

华南地区沥青路面设计弯沉计算方法

冯志慧^{1,2},薛鹏涛³,王荣华²,王 钊⁴

(1. 河南农业大学 信息与管理科学学院,河南 郑州 450046; 2. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;
3. 河南省交通运输厅公路管理局,河南 郑州 450016; 4. 广东潮惠高速公路有限公司,广东 广州 510100)

摘 要:为了确定更加适合中国柔性沥青路面结构设计中的基层类型系数 A_b 值,分析了现行沥青路面设计规范中设计弯沉计算方法、演变及在半刚性路面、柔性路面及组合式路面中的适用情况;结合中国8条高速公路沥青路面的实测弯沉指标,研究了柔性基层沥青路面设计弯沉计算体系,对沥青路面设计弯沉计算公式进行了标定;通过计算中国常见的半刚性、组合式、柔性路面结构中柔性结构层的总厚度及层底的受力状况,提出了沥青路面设计弯沉计算公式的适用条件。研究结果表明:在进行路面设计弯沉计算时,半刚性基层的路面结构类型系数 A_b 取值1.0,柔性基层的 A_b 取值2.4,组合式基层的 A_b 取值采用线形内插法进行确定;沥青路面刚柔结构中柔性层厚度小于21 cm时路面为半刚性结构,柔性层厚度大于35 cm时路面为柔性结构,柔性层厚度为21~35 cm时路面为组合式结构,该组合结构更符合中国目前柔性层路面结构实际情况。

关键词:道路工程;沥青路面;设计弯沉;力学分析;弯拉应力;柔性基层

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Calculating method of design deflection in asphalt pavement based on south China area

FENG Zhi-hui^{1,2}, XUE Peng-tao³, WANG Rong-hua², WANG Zhao⁴

(1. School of Information and Management, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China;
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Highway Administration Bureau,
Department of Transportation of Henan Province, Zhengzhou 450016, Henan, China;
4. Guangdong Chaohui Expressway Co Ltd, Guangzhou 510100, Guangdong, China)

Abstract: In order to determine a more suitable pavement structure type coefficient A_b for Chinese flexible asphalt pavement structure design, the design deflection calculation method, evolution and applicability in semi-rigid pavement, flexible pavement and composite pavement was analyzed in current asphalt pavement design specifications. Based on measured deflection indicators of 8 asphalt pavement expressways in China, the design deflection calculation system for flexible base asphalt pavement was studied, and the design deflection calculation formula was determined for asphalt pavement. Through calculating the thickness of flexible structure layer and strength performance of bottom layer of flexible base pavement in semi-rigid pavement structure, composite pavement structure and flexible pavement structure, the applicable condition for design deflection calculation formula of asphalt pavement was proposed. The results show that in the design deflec-

tion calculation of pavement structure, pavement structure type coefficient A_b is 1.0 for semi-rigid base pavement, 2.4 for flexible base pavement and is determined using liner interpolation method for composite base pavement. In the flexible-rigid structure of asphalt pavement, the pavement is semi-rigid structure when the flexible layer thickness is less than 21 cm, and is flexible structure when the flexible layer thickness is more than 35 cm. The pavement is composite structure when the flexible layer thickness is between 21 cm and 35 cm, which is more suitable for current flexible pavement structure in China. 1 tab, 12 figs, 15 refs.

Key words: road engineering; asphalt pavement; design deflection; mechanical analysis; flexural-tensile stress; flexible base

0 引言

国外沥青路面设计方法及标准中,绝大部分国家的路面设计方法采用土基顶面压应变以及沥青层底的压应变,或者是 AASHTO 的服务性能指数作为设计指标,甚至很多国家干脆采用典型结构,很少有国家将弯沉指标用作路面的设计指标^[1]。中国现行规范中沥青路面结构设计以路表弯沉和层底拉应力为控制指标。但随着道路的实际使用性能和研究人员的调查研究,认识到在沥青路面结构服务期内,中国采用的设计弯沉指标及国外采用的路基顶面压应变、沥青层底部拉应变指标均不能真实地反映实际道路的破坏情况,即弯沉较小的路面不一定具有较高的使用性能,弯沉较大的路面也可能具有良好的使用性能。特别通过对目前中国半刚性基层、柔性基层及组合式基层等沥青路面弯沉指标的研究可知,现行设计弯沉计算公式不能很好地适用于柔性基层的沥青路面结构^[2-3]。

