

砂黄土区路基下采空区地表移动变形规律研究

雷明轩¹, 刘国田¹, 苏卫卫^{1,2}, 张留俊^{1,2}, 尹利华^{1,2}

(1.中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710065;2.陕西省公路交通防灾减灾重点实验室,陕西 西安 710065)

摘要:中国砂黄土地区下伏大量采空区,极大地限制了砂黄土地区公路建设的发展。对于砂黄土地区路基下伏采空区的评价显得尤为重要。根据砂黄土地区公路下伏采空区的特点,基于FLAC^{3D}软件,选择合理参数建立路基下伏采空区模型。在砂黄土力学特性分析基础上,总结了路基下伏采空区地表移动变形参数的规律,进行地表移动变形区域辨识,并标识出砂黄土地区地表最危险区域的范围,为采空区公路选线和治理提供重要参考依据。

关键词:砂黄土;采空区;路基;地表移动变形规律

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

0 引言

在山西省、陕西省北部、内蒙古自治区等砂黄土地区分布着大量的煤矿采空区,随着经济发展、交通运输的需要和农用、民居、建设用地的限制,公路建设不得不从采空区通过^[1],采空区引起的地面塌陷问题极大地限制了公路建设的发展,因此对公路走廊内采空区的研究越来越受到国内外专家学者的关注。

近年来,随着数值分析模拟软件的发展,一大批学者基于Ansys、FLAC等数值模拟软件进行了采空区的研究,并取得了大量的成果。王生俊等^[2]根据采空区塌陷冒落带的力学特征,采用FLAC^{3D}软件对郑少高速公路下伏采空区剩余沉降量进行计算和评价;张志沛等^[3]采用有限元数值模拟方法对郑少高速下伏煤层采空区随采矿过程的变化规律进行了研究,分析评价了该高速公路修建后煤矿采空区的应力与变形特征,并对采空区的长期稳定性进行了评价预测;童立元等^[4-5]应用Ansys软件,全面分析公路与采空区二者之间相互作用与影响的基本规律;孙琦等^[6]采用FLAC^{3D}对某新建公路穿越浅埋采空区的情况进行数值模拟,得出了浅埋采空区影响下公路路基的沉降规律,分析了交通荷载、地下水与采空区耦合作用对路基稳定性的影响。目前对于采空区的

研究主要以地表沉降规律为主,对于地表移动变形规律较少涉及,而对于砂黄土地区采空区,拉张裂缝发育,加之砂黄土力学特性,除了沉降对路基影响较大之外,其余地表移动变形值对采空区上覆路基的稳定性影响显著。因此有必要对砂黄土地区路基下伏采空区的地表移动变形规律进行专门研究。

本文以内蒙古地区荣(成)一乌(海)高速公路采空区为例,采用FLAC^{3D}有限差分软件对砂黄土地区路基下伏采空区进行模拟分析,研究总结采空区的地表移动变形规律,并进行地表移动变形区域的划分,为采空区公路建设的规划和采空区优化处置提供科学依据。

1 模型与参数

1.1 路基下伏采空区地质模型

根据采空区的物探勘探资料,与拟建公路相关段采空区所在煤矿集中采煤时间始于1958年,终结于1979年,现已经停产,历史时期煤矿采用回采率较低的房柱式开采,采空巷道较稀,保留煤柱较密,保安煤柱距离约20 m开采煤系地层属古生代石炭二叠系月门沟煤系,开采层为B层,B层最大厚度可达13.27 m,局部最薄平均厚度为5.55 m,拟建公路通过层平均厚度10 m,其上覆地层主要为二叠系黄色中

收稿日期:2022-01-04

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2016YFC0802203)

作者简介:雷明轩,女,硕士,高级工程师.E-mail:leimx@ccroad.com.cn

粗粒砂岩,交错层理发育、平均层厚 45 m,表层为第四系砂黄土、拟建公路处平均层厚 20 m,具柱状节理,交错层不良。该处采空区与公路相交段平均长 150 m、宽 390 m,目前拟建公路通过处未见明显地表塌陷,但是周边区域有明显的地表塌陷,塌陷面积 $600\text{ m}\times 400\text{ m}$,最大塌陷深度达 5 m。根据采空区特点,本次模拟分析时,采空区地层自上而下依次为砂黄土、覆岩、煤层、基岩,厚度分别为 20 m、45 m、10 m、45 m,产状水平,采空区面积为 $390\text{ m}\times 150\text{ m}$,开采方式为房柱式,矿柱间距为 20 m,房柱尺寸为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$,房宽为 10 m。

