

基于有效模量的沥青路面加铺层设计方法

武建民¹, 杜荣耀², 王笑风²

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 河南省交通规划勘察设计院有限责任公司, 河南 郑州 450052)

摘 要:中国沥青路面加铺设计方法单纯采用旧路面的弯沉作为设计指标, 无法指导路面病害较为严重时所需要进行的路面加铺设计。参考 AASHTO 设计方法中旧沥青路面层系数的建议值, 根据模量和层系数的关系, 确定了半刚性基层沥青路面结构层的有效模量建议值, 并结合中国沥青路面设计方法, 提出基于结构层有效模量的半刚性基层沥青路面加铺层设计方法。通过沥青路面加铺设计实例, 根据路面病害状况确定了各结构层的有效模量, 得到加铺层厚度为 10 cm。结果表明: 该方法设计结果与美国 AI 法结果基本一致, 略低于 AASHTO 设计结果; 避免了当路面代表弯沉值较小时, 按现行规范无法进行加铺的情况。

关键词:道路工程; 加铺层设计; 有效模量; 结构层系数; AASHTO

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Design method of asphalt pavement's overlay based on valid modulus

WU Jian-min¹, DU Rong-yao², WANG Xiao-feng²

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an

University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Henan Provincial Communications Planning,

Survey & Design Institute Co Ltd, Zhengzhou 450052, Henan, China)

Abstract: The current overlay design method uses the deflection as the only design index in China, which can not meet the requirement of the asphalt pavements with serious diseases. According to the relationship between modulus and layer coefficient, the effective modulus suggested value of semi-rigid asphalt pavement layers was determined by referencing to the AASHTO's old asphalt surface layer coefficient. Combining with Chinese's overlay design method, a new overlay design method was set up based on the valid modulus of asphalt pavement. As an example the overlay on an actual asphalt pavement with diseases was designed by the new method, the valid modulus of pavement layers was determined, the overlay thickness was 10 cm which is basically equal to the AI method, and little thin than the one by the AASHTO method. The results indicate that the problem in current overlay design method can be avoid by using this method. 10 tabs, 1 fig, 9 refs.

Key words: road engineering; overlay design; valid modulus; layer coefficient; AASHTO

0 引言

沥青路面在使用过程中,适时的进行加铺罩面,有利于消除或减缓路面病害,延长路面使用寿命。为此,美国的 AI 和 AASHTO 在沥青路面设计指南中都专门制定了加铺层的设计方法。AI 采用旧路面结构层的有效厚度来确定加铺层的厚度^[1];AASH-TO 则根据加铺层的结构数来计算得到加铺层厚度^[2];中国《公路沥青路面设计规范》(JTJ D50—2006)使用路表弯沉来确定原路面的当量模量,然后进行加铺层设计^[3]。刘黎萍等研究建立了有效厚度系数预测模型,并利用模型对半刚性基层和碎砾石基层路面结构的有效厚度系数及有效厚度进行了预测分析^[4]。曾梦澜等提出了冷再生沥青路面再生层的厚度可以采用改建路面设计的方法计算确定^[5]。然而根据大量的高速公路沥青路面损坏调查发现,弯沉与路面的损坏程度并不对应,弯沉值比较大的路段可能损坏并不严重;而一些损坏严重的路段,虽弯沉值并不大,但路面却伴有如车辙、坑槽、开裂等严重的病害。虽然路段弯沉很小,但路面已经出现了不同程度的破坏,如果不及时加铺,将加速路面破坏。

表 1 确定有效厚度所用的换算系数

Tab. 1 Conversion coefficient used in determination of effective thickness

材料分类	材料描述	换算系数
I	(a)任何情况的天然土基; (b)改良土基,以粒状材料为主,可含一些粉土和粘土,但 PI 小于等于 10; (c)石灰改良高塑性土基,PI 大于 10。	0
II	粒料底基层和基层,级配较好,含少量 CBR 大于等于 20 的塑性细颗粒;如果 PI 小于等于 6,采用大值;如果 PI 大于 6,则采用小值。	0.1~0.2
III	水泥或石灰-粉煤灰稳定低塑性土底基层和基层,PI 小于等于 10	0.2~0.3
IV	(a)乳化沥青或稀释沥青面层和基层,呈现大量开裂,有很多剥落或集料破碎,轮迹处明显变形,失去稳定性; (b)水泥或石灰-粉煤灰稳定基层,已有反射裂缝,如果裂缝狭小而紧密,则用大值,如裂缝宽、有唧泥或明显不稳定,则用小值。	0.3~0.5
V	(a)沥青混凝土面层和基层,有明显的开裂和裂纹; (b)乳化沥青或稀浆沥青面层和基层,有细裂纹,集料有些剥落或粉碎,轮迹处有少量变形,但基本稳定。	0.5~0.7
VI	(a)沥青混凝土面层和基层,没有或有少量的细裂缝,轮迹处没有或有较少且小的间断裂纹和少量变形; (b)乳化沥青或稀释沥青面层和基层稳定,一般无裂缝、无泛油,轮迹处有小的变形。	0.7~0.9
VII	沥青混凝土面层,包括沥青混凝土基层,一般无裂缝,轮迹处没有或有较小的变形。	0.9~1.0

