

华北地区公路土质边坡土壤侵蚀实验研究

杨建英¹, 韩成军^{1,3}, 叶海英¹, 祁有祥¹, 赵廷宁²

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

2. 北京林业大学 边坡绿化研究所, 北京 100083; 3. 青海省水土保持局, 青海 西宁 810001)

摘要: 公路建设过程中产生的水土流失非常严重。在标定人工降雨器降雨参数的基础上, 研究了华北地区公路土质边坡水土流失规律。结果表明, 土体硬度、前期土壤含水量、降雨强度相同条件下, 土壤侵蚀量随坡度的增大而增加, 在 25° 附近达最大值, 之后随坡度的增加侵蚀量略有下降并渐趋稳定; 土壤侵蚀量随土体硬度的加大而减小, 且降雨强度越大这种影响愈显著; 前期土体含水量愈大, 土壤侵蚀量呈增大趋势。本研究可为科学评价工程土质边坡的水土流失提供依据。

关键词: 土质边坡; 模拟; 土壤侵蚀试验

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)04—0121—05

中图分类号: S157, X734

Experimental Research on Soil Erosion on Earth Side Slope of Highways in North China

YANG Jian-ying¹, HAN Chen-jun^{1,3}, YE Hai-ying¹, QI You-xiang¹, ZHAO Ting-ning²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Slope Revegetation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. Soil and Water Conservation Bureau of Qinghai Province, Xi'ning, Qinghai 810001, China)

Abstract: Soil erosion generated by road construction project is significantly serious. Based on the calibration of the characteristics of rainfall simulator, side slope of different gradients and different degrees of compactness formed in road construction process is studied. Results show that soil erosion is aggravated with increased slope gradient. Soil erosion rate reaches a peak at about 25°, beyond which it begins to decrease and finally goes to a steady state. Moreover, soil erosion is alleviated with increased soil hardness and this trend is more obvious if rainfall intensity becomes much stronger. Additionally, soil erosion is aggravated with the increasing of antecedent soil water content. This study may provide a basis for the scientific evaluation of soil erosion on earth side slope in an engineering project.

Keywords: earth side slope; simulation; soil erosion experiment

近年来,随着我国经济的快速增长和改革开放的深入,公路建设作为国民经济和社会发展的重要基础设施,发展十分迅速。伴随公路建设产生的水土流失十分严重,使国民经济遭受了巨额损失。

国内外学者对道路土壤侵蚀进行了大量研究。Luce (1999) 认为道路建设形成的硬地面(包括路面、施工便道、施工营地)极大地降低了地表的入渗能力,易于形成坡面漫流和产沙; Jones J. A. (2000) 等发现道路建设大大影响了坡面侵蚀泥沙沉积的方式和发生频率; Nyssen J. (2002) 指出往往在道路下坡向诱发切沟,切沟的形成不仅造成大量的水土流失,而且成为泥沙源通往下游沟道河流的便捷路径。李志刚等(2003,

2004) 通过野外模拟试验定量比较了几种常用路堤边坡防护型式的抗冲刷能力。沈波等(2003) 进行了压实黄土路基边坡 7 大因素变化条件下的降雨冲刷试验研究^[1]。这些研究多是对已完工的公路工程进行的研究,而对施工过程中的土壤侵蚀则研究较少。公路工程土壤侵蚀大致可分为开挖路基边坡、填筑路基边坡、施工便道、取土场、弃渣场等若干侵蚀单元,各侵蚀单元在不同施工阶段由于开挖、填筑、压实程度不同,其坡度、硬度亦不同,侵蚀模数也是一个变化的数值。本研究通过模拟华北地区公路建设过程中可能出现的边坡坡度、边坡压实度,旨在探索公路工程建设过程中土壤侵蚀的一些基本规律。

1 研究方法

1.1 人工模拟降雨器及其参数标定

本研究使用的人工降雨器为课题组自行研制,由布针架、水源、导管、流量计、压力表、加压水泵、泄压阀门、侵蚀槽、滑轮组、牵引钢丝绳等组成,系统构成如图 1 所示。布针架距地面净高(降雨高度)可在 0.5 ~ 4.0 m 调节,有效降雨范围为 1.92 m × 0.85 m。

降雨的主要特性包括:(1)降雨量、降雨强度;(2)降雨分布的均匀性;(3)雨滴大小、终速等^[2]。试验开展前首先对降雨器的上述参数进行了标定。本次标定的降雨器水压范围定为 0 ~ 0.1 MPa,标定水压选择正点刻度 0.025, 0.05, 0.075 MPa 进行。