煤层开采后,围岩应力进行重分布,采空区上覆岩层在自重作用下,产生向下的位移,当所受应力超过本身强度时,顶板岩层发生断裂、破碎、塌落,并填充采空区,冒落带上部的裂隙带岩层在自重作用下,继续产生裂隙、离层及断裂,但未破坏,裂隙带上部的弯曲带岩层则产生微小变形,强度稍有降低。自采空区向地表依次划分为冒落带、裂隙带和弯曲带^[7]。本模型冒落带高度为 25 m,冒落带以上的覆岩为裂隙带,表层松散黄土层为弯曲带(图 1)。

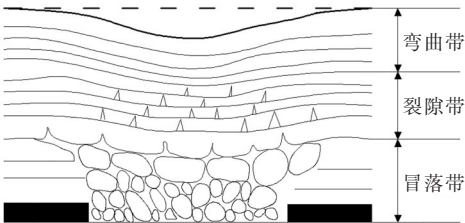


图 1 采空区覆岩破坏分带示意图

为研究路基对下伏采空区稳定性的影响,在采空区地质模型的基础上叠加了填方路基,路基宽度取 30 m,坡率 1:2,每 8 m 设置一级平台,平台宽 3 m,模型(不含路基)长 790 m,宽 450 m,高 120 m,长轴方向为路基纵断面方向,短轴方向为路基横断面方向,筑路后的模型如图 2 所示,短轴方向剖面图如图 3 所示。

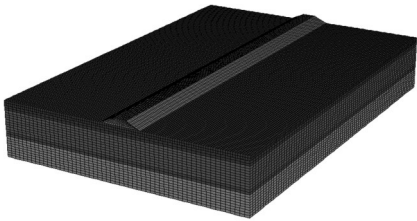


图 2 采空区三维地质模型

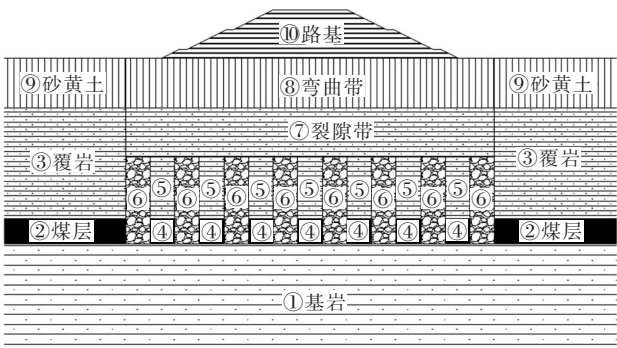


图 3 采空区的短轴方向剖面图

1.2 材料本构模型及参数

本文选用 Mohr-Coulomb 模型来模拟采空区岩土体的应力应变特性。根据现场物探和室内试验的结果,并参考相关地质资料^[2,8-10],综合考虑采空区三带强度折减,各地层的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 采空区三带及矿柱的物理力学参数

岩性	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模 量/MPa	剪切模 量/MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa
①基岩	2 500	5 341.0	3 316.0	43.0	3.400
②煤层	2 300	1 136.0	585.9	40.0	1.000
③覆岩	2 400	1 667.0	769.2	40.0	2.600
④矿柱(煤层)	2 255	227.3	117.2	31.0	0.200
⑤矿柱(覆岩)	2 345	333.4	153.8	36.0	0.520
⑥冒落带	2 100	21.0	10.0	30.0	0.050
⑦裂隙带	2 350	333.4	153.8	36.0	0.520
⑧弯曲带	1 810	16.7	12.5	20.1	0.013
⑨砂黄土	1 900	34.7	26.5	22.0	0.039
⑩路基	1 950	58.8	22.6	32.0	0.025

2 砂黄土区路基下采空区变形特点

在开采影响波及地表以后,受采动影响的地表从原有的标高向下沉降,从而在采空区上方地表形成地表移动盆地。描述移动盆地移动和变形的参数主要包括^[11-12]:

- (1) 地表下沉量:地表移动盆地内地表点移动矢量的垂直分量。
- (2) 地表水平位移量:地表移动盆地内地表点移动矢量的水平分量。
- (3) 地表倾斜变形量:由于地表相邻两点的不均匀下沉而产生的相对垂直位移。

(4) 地表水平变形量: 由于地表相邻两点的不均匀水平移动而产生的相对水平位移。

一般情况下, 采空区的变形主要以沉陷为主, 拉张裂缝危害不大, 因此稳定性评价大多仅考虑地表的下沉量, 地表的水平移动变形仅起到辅助参考的作用。对于砂黄土地区的采空区, 由于砂黄土具有弱胶结性, 黏聚力较小, 松散层抗拉强度较小^[13-14], 极易拉裂形成拉张裂缝, 加之黄土土质疏松, 渗透性强, 垂直节理发育, 水稳性差, 抗冲蚀能力弱, 雨季降水沿着拉张裂缝不断向下渗透、冲蚀, 一方面使下层黄土含水量增大, 强度降低, 抗变形能力减弱^[1, 15-16]; 另一方面, 由于黄土本身垂直节理发育, 在降水冲蚀和淘蚀作用下, 拉张裂缝继续发育^[17], 在垂直节理面上因节理切割形成竖向软弱面, 多个软弱面互相切割形成与周边围岩黏聚力很小的棱体, 在重力作用下棱体易塌落, 最终发生塌陷。因此, 黄土地区采空区往往拉张裂缝发育, 且沉陷与拉张裂缝伴生, 拉张裂缝的发育发展对于采空区的稳定性十分重要。在对黄土地区采空区进行稳定性分析与评价时, 除了对地表的沉陷进行重点研究之外, 对于地表的水平移动变形情况同样要着重研究。

3 砂黄土区路基下采空区地表移动变形规律分析

为了进一步研究砂黄土区路基下采空区地表移动盆地的移动变形规律, 根据模拟计算结果, 分别作地表移动盆地长、短轴方向主剖面的下沉曲线、水平位移曲线、水平变形曲线和倾斜变形曲线(图4~11)。据此获得地表移动盆地各点的移动变形值。

由图4~11可知:

(1) 地表下沉量为0的点即为地表移动盆地的边缘, 由此可以确定移动盆地的最外边界线。

(2) 地表水平位移从中心轴向外先增大后减小, 水平位移最大值与中轴线之间区域以压缩变形为主, 不产生拉张裂缝, 水平位移最大值外侧区域则以拉伸变形为主, 易产生拉张裂缝。因此水平位移最大位置即为压缩变形和拉伸变形的分界。

(3) 地表水平变形大于0的区域为拉伸区, 以拉张变形为主, 水平变形值越大意味着相邻位置水平位移越不均匀, 越容易出现拉张裂缝, 地表水平变形

值最大位置为最易出现拉张裂缝位置。

(4) 地表倾斜变形越大, 意味着相邻位置的垂向位移差越大, 即越容易出现垂直位错, 地表倾斜变形最大位置为最易出现垂直位错位置。

此外, 对于最易出现拉张裂缝位置和最易出现垂直位错位置之间的区域, 水平变形和倾斜变形均较大, 拉裂缝与垂直位错发育, 黄土内部的小棱体发育, 最易发生塌陷, 因此可以认为该区域是采空区地表最危险区域。

