

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0003.018

# 高速公路边坡水土流失机理与养护管理研究

龙 茜

(重庆市城市建设投资(集团)有限公司,重庆 400023)

**摘 要:**对重庆市梁忠高速公路填方路基边坡土壤开展室内模拟降雨试验,分析不同降雨强度和坡度条件下坡面产流和产沙的规律;结果表明:在 0.6 mm/min、0.9 mm/min、1.2 mm/min 降雨强度条件下,起始产流时间随坡度呈减小趋势,当土体坡度一定时,起始产流时间不断减小,地表径流强度随着降雨强度的增大而增大;当降雨强度一定时,土体的起始产流时间随土体坡度增大逐渐减小,从而反映出地表径流强度不断增大;降雨强度对土壤侵蚀的临界坡度有一定影响,但两者具体变化关系需进一步研究。另外,通过高速公路边坡水土流失机理进行了研究,展开了高速公路边坡水土流失主要诱因分析,提出了科学的高边坡的养护管理措施。

**关键词:**高速公路;水土流失;人工降雨模拟实验;产沙量

**中图分类号:**S157.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-058X(2020)03-0115-06

## 0 引 言

当今世界水土流失仍然是一个技术性的难题,无论山区还是高原都存在不同程度的水土流失问题<sup>[1]</sup>。地球上受到水土流失的面积达到 2 500 万平方千米,大约有陆地面积的 16.7%,损失的土壤量达到 260 亿吨<sup>[2]</sup>。近年来,在开发建设过程中进行的大量采挖活动,特别是山区高速公路项目建设中,对土壤和植被自然形态产生了剧烈扰动和破坏,加上在施工过程中保护监管措施不到位,对生态环境产生了严重的破坏,导致大量的水土流失<sup>[3]</sup>。山区高等级公路的修建,往往需要开挖大量的边坡。边坡的开挖卸荷导致岩土体内部的应力状态发生改变,当边坡所受的应力达到应力极限

时,边坡就会发生失稳破坏,造成大量的人员伤亡<sup>[4]</sup>。大量工程开挖和人工降雨也会造成大量的水土流失,尤其是在复杂的高速公路建设中<sup>[5]</sup>,不可避免地破坏生态和植被,留下了大量的裸露边坡,造成了水土流失的加剧<sup>[6-7]</sup>。因施工过程处理不当而导致建筑材料大量浪费,并且,导致地表土质松散变质,当遇到雨水侵蚀时就会造成大量的水土流失<sup>[8-9]</sup>,如不加以有效防护,由于土壤侵蚀导致坡面局部崩塌形成大型滑坡,将造成巨大财产损失以及人员伤亡,对生态环境也造成大面积的破坏。因此,在高速公路建设的过程中,如何加强对环境的保护,成为一个越来越被广泛关注的技术性的问题。高速公路填方路基边坡坡面土壤含有大量的建筑废石,与一般的山区坡面土壤有着很大不同,所以在这样的环境修建高速公路除工程难度大以

收稿日期:2019-12-26;修回日期:2020-01-20.

作者简介:龙茜(1981—),重庆市人,经济师,从事市政工程管理研究.

