

文章编号:1671-8879(2008)04-0035-04

## 采动区公路路基和路面的协同作用模型

余学义,赵兵朝,李瑞斌

(西安科技大学 能源学院,陕西 西安 710054)

**摘要:**针对开采引起地表沉降对高等级公路的危害,分析了地下开采引起地表移动变形规律,建立开采引起公路路基与路面的协同作用理论模型,确定了起关键作用的协同作用参数,分析了开采影响区的路基与路面协同作用的关系,并简要地分析了应用协同作用计算理论进行矿区公路设计和保护开采的方法。结果表明,通过改变开采方法和改进结构,能够有效地减小采动对公路的影响。

**关键词:**道路工程;开采影响区;路基;路面;协同作用

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

### Synergy action model of highway subgrade and pavement in mining area

YU Xue-yi, ZHAO Bing-chao, LI Rui-bin

(School of Energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** According to the damage character of highway by surface subsidence due to underground mining, this paper analyzed the rules of earth surface movement and deformation, sets up the synergy action model of subgrade and pavement of highway, confirms the synergy action parameters, solves the synergy action relation of subgrade and pavement in influence area by mining, and briefly introduces the method of applying synergy action calculation model to design highway and protect mining in mining area. The results indicate that this method can effectively reduce mining influence on highway by changing mining method and improving the structures of subgrade and pavement. 2 figs, 8 refs.

**Key words:** road engineering; influence area by mining; subgrade; pavement; synergy action

## 0 引言

矿区公路特别是高等级公路受沉陷区或开采影响破坏已成为矿区公路安全运行中需要解决的一个重要问题,如在已建成的太原—旧关、徐州—连云港、晋城—焦作、西安—铜川等高等级公路部分通过采空区段,公路已遭受较为严重的损坏,这些损坏以路面开裂为主要特征。矿区公路保护应从 3 个方面入手:一是对已有的采空区进行详尽的勘测与处治,

这一方面已经通过大量的工程实践<sup>[1-4]</sup>,取得一些可借鉴的方法;二是应用特殊开采方法,减小开采引起的地表移动变形量;三是依据开采引起公路路基、路面的协同作用关系,进行特殊路基路面结构设计,提高公路抗变形能力。关于开采引起地表移动变形的预测在中国已形成较为完善的理论方法体系<sup>[5-7]</sup>,然而公路是一种特殊的线性构筑物,从形状、结构和保护的要求方面与一般的建筑物下开采有很大的差异,即使应用特殊开采技术(限高开采、充填开采、协

收稿日期:2007-08-08

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2003E206)

作者简介:余学义(1955-),男,陕西定边人,教授,博士研究生导师,E-mail:yuxy@xust.edu.cn。

调开采等)也难以达到保护的要求。在采用了特殊开采技术后,危害高等级公路的主要是地表的水平变形(包括已开采空区的剩余水平变形和将要开采形成的水平变形),水平变形将引起公路路面的开裂,公路路面的开裂变形在雨水侵蚀、冻结膨胀、运行车辆加载等作用下,将加速路面破坏,降低公路服务年限,对公路危害极大。为此,本文根据采动公路路基、路面协同作用原理,建立协同作用理论模型,给出协同作用的关键参数,并分析这些关键参数与采矿、地质及路基、路面结构间的关系,为矿区高等级公路设计、保护提供依据。

## 1 模型的建立

### 1.1 基本假定

假定开采区为半无限工作面开采,公路为各向同性的无限长线性建筑物,公路路面的横断面积为  $S(\text{m}^2)$ ,公路路基岩土层沿轴线方向的弹性系数为  $k_1$ 。以开采区引起地表半盆地移动变形区为影响范围,开采深度为  $H(\text{m})$ ,主要影响范围角为  $\beta$ ,公路轴线与开采工作面间平面夹角为  $\alpha_0$ 。开采引起地表(公路路基)水平移动必然引起公路路面的水平移动,其分布关系如图 1 所示,二者可以近似地表达为

$$u_1 = \frac{u_{1\max}}{2} [1 + \cos(\pi\xi)] \quad (1)$$

式中:  $u_1$  为路基水平移动;  $u_{\max}$  为路基最大水平移动值;  $u_{1\max} = u_{\max} \sin(\alpha_0)$ ;  $\xi = \frac{x_1}{r_1}$ ;  $r_1 = \frac{r}{\sin(\alpha_0)}$ ;  $r$  为主要影响半径,  $r = \frac{H}{\tan(\beta)}$ ;  $x_1$  为距工作面开切眼的推进距离。

