

文章编号: 1001-1986(2013)01-0040-06

老采空区地表剩余变形对城市轨道交通的影响评价

马路兴, 吴朝阳, 高艳卫

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 为了评价煤矿老采空区地表剩余变形对城市轨道交通稳定性的影响, 针对徐州轨道交通规划 1 号线, 应用概率积分法建立闭合矩形积分模型, 选取合理的计算参数, 计算了研究区的地表剩余移动和变形。根据计算结果, 绘制了地表剩余移动和变形等值线图, 另外, 分别绘制了纵向和横向的剩余移动变形沿着线路轴线的变化曲线。根据城市轨道交通地基变形控制指标, 对老采空区地表进行了稳定性分区, 并分析了地表剩余变形对线路稳定性的影响。结果表明: 研究区内存在非稳定区; 在非稳定区, 横向的剩余变形均小于允许值, 而纵向的剩余变形大多超过允许值, 必须进行有效的工程措施确保线路安全。

关键词: 煤矿老采空区; 地表剩余变形; 概率积分法; 稳定性评价

中图分类号: P642.26; P642.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2013.01.008

Evaluation of the influence of residual deformation above mined-out area on the stability of urban rail transit

MA Luxing, WU Chaoyang, GAO Yanwei

(School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to evaluate the stability of urban rail transit on coal mined-out area influenced by surface residual deformation, according to Xuzhou Rail Transit Line 1, the closed rectangular integral model was established based on probability integral method. After choosing the reasonable computation parameters, the surface residual movement and deformation in the study area were calculated. As a result, the surface residual movement and deformation contours were given. Besides, the curves of transverse and longitudinal movement deformation along the line axis were drawn respectively. According to the limitation of urban rail transit foundation deformation, the study area above coal mined-out area was divided into stable zone, unstable zone and very unstable zone. The influence of the surface residual deformation on rail lines was analyzed. The results indicate that the transverse residual deformations are less than allowable value in the unstable zones, but the longitudinal residual deformations exceed allowable value. Effective engineering measures should be taken to ensure the safety of the line.

Key words: coal mined-out area; surface residual deformation; probability integral method; stability evaluation

城市轨道交通属运量大、速度快、舒适性高、服务年限长的高等级交通线路, 对地基变形和稳定性的要求比一般建(构)筑物高。煤矿老采空区的存在常会引起岩层移动, 造成地表拉裂、隆起、倾斜、扭曲, 形成地表阶梯状、漏斗状塌陷坑等^[1], 给城市轨道交通造成巨大危害。

目前, 很多学者应用概率积分法研究了采空区地表移动变形^[1-2], 但其中针对老采空区地表剩余移动变形及稳定性的研究不够。余学义^[3-4]进行了概率积分法剩余变形计算的研究, 建立了预计采空区地表剩余移动变形的方法及通用数学模型。采空区稳

定性评价常用方法是, 先计算采空区地表的剩余移动变形, 再根据工程构筑物对地表变形的要求, 最终确定采空区的稳定性^[4-8]。

本文应用概率积分法, 以徐州轨道交通规划 1 号线为例, 计算煤矿老采空区地表剩余变形, 并评价其对城市轨道交通稳定性的影响, 为选择合理的线路方案、采取有效的工程措施、确保线路安全提供依据。

1 工程及地质概况

徐州轨道交通规划 1 号线全长 31.9 km, 是徐州

收稿日期: 2012-03-10

作者简介: 马路兴(1989—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 从事煤矿水文地质工程地质方面的研究。

