

文章编号:1671-8879(2014)06-0057-08

采空区路基路面力学响应分析

岳爱军^{1,2}, 郑健龙¹, 吕松涛^{1,2}

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 广西交通科学研究院
广西道路结构与材料重点实验室, 广西 南宁 530007)

摘要:针对采空区沉陷容易导致路基路面发生变形破坏的工程技术难题,基于采空区位置对路基路面变形响应的影响程度,提出了采空区临界区域的概念,采用有限元数值分析方法,建立了采空区临界区域的确定方法,由此揭示了采空区路基填筑高度对沥青路面设计指标弯沉及层底拉应力的影响规律,并基于采空区引起的路基顶面的不均匀变形,揭示了 5 种路面结构路表弯沉与层底拉应力的变化规律。研究结果表明:处于临界影响区范围外的采空区对土基表面最大位移的影响小,可忽略不计;采空区影响范围内的路表弯沉比层底拉应力对路基填筑高度变化敏感,柔性基层沥青路面结构适应变形能力强。

关键词:道路工程;路基路面;采空区;弯沉;拉应力

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A

Mechaniced response anlysis of subgrade and pavement for mined-out area

YUE Ai-jun^{1,2}, ZHENG Jian-long¹, LU Song-tao^{1,2}

(1. School of Communication and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology,
Changsha 410004, Hunan, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Road Structure and Materials,
Guangxi Transportation Institute, Nanning 530007, Guangxi, China)

Abstract: For the engineering technical problems of the deformation destroy of the subgrade and pavement caused by the mined-out area subsidence, the concept of critical zone of mined-out area was put forward according to the influence degree of the subgrade and pavement on deformation response in the position of the mined-out area. Then the method to determine the critical region of mined-out area was established by using the finite element numerical analysis method. It revealed the influence law of the filling height of the subgrade on asphalt pavement design indexes (deflection and its tensile stress in the bottom layer). Based on the non-uniform top deformation of subgrade caused by the mined-out area, it revealed the change rule of pavement surface deflection and tensile stress in the bottom layers of five kinds of pavement structures. The result shows that the influence of the mined-out area outside the critical impact area on the maximum displacement on the subgrade surface is too small to be ignored. The influence of the road surface deflection within the impact area of mined-out area is more sensitive to subgrade height change than the

收稿日期:2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50178012,51208066);交通运输部应用基础研究项目(2012 319 825 150);

广西道路结构与材料重点实验室开放基金项目(2014gxjgclkf-002)

作者简介:岳爱军(1971-),男,湖南邵阳人,广西交通科学研究院高级工程师,长沙理工大学工学博士研究生,E-mail:362382719@qq.com。

bottom layer tensile stress. The flexible base asphalt pavement structure has stronger ability to adapt to the deformation than the semi-rigid base one. 3 tabs, 12 figs, 16 refs.

Key words: road engineering; subgrade and pavement; mined-out area; deflection; tensile stress

0 引言

地下固体矿床开采后的空间及其围岩容易失稳而产生位移、开裂、破碎垮落,直到上覆岩层整体下沉,而引起地表变形和破坏的地区或范围,统称为采空区。当矿体(如煤、金属矿石等)从地下被开采出来后,上覆岩体失去支撑而导致原平衡状态被破坏,引起应力重分布,以期达到新的平衡。在开采过程中至开采结束后的一段时间内,开采沉陷逐渐波及地表,从而引起铺筑在上面的路基、路面产生一系列病害,如路面开裂、路基填料松散以及由于不均匀沉陷导致线形在平、纵、横方向发生一系列不良变化,导致行车安全受到极大影响^[1-3]。这一问题引起了国内外研究者的普遍重视,目前的研究主要集中在采空区对路基及边坡稳定性的分析评价、对路基路面变形失稳及其治理技术等方面。吴盛才等采用概率积分法,对采空区地表移动与变形值进行预测,并绘制出采空区主断面上的变形曲线^[4];袁臻通过数值分析方法与模型试验,对岩溶洞穴区、采动地区路基的稳定性评价及工程处治措施进行了研究,得到了煤层开采后上部路基变形趋势及其发展规律,定量评价了采动对路基及边坡的影响作用,确定了路基边坡发生破坏的“圆弧-顺层”模式及范围,运用极限平衡方法对边坡的安全性作出了评价,并提出了具体的处治建议^[5];刁心宏等采用理论和半定量方法对昌金高速公路金鱼石路段路基下采空区的稳定性进行了评估,研究表明采空区围岩不稳定,并且对路基稳定性有显著影响^[6];彭帅英以概率积分法为理论基础,编制了多层任意形状采空区地表沉陷预计系统,并将系统用于研究采空区高速公路地表沉陷计算,利用有限差分法 FLAC 数值模拟软件,研究了汽车动荷载作用下采空区地表变形规律,并采用改进的遗传算法求解和优化 Holt-Winters 模型的组合参数,建立了高速公路沿线监测点地表沉陷的预测模型^[7];New 等采用现场试验与理论分析方法对采空区路表变形计算预测模型进行了验证^[8-9];陈晓斌等根据随机介质理论,建立了高速公路地下采空区地面变形计算模型,并对高速公路下覆典型的 2 种采煤形成的采空区坍塌后地面变形进行了计

