

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.06.005

广东省倒装结构沥青路面弯沉修正应用

林伟弟

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘要: 为了得到适用于广东省倒装式沥青路面的弯沉修正系数, 基于倒装结构沥青路面在广河高速公路与仁深高速公路的应用现状, 结合弯沉计算方法的演变, 阐述了现行路面弯沉验收标准对倒装式沥青路面结构存在不适应性的原因。充分调研了类似工程弯沉理论计算值与现场实测值的关系, 研究了级配碎石基层与沥青层厚度、路面结构层总厚度对弯沉修正系数的影响。采用回归分析的方法, 得到了满足95%可靠度的路表验收弯沉修正系数的取值范围, 并通过工程实例对其进行了验证。结果表明: 目前国内普遍采用的单一弯沉修正系数, 是针对旧版《公路沥青路面设计规范》的计算公式提出的, 如果将此弯沉修正系数直接套用到现行2017版规范进行修正, 其结果将过于宽松, 标准偏低, 不利于现场施工质量的控制; 级配碎石层与沥青层的厚度对路表弯沉值影响很大, “级配碎石层厚/沥青层总厚度”、“级配碎石层厚/路面结构层总厚度”与弯沉修正系数均存在较强的线性关系, 比值越大, 相应的路表验收弯沉修正系数值越大, 其范围为: 1.22~1.39, 可采用线性内插法进行确定, 计算成果与现场实测数据吻合较好。建议加强各地区工程的弯沉试验和跟踪观测, 进一步细化弯沉修正系数的内插公式研究。

关键词: 道路工程; 弯沉修正; 统计回归; 倒装结构; 沥青路面

中图分类号: U416.224

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2022)06-0035-08

Application of Deflection Correction for Inverted Structural Asphalt Pavement in Guangdong Province

LIN Wei-di

(Guangdong Communications Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510507, China)

Abstract: In order to obtain the deflection correction coefficient applicable to the inverted asphalt pavement in Guangdong Province, based on the application status of inverted structural asphalt pavements in Guangzhou-Heyuan expressway and Renhua-Shenzhen expressway, combining with the evolution of deflection calculation method, the reasons for the inadaptability of the current pavement deflection acceptance standard to the inverted asphalt pavement structure are expounded. The relationship between the deflection theoretical calculation value and the field measured value of similar projects is fully investigated, and the influence of the thicknesses of graded gravel base and asphalt layer and the total thickness of pavement structural layer on the deflection correction coefficient is studied. The value range of the deflection correction coefficient for road surface acceptance to meet the 95% reliability is obtained by using regression analysis method, which is verified by engineering examples. The result shows that (1) At present, the single deflection correction coefficient generally used in China is proposed for the calculation formula in the old version of *Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement*. If this deflection correction coefficient is directly applied to the current 2017 version of the specification for correction, the result will be too loose and the standard value is low, which is not conducive to the control of on-site construction quality. (2) The thicknesses of graded gravel layer and asphalt layer have great influence on the road surface deflection value.

收稿日期: 2021-08-12

作者简介: 林伟弟 (1989-), 男, 广东潮阳人, 硕士. (642887607@qq.com)

“Graded gravel layer thickness/total asphalt layer” and “graded gravel layer thickness/total pavement structural layer thickness” have strong linear relationships with the deflection correction coefficient. The larger the ratio, the larger the corresponding road surface acceptance deflection correction coefficient value, its range is 1.22 to 1.39, which can be determined by the linear interpolation method, and the calculation result is in good agreement with the field measured data. It is recommended to strengthen the deflection test and tracking observation for each regional project, and further refine the research on the interpolation formula of the deflection correction coefficient.

Key words: road engineering; deflection correction; statistical regression; inverted structure; asphalt pavement

0 引言

“十三五”期间,围绕推动粤港澳大湾区、深圳先行示范区的“双区”建设,补短板、强弱项和适度超前发展、持续发展,广东高速公路网络不断完善,新增运营里程超过3 300 km。2020年底,伴随着潮汕环线高速等9条高速公路建成通车,广东高速公路总里程在全国率先突破10 000 km,连续7年位居全国第一。据统计,在已建成的高速公路中,传统的半刚性基层沥青路面为主要型式,占比约80%,该种路面结构最大的优点是板体性好、整体强度高、承载能力高,在轻、中交通荷载等级下整体性价比高,适应高速公路路面建设和发展的需要。但随着经济发展,交通量和轴载的增加,加上广东省气候炎热、多雨潮湿、高温持续时间长的特点,半刚性路面“耐久性差、使用寿命短”的问题不断显现出来。在运营过程中,经常出现车辙、松散、坑槽、水损害等路面损坏。在一定程度上无法满足广东交通荷载和地理气候环境的需要,使得路面寿命缩短,提早6~7 a进行大中修。

