

回弹模量对路面验收弯沉的影响分析

连 萍

(上海同济检测技术有限公司, 上海市 200441)

摘 要: 新建沥青路面结构设计中, 各层结构材料抗压回弹模量的大小对路面验收弯沉值有一定影响。通过计算路面结构, 研究各层结构材料回弹模量变化对路面验收弯沉值的影响。结果表明: 各层结构材料的回弹模量对路面验收弯沉值的影响程度, 自路面结构下层向上层逐层递减; 各层结构材料回弹模量取值区间不同且结构厚度差异大, 导致对应的路面验收弯沉变化区间也较大。其中, 水泥稳定碎石基层的回弹模量值较大, 结构厚度较厚, 其对应的路面验收弯沉值的影响区间最大。

关键词: 路面结构设计; 回弹模量; 设计弯沉; 验收弯沉

中图分类号: U416.2; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0137-04

Modulus on Pavement Acceptance Deflection

LIAN Ping

(Shanghai Tongji Testing Technology Co., Ltd., Shanghai 200441, China)

Abstract: In the design of new asphalt pavement structures, the compressive rebound modulus of each layer of structural materials has a certain impact on the acceptance deflection value of the pavement. By calculating the pavement structure, the influence of the variation of the rebound modulus of each layer of structural materials on the acceptance deflection value of the pavement is studied. The result shows that the influence of the rebound modulus of each layer of structural materials on the acceptance deflection value decreases progressively from the lower layers to the upper layers of the pavement structure. The value range of the rebound modulus of each layer of structural materials is different, and the thickness of the structure varies greatly, leading to a relatively large variation range of pavement acceptance deflection, in which the rebound modulus value of the cement-stabilized crushed stone base is relatively large, and the structural thickness is relatively thick. The influence range of the corresponding pavement acceptance deflection value is the largest.

Keywords: pavement structure design; rebound modulus; design deflection; acceptance deflection

0 引 言

路面结构设计^[1]是道路工程设计中的主要内容^[2]。在公路和城市道路工程设计时, 应根据道路等级、路面使用性能要求和交通荷载, 结合当地气候、水文等, 进行结构组合、材料和厚度设计^[3]。新建沥青路面结构设计采用双圆垂直均布荷载作用下的弹性层状连续体系理论进行计算^{[4][5]}。路面结构设计的主要步骤为: 初拟路面整体结构类型, 确定土基回弹模量, 计算设计工作年限内一个车道上的累计当量轴次, 确定材料设计参数, 进行路面结构厚度设计, 确定最终路面结构方案^[6]。

路面结构的设计参数中, 各层结构材料回弹模

量取值大小对路面验收弯沉值的计算结果有着一定的影响, 因此, 针对各层结构材料回弹模量对路面验收弯沉值影响的研究分析和总结, 有助于为今后工作中更合理地确定材料回弹模量取值及计算路面结构厚度, 并合理控制工程造价提供一定的经验借鉴。

1 路面结构计算案例分析

以上海市某道路新建工程为例, 道路等级为城市主干路, 设计为双向6车道, 拟采用沥青路面, 路面结构设计工作年限为15年。路面结构设计的步骤主要如下。

1.1 初拟路面整体结构类型

根据道路等级、使用要求、交通条件、材料供应与施工技术条件^[4], 路面整体结构类型拟采用沥青混合料路面。

收稿日期: 2026-02-26

作者简介: 连萍(1975—), 女, 学士, 高级工程师, 从事道路材料研究和工程检测工作。

1.2 确定路基顶面当量回弹模量

路基顶面当量回弹模量是设计的重要参数^[5]。结合工程土质、水文、地质及施工条件等情况,路面结构下 30 cm 的土路基拟采用掺石灰处理,路基顶面当量回弹模量按 40 MPa 进行控制。

1.3 计算设计工作年限内一个车道上的累计当量轴次

1.3.1 交通量调查

根据现场实际观测的现状交通流量统计数据,取高峰小时流量占全天 24 h 交通量的系数 0.071,昼夜比系数为 0.7,计算得 2025 年日交通流量,如表 1 所示(取流量较大路段):

