

# 软弱岩土挖方段公路路基换填深度研究

张静波<sup>1</sup>, 陈兴<sup>1</sup>, 吕岩松<sup>2</sup>, 杨露<sup>2</sup>, 詹永祥<sup>3</sup>

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司 武汉市 430056; 2. 贵州高速公路集团有限公司 贵阳市 550004;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉市 430071)

**摘要:** 软弱岩土挖方段路基换填深度一直是业内备受关注且未能较好解决的一个问题。文中基于路基路面协同设计的思想,结合贵州省高速公路所惯用的典型沥青路面结构,采用动变形控制方法对重交通条件下软弱岩土挖方段路基适宜换填深度展开研究,给出了软弱岩土挖方路基强度与换填深度之间的对应关系。研究成果可供路面结构和交通荷载相近的省份设计参考。

**关键词:** 路基; 软弱岩土; 动变形; 回弹模量; 换填深度

软弱岩土挖方段公路路基换填深度一直是业内备受关注却未能得到较好解决的一个问题。严格地讲,只有实现路基路面协同变形的换填深度才能称为适宜的换填深度。由于受上部路面结构型式、交通荷载等级、填料及地基的长期强度等多因素影响,路基路面协同设计是一个非常复杂的过程。近些年来,路基路面协同设计及动力设计理念逐渐被广大科研和公路工程技术人员所接受。新版《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)<sup>[1]</sup>第3.2.4条对路基结构的动力设计指标和验算指标做出了明确规定。“路基应以路床顶面回弹模量为设计指标,以路床顶面竖向压应变为验算指标”,“路基在平衡湿度状态下,路床顶面回弹模量不应低于现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50)<sup>[2]</sup>和《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40)<sup>[3]</sup>的有关规定”,“沥青路面路床顶面竖向压应变的计算值应满足沥青路面永久变形的控制要求”。

路基动力设计的目的在于控制路基填土因交通荷载引起过大变形而导致路面结构的破坏,同时保证土体结构本身不发生破坏。根据控制参数和设计侧重点的不同,路基动力设计方法有所不同,主要有动应变控制法、动应力控制法和动变形控制法。

文献[4]对于上述的3种方法进行了较为详细的叙述。鉴于目前关于路基土破坏动应变的具体取

值尚无统一的认识或规定,结合《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2006)<sup>[2]</sup>关于路面弯沉控制的思想,本文采用文献[4]所提供的动变形设计方法开展软弱岩土挖方段路基适宜换填深度研究。

## 1 动变形法设计步骤

### (1) 确定计算参数。

确定设计采用的汽车动荷载参数,根据设计文件,计算设计年限内一个车道的累计标准当量轴次。同时确定设计交通量与交通等级,面层、基层类型,以及公路结构组合类型及相关参数。

### (2) 路基顶面允许动变形计算。

利用规范对路面弯沉的控制标准,结合路面路基协调变形条件,得到路基顶面允许动变形值 $U_d$ 。

$$U_d = 600 N_e^{-0.2} A_c A_s A_b A_a \quad (1)$$

式中: $U_d$ 为允许动变形值,0.01 mm; $N_e$ 为设计年限内一个车道累计当量轴次; $A_c$ 、 $A_s$ 和 $A_b$ 分别为与公路等级、结构层类型和性质有关的系数,可参考文献[2]确定; $A_a$ 是路基顶面动变形与路表面动变形幅值之比,也称为公路路面结构组合系数,可参考文献[5]确定。