式(1)接近于开采下沉盆地的计算公式<sup>[8]</sup>,即开采引起地表下沉导致的地表水平移动克服路基与路面间的摩擦力后传递给公路路面,公路路面发生弹性水平移动的二维平面表达式。开采引起公路路基的非均匀水平移动,克服路基与路面间的摩擦力,在路基路面间产生决定路基路面承载能力的水平剪应力  $\tau$ ,这种水平剪应力将产生沿路面内部轴线方向的附加拉伸、压缩应力  $\sigma$ ,以及弹性水平移动  $\bar{u}$  (在零下低温条件下沥青或水泥路面处于弹-脆性状态),如图 1 所示。

### 1.2 公路路基与路面间的水平移动协同作用模型

水平剪应力  $\tau$  值直接取决于公路路基、路面的水平移动值及其路基土层的物理力学性质,但不超过极限值  $\tau_g$ ,  $\tau_g$  值可由路基岩土的挤压强度试验确定。由图 1 可知,沿路面轴向断面的移动变形特征为:

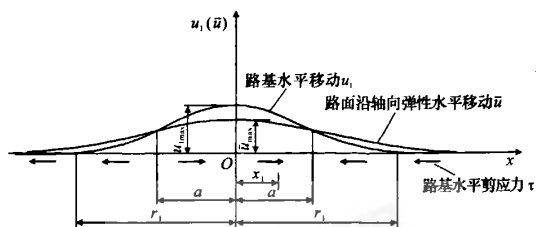


图 1 路基水平移动与路面沿轴向弹性水平移动分布形态

在  $|x_1| < a$  范围,  $\tau$  的方向与开采地表移动的方向一致;在  $|x_1| > a$  范围( $a$  见图 1 所示),  $\tau$  的方向与开采地表移动的方向相反;在  $x_1 = \pm a$  位置,开采引起地表的移动值与路面的移动值相等。根据系统平衡原理,开采引起公路路基及路面的水平移动为  $u_1$  和  $\bar{u}$ ,二者引起沿路基断面内的剪应力的总和为 0,即出现在沿路基轴线方向的水平剪应力  $\tau$  的和为 0,可以表示为

$$\int_l \tau dx_1 = 0 \quad (2)$$

式中:  $l$  为开采影响的路基长度(m)。

式(2)为  $\tau$  的自平衡方程,根据图 1,由式(2)可以计算  $x_1 = \pm a$  位置的  $\tau$  值。

按照 Winkler 地基弹性方程,可确定  $\tau$  值为

$$\tau = k_1(u_1 - \bar{u}) \quad (3)$$

根据弹性移动变形原则,式(3)的边界条件为

$$u_1 - \bar{u} \leq u_g$$

式中:  $u_g$  为地基处于塑性工作状态的边界值,地基处于这种塑性状态,将限制在地基应力计算中应用 Hook 弹性准则。

以上边界条件是由路基与路面间的摩擦力与粘结力决定的,在确定的条件下,路基具有固定的剪应力  $\tau_g$ ,即使  $u_1$  继续增加,  $\tau_g$  保持恒定,可以表述为

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_g \\ u_1 - \bar{u} &\geq u_g \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中:  $k_1$ 、 $u_g$  均为路基弹塑性特征值参数,其首先取决于路基岩土的种类和密实程度。随着路基岩土密实程度的增加,参数  $k_1$  值随之增加,同时参数  $u_g$  值减小。

路面内剪应力和正应力可以由图 2 来确定。根据 Hook 准则,路面内的正应力  $\sigma$  与水平变形  $\epsilon$  的关系式为

$$\sigma = \epsilon E_n \quad (5)$$

式中:  $E_n$  为路面弹性模量,在  $0^\circ\text{C}$  以下时为定值。

根据图 2,可以得出水平变形的计算公式为

$$\epsilon = \frac{\bar{u} + d\bar{u} - \bar{u}}{dx_1} = \frac{d\bar{u}}{dx_1} \quad (6)$$

