

# 青藏高原地区生态边坡抗冲刷试验研究

岑国平<sup>1</sup>, 李林<sup>1</sup>, 刘培莹<sup>1,2</sup>, 赵云<sup>3</sup>, 龙小勇<sup>1</sup>

1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038
2. 中国人民解放军 93968 部队, 乌鲁木齐 830075
3. 中国人民解放军 73841 部队, 南京 210000

**摘要** 为减少交通工程建设对青藏高原生态环境的影响, 分析了青藏高原地区降雨特性, 制定了3个地区的暴雨公式; 用青藏高原典型土壤进行了裸土、纯草皮、三维网草皮的边坡冲刷试验, 获得了两种草皮的抗冲刷流速, 并与西安黄土的抗冲刷流速进行对照; 考虑坡面微地形的影响, 将坡面水流概化为抛物线形浅沟流, 通过现场实测确定了相关参数; 计算了西宁、玉树、拉萨、德令哈4个地区的边坡水流参数, 并结合室内冲刷试验结果, 提出适用于4个地区的生态边坡防护方案。

**关键词** 青藏高原; 生态边坡防护; 冲刷试验; 暴雨公式; 浅沟流

青藏高原地区海拔高, 气候环境恶劣, 生态系统脆弱<sup>[1]</sup>。为了改善青藏高原地区落后的交通状况, 近年来修建了许多公路、铁路和机场, 这些工程往往产生大量的高边坡。传统的边坡防护以圬工砌体为主, 包括拱形砌石护坡、菱形砌石护坡等, 这些护坡不但造价高, 而且需要开采大量的砂石, 对当地生态环境造成破坏, 同时与周围环境也不够协调。

20世纪30年代国外已开展生态边坡的研究, 目前在国内外许多工程中已广泛应用<sup>[2]</sup>。但生态边坡的设计、施工仍存在许多问题: 一是生态边坡的抗冲刷能力问题, 钟春欣等<sup>[3]</sup>曾开展室内试验, 研究了草皮的抗冲刷能力, 但各地土壤有较大区别, 草皮的品种、密度也不同, 导致抗冲刷流速有一定差异; 二是坡面流速计算方面, 一般假设坡面为均匀的平面, 利用水力学公式推导计算流速, 但实际坡面往往有一定起伏, 导致水流集中在相对较低的地方, 形成浅沟流, 使流速明显增大, 对这一问题至今没有很好研究; 三是各地的暴雨特性不同, 降雨强度有很大区别, 没有一个普通适用的坡面防护设计方案。

本文结合青藏高原实际, 对青藏高原4个地区的多年降雨资料进行收集, 自行制定暴雨强度公式, 同时将针对高原地区的土壤和草种开展裸土冲刷及生态坡面冲刷试验, 获得草皮边坡抗冲刷流速; 根据实测的坡面微地形参数, 获得浅沟流流速计算的公式; 并计算不同坡率下浅沟流的流量和流速, 最终提出适合青藏高原地区的生态边坡防护方案。

## 1 青藏高原地区降雨特征分析

暴雨特性对边坡冲刷有较大影响。青藏高原地区年降雨量总体不大, 除东南部年降雨量超过1000 mm, 西北部年降雨量小于200 mm, 大部分地区年降雨量在200~600 mm<sup>[4]</sup>。降雨强度也比较小, 年最大60 min降雨量均值大多在5~20 mm, 年最大10 min降雨量均值大多在4~8 mm<sup>[5]</sup>, 远小于中国东部地区。这对生态边坡防护既有利又有弊。有利的方面是降雨强度较小, 坡面的流量和流速都比较小, 不容易引起边坡冲刷。不利的方面是降水总量比较小, 加上天气寒冷, 草皮生长缓慢, 在雨季来临前草皮比较稀疏, 抗冲刷能力弱, 部分干旱或特别寒冷地区草皮难于生长。

暴雨强度对坡面冲刷有重要影响, 一般用暴雨强度公式表示:

$$a = \frac{A + C \lg N}{(t + b)^n} \quad (1)$$

式中,  $a$  为平均暴雨强度(mm/min),  $t$  为降雨历时(min),  $N$  为暴雨的重现期(年),  $b$ 、 $A$ 、 $C$  为地区参数。

