

铁路工程建设水土流失监测试验研究 ——以北同蒲增建二线改造项目太原至原平段为例

孙飞云, 杨成永, 黄新民, 刘世海, 薛 强

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要: 在北同蒲增建二线改造项目太原至原平段水土流失监测过程中, 根据建设责任区内的水土流失敏感点的土壤侵蚀特征采用了定点连续监测、定点定时监测和沿线调查三个不同层次的监测方法。铁路建设责任区域内的气象条件、土地利用形式和地形等水土流失影响因子的差异性导致了各水土流失敏感点的土壤侵蚀形式和特征的不同。项目建设期间产生的大型的裸露土体在侵蚀性降雨条件下其土壤特性变化明显, 增加了区域内的产沙量; 坡面土壤粒度的粗化和随机粗糙度的变化不一定会降低坡面上的面蚀强度。作为铁路建设重要工程主体的路堤和路堑的建设会改变区域内的产流、径流和渗流途径; 在稳定和适宜的工程防护下, 能够较好地控制开发建设项目径流产沙的增量。铁路建设中的水保设施本身的失稳也常常是增加产沙量的另一途径。

关键词: 铁路工程; 土壤侵蚀; 水土流失; 水土保持监测

中图分类号: S157.1; U 213.152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)01-0248-03

Monitoring on Soil and Water Conservation During the Construction of Railway Project

SUN Fei-yun, YANG Cheng-yong, HUANG Xin-min, LIU Shi-hai, XU E Qiang

(School of Civil Engineering & Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To carry out a monitoring on soil and water conservation at the section from Taiyuan to Yuanping in the project of Beitongpu second railway line located in Shanxi province, three monitoring schemes of different level, namely continuous measurement, periodic measurement and periodic reconnaissance, are employed according to the characteristics of soil erosion of the ground surface under study. Sampling and testing were done to the critical topographic units sensitive to soil erosion within the area subject to soil and water loss prevention. The climate conditions, types of land use and land topography along the railway line contribute to the diversity of styles and characteristics of soil erosion in those units. The precipitation comes in and is able to bring obvious change to the feature of bare soil that formed during construction. The change of granularity of the soil and the crust type of the ground surface do not necessarily help reduce the intensity of surface erosion on those lands. The construction of embankments and cuttings, which are main ingredients of the railway engineering, will inevitably influence the route of runoff and seepage, and increase sediment yields. However, proper means of engineering protection can help minimize the increment of soil erosion. The other reason augmenting soil erosion in engineering projects might come to be the instabilizing of the establishments of soil and water conservation themselves.

Key words: railway engineering; soil erosion; soil and water loss; monitoring on soil and water conservation

建设区域内的土壤侵蚀量和泥沙输移量的急剧增加是铁路建设项目对区域内地质和地表的扰动导致的直接的环境问题: 开发建设项目通过破坏地表原有的植被体系和土层, 使土体暴露于降雨和风化的外营力下, 导致降雨击溅强度的增加和风湿现象的严重; 从开挖面取出的土体在施工过程中松散的堆积在责任区域内, 在强降雨条件下, 防护措施没有发挥有效功能的弃土场内的泥沙输移量是建设项目进行前的几十倍乃至上百倍, 严重的影响了项目建设区域内的水系泄洪能力; 路堤路堑等砌体在上游汇水的冲刷下会显著的影响铁路运营的安全; 站场和施工期的临时用地在土壤侵蚀外营力的作用下也是导致区域内土壤侵蚀增加的直接因素之一。本文以北同蒲增建二线改造项目的水土流失监测过程为例, 介绍铁路

建设等线形开发建设项目的水土流失特征和土壤侵蚀状况, 同时也对项目建设区域内采取的水保措施进行功能评价。

1 研究区概况

北同蒲铁路是贯穿山西北部的一条重要的交通枢纽, 随着晋煤外运和客运的压力日益增加, 原有的单行线路已经很难满足需要; 同时, 旧的站场和线路也无法满足列车全面提速的压力要求, 因此对北同蒲铁路原平至太原段进行改建势在必行。本次北同蒲增建二线改造工程北起原平市向南经忻州市、阳曲县, 最后进入太原市, 线路全长 105.813 km。全线共有取土场 2 处, 弃土场 2 处, 采石场 1 处, 增建隧道 1 座, 大型的堑坡开挖面 2 处, 新建大桥 2 座。