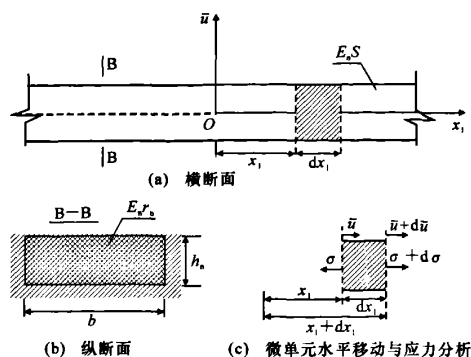


图2 路基路面应力计算

注:  $S$  为路基横断面面积,  $S = b h_n$ ;  $b$  为路面宽度;  $h_n$  为路面高度;  $r_1$  为路面密度。

将式(6)代入式(5),再对  $d\bar{u}/dx_1$  取导数,得到路面轴向断面弹性水平移动的二次微分方程为

$$\frac{d^2 \bar{u}}{dx_1^2} = \frac{\tau}{E_n \lambda} \quad (7)$$

式中:  $\lambda$  为路基、路面间的摩擦系数。

式(7)给出了开采影响路基与路面间的协同作用关系式,但是该表达式是一个接近于实际的近视关系,路基、路面的真实应力具有非线性变化特征。式(7)的解取决于对  $\tau$  的表达形式,由式(3)和式(7)可以得出弹性路基的非线性微分方程为

$$\frac{d^2 \bar{u}}{d\xi^2} - k^2 \bar{u} = -k^2 u_1 \quad -1 \leq \xi \leq 1 \quad (8)$$

式中:  $k = r_1 \sqrt{\frac{k_1}{E_n \lambda}}$ 。

解微分方程式(8),可得

$$\bar{u} = A e^{k\xi} + B e^{-k\xi} + \frac{u_1}{2\alpha} \left[ 1 + \frac{\cos(\pi\xi)}{1 + (\pi/k)^2} \right] \quad (9)$$

式中:  $\alpha, k$  均为无量纲理论参数;  $\alpha = u_g/u_{1\max}$ ;  $A, B$  为根据特定的条件确定的定积分。

### 1.3 采动引起公路路基、路面协同作用应力变化模型

在确定了采动引起路面沿轴线方向的水平移动计算模型后,就可以通过分析推导得出在开采影响下沿公路轴线方向的正应力  $\sigma$  (拉伸应力、挤压应力)及路基的水平剪应力  $\tau$ ,其表达式为

$$\sigma = \frac{E_n d\bar{u}}{r_1 d\xi} \quad (10)$$

$$\tau = \frac{E_n \lambda d^2 \bar{u}}{r_1^2 d\xi^2} \quad (11)$$

## 2 采动区路基、路面协同作用分析

式(9)~式(11)表达了采动引起的地表移动变形通过路基传递给路面,引起路面沿轴线方向的水平移动和附加应力协同作用的计算模型。在模型中

无量纲理论参数  $\alpha, k$  是决定采动引起公路路基与路面协同作用的关键参数,在此将其定义为协同作用参数。参数  $k$  具有特定的物理力学意义,在路基轴线剖面方向弹性水平移动系统中,影响参数  $k$  值的主要因素为:弹性系数  $k_1$ ;路面横断面与路基有效接触部分的摩擦系数  $\lambda$ ;水泥沥青路面在低温条件下的弹性模量  $E_n$ ;采动主要影响半径  $r$ ;开采工作面与公路轴线方向的平面夹角  $\alpha_0$ 。 $\alpha$  为开采地质状况、采矿条件、开采方法等因素与公路路面弹性范围限定条件有关的参数。

由采动区路基和路面协同作用计算模型分析可知,在矿区公路设计中应从两个方面进行分析计算。

(1) 分析开采影响区的开采地质、采矿条件,应用相应的减小开采引起地表移动变形的控制开采方法,如协调开采、部分开采、采空区充填开采、覆岩离层充填减沉等开采方法,这些方法能够有效地减小地表移动变形量,即增大协调作用参数  $\alpha$  值。

(2) 改变公路路面结构,例如:路面应用 SBS、SBR 改性沥青技术;在半刚性基层顶部与路面层间铺设玻璃纤维网或预切缝后设置玻璃纤维格栅;在半刚性基层底部与路基粘土层间铺设滑动层。这些方法能够有效地减小  $\lambda$  值,增加  $u_g$  值,达到增大协同作用参数  $\alpha, k$ ,减小公路路面水平移动变形的目的。

## 3 结 语

(1) 分析地下开采引起地表移动变形规律和公路路基、路面结构特点,建立开采引起公路路基与路面的协同作用理论模型,给出了分析采动区路基与路面协同作用的应力应变计算式,为采动影响区的公路设计奠定了理论基础。

(2) 通过分析路基与路面协同作用的影响因素,定义了公路路基与路面的协同作用理论参数  $\alpha, k$ ,同时分析了地质条件、采矿方法、公路路基、路面结构及力学特性对这些参数的影响。

