

公路与城市道路沥青路面力学差异性研究

刘浪, 何西西

(重庆设计集团有限公司, 重庆市 400020)

摘要: 为深入研究公路与城市道路中沥青路面设计方法的力学差异性, 通过系统对比两类规范在设计理论、控制指标、荷载标准等方面的本质区别, 结合有限元数值模拟与典型案例计算, 定量分析了同一路面结构在两种规范体系下的力学响应特性。研究结果表明, 城市道路路面引入了更注重面层抗车辙、抗剪切破坏的可靠性设计理论和剪应力控制指标, 而以弹性层状体系理论为基础的公路路面则侧重于对整体结构的疲劳性能的控制。研究结论还显示, 相同条件下按公路规范计算的路面厚度较城镇道路规范薄 10%~15%, 这种差异性在重载交通环境下尤为显著。研究为城镇地区公路或城间市政道路路面设计的规范选择提供了理论依据, 对促进路面设计理论的完善与发展具有重要意义。

关键词: 沥青路面; 力学; 差异性; 城市道路; 弹性层状体系理论; 结构设计; 城镇地区公路

中图分类号: U416.217; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0074-04

Study on Mechanical Differences Between Highway and Urban Road Asphalt Pavements

LIU Lang, HE Xixi

(Chongqing Design Group Co., Ltd., Chongqing 400020, China)

Abstract: To further study the mechanical differences in asphalt pavement design methods between highways and urban roads, by systematically comparing the fundamental distinctions between the two sets of specifications in terms of design theory, control indicators and loading standards, and combined with the finite element numerical simulations and the typical case calculations, the mechanical responses of the same pavement structure under the two specification systems are quantitatively analyzed. The results show that the reliability design theory and shear stress control index paying more attention to the rutting resistance and anti-shear failure of the surface layer are introduced into the urban road pavements. In contrast, the highway pavement design based on the elastic layered system theory focuses more on controlling the fatigue performance of the overall structure. The findings also reveal that under the same conditions, the pavement thickness calculated according to highway specifications is approximately 10%~15% thinner than that based on urban road specifications. This kind of difference is particularly significant in heavy-duty traffic environments, which provides a theoretical basis for the selection of specifications in the pavement design of highways in urban areas or interurban municipal roads, and has the important significance to promote the perfection and development of pavement design theory.

Keywords: asphalt pavement; mechanics; differences; urban roads; elastic layered system theory; structural design; urban area highways

0 引言

随着我国城镇化进程加速和交通基础设施建设的快速发展, 沥青路面作为城市道路与公路的主要路面形式, 其设计方法的科学性与适应性备受关注。目前, 国内道路路面设计主要依据《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)^[1]和《公路沥青路面设计规范》

《(JTG D50—2017)^[2]两大标准体系。这两大标准体系因功能定位、服务对象及使用环境的不同, 在设计理念、控制指标和计算方法上存在显著差异, 导致对同一路面结构的设计结果往往不尽相同^[3]。尤其是相同交通等级和路基条件下, 分别按照两类规范计算得到的路面结构厚度与力学响应存在较大差异。这种差异性在城市出入口道路、城乡连接线等既符合城镇道路功能又具有公路特征的道路项目中尤为突出。2022年3月1日, 《城镇化地区公路工程技术标准》(JTG 2112—2021)^[4]正式实施, 该标准主

收稿日期: 2025-08-26

作者简介: 刘浪(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 注册土木工程师(道路), 从事道路交通设计及其管理工作。

要规定了城镇化地区公路平、纵及横断面的设计,尚未提及路面设计的相关标准,尤其是路面的计算理论和指标控制。

近年来,国内外学者已从不同角度开展了路面设计力学性对比研究^[5-8]。彭宏图等^[9]通过对混合基层路面结构的疲劳特性和半刚性基层结构的分析,指出混合式基层更适用于大交通量的高速公路,其研究对优化公路路面结构具有重要意义。何创等^[10]利用 ABAQUS 软件模拟计算,发现轴载、基层厚度、基层模量是沥青路面结构力学响应的关键指标。吴俊等^[11]通过工程试验研究了多层道路体系在冲击荷载下的力学响应,发现多层道面体系相对传统路面结构具有更好的抗冲击性及延展性。崔永日等^[12]通过系统对比公路与城市道路两本规范分别计算出的沥青路面车辙结果,认为公路规范中对于沥青车辙计算的方法更为合理,对交叉口及公交站处则应按照城市道路设计方法进行计算。此外,有学者针对计算参数选择、结构组合优化等方面也进行了部分研究,大多数侧重于单一规范体系下的结构分析与优化,针对城市道路与公路沥青路面系统性的力学差异性研究比较方面还缺乏研究。