针对于出现的问题,道路研究者对路面结构设计及弯沉指标进行了多方面研究,滕旭秋提出以沥青路面的疲劳、变形、开裂产生的车辙、裂纹等病害为设计指标^[2];程继顺等针对柔性基层路面设计中轴载换算方法行了研究^[3];聂忆华等针对现有设计弯沉计算方法对全厚式沥青路面、碎石基层路面和混合式基层路面的适用性进行了研究^[4];罗辉等对基层模量和厚度进行了设计弯沉影响的研究^[5];马松林等研究提出沥青加铺层可靠度主要取决于旧路面当量模量和均匀性^[6]。其他学者也进行了大量的研究^[7-15]。但是现行沥青路面补强结构设计属力学经验法,对原路面结构是否作为半刚性基层并无明确规定,且现行沥青路面设计弯沉指标在柔性基层路面结构设计中出现了诸多问题。为此,本文采用

弹性层状体系理论及有限元结合的方法,提出了基层刚柔类型的模量及弯沉判定方法,对柔性基层结构类型系数和界定基层结构类型的柔性层总厚度范围进行了标定,回归分析得出了适用于柔性基层结构的设计弯沉计算公式。

1 现行规范设计弯沉计算标准的由来

中国现行规范中沥青路面设计弯沉是根据公路等级、设计年限内累计标准轴载作用次数、面层以及基层类型计算而定的,设计弯沉计算公式为

$$l_d = 600 N_e^{-0.2} A_s A_c A_b \quad (1)$$

式中: l_d 为设计弯沉值(0.01 mm); N_e 为设计年限内一个车道累计当量轴次(次/车道); A_c 为公路等级系数,高速公路、一级公路为 1.0,二级公路为 1.1,三、四级公路为 1.2; A_s 为面层类型系数,沥青混凝土面层为 1.0,热拌和冷拌沥青碎石、上拌下贯或贯入式沥青路面、沥青表面处治为 1.1; A_b 为路面结构类型系数,半刚性基层沥青路面为 1.0,柔性基层沥青路面为 1.6,混合式基层沥青路面系数采用线性内插法获得。

式(1)是 20 世纪 90 年代初修订《公路柔性路面设计规范》(JTJ014—86)(简称“柔规”)时提出的。修订工作是在 1992~1993 年进行,分别调查了吉林、山东、山西、四川、西藏、上海、湖北、江西、湖南,共 50 多个路段,两万多个测点。此外,还收集了黑龙江、天津两地的调查资料作为参考。将收集到的数据进行数理统计后,在双对数坐标中,以设计年限末的累计当量标准轴次为横坐标,路面标准容许弯沉值为纵坐标,进行回归分析得到的双对数关系,见式(2)。

$$l_R = 650 N_e^{-0.204} \quad (r=0.77, n=50) \quad (2)$$

式中: r 为回归系数; n 为设计年限。

考虑到当时车辆的超载情况不能从交通量观测站提供的数据得到反映,使得换算后的累计轴次偏小,故将式(2)的常数系数乘以 1.1,并将指数调整为-0.2 次方后,统一采用路面的容许弯沉 l_R ,其表达式为

$$l_R = 720 N_e^{-0.2} A_c A_s (0.01 \text{ mm}) \quad (3)$$

由于沥青路面弯沉是逐年变化的,且在路面竣工后的二三年之间路表弯沉值最小,即路面整体结构处于最大刚度状态^[12-13]。由于路面基层铺完以后,再铺筑沥青面层,所需时间少则半年,多则 1~2 年,而路面竣工验收一般在通车后 2 年左右进行,此时路面整体结构已达设计要求的最大刚度状态,故将其取作为设计状态。根据这一假定,可得如下设计弯沉式为

$$l_d = l_0 = l_R / A_T \quad (4)$$

式中: l_0 为竣工验收弯沉; A_T 为弯沉增长系数。

将式(3)代入式(4)得

$$l_d = 720 N_e^{-0.2} / A_T \quad (5)$$

根据容许弯沉调查所选路段的实际情况,将弯沉增长系数取为 1.2,故而得出不同公路等级、不同面层和基层结构类型普遍适用的设计弯沉计算公式(式(1))。

在本次修订中,虽然所选择的样本分布在中国 50 多条路段中,但其中只有 4 条路段为柔性基层。将调查路段中的 4 条柔性基层路面的容许弯沉值与累计标准轴次之间建立双对数关系,得出柔性路面容许弯沉计算公式为