主城区东西向的骨干线路。西部停车场到“杏山子工业园”站要穿越卧牛山矿采空区, 目前有 3 条线路方案, 即线路 1、2、3, 见图 1。

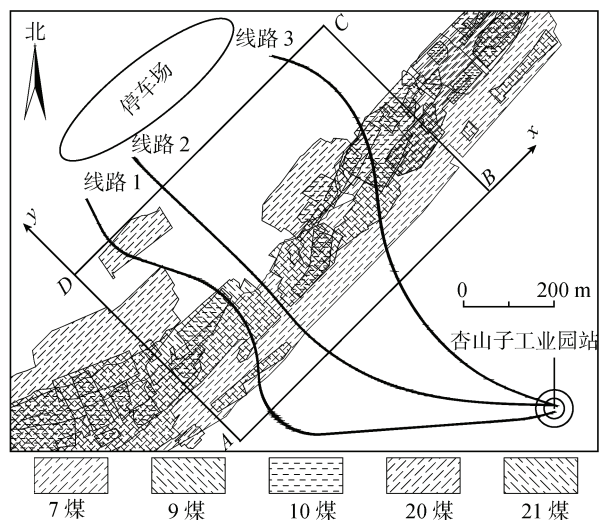


图 1 轨道线路下伏采空区的分布

Fig. 1 Distribution of the mined-out areas beneath rail lines

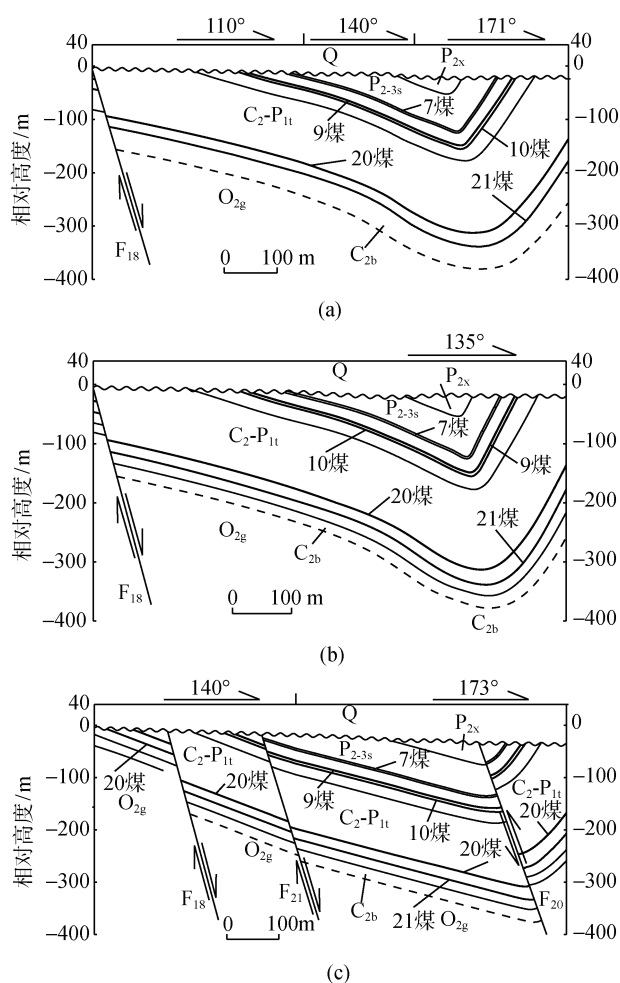


图 2 沿线路的地质剖面图

Fig. 2 Geologic sections along the lines
a—线路 1; b—线路 2; c—线路 3

卧牛山矿井田长 5.5 km, 宽 1.5 km, 位于一 NE-SW 向展布的不对称向斜。向斜 NW 翼地层较缓, 倾角 20°~27°; SE 翼地层较陡, 倾角 65°~70°。井田内揭露的地层由新到老分别为: ①第四系(Q), ②中二叠统下石盒子组(P_{2x}), ③中下二叠统山西组(P_{2-3s}), ④上石炭统—下二叠统太原组(C₂-P_{1t}), ⑤上石炭统本溪组(C_{2b}), ⑥中奥陶统阎庄组(O_{2g})。线路 1、线路 2 和线路 3 地质剖面图如图 2 所示。

卧牛山矿 1962 年投产, 设计生产能力 30 万 t/a, 于 2008 年 12 月 31 日关闭, 累计采出煤约 1 300 万 t。主要开采 NW 翼煤层, 开采过的煤层有山西组(P_{2-3s})的 7、9、10 煤和太原组(C₂-P_{1t})的 20、21 煤。除 7 煤赋存稳定, 为全区大部可采煤层外, 其余煤层赋存均不稳定, 为局部可采煤层。各煤层的平均厚度分别为 3.6 m、0.91 m、0.60 m、0.81 m 和 0.62 m; 开采深度分别为 75~180 m、76~212 m、75~175 m、140~360 m 和 240~400 m; 开采时间分别为 1968—1995 年、1988—2004 年、1988—2004 年、1988—2005 年和 1998—2008 年; 开采方式均为走向长壁炮采; 顶板管理方式均为全部垮落法。

经过四十多年的开采, 已经形成了多层老采空区(图 1)。整体来看, 煤层在走向方向开采充分, 倾向方向开采不充分。3 条拟选线路基本沿煤层倾向, 与煤层走向垂直。

2 地表剩余移动变形的预计方法

2.1 概率积分法的基本原理

概率积分法是以随机介质理论为基础, 把岩层看作颗粒体的随机介质, 从统计观点出发, 把整个开采单元划分成无数个微小单元, 整个开采对地表的影响等于各微小单元开采对地表影响之和, 从而建立地表移动变形与单元开采的函数关系^[2]。

2.2 闭合矩形积分模型^[2,5]

如图 3 所示, 矩形 KLMN 为一倾斜煤层的开采边界, 倾角为 α , 厚度为 M , 倾斜长度为 D_1 , 走向长度为 D_3 。

设 $i(x,y)$ 为回采工作面的任一微小单元, 单元 i 引起地面任一点 $A(x,y)$ 的下沉量为 $W_i(x,y)$, 按概率积分法的原理, 有:

$$W_i(x,y) = \frac{1}{r_z} \exp \left(-\pi \frac{(x-\eta)^2 + (y-\zeta)^2}{r_z^2} \right) \quad (1)$$