基于此,通过有限元数值模拟和典型案例计算,从设计理论体系、控制指标、荷载标准、材料参数等方面对两类规范的异同进行了系统对比,并根据不同规范公式计算得出的力学响应差异,对同一路面结构在不同条件下的路面设计提出了定量的分析建议,供实际项目优化设计时参考。

公路与城市道路两类规范设计理论对比如表 1 所示^[13-14]。

表 1 两种规范的基本特点对比

特征指标	公路沥青路面 设计规范	城镇道路路面 设计规范
发布年代	2017 年	2012 年
理论基础	弹性层状体系理论	增加了可靠度理论
设计理念	结构疲劳性能控制	综合使用性能控制
适用范围	各等级公路	城镇各级道路
可靠度设计	未引入	明确引入

1 力学响应对比分析

1.1 分析方法与模型建立

为深入研究不同规范体系下路面结构力学响应的差异性,本文采用 ABAQUS 有限元软件进行模拟分析。如图 1 所示,模型几何尺寸长 5 m、宽 5 m、高 6 m,单元类型为假定各结构层间完全连续的三维六

面体八结点单元^[15]。

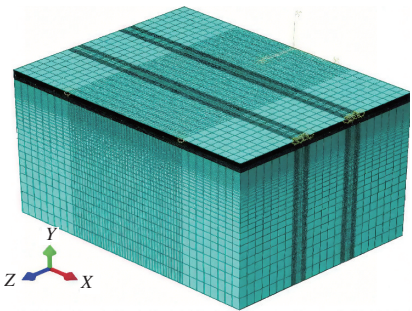


图 1 路面结构计算模型

如图 2 所示,本次研究采用规范中双轮组矩形荷载作用图式作为计算依据,将车轮荷载等效简化为均布矩形荷载形式,施加 100~250 kN 不同轴载进行分析计算,依次增加 50 kN^[16]。

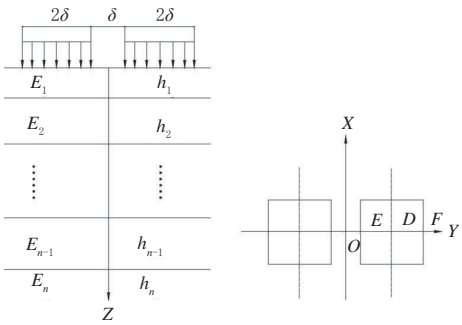


图 2 荷载作用图示

1.2 计算参数

表 2 所示为选取路面结构计算参数。

表 2 路面结构计算参数

结构层	厚度/cm	回弹模量/MPa	泊松比
细粒式沥青混凝土	4	1 200	0.35
中粒式沥青混凝土	6	1 000	0.35
粗粒式沥青混凝土	8	800	0.35
水泥稳定碎石	30	1 500	0.25
级配碎石	20	350	0.30
土基	—	40	0.40

1.3 路表弯沉响应分析

研究得出,在标准轴载作用下,路表弯沉值与轴载呈正相关,如图 3 所示,采用城市体系规范和公路规范体系计算的路面结构最大弯沉分别为 0.48 mm 和 0.66 mm;超载 150% 时(250 kN)时,路面结构弯沉最大增加 1.35 mm 和 1.88 mm,增幅分别为 181% 和 185%。

对比发现,按照公路规范体系计算的路表弯沉值在同等轴载作用下比城镇道路规范多 5%~10%。这主要是因为城镇道路规范考虑了可靠度系数和材料非线性特性,使得计算得到的路面整体刚度更大(城镇道路规范中弯沉计算公式: $l_d=600 N_e^{-0.2} A_e A_s A_b$,式中 A_e 为道路等级系数, A_s 为面层类型系数, A_b 为基

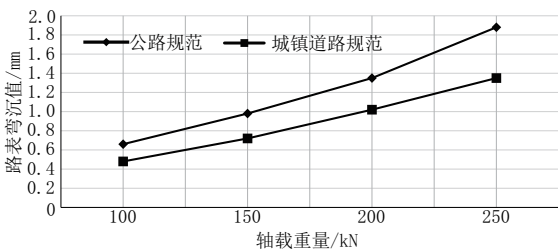


图3 路表弯沉对比

层类型系数)。此外,城镇道路规范对基层和底基层材料模量要求更高,特别是对水稳类稳定材料的刚度调整系数更为严格,进一步减小了计算弯沉值。

为验证有限元模型的有效性,选取与文献[16]中相同路面结构与荷载条件进行对比。计算结果表明,本文模型所得路表最大弯沉值分别为0.48 mm(城镇规范)、0.66 mm(公路规范),与文献中实测数据(0.52 mm与0.71 mm)的相对误差为7.0%~7.7%,在可接受范围内(<10%)。该误差主要来源于材料本构模型的简化与层间接触条件的理想化假设。