### (3) 路基顶面动变形计算。

软弱岩土挖方段路基结构可以概化成一个典型的多层结构体系,其主要结构层由上至下依次为:面

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目,项目编号 2014-122-007

收稿日期: 2016-11-03

层、基层、底基层、换填层和地基。计算模型如图 1 所示。

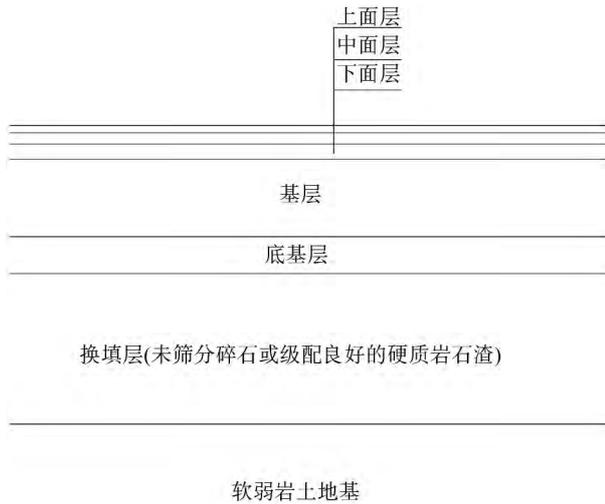


图 1 软弱岩土挖方路段路基层状结构模型

已知换填层和软弱岩土地基回弹模量,拟定一个换填层厚度,根据路基分层结构体系,参考文献[5],计算得到路基顶面动变形  $U_z$ 。

$$U_z|_{z=z_1} = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} ((-v_{p2} e^{-v_{p2} z_1} A_2 + v_{p2} e^{v_{p2} z_1} B_2 + (v_{s2}^2 - \gamma_{s2}^2) e^{-v_{s2} z_1} C_2 + (v_{s2}^2 - \gamma_{s2}^2) e^{v_{s2} z_1} D_2) e^{i(\beta x + \gamma y)}) d\beta d\gamma \quad (2)$$

式中:

$$v_{p2}^2 = \beta^2 + \gamma^2 + \gamma_{p2}^2; v_{s2}^2 = \beta^2 + \gamma^2 + \gamma_{s2}^2; \gamma_{p2}^2 =$$

$$\frac{\alpha}{c_{p2}^2}; \gamma_{s2}^2 = \frac{\alpha}{c_{s2}^2};$$

$$c_{p2} = \sqrt{\frac{\lambda_2 + 2G_2}{\rho_2}}; c_{s2} = \sqrt{\frac{G_2}{\rho_2}};$$

$$\alpha = -\omega^2 + 2V\omega\beta - V^2\beta^2。$$

其中:  $G_2$  和  $\lambda_2$  为路基土体的 Lamé 常数;  $\rho_2$  为路基土体密度;  $V, \omega$  分别为行车速度和振动圆频率;  $\beta, \gamma$  为积分变换参数;  $A_2, B_2, C_2$  和  $D_2$  为待求积分常数;  $z_1$  为路面表面到路基顶面的垂直距离。

(4) 适宜换填层厚度。

路基动变形控制设计应满足路基顶面抵抗变形破坏的要求,即:

$$U_z \leq U_d \quad (3)$$

如计算所得  $U_z > U_d$ , 则应适当增大换填层厚度,并重复步骤(3),重新计算  $U_z$ ,直至计算所得满足  $U_z \leq U_d$ 。此时所对应厚度即为当前软弱岩土地基回弹模量对应的换填层的最小允许厚度  $H_{min}$ ,也即适宜换填厚度。软弱岩土挖方路基换填深度设计

时应满足:

$$H_d \geq H_{min} \quad (4)$$

式中:  $H_d$  为换填层设计厚度;  $H_{min}$  为换填层最小允许厚度。

2 软弱岩土挖方路基换填适宜深度研究

软弱岩土挖方路基换填深度受路面结构型式、交通荷载等级、现场所能方便取得的非软弱岩土类填料强度、软弱岩土地基的长期强度等多因素影响,因此其设计是一个非常复杂的过程。本文结合贵州省高速公路所惯用的典型沥青路面结构,对重交通条件下软弱岩土挖方路段路基换填深度开展研究。设计所用路面结构数据采用依托工程——贵州省三黎高速公路的沥青路面结构型式和设计参数。三黎高速公路路面结构见表 1。其交通荷载等级为重交通,设计弯沉值为 0.230 mm,路面设计结构层参数详见表 2。

表 1 路面结构形式

结构层	结构方案	厚度/cm
上面层	细粒式改性沥青玛蹄脂碎石 (SMA-13)	4
中面层	中粒式沥青混凝土 (AC-20C)	6
下面层	粗粒式沥青混凝土 (AC-25C)	8
基层	水泥稳定碎石	41
底基层	级配碎石	20