算分析^[10];王玉标利用相关软件对采空区路基变形基本规律进行了研究,归纳总结了采空区路基路面一般处治方法和协调设计方法^[11];贺跃光等以采空区上方高速公路路基路面破坏的 5 个指标,即沉降、倾斜、水平位移、水平移动、曲率为研究对象,结合城市地下工程开挖相关控制指标,定量地研究了采空区上方高速公路路面的变形控制指标,提出了适合采空区上方高速公路路基以及桥墩等允许变形的控制指标^[12]。对采空区的分类、判别标准即何种采空区需要进行严格处理很少涉及,因此,在保证路基路面结构稳定的基础上,为了节约工程造价,急需对需要处理的采空区进行判别分类。

本文依托某高速公路实体工程不同地基深处存在不同程度的采空区域,若不加以处理,将导致后期的路基路面发生结构性破坏,若对路基下的所有采空区均进行处理,则会导致工程造价急剧增加。对上面铺筑的路基路面影响小的地下采空区域可不必进行处理或严格控制,因此需要对采空区的路基路面结构力学响应特征进行分析,但用一般的弹性层状态体系理论方法难以直观、有效地解决这一问题。国内外研究者分别采用有限元、离散元和有限差分等数值分析方法对采空区的稳定性、采空区上结构物的变形预测、监测等进行了大量研究。研究结果表明数值分析方法可在建立合适采空区模型的前提下,形象直观地反映受采空区影响的路基路面结构力学响应规律,是一种有效的分析方法^[13-16]。

因此,本文基于有限元数值分析软件 ANSYS,提出了采空区临界区域的概念及其确定方法,揭示了采空区临界区域内路基填筑高度对沥青路面设计指标弯沉及层底拉应力的影响规律,基于采空区所引起的路基顶面的不均匀变形,揭示了柔性基层和半刚性基层沥青路面等 5 种路面结构路表位移与层底拉应力的变化规律。研究结果可为指导采空区路基路面的结构设计提供依据,对防治采空区路基路面的病害具有一定的理论及工程应用价值。

1 采空区临界区域的提出及确定方法

某高速公路处于采空区,本文在分析复杂地基时,采空区在一定深度范围内随机生成,采空区临界

区域是指:在采空区这个区域之外的情况下,采空区的存在对土基表面产生的位移影响可以忽略不计。本文基于弹性理论、考虑土体自重、采用 ANSYS 有限元程序来计算土体表面的相对最大位移,确定采空区的临界区域。

1.1 计算区域

采空区临界区域确定时其地基计算区域水平方向 B 取 120 m,竖向 H 取 120 m,地基上部填筑的路基高度 h 分别取 2、4、6、8、10 m,采空区典型结构形状用半径为 5 m 的半圆加边长为 5 m×10 m 的矩形来模拟,采空区距地基几何中心的横向距离 X 分别取 0、12、24、36、48 m,采空区深度 Y 分别取 0、20、40、60、80 m,如图 1 所示。