随着对沥青路面结构行为的深入认识,特别是国外长寿命或永久性沥青路面思想的引入,出于沥青路面结构耐久性和全寿命沥青路面周期经济分析思想,近些年来,许多专家学者对倒装式沥青路面进行了研究,并取得了一些有实际意义的成果。

经调查分析,倒装结构沥青路面结合了半刚性基层板体性分散荷载作用的优点及柔性基层抗疲劳性能,消除因为半刚性基层不足引发的病害,其裂缝率相对于半刚性基层沥青路面可以减少约2~3倍。综合来看,倒装式基层沥青路面更适合在湿热地区特重交通高速公路上使用^[1]。

李福普等^[2]指出,半刚性沥青路面由于水泥稳定碎石基层温缩、干缩开裂导致的反射裂缝是沥青路面的主要病害之一,而采用级配碎石基层对于减

少沥青面层裂缝具有较好效果,在克服早期横向裂缝方面表现出优越性。

王春明^[3]采用有限差分方法,模拟了福建省倒装沥青路面结构温度场的时空分布规律。研究表明:在水泥稳定碎石基层上铺设级配碎石和沥青碎石,可以改善基层内部温度梯度与基层顶部的温度变化幅度,可减少由半刚性基层温缩引发的反射裂缝。

为适应高温湿热气候条件,提高重交通荷载等级的沥青路面的耐久性,减少和延缓反射裂缝病害的发生,广东省近年来在广河高速公路(惠州段)、仁深高速公路(博罗段)等工程选取试验段,开展了规模化的倒装式沥青路面的应用研究。

1 倒装式柔性基层沥青路面在广东省的应用情况

1.1 广河高速公路(惠州段)

广河高速公路(惠州段),设计年限内1个车道上的累计标准轴载 $N_e = 2.4 \times 10^7$ 次,属于重交通荷载等级。路面结构设计采用倒装式柔性基层沥青路面结构,沥青面层采用4 cm厚Sup-12.5+7 cm厚Sup-19+8 cm厚Sup-25,上基层9 cm厚ATB-25、下基层32 cm厚级配碎石、底基层15 cm厚水泥稳定碎石。依据交通运输部公路科学研究院的《广州至河源高速公路惠州段路面弯沉标准研究报告》的结论^[4],对路表验收弯沉进行调整,采用43.5(0.01 mm)。

自2012年1月通车以来,路面行驶质量整体较好,平整密实、抗滑性能好,未发现结构性破坏^[5-6]。路面行驶质量指数(RQI)优良率占98%,仅存在局部坑槽和裂缝,但路表弯沉值较大,如图1所示。

由统计结果可知,2012—2014年间各路段路表弯沉的实测值介于37.6~72(0.01 mm)之间,个别达到81(0.01 mm)。运营前3年,各路段的弯沉代表值均较交工验收时的弯沉代表值大,整体呈现逐年增长的趋势。而2013—2014年间右幅有一定幅度

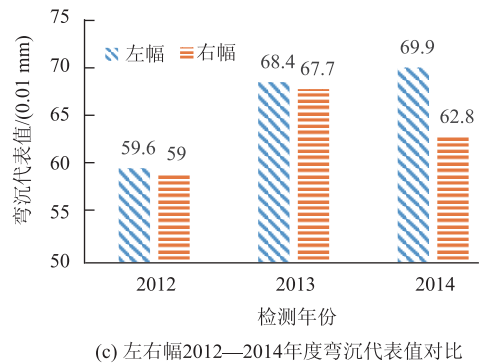
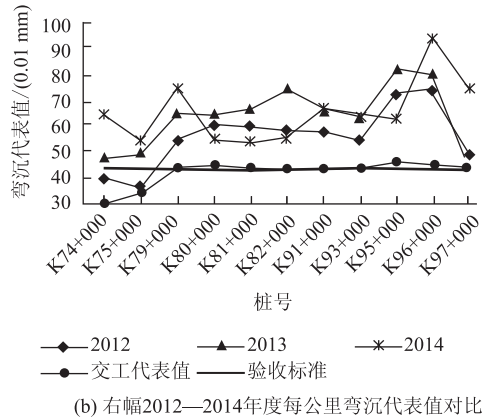
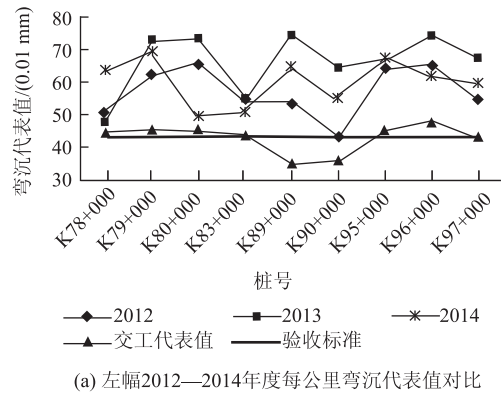