由于青藏高原地区降雨资料缺乏, 大部分地区没有暴雨强度公式。目前西藏和青海两省(区)只有西宁市有暴雨公式<sup>[6]</sup>。为此, 我们收集了青海玉树、德令哈、西藏拉萨等地的降水资料, 自行推导了这些城市的暴雨公式。玉树、德令哈主要收集当地气象站或水文站短历时降雨资料, 历时10~120 min, 资料年数为23~30年, 采用年最大值法选样, 通过频

收稿日期: 2015-12-10; 修回日期: 2016-05-13

作者简介: 岑国平, 教授, 研究方向为机场道面材料, 电子信箱: cenguoping@163.com; 李林(通信作者), 研究方向为机场排水, 电子信箱: 1046586827@qq.com

引用格式: 岑国平, 李林, 刘培莹, 等. 青藏高原地区生态边坡抗冲刷试验研究[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 113-117; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.014

率分析及公式参数推导;拉萨市的暴雨公式主要通过查阅《中国暴雨统计参数图集》,获得年最大10 min、1 h、6 h的雨量均值及变差系数,并根据水文统计相关理论获得5年重现期各历时的设计雨量。各城市的暴雨公式为:

$$\text{西宁: } a = \frac{1.848 + 2.569 \lg N}{t^{0.631}} \quad (2)$$

$$\text{玉树: } a = \frac{3.13 + 2.48 \lg N}{t^{0.72}} \quad (3)$$

$$\text{德令哈: } a = \frac{2.72 + 2.97 \lg N}{(t + 5)^{0.768}} \quad (4)$$

$$\text{拉萨: } a = \frac{4.393}{t^{0.708}} \quad (5)$$

其中拉萨公式中重现期为5年。

## 2 室内抗冲刷试验

边坡冲刷不仅与当地的暴雨特性有关,还与土壤性质有关。青藏高原地区表层土壤大多为细粒土质砂或含砂(砾)粉土。这些土黏性小,抗冲刷能力比较弱。为了定量确定青藏高原地区生态边坡的抗冲刷能力,从西藏拉萨采集了典型土壤1 t以上,结合青藏高原地区降雨特征分析结果,在西安进行室内抗冲刷试验。通过颗粒筛分,大于0.075 mm的粗粒占51.9%,大于2 mm的砾粒占17.2%,液限36.1%,塑性指数为14.6。根据《公路土工试验规程》,该土为黏质砂土。在该土壤上种植草皮,草种为青藏高原采集的披碱草和紫羊茅,按1:1混播。由于高原气温低,草皮生长缓慢,当年春季种植的草皮在暴雨来临时还不够稠密。为了与高原的实际条件更接近,高原草种在西安种植时选择初春低温时播种,待草皮生长2个月时,草的密度中等,移植到室内进行边坡试验。草皮类型有纯草皮和三维土工网草皮2种<sup>[7]</sup>。为了与其他地区的土壤抗冲刷能力进行比较,还同时进行了西安黄土的草皮试验。西安黄土为低液限黏土,液限31%,塑性指数16。

### 2.1 试验装置

试验装置如图1所示。水从泵房抽到屋顶的稳定水箱,通过流量调节阀进入试验系统,进水流量由矩形堰测试后,

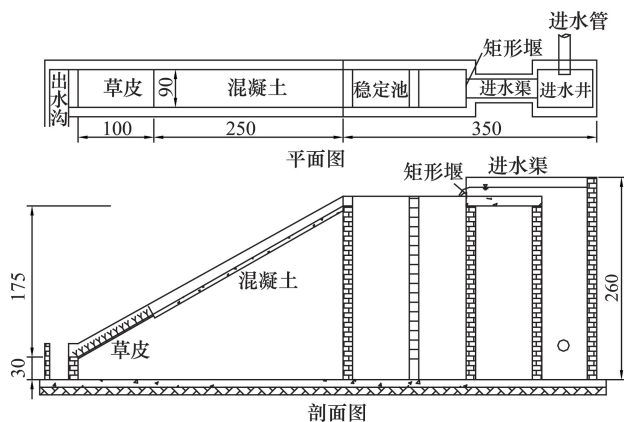


图1 室内冲刷试验装置(尺寸单位:cm)

Fig. 1 Indoor erosion test device (size: cm)