1.3.2 累计当量轴次换算

沥青路面设计工作年限内一个车道上的累计当量轴次 N_e ^{[6][7][8]}计算公式如下:

表 2 代表车型及主要参数

车辆类型	代表车型	前轴轴重/kN	后轴轴重/kN	后轴轮组数	后轴轴数	后轴距
小客车	红旗 CA630	19.3	27.9	1	1	—
大客车	瓦房店 WK174A	37.0	78.0	2	2	>3
小货车	成都 CD130	13.6	27.2	2	1	—
大货车	日野 ZM440	60.0	100.0	2	2	<3

根据调查交通量统计,计算当量轴载换算系数,结果如表 3 所示。

表 3 当量轴载换算系数

系数	小客车	大客车	小货车	大货车
沥青路面	0.002	0.512	0.019	1.110

路面设计工作年限为 15 年,计算得到设计工作年限内一个车道上的累计当量轴次 N_e 为 1.3×10^7 次/车道,交通分级属重交通等级。

1.4 确定材料设计参数

参考本地区主干路常用典型路面结构,初拟路面结构组合方案为:面层采用 3 层式沥青混合料,从上到下为 4 cm SMA-13(SBS 改性)+6 cm AC-20+8 cm AC-25;基层采用水泥稳定碎石,厚度根据计算取定;垫层采用 15 cm 级配碎石。

进一步确定各层材料弯沉计算用的设计参数,抗压回弹模量取值如表 4、5 所示。通常计算时采用回弹模量取值区间的平均值。

表 4 基层和垫层材料的设计参数(弯沉计算用) 单位:MPa

结构层材料类型	抗压回弹模量取值区间	回弹模量平均值
水泥稳定碎石	1 300~1 700	1 500
级配碎石	200~250	225

1.5 路面结构计算

路面结构力学指标采用弹性层状连续体系理

表 1 交通流量表(双向) 单位:辆/d

方向	小客车	大客车	小货车	大货车	合计
北向南	12 110	577	1 009	721	14 417
南向北	11 755	855	980	700	14 289

$$N_e = \frac{[(1 + \gamma)^n - 1] \times 365}{\gamma} \times N_1 \times \eta \tag{1}$$

式中: γ 为设计工作年限内交通量的年平均增长率,%; n 为设计工作年限,年; N_1 为路面营运第一年单向日平均当量轴次,次/d; η 为设计车道分布系数。

交通增长率:2026 年—2031 年交通增长率为 8.2%,2031 年—2041 年交通增长率为 1.4%,2041 年—2046 年交通增长率为 0.95%。

根据其他工程上海市公路货运车辆调研资料,选用的代表车型及相关参数如表 2 所示。

表 5 沥青路面材料的设计参数

结构层材料类型	20℃抗压回弹模量取值区间/MPa	回弹模量平均值/MPa
SMA-13(SBS 改性)	700~900	800
AC-20	800~1 400	1 100
AC-25	800~1 200	1 000

论。轮胎接地压强为 0.7 MPa,当量圆半径为 10.65 cm,两轮中心距离为 31.95 cm,车道系数为 0.8。路面结构计算主要控制 3 项指标:弯沉、弯拉应力与剪应力^[9],本次针对弯沉进行计算。

1.5.1 沥青路面设计弯沉值 l_d

沥青路面设计弯沉值 l_d ^{[7][10]}计算公式如下:

$$l_d = 600 \times N_e^{-0.2} \times A_c \times A_s \times A_b \tag{2}$$

式中: l_d 为路面设计弯沉值,0.01 mm; A_c 为道路等级; A_s 为面层类型系数; A_b 为基层类型系数。

道路等级为主干路, A_c 取 1.0;面层类型为沥青混合料, A_s 取 1.0;半刚性基层 A_b 取 1.0,由上式计算得 $l_d = 22.66$ (0.01 mm)。