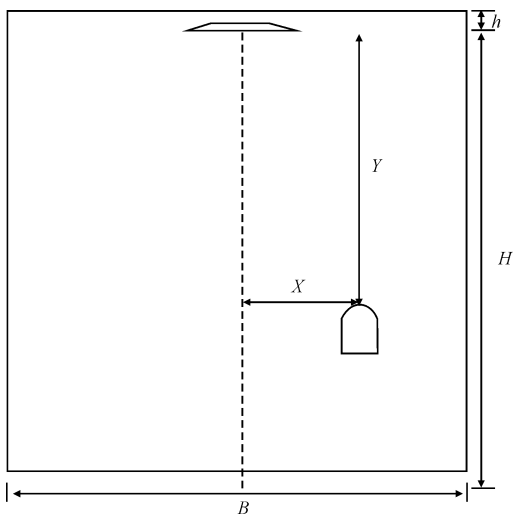


图 1 计算区域
Fig. 1 Calculation area

1.2 计算方案

路基填筑高度为 2 m 时换算的线荷载为 $p=37\,400\text{ N/m}$,其他填土高度按此比例计算。采空区的计算位置按其距地基几何中心的横向距离 X 与深度 Y 的组合进行确定。计算采用平面应变模型,应用有限元数值分析方法,选用等参 4 节点四边形单元,分别计算对应不同填土高度、不同采空区位置处的土基表面最大弯沉。

1.3 计算参数及边界条件

假定地基土与路基填土为同种材料,均为各向同性的均质粘性土,土的密度为 1.87 g/cm^3 ,模量取 35 MPa ,泊松比取 0.35 ,路基填土荷载作用宽度为 27 m 。

计算边界条件为:地基竖向两侧假定为无摩擦 x 向约束,地基底面假定为 x 、 y 方向均约束。

1.4 计算结果分析

以路基填筑高度为 2 m 时为例,按照上述的计算条件,计算得到当路基填筑高度为 2 m 时土基表面的最大位移随采空区位置变化的关系,如图 2、图 3 所示。

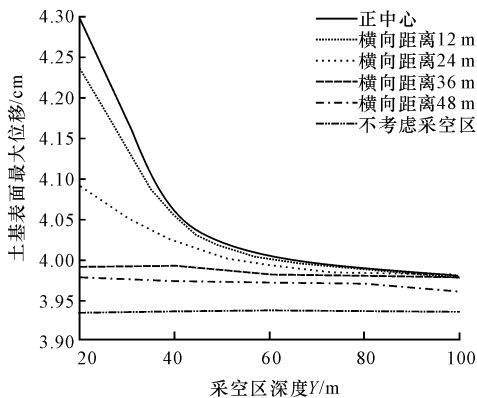


图 2 土基表面最大位移随采空区深度变化关系(路基填筑高度 2 m)
Fig. 2 Relationship between the maximum surface displacement of subgrade and the depth variation of the mined-out area (the height 2 meter of the base filled)

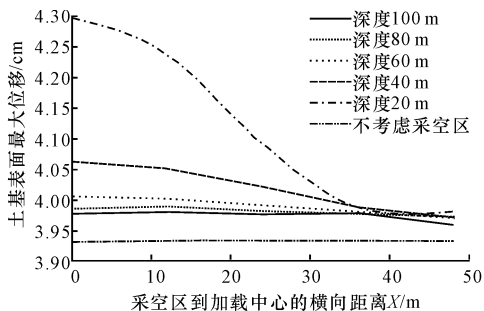


图 3 土基表面最大位移随采空区横向变化关系(路基填筑高度 2 m)
Fig. 3 Relationship between the maximum surface displacement of subgrade and the transverse variation of the mined-out area (the height 2 meter of the base filled)

由图 2 可知,土基表面最大位移随着采空区深度的增加而减小,且采空区离加载中心越近,变化越明显,在横向距离大于 36 m 时,土基表面最大位移受横向距离影响很小,关系曲线近似水平直线。

从图 3 可知,土基表面最大位移随着采空区到加载中心的横向距离的增加而减小,在横向距离大约为 12 m 时,其减小幅度明显变大,直至 36 m 左右时减小趋势趋缓。因此在实体工程中,尤其要注意横向距离为 12~36 m 的范围段,防止路基路面出现不均匀沉降。

