

# 以弯沉为指标的沥青路面施工质量控制研究<sup>\*</sup>

郭彤<sup>1</sup>, 肖戈<sup>1</sup>, 刘海涛<sup>1</sup>, 李崛<sup>2</sup>, 刘宏富<sup>2</sup>

(1.湖南省怀芷高速公路建设开发有限公司, 湖南 长沙 410004; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 通过现场与室内试验,对弯沉指标在路面施工和管理中的作用进行分析,结果表明弯沉在施工过程中随龄期发生变化,规范中指定龄期的评价方法存在缺陷,采用弯沉随龄期变化的公式可对路面结构施工质量进行即时检测和控制;依托溆怀(溆浦—怀化)高速公路建设,提出了回弹模量与弯沉相结合的施工质量管理方案。

**关键词:** 公路;沥青路面;弯沉;施工质量

**中图分类号:** U416.217

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2017)02-0080-04

中国高速公路里程已居于世界前列,但路面早期破坏严重,部分高速公路沥青路面的使用寿命仅 6~8 年。沥青混合料的非均匀性是造成路面早期损坏的重要原因,而中国现有规范缺乏离析评定标准,系统深入的沥青混合料施工压实理论尚未形成,现有成果在实际工程中应用较少。

弯沉是中国路面设计和施工控制的重要指标,施工现场材料模量差异性的主要影响因素是摊铺时材料的离析,通过调查施工后不同位置处的实测弯沉能及时发现道路质量隐患并进行处理。该文依托溆怀(溆浦—怀化)高速公路建设,通过室内与现场试验拟合得到试验段的理论弯沉值,并据此建立质量动态控制模型,为建设高性能耐久性沥青路面提供保障和参考。

## 1 路面施工的控制指标

### 1.1 施工质量管理方法

路面施工过程具有流动性、单体性及很强的综合性,通过对其关键工序、重要工艺参数及关键设备操作程序等进行数据采集和监控,可实现对沥青路面施工过程的管理和控制。国际上沥青路面工程质量过程控制通用做法是建立具有法律依据的质量控制和质量保证体系(QC/QA)。

以设计弯沉作为路面设计和施工质量控制参数,能快速检测路面结构的整体刚度情况,与当今世界上普遍采用的弯拉应变与土基顶面压应变、应力等控制参数相比,弯沉指标具有直观可测、实际操作简单、数据结果更易处理且适合中国国情、易于推广

应用等优点。可根据 JTGF40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求及现场施工道路的具体情况,结合现场弯沉实测数据提出沥青面层施工质量管理方法。

### 1.2 结构层不同龄期的弯沉测试

中国现行规范采用某一固定龄期的设计弯沉作为路面验收指标,而实际工程中沥青路面半刚性基层的强度随龄期的增长逐渐增大,路面整体刚度也发生变化。对溆怀高速公路试验路段的 27 个测点进行弯沉测试,基层在 17、25、32、64 d 龄期的弯沉测试结果见图 1,下面层在 7、17、25 d 龄期(由于面层施工进度较快,下、中、上面层只测试 3 个龄期的弯沉值)的弯沉测试结果见图 2。

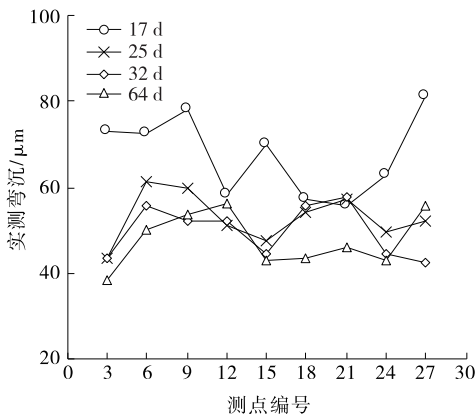


图 1 不同龄期基层实测弯沉

由图 1、图 2 可知:各结构层弯沉值的整体变化趋势是随着龄期的延长而降低,不同测点同一龄期的测试结果差异较大。由于各测点测试间隔时间较

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608058);湖南省自然科学基金青年人才培养联合基金项目(14JJ6018)