通过两级稳定水池进入试验坡面。试验坡面水平长3.5 m,宽0.9 m,坡比为1:2。实际工程中,边坡每级高度一般小于10 m,坡面水流的流速由坡顶向坡脚逐渐增大。由于草皮的糙率较大,流速增加缓慢。在室内试验中,受场地高度的限制,坡面高度不能过大。为了增大流速,将坡面上部设计为混凝土坡面,减小糙率,使流速达到或超过实际边坡最大流速。混凝土坡面水平长2.5 m,坡面下部铺草皮,水平长1 m。试验时测试矩形堰的堰头高度,并通过已率定的堰流公式得到进水流量,同时测试混凝土坡面下缘附近的平均水深,并由式(1)计算坡面水流的流速:

$$v = Q/bh \quad (6)$$

式中, $v$ 为坡面流速(m/s), $Q$ 为进水流量(L/s), $b$ 为坡面宽度(m), $h$ 为水深(mm)。

### 2.2 裸土冲刷试验

试验前将拉萨土填入护坡区,压实后开始冲刷试验。由于裸土的抗冲刷能力比较小,所以试验中首先以最低的流速进行冲刷;水泵刚启动时,矩形堰处流量还未稳定,坡面上开始有少量水流进入护坡区,冲走一些散落的土颗粒;当流量逐渐稳定,土壤开始有小坑和小细沟出现;随着水流的持续冲刷,形成越来越大的坑和沟,整个冲刷过程持续2 min后土壤表面即形成较大的侵蚀,如图2所示。



图2 裸土冲刷侵蚀

Fig. 2 Bare soil erosion

由于水流在很短时间内对裸土形成了较大的侵蚀,故抗冲刷流速小于0.6 m/s。由此,不经过任何防护措施的拉萨裸土的抗冲刷能力非常低。

### 2.3 纯草皮护坡和三维网草皮护坡试验

试验前,取整块草皮移植至护坡区压实,并用U形钉固定。浇水养护1~2 d,尽量减少因移植导致的草皮防护能力的减弱。采用草皮护坡进行冲刷试验时,流量从小逐级增大,分3~4级,每级持续冲刷1 h。如果上一级流速未造成草皮护坡冲刷破坏,加大流速,直至草皮冲刷破坏。破坏标准以草草根须明显裸露或者发生翻起为准,见图3和图4。取破坏前一级的流速作为抗冲刷流速,用纯草皮护坡时拉萨土(黏质砂土)和西安黄土(低液限土)的抗冲刷流速分别为0.99和1.13 m/s,三维网草皮护坡时两者的抗冲刷流速分别为1.17和1.40 m/s。



图3 纯草皮被冲刷  
Fig. 3 Turf erosion map



图4 三维网草皮被冲刷  
Fig. 4 Three dimensional mesh cushion grass

### 2.4 试验结果分析

试验结果表明,裸土在第一级水流(流速0.6 m/s)冲刷下经过2 min后便产生了较大的侵蚀破坏,而两种生态防护方式可以经受持续几级的水流冲刷,抗冲刷流速达到0.99~1.40 m/s,因此植草可大大提高固土效果;试验结果表明三维网草皮比纯草皮抗冲刷流速提高约20%。在草皮冲刷时,首先出现面蚀,表层土壤被冲走。然后在局部草较稀的地方出现小的坑洞。在纯草皮时,坑洞发展较快,逐渐形成较大的坑,草皮根须外露。有三维网时,草根与三维网紧密地缠绕在一起,有效阻止了径流下切作用,使抗冲刷流速有明显提高。

从两种土的对比试验看,拉萨土的抗冲刷流速明显小于西安黄土,两者相差15%左右。这是由于拉萨土黏性较小,容易受到冲刷侵蚀。一般情况下,粉土及粉质砂土的抗冲刷能力比较弱,而青藏高原地区表土大量分布这类土壤,容易引起冲刷。

### 3 边坡流速计算

边坡水流在理论上一般按片状流来考虑,以宽度为1 m的单宽坡面为例,水流的流量和流速沿坡面逐渐增大,到坡脚达到最大值。

坡脚流速按曼宁公式计算:

$$v = \frac{\sqrt{S}}{n} R^{0.667} \quad (7)$$

式中, $v$ 为流速(m/s), $n$ 为坡面糙率, $S$ 为坡面坡度, $R$ 为水力半径(m)。对单宽坡面, $R=h$ 。

根据运动波理论,可以得到坡面汇流时间为:

$$\tau = 1.362 \left( \frac{nL_p}{(\Psi a)^{0.667} S^{0.5}} \right)^{0.6} \quad (8)$$

式中, $\tau$ 为汇流时间(min), $L_p$ 为坡面水流距离(m), $\Psi$ 为径流系数, $a$ 为平均雨强(mm/min),根据暴雨强度公式计算, $n$ 、 $S$ 与式(7)相同。