1.5.2 路面竣工验收弯沉值^[11]

进一步计算路面竣工验收弯沉值 l_s 。主干路的路面目标可靠度^[3,7]按 90%,变异水平等级^[7]为低,对应的沥青路面可靠度^[12]系数^[7]取 1.06。考虑可靠度系数后不同厚度水泥稳定碎石的路面竣工验收弯沉值计算结果见表 6。

表 6 不同厚度水泥稳定碎石的路面竣工验收弯沉值

厚度/cm	路面竣工验收弯沉值 $l_s/(0.01\text{ mm})$	弯沉值对比
40	22.34	$l_s < l_d$
38	23.35	$l_s > l_d$
36	24.43	$l_s > l_d$

1.5.3 路面结构厚度设计

路面验收弯沉值应小于路面设计弯沉值^[13]。因此水泥稳定碎石结构层厚度最终取 40 cm,路面结构顶面竣工验收弯沉计算值 $l_s=22.34(0.01\text{ mm})$,小于设计弯沉值 $l_d=22.66(0.01\text{ mm})$,满足设计强度要求。最终确定路面结构设计组合如表 7 所示。

表 7 路面结构设计组合

层数	各层结构名称	厚度/cm
1	SMA-13(SBS 改性)	4
2	AC-20	6
3	AC-25	8
4	水泥稳定碎石	40
5	级配碎石	15
	合计	73

2 材料回弹模量取值对路面验收弯沉值的影响分析

本次研究重点针对各层结构材料在不同回弹模量取值情况下的路面验收弯沉值的变化情况。

各层结构材料的回弹模量 E 的取值区间可按表 4 和表 5 取得,材料不同回弹模量下的路面验收弯沉值和变化情况见图 1~5。其中:

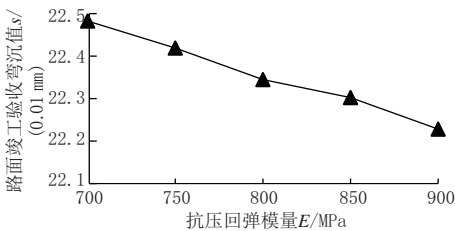


图 1 SMA-13(SBS 改性)不同回弹模量下的路面验收弯沉值

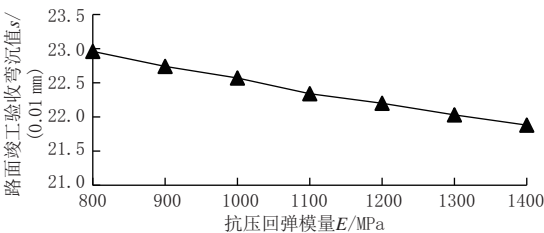


图 2 AC-20 不同回弹模量下的路面验收弯沉值

SMA-13(SBS 改性)回弹模量取 700、750、800、850、900 MPa 时,所对应的路面验收弯沉值分别为 22.48、22.42、22.34、22.30、22.23(0.01 mm)。

