

路床顶回弹模量的理解及计算探讨

黄峰¹, 章芳芳²

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430073; 2. 武汉城市学院, 湖北 武汉 430000)

摘要: 路基是支撑路面结构的岩土结构物, 路床顶回弹模量在路面结构设计中起重要作用, 现行设计规范均对路床顶回弹模量提出最小值要求。实际工程中路床填土存在多种类型填料分层填筑碾压而成, 由于回弹模量与级配和细料含量、压实度、含水率密切相关, 因此路基每层土回弹模量均不一致, 规范对于如何在设计初期根据路床填料计算路床顶回弹模量没有相关规定。通过对路床顶当量模量换算公式与弹性层状体系理论计算的对比分析, 提出设计阶段计算路床顶回弹模量的计算方法。

关键词: 路床; 回弹模量; 弹性层状体系; 换算

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0067-03

Understanding and Calculation of Rebound Modulus of Roadbed Top

HUANG Feng¹, ZHANG Fangfang²

(1. Central South Design and Research Institute of China Municipal Engineering Co., Ltd., Wuhan 430073, China; 2. Wuhan City University, Wuhan 430000, China)

Abstract: Subgrade is the rock-soil structure to support the pavement structure. The rebound modulus of roadbed top is an important index in the pavement structure design. The minimum requirement of rebound modulus of roadbed top is put forward in current design codes. In actual engineering, the roadbed fill is made of layered filling and rolling by various types of fillers. As the rebound modulus is closely related to gradation, fine material content, compaction degree and water content, the rebound modulus of soil in each layer of subgrade is inconsistent. The code has no relevant provisions on how to calculate the rebound modulus of roadbed top based on roadbed filler at the initial stage of design. By comparing and analyzing the equivalent modulus conversion formula of roadbed top with the theoretical calculation of elastic layered system, a method to calculate the rebound modulus of the roadbed top in the design stage is proposed.

Keywords: roadbed; rebound modulus; elastic layered system; conversion

0 引言

路基是支撑路面结构的岩土结构物, 车轮荷载通过路面结构将轮胎接触压力传至路基, 路基在车轮荷载(应力)作用下产生变形(应变), 路基的变形由不可逆的塑性变形和可逆的弹性变形两部分组成。无论是弹性变形还是塑性变形, 一旦变形过大会都导致水泥混凝土路面及沥青路面开裂, 引起路面过早损坏并影响行车舒适性。文献[1]指出路基变形量占路面结构总变形量的70%~90%, 因此, 应确保路基具有足够强度, 从而提高道路的使用寿命。

由于路基土是非线性弹性材料, 路基在车辆重复荷载作用下回弹变形即时消失, 而塑性变形残留

在路基土之中, 路基土在重复荷载作用下逐渐密实, 塑性应变则逐渐减小至稳定。回弹模量是指正应力与弹性(即可恢复)的正应变的比值, 能较好的反应路基所具有的部分弹性性质, 现行水泥混凝土路面、沥青路面设计规范均将路床顶回弹模量作为路基设计指标, 均对路床顶回弹模量最小值作出规定。由于目前工程中路床存在多种及多层材料组合, 每层土的回弹模量与材料类型、压实度等密切相关, 而现行规范对于在设计阶段如何根据填料类型计算确定路床顶回弹模量没有明确规定及计算方法。本文针对如何在设计阶段确定路床顶回弹模量进行分析。提出设计阶段计算路床顶回弹模量的计算方法。

1 路床顶回弹模量的规范规定

《城市道路路基设计规范》(CJJ 1994—2013)要求在不利季节, 按照道路等级不同, 提出各级道路路

收稿日期: 2024-10-14

作者简介: 黄峰(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路和桥梁设计工作。

床顶最小回弹模量设计值(其中快速路及主干路要求不小于30 MPa、次干路及支路要求不小于20 MPa)。回弹模量测定可采用室内实验法(主要为承载板法及强度仪法)、现场承载板法(适用于已建成的路基)、换算法(CBR值关系换算)、查表法(规范给定参考值)^[2]。对于目前路基设计该规范存在以下几点问题:一是设计单位普遍不具备室内试验实力,而勘察报告也很少提供路基土室内试验的回弹模量,即使设计单位在提勘察要求时提出该项要求,最终由于成本原因也很少有勘察单位提供该数值。二是查表法确定路基回弹模量需要确定路基土稠度,地勘报告提供的稠度基本是现状天然土的稠度,与实际路基(碾压完成后,运营进入干湿平衡状态)稠度不一致,导致查表存在误差。三是路基土理论上为弹性层状半无限体,即使在路床范围内也可能存在多种土层,每种土层回弹模量是不一样的,对于层状路基如何计算确定路床顶的回弹模量规范没有明确计算方法,而仅仅规定了路床顶面的设计回弹模量要求。