1.5 采空区临界区域的确定

通过图 2 可得,在采空区深度 Y 大于 60 m 时,采空区横向位置 X 与深度 Y 对土基表面最大位移

影响很小,因此确定采空区临界深度为 60 m。通过图 3 可得,在采空区横向位置 X 大于 36 m 时,采空区横向位置 X 与深度 Y 对土基表面最大位移影响很小,因此确定采空区临界宽度为 $2\text{ m}\times 36\text{ m}$ 。因此,填土高度为 2 m 时对应的采空区影响区域为路基中心下深 60 m、宽 72 m 的矩形区域。在此范围外,可以忽略采空区的存在对土基表面位移的影响,影响区域如图 4 所示。

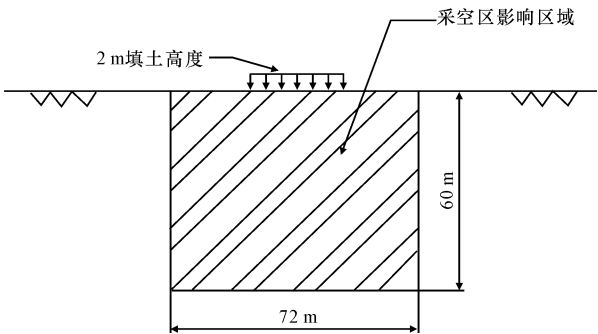


图 4 采空区对土基表面最大位移影响区域

Fig. 4 Influencing area of the mined-out area on the maximum surface displacement subgrade

据此,可得路基填筑高度分别为 4、6、8、10 m 的土基表面最大位移随采空区位置的变化关系。结果表明,对于不同的路基填筑高度,均当采空区的深度 Y 大于 60 m、横向位置 X 大于 36 m 时土基表面最大位移变化不明显,为此可确定采空区临界区域近似为 $60\text{ m}\times 72\text{ m}$ 范围,在此范围内的采空区需要进行处理,超出此范围的采空区可不进行处理,因此,所确定的采空区临界区域具有一定的工程指导意义。

2 采空区路基填筑高度对沥青路面设计指标的影响

2.1 计算模型

由前面的分析可知,当采空区在距路表深度为 60 m 以下时,或者采空区中心距离路线中心 36 m 以外时,可以忽略采空区对土基表面变形的影响。本文在路基顶面不均匀竖向位移计算时,考虑水平方向最不利情况,即采空区位于路线中心下,深度方向选取距路表 50 m 深,路基填筑高度为 4 m,有限元模型采用二维平面应变模型,如图 5 所示。

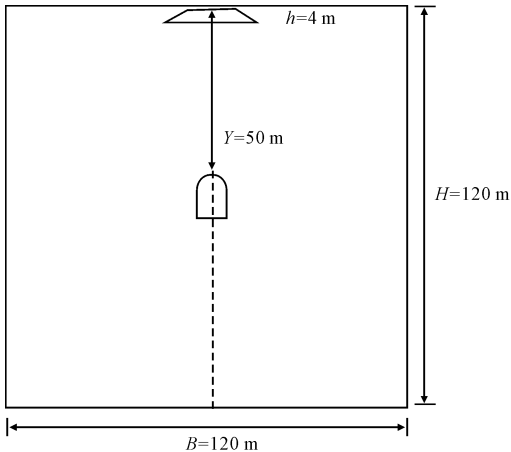


图 5 计算模型

Fig. 5 Calculation model

2.2 计算参数及边界条件

计算的路面结构选用中国典型的半刚性基层沥青路面结构,材料参数选取时按规范要求考虑了模量的最不利组合,具体路面结构和参数见表 1。

表 1 典型路面结构及参数

Tab. 1 Typical pavement structures and parameters

结构层	材料类型	结构厚度/cm	20 ℃下弯沉计算用模量/MPa	15 ℃下拉应力 Q 模量/MPa
上面层	AC-13C	4	1 400	2 000
中面层	AC-20C	6	1 200	1 800
下面层	AC-25C	8	1 000	1 200
基层	水泥稳定碎石 (3.5 MPa)	36	1 500	3 500
底基层	水泥稳定碎石 (2.5 MPa)	20	1 300	3 100