AC-20 回弹模量取 800、900、1 000、1 100、1 200、

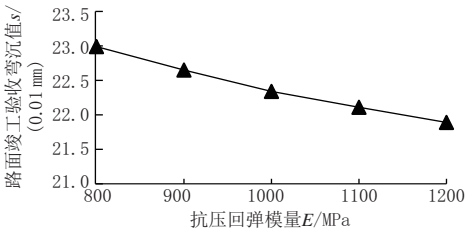


图 3 AC-25 不同回弹模量下的路面验收弯沉值

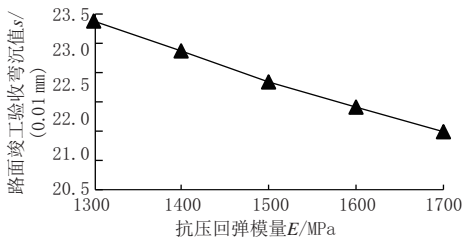


图 4 水泥稳定碎石不同回弹模量下的路面验收弯沉值

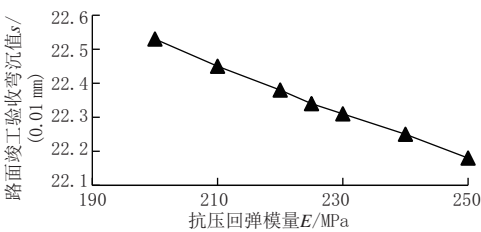


图 5 级配碎石不同回弹模量下的路面验收弯沉值

1 300、1 400 MPa 时,所对应的路面验收弯沉值分别为 22.96、22.74、22.57、22.34、22.20、22.03、21.88(0.01 mm)。

AC-25 回弹模量取 800、900、1 000、1 100、1 200 MPa 时,所对应的路面验收弯沉值分别为 22.99、22.65、22.34、22.11、21.89(0.01 mm)。

水泥稳定碎石回弹模量取 1 300、1 400、1 500、1 600、1 700 MPa 时,所对应的路面验收弯沉值分别为 23.38、22.87、22.34、21.91、21.49(0.01 mm)。

级配碎石回弹模量取 200、210、220、225、230、240、250 MPa 时,所对应的路面验收弯沉值分别为 22.53、22.45、22.38、22.34、22.31、22.25、22.18(0.01 mm)。

从图 1~5 可以看出,各层结构材料在不同回弹模量下,计算所得路面验收弯沉值也不相同;材料回弹模量取值越大,计算所得的路面验收弯沉值则越小。

各层结构材料回弹模量和路面验收弯沉值存在一定的线性关系,采用一元线性回归模型进行验证。将各材料回弹模量作为自变量 x ,路面验收弯沉值作为因变量 y ,其线性回归模型方程如下:

$$y=a+bx+e \tag{3}$$

式中: a 为回归常数; b 为回归系数; e 为误差项或回归余项。

根据各层材料不同回弹模量值和对应的路面验

收弯沉值计算回归系数 b 和回归常数 a , 并进行回归检验。计算结果如表 8 所示。

表 8 一元线性回归模型验证参数计算结果

各层结构	回归系数 b	回归常数 a	相关系数 R
SMA-13(SBS 改性)	-0.001 3	23.356 0	-0.997 3
AC-20	-0.001 8	24.364 6	-0.997 5
AC-25	-0.002 7	25.136 0	-0.955 0
水泥稳定碎石	-0.004 7	29.508 0	-0.998 6
级配碎石	-0.006 9	23.904 3	-0.998 7

由表 8 计算结果可以看出, 各层结构线性回归模型的相关系数 R 在 -1 和 0 之间, 表明自变量 x (材料回弹模量) 和因变量 y (路面验收弯沉值) 为负相关; 且 R 的绝对值接近 1, 表明线性关系较好。进一步通过显著性水平检验, 表明线性假设是合理的。

根据回弹模量变化差 ΔE 和路面验收弯沉变化差 Δl_s 的平均差值比率 $\Delta l_s / \Delta E$, 可以分析各层结构材料回弹模量对路面验收弯沉值的影响程度。各层结构材料回弹模量 E 的取值区间、路面验收弯沉值 l_s 、回弹模量和路面验收弯沉值平均差值比率 $\Delta l_s / \Delta E$ 值见表 9。

表 9 路面验收弯沉值和 $\Delta l_s / \Delta E$ 值对比

各层结构材料	回弹模量 E / MPa	路面验收弯沉值 l_s / (0.01mm)	$\Delta l_s / \Delta E$
SMA-13(SBS 改性)	700~900	22.23~22.48	0.001 3
AC-20	800~1 400	21.88~22.96	0.001 8
AC-25	800~1 200	21.89~22.99	0.002 8
水泥稳定碎石	1 300~1 700	21.49~23.38	0.004 7
级配碎石	200~250	22.18~22.53	0.007 0

由表 9 中 $\Delta l_s / \Delta E$ 的比值可以看出, 各层结构材料回弹模量对路面验收弯沉值的影响程度^[14]由路面结构下层往上层逐层递减, 其中级配碎石的影响程度最大, SMA-13(SBS 改性)的影响程度最小。