2 AASHTO 沥青加铺层设计方法

AASHTO 加铺层设计是基于剩余寿命的概念,满足未来交通量所需的加铺层厚度,可由式(1)确定。

$$N_{SN_{ol}} = a_{ol} D_{ol} = N_{SN_f} - N_{SN_{eff}} \tag{1}$$

式中: $N_{SN_{ol}}$ 为加铺层的结构数; a_{ol} 为沥青加铺层的

如何根据中国高速公路半刚性基层沥青路面的结构特点和路面损坏特点,研究建立一种适合的半刚性基层沥青路面加铺层设计方法,是非常必要的。为此,本文参考 AASHTO 设计方法中旧沥青路面层系数的建议值,并根据模量和层系数的关系,确定了半刚性基层沥青路面结构层的有效模量建议值,并结合中国沥青路面设计方法,提出基于结构层有效模量的沥青路面加铺层设计方法。

1 AI 沥青加铺层设计方法

AI(Asphalt Institute,沥青协会)是美国的一个行业组织,AI 的路面设计采用 2 个应变变量作为设计指标:一个是沥青混合料层底水平拉应变,以控制路面疲劳开裂;另一个是路基顶面竖向压应变,以控制永久变形。AI 法将路面视为多层弹性体系,根据交通量和土基强度确定路面所需的总厚度 h_n ,根据旧路面状况确定旧路面结构层的有效厚度 h_e 。旧路面各层的厚度换算系数见表 1。其中,PI 为塑性指数,CBR 为加州承载比。由公式 $h_{ol} = h_n - h_e$,计算加铺结构层厚度 h_{ol} 。

结构层系数; D_{ol} 为加铺层厚度; N_{SN_f} 为承载将来交通所需要的结构数; $N_{SN_{eff}}$ 为旧路面的有效结构数。

N_{SN_f} 可根据式(2) 确定

$$\lg(W_{18}) = Z_R S_0 + 9.36 \lg(N_{SN_f} + 1) - 0.20 + \frac{\lg[\Delta PSI / (4.2 - 1.5)]}{0.40 + 1.094 / (N_{SN_f} + 1)^{5.19}} + 2.32 \lg(M_R) - 8.07 \tag{2}$$

式中: W_{18} 为 80 kN 当量荷载作用次数的预测值; Z_R 为给定可靠度的正态偏移; S_0 为结合交通预测和性能预测的标准离差; Δ_{PSI} 为初始设计服务性指数 PSI_0 (取值为 4.2 ~ 4.5) 和最终路面设计服务性指数 PSI_t (主要公路不小于 2.5,次要公路不小于 2.0) 的差值; M_R 为路基土的回弹模量。

$$N_{SN_f} = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (3)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 分别为面层、基层和底基层的结构层系数; D_1 、 D_2 、 D_3 分别为面层、基层和底基层的厚度; m_2 、 m_3 分别为基层、底基层的排水系数。

$N_{SN_{eff}}$ 可以通过现场路面状况调查和路面材料的结构性能测试来评价,具体可以根据路面状况和表 2 中选择沥青路面各结构层的层系数,然后确定 $N_{SN_{eff}}$ 。