短,原材料来源相同,可排除这一因素的干扰,弯沉值差异主要是由摊铺时材料离析导致的。

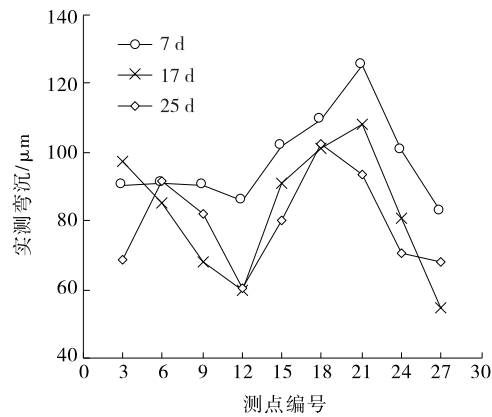


图 2 不同龄期下面层实测弯沉

2 施工质量动态控制

2.1 质量控制图

质量控制图主要通过采集数据利用图示表征生产质量情况,不仅可控制施工工序稳定,而且能及时对质量问题进行诊断,为施工方法的改进提供数学统计参考。在公路面层施工中,可以弯沉值为指标通过控制图法表达其质量波动,实现施工质量的有效控制。

2.2 弯沉动态控制

控制图一般用质控上限  $UCL$ 、中心线  $CL$  及质控下限  $LCL$  来界定质量标准和允许范围,将测试值标记至图中,其连线可反映实际施工质量波动情况。以试验段下面层不同龄期弯沉测试结果为例,采用弯沉平均值—极差,按《公路沥青路面施工技术规范》对控制图参数进行计算,计算结果见表 1,根据计算结果制作的控制图见图 3。

表 1 下面层控制图参数计算结果  $\mu\text{m}$

项目		计算结果
弯沉	平均值 $\bar{l}$	85.9
	极差 $R$	75.6
$\bar{l}$ 控制图	$CL$	85.9
	$UCL$	163.0
	$LCL$	8.8
	$CL$	75.6
$R$ 控制图	$UCL$	194.3
	$LCL$	—

利用控制图判断道路施工质量时,若满足以下

两个条件,则可认为施工质量属于控制状态:一是测试结果没有偏出控制界限,二是测试结果随机排列没有缺陷。其中排列缺陷是指测试结果连续 7 个点出现在中心线同一侧或同时上升或下降、连续 3 个点中有 2 个出现在 2 倍标准差线外、控制点出现周期波动情况等。

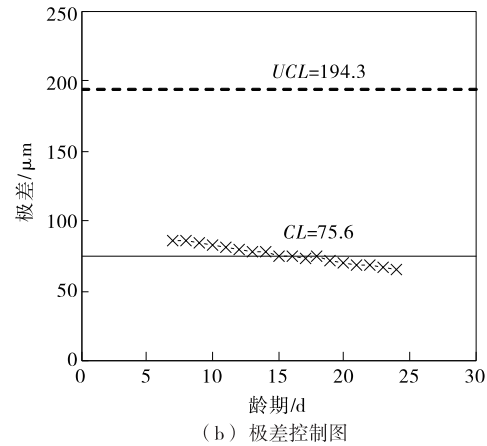
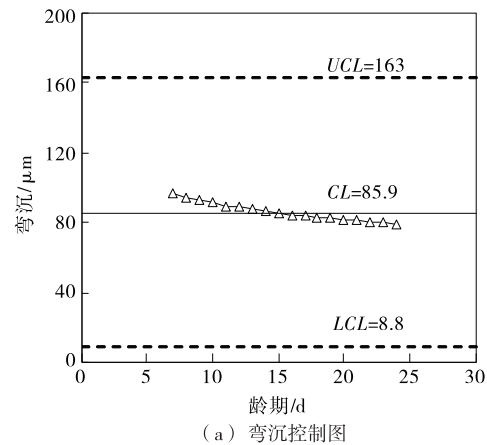


图 3 弯沉  $\bar{l}-R$  控制图

2.3 弯沉随龄期的变化规律

根据现场测试数据及图 1、图 2,各结构层的弯沉值与其施工过程的龄期有关。现行设计规范以某一固定龄期的材料回弹模量计算理论弯沉,以该弯沉值作为施工控制的标准显然与实际情况不符。基于上述讨论,参照文献[11]的方法,通过现场实测数据拟合得出沥青路面各结构层弯沉与龄期的关系(见表 2)。

将不同时间代入表 2 所示拟合公式中,计算得到各结构层不同龄期的弯沉标准值(见表 3)。在施工过程中随时对各结构层进行弯沉检测,并将实测弯沉值与表 3 中标准值进行比较,从而实现施工质量及时控制。

表2 各结构层弯沉  $l$  随龄期  $t$  的变化规律

结构层	结构类型	厚度/cm	龄期 $t$ /d	拟合公式
基层	水泥稳定碎石 (3.5 MPa)	36	17~64	$l_{i1} = 125.72t^{-0.245\ 1}$
下面层	ATB-25	8	7~25	$l_{i2} = 131.13t^{-0.157\ 4}$
中面层	AC-20	6	7~25	$l_{i3} = 114.72t^{-0.123\ 6}$
上面层	SMA-13	4	7~25	$l_{i4} = 74.86t^{-0.057\ 2}$