外,对生态环境的保护要求也相对较高<sup>[10-11]</sup>。因此,对高速公路边坡土壤展开水土流失研究,试验样本取自重庆市梁忠高速公路境内的填方路基边坡土壤。通过模拟室内人工降雨测定径流量和泥沙量,分析坡度及降雨强度对坡面土壤的流失的影响。为高速公路边坡修建提供理论依据,为配套高速公路水土流失防治措施的制定提供数据基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验土壤选用重庆市梁平区仁贤镇梁忠高速公路施工区域第四纪沉积物坡积土,天然容重为  $1.76 \text{ g/cm}^3$ ,土中含有较多的石块细渣。首先将土壤过孔径为  $10 \text{ mm}$  的筛网去除过大的石块,然后利用筛分法将试验土壤进行颗粒分类,土壤粒径( $< 0.1 \text{ mm}$ )、( $0.1 \text{ mm} \sim 0.25 \text{ mm}$ )、( $0.25 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$ )、( $0.5 \text{ mm} \sim 1 \text{ mm}$ )、( $1 \text{ mm} \sim 2 \text{ mm}$ )、( $2 \text{ mm} \sim 5 \text{ mm}$ )、( $> 5 \text{ mm}$ ) 分别为  $4.13\%$ 、 $6.20\%$ 、 $8.33\%$ 、 $14.03\%$ 、 $10.72\%$ 、 $41.31\%$  和  $15.28\%$ 。由于该试验土主要用于填筑路基,所以土壤中含有大量的大颗粒碎石、碎渣以保证路基的稳定性。土壤粒径( $> 2 \text{ mm}$ )的颗粒部分达到  $56.59\%$ ,而原地貌土壤粒径( $> 2 \text{ mm}$ )的颗粒部分质量不到  $10\%$ ,占比非常低<sup>[4]</sup>。

该试验采用自行研制的人工降雨模拟装置,实验过程中该装置降雨强度均匀且稳定。用可变角度的土槽来模拟高速公路边坡的土体坡面,该土槽参数为  $1 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ ,试验土壤的密度为  $1.79 \text{ g/cm}^3$ ,试验土壤的天然含水率为  $10\%$ ,与施工现场土壤的含水率非常接近。本次实验在重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室举行。

### 1.2 试验方案设计

为了更加接近现场路面的实际情况,对其土槽内部的填土情况进行分层填装,最底层为均匀分布  $10 \text{ cm}$  厚的碎石,碎石层上填装  $5 \text{ cm}$  的细沙,细沙

之上为本次试验土壤,厚度为  $20 \text{ cm}$ ,以满足本次模拟降雨过程的土壤中水分的自由渗透条件。在土槽内进行填土之前,需要确定每层土体的厚度以及填充土体的重量,待每层土体填装完成后,把土体压实至确定的厚度,继续填装下一层土体。在填装下一层土体之前需要将土壤表面用刀片将土壤打碎,目的是保证每层之间更好地接触,防止出现明显的分层现象。在填装过程中,需要保证土体含水量均匀,因此在填充土壤层之前,需要对土壤层的含水量进行测量并且配置。

### 1.3 数据采集与分析

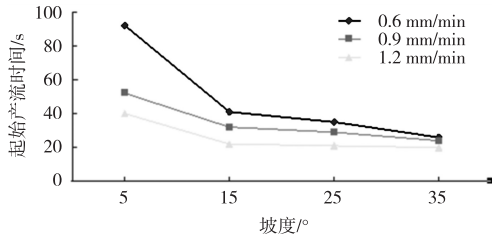
在实验开始前需要保证降雨量稳定,待降雨稳定一段时间后开始试验。同时记录降雨时间(即坡面产流时间),并观察坡面的变化。用径流桶接住坡面上流下来的水,把径流桶放在电子秤上同时记录流下水的质量,试验开始后,每隔  $1 \text{ min} \sim 2 \text{ min}$  记录坡面流下水的质量。试验时间为  $1 \text{ h}$ ,试验结束后,待接取的坡面上的水全部澄清后,将径流桶的上层清液吸取出来,然后将底层的混浊液倒在烧杯中,放入烘箱在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  的条件下烘干。