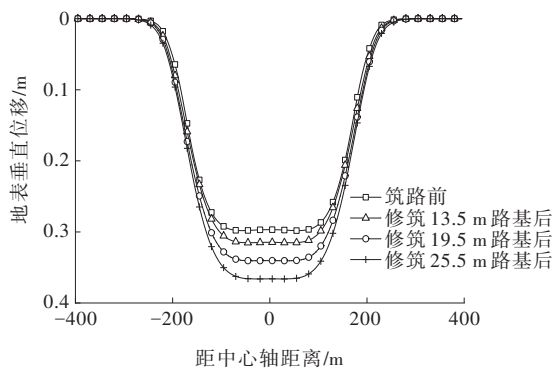


图4 筑路后地表移动盆地长轴方向主剖面下沉曲线

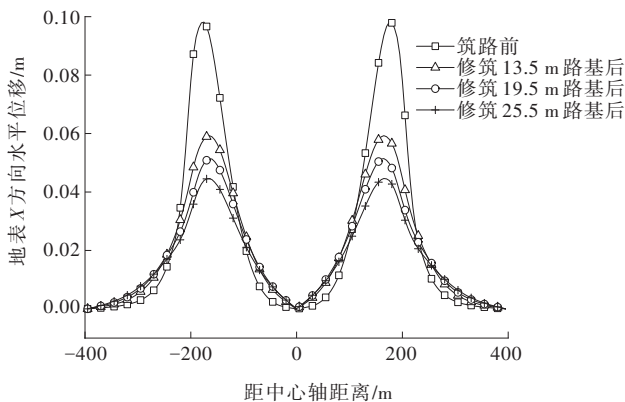


图5 筑路后地表移动盆地长轴方向主剖面X方向位移曲线

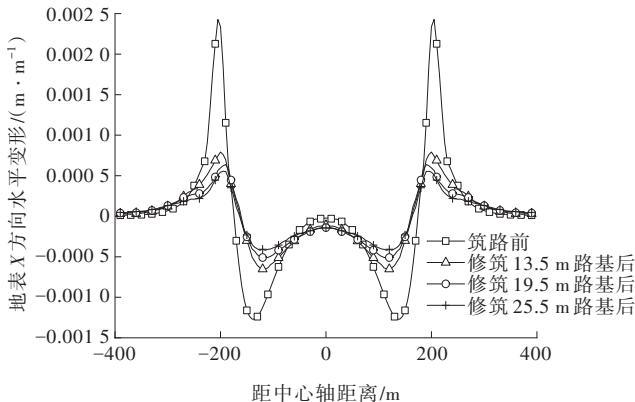


图6 筑路后地表移动盆地长轴方向主剖面X方向地表水平变形曲线

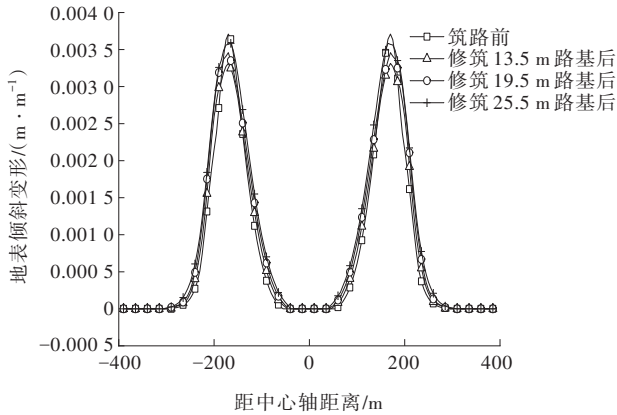


图7 筑路后地表移动盆地长轴方向主剖面地表倾斜变形曲线

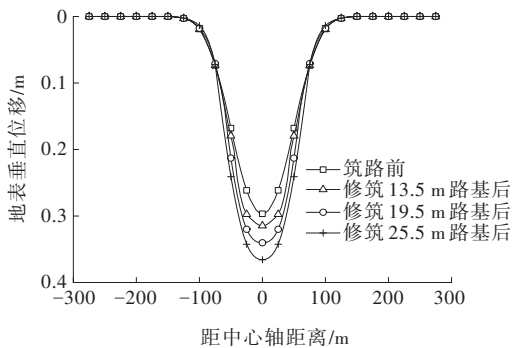


图8 筑路后地表移动盆地短轴方向主剖面下沉曲线

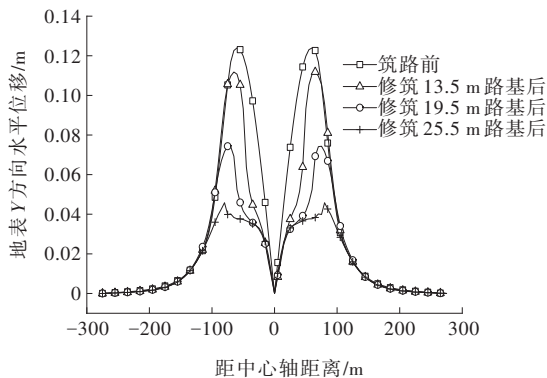


图9 筑路后地表移动盆地短轴方向主剖面Y方向位移曲线

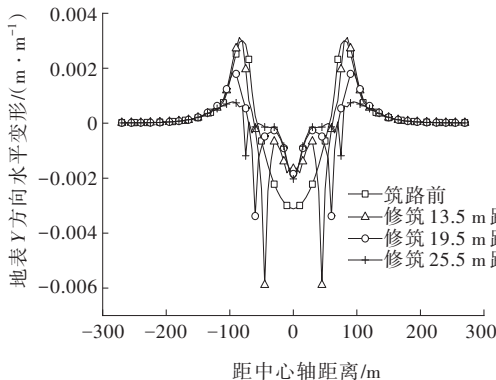


图10 筑路后地表移动盆地短轴方向主剖面Y方向地表水平变形曲线

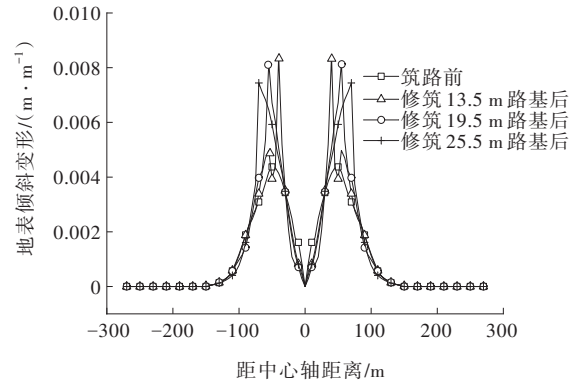


图11 筑路后地表移动盆地短轴方向主剖面地表倾斜变形曲线