$$l_R = 1\ 060 N_e^{-0.2} \quad (6)$$

将式(6)代入计算弯沉的一般表达式(1),可得 $A_b = 1.53$,取整为 1.6。

2 现行柔性基层沥青路面设计弯沉的适用性

中国柔性基层沥青路面设计方法与半刚性基层完全相同,都以弯沉作为设计指标,并有相应的控制标准。随着柔性基层路面结构在中国高等级路面结构中的逐步应用,现行规范中所制定的弯沉标准在指导路面结构设计过程中也越来越暴露出诸多不可控制的问题。如广东深汕西(深圳—汕头西段)高速公路、广深珠(广州—深圳—珠海)高速公路、广河(广州—河源)高速公路惠州段、浦南(浦城—南平)高速公路、江苏沪宁(上海—南京江苏段)高速公路、

青海平西(海东市平安县—西宁市)高速公路以及重庆武合(武胜—合川)高速公路等。从交通部 2001 年以来在广东省、江苏省、青海平西等地铺筑的柔性基层沥青路面弯沉检测及使用性能长期观测结果可知,虽然这些路面的实测弯沉值均大于设计弯沉值,但经过长时间运营均未出现路面整体强度不足的状况。由此可以说明,现行规范的弯沉标准对于柔性基层结构的控制过于严格,柔性基层结构类型系数 A_b 值偏小,不具有广泛代表性,应针对目前高等级公路的实际情况重新进行标定。

柔性基层路面结构的设计弯沉标准在实际应用中常常不可控制的原因主要有以下几点^[12-13]:

(1)基层结构类型系数的代表性。现行柔性路面基层类型系数值是通过在中国范围内所调查的 4 条柔性路面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,会影响回归公式的代表性;另外样本的采集地区大多为北方省份,样本采集地区范围较小,这也是影响回归公式是否具有广泛代表性的一个很重要的方面。

(2)公路等级差别大。20 世纪 90 年代对“柔规”的修订中所选的调查路段大多为 20 世纪 80 年代修建的道路,当时中国已经开始高等级公路的建设,但总体上来说,已建道路仍以低等级公路为主,其公路等级与广东省现在的高等级道路差别很大,从而造成能够适应当时沥青路面设计的弯沉计算公式不能很好地应用于广东省现有高等级沥青路面的建设。20 世纪 80 年代所建道路等级较低、面层厚度较薄、沥青面层质量差(与现在的沥青混凝土相差很大)、基层强度低(以柔性基层为主),故路面质量远不如现在的高等级沥青混凝土路面,两者的力学特性以及破坏模式都有显著的差异。另外,虽然 20 世纪 80 年代时已建造了大量半刚性基层沥青路面,但由于当时经济整体发展水平较低,道路交通量需求与目前相比要小得多,故而设计的半刚性基层路面与现在的半刚性路面差别也较大(与现在的半刚性基层沥青路面相比,当时的基层偏于柔性,或往往在通车使用几年之后就发展为柔性基层)。

(3)交通负荷差别大。中国经济迅猛发展,公路总里程飞速增长,道路交通量增长速率也逐年增长,目前同等级道路所承受的交通荷载要较 20 世纪 90 年代大得多,这就提高了对道路使用性能的要求,增

加了道路的建设难度。

综上,现行柔性路面设计弯沉计算公式中的基层类型系数值并不能很好地应用于中国的柔性沥青路面结构设计。故此次研究通过多路段调查,对中国具有代表性的柔性结构(或相当于柔性结构)沥青路面进行弯沉回归分析,重新标定基层类型系数。

3 设计弯沉计算公式标定

中国规范在进行容许弯沉计算公式回归分析时,已经验证了公路等级系数及路面类型系数的取值合理性,且在新建半刚性基层以及组合式基层沥青路面设计中得到成功应用,故这 2 个参数的取值仍然采用规范中已有的规定,只对路面基层类型系数值进行标定^[6]。