表 2 AASHTO 旧沥青路面结构层的层系数建议值

Tab. 2 Layer coefficient of old asphalt pavement suggested by AASHTO

材料	阶段	表面状况及分类	结构层系数 a_{ol}
沥青 面层	I	没有或者有很少的龟裂和(或者)只有不严重的横向裂缝	0.35~0.40
	II	小于 10% 轻微的龟裂和(或者)小于 5% 中等和严重的横向裂缝	0.25~0.35
	III	大于 10% 的轻微的龟裂和(或者)小于 10% 中等龟裂和(或者)大于 5%~10% 中等的和严重的横向裂缝	0.20~0.30
	IV	大于 10% 中等的龟裂和(或者)小于 10% 严重的龟裂和(或者)大于 10% 中等的和严重的横向裂缝	0.14~0.20
	V	大于 10% 严重的龟裂和(或者)大于 10% 严重的横向裂缝	0.08~0.15
稳定 基层	I	没有或者很少有龟裂和(或者)只有轻微的横向裂缝	0.20~0.35
	II	小于 10% 轻微的龟裂或者小于 5% 中等和严重的横向裂缝	0.15~0.25
	III	大于 10% 轻微的龟裂和(或者)小于 10% 中等的龟裂和(或者)大于 5%~10% 中等的和严重的横向裂缝	0.15~0.20
	IV	大于 10% 中等的龟裂和(或者)小于 10% 严重的龟裂和(或者)大于 10% 中等的和严重的横向裂缝	0.10~0.15
	V	大于 10% 严重的龟裂和(或者)大于 10% 严重的横向裂缝	0.08~0.15
底基层	根据积水、集料的劣化和污染的情况判断		根据经验

3 路面结构层有效模量的确定

路面结构层的模量对路面结构层的受力状态有着重要的影响,是路面结构设计的重要参数^[6]。众多学者研究了旧路面状况和路面有效厚度、路面模量的关系。王永胜等认为中国路面材料静态参数与 AASHTO 设计方法动态参数有良好的对应关系^[7]。AASHTO 给出了密级配沥青混凝土模量和结构层系数的关系,结构层系数与回弹模量基本上是线性关系,如图 1 所示。

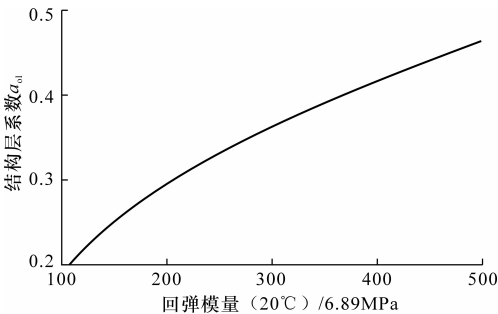


图 1 AASHTO 的 20℃密级配沥青混凝土
模量与结构层系数的关系

Fig. 1 Relationship between the modulus and
layer coefficient of dense-graded asphalt concrete
in 20℃ suggested by AASHTO

由图 1 可知,AASHTO 和 AI 的沥青加铺层设计方法,都包括了一种以现场调查和材料测试的结

构性能测试为基础对旧路面残余寿命进行评估的方法,然后进行加铺层设计的方法。因此可以认为,旧路面状况与 AASHTO 层系数、路面结构的有效厚度、路面各层的模量有密切关系。所以可根据旧路面状况估计路面结构层的有效模量,以有效模量作为路面加铺层的设计参数,进行加铺层设计。

3.1 沥青路面面层有效模量的赋值

沥青面层有效模量参照 AASHTO 加铺层设计方法确定。如对于旧沥青面层的第 I 阶段的有效模量,可根据《公路沥青路面设计规范》推荐的沥青混凝土的中值模量(1 400 MPa)进行折减得到,所以旧沥青面层第 I 阶段的有效模量推荐值为 1100~1 400 MPa。其他类的模量可以利用旧沥青面层的第 I 阶段的有效模量推荐值与 AASHTO 层系数和模量大致的线性关系,用插值法推导出来,结果见下页表 3。

3.2 半刚性基层材料有效模量的赋值

半刚性基层材料是中国高速公路广泛使用的材料,王旭东的研究给出了中国半刚性材料模量与 AASHTO 推荐模量之间的关系,认为在可靠度为 50% 时,动态回弹模量为静态模量的 2.2 倍^[8]。

杨振丹参照南非关于半刚性基层的研究结果,按照基层的开裂状况分阶段确定基层材料的有效模量,把半刚性基层在使用过程中的状态经历分为 3 个阶段:疲劳开裂前阶段,由于温度和湿度的作用,

表 3 旧沥青面层有效模量建议值

Tab. 3 Valid modulus recommended values of old asphalt layers

材料	阶段	表面状况及分类	模量/MPa
沥青 面层	I	没有或者有很少的龟裂和(或者)只有轻微的横向裂缝	1 100~1 400
	II	小于 10% 轻微的龟裂和(或者)小于 5% 中等和严重的横向裂缝	785~1 100
	III	大于 10% 轻微的龟裂和(或者)小于 10% 的中等龟裂和(或者)大于 5%~10% 的中等和严重的横向裂缝	628~942
	IV	大于 10% 的中等的龟裂和(或者)小于 10% 的严重的龟裂和(或者)大于 10% 的中等的和严重的横向裂缝	400~628
	V	大于 10% 的严重的龟裂和(或者)大于 10% 的严重的横向裂缝	250~450