1.4 层底应力、应变响应

研究表明,两种规范体系下沥青路面各结构层的层底拉应力、拉应变均随轴载的增加而增大。如图4所示,在标准轴载作用下,采用城市体系规范和公路规范体系计算的路面结构沥青层最大拉应力分别为0.15 MPa和0.13 MPa;在超载150%(250 kN)情况下,最大拉应力增大至0.38~0.42 MPa,增大幅度为180%~192%。

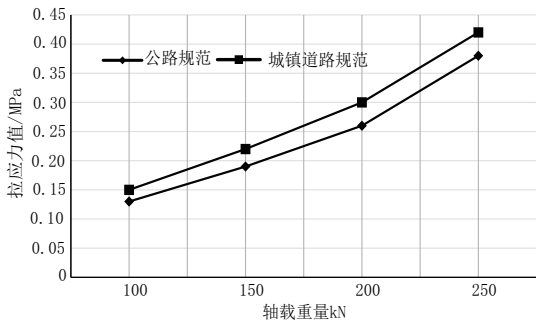


图4 最大拉应力对比

城镇道路规范在层底应力应变计算中引入了剪应力修正系数和温度影响系数,使得计算结果更加符合城市道路的实际工作状态。城市道路由于车辆启停频繁、转向调头多,沥青层内部产生的剪应力明显高于公路环境,因此城镇道路规范的计算结果通常比公路规范高15%~20%。对于城镇道路,既要控制荷载应力,又要控制温度应力性,这两个指标都要控制荷载应力,原因是城市道路由于周边建筑物的遮挡,日照不均匀,产生的温度梯度变化更大,导致

温度应力更为显著。而公路规范主要考虑荷载应力的影响,对温度应力的考虑相对简化。

1.5 剪应力与车辙分析

计算表明,在标准轴载作用下,距路表4~6 cm深处通常出现沥青层中最大的剪应力,最大值在0.25~0.35 MPa;剪应力在超载条件下可增加到0.6~0.8 MPa。

城市道路由于车速低、刹车频繁、转向多等特点,沥青层内产生的剪应力明显高于公路环境。特别是在交叉口、公交站台、弯道等路段,剪应力往往是控制设计的主要因素。城镇道路规范通过引入剪应力指标,能够更有效地预防车辙和剪切破坏,提高路面使用性能。

公路规范采用沥青混合料永久变形作为设计指标,而城镇道路规范则采用土基顶面压应变和沥青面层车辙双控指标,同时控制材料性和结构性车辙,提供了更为全面的车辙控制方法。

2 案例计算与对比分析

2.1 工程概况

为定量分析两类规范下路面设计结果的差异性,选取某城市主干道工程作为案例进行对比计算。取初始年平均日交通量为25 000辆/d,其中大客车及货车比例为18%, η 取0.8(设计车道分布系数), γ 取5%(基准年内交通的年平均增长率), t 取15年(设计基准年)。

路基为黏性土,地下水位距路表2.0 m,年平均降雨量为1 200 mm,最高月平均气温为33℃,最低月平均气温-5℃。根据试验测定,土基回弹模量为40 MPa,考虑到湿度调整系数,设计模量取32 MPa。

2.2 计算结果对比

分别按照两类规范进行路面结构设计,得到如表3所示的结果。

表3 两种规范下路面设计结果对比

设计参数	公路规范结果	城镇道路规范结果	差值百分比
设计弯沉值/mm	0.231	0.215	7.4%
沥青面层总厚度/cm	16	18	12.5%
基层厚度/cm	30	32	6.7%
底基层厚度/cm	18	20	11.1%
总厚度/cm	64	70	9.4%
基层层底拉应力/MPa	0.285	0.302	5.9%
沥青层剪应力/MPa	—	0.321	—
土基顶面压应变 $\mu\epsilon$	342	318	7.0%

计算结果表明,按照城镇道路规范设计的路面结构总厚度为70 cm,比公路规范的64 cm增加了

6 cm,增大幅度约为9.4%。这种差异主要源于城镇道路规范对可靠度要求更高,对材料参数要求更为严格,以及增加了剪应力控制指标。

在结构组合方面,城镇道路规范要求沥青面层总厚度为18 cm,比公路规范的16 cm增加了2 cm。这主要是因为城市道路车辆启停频繁、转向多,对沥青面层的抗车辙和抗剪切能力要求更高。基层和底基层厚度也有所增加,分别增加了2 cm,反映了城镇道路规范对结构整体刚度和长期性能的更高要求。