《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)规定以路床顶回弹模量为设计指标,新建公路路床顶面回弹模量的设计值 E_0 要求为: $E_0=K_s K_\eta M_R$,各指标意义如下^[3]:

E_0 为路基回弹模量设计值,MPa,规定为平衡湿度状态下,其值应大于现行《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)以及《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)的要求;

M_R 为路基动态回弹模量值,MPa,规定为标准状态,其值可通过动三轴仪试验获得、也可按照规范提供的参考值选用、初步设计阶段可根据CBR值估算;

K_s 为湿度调整系数,取值按照规范采用;

K_η 为路基土模量折减系数(考虑干湿循环或冻融循环)。

《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)实施已近10 a,在路基设计中还存在如下几点问题:一是该规范中路基回弹模量采用动态回弹模量,根据相关研究动态回弹模量要大于静态回弹模量^[4],在《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)实施后修订的《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)已采用动态回弹模量,但目前现行的《公路水泥混凝土路面设计规范》还是采用静态回弹模量。静态回弹模量可采用梁式弯沉仪测量弯沉后进行反算,而动态回弹模量测定需采用落锤式弯沉仪。目前部分地区还是采

用梁式弯沉仪来检测,但规范无静态回弹模量与动态回弹模量两者的换算公式。二是与《城市道路路基设计规范》(JTG D30—2015)一样,仅规定了路床顶的回弹模量要求,由于路床可能是有多种土层组成,如何在设计阶段计算路床顶回弹模量没有相关计算方法。

由于路床顶回弹模量关系整个路面结构计算,因此在设计阶段需根据路床土的特性进行计算确定路床顶回弹模量,而不仅仅是在设计文件中规定这一数值,若不在设计阶段初步计算及评估路床顶回弹模量,实际工程中经常出现在路基施工完成后经检测达不到要求后再增加地基处理的案例。因此,计算路床顶回弹模量是道路设计的一个关键因素。

2 路床顶回弹模量的计算公式

文献[5]中提出按照弹性层状地基理论,按照弯沉等效的原则,将多层结构转化为单层结构。由于弹性层状计算无法采用简易公式计算,国内层状体系计算软件(HPDS2017、URPDS2012)均没有计算路床顶回弹模量功能,而现行设计规范也未规定路床顶回弹模量计算方法及公式。目前设计阶段普遍未对路床顶回弹模量进行初步计算。因此,本文针对路床顶回弹模量的当量换算进行讨论。

国内已有不少学者针对混凝土路面的基层顶面当量回弹模量进行过研究^[6-7],该类研究主要是通过刚度等效或弯沉等效将混凝土路面以下基层、垫层、土基等效为当量半无限空间体。现行《公路水泥混凝土路面设计规范》规定了混凝土路面板底当量回弹模量的换算公式^[8]。现行《公路沥青路面设计规范》也规定了基层(两层或两层以上不同材料组成时)当量回弹模量的换算公式^[9]。参照上述基层当量回弹模量换算公式,基于刚度等效原则及加权平均方式提出路床顶当量回弹模量的换算如下。

基于弯曲刚度等效原则换算公式如下:

$$E_x = \frac{E_{i1} h_{i1}^3 + E_{i2} h_{i2}^3}{(h_{i1} + h_{i2})^3} + \frac{3}{h_{i1} + h_{i2}} \left(\frac{1}{E_{i1} h_{i1}} + \frac{1}{E_{i2} h_{i2}} \right)^{-1} \quad (1)$$

基于层厚的平方加权平均的原则换算公式如下:

$$E_x = \frac{E_{i1} h_{i1}^2 + E_{i2} h_{i2}^2}{h_{i1}^2 + h_{i2}^2} \quad (2)$$

式中: h_i 为分层厚度,mm; E_i 为模量,MPa。超过两层时,重复利用该公式自上而下换算。

3 公式的验证与比较

无论是水泥混凝土路面结构分析采用的弹性地基板理论还是沥青混凝土路面采用的弹性层状连续体系理论均将路床当做弹性半无限体。基于此,为验证上述公式的适用性,采用弹性层状体系理论解进行验证。