路基填土密度取 1.7 g/cm^3 。计算的初始条件和边界条件同前。

2.3 计算结果分析

2.3.1 路基填筑高度对路表最大弯沉的影响

在土基有采空区存在的情况下,路基土填筑高度对路表最大弯沉会产生影响,分析路表弯沉随填土高度的影响规律时考虑路基填土的自重,为后续最佳路基填土高度范围的提出提供依据。

不同路基填土高度时的路表弯沉如下页图 6 所示。

由图 6 可知,路表最大弯沉随着路基填筑高度增加而增大,关系近似为正比关系,随填土高度增加弯沉变化幅度略微变大,这说明在土基有采空区的情况下,路基填筑高度对路表位移的影响较大。

2.3.2 路基填筑高度对面层层底最大拉应力的影响

在土基有采空区存在的情况下,路基土填筑高

度对面层层底最大拉应力值会产生影响,不同路基填土高度时面层层底最大拉应力值如图 7 所示。

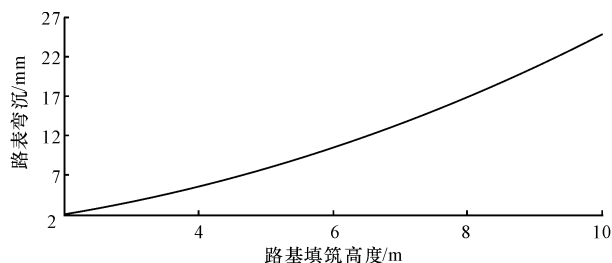


图 6 路基填筑高度与路表最大弯沉关系

Fig. 6 Relationship between the maximum deflection of the surface and the subgrade height

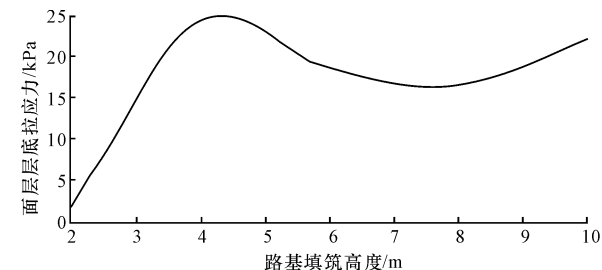


图 7 路基填筑高度与面层层底最大拉应力关系

Fig. 7 Relationship between the maximum tension stress of the pavement bottom and the subgrade filling height

由图 7 可知,面层层底最大拉应力值不是随着路基填筑高度的增加一直增加,而是随着填筑高度的增加先增大,后减少然后再增大,呈波浪式变化。从图中可看出面层层底拉应力在路基填土高度 6~9 m 时较小,处于波谷;在 3~5 m 时,面层层底拉应力较大,处于波峰。因此在实体工程中,要尽量避开波峰区段的填土高度,以控制面层层底的拉应力大小。

2.3.3 路基填筑高度对基层层底最大拉应力的影响

在土基有采空区存在的情况下,路基土填筑高度对基层层底最大拉应力值会产生影响,不同路基填土高度时基层层底最大拉应力值如图 8 所示。

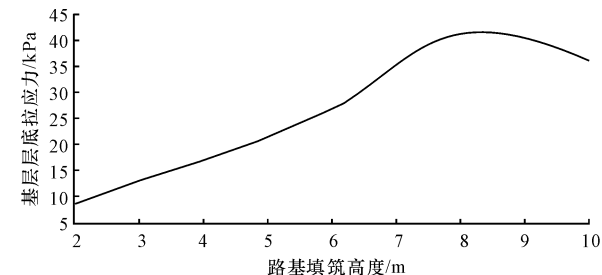


图 8 路基填筑高度与基层层底最大拉应力关系

Fig. 8 Relationship between the maximum tension stress of base layer bottom and subgrade height

由图 8 可知,基层层底最大拉应力随着路基填筑深度的增加先增加后减小,在路基填筑深度为 8.2 m 时,基层层底的拉应力最大,随后拉应力呈减小趋势。

综上所述,路表弯沉随路基填筑高度的增加逐渐增加,面层层底拉应力和基层层底拉应力随路基填筑高度的增加不单调,采空区位于采空区临界区域范围内时,路面设计指标中的弯沉比层底拉应力对路基填筑高度的变化更敏感。在实体工程中需要对其进行优化组合设计,提出最佳路基填土高度范围,减小路面各层层底拉应力,提高路面的耐久性。