目前中国已建沥青混凝土路面大多为半刚性结构,柔性基层较少。但半刚性基层沥青路面随着使用年限的增长,交通荷载的长期作用使得路面发生各种疲劳以及开裂破坏,从而造成原来的板体半刚性基层逐渐破碎为散体基层,即原半刚性基层随时间推移会逐渐向柔性基层转变^[5,12]。为了提高回归方程的准确性,增加样本数量,本文将中国早期修建且现已开裂破坏较严重的半刚性基层沥青路面也视为柔性基层,进行设计弯沉的回归分析。所选路段有沈大(沈阳—大连)高速公路、济青(济南—青岛)高速公路、深汕西(深圳—汕头西段)高速公路、佛开(佛山—开平)高速公路、广三(广州—三水)高速公路、广佛(广州—佛山)高速公路、广深(广州—深圳)高速公路及广河(广州—河源)高速公路等 8 条沥青混凝土路面。

同时,在确定柔性路面的基层类型系数时,规范中采用调查路段的容许弯沉值与设计年限末的累计标准轴次进行回归分析,得出柔性路面容许弯沉的回归公式,并将此回归公式进行调整后令其等于容许弯沉的统一表达式,即式(4),从而计算得出数值。但在实际发生累计轴次已经超过设计累计轴次时,若将路面实测弯沉转换为容许弯沉值与新建道路时的设计年限末累计轴次进行回归分析,而忽略其已经承受的多余设计累计轴次的部分,不符合路面使用的实际状况。因此,本文使用旧路表实测弯沉代表值与其已经实际发生的累计轴次进行回归分析。

沈大高速公路是中国大陆建设的第一条高速公

路,路面设计依据 1978 版设计规范进行,1990 年 9 月全线建成通车,全长 348 km,双向 4 车道,原路面结构如图 1 所示。

4 cm/5 cm 中粒式沥青混凝土
5 cm 粗粒式沥青混凝土
5 cm/6 cm 沥青碎石
20 cm 路拌水泥稳定砂砾或矿渣
20 cm 天然砂砾或矿渣
路基

图 1 沈大高速公路原路面结构
Fig. 1 Original pavement structure
of Shenyang-Dalian expressway

通过交通量和路面弯沉调查可知,当一个车道累计标准轴次达到 19.354×10^6 次/车道时,其路面弯沉代表值为 62(0.01 mm)。

济青高速公路,是山东最繁忙的高速公路,于 1993 年末竣工通车,全长 318 km,双向 4 车道,原路面结构如图 2 所示。

4 cm 中粒式沥青混凝土
5 cm/6 cm 中粒式沥青混凝土
6 cm/8 cm 粗粒式沥青混凝土
34 cm 二灰碎石或水泥稳定砂砾
18 cm 二灰土或石灰土
路基

图 2 济青高速公路原路面结构
Fig. 2 Original pavement structure
of Jinan-Qingdao expressway

通过交通量和路面弯沉调查可知,当一个车道累计标准轴次达到 2.67×10^7 次/车道时,其路面弯沉代表值为 40(0.01 mm)。

广东深汕高速公路西段起于深圳市龙岗区,止于陆丰市潭西镇,东接深汕(深圳—汕头)高速公路东段,全长 146.55 km,为双向 4 车道。其中沥青混凝土路面长 80.43 km,1997 年建成通车时原路面结构如图 3 所示。

3 cm 开级配沥青混凝土磨耗层
5 cm 中粒式沥青混凝土
6 cm 粗粒式沥青混凝土
20~34 cm 水泥稳定碎石
28~40 cm 级配碎石
路基

图 3 深汕高速公路原路面结构
Fig. 3 Original pavement structure
of Shenzhen-Shantou expressway

通过交通量和路面弯沉调查可知,当一个车道累计标准轴次达到 1.18×10^7 次/车道时,其路面弯沉代表值为 131(0.01 mm)。

广三高速公路位于佛山市南海区与三水区,全长 30 km,于 1996 年建成通车。全线为双向 4 车道,沥青混凝土路面全长 11.91 km。原路面结构如图 4 所示。

4 cm 中粒式沥青混凝土
5 cm 粗粒式沥青混凝土
20 cm 6%水泥稳定石粉
30 cm 4%水泥稳定石粉
土基

图 4 广三高速公路原沥青路面结构
Fig. 4 Original asphalt pavement structure
of Guangzhu-Sanshui expressway