使用 8 个 500 ml 同口径量杯,以图 2 所示 4 种方式在降雨区内同一水平面上摆放,降雨高度 4.0 m。启动降雨器,使降雨持续 10 min,用量杯承接降雨,量

测各容器内雨量,计算各点位雨强,并对各点位雨量进行偏差分析,确定降雨均匀度。

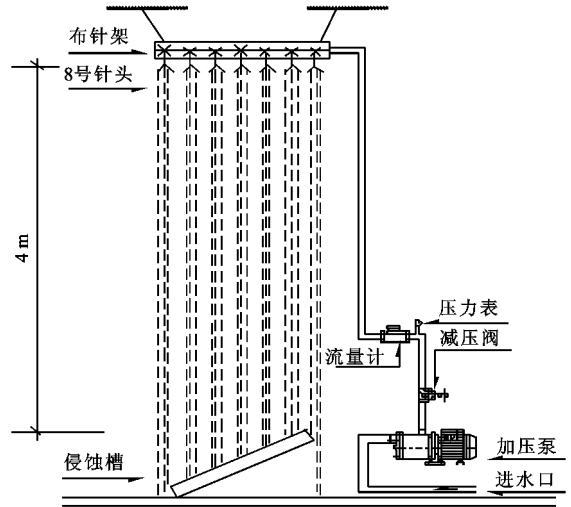


图 1 人工模拟降雨器工作示意图



图 2 接雨器皿布置方式示意图

1.2 模拟压实土体模块的制备与侵蚀试验

试验用土采自北京西北部开挖工地,为褐土,天然含水量约 15%,干容重 1.96 g/cm³。铁制侵蚀槽规格长 800 mm,宽 430 mm,高 90 mm。将试验用土充填于侵蚀槽内,用与侵蚀槽等尺寸薄木板盖顶,用重锤击打盖板分层压实土体,形成一定压实度的供试模块。使用日本产山中式 351 型土壤硬度计,测定土体硬度。试验时用吊链改变一端高度来调整试验模块的放置坡度,试验坡度可在 0°~80°之间调节。

本次试验设计主要考虑了 4 个影响因素:硬度、土壤含水量、降雨强度、坡度。

进行试验设计之前首先对北京地区具有代表性的公路土质边坡的硬度、压实度及土体含水量情况进

行了调查与测定,结果如表 1。参照野外公路土质边坡情况调查结果,对公路边坡土壤侵蚀试验设计如下(表 2)。

(1) 第 1 组试验。采用雨强为 1.723 mm/min,含水量 15%,硬度 38 kg/cm²,土体模块坡度分别定为 0°,5°,10°,15°,20°,25°,30°,35°进行试验。

(2) 第 2 组试验。将硬度、含水量、降雨强度因素分成 4 个水平等级进行试验组合,坡度定为 30°。表 2 为各次试验的具体条件。

试验时,待降雨稳定后把土体模块置于有效降雨范围内,降雨高度 4.0 m,连续降雨 10 min,收集侵蚀槽末端流出的泥水混合物,称重;沉淀过滤后,风干泥沙,称重,计算径流量和侵蚀泥沙量。

表 1 公路土质边坡硬度、压实度、含水量调查结果

调查地点	样点数	硬度/ (kg · cm ⁻²)	土体含水量/ %	压实度/ %	调查方法
施工过程中的北京市六环路良乡至寨口段工程	6	73	7.53	95.0 %	使用山中式尖头硬度计对边坡土体直接进行硬度测定,取样,实验室测定含水量。
已完工京承高速六棱花饰砖护砌边坡	3	2.4	12.5	—	掀开六棱花砖,测定其下土体
延庆龙庆峡附近土路	3	14	—	—	测定土路路面

表2 试验设计

降雨场次	硬度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	含水量/ %	降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	38	15	1.723
2	38	15	3.556
3	100	15	1.723
4	280	15	1.723
5	100	15	3.556
6	280	15	3.556
7	38	9	1.723
8	38	20	1.723
9	38	9	3.556
10	38	20	3.556

1.3 实际压实土体模块的采集与侵蚀试验

根据《公路路基设计规范》,路基填筑应分层填筑

均匀压实。高速公路,一、二级公路上路堤压实度应大于等于94%,三、四级公路应大于等于93%。该压实度指标系按《公路土工试验规程》(JTJ 051)中重型击实试验法确定的最大干密度的压实度^[3]。