表 2 路面结构计算参数

路面结构层	路面结构层参数			厚度 cm
	动态回弹模量/MPa	密度 kg/m <sup>3</sup>	泊松比	
上面层	6 000	2 500	0.25	4
中面层	5 500	2 500	0.25	6
下面层	5 000	2 500	0.25	8
基层	3 500	2 400	0.25	41
底基层	300	2 300	0.30	20

规范<sup>[1]</sup>中规定轻、中等及重交通路床结构层厚度为 0.8 m,特重、极重交通路床结构层厚度为 1.2 m。在公路网中轻、中等及重交通等级占绝大部分,特重和极重交通路基路面结构一般需要专门论证和特殊设计。因此,本文以重交通对应的累计标准轴次的上限值进行相应的计算,即 BZZ-100 累积标准轴次  $N_e = 2 500$  万次/车道,其结论将更具有普遍性和适用性。

将  $N_e=2\ 500$  万次/车道代入公式(1),计算得到路基顶面允许动变形值为  $0.165\text{ mm}$ 。

### 2.1 换填层填料为未筛分碎石或级配良好的硬质岩石渣

当换填层填料为未筛分碎石或级配良好的硬质岩石渣时,回弹模量参考规范<sup>[1]</sup>附录B取  $E=200\text{ MPa}$ ,通过将不同的换填深度和地基动态回弹模量进行组合,带入公式(2),即可求得满足路基顶面允许动变形的不同软弱岩土地基动态回弹模量所对应换填深度(换填层  $E=200\text{ MPa}$ ),如图2所示。

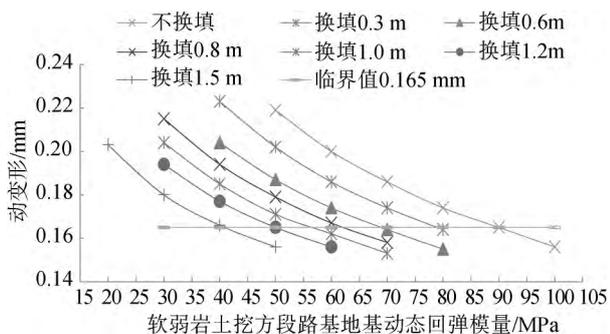


图2 不同换填厚度下路基顶面动变形计算值与软弱岩土回弹模量关系 ( $E=200\text{ MPa}$ )

将图2中的数据简化成表,可得到表3。

表3 软弱岩土地基回弹模量与换填深度对应关系

动态回弹模量阈值/MPa	90	80	70	63	56	50	41
换填深度/cm	0	30	60	80	100	120	150

对表3中的数据拟合可得:

$$H_{\text{换}} = 270 - 3M_R \quad (5)$$

式中:  $H_{\text{换}}$  为适宜换填深度, cm;  $M_R$  为地基土长期相对稳定的动态回弹模量, MPa。

表3所列地基回弹模量为其长期相对稳定动态回弹模量,需结合地基所处自然环境条件,在考虑干湿循环或冻融循环基础上采用动三轴试验测得。动三轴试验方法可参照规范<sup>[1]</sup>附录A。

考虑到目前还没有标准的动态回弹模量试验方法,根据规范<sup>[1]</sup>第3.2.6款中提供的动态回弹模量与加州承载比  $CBR$  之间的经验关系式:

$$M_R = 17.6 CBR^{0.64} \quad (2\% < CBR \leq 12\%) \quad (6)$$

$$M_R = 22.1 CBR^{0.55} \quad (12\% < CBR < 80\%) \quad (7)$$

对表3进行转换,可得到基于  $CBR$  的贵州省重交通高速公路软弱岩土挖方段路堤换填深度阈值,见表4。

表4 软弱岩土地基  $CBR$  与换填深度对应关系

$CBR/\%$	12.8	10.7	8.6	7.3	6.2	5.1	3.6
换填深度/cm	0	30	60	80	100	120	150

对表4中的数据拟合可得:

$$H_{\text{换}} = 203.66 - 16.24 CBR \quad (8)$$

### 2.2 换填层填料为天然砂砾

当换填层填料为天然砂砾时,回弹模量参考规范<sup>[1]</sup>附录B取  $E=120\text{ MPa}$ ,重复上述步骤,可求得满足路基顶面允许动变形的不同软弱岩土地基动态回弹模量所对应换填深度(换填层  $E=120\text{ MPa}$ ),见表5。