但由于各层结构材料回弹模量 E 的取值区间差异较大, 所对应的路面验收弯沉值 l_s 区间变化差异也较大。其中 SMA-13(SBS 改性)厚度最小, 回弹模量 E 也较小, 其路面验收弯沉值的区间变化最小, 为 0.25 (0.01 mm); AC-20 和 AC-25 虽然回弹模量 E 值较大, 但厚度较薄, 路面验收弯沉值的区间变化较小, 分别为 1.08 (0.01 mm) 和 1.10 (0.01 mm); 水泥稳定碎石厚度最大, 回弹模量 E 最大, 其路面验收弯沉值的区间变化也最大, 为 1.89 (0.01 mm); 级配碎石回弹模量 E 值较小, 取值区间范围也仅有 50 MPa, 其路面验收弯沉值的区间变化仅为 0.35 (0.01 mm)。

综上, 各层结构材料回弹模量 E 的取值对路面验收弯沉值 l_s 的计算结果是有一定影响的。回弹模

量 E 的合理取值, 可对计算确定路面结构厚度和工程造价提供重要的依据。

3 结 语

弯沉值是路面结构的一项重要指标^[15]。研究表明, 各层结构材料的回弹模量对路面验收弯沉计算值有一定影响, 存在线性关系, 且其影响程度由路面结构的下层往上层逐层递减。由于各层结构材料回弹模量的取值区间不同且结构厚度差异较大, 因此所对应的路面验收弯沉计算值的变化也较大。其中水泥稳定碎石基层的回弹模量值较大, 结构厚度较厚, 其路面验收弯沉值的影响区间也最大。

一般在路面结构计算时, 各层材料回弹模量习惯上采用规范的平均值。鉴于回弹模量对路面验收弯沉值存在影响, 因此建议在工程实践中, 建设单位和设计单位可结合本地区自然条件和材料类型等, 并根据道路等级和设计阶段确定材料回弹模量等设计参数。在初步设计阶段, 可结合设计规范并借鉴本地区已有试验资料或工程经验确定材料回弹模量, 在施工图设计阶段, 应结合试验等确定材料回弹模量, 以更科学、合理地计算并确定路面结构设计组合。

参考文献:

[1] 王承志. 沥青路面设计和结构计算研究[J]. 工程建设与设计, 2025(17): 111-113.

[2] 李鸿芳. 城市道路工程路面结构设计探究[J]. 建筑工程技术与设计, 2016(15): 1461, 1714.

[3] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].

[4] DG/T J08-2106—2025 城市道路设计标准[S].

[5] 董城, 张瑞蕾, 周轮, 等. 基于路基动态回弹模量的水泥混凝土路面动力响应分析[J]. 公路, 2018, 63(12): 41-47.

[6] CJJ 169—2012 城镇道路路面设计规范[S].

[7] DG/TJ08-2131—2022 路面设计标准[S].

[8] 吴小英. 沥青路面设计中应注意的超载问题分析[J]. 中国市政工程, 2017(5): 82-84; 91; 105

[9] 夏家波. 沥青路面交工验收弯沉值的计算分析[J]. 车时代, 2023(2): 49-51.

[10] 孙祥军. 试论道路路基做弯沉试验的必要性[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2014(28): 428-429.

[11] 邓翠翠. 路基路面回弹弯沉检测和评定结果分析[J]. 交通标准化, 2012(18): 53-55.

[12] 宋高嵩, 张瑞德, 庞静. 可靠度理论在公路沥青路面设计中应用的探讨[J]. 辽宁交通科技, 2004(6): 17-19.

[13] 林榕. 沥青路面弯沉指标验收标准的探讨[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2012.

[14] 王理吉. 新疆公路路基路面弯沉验收标准修正方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.

[15] 马宁. 沥青混凝土路面激光弯沉检测相关问题探讨[J]. 科技创新, 2024(11): 141-144.