为弄清高压实度边坡在强降雨下的土壤侵蚀规律,本研究在野外已停用的旧路路段切取了 $0.4 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 0.10 \text{ m}$ 的供试土块,并现场测定了硬度,为 63 kg/cm^2 ,运至试验室内,以 $1:1.5(33.69^\circ)$ 坡度放置,在 1.723 mm/min 降雨强度下进行了土壤侵蚀试验,降雨历时15 min。

2 试验结果与分析

2.1 降雨器标定结果及分析

2.1.1 降雨均匀度 不同供水压力下,各种布置方式测得的雨量如表3所示。

表3 降雨均匀度标定结果(历时10 min)

供水压力/ MPa	参数	第1种 布置方式	第2种 布置方式	第3种 布置方式	第4种 布置方式	平均值
0.025	平均降雨量/mm	16.456	16.983	17.838	17.663	17.235
	标准偏差	3.264	2.688	3.930	3.256	3.284
	相对偏差	0.198	0.158	0.220	0.184	0.192
0.050	平均降雨量/mm	21.256	17.355	20.400	20.169	19.790
	标准偏差	3.423	2.112	3.686	3.502	3.181
	相对偏差	0.161	0.1217	0.1807	0.174	0.1592
0.075	平均降雨量/mm	35.869	34.445	36.210	35.731	35.56
	标准偏差	4.375	3.490	5.535	4.869	4.567
	相对偏差	0.123	0.101	0.1529	0.136	0.128

从表3可以看出,供水压力0.025 MPa时,平均雨强 1.723 mm/min ,8个接水器皿平均雨强的相对偏差为19.03%,均匀度为80.97%;供水压力0.05 MPa时,平均雨强为 1.979 mm/min ,8个接水盒平均雨强的相对偏差为15.92%;均匀度为84.08%。供水压力0.075 MPa时,平均雨强为 3.556 mm/min ,8个接水盒平均雨强的相对偏差为12.81%;均匀度为87.19%。

在本试验雨强范围内($1.723 \sim 3.556 \text{ mm/min}$),降雨均匀度均在80%以上,可以满足试验要求。此外,随着供水压力的增大,降雨强度的增加,降雨的均匀度亦显示出增加的趋势。由供水压力0.025 MPa时的80.97%,增加到了0.075 MPa时的87.19%。降雨量分布的相对偏差均小于20%,运行过程中性能稳定。

2.1.2 降雨强度 试验中电压波动,水源波动,风力影响,个别喷孔出水不畅以及部分仪器的气密性能等

因素都可能造成雨强的波动。本试验采用流量计和压力表控制方式对降雨强度进行了标定,即,先设定供水压力,读取降雨前流量计读数,在此供水压力下持续降雨10 min,再读取降雨后流量计读数,降雨前后读数之差即为该条件下的总降雨量,除以降雨面积和时间,得出降雨强度。

对同一供水压力,重复11~13次试验,求取雨强平均值,表4为供水压力与平均雨强的试验结果。

从表4中可以看出,平均降雨强度随着供水压力的增大而增加,但雨强与供水压力并不成线性关系。

表4 降雨强度与供水压力的关系

供水压力/ MPa	降雨时间/ min	重复试验 次数	平均过 水流量/ m^3	平均降 雨量/ mm	平均 降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)
0.025	10	13	0.029	17.890	1.723
0.050	10	11	0.035	21.450	1.979
0.075	10	12	0.059	36.210	3.556

2.1.3 雨滴大小 试验采用 A4 的定性晒图纸作为色斑载体。将高锰酸钾与固定剂滑石粉分别细致研磨,按 1 : 4 比例混合搅拌均匀后,用 0.1 mm 细筛均匀筛洒于晒图纸表面,并装入有盖试验接雨盒中,降雨时,打开盖迅速接雨形成雨斑。

在取得样斑后,将带斑样纸晾干,之后对色斑进行筛选。正常单个雨滴形成的色斑一般呈带毛刺的圆形,对于粒径极小的雨滴略去不计,因为形成这种色斑的雨滴是飘散的雾珠,它在降雨体积总量中所占的比例极小,而且对地面几乎不产生击溅作用。对重叠的雨滴也予以剔除。在实际取样过程中,由于间隔时间极短,几乎不可能出现两个雨滴先后下落到滤纸上却完全重叠的情况,因此两雨滴粘连的色斑图案必定不能成圆形。此外,每一单个雨滴击溅成的色斑只有一个较白的中心点,这也是判定色斑是否重叠的一个依据。

样斑直径可用与其同面积的圆的直径来表示。将样斑纸扫描至计算机中,然后用 AutoCAD 将图像以实际尺寸(1 : 1 比例)导入并描绘出经筛选后剩余雨滴的边界,算出其面积,最后换算成圆的直径。图 3 为雨滴样斑图片。