图 1 2012—2014 年度左右幅弯沉代表值对比
Fig.1 Comparison of deflection representative values between left and right pavement in 2012–2014

降低，左幅小幅增大。这主要是因为，在半刚性底基层和沥青层之间设置了 32 cm 厚度的级配碎石，其模量较低，造成路表弯沉较大。

通过对历年路面弯沉结果进行对比分析，由图 2 可以看出：弯沉随着龄期增长没有增大，在 2014 年之后，反而呈现变小的趋势。2017 与 2018 年间，双向各车道每公里代表弯沉平均值大多数在 30.0 (0.01 mm) 以下，PSSI 评价等级均为优，路面结构承载能力较高。这一现象与 20 世纪末，英国 TRL 公布的英国长寿命沥青路面的观测结果一致，与《福建省高速公路新型结构沥青路面结构设计指南》中

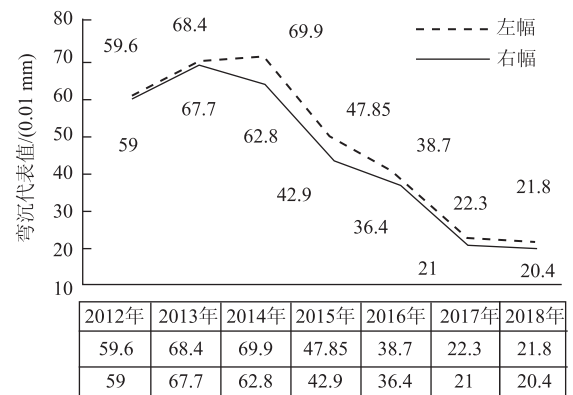


图 2 广河高速公路弯沉变化规律
Fig.2 Rule of deflection of Guangzhou–Heyuan expressway

提出的柔性路面路表弯沉随时间推移变化趋势的结论相吻合^[7]。

这主要是因为：柔性基层级配碎石模量随着沥青层加铺之后，含水量较为稳定，其模量基本保持不变；沥青层混合料由于油质挥发，沥青质增多，胶质含量有所降低，沥青胶结料产生硬化，导致沥青混合料模量的增加。

1.2 仁深高速公路（博罗段）

2016 年，仁深高速公路在充分调研了福建、广东两省倒装路面结构应用的基础上，分析研究了该结构在各工程上的适用性及优缺点。对路面结构进行了优化调整，并应用于博罗县的平安互通立交至响水停车区 10 km 路段（桩号 K459+500 ~ K469+595）。通过减薄级配碎石基层的厚度，降低沥青面层在荷载作用下的弯曲半径，从而减缓沥青面层的结构性疲劳破坏。同时为保证柔性层具有足够的层底弯拉应力，满足应力的有效扩散，将级配碎石层厚度调整为 12 cm。此外，增加水稳底基层厚度至 36 cm，有利于降低路基土顶面压应力水平，同时提高级配碎石的模量。路面结构参数如表 1 所示。

表 1 路面结构参数		
Tab.1 Pavement structural parameters		
结构层	材料	动态压缩模量/MPa
上面层	4 cm SMA-13	12 000
下面层	6 cm AC-20C	11 000
上基层	16 cm ATB-25	9 000
下基层	12 cm 级配碎石	500
底基层	18 cm 4%水泥稳定级配碎石	10 000
底基层	18 cm 4%水泥稳定级配碎石	10 000
土基顶面		60

根据交通量预测结果，计算得到设计使用年限

内设计车道累计大型客车和货车交通量为: 2.015×10^7 辆, 属于特重交通荷载等级。根据现场实测弯沉结果, 修正后的路表验收弯沉采用 36.8 (0.01 mm), 路面的各项力学指标、无机结合料稳定层与沥青混合料层的疲劳开裂验算均能满足规范的相关要求。

该工程从 2018 年底通车至今 3 a, 根据 2020—2021 年度定检报告: 路面技术状况指数 (PQI) 为 97.18, 其他各分项指标: 路面损坏状况指数 (PCI) 为 99.56, 路面车辙深度指数 (RDI) 为 96.39, 路面行驶质量指数 (RQI) 为 95.42, 路面跳车指数 (PBI) 为 99.31, 路面抗滑性能指数 (SRI) 为 93.19, 路面结构强度指数 PSSI 为 99.81, 路面弯沉代表值为 17.3~25.1 之间, 路面结构强度较好。PQI 优等路率为 100%。从路面性能看, 路面水损坏、坑槽、车辙等早期损坏问题几乎没有, 路面行驶质量高, 取得了明显的经济和社会效益。

2 现行规范对倒装式沥青路面验收弯沉的适用性分析

刘贺等^[8]通过对全柔性沥青路面各层实测弯沉值与计算值进行比较分析得到: 采用设计文件设计值和计算软件 HPDS2011 的计算值, 合格率为 0, 需调整指标才能完成对柔性基层及相应面层的弯沉判定。