表3 各结构层不同龄期弯沉标准值

龄期/ d	基层弯沉 标准值/ $\mu\text{m}$	龄期/ d	面层弯沉标准值/ $\mu\text{m}$		
			下面层	中面层	上面层
17	62.8	7	96.5	90.2	67.0
18	61.9	8	94.5	88.7	66.5
19	61.1	9	92.8	87.4	66.0
...	...	...	...	...	...
32	53.8	17	84.0	80.8	63.7
33	53.4	18	83.2	80.3	63.5
34	53.0	19	82.5	79.7	63.3
...	...	...	...	...	...
62	45.7	22	80.6	78.3	62.7
63	45.5	23	80.1	77.9	62.6
64	45.4	24	79.5	77.5	62.4

### 3 溆怀高速公路施工监控分析

在湖南部分地区,高速道路建设工期短,而当地土体较潮湿,道路通车不久便出现局部大面积沉降变形、路面严重网裂和龟裂。实践证明,不仅柔性路面会过早破坏,刚性路面也会因下承层强度和水稳性不好而发生断裂、断角、翘曲等过早破坏。为消除隐患,确保整体强度达到设计要求,在溆怀高速公路路基、底层、基层施工期间就逐层进行弯沉测定。

#### 3.1 原材料控制

导致现场测试弯沉值出现较大偏差的主要因素有路面温度、湿度及材料参数。原材料质量会对沥青路面整体强度产生至关重要的影响,必须保证原材料质量。

沥青混合料中集料具有骨架作用,为沥青混合料提供主要力学性能。粗集料通常要求采用石质坚硬、耐磨、干净、无杂质且形状接近立方体颗粒的碎石,使其与沥青拌和时具有较好的粘附性;在面层摊铺过程中,粗集料易被压碎,需增加高温时压碎指标,以提高路面中、下面层的刚度。细集料通常要求其干燥、洁净、粉尘含量低,且与沥青具有良好的粘结能力。

沥青的技术指标应符合施工规范要求,贮存温

度应为 130~170 °C,并做好防水。如果选择 SBS 改性沥青,建议选择成品沥青。为预防沥青离析,在储运过程中添加稳定剂。短时间保存后,在使用前需搅拌均匀,在不发生离析的状态下使用。

#### 3.2 弯沉监控布置方案

利用贝克曼梁法测试弯沉,承载板法测试左轮迹同一弯沉测点的回弹模量。选取右幅行车道按等距 20 m 布置测点(见图 4),3 种路面结构试验段共布置 9 个回弹模量测点,其中测点 1~3 位于路面结构一上,测点 4~6 位于路面结构二上,测点 7~9 位于路面结构三上。

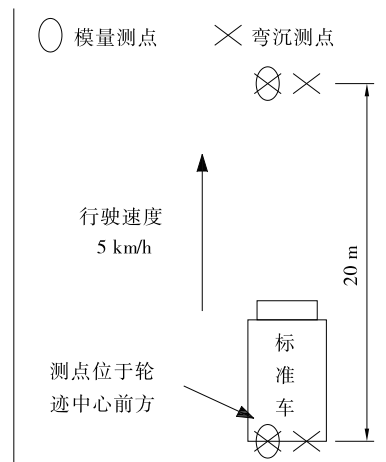


图4 现场测点布置示意图

#### 3.3 测试结果分析

分别对 3 种路面结构的精加工层、低基层、下基层、下面层、中面层、上面层进行回弹弯沉和承载板试验检测,结果见表 4、图 5 和表 5。

从表 4 可得出精加工层 7 个测点的平均回弹模量为 265.2 MPa,标准差为 49.85 MPa,符合相关规范要求,说明路基施工质量良好;底基层的回弹模量平均值为 392.5 MPa,标准差为 150.7 MP,虽然级配碎石底基层的强度达到了设计标准,但其离散性较大;下基层中,结构一的回弹模量变化很大,需进一步查明原因,结构二和结构三的测试数据离散性相对较小,符合要求;下面层顶回弹模量平均值为

5 942.9 MPa,标准差为 1 45.8 MPa(由于施工单位赶进度,检测时已铺筑了部分试验段的中面层,下面层只测试了结构二和结构三);中面层顶中,结构一的回弹模量标准差较大,为 469.7 MPa,其余两种结构分别为 142.6、104.9 MPa;表面层中,测点 3 的回弹模量异常,其余测点测试结果离散性不大。