(3) 根据公路路基、路面协同作用原理,给出了在采动影响区的公路设计中应用协同作用理论的方法和思路。

(4) 在采动区应用路基、路面协同作用理论,确定合理的采矿方法、路基路面结构,对矿区高等级公路设计与公路下的保护开采具有重要的应用价值。

### 参考文献:

### References:

- [1] 孙忠弟. 高等级公路下伏空洞勘探、危害程度评价及

- 处治研究报告集[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [2] 邢玉东,杨 昊. 锦州至阜新高速公路煤矿采空区处治设计[J]. 东北公路,2001,24(4):11-13.  
XING Yu-dong, YANG Hao. The design to dispose empty coal mine area in the expressway from Jinzhou to Fuxin[J]. Northeastern Highway, 2001, 24(4): 11-13.
- [3] 王茂文. 京珠高速公路未宜段下伏采空区的处理[J]. 中南公路工程,2001,26(2):16-18.  
WANG Mao-wen. Gob disposal under Jingzhu expressway in Lei-yi [J]. Central South Highway Engineering, 2001, 26(2): 16-18.
- [4] 余学义,赵兵朝,党天虎,等. 滑坡区下煤层控制开采与综合治理[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(1):67-70.  
YU Xue-yi, ZHAO Bing-chao, DANG Tian-hu, et al. Control mining and synthesis management under landslide area [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2006, 26(1): 67-70.
- [5] Yu X Y, Zhao B C. The control of mining damage in China[J]. International Mining Forum, 2004 (1): 235-240.
- [6] 李白英. 开采损害与环境保护[M]. 北京:煤炭工业出版社,2004.
- [7] 徐乃忠,孟庆坤. 地表沉陷控制新途径[J]. 煤矿开采,2004,9(1):10-11.  
XU Nai-zhong, MENG Qing-kun. New way to control surface subsidence [J]. Coal Mining Technology, 2004, 9(1): 10-11.
- [8] 郭文兵,邓喀中,邹友峰. 岩层与地表移动控制技术的研究现状及展望[J]. 中国安全科学学报,2005,15(1):6-10.  
GUO Wen-bing, DENG Ka-zhong, ZOU You-feng. Research progress and prospect of the control technology for surface and overlying strata subsidence [J]. China Safety Science Journal, 2005, 15(1): 6-10.

(上接第 34 页)

- [3] 王广月,马华月,刘 健. 路基膨胀土胀缩等级的物元可拓识别模型[J]. 公路交通科技,2005,22(11):30-33.  
WANG Guang-yue, MA Hua-yue, LIU Jian. Matter element extension model of expansive soils' expansive scale in embankments [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(11): 30-33.
- [4] 汪明武,金菊良,李 丽. 可拓学在膨胀土胀缩等级评判中的应用[J]. 岩土工程学报,2003,25(6):754-757.  
WANG Ming-wu, JIN Ju-liang, LI Li. Application of extension method to the evaluation of the grade of shrinkage and expansion for the expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 754-757.
- [5] 蔡 奕,王宝军,施 斌,等. GIS 环境下膨胀土胀缩等级的模糊数学评判[J]. 工程勘察,2002(2):1-4.  
CAI Yi, WANG Bao-jun, SHI Bin, et al. To judge the swell and shrink grades of expansive soil under GIS environment by fuzzy mathematics [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2002(2): 1-4.
- [6] 陈宇亮,赵胜伟,李雪莲. 基于 MATLAB 的膨胀土胀缩等级评定模糊决策系统[J]. 中南公路工程,2006,31(3):140-142.  
CHEN Yu-liang, ZHAO Sheng-wei, LI Xue-lian. A fuzzy decision system for assessing the swell and shrink grades of expansive soil based on a MATLAB-FIS toolbox [J]. Central South Highway Engineering, 2006, 31(3): 140-142.
- [7] 杨果林,丁加明. 膨胀土路基的胀缩变形模型试验[J]. 中国公路学报,2006,19(4):23-29.  
YANG Guo-lin, DING Jia-ming. Model test on expansion and shrinkage deformation in expansive soil roadbed [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 23-29.
- [8] 刘 悦,黄强兵,胡长顺. 基于模糊信息优化处理法的膨胀土分类[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(1):15-19.  
LIU Yue, HUANG Qiang-bing, HU Chang-shun. Classification of expansive soil based on fuzzy information optimization disposal [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1): 15-19.
- [9] Miller C J, Yesiller N, Yaldo K. Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(9): 733-742.