2.3 经济性与可靠性分析

按照城镇道路规范设计的路面结构约为290元/m²,比公路规范的260元/m²提高了约11.5%。

然而,按照相关疲劳寿命预测模型计算,城镇道路规范设计的路面疲劳寿命约为18.5年,比公路规范的15.2年提高了约21.7%。这意味着虽然初始投资增加了11.5%,但使用寿命延长了21.7%,从全寿命周期成本来看更为经济。

可靠性分析表明,城镇道路规范引入可靠度设计理论后,路面结构的可靠度指标从公路规范的2.5提高到3.0,失效概率从0.62%降低到0.13%,安全度提高了约4.8倍。这对于城市道路尤为重要,因为城市道路维修养护对交通影响大,社会成本高,要求更高的可靠度和更长的使用寿命。

3 结 语

通过系统对比分析公路与城市道路路面计算的力学差异性,主要得出以下结论。

设计理念上存在本质差异:公路规范以弹性层状体系理论为基础,侧重于整体结构的疲劳性能控制;城镇道路规范引入可靠度设计理论,更加注重面层抗车辙和抗剪切破坏,强调路面结构的全寿命性能。

设计指标与控制标准不同:公路规范采用多指标设计体系,而城镇道路规范增加了沥青层剪应力与沥青层层底拉应变控制指标,更适合城市道路的使用环境。

力学响应特性存在显著差异:在相同轴载作用下,按公路规范计算的路表弯沉值通常比城镇道路规范大5%~10%;而层底应力方面,城镇道路规范的计算结果通常比公路规范高15%~20%,这种差异在重载交通环境下更为明显。

深层机理分析表明,两类规范在路面厚度与造价方面的差异主要源于其设计理念与环境适应性的

系统差异。一是可靠度理论的引入与量化影响:城镇道路规范通过可靠度设计(可靠度指标由2.5提高至3.0),使结构失效概率降低约80%,直接导致材料性能要求提高与结构厚度增加,这是初始造价提升的核心原因。二是使用环境差异的系统响应:城市道路中频繁启停、转向、局部温度梯度大等使用特点,城市环境下剪应力较公路环境平均高出15%~20%,且剪应力与车辙深度呈非线性关系,这是城镇道路规范增加面层厚度的直接依据。三是全寿命周期与性能的权衡机制:尽管城镇道路规范初期成本较高,但其疲劳寿命延长21.7%,可靠度提升4.8倍,适用于维修及社会成本高的城市道路。

综上,两类规范的差异不仅是数值上的不同,更是设计科学性、环境响应与成本控制理念的系统区别。建议在城镇化地区道路路面设计中,可根据实际交通特征与环境条件灵活选用或融合两类规范的各自优势进行针对性设计,推动路面设计向更精细化、环境适应化方向发展。

参考文献:

- [1] CJJ 169—2012 城镇道路路面设计规范[S].
- [2] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [3] 陈建中,林辉,郭俊峰.城镇道路路面设计规范与公路沥青路面设计规范中沥青路面设计对比分析[J].市政技术,2017,35(3):27-29;33.
- [4] JTG 2112—2021 城镇化地区公路工程技术标准[S].
- [5] 曹林涛,李立寒.基层类型对沥青面层车辙和开裂的影响分析[J].公路工程,2008,33(4):12-14.
- [6] 许新权.基于APT的重载交通沥青路面结构研究[D].西安:长安大学,2008.
- [7] 左俊朝,周正峰,曹林涛.基层结构参数对沥青混凝土路面力学响应的影响分析[J].公路,2012(10):28-33.
- [8] HU X D, Walubita L F. Modeling mechanistic responses in asphalt pavements under three-dimensional tire-pavement contact pressure[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(1): 250-258.
- [9] 彭宏图.混合式基层沥青路面的疲劳特性分析研究[J].公路工程,2013,38(4):128-132.
- [10] 何创,曾静,李建阁,等.重载交通半刚性基层条件下沥青面层的力学响应研究[J].路基工程,2017(3):21-25.
- [11] 吴俊,李亮,杜修力,等.冲击荷载作用下多层道面体系动态性能试验[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(12): 1321-1328.
- [12] 崔永日,赵善德.城市道路与公路规范中车辙计算方法的对比分析[J].黑龙江交通科技,2024,47(2):60-64.
- [13] JTG D50—2006 公路沥青路面设计规范[S].
- [14] 王乐宇.中外沥青路面结构设计参数对比研究[D].南京:东南大学,2015.
- [15] 肖杰.快速干线沥青路面结构改造方案比选分析[J].公路与汽运,2020(1):59-61;65.
- [16] 毛媛.重载交通作用下沥青路面结构设计研究[J].交通世界,2024(33):87-89.