通过交通量和路面弯沉调查可知,当一个车道累计标准轴次达到 2.3×10^7 次/车道时,其路面弯沉代表值为 49(0.01 mm)。

佛开高速公路全长 80 km,于 1996 年 12 月建成通车。沥青混凝土路面长 15.4 km,为双向 4 车道,路基宽 24.5m。原路面结构如图 5 所示。

3 cm 级配沥青混凝土
7 cm 中粒式沥青混凝土
8 cm 沥青碎石
25 cm 6%水稳石屑
23(28) cm 级配碎石
土基

图 5 佛开高速公路原路面结构
Fig. 5 Original asphalt pavement structure
of Foshan-Kaiping expressway

通过交通量和路面弯沉调查可知,当一个车道累计标准轴次达到 7.8×10^7 次/车道时,其路面弯沉代表值为 60(0.01 mm)。

广佛高速公路于 1989 年建成通车,1993 年初曾对路面进行一次罩面加铺维修,又于 1999 年对路面进行了加宽扩建,由原来的双向 4 车道扩建为单向 4 或者 3 车道。原路面结构如图 6 所示。

4 cm 中粒式沥青混凝土
5 cm 粗粒式沥青混凝土
6 cm 沥青碎石
25 cm 水泥稳定石屑
28 cm 水泥稳定土
土基

图 6 广佛高速公路原路面结构
Fig. 6 Original pavement structure
of Guangzhou-Foshan expressway

通过交通量和路面弯沉调查可知,当一个车道累计标准轴次达到 1.59×10^7 次/车道时,其路面弯沉代表值为 65(0.01 mm)。

广深高速公路是广深珠高速公路的一部分,主线总长 122.8 km,沥青路面长 116.8 km,1994 年试通车,1996 年交工验收,1997 年正式通车营运,主线设计为 6 车道。原路面结构如图 7 所示。

4 cm 中粒式沥青混凝土 AC-16 II
8 cm 粗粒式沥青混凝土 AC-25 I
10 cm 粗粒式沥青混凝土 AC-30 II
10 cm 沥青碎石 AM-30
23 cm 4%水泥稳定碎石
23 cm 级配碎石
22 cm(中及快车道)或 32 cm(慢车道)未筛分碎石
土基

图 7 广深高速公路原路面结构
Fig. 7 Original pavement structure of
Guangzhou-Shenzhen expressway

通过交通量和路面弯沉调查可知,当一个车道累计标准轴次达到 1.22×10^8 次/车道时,其路面弯沉代表值为 25(0.01 mm)。

广河高速公路惠州段为倒桩柔性基层沥青路面结构,2012 年 1 月建成通车。路基段路面结构设计采用倒装式柔性基层沥青路面结构,如图 8 所示。

4 cm SBS 改性沥青 Sup-12.5
必要时设 PC-3 乳化沥青粘层
7 cm SBS 改性沥青 Sup-19
8 cm 普通沥青 Sup-25
9 cm 普通沥青 ATB-25
32 cm 级配碎石
15 cm 水泥稳定级配碎石(7 d 抗压强度 2.5 MPa)
路基

图 8 广河高速公路惠州段路面结构
Fig. 8 Pavement structure of HuiZhou section
in Guangzhou-Heyuan expressway

通过交通量和路面弯沉调查可知,当一个车道累计标准轴次达到 2.40×10^7 次/车道时,其路面弯沉代表值为 57(0.01 mm)。

将上述所选路段的弯沉代表值及累计标准轴次收集整理后,汇总见下页表 1。

表 1 不同路段的弯沉代表值及累计轴次

Tab. 1 Deflection representative values and cumulative axis times in different segments

路段	弯沉代表值/ 0.01 mm	累计轴次/ (次·车道 ⁻¹)
沈大高速公路	62	1.93×10^7
济青高速公路	40	2.67×10^7
深汕西高速公路	131	1.18×10^7
广三高速公路	49	2.30×10^7
佛开高速公路	60	7.80×10^7
广佛高速公路	65	1.59×10^7
广深高速公路	25	1.22×10^8
广河高速公路	57	2.40×10^7