半刚性基层使用初期即会出现一定的收缩裂缝,使基层开裂成为板块状,这个阶段的模量为 4 000~6 000 MPa;疲劳开裂阶段,半刚性基层在荷载反复作用下出现疲劳裂缝,并逐渐扩展,结构层开裂成大块状,其模量值低于相应于板块状的室内试验结果,这个阶段的模量为 1 300~1 700 MPa;疲劳开裂后阶段,在行车荷载的反复作用下,半刚性基层进一步碎裂成小块,有效模量值进一步降低,并接近于粒料基层,使沥青面层出现较大变形和疲劳开裂,这个阶段的模量为 400~600 MPa^[9]。

AASHTO 定义的半刚性基层第 I 阶段的路面

状况是没有或者很少有龟裂和(或者)只有不严重的横向裂缝,属于上面文献[9]中的基层疲劳开裂前阶段和疲劳开裂阶段之间,对应的模量在 2 000 MPa 左右,所以第 I 阶段的有效模量可以取 1 800~2 400 MPa;对半刚性基层的第 IV 阶段,有大于 10% 的中等的龟裂和(或者)小于 10% 的严重的龟裂和(或者)大于 10% 的中等的和严重的横向裂缝,属于文献[9]中的疲劳开裂后模量,所以对于这个阶段的有效模量可以取 400~700 MPa。半刚性基层其他阶段的有效模量,可以根据插值法计算出来,如表 4 所示。

表 4 旧半刚性基层有效模量建议值

Tab. 4 Valid modulus recommended values of semi-rigid base layers

材料	阶段	表面状况及分类	模量/MPa
半刚性 基层	I	没有或者很少有龟裂和(或者)只有不严重的横向裂缝	1 800~2 500
	II	小于 10% 的不严重的龟裂或者小于 5% 中等的和严重的横向裂缝	1 400~1 800
	III	大于 10% 的不严重的龟裂和(或者)小于 10% 的中等的龟裂和(或者)大于 5%~10% 的中等的和严重的横向裂缝	700~1 400
	IV	大于 10% 的中等的龟裂和(或者)小于 10% 的严重的龟裂和(或者)大于 10% 的中等的和严重的横向裂缝	400~700
	V	大于 10% 的严重的龟裂和(或者)大于 10% 的严重的横向裂缝	100~400
底基层	根据积水、集料的劣化和污染的情况判断		根据经验

4 路面结构层有效模量的判断方法

4.1 沥青面层有效模量的判断方法

对沥青路面上面层有效模量的评估,可根据旧路面状况中的龟裂数量和表 3 进行评估;对沥青层中下层的有效模量,因为中下层有上面层的保护,模量变化较小,所以可以取与上面层模量相近的值,但要小于现行规范推荐的中值。

4.2 半刚性基层有效模量的判断方法

目前,半刚性基层的主要病害主要通过雷达检测评定。根据雷达检测病害的表述,半刚性基层主要的病害种类分为疏松、松散、较松散,沉陷和脱空。对半刚性基层可以认为,疏松属于较轻的龟裂,松散和较松散属于中等的龟裂,沉陷、脱空属于较严重的龟裂。因此,半刚性基层的有效模量可以根据雷达检

测数据进行评估,算出半刚性基层龟裂的百分率,就可以根据龟裂率及严重程度,查表 4 评估半刚性基层的有效模量。

5 基于有效模量的加铺层设计步骤

结合路面结构层的有效模量和现行规范新建沥青路面的设计方法,提出了基于有效模量的加铺层设计方法,其步骤如下所述。

- (1)根据中国《公路沥青路面设计规范》,确定设计交通量 ESAL。
- (2)确定土基回弹模量 M_r 。
- (3)估计旧路面的有效模量,旧路面结构层的有效模量,见表 3、表 4。
- (4)根据交通量计算设计弯沉 l_d 。
- (5)用 HPDS 2006 公路路面设计程序系统,计算加铺后的计算弯沉 l_s ,使 $l_s \leq l_d$ 。

6 加铺层厚度设计示例与对比分析

为进一步说明基于结构层有效模量的沥青路面加铺层设计过程,以某高速公路的检测资料为基础给出设计案例,并与现行规范的设计方法、AASHTO 和 AI 设计方法进行对比分析。