王璜^[9]研究认为, 各弯沉标准与实测弯沉间均存在相互矛盾的情况, 现行弯沉设计标准体系不适用于柔性基层沥青路面结构, 应重新调整柔性基层沥青路面设计的弯沉计算方法。

王旭东^[10]从路面结构承载能力角度出发, 指出完善弯沉设计指标是完善沥青路面力学经验设计方法的有效途径。聂忆华等^[11]针对我国弯沉计算公式对全厚式沥青路面结构的不适应性, 通过国内外计算公式参数的修正, 提出了新的弯沉计算公式。胡春华等^[12]利用现场实测数据进行统计分析, 于 2005 年提出了能够适应柔性基层沥青路面的弯沉 F 修正公式。冯志慧等^[13]通过分析具有代表性的柔性结构沥青路面的总厚度及层底受力状况, 进行了弯沉回归分析, 重新标定了基层类型系数。

纵观我国沥青路面发展史, 从 1978—2017 年, 规范经过 7 次修订和不断调整。每次弯沉设计公式的修订, 都是针对当时最典型的公路结构进行调整。现行设计规范的设计体系主要是以半刚性基层为典型结构的沥青路面设计。对于半刚性沥青路面, 弯沉设计标准总体上是逐渐提高, 即弯沉值逐渐降低。而倒装式沥青路面结构毕竟是一种新的结构型式, 与传统半刚性基层存在较大差异, 在国内真正应用

只有 15 a 左右, 尚未针对该路面结构制定相应的设计标准, 在广东省内也只有广河、仁深两条高速公路进行规模化应用。

规范指出: 对于交通量较大的柔性基层沥青路面结构, 现在尚处于研究阶段, 缺乏理论研究及工程实践经验, 故采用柔性基层沥青路面结构时, 应综合考虑国外经验及国内实际^[14]。2017 版《公路沥青路面设计规范》, 虽然取消了路表弯沉设计指标, 但由于弯沉测定广为熟知, 具有使用简便、直观、经济和较快速的优点, 同时对于同一种或同一段路面结构, 弯沉指标仍能反映出该结构的承载能力, 故 2017 版设计规范仍将弯沉作为路基和路面的交工验收指标。

2017 版规范附录 B.7.3^[14] 计算路表验收弯沉值时, 采用平衡湿度状态下顶面当量回弹模量乘以模量调整系数 k_l , k_l 用以协调理论弯沉与实测弯沉的差异, 如式 (1)、式 (2) 所示:

$$l_a = P \bar{l}_a, \quad (1)$$

$$\bar{l}_a = f\left(\frac{h_1}{\delta}, \frac{h_2}{\delta}, \dots, \frac{h_{n-1}}{\delta}; \frac{E_2}{E_1}, \frac{E_3}{E_2}, \dots, \frac{k_l E_0}{E_{n-1}}\right), \quad (2)$$

式中, $\bar{l}_a$ 为理论弯沉系数; k_l 为路基顶面回弹模量调整系数; δ 为标准荷载的当量圆半径, 106.5 mm; $h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$ 为各结构层厚度; E_0 为平衡湿度下路基顶面回弹模量; $E_1, E_2, E_3, \dots, E_{n-1}$ 为各结构层模量; P 为标准轴载的轮胎接地压强, 0.7 MPa。

采用 HPDS2017 根据弹性层状体系理论按上式计算得到仁深高速公路 (博罗段) 倒装式路面结构的理论路表交工验收弯沉值 $l_a = 30.1$ (0.01 mm), 这与现场实测弯沉值存在较大的差别。该工程于 2018 年 9 月施工完成路面上面层, 现场采用贝克曼梁实测路表弯沉代表值为 30.3~37.6 (0.01 mm) 之间。

可以看出采用现行规范计算路表验收弯沉值, 在应用中依然存在弯沉“超标”的问题。分析其原因, 主要有以下几个方面:

2.1 模量调整系数 k_l

该系数是通过采集国内 4 条柔性路面公路的容许弯沉值与累计轴次进行回归得到的, 其样本数量较少, 且大多数采集样本为北方省份, 对于南方高温湿热地区代表性不足。根据规范的解释说明: 当路面结构层采用无机结合料稳定类基层沥青路面和水泥混凝土基层沥青路面, 取 0.5; 粒料类基层沥青

路面和沥青结合料类基层沥青路面,当采用无机结合料稳定底基层时,取0.5,否则取 $1.0^{[14]}$,即倒装结构的沥青路面(粒料类基层沥青路面,无机结合料稳定底基层),该模量调整系数 k_1 值取0.5,与半刚性基层路面类型取值一致。计算弯沉值时,仅能通过各结构层模量取值不同加以调整。