收稿日期: 2005-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(基金号: 50409006)

作者简介: 孙飞云(1982-), 男, 在读研究生, 研究方向为交通建设生态评价。

改建项目线路经过忻定断陷盆地、舟山余脉及太原断陷盆地北端, 全线地形几乎全部以 SN 方向缓慢下降。地质构造从第三纪以来处于下降阶段, 新构造运动较活跃, 滹沱河两岸的山区遭到强烈的剥蚀, 致使盆地沉积的第四纪地层总厚度达到 400 m, 在山前形成较大的洪积扇及冲洪积倾斜平原, 冲沟的向源侵蚀亦较强烈, 造成沟谷不断下切。改建项目建设区域内属于中温带亚干旱气候区, 年平均降水量小于 500 mm, 且多集中于 7、8 月份, 年平均气温在 8.6~8.9。沿线原平至忻州段以砂质土为主, 忻州至北白段以黏质土为主。全线植被盖度不高, 按照海拔的高度由高向低呈明显的群落分布。

2 监测方案与研究方法

2.1 监测方案

按照水利部颁布的《水土保持监测技术规程》(SL 277-2002) 对整个改建线路进行三个层次上的监测: 定点连续监测、定点定时监测和沿线调查, 在此监测思路指导下调查整个沿线水土流失状况和水土流失敏感点的分布情况, 确定并布设定点连续监测点 1 处, 为大型排土场; 定点定时监测点 4 处: 分别为植被防护路堤, 高路堑开挖面, 大型取土场和大型采石场; 沿线调查对象主要是对于铁路沿线的路堑、路堤、隧道等在铁路运营阶段有无重力侵蚀现象。

2.2 水土流失因子的确定与监测方法

铁路建设项目责任区域内的水土流失影响因子主要包括: 降雨特征、气象条件、边坡因子、土壤特性、地面状况、地形因子、植被情况、工程防护措施功能发挥情况、土壤利用情况等。监测过程中主要的监测项目和方法见表 1。

表 1 监测项目和方法

影响因子	监测项目	监测方法	频率
气象因子	降雨量	雨量桶	每次降雨测定
	降雨强度	自计雨量计	
边坡因子	坡长和坡度	地面丈量法	每月
	土壤容重	重力法	
土壤因子	土壤粒度分布	粒度分析	每月
	土壤物理特性	常规物理方法	半年
地形因子	地面粗糙度	小区模拟法	每月(雨季酌加)
	地形分布	目测法	一年
植被因子	植被类型	现场调查	半年
	植被盖度	观测法	每月
土地利用形式因子		调查	
工程防护措施因子	林草措施	生态评价	每月
	工程措施	工程评价	每月

铁路建设责任区域在项目实施以后水土流失特征和土壤侵蚀量的变化情况依据监测数据在三个层次上进行评价, 同时, 结合各水土流失敏感点的特征, 在水蚀为主要侵蚀形式的区域内布设径流泥沙池和简易水土流失观测场, 以获得在降雨产流过程中项目责任区域内的泥沙输移量。具体监测方法见表 2。

表 2 监测方法

监测位置	监测方法	数目
定点连续监测点	路堑	径流泥沙池 5 个
	弃土场	简易水土流失观测场 3 处
		大型沟蚀测量
定点定时监测点	路堤	简易水土流失观测场 2 处
	取土场	简易水土流失观测场 3 处
	路堑	沟蚀测量
	采石场	重力侵蚀测量
沿线调查	线路沿线	重力侵蚀调查与测量