表5 软弱岩土地基回弹模量与换填深度对应关系

动态回弹模量阈值/MPa	90	85	80	77.5	74.5	72	67
换填深度/cm	0	30	60	80	100	120	150

对表5中的数据拟合可得:

$$H_{\text{换}} = 607 - 6.8 M_R \quad (9)$$

利用填料动态回弹模量与  $CBR$  之间的经验关系式,对表5进行转换,可得到基于  $CBR$  的换填料为天然砂砾的换填深度阈值,见表6。

表6 软弱岩土地基  $CBR$  与换填深度对应关系

$CBR/\%$	12.8	11.7	10.7	10.1	9.0	8.1
换填深度/cm	0	30	60	80	120	150

对表6中的数据拟合可得:

$$H_{\text{换}} = 405.82 - 32.22 CBR \quad (10)$$

表4及表6所列地基  $CBR$  为其长期相对稳定  $CBR$ ,需结合地基所处自然环境条件,在考虑干湿循环或冻融循环效应的基础上采用现场  $CBR$  试验测得。 $CBR$  现场测试试验可参照《公路土工试验规程》(JTJ E40-2007)<sup>[7]</sup>进行。

### 3 结语

(1)本文采用动变形控制法,对贵州省重载高速公路软弱岩土挖方路堤换填适宜深度进行了研究,得到了不同换填料的适宜换填深度与软弱岩土地基长期相对稳定动态回弹模量和  $CBR$  之间的对应关系,可供贵州省及其他路面结构和交通荷载相近的省份借鉴和参考。

(2)软弱岩土挖方段路基换填深度受上部路面结构、换填料和路基强度等因素影响,其计算过程较为复杂,表3、表5与表4、表6所列不同动态回弹模

量和 CBR 对应换填深度是基于贵州省典型沥青路面结构和采用级配良好的硬质岩石渣或非筛分碎石作为换填料的基础上计算得到的,实际使用中如路面结构或者采用的换填料种类发生改变,则应对换填深度做出相应调整。

参考文献:

[1] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2015.  
 [2] JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2006.  
 [3] JTG D40—2011 公路水泥混凝土路面设计规范[S].

北京:人民交通出版社,2011.  
 [4] 卢正,姚海林,吴万平. 高速公路路基结构分析及动变形设计方法[J]. 岩土力学,2010,31(9):2907—2912.  
 [5] 卢正,姚海林,胡梦玲. 基于传递—反射矩阵法的层状公路结构动力响应研究[J]. 岩土力学,2012,33(12):3767—3774.  
 [6] 卢正,姚海林,胡梦玲,等. 基于动变形控制法的路基临界高度与湿度关系研究[J]. 岩土力学,2014,35(1):184—188.  
 [7] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2007.

## Research on the Replacement Depth of Highway Subgrade for Soft Rock-soil Excavation

*ZHANG Jing-bo<sup>1</sup>, CHEN Xing<sup>1</sup>, LYU Yan-song<sup>2</sup>, YANG Lu<sup>2</sup>, ZHAN Yong-xiang<sup>3</sup>*

(1. CCCC Second Highway Consultants Co. Ltd., Wuhan 430056, China;  
 2. Guizhou Expressway Group Co. Ltd., Guiyang 550004, China;  
 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The replacement depth of highway subgrade for soft rock-soil excavation has been a problem that has been concerned and failed to solve successfully. In this paper based on the idea of collaborative design of subgrade and pavement, combining with the typical asphalt pavement structure of expressways in Guizhou Province, the dynamic deformation control method has been used to study the suitable replacement depth of highway subgrade for soft rock-soil excavation under heavy traffic conditions, and the correspondence between the replacement depth and strength of subgrade for soft rock-soil excavation is put forward. The research results can provide reference for the provinces with similar pavement structure and traffic load.

**Key words:** soft rock-soil; dynamic deformation; modulus of resilience; depth of replacement