为得到较准确的雨滴直径,采用表示色斑直径与雨滴粒径关系的修正式 $d_1 = 0.356 D^{0.712}$, $d_2 = 0.334 D^{0.7495}$, $d_3 = 0.295 D^{0.756}$ (式中 d_1, d_2, d_3 为雨滴直径, D 为样斑直径) 分别计算雨滴粒径,然后求取平均值 d :

从表 5 可见,雨滴粒径分布于 1.0 ~ 2.5 mm 范围内,这 3 种供水压力下均以 2.0 ~ 2.5 mm 大粒径雨滴所占比例为大,其次是 1.5 ~ 2.0 mm 雨滴。0.025, 0.050, 0.075 MPa 供水压力情况下,2.0 ~ 2.5 mm 大粒径雨滴所占比例分别为 53.8%, 53.8%, 56.3%。雨滴平均粒径则呈现出随供水压力增大而减小的趋势,但减小趋势并不明显。

衡量降雨侵蚀能量的主要指标为降雨侵蚀力。根据毕小刚研究,北京地区多年平均降雨侵蚀力为 1 400 ~ 4 600 $[100 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]^{[41]}$,区域降雨侵蚀力分布变化较大。经计算,本研究用模拟人工降雨,10 min 降雨约相当于 306 ~ 1 235 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 的降雨侵蚀力。

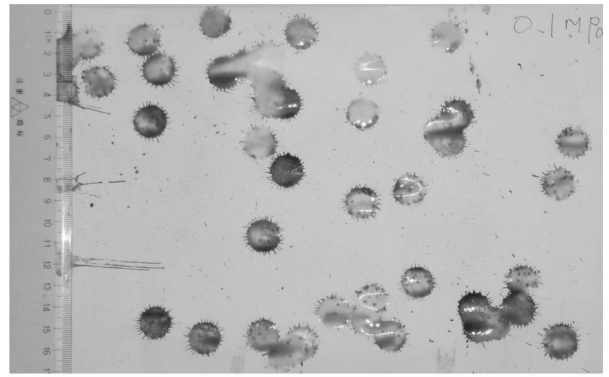


图 3 雨滴样斑图片

表 5 不同供水压力下降雨的雨滴粒径

供水压力/ MPa	样斑 数	雨滴粒径(d) 分布/mm			雨滴平均 粒径/mm
		1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 2.5	
0.025	13	2	4	7	2.017
0.050	13	2	4	7	2.009
0.075	16	0	7	9	2.009

2.2 降雨侵蚀实验结果及分析

2.2.1 坡度对侵蚀量的影响 表 6 为硬度 38 kg/cm^2 , 前期土壤含水量 15% 时,不同坡度条件下降雨侵蚀量的试验结果。

从表 6 中可以看出,单位面积土壤侵蚀量随坡度的增加而增加,在 25° 附近达到峰值,之后随坡度增加,侵蚀量略有下降并趋向于一稳定数值。侵蚀模块的承雨面积一定,单位时间内,如以相同面积水平状态接受的降雨量为 R ,则坡面状态接受的降雨量为 $R \cos \alpha$ (α 为坡度)。

随着坡度的增加,相同降雨强度下侵蚀模块承接的降雨量逐渐减少,使降雨侵蚀力具有减少的趋势。同时随着坡度的增加降雨的重力侵蚀力具有增大的趋势,两种因素相互制约。坡度 25° 以下时,侵蚀力增大趋势大于减小趋势,结果表现为侵蚀力随坡度的增加而增大,因此出现了在 25° 以下时土壤侵蚀量随坡度增加而增大的趋势。坡度大于 25° 时,侵蚀力增大趋势小于减小趋势,则表现出侵蚀力随坡度的增大而减小,也就出现了坡度大于 25° 时土壤侵蚀量随坡度增加而减小的趋势。

表 6 不同坡度下的压实模块的土壤侵蚀量

项目	不同坡度下土壤侵蚀量							
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
土壤侵蚀量/g	25	97	160	230	398	573	554	532
单位面积土壤侵蚀量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2})$	15.32	59.44	98.04	140.93	243.87	351.10	339.46	325.98