表 4 各结构层承载板回弹模量测试结果 MPa

结构层	结构一各测点测试结果			结构二各测点测试结果			结构三各测点测试结果		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
精加工层顶	253.0	237.4	262.1	267.3	369.2	190.9	276.3	—	—
底基层顶	654.5	3 162.6	2 968.6	243.7	266.5	267.1	449.5	463.4	665.0
下基层顶	1 377.9	7 068.6	2 533.4	1 077.6	1 451.1	1 241.3	1 399.5	1 425.0	1 384.8
下面层顶	—	—	—	3 060.0	7 882.6	5 021.2	5 168.9	6 461.1	8 063.5
中面层顶	3 195.3	2 513.6	2 051.8	1 667.7	1 948.3	1 988.0	2 283.6	2 040.0	2 232.3
表面层顶	1 264.7	1 513.6	4 522.1	1 297.8	2 101.2	2 636.3	1 611.1	1 855.2	2 180.4

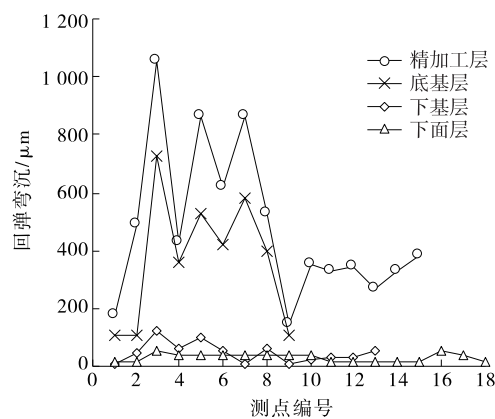


图 5 部分结构层回弹弯沉测试结果

表 5 各结构层回弹弯沉测试结果 μm

结构层	弯沉平均值	弯沉代表值	弯沉设计值
精加工层顶	478	1 110	1 790
底基层顶	372	1 263	935
下基层顶	38	113	392
下面层顶	21	55	204
中面层顶	14	40	185
表面层顶	14	40	172

由图 5 和表 5 可知:碎石精加工层和底基层的弯沉测试数据离散性明显,说明两结构层受路基强度变化和施工控制水平的影响较大;弯沉值在底基层和下面层之间急剧降低,这可能与沥青碎石层具有较大的刚度有关;由于回弹弯沉测试精度等原因,各面层的测试结果相差不大,说明弯沉测试不能单独指导施工控制,对于部分结构层仍需通过回弹模量加以测试和控制。

4 结论

(1) 弯沉是中国道路设计和施工的重要评价参

数,其结果直观可测且实际操作简单,便于以弯沉为指标指导沥青面层施工质量管理。

(2) 施工过程中各结构层的弯沉并不为定值,其值与施工过程的龄期有关,且测试结果波动较大,受测点分布和材料不均的影响。

(3) 以弯沉为控制指标,通过弯沉随龄期变化的公式可得到各结构层不同龄期的弯沉标准值,施工中可利用该指标结合控制图方法对路面进行施工质量控制。

(4) 在淑怀高速公路试验段,以回弹模量为控制指标,通过承载板实测数据对各结构层的刚度进行评估,结合弯沉测试结果共同指导施工质量及验收,取得了较好效果。

参考文献:

[1] 支喜兰,王威娜,张超,等.高速公路沥青路面早期性能评价模型[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(2).

[2] 尹健标,王端宜.沥青路面施工离析与早期损坏关系的研究[J].中外公路,2010,30(2).

[3] 王端宜,张肖宁,王绍怀.表面离析作为沥青混凝土路面施工质量评价指标的研究[J].公路,2005(1).

[4] 谭发茂,马春泉.沥青混合料均匀性和离析研究的现状分析[J].中外公路,2009,29(3).

[5] 伏晓宁.沥青路面摊铺离析评价方法研究[J].公路交通科技,2008,25(4).

[6] 王旭东.沥青路面弯沉指标的探讨[J].公路交通科技,2015,32(1).

[7] 冯志慧,薛鹏涛,王荣华,等.华南地区沥青路面设计弯沉计算方法[J].长安大学学报:自然科学版,2013,33(6).