6.1 交通量现状和原路面状况

路段的交通量数据:路面竣工后第一年日平均当量轴次为 10 339;设计年限内一个车道上累计当量轴次为 $2.558\ 783\times10^7$ 。沥青路面面层状况见表 5;半刚性基层的状况见表 6。

表 5 沥青面层状况
Tab. 5 Condition of asphalt layers

病害类型	严重 程度	损坏率 /%	病害 类型	严重 程度	损坏率 /%
纵向和横向裂缝	轻	12. 18	松散	重	0. 32
松散	轻	0. 04	龟裂	重	4. 64
纵向和横向裂缝	重	1. 07	坑槽	重	1. 42
沉陷	重	1. 42			

表 6 半刚性基层状况
Tab. 6 Condition of semi-rigid base layer

区间桩号	长度 /m	缺陷 描述	区间桩号	长度 /m	缺陷 描述
K110+117~K110+137	20	局部 松散	K110+796~K110+801	5	松散
K110+566~K110+601	35	局部 较松散	K111+323~K111+364	41	局部 较松散
K110+654~K110+661	7	松散			

运用 AASHTO、AI 设计方法,需要把中国的 100 kN 的当量轴载换算成 80 kN 的当量轴载,对于 2 种设计方法的不同标准轴载,可采用四次幂定律公式进行换算,即

$$F_i = (P_i/P_s)^4 \tag{4}$$

式中: F_i 为轴载等效系数; P_s 为任意标准轴载; P_i 为待换算轴载。

将一个车道上的 100 kN 累积当量轴次按式(4)换算成 80 kN 的当量轴载,为 $6.240\ 93\times10^7$ 。

6.2 基于有效模量的加铺层设计方法

根据沥青面层模量的判断方法,沥青面层有小于 5%严重龟裂和较少的中等和严重的横向裂缝,属于表 3 中的第Ⅱ阶段,所以选用模量为 950 MPa。由于旧水泥稳定基层出现小于 7.2%中等的龟裂(由表 6 可以得出),属于表 4 中的第Ⅲ阶段,所以选取模量为 1 000 MPa。水泥石灰土模量按经验取 350 MPa,结构层材料设计参数见表 7。

表 7 根据路面状况评估的模量
Tab. 7 Modulus according to the assessment of road conditions

结构层名称	厚度/cm	20 ℃抗压回弹模量/MPa	
		初始设计	评估的模量
沥青混凝土面层	10. 7	1 400	950
粗粒式沥青混凝土	5. 0	1 000	945
沥青碎石	5. 0	1 200	940
水泥稳定碎石	20. 0	1 500	1 000
水泥石灰土	30. 0	500	350
土基		40	40

用 HPDS 2006 公路路面设计程序系统,按照表 7 中的模量,计算得到加铺层厚度为 10. 0 cm 的热拌沥青混合料(HMA)。

6.3 AASHTO 设计方法

(1) N_{SN_f} 和 $N_{SN_{eff}}$ 的确定。本例中假设 PSI_0 为 4. 2, PSI_t 为 2. 5,得到 ΔPSI 为 1. 7,土基回弹模量取 40 MPa;分别取不同的可靠度水平 R 和标准差 S_0 ,按照式(2) 确定 N_{SN_f} 的值,见表 8;根据旧路面状况和表 2,评估的 $N_{SN_{eff}}$ 为 4. 767。

表 8 不同的可靠度水平 R 和标准差 S_0 的结构数 N_{SN_f}

Tab. 8 Structure number N_{SN_f} of different reliability level R and standard deviation S_0			
N_{SN_f}		不同可靠度(%) 的 R 值	
		90($Z_R = -1.282$)	95($Z_R = -1.645$)
标准差 S_0	0. 4	6. 8	7. 1
	0. 5	7. 0	7. 4

(2) 由式(1) 计算的加铺层厚度见表 9,其中层系数 a_{ol} 取 0. 44(为新拌沥青混凝土常用的层系数)。

表 9 不同可靠度和标准差下的加铺层厚度

Tab. 9 Overlay thickness of different reliability level and standard deviation			
N_{SN_f}		不同可靠度(%) 的热拌沥青混合料 加铺层厚度 /cm	
		90($Z_R = -1.282$)	95($Z_R = -1.645$)
标准差 S_0	0. 4	12. 0	13. 7
	0. 5	13. 1	15. 5