坡脚单宽流量:

$$q = 0.0167 \Psi a L \quad (9)$$

式中, $q$ 为单宽流量(L/s), $L$ 为坡面的水平长度(m)。

坡脚水深

$$h = \left( \frac{nq}{\sqrt{S}} \right)^{0.6} \quad (10)$$

式中, $q$ 为单宽流量( $m^3/s$ )。

上述公式是在理想状况下推导的,即假设坡面为均匀的平面,水流为片状流。实际工程中,边坡坡面不可能处于绝对平整的状态,由于施工误差以及水流冲刷等的影响,坡面局部会存在一定起伏,这种微地形的存在会使水流集中,水深和流速都会增加。因此,流速计算中应考虑微地形影响<sup>[8]</sup>。

为了得到实际情况下坡面微地形的形态,在玉树机场进行了实地调查测试。玉树机场南侧边坡坡比为1:2,坡高约5.5 m。通过颗粒筛分,边坡表层0.075~0.005 mm的粉粒含量平均超过75%,液限为29.5%,塑限为20.8%,塑性指数8.8,为低液限粉土,其下部为砂砾石层。在未进行防护时,边坡冲刷非常严重,草皮防护后未出现冲刷(图5)。



(a) 防护前 (b) 防护后

图5 玉树机场生态边坡防护效果

Fig. 5 Effect of ecological slope protection in Yushu airport

对该边坡坡面微地形宽度、深度等参数进行测量,测量方法为:在边坡的同一水平高度上,根据坡面起伏状况将凹形坡面看作沟,测量出所有沟的宽度和深度。深度一般为2~5 cm,宽度在1.0~2.5 m,平均为1.7 m。以最大深度处为中心,测量两侧不同位置处的深度。因为径流都是集中在沟底,所以沟底的形态对坡面冲刷有较大影响。对测量数据进行拟合(图6),得出沟底的一般形态为抛物线,可用公式 $y=0.674x^2$ 表示。式中 $x$ 、 $y$ 分别为图中的水平和竖向坐标(m)。

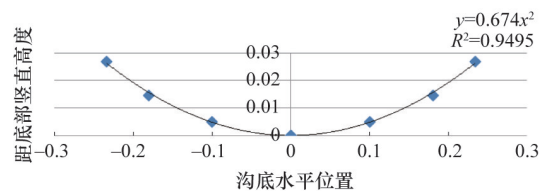


图6 沟底形态曲线

Fig. 6 Curve of the bottom of the ditch

沟内流速仍按曼宁公式(7)计算,抛物线断面的水力半径 $R=2h/3$ ,过水断面面积 $A=2bh/3$ 。这里 $b$ 为水面宽度,根据水深由抛物线公式计算得到<sup>[9]</sup>。

坡脚流量

$$Q_s = 0.0167 \Psi a B L \quad (11)$$

式中,  $B$  为平均汇流宽度(m), 即两相邻起伏最高点的平均距离。

坡面汇流时间也会相应改变, 本文根据沿程变量流的相关理论, 提出以下计算公式:

$$\tau = \frac{H_i L_p}{60 K v} \quad (12)$$

式中,  $L_p$  为坡面的长度(m),  $v$  为坡脚的流速(m/s),  $H_i$  为水流距离增大系数。

由于坡面地形的不规则, 坡面水流并非沿直线流动, 而有一定的曲折, 造成水流距离增大, 一般可取 1.2~1.3。  $K$  为沿程平均流速系数。由于坡面流的流速是沿程逐渐增大的, 其平均流速  $\bar{v}$  小于坡脚流速  $v$ ,  $\bar{v} = K v$ , 即为坡脚流速的  $K$  倍。根据推导, 抛物线沟  $K=0.692$ 。若取  $K_i=1.25$ , 则得

$$\tau = 0.03 \frac{L_p}{v} \quad (13)$$

计算过程可采用试算法, 先假设坡脚的水深  $h$ , 根据坡面的糙率、坡度由式(7)计算出坡脚的流速, 并根据沟形抛物线方程计算出水面宽和过水断面面积, 并得到沟的过水流量。

同时根据坡脚流速由式(13)计算坡面汇流时间, 并由暴雨公式计算平均雨强, 再由式(11)计算坡脚的设计流量。如果设计流量与过水流量不相等, 则假设的水深不合适。调整水深  $h$ , 直至两者相等。此时得到坡脚的流速, 作为验算是否出现冲刷的依据。