式中 r_z 是任意开采水平的影响半径, $r_z = H/\tan\beta$; H 为单元 i 的开采深度; $\tan\beta$ 为主要影响角正切。

矩形 $K'L'M'N'$ 为考虑了拐点偏移距 S_0 后的开采边界。矩形 $K''M''L''N''$ 为考虑了拐点偏移距 S_0

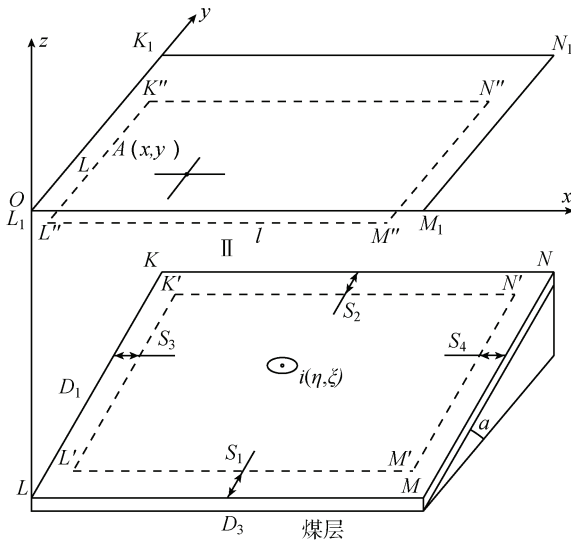


图 3 闭合矩形积分模型

Fig. 3 Closed rectangular integral model

和开采影响传播角 θ_0 后的计算边界，其走向长度为 l ，倾斜长度为 L ，计算公式如下：

$$l = D_3 - S_3 - S_4 \quad (2)$$

$$L = (D_1 - S_1 - S_2) \frac{\sin(\theta_0 + \alpha)}{\sin \theta_0} \quad (3)$$

式中 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 分别是下山、上山、走向左边界、走向右边界的拐点偏移距。

整个工作面回采后，地表任意点 $P(x, y)$ 处的下沉为：

$$W(x, y) = W_{\max} \int_{S_3}^{D_3 - S_4} \frac{1}{r} e^{-\frac{\pi(x-\eta)^2}{r^2}} d\eta \cdot \left[\int_{-d}^{+\infty} \frac{1}{r_1} e^{-\frac{\pi(y-\zeta)^2}{r_1^2}} d\zeta - \int_{L-d}^{+\infty} \frac{1}{r_2} e^{-\frac{\pi(y-\zeta)^2}{r_2^2}} d\zeta \right] \quad (4)$$

式中 $W_{\max} = qM \cos \alpha$ ，为最大下沉值； q 为下沉系数； $d = (H_1 - S_1 \sin \alpha) \cot \theta_0 - S_1 \cos \alpha$ ； $r_1 = H_1 / \tan \beta$ 、 $r_2 = H_2 / \tan \beta$ 、 $r = H_z / \tan \beta$ 分别为倾斜主断面上采空区下边界、上边界，走向主断面上采空区边界的主要影响半径； H_1 、 H_2 、 H_z 分别为采空区上山、下

山边界采深、走向主断面采深； $\tan \beta$ 为主要影响角正切。

地表任意点 $P(x, y)$ 沿 φ 方向的倾斜为：

$$i(x, y, \varphi) = \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \cos \varphi + \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \sin \varphi = i_x \cos \varphi + i_y \sin \varphi \quad (5)$$

地表任意点 $P(x, y)$ 沿 φ 方向的曲率为：

$$K(x, y, \varphi) = \frac{\partial i(x, y, \varphi)}{\partial x} \cos \varphi + \frac{\partial i(x, y, \varphi)}{\partial y} \sin \varphi = K_x \cos^2 \varphi + \frac{\partial W(x, y)}{\partial x \partial y} \sin 2\varphi + K_y \sin^2 \varphi \quad (6)$$

地表任意点 $P(x, y)$ 沿 φ 方向的水平移动为：

$$U(x, y, \varphi) = U_x \cos \varphi + U_y \sin \varphi \quad (7)$$

式中 $U_x = b r i_x$ ； $U_y = b r_{1,2} i_y$ ； b 为水平移动系数； $r_{1,2} = (H_1 + H_2) / \tan \beta$ 为倾斜方向上下山边界的平均影响半径。

地表任意点 $P(x, y)$ 沿 φ 方向的水平变形为：

$$\varepsilon(x, y, \varphi) = \frac{\partial U_x}{\partial x} \cos \varphi + \frac{\partial U_y}{\partial y} \sin \varphi = \varepsilon_x \cos^2 \varphi + \gamma_{xy} \sin \varphi \cos \varphi + \varepsilon_y \sin^2 \varphi \quad (8)$$

$$\text{式中 } \gamma_{xy} = \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x}.$$