基于对地表移动盆地变形规律的分析,进一步对地表移动变形区域进行划分标识(图12)。

由图12可知:图示均匀沉降区以均匀下沉为主,下沉量最大;虚线为拉伸区和压缩区分界线,拉伸区以水平拉张变形为主,易出现拉张裂缝,压缩区以向移动盆地中心的压缩为主,易出现下沉和垂直位错;最易出现拉裂缝位置与最易出现垂直位错位置之间区域是采空区最危险区域,即图示阴影区域。该图将采空区地表移动变形的规律清晰地展示出来,对于采空区上构筑物的布设、绕避和采空区处置具有重要的指导意义。

4 路基填筑对采空区地表位移变形的影响

对比图4~12可以发现,路基修筑后对采空区地表移动变形值的影响主要有以下几个方面:

(1) 路基修筑后,地表移动盆地范围增大,且与路基高度正相关。

(2) 路基修筑后,地表下沉量增大,且与路基高度正相关,与此同时均匀下沉区范围缩小,与路基高度负相关。

(3) 路基修筑后,路基横断面方向倾斜变形量增大,不均匀沉降增大,有利于垂直位错发育;但随路基高度增大,倾斜变形量减小,不均匀沉降减弱。

(4) 路基修筑后,地表水平移动值和水平变形值减小,且与路基高度负相关,不利于拉张裂缝发育。

(5) 路基修筑后,最易出现拉裂缝位置在公路纵断面方向内缩,在公路横断面方向外扩,且与路基高度正相关;最易出现垂直位错位置在公路纵断面方向基本不变,在公路横断面方向先内缩,后随着路基