## 2 结果与分析

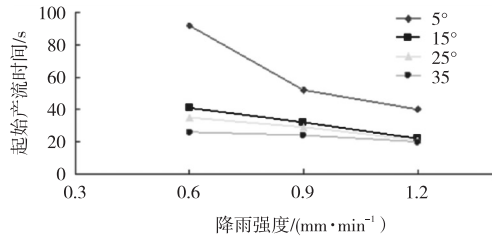
### 2.1 降雨强度和坡面坡度对坡面产流的影响

在其他外界条件相同的情况下,降雨强度和坡面坡度都会影响土体坡面的起始产流时间。在  $0.6 \text{ mm/min}$ 、 $0.9 \text{ mm/min}$ 、 $1.2 \text{ mm/min}$  降雨强度条件下,起始产流时间随坡度呈减小趋势,在同一降雨强度条件下,起始产流时间随着坡度增加呈减小趋势,其中坡度在  $5^\circ$  时,变化最为明显。同一坡度条件下,随着降雨强度的增大,产流时间提前,极差值也在不断缩小,由图 1 可知:起始产流时间随着土体坡度增大而减小,且在土体坡度一定时,降雨强度越大起始产流时间也越来越小;对比 4 种坡度可以看出,在同一降雨强度下,当土槽坡度大于  $15^\circ$  时,起始产流时间与降雨强度线性关系非常明显,

而当土槽坡度为 $5^\circ$ 时,线性关系不太明显。



(a) 坡度与起始产流时间关系



(b) 降雨强度与起始产流时间关系

图1 不同降雨强度下起始产流时间随坡度变化曲线

Fig. 1 The curve of initial runoff generation time with slope change under different rainfall intensity

综合上述实验结果还可以发现,降雨强度和坡面坡度都会影响土体坡面的起始产流时间。试验刚开始阶段,由于土壤的含水量没有达到饱和,雨水不断被吸收,所以地表无明显的径流产生。随着降雨试验的不断进行,雨水不断地渗入土壤中,土体含水量逐渐增大,由土壤上层至下层不断渗透,当降雨强度大于雨水在土壤中下渗的速率时,地表径流开始产生。当土体坡度一定时,起始产流时间不断减小,地表径流强度随着降雨强度的增大而增大;另一方面,在降雨强度一定的情况下,起始产流时间随坡度增大逐渐减小,从而反映出地表径流强度不断增大。

## 2.2 降雨强度和坡面坡度对坡面产沙量的影响

通过降雨试验得出,在其他因素保持一致的情况下,随着降雨的增强,对土壤的侵蚀作用越来越大,降雨强度越大,雨水的流量越大,从而雨水的速度和动能就越大,由于土壤结构物间充满细小的土壤颗粒,进而冲刷的土壤颗粒就越多,从而对土壤结构的破坏程度越大,对土壤的侵蚀就越多。

由此可见,坡面流量与水流速度都会影响对坡

面土壤的侵蚀,土壤中水流入渗量越小,坡面的水流速度就越大,从而对土壤的侵蚀就越多。根据图2所示,在同一坡度条件下,总产沙量随着降雨强度增大而增大。坡面总产沙量受降雨强度影响非常显著,但是增大土体坡度对坡面总产沙量的影响更加显著,当土体坡度一定时,降雨强度在 $0.6 \text{ mm/min} \sim 0.9 \text{ mm/min}$ 的范围内总产沙量增长幅度最大,降雨强度在 $0.9 \text{ mm/min} \sim 1.2 \text{ mm/min}$ 范围内总产沙量次之,以当土体坡面角度为 $15^\circ$ 时,降雨强度在 $0.6 \text{ mm/min} \sim 0.9 \text{ mm/min}$ 的范围内总产沙量从 $60.52 \text{ g}$ 增加到 $137 \text{ g}$ ,降雨强度在 $0.9 \text{ mm/min} \sim 1.2 \text{ mm/min}$ 的范围内总产沙量从 $137 \text{ g}$ 增加到 $148.29 \text{ g}$ 。由此可以表明,降雨强度增大,总产沙量呈增长趋势,但是总产沙量增长的速率随之降低。