3 路面结构的附加应力和变形分析

3.1 计算模型

由于目前高速公路路堤高度一般为 3~4 m,故本文为简化计算,在进行路面附加应力计算时,路堤高度统一为 4 m,考虑采空区的影响,土基计算深度为 120 m。在实体工程中,采空区的范围一般出现在距路表深度 50 m 左右,考虑最不利情况,所取基层层底面的不均匀位移初始条件为采空区顶部距离土基顶面 50 m 位置时路基顶面 X 方向的变形。故地基与路基的计算模型与前述图 5 一致,不考虑车辆荷载的作用。

3.2 初始条件及边界条件

计算由于路基顶面不均匀位移对路面产生的附加应力时,基层层底面的不均匀变形初始条件为:采空区顶部距离土基顶面 50 m 位置时路基顶面 Y 方向的变形,层间完全连续,边界条件同前。

3.3 计算结果分析

在进行路面附加应力分析时,可以先计算路基顶面不均匀变形,然后作为位移边界条件施加到路面计算模型中,此位移边界条件是路面内部产生附加应力的主要因素。本文主要分析某高速公路 4 种柔性基层路面结构和 1 种半刚性基层沥青路面:①ATB-30 下面层+ATB40 基层;②ATB-30 下面层+水泥稳定碎石基层;③ATB-30+级配碎石基层;④ATB-30 下面层+级配碎石层+水泥稳定碎石基层;⑤半刚性基层沥青路面(AC20 下面层+水泥稳定碎石基层)。计算在路基顶面不均匀竖向位移初始条件作用下,路面结构内部产生的附加应力。

3.3.1 路表位移与层底拉应力分析

5 种路面结构的应力应变计算结果数值大小不同,但其变化规律类似,以结构①为例,其力学响应变化规律如图 9、图 10 所示。

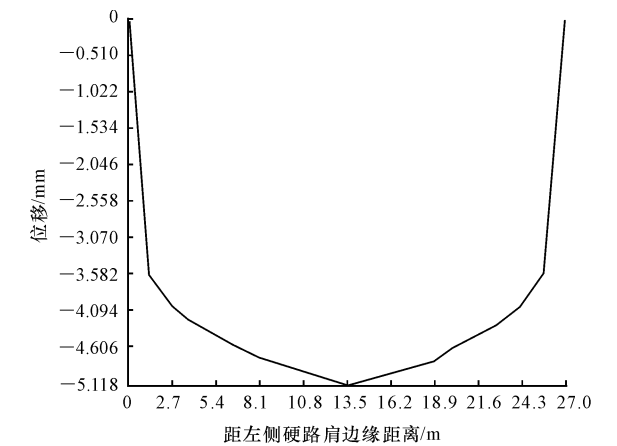


图 9 路表 Y 方向位移变化

Fig. 10 Displacement variation along Y direction of the subgrade

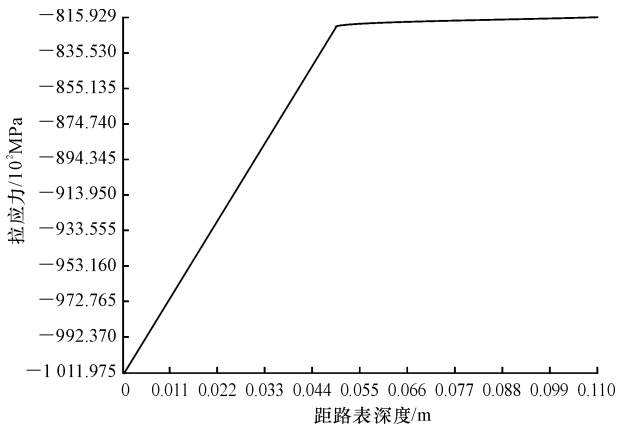


图 10 路线中心处拉应力沿深度方向变化

Fig. 10 Variation of the tension stress along the direction of the depth in the center line

