

高模量沥青混凝土抗变形性能研究

王 刚^{1,2}, 刘黎萍¹, 孙立军¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要: 对高模量沥青混凝土及 SBS 改性沥青和 70# 普通沥青混凝土在 15℃、20℃、40℃ 及 60℃ 条件下进行单轴贯入和抗压回弹模量试验, 结果表明高模量沥青混凝土在各温度下具有相对较高的抗剪强度和抗压回弹模量值, 尤其在高温时优势明显. 分别得到了以标准温度 15℃ 及 20℃ 抗压回弹模量为基准的回归方程, 可以对各种混合料在不同温度下抗压回弹模量进行较高精度的推算, 当对结果精度要求不高时也可以采用抗剪强度对抗压回弹模量进行换算. 通过对路面结构永久变形的计算, 验证了国外将高模量沥青混凝土用于路面结构中间层的正确性, 同时也表明了采用抗剪强度及抗压回弹模量指标进行路面变形分析的合理性.

关键词: 沥青混凝土; 单轴贯入试验; 抗压回弹模量试验; 抗变形性能; 回归方程

中图分类号: U414

文献标识码: A

Research on Anti-deformation Properties of High Modulus Asphalt Concrete

WANG Gang^{1,2}, LIU Liping¹, SUN Lijun¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region of the Ministry of Transport, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Based on the uniaxial penetration and compressive resilient modulus test, the high modulus asphalt concrete, SBS modified asphalt and 70# plain asphalt concrete under the condition of 15℃, 20℃, 40℃ and 60℃ have been evaluated. The test results show that the high modulus asphalt concrete has relatively high shearing strength and modulus under various temperatures and especially at high temperatures. The equation based on compressive resilient modulus at standard temperature 15℃ and 20℃ is obtained through regression analysis to calculate the compressive resilient modulus at different temperatures for kinds of mixtures. Also shearing strength can be used to calculate the modulus

when the precision demand is not so high. Through calculating the permanent deformation of the pavement structures, it proves high modulus asphalt concrete being used as the middle layer of pavement structures in foreign countries is rational. Experimental results verifies the reasonability of shearing strength with compressive resilient modulus being used to analysis the anti-deformation properties of asphalt concrete.

Key words: asphalt concrete; uniaxial penetration test method; compressive resilient modulus test; anti-deformation properties; regression equation

长寿命沥青路面的设计理念认为路面在较厚的沥青层(大于 18 cm)情况下, 可以消除传统上普遍存在的沥青层底疲劳损坏, 但是长寿命路面并不是一直不坏, 而是路面损坏仅发生在路面的上层, 维修时不需要进行结构性处理, 只需将表层混合料铣刨, 并换成等厚度的新混合料即可^[1], 因而对沥青层上面层抵抗变形和开裂等性能提出了更高的要求, 高模量沥青混凝土(HMAC)便是在这样的环境下被提出和广泛采用, 法国对高模量沥青混凝土的研究最早也最全面, 按照法国高模量沥青混凝土标准 NF P98-140 中的定义, 复数模量(15℃, 10 Hz) $\geq 14\ 000$ MPa 的沥青混凝土才能称为高模量沥青混凝土. 如今英国、葡萄牙、芬兰、美国、韩国等国家各自对高模量沥青混凝土展开过研究, 并认为它的突出优点是刚度大、抗车辙能力强, 同时具有较好的抗疲劳性能, 采用高模量沥青混凝土的长寿命路面在设计和施工良好的情况下使用 8~12 年才需要进行表面功能性维修, 其设计使用寿命在 40 年以上, 而国内的高模量沥青混凝土研究才刚刚起步, 有必要针对我国的具体情况对高模量沥青混凝土展开系统的研究. 1987 年第 6 次国际沥青路面结构设计会议上,

收稿日期: 2010-12-13

基金项目: 江西省交通厅科技项目(2009c0001); 广东省交通厅科技项目(2007-1)

第一作者: 王 刚(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路工程. E-mail: cartlj@126.com

通讯作者: 刘黎萍(1968—), 女, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路结构与材料. E-mail: liu_liping@163.com

Eisenmann 等人将沥青路面的永久变形机理明确为沥青混合料的剪切流动变形机理,即车辙变形主要是路面剪切变形的结果,车辙的大小不但与路面材料的抗剪强度有关,而且与整个路面结构所承受的剪应力有关,另外抗压回弹模量也被认为是表征沥青混凝土抗变形性能的主要指标. 本文采用单轴贯入抗剪试验及抗压回弹模量试验对高模量沥青混凝土进行研究,同时选择了另外两种混合料进行抗变形能力的对比,并在此基础上考虑由温度引起的模量梯度对实际路面结构进行抗变形能力对比分析.