本文采用壳牌沥青路面设计软件 BISAR 3.0(层状体系计算程序)对多层土组成的路床计算出弯沉值 L_1 ,程序中作用荷载选用现行规范通用的双圆垂直均布荷载(其值 $p=0.7\text{ MPa}$),双圆荷载当量圆半径 $\delta=106.5\text{ mm}$,双圆圆心间距为 3δ 。理论计算的弯沉值应为^[10]: $L_2=2p\delta(1-\mu_0^2)\times0.712\times10^3/E_0$,利用层状体系计算出的弯沉值应等于理论计算弯沉值($L_1=L_2$),据此,则可反算回弹模量:

$$E_0=2p\delta(1-\mu_0^2)\times0.712\times10^3/L_1$$

式中: L_1 、 L_2 为路基弯沉值, 0.01 mm ; μ_0 为泊松比,取 0.35。

针对实际工程上路床常采用石灰土处理、级配碎石换填、原土(黏土)碾压,下路床及地基土采用黏土三种组合方案进行验算。石灰土和级配碎石回弹模量值参照《城市道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)附录 C 推荐范围进行取值^[11],黏性土回弹模量参照《城市道路路基设计规范》(CJJ 194—2013)附录 A 取值^[2]。假定每层路基填料回弹模量均考虑了湿度调整,取值见表 1。

表 1 三种方案回弹模量组合值

编号	方案一	方案二	方案三
上路床(0.3 m)	石灰土,回弹 200 MPa	级配碎石,回弹 150 MPa	黏土,回弹 60 MPa
下路床(0.5 m)	50M Pa	50 MPa	50 MPa
路基(路堤) (0.7 m)	40 MPa	40 MPa	40 MPa

依据每层土回弹模量值按照式(1)、式(2)计算出路床顶当量回弹模量值见表 2。采用 BISAR 3.0 计算出 3 种组合方案弯沉值 L_1 分别为 122(0.01 mm)、133.2(0.01 mm)、182.7(0.01 mm)反算回弹模量见表 2。

计算发现当多层土之间模量比越小时,采用两种当量模量换算公式与理论计算结果相近。当多层土之间模量比相差较大时,两种当量模量换算公式

表 2 三种方案路床顶回弹模量计算值 单位:MPa

编号	方案一	方案二	方案三	平均误差
公式 1 计算	57.74	55.27	46.48	18.04%
公式 2 计算	68.15	60.66	47.16	10.48%
层状体系理论计算	76.35	69.9	50.98	—

与理论计算结果相比均偏小。相较而言,采用式(2)计算结果更接近,其原因在于路床顶部上层土回弹模量越大,扩散效果越明显,路床顶弯沉则越小(当量回弹模量越大)。而式(1)采用刚度等效换算公式明显放大了底层土基(回弹模量小)的效果,造成弯沉变大,路床顶当量回弹模量较理论值小。而式(2)基于平均原则,基本符合扩散效果,所以与理论计算结果接近,且式(2)计算也更简易。因此,推荐采用式(2)计算路床顶回弹模量值。

4 结 语

路床顶面回弹模量是表征路基强度和刚度的重要参数,其对路面结构厚度计算以及路面的使用寿命都有重要的影响。目前设计仅仅依据规范提出路床顶回弹模量值,由于路基理论上为层状体系,设计阶段应根据路基填料类型按照层状理论计算路床顶回弹模量,据此考虑是否进行路基处理。经计算对比分析,建议设计阶段按照本文式(2)计算路床顶回弹模量,以此作为设计依据且结果偏安全。针对路基回弹不满足要求的工程,也可采用本公式试算,以确定路床换填类型及换填厚度。

参考文献:

[1] 黄晓明.路基路面工程[M].北京:人民交通出版社,2017.
[2] CJJ 1994—2013,城市道路设计路基设计规范[S].
[3] JTG D30—2015,公路路基设计规范[S].
[4] 郭友.路基静态与动态回弹模量转换关系研究[J].低温建筑技术,2023(9):63-66.
[5] 姜爱锋,姚祖康.路面结构中地基顶面当量回弹模量的换算[J].同济大学学报,2001(5):536-540.
[6] 蒋应军,戴经梁.不同等效原则的基层顶面当量回弹模量算法[J].长安大学学报(自然科学版),2005(5):1-6.
[7] 吴万平.《公路路基设计规范》释义手册[M].北京:人民交通出版社,2015.
[8] JTG D40—2011,公路水泥混凝土路面设计规范[S].
[9] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].
[10] 王凯.层状弹性体系的力学分析与计算[M].北京:科学出版社,2017.
[11] CJJ 169—2012,城市道路路面设计规范[S].