2.3 计算参数的选取

2.3.1 基本参数

概率积分法的基本计算参数与煤层开采方法、顶板管理方式、覆岩性质、开采深度、煤层倾角及重复采动次数等因素有关，原则上应该根据本矿区地表移动变形的实测数据确定。然而，该矿在开采过程中没有进行地表移动变形的观测，故参考徐州矿区具有相似地质采矿条件的工作面的实测参数^[9]，各观测站的地质采矿条件见表 1，各观测站的计算参数见表 2，又考虑到重复采动对计算参数的影响^[9-10]，最终选取的计算参数见表 3。

表 1 各观测站的地质采矿条件

Table 1 Geological and mining conditions of observation stations

观测站	煤层	采厚/m	倾角/(°)	下山/m	上山/m	深厚比	走向长/m	倾斜长/m	松散层/m	采煤方法
庞庄矿 502	B 层	2.0	16	113	84	49	205	82	64	长壁全陷
庞庄矿 706	7 层	2.0	13	130	85	54	200	235	60	长壁全陷
权台矿 110	1 煤	2.1	31	39	104	49	450	170	17	长壁全陷
董庄矿 107	1 煤	2.0	30	47	134	67	250	100	33	长壁全陷
垞城矿 4204	2 煤	1.8	38	273	169	117	380	160	60	长壁全陷
新河矿 2004	20 煤	0.8	16	255	269	335	560	120	55	长壁全陷
垞城矿 1123	1 煤	1.6	20	407	343	234	600	160	77	长壁全陷

表 2 各观测站的计算参数
Table 2 Calculation parameters of observation stations

观测站	下沉系数 q	水平移动系数 b	主要影响角正切 $\tan\beta$	拐点偏移距 S	影响传播角 θ_0
庞庄矿 502	0.92	0.37	1.70		$90^\circ-0.39\alpha$
庞庄矿 706	0.95	0.4	1.70	0.03	$90^\circ-0.15\alpha$
权台矿 110	0.78				
董庄矿 107	0.83	0.30	1.40		$90^\circ-0.38\alpha$
垞城矿 4204	0.71	0.22	1.55	0.05	
新河矿 2004	0.70	0.35		0.05	$90^\circ-0.59\alpha$
垞城矿 1123	0.75	0.32	1.8	0.05	$90^\circ-0.5\alpha$
综合值	0.81	0.33	1.6	0.05	$90^\circ-0.40\alpha$

注: α 为煤层倾角。

表 3 概率积分法的基本计算参数
Table 3 Basic calculation parameters of probability integral method

采动程度	下沉系数 q	主要影响角正切 $\tan\beta$	拐点偏移距 S	水平移动系数 b	影响传播角 θ
初次	0.81	0.33	$0.05H$	1.6	$90^\circ-0.40\alpha$
重复	0.93	0.26	$0.05H$	2.1	$90^\circ-0.40\alpha$

2.3.2 残余下沉系数

地表残余下沉系数 q_s 的计算公式为:

$$q_s = q_a - q_y \quad (9)$$

式中 q_a 为最终下沉系数; q_y 为已发生下沉的下沉系数。

最终下沉系数 q_a 及已发生下沉的下沉系数 q_y 的计算公式分别为:

$$q_a = q(1+k) \quad (10)$$

$$q_y = q(1-e^{-ct}) \quad (11)$$

式中 k 为残余下沉量 (覆岩破坏形成的岩块间、离层间等微小空间经漫长的过程进一步密实的下沉量) 与最大下沉量的比值; c 为岩性、采深系数; t 为计算时间距到开采时间的间隔^[3-4]。

将式(10)、式(11)代入式(9), 有:

$$q_s = q(e^{-ct} + k) \quad (12)$$

据文献[3-4], c 的取值为: 覆岩较硬, 采深较大时 $c = 1.0 \sim 1.5$; 覆岩较硬, 采深较浅时 $c = 2.0 \sim 2.5$; 覆岩较软, 采深较大时 $c = 1.0 \sim 1.5$; 覆岩较软, 采深较浅时 $c = 2.5 \sim 3.0$; 重复采动时 c 一般小于 1。卧牛山矿煤层普遍采深 75~200 m, 最大 400 m, 均小于 500 m, 属浅部开采; 覆岩以泥岩, 粉砂岩为主, 另外第四纪松散层 40.50~71.46 m, 覆岩较软。考虑到工程的安全性, 本次预计中 c 的取值为: 初次采动时, c 取 2.5; 重复采动时, c 取 0.8。 k 的取值一般根据实际情况而定, 本次预计中 k 取 0.1。