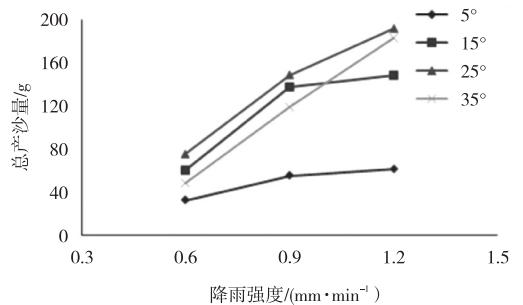


图2 总产沙量随降雨强度变化曲线

Fig. 2 The change curve of total sediment yield with rainfall intensity

坡面上的土壤侵蚀强度除了与降雨因素有关外,地面坡度的大小也是影响坡面土壤侵蚀的主要因素。本次室内模拟降雨试验在降雨强度一定的条件下,土体不同坡度对总产沙量的影响。由图3结果可知,在相同降雨强度条件下,土体总产沙量可分为3个阶段,坡度在 $5^\circ \sim 15^\circ$ ,在同一降雨条件下坡面产沙量增加较快,当坡度由 $15^\circ$ 增加到 $25^\circ$ 时,产沙量增加放缓,当土体坡度在 $25^\circ \sim 35^\circ$ 范围内,且产沙量随坡度增大而降低。在降雨强度一定的条件下,坡面土壤在降雨侵蚀作用下存在某一临界坡度。从本次试验结果来看,该临界坡度在 $25^\circ$ 附近。

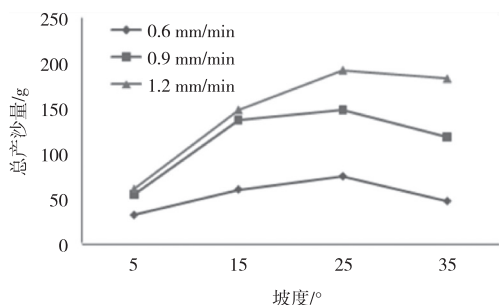


图 3 总产沙量随土体坡度变化曲线

Fig. 3 Change curve of total sediment yield with soil slope

### 2.3 坡面径流对产沙机理的影响

通过本次人工降雨模拟实验分析得出,土体坡面的产沙量在单位时间内并不是不变的,随着坡面产流的不断加大,地表径流的逐步趋于稳定,从而产沙量不断增加。在降雨强度相同条件下,随着坡度的增加,总产沙量也会随之增大,当土体坡面角度达到 25°时,随着坡度增加,坡面的总产沙量呈减少趋势。降雨强度和土体坡度对坡面的产流也产生很大的影响。该试验结果表明,当土体坡度一定时,起始产流时间不断减小,地表径流强度不断增大;另一方面,在降雨强度一定的情况下,随土体坡度的增大,地表径流强度呈缓慢递增趋势。

### 2.4 高速公路边坡的养护管理研究

高速公路边坡在施工结束后,各个构件还不稳定,混凝土还在加固过程中,为了保证混凝土强度的稳定以及高速公路边坡各个构件的稳定,需要对其进行一段时间的养护,从而保证高速公路边坡的安全性。包括边坡的定期检查,排水设施的清理,沟底损坏的修复,使得边坡的隐患降到最低。根据实践经验,植物的叶子、落叶均可以防止降雨对高速公路边坡的侵蚀<sup>[12]</sup>。对此,要对边坡进行一系列的养护措施:

- (1) 完善养护制度,对其养护条件进行监督;
- (2) 建立相应的养护管理台账,并且确保时刻有人进行执行;
- (3) 重视日常维护保养;
- (4) 在路基、路面、等施工区域,种植一定的植物来增加其防风固沙的能力,并且保持土壤的完整

性,防止降雨对高速公路边坡的侵蚀<sup>[13-14]</sup>;

(5) 建立完善的应急体系。边坡如果长期处于水的侵蚀作用下,水会降低边坡的强度,导致高边坡稳定性降低,因此要经常查水、定期清理、疏通边坡排水系统。高速公路边坡水土流失问题是威胁高速公路安全的一大隐患,应以预防为主,防治结合,共同对边坡进行养护以及对高速公路路基进行灾害治理,建立完善的应急体系。