1 试验方法简介

1.1 单轴贯入试验方法

同济大学提出了单轴贯入抗剪试验方法^[2],文献[3]通过有限元分析和实测混合料强度试验确定了单轴贯入试验条件. 混合料抗剪强度=贯入强度×剪应力系数,单轴贯入试验所需的抗剪参数见表 1.

表 1 抗剪参数选取表
Tab.1 Shear parameter selection table

试件尺寸	泊松比	τ_{max}
$d \leq 16 \text{ mm}$	0.35	0.339
$d > 16 \text{ mm}$	0.35	0.350

表 2 沥青技术指标试验结果
Tab.2 The results of asphalt specifications

类型	针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	延度(5 cm·min ⁻¹ , 5℃)/cm	延度(5 cm·min ⁻¹ , 15℃)/cm	软化点 环球法/℃	旋转粘度 135℃/Pa·s
SBS	52	32	—	88.5	2.039
HMAC	72	93	—	93.3	3.182
70#	69	—	>150	47.6	0.535

2.1 单轴贯入试验结果及分析

因空隙率变化对沥青混合料抗剪强度影响较大^[6],为便于比较,试验所成型的混合料试件均在各自最佳沥青用量(由马歇尔方法确定)下成型,采用每组 6 个平行试件空隙率均控制在 4%±0.2%,抗剪强度试验在 MTS 810 试验机上进行. 为了考察不同温度下各沥青混合料抗剪性能,主要进行了在 15℃、20℃、40℃和 60℃下抗剪强度测试,抗剪强度试验结果见图 1 和图 2.

图 1 表明,沥青混合料抗剪强度具有较大的温度敏感性,随着温度的升高抗剪强度减小,温度由 15℃升高到 20℃时抗剪强度急剧减小,随着温度继续升高,减大幅度趋于缓和,结果显示,各种沥青混合料 60℃时抗剪强度均不到各自 15℃时的 20%,这

1.2 抗压回弹模量试验方法

根据规范规定^[4],在标准试验温度 15℃(或者 20℃)下,采用加载速率 2 mm·min⁻¹,对 Φ100×100 mm 试件进行 7 级单轴无侧限重复加载(抗压强度破坏荷载的 0.1 倍~0.7 倍)测试各级回弹变形计算出抗压回弹模量.

2 试验结果及分析

国内外研究认为路面车辙变形主要发生在路表 10 cm 以内,沥青混合料抗剪强度不足将直接导致路面剪切塑性流动的出现,加之混合料回弹模量不足造成路面扩散应力能力的下降,路面在很短时间内便出现较大的车辙永久变形. 文献[5]通过三维有限元力学分析,对目前国内常用沥青路面结构中剪应力沿深度变化规律进行研究,表明高剪应力区主要集中在路面结构中、上面层. 因而本文主要针对中上面层 SUP20 及 SUP13 级配展开研究,中面层集料采用目前普遍使用的石灰岩,上面层采用玄武岩. 为了系统研究高模量沥青混凝土的抗变形特性,采用高模量改性沥青,并对比壳牌 SBS 改性沥青及 70# 普通沥青试验结果,沥青技术指标试验结果见表 2.

也解释了沥青路面永久变形容易在夏季炎热气候时显著增大的原因.