在双对数坐标中,以已发生累计轴次 N_e 为横坐标,弯沉代表值 l_R 为纵坐标,回归所得曲线如图 9 所示。

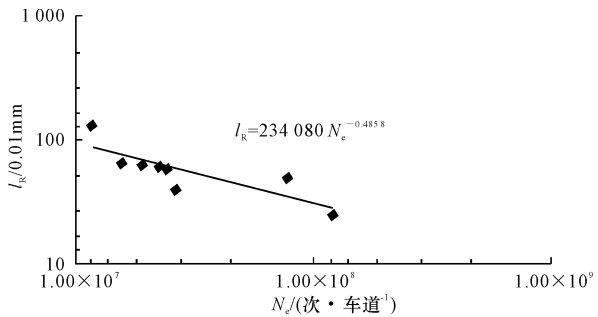


图 9 柔性基层沥青混凝土路面弯沉散点图及回归结果

Fig. 9 Deflection scatter diagram and regression result of asphalt concrete pavement on flexible base

由于样本数量较少,累计轴次范围有限,故以其平均累计轴次为圆心,将回归得到的曲线进行一定旋转,使得其斜率与容许弯沉的一般表达式相同,以便进行比较,调完斜率后的公式为

$$l_R = 1\,690 N_e^{-0.2} \tag{7}$$

令式(4)等于式(7),可得 $A_b = 2.35$,取整为 $A_b = 2.4$ 。

4 沥青路面结构类型的界定

为了确定路面基层类型系数不同取值的适用条件,本文从 3 种常见的半刚性、组合式、柔性路面结构中柔性层的总厚度及层底弯拉应力的不同受力状况进行分析研究。

4.1 半刚性基层沥青路面结构

针对中国常见的半刚性基层沥青路面结构(3 层沥青混凝土面层+3 层水泥稳定碎石基层),通过改变其沥青面层厚度来进行层底弯拉应力试算。将

得到的数据进行整理,绘制上、中、下面层层底最大弯拉应力以及路面结构层中的最大拉应力随面层总厚度的变化曲线图,如图 10 所示。

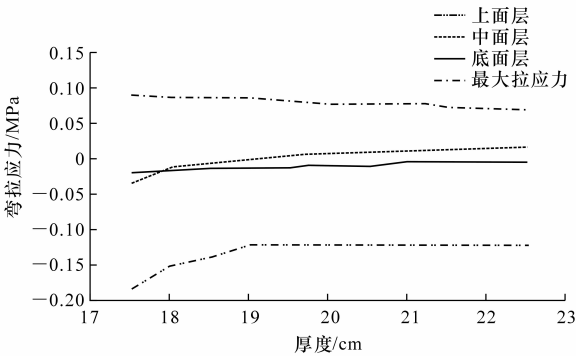


图 10 半刚性基层路面层底弯拉应力随面层厚度变化曲线

Fig. 10 Change curve of flexural-tensile stress of the bottom layer of semi-rigid base pavement with variation of surface layer thickness

计算结果发现,路面结构中最大层底拉应力出现在水泥稳定半刚性底基层。由图 10 可以看出,随着柔性面层厚度的增大,底基层承受的最大拉应力呈现平缓的减小趋势。观察图 10 中的上、中、底面层层底弯拉应力随面层厚度的变化曲线,可以看出上面层和底面层一直处于受压状态(弯拉应力为正,则受拉;为负,则受压);中面层受力则是随着面层厚度的增加,由受压向受拉状态转变。当沥青面层厚度为 21 cm 时,为受压与受拉状态的转变点,说明随着柔性沥青层的增加,路面结构受力状态逐渐由半刚性基层的受力模式向组合式结构受力模式过渡。

4.2 柔性基层沥青路面结构

采用目前常用的柔性基层路面结构(4 层沥青混凝土面层+级配碎石+水泥稳定碎石基层),通过改变柔性层的厚度进行层底弯拉应力试算,将得到的结果整理,如下页图 11 所示。

计算结果显示,路面结构的最大拉应力出现在级配碎石柔性基层上,这与半刚性基层路面的最大拉应力所出现的位置不同。由图 11 可以看出,柔性路面结构的上面层处于受压状态,底面层处于受拉状态;当柔性层总厚度在 38 cm 附近时,为中面层由受压向受拉状态转变的过渡点,也即路面由组合式结构受力模式向柔性结构受力模式的转变点。