下面以拉萨地区边坡为例, 坡面坡率 1:2, 单级坡高 10 m, 草皮浅沟的糙率取 0.03, 坡面径流系数取 0.4, 平均汇流宽度取 2.5 m, 设计暴雨重现期取 5 年。经过试算, 坡脚水深为  $h=0.007$  m, 流速为  $v=0.657$  m/s, 流量为  $Q=0.627$  L/s。

根据抗冲刷试验, 拉萨土纯草皮的最大抗冲刷流速为 0.99 m/s, 根据工程经验, 取安全系数 1.5, 则允许流速为 0.66 m/s, 该坡面的最大流速为 0.657 m/s, 没有超过允许流速。因此采用纯草皮防护不会产生冲刷破坏。

坡面坡率、高度及暴雨强度不同, 坡面最大流速也会不同。公路路基、机场等边坡的坡率大多为 1:1.5~1:3, 机场侧净空处理区的坡率为 1:7(民航)或 1:10(军航)。单级最大坡高一般为 10 m。根据这些数据, 计算出西宁、拉萨、玉树、德令哈等高原地区的坡面流速(表 1)。

表 1 不同坡率的生态防护下坡面流参数

Table 1 Parameters of ecological protection downhill flow

地区	$v/(m \cdot s^{-1})$					$Q/(L \cdot s^{-1})$				
	1:1.5	1:2	1:3	1:7	1:10	1:1.5	1:2	1:3	1:7	1:10
西宁	0.72	0.71	0.70	0.62	0.56	0.61	0.81	1.23	2.09	2.30
玉树	0.77	0.76	0.74	0.64	0.57	0.74	0.99	1.47	2.40	2.46
拉萨	0.74	0.73	0.72	0.62	0.56	0.67	0.90	1.34	2.14	2.21
德令哈	0.55	0.54	0.53	0.48	0.45	0.25	0.33	0.51	0.93	1.12

注: 单级坡高 10 m, 糙率 0.03, 径流系数取 0.4, 平均汇流宽度 2.5 m, 暴雨重现期取 5 年。

由表 1 可见, 随着坡率的减小, 流量逐渐增加, 而流速逐渐减小。但坡率在 1:1.5~1:3, 流速变化不大。

对 4 个地区比较, 玉树的流量和流速最大, 其次为拉萨和西宁, 德令哈最小。这与当地的暴雨强度有关。玉树、拉萨和西宁在坡率为 1:1.5~1:3 时, 流速在 0.7~0.77 m/s。如抗冲刷流速按拉萨土的试验结果验算, 则超过了纯草皮的允许流速(0.66 m/s)。三维网草皮抗冲刷流速 1.17 m/s, 取安全系数 1.5, 则允许流速为 0.78 m/s。因此可以用三维网草皮防护。而在坡率在 1:7~1:10 时, 流速未超过 0.66 m/s, 因此可以用纯草皮防护。对德令哈, 所有坡率的最大流速均未超过 0.66 m/s, 可以用纯草皮防护。

玉树机场在 1:2 的边坡上采用三维网草皮防护, 在 1:7 的侧净空处理区采用纯草皮防护, 自 2008 年修建以来, 坡面未出现冲刷现象, 说明本文的计算结果是合理的。

需要注意的是, 本文中抗冲刷试验的草皮是在养护 2 个月左右, 草皮密度中等情况下得到的。如果由于气温比较低, 草籽播种比较晚, 在雨季来临时草皮还比较稀疏, 抗冲刷能力会大大降低。此时应通过增加三维土工网或其他措施

提高抗冲刷能力。在德令哈附近有很多粉砂土, 抗冲刷能力很低。应采取其他措施, 如加三维网, 或更换表土等。

#### 4 结论

1) 青藏高原区表层土壤黏性小, 抗冲刷能力比较低。通过拉萨地区黏质砂土的草皮抗冲刷试验, 得到纯草皮的抗冲刷流速为 0.99 m/s, 三维网草皮抗冲刷流速为 1.17 m/s, 低于相同条件下西安黄土的抗冲刷流速, 两者相差 15% 左右。

2) 通过收集雨量资料, 建立了玉树、德令哈、拉萨的暴雨强度公式。

3) 边坡表面微地形会使坡面水流集中, 增大坡面流速。根据现场实测的微地形, 推导了坡面平均流速系数。

4) 计算了西宁、玉树、拉萨、德令哈 4 个地区在不同坡率下坡脚流量、流速等参数, 在坡高 10 m, 暴雨重现期为 5 年时, 西宁、玉树、拉萨在 1:1.5~1:3 的边坡需要用三维网草皮防护, 1:7~1:10 的边坡可用纯草皮防护, 德令哈各边坡都可用纯草皮防护, 但如遇粉砂土等抗冲刷能力很差的土质, 需要采取其他工程措施。