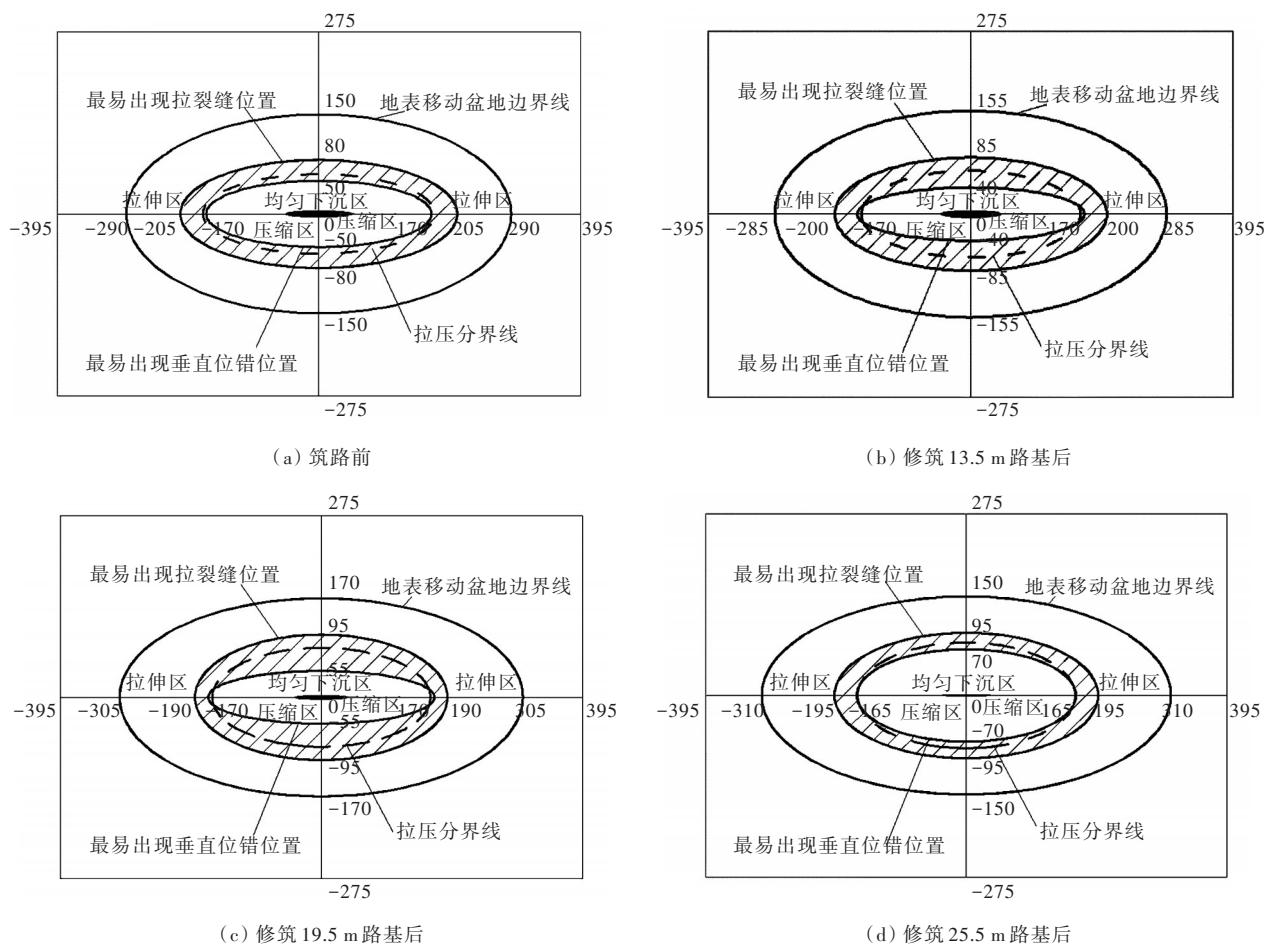


图 12 采空区地表移动变形区域划分图(纵、横坐标方向移动变形单位:m)

高度增大而外扩。

5 结论

本文在国内外相关研究的基础上,结合内蒙古砂黄土地区路基下伏采空区进行研究,得到以下结论:

(1) 应用FLAC^{3D}软件对砂黄土地区路基下伏采空区进行数值模拟,获得了不同高度路基下采空区的地表移动变形值。

(2) 通过对采空区的地表移动变形规律的分析,将采空区地表移动变形区域划分为均匀下沉区、压缩区和拉伸区,并提出砂黄土地区采空区地表最易出现拉裂缝位置与最易出现垂直位错位置之间区域是采空区地表最危险区域,基于此,对不同填土高度路基下伏采空区地表移动变形区域进行了划分。

(3) 通过对不同高度路基下伏采空区的地表移动变形规律的分析,总结了路基修筑及路基高度对采空区地表移动变形值和地表移动变形区域的影响

规律。

参考文献:

- [1] 孙建中.黄土学[M].上篇.香港:香港考古学会,2005.
- [2] 王生俊,贾学民,韩文峰,等.高速公路下伏采空区剩余沉降量FLAC^{3D}计算方法[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3545-3550.
- [3] 张志沛,刘旭,徐汉民,等.煤矿采空区注浆工程质量检测的试验研究[J].岩土工程学报,2005,27(5):604-606.
- [4] 童立元,赖远明,刘松玉,等.高速公路下伏多层倾斜采空区危害性评价数值模拟[J].工程地质学报,2007,15(1):114-118.
- [5] 童立元,邱钰,刘松玉,等.高速公路与下伏煤矿采空区相互作用规律探讨[J].岩石力学与工程学报,2010,29(11):2271-2276.
- [6] 孙琦,张向东,杜东宁,等.浅埋采空区对路基稳定性影响的数值模拟[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(2):127-131.
- [7] 王晖.青兰高速公路沿线北一八特采空区地表沉陷机理及其数值模拟[D].北京:中国地质大学(北京),2009.