2.2 气候条件及交通环境的特殊性

广东省地处中国大陆最南部,位于东亚季风区,从北向南分别为中亚热带、南亚热带和热带气候。气候炎热,高温持续时间长,是全国光、热和水资源较丰富的地区,且雨热同季。年平均气温 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$,历史极端最高气温为 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-7.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。按沥青路面气候分区属于夏炎热冬温潮湿区,即1-4-1。根据广东省近20 a的气候数据统计显示,近年来极端高温、 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上高温天数、 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上高温积温等气候参数均有增强的趋势,高温条件将明显影响路面性能,进而影响到材料的选择。沥青混合料在长时间重载和高温的作用下,其压缩模量和强度将随温度升高而显著下降,加大沥青混合料的变形,进而产生车辙、推移等永久性病害,降低路面的使用性能。

广东省的雨季主要集中在4—9月,年平均降水量为 $1\,789.3\text{ mm}$,年降水量最少为 $1\,314.1\text{ mm}$,最长达 $2\,254.1\text{ mm}$ 。降水对地基土和路面材料的冲刷及材料性能影响很大。土体含水量增加,将导致路基承载力下降,影响路面使用性能^[15]。

多雨潮湿地区施工过程中,半刚性底基层的强度形成较慢,导致级配碎石的承载能力较低,级配碎石顶面弯沉普遍偏大,难以达到原设计要求;同时潮湿状态下的级配碎石层模量降低也会导致弯沉的增加^[16]。

2.3 级配碎石的粒料性

级配碎石由于没有采用胶结料,其强度主要靠碎石自身的强度及碎石颗粒之间的嵌挤能力,其力学性能与沥青混合料和半刚性材料不同,受原材料质量、粗集料含量以及施工期间含水量影响较大。故原材料对级配碎石混合料的性能影响非常大,采用优质的级配碎石和严格控制生产质量对于保证级配碎石的性能非常重要^[7,17]。

2.4 交通负荷大

交通量与中型以上货车比例是影响路面使用性能的关键因素。广东省作为全国经济第一强省,货物运输及客流量均排在全国前列。为了便于比较,收集了全国89条高速公路的设计累计标准轴次,汇

总得到统计分布图,如图3所示。

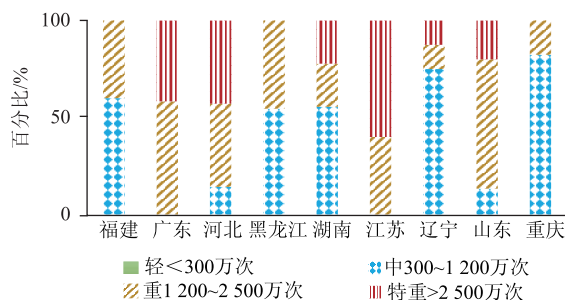


图3 全国89条高速公路累计标准轴次统计分布

Fig.3 Statistical distribution of cumulative standard axes of 89 expressways in China

全国现有高速公路交通荷载具有较大的差异,东部沿海发达省份(如广东、山东、江苏)普遍为重载交通等级公路;北方及西部地区(如黑龙江、辽宁、重庆)以轻、中型交通荷载等级公路为主。其中广东省特重型交通荷载公路的比例高达42%,加之超载问题较为突出,使得路面的使用年限大打折扣。

图4为广东省已运营部分高速公路交通荷载推算15 a累计标准轴次的区域分布情况,从图中可以看出,广东省内所调查的23条高速公路均为重型和特重型交通等级公路,珠三角地区大部分为特重型交通等级公路,其中广深高速设计累计标准轴次高达4958万次。

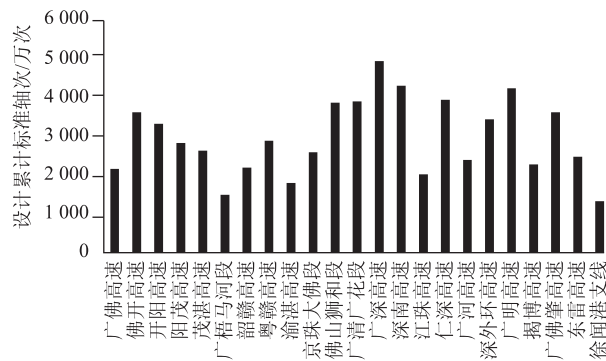


图4 广东省23条高速公路累计标准轴次统计分布

Fig.4 Statistical distribution of cumulative standard axes of 23 expressways in Guangdong Province

目前国内专家学者,基于倒装式沥青路面的特点,考虑地区的气候、交通量等因素提出的修正弯沉验收标准,均为针对2006版规范的计算公式所提出。而现行的2017版规范同样不能很好地适用于计算倒装式沥青路面验收弯沉值,需要对弯沉计算公式进行修正,为广东省倒装式沥青路面路表验收弯沉值的确定提供依据。