3 监测结果与分析

3.1 降雨资料

监测过程中, 根据谢云等人确定的黄土高原侵蚀性降雨标准^[5], 确定了各监测点降雨情况: 定点连续监测点在监测时段内共降雨 29 次, 降雨总量为 263.5 mm, 其中最大的降雨强度为 3.45 mm/min, 侵蚀性降雨有 7 次; 定点定时监测点在监测时段内共降雨 33 次, 其中侵蚀性降雨为 6 次, 最大降雨强度为 0.51 mm/min。根据监测结果, 约 90% 以上的产沙量来自于侵蚀性降雨过程, 特别地, 在定点连续监测点的最大降雨强度为 3.45 mm/min, 降雨历时 2 h 左右的特大暴雨中, 造成了监测点内几乎所有的重力坍塌和泥沙输移, 并直接导致了大量侵蚀切沟的极限发展。因此, 大型的线形开发建设项目开挖面的产沙量, 受到区域内土壤侵蚀主要外营力的极大作用和影响。

3.2 土壤特性结果与分析

监测时段内对水土流失敏感点的土壤特性进行了分析, 以对比在铁路建设期间内造成的裸露大型土体, 进行工程防护和植被防护的堑坡堤坡土体和对应位置的原地貌土体特性差异。土壤质地在外营力的作用下, 其容重和粒度分布改变较明显见图 1, 这两者的变化直接导致了土壤可蚀性的变化, 从而影响到建设项目区域内泥沙输移主要作用特征和数量的改变。土壤可蚀性是指土壤抵抗径流对其分散和悬浮的能力, 主要与土壤质地、结构、孔隙、剖面构造、土层厚度和土壤湿度有关。土壤的可蚀性和侵蚀特性随着土壤的组分和粒度差异有很大的不同, 同时随着土壤在降雨条件下的特性的改变, 其可蚀性和侵蚀特性的差异也很大。土体在降雨雨滴的击溅下的分离是泥沙输移的第一步, 土壤被分离后在径流的剪切力下又会产生进一步的携沙过程。这些过程都与土壤的聚合稳定性有很大的关系。铁路建设期间, 在裸露的开挖面和土体堆积面, 由于坡顶面蚀的进行, 土样粒度分布出现较大的变化, 土壤中 > 10 mm 的粒度百分含量明显增加, 而 0.25~0.075 mm 范围内含量明显降低。而在部分地区, 土壤中 > 10 mm 的大颗粒土体质量几乎占整体质量的 10% 左右, 地表粗糙度也明显增加, 小颗粒的砂土和黏土的质量百分比开始下降。这些土壤质地和结构的变化对铁路建设过程中产沙的大型的裸露土体平台位置土壤侵蚀方式和强度影响很大, 在大粒径土体坡面, 降雨径流汇水方向随着地表粗糙度的分布重新发展, 出现了新的细沟侵蚀雏形; 径流开始集中: 产流时间随着土壤粒径增加而降低, 但径流一旦产生, 其流态在大粒径土体之间产生紊流态, 其携砂能力和径流剪切力随之增加, 因此说, 大型裸露坡顶土壤粒度粗化并不一定会降低坡顶面蚀, 相反的, 在流态和汇水方向变化的情况下, 新的土壤侵蚀沟链会在雨季出现, 导致区域内土壤侵蚀形式的根本改变。

3.3 取土场和弃土场监测结果与分析

由于铁路建设属于线形建设项目, 其周边地形等环境条件差异较大, 因此, 影响责任区域内水土流失的地形因子、土地利用形式以及坡面和坡顶特征分布差异便很大。试验过程中, 只对主要的大型排土场、取土场和路堤所在区域内的诸多因子进行了考察。排土场和取土场都是铁路建设中较集中的堆积和开挖点, 其造成的裸露坡面和破坏的植被比较显著, 铁路改建项目进行完成后, 取土场表面在短期内部分被改变为民居宅基地, 部分改变为农业用地, 这种利用形式的变化很大程度上降低了原裸露坡面的产沙量, 对项目建设实施期间生态环境和土壤微环境的恢复起到了促进作用。弃土