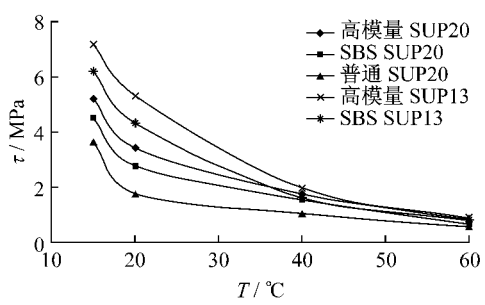


图 1 抗剪强度试验结果对比
Fig.1 Comparison of shear strength test results

由图 1 还可知,各温度下抗剪强度由大到小顺序均为:高模量沥青混合料>SBS改性沥青混合料

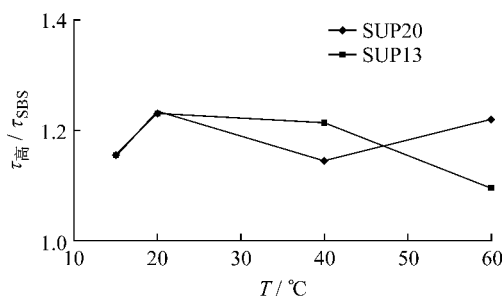


图2 高模量与SBS改性沥青混合料抗剪强度比及与温度的关系

Fig.2 Coefficient of shear strength ratio of high modulus and SBS and its relationship with temperature

>70#普通沥青混合料,说明无论是高温还是低温,高模量沥青混合料都具有较好的抗变形能力;图2表明高模量与SBS改性沥青混合料抗剪强度比值在不同温度下有所不同,温度低于40℃时SUP20及SUP13抗剪强度比均先增大后减小,高于40℃时有所不同,SUP20呈增大趋势,60℃时比值为1.22倍,而SUP13则相反,60℃时比值只有1.10,说明在高温季节随着温度升高,相对于SBS改性沥青混合料而言,SUP20更能体现高模量沥青混合料抗变形性能优势.当然高模量沥青相对于普通70#基质沥青混合料而言,其性能优势在各温度下均表现明显,不同温度下两者比值的平均值达到了1.61倍.

2.2 抗压回弹模量试验结果及分析

采用与单轴贯入试验相同的成型方法,用旋转压实仪在各自最佳沥青用量下成型 $\Phi 100 \times 100$ mm沥青混合料试件,每组平行试件采用6个并控制空隙率在 $4\% \pm 0.2\%$,试验在MTS 810试验机上进行,进行了标准温度(15℃和20℃)及40℃、60℃的抗压回弹模量试验,试验在环境保温箱内进行以精确控制试验温度,不同温度下抗压回弹模量试验结果见图3和图4.

图3表明,各种混合料抗压回弹模量表现出与

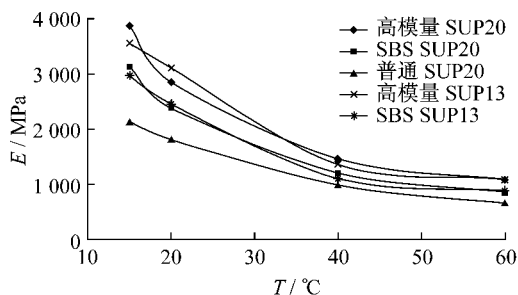


图3 抗压回弹模量试验结果对比

Fig.3 Comparison of compressive resilient modulus test results

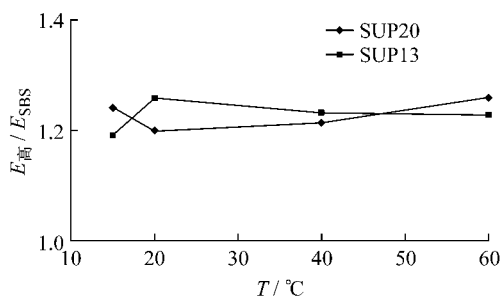


图4 高模量与SBS改性沥青混合料回弹模量比及与温度的关系

Fig.4 Coefficient of compressive resilient modulus ratio of high modulus and SBS and its relationship with temperature

抗剪强度同样的变化趋势,即随着温度升高抗压回弹模量明显降低,表现出了较大的温度敏感性,并且在各温度下高模量沥青混合料>SBS改性沥青混合料>70#普通沥青混合料,60℃时各混合料抗压回弹模量只有其15℃时的30%左右;图4表明,SUP20高模量与SBS改性沥青混合料模量比值随着温度的升高先减小后增大,而SUP13则先增大后减小;温度高于20℃后SUP20随温度升高不断增大,60℃时比值达到最大1.26,而SUP13则相反,60℃时达到最小1.23,模量比值变化结果也表明,在温度较高时SUP20更能体现高模量沥青混合料的抗变形性能优势,相对于普通70#基质沥青混合料而言,高模量沥青混合料抗变形性能优势更加明显,两者模量比值各温度下平均值达到了1.63倍.