## 参考文献 (References)

- [1] 于伯华, 吕昌河. 青藏高原高寒区生态脆弱性评价[J]. 地理研究, 2012, 30(12): 2289-2295.  
Yu Bohua, Lü Changhe. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau[J]. Geographical Research. 2012, 30(12): 2289-2295.
- [2] 周跃. 欧美坡面生态工程原理及应用的发展现状[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 1(5): 79-85.  
Zhou Yue. Development status and application of the principle of slope engineering in europe[J]. Soil Erosion and Water Conservation, 1999, 1(5): 79-85.
- [3] 钟春欣, 张玮, 王树仁. 三维植被网加筋草皮坡面土壤侵蚀试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 35(3): 258-261.  
Zhong Chunxin, Zhang Wei, Wang Shuren. Dimensional vegetation net reinforced turf slope soil erosion experimental research[J]. Hohai University: Natural Science, 2005, 35(3): 258-261.
- [4] 水利部水文局, 南京水利科学研究院. 中国暴雨统计参数图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.  
Ministry of Water Resources Hydrology Bureau, Nanjing Hydraulic Research Institute. China storm statistic parameters portfolio[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2006.
- [5] 胡亮, 杨松, 李耀东. 青藏高原及其下游地区降水厚度季、日变化的气候特征分析[J]. 大气科学. 2010, 34(2): 387-398.  
Hu Liang, Yang Song, Li Yaodong. Climatic characteristics of the Tibetan Plateau and its downstream precipitation thickness season, diurnal variation[J]. Atmospheric Science, 2010, 34(2): 387-398.
- [6] 北京市政工程设计总院. 给水排水设计手册(第五册)城镇排水[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.  
Beijing Municipal Engineering Design Institute. Water supply and drainage design manual (Volume V) urban drainage[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2004.
- [7] 张莎莎, 杨晓华, 李凌姜. 黄土地区道路陡边坡植被多样性生态防护措施[J]. 公路交通科技, 2013, 30(6): 153-157.  
Zhang Shasha, Yang Xiaohua, Li Lingjiang. Loess area roads and steep slope vegetation diversity in ecological protection measures[J]. Highway and Transportation Research, 2013, 30(6): 153-157.
- [8] 赵云, 岑国平, 李会恩, 等. 不同边坡形式防冲刷试验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(20): 6015-6019.  
Zhao Yun, Cen Guoping, Li Huien, et al. Test research on different forms of anti-erosion[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(20): 6015-6019.
- [9] 岑国平. 机场排水设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002: 170-334.  
Cen Guoping. Airport drainage design[M]. Beijing: China Communications Press, 2002: 170-334.

## Experimental study on anti erosion of ecological slope in Qinghai-Tibet Plateau

CEN Guoping<sup>1</sup>, LI Lin<sup>1</sup>, LIU Jiyong<sup>1,2</sup>, ZHAO Yun<sup>3</sup>, LONG Xiaoyong<sup>1</sup>

1. School of Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China

2. The Chinese People's Liberation Army 93968 Units, Urumqi 830075, China

3. The Chinese People's Liberation Army 73841 Units, Nanjing 210000, China

**Abstract** In order to decrease the impact of traffic engineering construction on the ecological environment of Qinghai-Tibetan Plateau, we have worked out the rainstorm intensity formula of three cities through analysis of the rainstorm characteristics of Qinghai-Tibetan Plateau area. Slope erosion tests of pure turf and three dimensional mesh cushion grass are performed, respectively with typical soil of the Qinghai-Tibetan Plateau. Thus we have gained two kinds of turf scouring velocities, which are compared with that of Xi'an loess. Considering the influence of slope micro topography, the slope flow is generalized as parabolic shallow channeling, and the relevant parameters are determined through field measurement. In addition, combined with indoor scouring test's results an ecological slope protection scheme for the four regions is proposed, with calculation of slope flow parameters of Xining, Yushu, Lhasa, Delingha.

**Keywords** Qinghai-Tibetan Plateau; ecological slope protection; scouring test; rainstorm intensity formula; ephemeral gully flow

(责任编辑 王媛媛)