场表面植被盖度在 3% ~ 10% 之间, 边坡坡度为 30~ 40°, 边坡坡长 8~ 13 m, 整个弃土场水平投影面积 31 475 m²。在项目建设中, 对弃土场边坡进行了部分浆砌片石防护, 但在整个试验过程中, 弃土场内的产沙量为 617. 23 t, 是建设项目以前区域产沙量的 7 倍。大型弃土场内的监测结果远远小于 F. B. S. Kaihura (1984) 等人报道的在坦桑尼亚热带地区裸露的地表土壤侵蚀模数比原地貌土壤侵蚀模数增大 380~ 1 100 倍^[6], 原因可能是地区之间的降雨强度、土壤特性以及工程技术等方面的差异造成的。

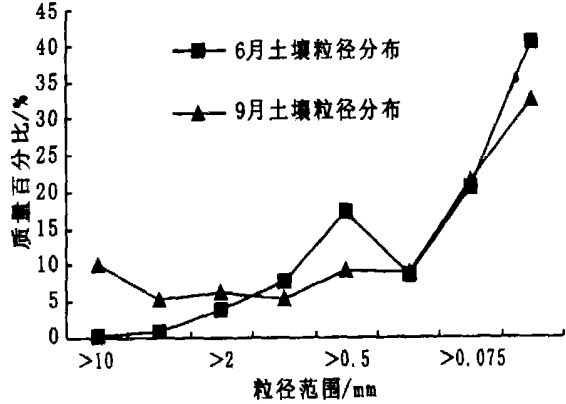


图 1 土壤粒径分布变化图
表 3 径流沉沙池部分监测结果

日期	径流沉沙池编号	降雨量 /mm	最大降雨强度 / (mm · min ⁻¹)	径流含沙率 / (kg · m ⁻³)
6 月 29 日	2#	13.40	0.080	1.10
	3#			0.57
	4#			0.53
	5#			0.90
	1#			1.50
7 月 29 日	2#	44.20	0.350	1.20
	3#			0.78
	4#			1.15
	5#			1.52
	1#			0.98
8 月 2 日	2#	21.90	0.420	1.08
	5#			1.24

在定点连续监测点布设径流沉沙池 5 处, 分别沿铁路线路分布于路堑堑坡脚处。进入沉沙池的泥水混合物主要来自于堑坡坡顶的封闭汇水区域。泥水混合物主要来源于两种形式: 坡面产流和坡顶渗流出流。部分监测结果见表 3。

由表得出: 径流沉沙池内的径流含沙率与降雨量和最大降雨强度相关性较差, 主要原因是径流沉沙池内的径流来源受到堑坡防护的影响, 而且不同高度的防护片石功能发挥差异较大, 当片石高度大于高坡顶高度时, 沉沙池内的泥沙混合物主要来自于高路堑泄水孔内的渗流出流; 而渗流出流流量和流速受到堑坡高度和坡度的影响。当片石高度小于上游平台高度时, 泥水混合物主要由上游降雨产流汇水组成, 此时的径流含沙率受堑坡影响较小, 使得该值与降雨条件的相关性较好。因此, 在铁路建设过程中的工程防护措施功能发挥的好

参考文献:

[1] 奚成刚, 杨成永, 许兆义. 铁路工程建设中水土保持问题的探讨[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 461- 464
[2] 王美芝, 杨成永, 许兆义. 路堤边坡土壤类型对水土流失影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 16- 19
[3] 郝芳华, 陈利群. 土地利用变化对产沙和产流的影响分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 5- 8

坏, 直接影响着区域内产流过程、径流和渗流的状态与途经。

3.4 其它水土流失敏感点结果与分析

铁路建设中, 路堤工程为主要的建设单元和水土流失敏感单元。路堤坡面的降雨产沙极大的影响着线路运营的安全。本次改建项目中的路堤主要集中在土壤侵蚀强度轻微的冲积平原地区, 路堤边坡在压实的基础上又采取了片石骨架护坡、林草防护和铺设土工网防护等措施。监测时段内, 在路堤边坡布设简易水土流失观测场, 用来确定路堤边坡工程防护措施发挥情况。监测结果显示, 路堤在降雨季节期间, 坡面植被盖度 40% 以上, 未出现侵蚀细沟, 有向粗糙度变化不大, 径流产流绝大部分入渗于工程和林草防护体系中。因此, 铁路路堤坡面较好的工程防护措施完全可以减少甚至避免路堤坡面产沙现象。