2.4 地表剩余移动变形的求取

a. 确定计算区域 根据线路与采空区的相对位置, 以图 1 中矩形 ABCD 所划定的范围作为计算区

域。其长边与煤层走向一致, 长 1 200 m; 短边与煤层倾向一致, 长 800 m。

b. 建立坐标系 x 轴沿矩形长边, 指向左方向; y 轴沿矩形短边, 指向上山方向, 如图 1 所示。

c. 选取计算点 将计算区域划分成 10 m×10 m 的网格, 各网格点处作为计算点。

d. 单元划分 闭合矩形积分模型只能对矩形单元进行计算, 故将采空区单元划分成大小不等的可计算矩形单元。

e. 计算过程 ①给各矩形单元赋值, 包括采深、采厚、倾角、时间、计算参数等; ②将式(12)求出的残余下沉系数 q_s 代替式(1)—式(8)中下沉系数 q ; ③用式(1)—式(8)依次计算矩形单元单独开采引起的地表剩余移动变形; ④利用坐标变换, 将地表相应网格点处的相应剩余移动变形量相加, 得到所有单元开采引起的地表剩余移动变形值。

3 采空区地表稳定性评价

3.1 地表剩余移动变形

计算可以得到计算区域内所有地表网格点处的竖向下沉值, 沿地表任意方向的剩余倾斜值、剩余曲率值、剩余水平移动值及剩余水平变形值。取所有网格点处各剩余移动变形的最大值(绝对值), 绘制相应的等值线图(图 4—图 8)。

3.2 城市轨道交通地基变形控制指标

目前我国还没有对城市轨道交通的地基变形控制做出明确规定。很多学者参照原煤炭部“三下”标准^[11], 将 $i \leq \pm 3 \text{ mm/m}$, $K \leq \pm 0.2 \text{ mm/m}^2$, $\epsilon \leq \pm 2 \text{ mm/m}$ 作为高速公路下伏采空区地表变形的控制指标^[6-8]。相比高速公路, 城市轨道交通为运量大、舒适性高、速

