采用 DO/08/300 型, 尺寸为 4 m×4 m。钢丝格栅由直径为 2.2 mm 的热镀锌钢丝编制而成, 网孔尺寸为 50 mm×50 mm, 用 ϕ 8 mm 钢丝绳缝合绳连接在支撑绳上。纵、横向支撑绳则采用 ϕ 16 mm

钢丝绳通过它将锚杆(绳)、钢丝绳网片连成整体。锚杆选用 ϕ 32 mm 螺纹钢, 设计抗拔力不小于 60 kN, 锚入稳定岩层深度不小于 2 m。

由以上数据可知, 单位宽度内有 20 根纵向钢丝, 钢丝绳的抗拉强度取为 1 770 MPa^[5], 因此, 单位钢丝绳网所能提供的最大抗拉力 $S_{\max} = 20 \times \frac{\pi d^2}{4} \times 1 770 \times 10^6 = 135 \text{ kN}$, 由图 3 中的几何关系可知: $\theta = 73^\circ$, $\alpha = 43^\circ$, $\beta = 17^\circ$ 。验算中根据现实情况 h 取 3 m, 坡体后缘张开裂隙深度为 4 m, 即 $D/\cot\beta = 4 \text{ m}$, 因此 $D = 1.2 \text{ m}$ 。强风化破碎岩体的强度取值 $c = 50 \text{ kPa}$, $\varphi = 20^\circ$; 容重 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ 。将这些数值代入式(1)~(4), 可得未采用主动 SNS 之前边坡的安全系数 $F = 1.43$ 。在采用柔性防护之后, 出于安全方面考虑, 假定钢丝绳网在正常工作状态所能提供的拉力为其最大值的一半, 即 $S = 0.5 S_{\max}$, 代入式(5)~(7)可得加固后边坡的安全系数为 $F' = 2.37$ 。

由上述的计算结果可知, 对该工程边坡而言, 在采用了主动 SNS 进行防护之后, 边坡的安全系数有了明显的提高, 已经达到加固的目的, 可以满足线路正常运营的安全要求。

5 结 语

SNS 充分利用柔性材料的易铺展性, 适应各类坡面地质灾害防护。主动 SNS 的开放性保护原有植被及其生长条件给实施人工绿化提供了可能。现阶段国内的采用主动 SNS 加固的边坡再进行植被恢复并不是很多, 现有的研究较少涉及对如何将植被防护与主动 SNS 结合。针对此现状, 本文结合现有的植被护坡工程技术, 对各种绿化方法与主动 SNS 结合的可能性作了初步探讨, 对进行植被恢复后边坡的浅层稳定作了定性的分析。此外, 本文还提出了一种简化的计算模型, 对采用 SNS 加固的边坡的稳定性进行了定量的分析。计算结果表明, 采用主动 SNS 可使边坡安全系数比原来有较大幅度的提高。因此, SNS 作为一种开放式的系统, 可以根据配合多种植绿化方法对边坡进行综合防护, 既可保证高大边坡的稳定, 确保道路安全畅通, 又能恢复山体因开挖而破坏的植被, 达到绿化、美化山体的效果。

参考文献(References):

- [1] 贺咏梅, 阳友奎. 崩塌落石 SNS 柔性防护系统的设计选型与布置[J]. 公路, 2001, (11): 14 - 20.(He Yongmei, Yang Youkui. Design selecting type and arrangement of SNS flexible protection system in rockfall field[J]. Highway, 2001, (11): 14 - 20.(in Chinese))
- [2] 李有志, 彭伟, 阳友奎, 等. 论 SNS 边坡柔性防护工程实践中的几个问题[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(增): 47 - 50.(Li Youzhi, Peng Wei, Yang Youkui, et al. Some problems concerned with the practice of SNS slope flexible protection system[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(Supp.): 47 - 50.(in Chinese))
- [3] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.(Zhou Depei, Zhang Junyun. Bio-geotechnical Technology of Vegetation[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.(in Chinese))
- [4] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.(Qian Jiahuan, Yin Zongzhe. The Principle and Calculation of Geotechnical Engineering(Second Edition)[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995(in Chinese))
- [5] 中华人民共和国国家标准编写组. 一般用途低碳钢丝(GB/T343 - 94)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. The Common Low-coal Content Steel Wire(GB/T343 - 94)[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.(in Chinese))
- [6] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.(Chen Zuyu. Soil Slope Stability Analysis—Theory, Methods and Programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))
- [7] Zhou Y Q, Li T B. Assessment of risks, hazard and mitigation of rockfall in Dahekou Hydropower Station[A]. In: Proc. of the 7th Int. Symposium on Landslides[C]. De Terrain: [s. n.], 1996. 435 - 440.
- [8] 袁聚云. 土工试验与原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003. 99 - 103.(Yuan Juyun. Earth Engineering Testing and Principle[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003. 99 - 103.(in Chinese))
- [9] 王可钧, 李焯芬. 植被固坡的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 687 - 691.(Wang Kejun, Lee C F. Brief mechanics analysis of bioengineering techniques for slope protection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 687 - 691. (in Chinese))
- [10] 阴可, 岳中琦, 李焯芬. 边坡绿化在香港的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 804 - 2 810.(Yin Ke, Yue Z Q, Lee C F. Slope vegetation and its application in Hong Kong[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 804 - 2 810(in Chinese))