铁路沿线调查按降雨情况安排进行, 在改建全线的工程体系中, 重力侵蚀现象很少, 原因是铁路建设期间的取土和采石方式均按照阶梯式取土, 取土面边坡高度小于 3 m, 坡度在 30° 以下, 同时作出了压实和植被恢复的水保措施; 在铁路隧道部分, 开挖过程中产生的弃渣全部使用于沿线路堤的填料, 隧道内采用“人”字型排水沟排水, 功能发挥良好。但是, 在部分铁路工程主体, 由于砂浆缝隙开裂和浆砌片石的脱落, 导致降雨产流过程中径流流向的改变和流态的改变, 增加了防护部分的产沙量, 这种情况是其它的开发建设项目所没有的, 原因是铁路建设项目的工程主体在施工期结束后, 其工程防护和检修周期较长, 所以, 在铁路建设项目中, 关于这种原因导致的产沙量增加应该及时的补救, 以防事故和失稳现象的扩大化。

4 结 论

通过北同蒲增建二线太原至原平段水土流失监测, 可以得出以下结论:

(1) 铁路建设施工过程中主要的水土流失敏感点为路堤、路堑、取土场和弃土场等大型的开挖面和堆积土体。作为线形开发建设项目, 其水土流失监测方案应按不同的水土流失敏感点确定定点连续监测点、定点定时监测点和线路沿线的土壤侵蚀调查三个层次进行监测, 同时应考虑工程失稳带来的土壤侵蚀强度的增加。

(2) 区域内的气象条件、土地使用方式的变化极大地影响了项目责任区域内的产流量和产沙量。在项目建设结束后, 及时且因地制宜地改变水土流失敏感点的土地使用形式, 会促进项目区域内的生态恢复并减少项目建设带来的泥沙输移量的增加。

(3) 铁路建设过程中产生的大型裸露土体在侵蚀性降雨条件下, 其土壤特性会发生较大的变化, 使得土壤可蚀性受到影响, 进而改变裸露土体边坡和顶面平台的径流流态和途经。大型堆积土体表面由于面蚀造成的土壤表层厚度的减少和土壤粒度的粗化, 并不一定会减小土体平台的面蚀强度。

(4) 铁路堑坡防护会改变区产流、径流和渗流过程。铁路路堤在稳定和适宜的防护体系中, 其边坡上的产沙现象可以减少甚至避免。铁路建设中的水土保持设施由于砂浆脱落和片石开裂等原因导致的工程失稳现象是产沙量增加的又一途径。

满足设计要求。

3.6.3 抗倾覆稳定性验算

为保证加筋土挡墙抗倾覆稳定性, 须检算它抵抗墙身绕墙趾向外转动倾覆的能力, 用抗倾覆稳定系数 K_o 表示, 即对于墙趾总的稳定力矩 $\sum M_y$ 与总的倾覆力矩 $\sum M_o$ 之比:

$$K_o = \frac{\sum M_y}{\sum M_o} = \frac{399 \times 3.5 + 22.618 \times 7 + 58.188 \times 3.934}{73.50 \times 3.5 + 32.302 \times 1.412} = 5.92 > 1.5$$

满足设计要求。

3.6.4 地基应力验算

$$e = \frac{B}{2} - \frac{\sum M_y - \sum M_o}{\sum N} = -0.148$$

$$\sigma_{max/min} = \frac{\sum N}{L} (1 \pm \frac{6e}{L}) = \frac{78.84 \text{ kPa}}{50.6 \text{ kPa}} [\sigma] = 120 \text{ Pa}$$

满足设计要求。

4 设计中注意的问题

由于本工程的特殊性和复杂性, 在设计上特别注意了以下问题:

(1) 面板设计。加筋土面板是为阻止填料倒塌而设置, 本工程采用十字型面板, 混凝土强度等级 C20, 板厚取 20 cm, 按最小配筋率 $\mu_{min} = 0.2\%$ 配筋, 既满足受力要求, 同时又考

虑发生裂缝和水的冲刷。

(2) 填料选择对于位于河岸上的加筋土工程, 必须保证水稳定性好, 一般宜采用砂砾填料。同时应在墙面板后做好反滤设施。当墙前水陡降时, 迅速排除加筋体中和加筋体后方的水, 使墙内墙外的水位差不超过容许值, 不形成过大的剩余水压力, 同时加筋体的填料不被带出, 使墙顶产生塌陷或其他变形。

(3) 为了尽量减少面板对地基产生的压力, 确保面板不被破坏, 在墙面板下设置厚 100 cm、宽 100 cm 的 C20 混凝土基础。

5 加筋土挡墙和悬臂式挡墙的比较

此工程还有一个悬臂式挡墙方案, 但其在浸水地区的稳定性(自身稳定、整体稳定)较差, 而且断面尺寸小, 施工难度大。加筋土挡墙为柔性结构, 主要依靠填料与拉筋之间的摩擦力来平衡墙面所受的水平土压力, 较能适应地基的变形和差异沉降, 对地基承载力要求低, 特别在软地基上, 其安全稳定性比悬臂式挡墙等其他刚性结构高, 且造价低廉, 造价节省 20% 左右, 技术经济优势明显。

此外, 加筋土挡墙虽然设计简单, 但对施工的管理要求较高, 每一道工序和细部构造都可能关系到整个工程的安全与质量, 必须严格按照设计要求和技术规范施工。

参考文献:

- [1] 交通部第二公路勘察设计院 公路设计手册——路基[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996
- [2] 何光春 加筋土工程设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000
- [3] 李海光, 等 新型支挡工程设计与工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004
- [4] JTJ 015-91, 公路加筋土工程设计规范[S]
- [5] 周志刚, 郑健龙 公路土工合成材料设计原理及工程应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [6] 郑先昌, 王力忠 加筋土挡墙在填方高边坡中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2001, (5): 66-68

(上接第 250 页)

- [4] Bjoen Klove Erosion and sediment delivery from peat mines[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 45: 199-216
- [5] 谢云, 刘宝元, 章文波 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11
- [6] F B S Kaihura, I K Kullaya, M Kilasara, et al Soil quality effects of accelerated erosion and management systems in three eco-regions of Tanzania[J]. Soil & Tillage Research, 1999, 53: 59-70
- [7] R K Misra, P C Teixeira The sensitivity of erosion and erodibility of forest soils to structure and strength[J]. Soil & Tillage Research, 2001, 59: 81-93
- [8] 王礼先, 等 水土保持学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995

(上接第 270 页)

- [11] V imaniam SM, K L Sahraw at, J R Burford Physical and Chemical Properties of Vertisols and their Management [A]. Trans of 12th. Intern Cong of Soil Sci Symposium [C]. New Delhi, 1982: 80-92
- [12] McComack D E, Wilding L P. Soil Properties influencing swelling on Canfield and Geeberg soils[J]. Soil Sci Soc Am. Proc., 1974, 39: 496-500
- [13] Crescimanno G, Provenzano G. Soil shrinkage characteristic curve in clay soils: Measurement and prediction[J]. Soil Sci Soc Am. J., 1999, 63: 25-32
- [14] Parker J C, Amos D L. An evaluation methods of several methods of estimating soil volume change [J]. Soil Sci Soc Am. J., 1977, 41: 1060-1064
- [15] C Di Maio, L Santoli, Pschavone volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state[J]. Mechanics of Materials, 2004, 36: 435-451
- [16] Guido Musso. The role of structure in the chemically induced deformations of febe bentonite [J]. Applied Clay Science, 2003, 23: 229-237
- [17] S M Rao. The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils [J]. Engineering Geology, 2001, 60: 223-233