## 3 结束语

降雨起始产流时间受降雨强度和土体坡度的影响非常大,在同一降雨强度下,当土槽坡度大于 15 时,起始产流时间与降雨强度线性关系非常明显,而当土槽坡度为 5°时,线性关系不太明显。试验结果表明:当土体坡度一定时,起始产流时间不断减小,地表径流强度不断增大;另一方面,在降雨强度一定的情况下,随土体坡度的增大,地表径流强度呈缓慢递增趋势。

通过对土体内的颗粒进行分析,水流运动过程中会受到孔隙压力、重力、水流阻力、土体颗粒与水的黏结力作用。通过分析土体坡面产沙过程得出,降雨强度对坡面总产沙量的影响非常显著,但是土体坡度对总产沙量有着很大的影响,当土体坡度一定时,降雨强度在 0.6 mm/min ~ 0.9 mm/min 的范围内总产沙量增长幅度最大,降雨强度在 0.9 mm/min ~ 1.2 mm/min 范围内总产沙量次之。坡面上的土壤侵蚀强度除了与降雨因素有关外,地面坡度的大小也是影响坡面土壤侵蚀的主要因素。当降雨强度一定时,总产沙量先随着坡度增大而增大,当土体坡度增大到 25°后,总产沙量随着坡度的增大而减少。说明土体存在某一临界坡度,达到这一临界坡度时,总产沙量呈下降趋势,该土体临界坡度在 25°左右。降雨强度对土壤侵蚀的临界坡度有一定影响,但两者具体变化关系需进一步研究。

加强对山区高速公路高边坡养护的研究,可以



提高高速公路边坡的强度,对制定高速公路边坡的防护措施具有重要意义。相关工作人员要对施工现场做好勘察研究,找到并分析影响高速公路强度的原因所在,比如施工方法、养护条件以及原材料的质量等。在此基础上,确定科学的高边坡的养护管理措施,对其养护条件进行监督,并且确保时刻有人进行执行,重视日常维护保养。

### 参考文献(References):

- [1] 程艳飞. 山区高速公路坡面水土流失机理与预测模型研究[D]. 重庆:重庆大学,2015  
CHENG Y F, Experimental Study on Soil Erosion and Prediction Model of Mountainous Highway Fill Subgrade Slope [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015 (in Chinese)
- [2] 郭廷辅. 世界水土流失现状及水土保持状况[J]. 成都水利,1998,12(3):62—65  
GUO T F. The Status of Soil Erosion and Soil Conservation in the World [J]. Chengdu Water Conservancy, 1998, 12(3):62—65 (in Chinese)
- [3] 程胜高. 高速公路环境评价与发展[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002  
CHENG S G, Environmental Assessment and Development of Expressway [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002 (in Chinese)
- [4] 杨超. 高速公路施工期边坡稳定性调查与防控措施[J]. 广东公路交通,2019,4(45):81—85  
YANG C, Investigation and Control of Slope Stability during Expressway Construction Period [J]. Guangdong Highway Communications, 2019, 4(45):81—85 (in Chinese)
- [5] 许梦飞,姜谔男,段龙梅,等. 考虑损伤渗流边坡稳定性数值离心加载法分析[J]. 岩土工程学报,2019(7):1—10  
XU M F, JIANG A N, DUAN L M, et. al. Centrifugal Loading Finite Element Method for Slope Stability under Damage-seepage Coupling Effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019(7):1—10 (in Chinese)
- [6] 苏初明. 植被混凝土在岩质边坡防护中的应用[J]. 工程设备与材料,2019(18):113—114  
SU C M. Application of Vegetation Concrete in the Protection of Rock Slope [J]. Engineering Equipment and Materials, 2019(18):113—114 (in Chinese)
- [7] 彭雪芹. 高速公路建设水土流失分析及水土保持研究[J]. 江西农业,2019(14):55—61  
PENG X Q. Analysis of Soil Erosion and Soil Conservation in Expressway Construction [J]. Jiangxi Agriculture, 2019(14):55—61 (in Chinese)
- [8] 马斌,张浩玉. 高速公路建设水土流失成因与水土保持策略核心探寻 [J]. 智能城市,2018(11):14  
MA B, ZHANG H Y. Core Exploration on Causes of Soil Erosion and Soil Conservation in Expressway Construction [J]. Intelligent city, 2018(11):14 (in Chinese)
- [9] 刘成. 水土保持监测在高速公路施工中的实施及成效探讨[J]. 公路交通科技,2016,12(1):51—54  
LIU C. Soil and Water Conservation Monitoring in Highway Construction Implementation and Effectiveness Discussion [J]. Highway Traffic Technology, 2016, 12(1):51—54 (in Chinese)
- [10] 江源. 道路生态影响与公路边坡植被恢复生态研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,2011  
JIANG Y. Study on Ecological Influence of Road and Vegetation Restoration of Highway Slope [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011 (in Chinese)
- [11] 武艳丽. 公路噪声环境影响评价的有效性分析[J]. 公路工程,2014,39(2):262—264  
WU Y L, Analysis of the EIA Effectiveness for Highway Noise [J]. Highway Engineering, 2014, 39(2):262—264 (in Chinese)
- [12] 王大为. 定西市生产建设项目水土流失分析及弃渣场防治措施研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2016  
WANG D W. Analysis of Soil Erosion in Production and Construction Projects in Dingxi City and Study on Prevention and Treatment Measures of Slag Dump [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [13] 傅涛. 三峡库区坡面水土流失机理与预测评价建模