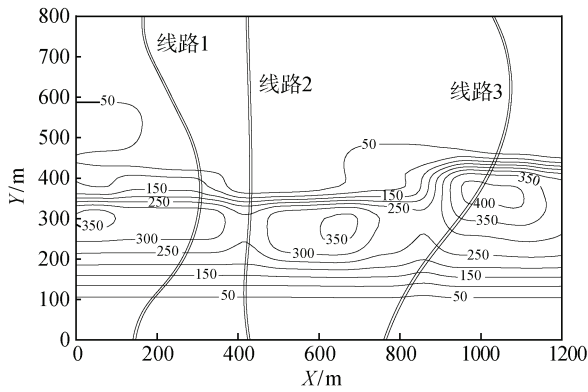


图 4 地表剩余下沉等值线

Fig. 4 Contour of surface residual subsidence

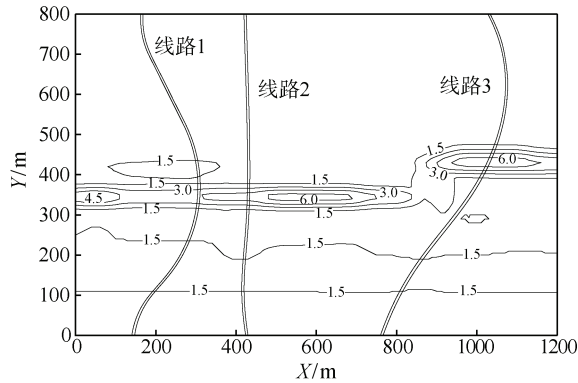


图 5 地表剩余倾斜等值线

Fig. 5 Contour of surface residual tilt

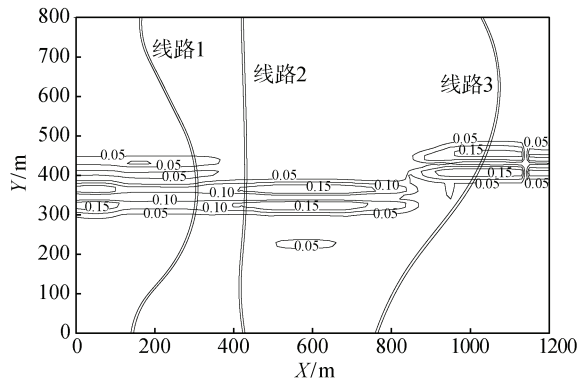


图 6 地表剩余曲率等值线

Fig. 6 Contour of surface residual curvature

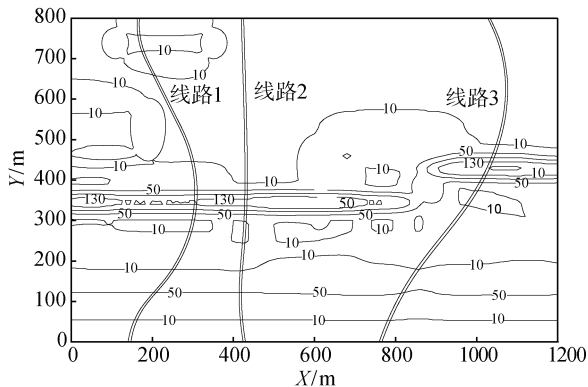


图 7 地表剩余水平移动等值线

Fig. 7 Contour of surface residual horizontal movement

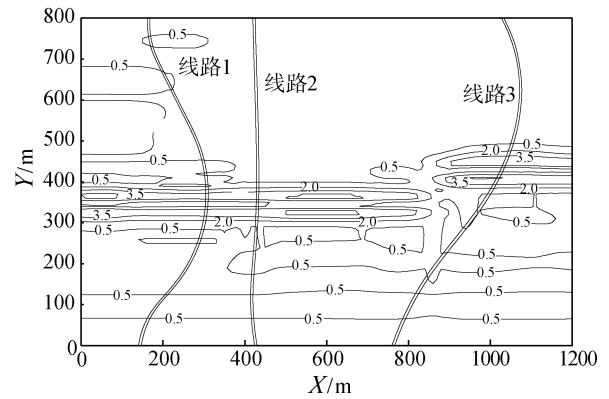


图 8 地表剩余水平变形等值线

Fig. 8 Contour of surface residual horizontal deformation

度快的客运线路，其对地基变形的要求更高。参照高速公路地基控制指标，并结合城市轨道交通的特点，选取的城市轨道交通地基变形控制指标，见表 4。

表 4 城市轨道交通地基变形控制指标

Table 4 Foundation deformation limits of urban rail transit

倾斜 $i/(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$	曲率 $K/(\text{mm}\cdot\text{m}^{-2})$	水平变形 $\varepsilon/(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$
$\leq \pm 2.25$	$\leq \pm 0.15$	$\leq \pm 1.5$

3.3 地表稳定性分区

采空区地表划分为稳定区、不稳定区和极不稳定区。其中，稳定区内地表剩余变形满足 $i \leq \pm 2.25 \text{ mm/m}$ ， $K \leq \pm 0.15 \text{ mm/m}^2$ ， $\varepsilon \leq \pm 1.5 \text{ mm/m}$ ；极不稳定区地表剩余变形至少满足条件 $i \geq 6 \text{ mm/m}$ ， $K \geq 4 \text{ mm/m}^2$ ， $\varepsilon \geq 4 \text{ mm/m}$ 中的一项；剩下的区域为不稳定区。分区结果见图 9。

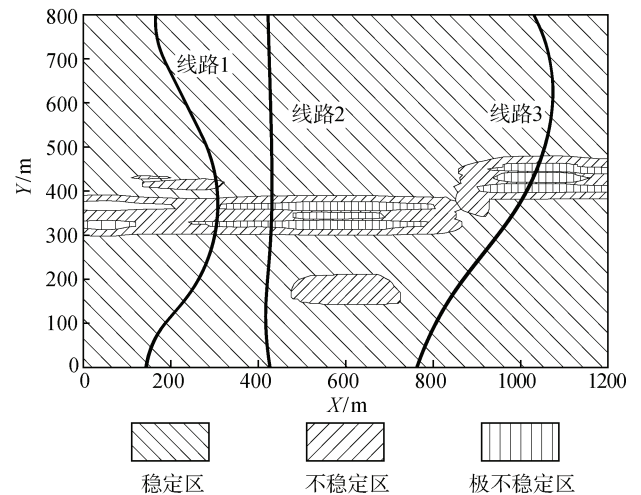


图 9 地表稳定性分区

Fig. 9 Partition of surface stability

由图 9 可以看出，不稳定区和极不稳定区主要位于纵向坐标 300~480 m，一方面是因为该区域位于各煤层采空区上山附近，另一方面是因为该区域存在多

煤层重复开采,所以剩余变形相对剧烈。还可以看出,3 条线路均通过不稳定区和极不稳定区,其中线路 3 经过极不稳定区的长度最大。结合图 1 还可以发现,大部分采空区域的地表剩余变形还不满足轨道线路对地基变形的要求。对于稳定区,线路可以安全通过,一般不需要工程治理;对于不稳定区,需进行有效的工程治理,线路才可以安全通过;对于极不稳定区,线路应该尽量绕避,如果确实要通过这些区域,必须进行严格论证,并且必须进行切实有效的工程治理。

4 地表剩余变形对线路的影响

以线路 2 为例,分析地表剩余变形对线路的影响。经过数据处理,分别得到纵向(平行线路方向)和横向(垂直线路方向)的剩余移动变形值,剩余移动变形沿着线路轴线的变化曲线,见图 10—图 13。