4.3 组合式路面结构

采用目前常用的柔性基层路面结构(2 层沥青混凝土面层+沥青碎石基层+2 层水泥稳定碎石底

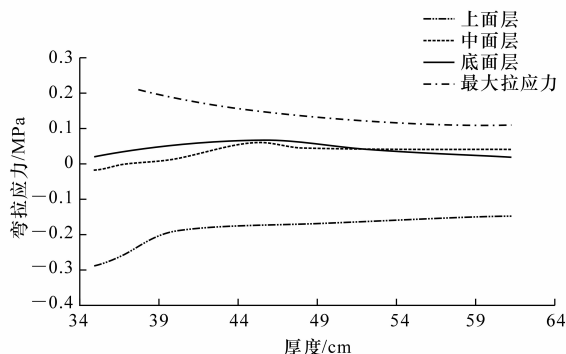


图 11 柔性基层路面层底弯拉应力
随柔性层总厚度变化曲线

Fig. 11 Change curve of flexural-tensile stress of the bottom layer of flexible base pavement with variation of surface layer thickness

基层),按照同样的方法进行路面层的弯拉应力试算,所得结果整理如图 12 所示。

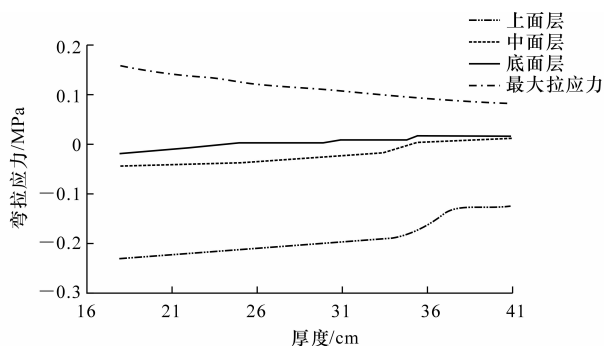


图 12 组合式基层路面层底弯拉应力
随柔性层总厚度变化曲线

Fig. 12 Change curve of flexural-tensile stress of the bottom layer of composite base pavement with variation of flexible layer thickness

由计算结果得知,组合式路面结构的最大拉应力出现的位置为底基层,与半刚性基层出现的位置相同。由图 12 可以看出,组合式面层的受力状况具有如下规律:上面层受压,而中面层和底面层都会随着柔性层总厚度的增大而由受压状态向受拉状态变化,且底面层的变化点要小于中面层。这是因为组合式路面结构的柔性层总厚度是介于半刚性与柔性之间的,当组合式结构层中的柔性层厚度较小时,其受力模式与半刚性基层的路面结构类似,故而中、底面层都受压;随着柔性层厚度的增加,底面层受拉大于受压,从而转变为组合式路面结构的受力模式;当柔性层厚度继续增加的情况下,中面层也逐渐转变为受拉状态,此时路面结构受力模式与柔性路面结构相同。

在图 12 中,当柔性层总厚度为 21 cm 时,路面结构层受力模式已接近组合式,再结合图 10 中的转

变厚度为 21 cm,则可将半刚性基层以上的柔性面层厚度小于 21 cm 时,认为路面是半刚性结构。在图 11 中组合式受力模式向柔性受力模式的转变厚度为 38 cm,而图 12 中的转变厚度为 35 cm,故将组合式基层与柔性基层的柔性层转变厚度定为 35 cm,也即当路面结构中的柔性层总厚度大于 35 cm 时,按柔性结构类型进行设计。而柔性层总厚度为 21 ~ 35 cm 时,则可认为路面为组合式结构。

5 设计弯沉计算公式

通过上述分析,可得柔性基层沥青路面设计弯沉计算公式为

$$l_d = 600 N_e^{-0.2} A_c A_s A_b \quad (8)$$

A_b 为路面结构类型系数,对半刚性基层 A_b 为 1.0,柔性基层 A_b 为 2.4,对组合式基层则采用线性内插法确定 A_b 。即当半刚性基层以上柔性结构层总厚度小于 21 cm 时为半刚性基层结构, $A_b = 1.0$;当柔性层厚度大于 35 cm 时,路面结构系数 $A_b = 2.4$;组合式结构层厚度为 21 ~ 35 cm 时,路面结构系数 A_b 由线性内插确定。

6 结 语

(1)通过对中国具有代表性的柔性结构(或相当于柔性结构)沥青路面进行弯沉回归分析,重新标定了基层类型系数。即:半刚性基层 $A_b = 1.0$,柔性基层 $A_b = 2.4$,组合式基层采用线性内插法确定 A_b 。