由图 9 所示,在路基底面位移边界条件的作用下,路表横向位置出现了不均匀沉降,且在路面中心处出现 Y 方向的最大位移。由图 10 可知,在面层范围内的压应力随深度方向的增加而减少,即在路基顶面竖向不均匀位移的初始约束条件下,在面层表面(距路表深度为 0 的地方)出现了压应力的最大值。

由图 11、图 12 可知,在上面层、中面层层底的应力曲线是关于路线中心对称的,各层层底拉应力出现在路面边缘处,而其他位置均出现压应力,最小压应力值出现在距路边缘 1 m 左右的地方,最大拉应力都在路线最边缘位置上;且 AC16 层层底拉应力最大值比 AC20 层层底大。

3.3.2 5 种路面结构路表最大位移与层底拉应力计算结果比较

(1) 路表 Y 方向位移大小的比较

路基顶面不均匀位移作为位移荷载加到面层计算模型中后,各路面结构的路表均产生了相同趋势

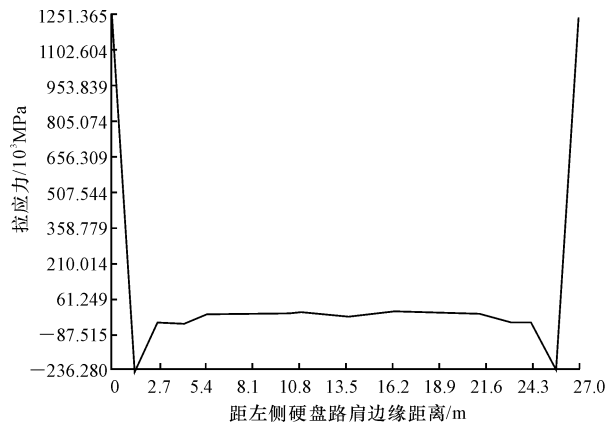


图 11 AC-16 层底拉应力变化

Fig. 11 Variation of tension stress at the bottom of AC-16

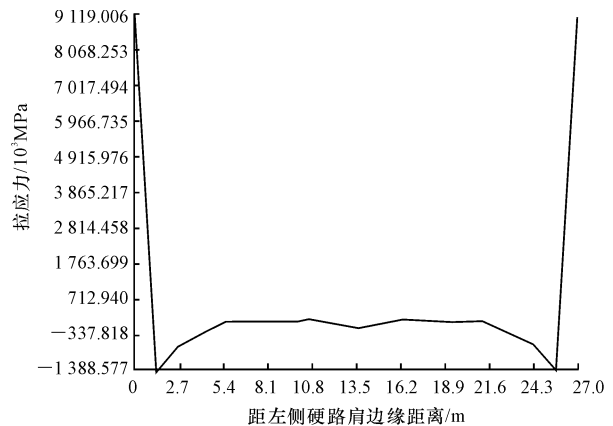


图 12 AC-20 层底拉应力变化

Fig. 12 Variation of tension stress at the bottom of AC-20

的不均匀变形。各路面结构在路表产生的最大变形值如表 2 所示。

表 2 各路面结构层路表最大位移

Tab. 2 Maximum surface displacement of different pavement structures

结构类型	柔性 1	柔性 2	柔性 3	柔性 4	半刚性基层结构
路表最大位移/mm	5.118	5.099	5.100	5.105	5.100

从表 2 可知,各路面结构层路表横向的最大位移相差不大,都在 5.1 mm 左右。除了柔性基层 2 的最大位移比半刚性基层的小之外,其他各柔性基层路面产生的路表最大位移均比主线半刚性结构的要大。这与“柔性基层路面产生路表弯沉大”的结论是基本一致的。

(2) 层底拉应力比较

由于拉应力是路面破坏的一个重要因素,由上述分析可知,在路基顶面竖向不均匀位移荷载的作用下,对 5 种路面结构附加拉应力的分析可知,不管

是在 AC-16 层层底还是 AC-20 层层底,在路线边缘处均产生了拉应力。各结构层层底最大拉应力值如表 3 所示。

表 3 各路面结构的层间最大拉应力

Tab. 3 Maximum tension stress of layer bottom of different pavement structure

结构类型	柔性 1	柔性 2	柔性 3	柔性 4	半刚性 基层结构
AC-16 层底/MPa	1.25	1.79	1.64	0.94	1.73
AC-20 层底/MPa	0.91	1.73	1.15	0.58	1.50
ATB-30 下面层/MPa	0.74	1.21	0.82	0.38	1.23
基层/MPa	0.28	0.33	0.31	0.32	0.48