塔克拉玛干沙漠复合型纵向沙垄顶部 高立式沙障防沙效应长久性探讨

金昌宁

(佛山科学技术学院,广东 佛山 528000)

摘要:以布设在塔克拉玛干沙漠腹地复合型纵向沙垄顶部的高立式沙障为对象,在多年对比观测的基础上,从长久性角度探究防沙效应。结果分析表明:除了公认的阻沙作用外,高立式沙障还有更为重要的“定沙”作用,即能将原来的沙丘整体性移动转变成只有落沙坡前移,迎风坡基本上被固定;即使被风沙掩埋,“定沙”作用仍然会长期存在,由此导致风沙运动规律明显地发生变化,造成落沙坡前移的速度越来越慢,平均运移速度从开始半年左右时约0.99 m/y,到16年后降至0.49 m/y左右。“定沙”作用不仅能大幅度延缓“沙丘前移,埋压公路”的时间,而且在沙害防治方面也具有极大的效率。因此,在流动性沙丘分布区的道路沙害防治体系中,高立式沙障是必不可少的,尤其是上风侧。

关键词:道路工程;高立式沙障;防沙效应;长久性;复合型纵向沙垄;塔克拉玛干沙漠

中图分类号:U416

文献标志码:A

0 引言

20世纪90年代初起,在塔克拉玛干沙漠,沙漠公路从无到有^[1],建设里程累计已超1 000 km,同时建成的机械防沙体系也是世界上规模最大的^[2]。机械防沙体系虽然规模巨大,可在技术领域进展缓慢^[3]。主要原因在于,体系造价低,即使因技术不尽完善导致防护成本上升,却增幅不大,从工程管理角度来

看,完全可以承受^[4-10]。但随着社会经济发展,世界上的沙漠工程建设越来越多,机械防沙体系的规模亦将越来越大^[11-13]。鉴于此,即使相关研究进步微小,也会有较大的经济效益及明显的社会与生态效益^[14-15]。

在塔克拉玛干沙漠公路沿线设置的“阻、固、输”相结合的、完整的机械防沙体系中,最外侧的高立式沙障(也称防沙栅栏等)主要起阻沙作用,以防止外侧来沙侵入到内侧的固沙带中^[1,3]。基于此,专业人

- [8] 杨利民,郭进军,韩易辰,等.下伏采空区对路基稳定性的影响研究[J].郑州大学学报,2018,39(1):42-46.
- [9] 武崇福,刘东彦,方志.FLAC^{3D}在采空区稳定性分析中的应用[J].河南理工大学学报,2007,26(2):136-140.
- [10] 张飞,刘德峰,王滨,等.FLAC在采空区稳定性分析中的应用[J].有色金属,2013,65(2):28-39.
- [11] 何国清,杨伦,等.矿山开采沉陷学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1991.
- [12] 邹友峰,邓喀中,马伟民.矿山开采沉陷工程[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [13] 唐亚明,冯卫,李政国.黄土滑塌研究进展[J].地球科学进展,2015,30(1):26-36.
- [14] 张永双,曲永新.陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J].工程地质学报,2005,13(1):18-28.
- [15] 谢定义.试论我国黄土力学研究中的若干新趋势[J].岩土工程学报,2001,23(1):3-13.
- [16] 张永双,曲永新,何锋.陕北砂黄土区公路地质灾害与防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):35-38.
- [17] 王兵,杨为民,王辉,等.路基下煤矿采空区地表塌陷特征及其形成机理[J].公路,2007,52(10):101-105.

收稿日期:2022-06-25

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(编号:200131879709)

作者简介:金昌宁,男,博士,研究员.E-mail:xjjcnalt@163.net