(2)通过对常见的半刚性、组合式、柔性路面结构中柔性层的总厚度及层底弯拉应力的不同受力状况进行分析,重新标定了沥青路面刚柔结构中柔性层的厚度,即当柔性层厚度小于 21 cm 时,路面为半刚性结构;当柔性层厚度大于 35 cm 时,路面为柔性结构;当柔性层厚度在 21 ~ 35 cm 之间时,路面为组合式结构。

(3)由于本文所采用的样本数量仍然偏少,故所得出的结论仍需通过验证并做进一步的改进。

参考文献:

References:

- [1] 福建省高速公路建设总指挥部. 南方湿热地区高速公路沥青路面新型结构研究总报告[R]. 福州: 福建省高速公路建设总指挥部, 2010.

- tion. Total report of research on expressway new — type asphalt pavement structure for southern humid area[R]. Fuzhou: General Command of Fujian Expressway Construction, 2010.
- [2] 滕旭秋. 柔性基层沥青路面设计指标及性能预估模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- TENG Xu-qiu. Study on design indexes and performance forecasting models for asphalt pavement with flexible base[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [3] 程继顺, 邓小刚, 郭庆坪. 柔性基层沥青路面轴载换算方法研究[J]. 路基工程, 2010(2): 67-69.
- CHENG Ji-shun, DENG Xiao-gang, GUO Qing-ping. Study on conversion method of axle load on flexible base asphalt pavement [J]. Subgrade Engineering, 2010(2): 67-69. (in Chinese)
- [4] 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.
- NIE Yi-hua, ZHANG Qi-sen. Research on bending index of full-depth asphalt pavement structure [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(2): 5-7. (in Chinese)
- [5] 罗 辉, 朱宏平, 郝行舟. 沥青路面动态响应数值分析[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(4): 44-47.
- LUO Hui, ZHU Hong-ping, HAO Xing-zhou. Numerical analysis of dynamic response on asphalt pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(4): 44-47. (in Chinese)
- [6] 马松林, 侯相深, 韩海红. 沥青路面加铺层结构可靠性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(12): 1995-1998.
- MA Song-lin, HOU Xiang-shen, HAN Hai-hong. Reliability analysis for asphalt overlays structure [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(12): 1995-1998. (in Chinese)
- [7] 王秀芳. 沥青路面设计指标研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- WANG Xiu-fang. Study on design index of asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007. (in Chinese)
- [8] 居 浩, 黄晓明, 马 涛. 柔性基层沥青路面轴数系数研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(7): 6-9.
- JU Hao, HUANG Xiao-ming, MA Tao. Research on equivalent axel-number coefficient of asphalt pavement with flexible base[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(7): 6-9. (in Chinese)
- [9] 栗振锋, 徐格宁, 郭向云. 考虑碎石基层横观各向同性的沥青路面结构设计[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 56-60.
- LI Zhen-feng, XU Ge-ning, GUO Xiang-yun. Structure design of asphalt pavement based on cross-anisotropy of macadam base[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(3): 56-60. (in Chinese)
- [10] California Department of Transportation. Method of test to obtain flexible pavement deflection measurements for determining pavement rehabilitation requirements[R]. Los Angeles: California Department of Transportation, 2004.
- [11] 郑健龙. 基于状态设计法的沥青路面弯沉设计标准[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 1-9.
- ZHENG Jian-long. Deflection design standards of asphalt pavement based on state design method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4): 1-9. (in Chinese)
- [12] 谈至明, 吁新华. 沥青面层的截面弯曲刚度当量模量计算[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 37-42.
- TAN Zhi-ming, YU Xin-hua. Calculation of sectional flexural stiffness equivalent modulus of asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 37-42. (in Chinese)
- [13] 张洪亮, 胡长顺, 许伟清. 移动荷载下柔性路面的动力响应[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(5): 6-10.
- ZHANG Hong-liang, HU Chang-shun, XU Wei-qing. Dynamic response of flexible pavement under moving load[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 6-10. (in Chinese)
- [14] 胡春华, 孙立军. 考虑层厚的路面弯沉修正系数研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(7): 895-898.
- HU Chun-hua, SUN Li-jun. Research on correction coefficient of asphalt pavement deflection with consideration of pavement structure thickness[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(7): 895-898. (in Chinese)
- [15] Zaghoul S, Hoover T, Swan D J, et al. Enhancing backcalculation procedures through consideration of thickness variability[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1869(1): 80-87.