3 弯沉修正及验证

根据设计规范确定路表验收弯沉值的原则, 验收弯沉值是依据路面结构模量计算标准轴载的轮胎接地压强 0.7 MPa 下的计算弯沉来确定的^[18], 取其中最小弯沉值乘以模量调整系数 k_l 为验收弯沉值。

仁深高速公路倒装结构路段施工完成后, 采用贝克曼梁对路表的弯沉进行了实测, 路段长度 10 km, 桩号范围为 K459+500~K469+595。沿行车方向每隔 20 m 实测 1 个断面, 每个断面分左右幅、分车道, 共测试了 2 514 组数据, 如图 5 所示。

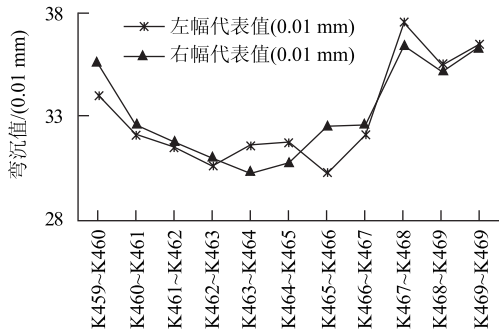


图 5 仁深高速公路倒装结构路段路表弯沉代表值
Fig. 5 Representative values of road surface deflection in inverted structural section of Renhua-Shenzhen expressway

从图 5 中可以看出, 倒装结构路段路表弯沉代表值处于 30.3~38.0 (0.01 mm) 之间, 左右幅弯沉趋势一致, 离散性不大。对于 K467~K468 路段弯沉达 37.6 (0.01 mm), 分析其原因, 主要是因为该路段为低填浅挖段, 且施工期间连续的雨水天气及丰富的地表水系及地下水系造成路面结构层含水量偏大。如果采用现行规范计算值 $la=30.1$ (0.01 mm) 作为弯沉验收指标, 则路表交工验收弯沉合格率为 0。

参考文献 [7] 中交通运输部公路科学研究院汇总了全国 9 个省 328 个路段的柔性结构、厚沥青层路面结构计算弯沉与实际测量弯沉的差异, 大约有 72.8% 的路段不合格。建议计算弯沉值可在 2006 版设计规范 F 修正的基础上, 放大 1.4 倍。基于 95% 统计可靠性的弯沉修正, 在大量现场实测数据基础上, 对弯沉计算值加以修正。假设修正系数为 K , 当 K 值等于 1.22 时, 修正后的验收弯沉值为 36.8 (0.01 mm), 可满足可靠度为 95% 的要求。

由于广东省内已建成的高速公路中, 大规模应用倒装结构路面的工程较少, 为了提高回归方程的准确性, 增加样本数量, 本研究将福建省近些年修建的同类型高速公路进行统计分析, 如表 2 所示。

表 2 各高速公路的弯沉修正系数
Tab. 2 Deflection correction coefficient for each expressway

项目	仁深	广河	建泰	建泰匝道	厦蓉	厦沙	龙长	浦南	泉三	厦漳
交通荷载等级	特重	重型	中型	轻型	重型	重型	中型	中型	特重	特重
沥青层厚度/cm	26	28	20.5	20	28	26	26	26	26	28
级配碎石上基层厚度/cm	12	32	16	15.5	15	16	16	15	15	16
路面总厚度/cm	89	75	66.5	55.5	79	74	72	73	73	79
X1: 级配碎石层厚÷沥青层厚度	0.46	1.14	0.78	0.78	0.54	0.62	0.62	0.58	0.58	0.57
X2: 级配碎石层厚÷路面总厚度	0.13	0.43	0.24	0.28	0.19	0.22	0.22	0.21	0.21	0.20
HPDS2017 计算验收弯沉值/(0.01 mm)	30.1	31.4	39.5	48.8	31.6	31.7	31.5	31.7	31.7	31.4
工程采用的验收弯沉值/(0.01 mm)	36.8	43.5	49.7	61.8	38.9	40.1	38.8	38.6	38.6	38.8
弯沉修正系数 K	1.22	1.39	1.26	1.27	1.23	1.26	1.23	1.22	1.22	1.24

从前面的分析可知, 级配碎石层厚与沥青层厚的厚度对路表弯沉值影响很大。表 2 中, 当级配碎石层厚与沥青层厚比值越大, 相应的弯沉修正系数 K 值越大, 其大小从 1.22~1.39 不等, 并非固定值。广河高速公路级配碎石层厚达 32 cm, 与沥青层厚比值为 1.14, 相应的弯沉修正系数为 1.39。仁深高速公路减薄级配碎石层厚度为 12 cm, 增加水稳底基层厚度至 36 cm, 路面结构层与福建的厦蓉高速公路较接近, 相应弯沉修正系数为 1.22。