在路基顶面竖向位移的初始边界位移约束条件下,根据计算结果可知:①各路面结构的层底拉应力从上至下逐渐减小;②除了柔性基层 2,其他各柔性基层路面结构的层底最大拉应力均比主线半刚性结构的要小;③柔性基层沥青路面由于采空区的存在会在路基顶面产生较大的变形,但由其引起的路面结构内部附加应力反而小,这说明了柔性基层沥青路面内部适应变形的能力要优于半刚性基层沥青路面。

由上述分析可知,由于路基采空区有不均匀沉降产生的路面附加应力,半刚性基层路面和柔性基层路面均产生了路表不均匀变形和层间附加应力。由计算结果可知,柔性基层路面路表不均匀变形偏大,而柔性基层路面结构的附加应力比半刚性基层路面小。即柔性基层路面结构更能适应由于下伏采空区地基产生不均匀位移所造成的路面结构受力的协调性,所以在有采空区的复杂地基上采用柔性基层沥青路面是合理的。

4 结 语

(1)采用有限元程序 ANSYS 计算分析了不同采空区位置与土基表面相对最大位移的关系,由此确定了采空区影响临界区域,若采空区位置在临界区域之外,则可忽略其对土基表面最大位移的影响。

(2)路表弯沉随路基填筑高度的增加逐渐增加,而面层层底拉应力和基层层底拉应力随路基填筑高度的增加呈波动式变化,具有峰值。采空区位置出现在采空区影响范围内,路面设计指标中的弯沉比拉应力对路基填筑高度的变化更敏感。

(3)与半刚性基层沥青路面相比,柔性基层沥青路面路表不均匀变形偏大,而路面结构的附加应力却比半刚性基层沥青路面的小,说明柔性基层沥青路面结构适应变形能力强,因此在有采空区的复杂

地基上采用柔性基层沥青路面结构是合理的。

参考文献:

References:

[1] 童立元,刘松玉,邱 钰,等. 高速公路下伏采空区问题国内外研究现状及进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2004,23(7):1198-1202.
TONG Li-yuan,LIU Song-yu,QIU Yu,et al. Current research state of problems associated with mined-out regions under expressway and future development [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(7):1198-1202. (in Chinese)

[2] 孙忠第. 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.
SUN Zhong-di. The research report sets of exploration,damage evaluation and treatment against underlying highway cavity[R]. Beijing:Science Press,2000. (in Chinese)

[3] Zhang L,Ernst H,Einstein H H,et al. Nonlinear Analysis of laterally loaded rock-socketed shafts [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2000,126(11):955-968.

[4] 吴盛才,徐 鹏,贺跃光. 高速公路下伏采空区地表变形预计及稳定性评价[J]. 测绘科学,2012,37(2): 97-99.
WU Sheng-cai,XU Peng,HE Yue-guang. Surface deformation prediction and stability assessment of highway underlying minded-out area[J]. Science of Surveying and Mapping,2012,37(2):97-99. (in Chinese)

[5] 袁 臻. 地下采动及溶洞路基失稳数值模拟[D]. 长沙:长沙理工大学,2005.
YUAN Zhen. Numerical simulation of instability subgrade in Goaf an Karst Area[D]. Changsha:Changsha University of Science and Technology,2005. (in Chinese)

[6] 刁心宏,刘 峰,龚葛萍,等. 高速公路路基下采空区稳定性评估与治理措施[J]. 华东交通大学学报, 2006,23(2):5-8.
DIAO Xin-hong LIU Feng,GONG Ge-ping,et al. Stability evaluation and disposal measure to abandoned workings under highway roadbed[J]. Journal of East China Jiaotong University,2006,23(2):5-8. (in Chinese)

[7] 彭帅英. 高速公路下伏多层采空区地表沉陷数值模拟及预测研究[D]. 长春:吉林大学,2013.
PENG Shuai-ying. Numerical simulation and ground subsidence prediction for multilayer goafs underlying highway[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)