[J]. 道路工程与桥梁, 2019(10):113

FU T. Mechanism and Prediction and Evaluation Modeling of Soil Erosion on Slope in Three Gorges Reservoir Area [J]. Road Engineering and Bridges, 2019(10):113 (in Chinese)

[14] 周森. 高速公路项目建设引起水土流失的原因及水土

保持对策[J]. 黑龙江水利科技, 2015, 43(10): 120—122

ZHOU M. Causes of Soil Erosion Caused by Expressway Construction and Countermeasures of Soil and Water Conservation [J]. Heilongjiang Water Conservancy Technology, 2015, 43(10):120—122 (in Chinese)

## Research on Water and Soil Erosion Mechanism and Their Protection Management for the Slope of the Expressway

LONG Qian

(Chongqing Urban Construction Investment Group Co., Ltd, Chongqing 400023, China)

**Abstract:** This paper conducted indoor simulation test on rainfall for filled soil slope of Liang-Zhong Expressway and analyzed the law for sediment and runoff generation under different slopes and different rainfall intensity. Results show that under 0.6mm/min, 0.9mm/min and 1.2mm/min rainfall conditions, the initial runoff time decreases with the change of the slope, when the soil slope is certain, the initial runoff generation time continuously becomes small, and the runoff intensity in the surface of the soil increases with the increase of rainfall intensity. When rainfall intensity is certain, the runoff generation time of the soil becomes smaller with the increase of soil slope, and the runoff intensity of soil surface continuously increases. The critical slope of the soil is about 25°. The rainfall intensity has certain influence on the critical slope of soil erosion, but the real change relation between the two needs to be further studied. Based on the research on water and soil erosion mechanism of the expressway slope, this paper analyzes the causes for water and soil erosion in expressway slope and points out the measures for scientifically protecting the slope of the expressway.

**Key words:** expressway; water and soil erosion; artificial rainfall simulation test; sediment

责任编辑:罗珊珊

引用本文/Cite this paper:

龙茜. 高速公路边坡水土流失机理与养护管理研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2020, 37(3):115—120  
LONG Q. Research on Water and Soil Erosion Mechanism and Their Protection Management for the Slope of the Expressway [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2020, 37(3):115—120