如果按照 2006 版规范及《福建省高速公路新型结构沥青路面结构设计指南》将修正系数取值为 1.4, 虽然现场实测的弯沉代表值均能 100% 满足验收要求, 但将导致现场施工容易达到设计要求, 标准偏低, 不利于现场施工质量的控制。因此, 建议采用 2017 版规范公式计算倒装式沥青路面的验收弯沉值, 其修正系数 K 值需根据不同工程的路面结构型式进行内插取值, 其范围为 1.22~1.39。

将上述所选路段的级配碎石层厚分别与沥青层总厚

度、路面结构层总厚度的比值作为横坐标, 弯沉修正系数 K 作为纵坐标, 回归所得曲线如图 6、图 7 所示。

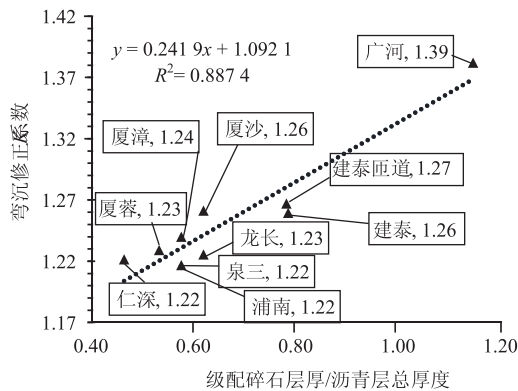


图 6 级配碎石层厚/沥青层总厚度与弯沉修正系数关系

Fig. 6 Relationship between graded gravel layer thickness/total asphalt layer thickness and deflection correction coefficient

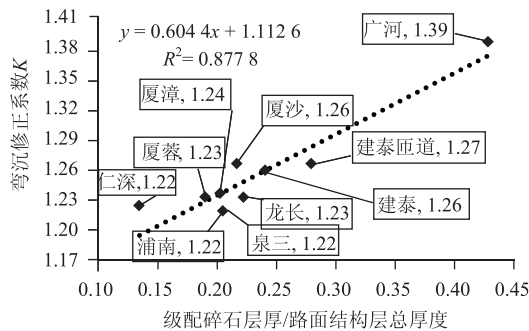


图 7 级配碎石层厚/路面结构层总厚度与弯沉修正系数关系

Fig. 7 Relationship between graded gravel layer thickness/total pavement structural layer thickness and deflection correction coefficient

从图中可以看出, “级配碎石层厚/沥青层总厚度”、“级配碎石层厚/路面结构层总厚度”与弯沉修正系数均有着较强的线性关系, 相关系数 R^2 的为 0.89。路表验收弯沉修正系数 K , 可由线性内插确定。

由于本次研究只采用了 10 条倒装式沥青路面的验收弯沉资料, 样本数量相对较少。同时由于弯沉修正系数受很多因素的影响, 故建议各地区工程进行弯沉的试验和跟踪观测, 进一步细化修正系数 K 值的内插公式研究。

4 结论

(1) 现行的《公路沥青路面设计规范》不能很好地适用于计算倒装式沥青路面验收弯沉值, 需要对其进行修正。目前国内普遍采用的弯沉修正系数

1.4, 是针对旧版《公路沥青路面设计规范》的计算公式所提出。如果单一地将此弯沉修正系数套用到现行 2017 版规范进行修正, 结果将过于宽松, 标准偏低, 不利于现场施工质量的控制。

(2) 在大量现场实测数据基础上, 统计各工程弯沉理论计算值与实测值的关系, 分析了“级配碎石层厚/沥青层总厚度”、“级配碎石层厚/路面结构层总厚度”与弯沉修正系数均有着较强的线性关系, 相关系数 R^2 约为 0.89。回归得到了满足 95% 可靠度的路表验收弯沉修正系数 K , 其范围为 1.22~1.39。当级配碎石层厚度越大, K 值越大, 具体操作可通过内插确定。

(3) 考虑本次研究只采用了华南地区 10 条倒装式沥青路面的验收弯沉资料, 样本数量相对较少。同时由于弯沉修正系数受很多因素的影响, 故建议各地区工程进行弯沉的试验和跟踪观测, 进一步细化修正系数 K 值的内插公式研究, 为今后倒装式沥青路面进一步推广应用提供理论参考, 为广东省倒装式沥青路面路表验收弯沉值的确定提供依据。

参考文献:

References:

- [1] 许新权, 吴传海, 李善强. 广东省高速公路典型结构沥青路面使用性能调查与分析 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2016, 40 (4): 689-693, 699.
XU Xin-quan, WU Chuan-hai, LI Shan-qiang. Investigation and Analysis on the Performance of Asphalt Pavement of Typical Structure in Guangdong Province [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering Edition), 2016, 40 (4): 689-693, 699.
- [2] 李福普, 陈景, 严二虎. 新型沥青路面结构在我国的应用研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (3): 10-14.
LI Fu-pu, CHEN Jing, YAN Er-hu. Study and Application of New Asphalt Pavement Structures in China [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (3): 10-14.
- [3] 王春明. 福建省典型倒装路面结构温度场数值模拟 [J]. 南昌工程学院学报, 2011, 30 (4): 39-44.
WANG Chun-ming. Temperature Field Numerical Simulation of Inverted Pavement Structure in Fujian Province [J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2011, 30 (4): 39-44.
- [4] 交通运输部公路科学研究院. 广州至河源高速公路惠州段路面弯沉标准研究报告 [R]. 北京: 交通运输部

- 公路科学研究院, 2011.
- Research Institute of Highway of Ministry of Transport. Research Report on Road Surface Deflection Standard for Huizhou Section of Guangzhou-Heyuan Expressway [R]. Beijing: Research Institute of Highway, Ministry of Transport, 2011.
- [5] 蒋智禹. 倒装式沥青路面结构的力学性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- JIANG Zhi-yu. Research on Mechanical Performance of Inverted Asphalt Pavement Structure [D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [6] 李伟聪, 龚饶斌. 全柔性沥青路面弯沉验收标准研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2019, 43 (3): 462-466.
- LI Wei-cong, GONG Yao-bin. Study on Deflection Acceptance Standard of Full Flexible Asphalt Pavement [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering Edition), 2019, 43 (3): 462-466.
- [7] 福建省高速公路建设总指挥部, 交通运输部公路科学研究院, 长沙理工大学. 福建省高速公路新型结构沥青路面结构设计指南 [R]. 福州: 福建省高速公路建设总指挥部, 2013.
- Headquarters of Fujian Expressway Construction, Research Institute of Highway of Ministry of Transport, Changsha University of Science & Technology. Guide for Structural Design of New Structural Asphalt Pavement of Expressway in Fujian Province [R]. Fuzhou: Headquarters of Fujian Expressway Construction, 2013.
- [8] 刘贺, 吴传海. 全柔性沥青路面各层实测弯沉值与计算弯沉值比较分析 [J]. 广东公路交通, 2013 (2): 1-4.
- LIU He, WU Chuan-hai. Comparative Analysis on Deflection Value of AA Flexible Asphalt Pavement Layers between Measured and Calculated [J]. Guangdong Highway Communications, 2013 (2): 1-4.
- [9] 王璜. 柔性基层沥青路面弯沉设计指标体系研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.
- WANG Huang. Study on Deflection Design Criteria System for Flexible Base Asphalt Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [10] 王旭东. 沥青路面弯沉指标的探讨 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (1): 1-12, 24.
- WANG Xu-dong. Discussion of Asphalt Pavement Deflection Indicator [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (1): 1-12, 24.
- [11] 聂忆华, 张起森. 全厚式沥青路面结构弯沉设计指标研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (2): 5-7, 12.
- NIE Yi-hua, ZHANG Qi-sen. Researches on Bending Index of Full-depth Asphalt Pavement Structure [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24 (2): 5-7, 12.
- [12] 胡春华, 孙立军. 沥青路面弯沉修正系数研究 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (9): 66-69.
- HU Chun-hua, SUN Li-jun. Study on Correction Coefficient of Asphalt Pavement Deflection [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (9): 66-69.
- [13] 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): 28-35.
- FENG Zhi-hui, XUE Peng-tao, WANG Rong-hua, et al. Calculating Method of Design Deflection in Asphalt Pavement Based on South China Area [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2013, 33 (6): 28-35.
- [14] JTG D50—2017, 公路沥青路面设计规范 [S].
- JTG D50—2017, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [15] 黄博彦, 王钊. 广东省柔性基层沥青路面设计弯沉计算参数研究 [J]. 广东公路交通, 2012 (2): 8-12.
- HUANG Bo-yan, WANG Zhao. Study on Calculation Parameters of Design Deflection for Asphalt Pavement with Flexible Base in Guangdong Province [J]. Guangdong Highway Communications, 2012 (2): 8-12.
- [16] 高德天. 高温与重载对沥青路面的影响 [J]. 山西建筑, 2010, 36 (28): 270-271.
- GAO De-tian. The Influence of High-temperature and Heavy Load to the Asphalt Pavement [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36 (28): 270-271.
- [17] 高启聚, 郭忠印, 丛林. 粒料基层沥青路面土基压应变设计指标研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (7): 13-17.
- GAO Qi-ju, GUO Zhong-yin, CONG Lin. Research on Design Index of Compressive Strain on Top of Subgrade Soils in Asphalt Pavement with Granular Base [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (7): 13-17.
- [18] 徐艳玲. 多指标体系下的路基路面弯沉验收方法研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- XU Yan-ling. Study on Acceptance Methodology of Subgrade and Pavement Deflection under Multi-indicator System [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.