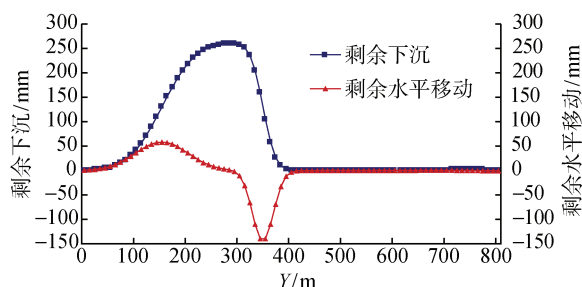


图 10 剩余下沉、纵向的剩余水平移动沿着线路轴线的变化曲线

Fig. 10 Curves of residual subsidence and longitudinal residual horizontal movement along the line axis

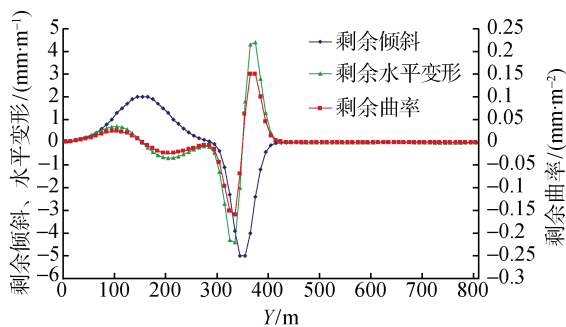


图 11 纵向的剩余倾斜、剩余水平变形、剩余曲率沿着线路轴线的变化曲线

Fig. 11 Curves of longitudinal residual tilt, horizontal deformation and curvature along the line axis

由图 10 可知:在 Y+150—Y+350 段剩余下沉较大,均大于 100 mm,最大达到 260 mm,该段位于 7 煤采空区,过大的剩余下沉将引起该段地基的下沉,并导致线路坡度的变化;Y+50—Y+400 段纵向剩余水平移动为-140~58 mm,主要因为 7 煤采空区上山附近和下山附近的剩余水平移动较大所致,其他段纵向的剩余水平移动近于零。

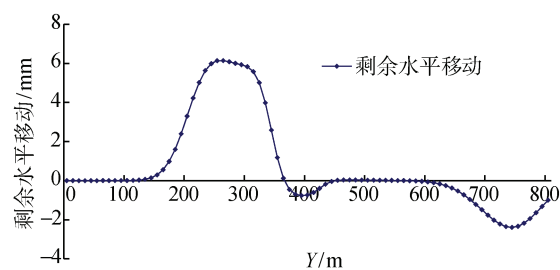


图 12 横向的剩余水平移动沿着线路轴线的变化曲线

Fig. 12 Curves of transverse residual horizontal movement along the line axis

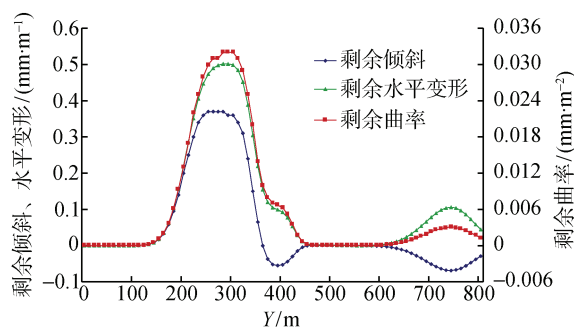


图 13 横向的剩余倾斜、剩余水平变形、剩余曲率沿着线路轴线的变化曲线

Fig. 13 Value of transverse residual tilt, horizontal deformation and curvature horizontally along the line

由图 11 可知:在 Y+320—Y+380 段纵向剩余倾斜-2.25~5.00 mm/m,大于其控制指标,主要因为该段位于 7 煤采空区上山附近,剩余倾斜还比较大,过大的纵向剩余倾斜将引起该段线路坡度的变化;除 Y+330 附近小段纵向剩余曲率大于其控制指标外,其他段均小于其控制指标,纵向剩余曲率对整个线路影响很小;在 Y+310—Y+340、Y+360—Y+390 段纵向水平变形分别为-1.5~4.4 mm/m、1.5~4.4 mm/m,大于其控制指标,主要因为该段位于 7 煤采空区上山附近,正负剩余水平变形比较剧烈,过大纵向剩余水平变形将引起地基的压缩和伸长,导致轨道的断开。

由图 12、图 13 可以看到,纵向的剩余水平移动、剩余倾斜、剩余曲率及剩余水平变形与横向的剩余移动变形相比均较小,并且剩余变形均小于其控制指标,这主要是因为沿走向煤层开采充分,沿倾向煤层开采不充分,由此可知横向的剩余变形对整个线路影响很小。

5 结论

a. 本文给出了残余下沉系数的计算公式,这提供了一种在矿区没有地表实测数据的情况下求取残余下沉系数的新途径。

(下转第 49 页)

表 2 三种含水率的稻草加筋盐渍土的抗剪强度
Table 2 Shear strength of saline soil reinforced with rice straw in three water contents