[8] 职雨风,徐科,张肖宁.路面基层施工质量均匀性评定

安全系数(如表2所示)及安全系数随粉质黏土粘聚力和内摩擦角的变化情况(如图4、图5所示)。

表2 路堑边坡稳定性计算结果

计算方法	安全系数
瑞典条分法	1.226
Bishop法	1.305
Spencer法	1.303

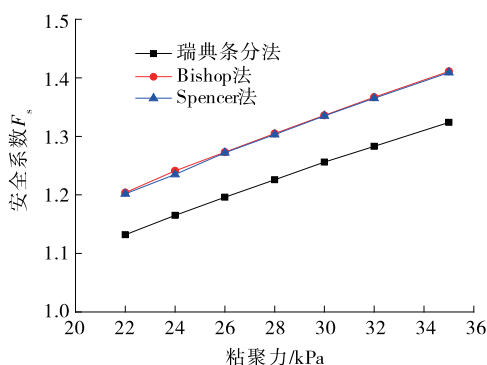


图4 边坡安全系数与土体粘聚力的关系

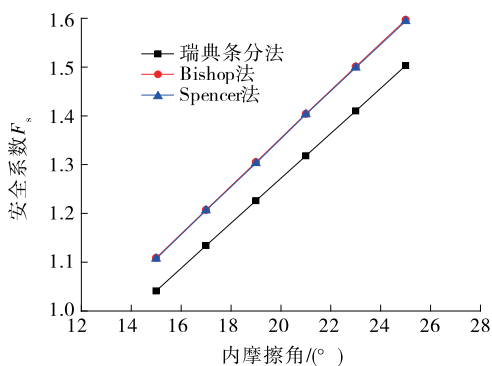


图5 边坡安全系数与土体内摩擦角的关系

由表2可知:该路堑边坡的安全系数大于1.2,说明天然状态下该边坡稳定,满足安全性要求;瑞典条分法计算所得边坡安全系数比Bishop法与Spencer法所得结果小,偏保守,而Bishop法与Spencer法所得计算结果非常接近。

由图4、图5可知:该路堑边坡的安全系数随粉质黏土层粘聚力、内摩擦角的增大呈线性关系增大,说明其稳定性主要由上覆粉质黏土层的物理力学参数所决定。鉴于其安全系数大于1.2,可仅对其采用植草植被防护。

### 3 结论

(1) 天然状态下,该典型路堑边坡的安全系数大于1.2,满足安全性要求;瑞典条分法比Bishop法及Spencer法保守;Bishop法与Spencer法所得边坡安全系数非常接近。

(2) 该路堑边坡的安全系数随粉质黏土层粘聚力、内摩擦角的增大近似呈线性关系增大,建议对其采取适当措施进行防护。

### 参考文献:

- [1] 李曙龙,黄小龙.水平成层土质边坡破坏机理及极限承载力研究[J].湖南交通科技,2015,41(2).
- [2] 赵明阶,何光春,王多垠.边坡工程处治技术[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [3] 夏艳华,白世伟.传递系数法在滑坡治理削坡方案设计中的应用[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1).
- [4] 朱益军.高速公路路堑边坡稳定性研究[D].杭州:浙江工业大学,2001.
- [5] 彭雪震,林贤蓬.基于赤平投影和极限平衡的某路堑边坡稳定性分析[J].中国水运:下半月,2009(9).
- [6] 陈泽松,夏元友,李奇敏,等.高陡路堑边坡开挖稳定性评价及应用[J].武汉理工大学学报,2010,32(5).
- [7] 胡海晨.高速公路土质边坡开挖稳定性分析[J].科技视界,2013(28).
- [8] 黄静宇,黄新任.非线性强度准则下炭质泥岩路堑边坡稳定性分析[J].湖南交通科技,2014,40(3).
- [9] 冯守中,闫澍旺,崔琳.干旱地区路堑边坡失稳的机理及稳定性分析方法[J].岩土力学,2009,30(增刊).

收稿日期:2016-10-28

(上接第83页)

方法研究[J].公路,2005(1).

- [9] 郭大进,沙爱民,孙建华,等.沥青路面工程质量控制指标体系的研究[J].公路交通科技,2007,24(4).
- [10] 宋波,郭大进.基于控制图数理的沥青混凝土路面试验检测指标误差估计[J].公路,2012(1).
- [11] 文俊.施工过程中沥青路面各结构层弯沉演变规律研

究[D].长沙:长沙理工大学,2013.

- [12] 陈林,王树杰.耐久性沥青路面力学响应及疲劳寿命预估研究[J].公路与汽运,2016(6).
- [13] 位赛厦.土基抗压回弹模量对半刚性基层沥青路面结构承载力的影响分析[J].公路与汽运,2016(4).

收稿日期:2016-10-18