6.4 AI 法的厚度设计

由土基模量和交通量可以得到 $H_n = 34$ cm,据旧路路面状况和表 1 得到 $H_e = 24.3$ cm;由公式 $h_{ol} = h_n - h_e$,得到 h_{ol} 为 9. 7 cm 热拌沥青混合料(HMA)。

6.5 现行规范方法

由于路段的代表弯沉为 19. 2 mm,小于路面的设计弯沉,所以根据现行规范不需要加铺补强。

以上 4 种方法得到的加铺层厚度见下页表 10。

表 10 不同设计方法的加铺层设计厚度

Tab. 10 Overlay design thickness of different design method

原路面弯 沉/mm	沥青加铺层厚度/cm				
	现行规范 设计方法	AASHTO 设计方法			本文设 计方法
		S_0	可靠度 90%	可靠度 95%	
19.2	0	0.4	12.0	13.7	10
		0.5	13.1	15.5	

由表 10 可知,本文设计方法的加铺层厚度与 AI 法设计的加铺层厚度非常接近,比 AASHTO 法设计的加铺层厚度要小一些,但是普遍认为 AASHTO 方法设计的加铺层较厚;同时也可以看出,按照现行规范的方法,由于弯沉值太小,所以不需要进行加铺层设计,这也恰好验证了现行规范中加铺层设计方法的局限性,以及本文加铺层设计方法的合理性。

7 结 语

(1)中国现行规范的方法是根据路面实测弯沉来确定路面的当量回弹模量,然而弯沉和路面破损程度无明显对应的联系,这就会导致有些路段弯沉很小,但路面破损却非常严重,出现按照现行规范方法无法进行加铺层设计的问题。

(2)参考 AASHTO 的旧沥青面层层系数的建议值,根据旧路的路面破损状况及模量与层系数的关系,确定了中国的旧沥青路面有效模量建议值,然后参考中国新建沥青路面设计方法,提出了基于有效模量的加铺层设计方法。

(3)经过实例验证和与其他加铺层方法的对比分析,本文的设计方法所得到的加铺层厚度为 10cm,与 AI 法和 AASHTO 法较为一致,避免了现行规范当路面代表弯沉值较小时无法进行加铺的情况,可以有效指导半刚性基层沥青路面加铺层设计。

参考文献:

References:

[1] Asphalt Institute. Asphalt overlays for highway and street rehabilitation manual series[R]. Washington D C:Asphalt Institute,1993.

[2] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO guide for design of new and rehabilitated pavement structures[R]. Washington DC: American Association of State Highway and

Transportation Officials,2003.

[3] JTJ D50—2006,公路沥青路面设计规范[S]. JTJ D50—2006,Specifications for design of highway asphalt pavement[S]. (in Chinese)

[4] 刘黎萍,孙立军. 旧沥青路面面层有效厚度模型研究[J]. 公路交通科技,2001,18(16):9-13.

LIU Li-ping,SUN Li-jun. Research on effective thickness model of existing asphalt pavement surface course[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(16): 9-13. (in Chinese)

[5] 曾梦澜,尹万辉,吴超凡,等. 冷再生沥青路面结构设计方法[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版:2008,31(7):1097-1099.

ZENG Meng-lan,YIN Wan-hui,WU Chao-fan,et al. Structural design method for cold reclaimed asphalt pavement[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2008, 31(7): 1097-1099. (in Chinese)

[6] 李智锋. 高模量沥青混凝土蠕变本构方程的有限元分析[J]. 筑路机械与施工机械化,2012,29(1):42-44.

LI Zhi-feng. Analysis on creep constitutive equation of high modulus asphalt concrete with finite element [J]. Road Machinery &. Construction Mechanization, 2012,29(1):42-44. (in Chinese)

[7] 王永胜,孔永健. AASHTO 沥青路面结构设计方法在我国的适用性研究[J]. 北方交通大学学报,2004,28(4):58-62.

WANG Yong-sheng,KONG Yong-jian. Research on the applicability of AASHTO asphalt pavement structure design method in China [J]. Journal of Northern Jiaotong University,2004,28(4):58-62. (in Chinese)

[8] 王旭东. 沥青路面材料动力特性与动态参数研究[D]. 南京:东南大学,1998.

WANG Xu-dong. Study of material dynamic characteristics and dynamic parameters of asphalt pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 1998. (in Chinese)

[9] 杨振丹. 半刚性基层沥青路面加铺层设计方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

YANG Zhen-dan. Study of overlay design method of semi-rigid asphalt pavement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2008. (in Chinese)