2.3 抗压回弹模量的温度修正

文献[7]对多种沥青混合料在不同温度下的抗压回弹模量数据,按各温度下抗压回弹模量值与20℃标准温度下抗压回弹模量之比与温度的关系进行回归分析,得到了公式: $\frac{E_T}{E_{20}} = 2.980 - 0.099T$,式中: T 为温度值,℃; E_T 与 E_{20} 分别为温度 T 及标准温度20℃下的抗压回弹模量值,MPa.

上式的比值关系可以消除材料性质的影响,这种比值关系与沥青标号、类型和混合料级配类型无关,文献[8]通过对温度与实测弯沉盆反算得到的沥青层模量之间相互关系研究分析也认为沥青层厚度、集料级配及材料性质对比值影响不大.仔细研究发现,该研究所采用的试件由马歇尔试验击实成型,试件尺寸与现行规范标准尺寸相差较大,另外该式只能对-10~30℃范围抗压回弹模量数值进行推算,并且当温度接近30℃时,由该式计算的结果几乎为0,这种状况在实际路面中是不可能出现的.

借鉴前人的研究成果,基于本研究所得出的试验数据,分别以 15℃ 及 20℃ 抗压回弹模量值为标准,将其他温度下数值与之比值作为纵坐标,以温度作为横坐标,进行相关性分析,发现在双对数坐标下,两者呈现较高的相关性能,结果见图 5 与图 6.

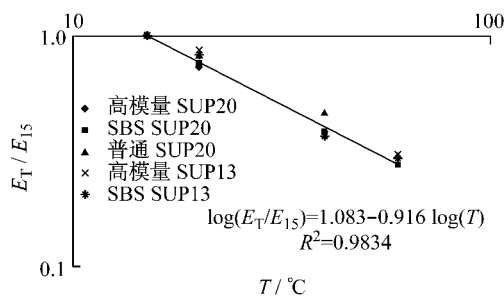


图 5 以 15℃ 模量为基准回归结果

Fig.5 Regression results as the benchmark of modulus at 15℃

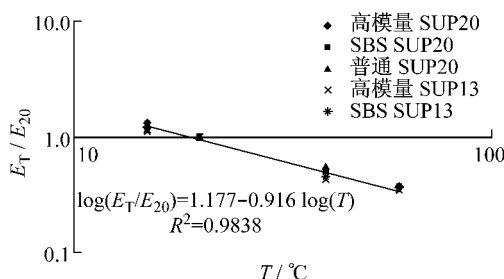


图 6 以 20℃ 模量为基准回归结果

Fig.6 Regression results as the benchmark of modulus at 20℃

由以上分析可以发现,得出的回归方程相关系数较高.实际操作中,在试验条件受限或时间不允许情况下,当对路面结构进行分析需要用到沥青混合料不同温度下的抗压回弹模量值时,可以只进行标准温度下(15℃或 20℃)的模量试验,利用回归方程进行推算,既省去了繁琐的重复试验过程又能保证较高的精度.

2.4 抗剪强度与抗压回弹模量相关性

对比抗剪强度及抗压回弹模量试验结果,采用相同级配的混合料在同一温度下均表现为高模量改性沥青最优,其次是 SBS 改性沥青及 70# 普通沥青,并且指标变化趋势相同,相互之间可能存在较大的相关关系,对各温度下抗剪强度与抗压回弹模量的

相关性进行了研究,见图 7.

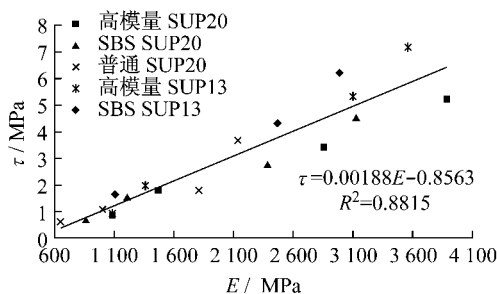


图 7 抗剪强度与抗压回弹模量相关性分析

Fig.7 Correlation of shear strength and compression resilient modulus

回归分析表明,每种混合料在不同温度下的抗剪强度与抗压回弹模量具有较好的线性关系,除了普通 SUP20 相关系数只有 0.841 外,其他混合料都在 0.970 以上.将所有混合料抗剪强度及抗压回弹模量数值汇总在一起,对结果进行回归分析,发现两者仍然呈现较好的线性关系,见图 7.因此可以认为,抗剪强度与抗压回弹模量的线性相关性受原材料性质影响不大.当试验条件受限无法进行抗压回弹模量试验或者对所需抗压回弹模量值精度要求不高时,可以通过简单的单轴贯入试验得出的抗剪强度对相同温度下的抗压回弹模量值进行推算.