注:侵蚀槽面积 1.92 m × 0.85 m;土体硬度 38 kg/cm^2 ;土体质量含水量 15%;降雨强度 1.723 mm/min 。

2.2.2 硬度、降雨强度对侵蚀量的影响 坡度 30°, 前期土壤含水量 15%, 不同硬度条件下的土壤侵蚀量试验结果如表 7 所示。从表 7 中可以看出, 土壤侵蚀量随硬度增大而减小, 且降雨强度越大, 这种影响越明显。这主要因为硬度越大, 颗粒间的相互作用力越强, 径流冲刷相对越困难。若雨强较小, 径流深度和流速都较小, 被水冲走的土粒就少。而坡面表层土在水浸泡下会变得松软, 这种现象无论硬度大或小都存在, 只是硬度小时更容易在雨水浸泡下变得松软。因此, 雨强较大时, 硬度对土壤侵蚀量的影响才更加突出。

从表 7 还可以看出, 在相同硬度, 相同土壤前期含水量条件下, 降雨强度越大, 土壤侵蚀量也越大。

表 7 不同硬度条件下的土壤侵蚀量

土体硬度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	不同降雨强度侵蚀量/g	
	1.723 mm/min	3.556 mm/min
38	554	793
100	395	593
280	198	325

注: 坡度 30°, 前期含水量 15%。

2.2.3 前期含水量对侵蚀量的影响 表 8 为坡度 30°, 硬度 38 kg/cm^2 , 不同前期含水量条件下土壤侵蚀量的试验结果。

表 8 不同前期含水量条件下土壤侵蚀量

前期含 水量/%	不同降雨强度侵蚀量/g	
	1.723 mm/min	3.556 mm/min
20	692	907
15	554	793
9	470	614

从表 8 中可以看出, 降雨强度 1.723 mm/min, 3.556 mm/min 条件下, 随着前期含水量的增大, 土壤侵蚀量呈增大趋势。土壤的抗侵蚀性主要与土体的抗剪强度有关, 这可能是因为含水量越大土体的抗剪强度越小, 土的抗蚀性就越小的缘故。

2.2.4 野外道路采集土体模块的土壤侵蚀 于野外采取道路土体模块 0.40 m × 0.25 m 用于土壤侵蚀试

验。土体硬度 63 kg/cm^2 , 含水量 15%, 坡度 1:1.5 (33.69°), 降雨强度 1.723 mm/min, 降雨历时 15 min 条件下, 0.1 m^2 承雨面积压实边坡的土壤侵蚀量为 16.73 g, 即为 111.5 g/m^2 , 与表 6 硬度 38 kg/cm^2 时大致相同坡度的侵蚀结果相比, 侵蚀量有明显降低。一方面由于土体硬度增加会降低侵蚀量, 另一方面, 由于野外采集的土体模块已被雨水冲刷多次, 细粒土已被冲蚀, 所剩粗粒土较难移动也会降低侵蚀量。

3 结论

(1) 本研究首先对自制室内人工降雨器进行了标定, 在 1.723 ~ 3.556 mm/min 雨强范围内, 降雨均匀度为 80.97% ~ 87.19%; 雨滴粒径分布在 1.0 ~ 2.5 mm 范围, 且以 2.0 ~ 2.5 mm 大粒径雨滴所占比例为大, 其次是 1.5 ~ 2.0 mm 雨滴。

(2) 模拟公路建设过程中形成的各种坡度、压实度边坡, 制作供试模块, 使用人工降雨器对模块进行的土壤侵蚀试验结果表明, 在 1.723 ~ 3.556 mm/min 的降雨强度范围内, 土体硬度、前期土壤含水量、降雨强度相同条件下, 土壤侵蚀量随坡度的增大而增加, 在 25° 附近达最大值, 之后随坡度增加侵蚀量略有下降并渐趋稳定。土壤侵蚀量随土体硬度的增大而减小, 且降雨强度越大这种影响越显著; 随着前期含水量的增大, 土壤侵蚀量呈增大趋势。

(3) 本研究所用 1.723 ~ 3.556 mm/min 的模拟人工降雨, 10 min 降雨约相当于 306 ~ 1 235 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 的降雨侵蚀力, 根据野外降雨侵蚀力情况及本试验研究结果, 可推算不同坡度、不同硬度土质边坡的土壤侵蚀模数, 可为科学评价工程建设产生的水土流失提供依据。

[参 考 文 献]

- [1] 沈波. 公路路基压实黄土坡面人工降雨侵蚀试验[J]. 长安大学学报, 2004, 24(6): 11—14.
- [2] 高小梅. 人工模拟降雨装置的研制与应用[J]. 辐射防护, 2000, 20(1/2): 86—90.
- [3] 中交第二公路勘察设计研究院. JTG D30—2004《公路路基设计规范》[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [4] 毕小刚. 北京地区坡面土壤流失方程研究[D]. 北京林业大学, 2007: 37—49.