含水率/%	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
20	46	9
22	56	12
24	28	8

a. 与含水率 22% 的加筋土的峰值主应力差相比, 含水率 20% 的加筋土在 100 kPa、200 kPa、300 kPa 和 400 kPa 围压下的降低率分别为 52%、57%、62% 和 61%; 24% 的加筋土的降低率分别为 58%、59%、30% 和 21%。含水率 20% 和 24% 加筋土的峰值主应力差均比 22% 加筋土的小很多。

b. 从含水率 22% 降低到 20%, 加筋土的粘聚力从 56 kPa 降到 46 kPa, 降低率为 18%; 内摩擦角从 12° 降低到 9°, 内摩擦角降低率为 25%; 当含水率从 22% 增加到 24% 时, 其粘聚力下降到 28 kPa, 降低率为 50%, 内摩擦角降低了 33%。可见含水率对加筋土的抗剪强度影响较明显, 含水率对抗剪强度影响的原理与对抗压强度影响相同。

c. 随含水率的增加, 加筋土的应力应变关系由硬化型向弱硬化型转变。

4 结 论

a. 稻草加筋提高了盐渍土的强度和抗变形能力。筋土摩擦作用的充分发挥使得加筋明显增强了盐渍土的粘聚力。由于加筋属于物理作用, 没有改变土的结构形态, 所以对土的内摩擦角影响不大。

b. 干密度越大, 加筋土的强度越高, 抗变形能

力越强, 加筋土的应力应变曲线就越显应变软化特征。随含水率的增加, 加筋土的强度和抗变形能力均减弱。在最优含水率和最大干密度条件下, 稻草加筋盐渍土的强度和抗变形能力最优。

c. 加筋土其他性能的实验研究工作宜在接近最优含水率和最大干密度的条件下制备样品, 包括加筋土的动力学性能、CBR、回弹模量等, 满足工程设计需要且便于各种数据间的对比分析。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 柴寿喜, 杨宝珠, 王晓燕, 等. 渤海湾西岸滨海盐渍土的盐渍化特征分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1217-1222.
- [3] 刘小文, 常立君, 耿小牧, 等. 含水率、干密度对红土强度影响规律的试验研究[J]. 公路, 2008, 12: 154-156.
- [4] 汪明元, 于嫣华. 干密度对加筋膨胀土强度与变形特性的影响[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 40-43.
- [5] 郭菊彬, 张昆, 王鹰. 盐渍土抗剪强度与含水量、含盐量及干密度关系探讨[J]. 工程勘察, 2006(1): 12-14.
- [6] 石茜, 柴寿喜, 李敏, 等. 潮湿环境中稻草的防腐效果及极限拉伸性能[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 200-206.
- [7] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [8] 申春妮, 方祥位, 王和文, 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1347-1351.
- [9] 旦增顿珠, 介玉新, 魏弋峰, 等. 垃圾土的强度特性试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(9): 1538-1541.

(上接第 45 页)

b. 徐州轨道交通规划 1 号线的三种方案均通过不稳定区和极不稳定区, 其中线路 3 经过极不稳定区的长度最大。建议从线路 1 及线路 2 中选取合理的线路方案。

c. 纵向的地表剩余变形较大, 在某些路段超过其控制指标, 对线路稳定性的影响较大; 横向的地表剩余移动变形相对较小, 均小于其控制指标, 对线路稳定性影响不大。对于不稳定的路段, 必须进行采空区治理, 以确保线路的安全。

参考文献

- [1] 刘宝琛, 张家生, 廖国华. 随机介质理论及其在矿业工程中的应用[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999.
- [2] 何国清, 杨伦, 凌虞娣, 等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1994: 116-183.
- [3] 余学义, 施文刚. 地表剩余沉陷的预计方法[J]. 西安矿业学院

学报, 1996, 16(1): 1-4.

- [4] 余学义. 采动区地表剩余变形对高等级公路影响预计分析[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(4): 9-12.
- [5] 李春雷, 谢谟文, 李晓璐. 基于 GIS 和概率积分法的北洛河铁矿开采沉陷预测及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1243-1250.
- [6] 陈晓斌, 张家生, 安关峰, 等. 高速公路采空区地面变形计算方法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 191-197.
- [7] 韩双, 邓建立. 高速公路连接线通过某煤矿安全评价[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(3): 381-383.
- [8] 吴盛才, 贺跃光, 徐鹏, 等. 概率积分法预计高速公路采空区地表变形[J]. 安全与环境工程学报, 2010, 17(5): 119-122.
- [9] 袁立. 徐州矿区开采沉陷规律及预测系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- [10] 曾开华, 张国锋, 杨晓杰. 门头沟多层采空区地基稳定性及变形预测研究[J]. 中国矿业, 2010, 19(10): 87-90.
- [11] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000: 78-108.