对比之前回归分析结果,用图 7 方程对不同温度下的抗压回弹模量进行推算时精度稍低于图 5 和图 6.

3 路面结构永久变形分析

对路面结构永久变形进行预估可以预先知道路面结构在设计交通量轴载次数作用后路面的永久变形,进而更科学更有针对性的指导路面结构设计和材料设计.同济大学经过多年的研究^[9-11],采用分层叠加原理,在结合了室内试验和环道试验结果的基础上提出了永久变形预估模型,当考虑路面隆起系数 L_p 时该模型还能对路面结构车辙深度进行预估,车辙 = 永久变形 $\times (1 + L_p)$,并经过证明该模型与路面实测结果较为吻合.

载作用次数; V 为行车速度, $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

采用 Superpave (SHRP) 提出的等效温度计算方法^[12-13]计算路面结构永久变形(车辙)等效温度.选用的路面结构见表 3,假定路面结构所在区域年平

$$R = 0.61(1 + L_p) \sum_{i=1}^n 10^{-7.927 T_i^{3.6834}} \{V^{-0.8538} \cdot N\}^{0.7863} \left(\frac{\tau_i}{[\tau]_i} \right)^{0.6842}$$

式中: R 为沥青层车辙深度, mm; L_p 为隆起系数,半刚性基层取 0.505; T_i 为沥青路面温度, °C; τ_i 为沥青路面在行车荷载作用下产生的最大剪应力, MPa; $[\tau]_i$ 为沥青路面材料抗剪强度, MPa; N 为轴

均气温为 16.6℃,标准差 2.4℃,取 85%保证率系数 强度及模量按层计算,计算用数值见表 5,各结构土
时不同亚层的等效温度计算结果见表 4,计算时抗剪 基模量统一取 40 MPa。

表 3 路面结构

Tab.3 Pavement structures

层位	厚度/cm	级配类型	结构类型		
			结构一	结构二	结构三
沥青层	4	SUP13	高模量改性沥青	SBS 改性沥青	SBS 改性沥青
	6	SUP20	高模量改性沥青	SBS 改性沥青	高模量改性沥青
	8	AC25	AH-70 号普通沥青		
基层	20	骨架密实型	水泥稳定碎石(3.5%水泥)		
	20	骨架密实型	水泥稳定碎石(3.0%水泥)		
底基层	22	骨架密实型	级配碎石		

表 4 不同亚层等效温度

Tab.4 Effective temperature of different sub-layers

深度/cm	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5
温度/℃	47.8	46.7	45.4	44.2	43.0	41.8	40.6	39.4	38.2
深度/cm	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5
温度/℃	37.0	35.8	34.6	33.4	32.2	31.0	29.8	28.6	27.4

表 5 路面各层参数取值

Tab.5 Parameter of different layers of pavements

类型	抗压回弹模量/MPa			抗剪强度/MPa		
	结构一	结构二	结构三	结构一	结构二	结构三
SUP13	3 105	2 467	2 467	0.897	0.818	0.818
SUP20	2 860	2 386	2 860	0.837	0.686	0.837
AC25	1 000	1 000	1 000	0.55	0.55	0.55
水稳碎石	1 500	1 500	1 500			
	1 300	1 300	1 300			
级配碎石	200	200	200			

运用 Ansys 有限元分析软件,将路面荷载简化为矩形荷载,采用标准荷载 0.7MPa 对路面结构进行计算,轴载作用取 8×10^7 次,表 5 所列下面层模量为实测值,基层及底基层模量为规范推荐值,计算结果见表 6。

表 6 永久变形计算结果

Tab.6 Calculation results of permanent deformation

结构	永久变形/mm	车辙深度/mm	最大剪应力/MPa
结构一	7.66	11.53	0.258
结构二	11.74	17.67	0.242
结构三	8.17	12.29	0.257

结果表明,结构二永久变形和车辙深度均最大,结构三次之,结构一最小,说明高模量沥青混凝土的使用能够明显降低路面结构的永久变形及车辙深度,从降低幅度来看,相对于结构二永久变形,结构三为其 0.70 倍,而结构一仅为 0.65 倍,结构一与结构三永久变形比较接近;三种结构最大剪应力均出现在距顶面 9.5 cm 左右,即路面结构中面层,最大

剪应力的计算结果符合虎克定律,即高模量沥青混凝土的使用将增大路面最大剪应力,但增幅甚微不到 7%,相比高模量对 SBS 改性沥青抗剪强度增幅 22%来说,剪应力增大带来的影响完全可以忽略。

实际的工程结构往往寻求性能与造价的平衡点,以上分析可以发现,结构三相对结构二在抗变形性能上具有明显优势,相对结构一不但性能相当而且在造价上具有优势,因而结构三是最优的选择,即高模量沥青混凝土用于路面结构中面层将达到性能与造价的较好结合,这一结果与抗剪强度及抗压回弹模量分析结果一致,当然,也验证了国外通常将高模量沥青混凝土用于路面结构中间联结层的正确性。

4 结论

(1) 单轴贯入及抗压回弹模量试验结果表明,高模量沥青混凝土在高温(60℃)时,仍然具有较为

优越的抗剪强度及抗压回弹模量,因而将其用于路面结构将有利于改善路面抗变形性能。

(2) 用标准温度(15℃或20℃)做基准的模量推算公式适用于温度大于0℃的情况,可对较高温度下模量进行推算,克服了以前只能对-10~30℃范围进行推算的弊端;当对推算结果精度要求不高时,也可以采用抗剪强度—抗压回弹模量换算公式,通过进行较为简单的单轴贯入试验,由抗剪强度推算出抗压回弹模量。

(3) 路面结构永久变形计算结果表明,将高模量沥青混凝土用于路面结构中面层将使得路面性能与造价达到最优的结合,这一结果与抗剪强度及抗压回弹模量分析结果一致,表明了选用这两个指标对高模量沥青混凝土抗变形性能进行研究分析的合理性。

参考文献:

- [1] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
SUN Lijun. Structural behavior study for asphalt pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 毕玉峰. 沥青混合料抗剪试验方法及抗剪参数研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2004.
BI Yufeng. Research on shearing test methods and shear parameters of asphalt mixtures [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2004.
- [3] 崔鹏. 长寿命沥青路面设计方法研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2007.
CUI Peng. Research on design method of perpetual asphalt pavement [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2007.
- [4] 交通部公路科学研究所. JTJ 052-2000 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2000.
Research Institute of Highway of Ministry of Transport. JTJ 052-2000 Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2000.
- [5] 尹谨学. 沥青路面重载特征及对路面设计的影响研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2009.
YIN Jinxue. Research on impact of heavy design features on pavement design of asphalt pavement [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2009.
- [6] 汤文. 沥青路面车辙预估模型研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2009.
TANG Wen. Research on rutting prediction model of asphalt pavement [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2009.
- [7] 许志鸿,杨孟余. 路面材料设计参数研究报告[R]. 上海:同济大学道路与交通工程研究所,1994.
XU Zhihong, YANG Mengyu. Study report of pavement materials design parameters [R]. Shanghai: Tongji University. College of Road and Traffic Engineering, 1994.
- [8] 查旭东. 沥青路面反算模量的温度修正[J]. 公路, 2002(6):51.
ZHA Xudong. Temperature adjustment for back calculation modulus of asphalt pavement [J]. Highway. 2002(6):51.
- [9] 朱琨琨. 车辙预估模型的改进及沥青混合料抗剪强度标准初探[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2010.
ZHU Kunkun. Improvement on permanent deformation evaluation model and primary investigation on criterion of shear strength for asphalt mixture [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2010.
- [10] 鲁正兰. 沥青路面车辙预估方法的研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2005.
LU Zhenglan. Research on rutting prediction methods of asphalt pavement [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2005.
- [11] 苏凯. 沥青路面车辙产生机理及预估方法研究[D]. 上海:同济大学交通运输工程学院,2007.
SU Kai. Research on rutting mechanism and prediction methods of asphalt pavement [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2007.
- [12] Huber G A. Weather database for the superpave mix design system [C]//Strategic Highway Research Program, Washington DC: National Research Council, SHRP-A-648A, 1994:1-4.
- [13] Kennedy T W, Huber G A, Harrigan E T, et al. Superior performing asphalt pavements (superpave): the product of the SHRP asphalt research program [C]//Strategic Highway Research Program, Washington DC: National Research Council, SHRP-A-410, 1994:16-19.