

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2015.11.001

水泥乳化沥青混凝土长寿命复合式路面结构研究

付军¹, 张小强¹, 王发洲¹, 肖旺新²

(1. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430063; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要:为减少长寿命复合式路面的沥青层厚度与反射性裂缝, 将冷拌水泥-乳化沥青混凝土应用于高压应力区(联结层), 并设置大粒径沥青碎石与水泥稳定碎石复合式基层。用三维有限元方法分析其路面设计控制参数以及路面材料宏观力学参数(弹性模量)与各层结构厚度对长寿命复合式路面的影响, 结果表明各层材料最大拉应力、最大剪应力为强度控制指标更为合适, 同时结合工程实际提出了水泥乳化沥青混凝土长寿命复合式路面结构, 并应用于宜昌城区的试验路段。

关键词:道路工程; 水泥乳化沥青混凝土联结层; 三维有限元分析; 长寿命复合式路面; 设计指标

中图分类号: U416.02

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2015)11-0001-06

Research on CEAC Long-life Composite Pavement Structure

FU Jun¹, ZHANG Xiao-qiang¹, WANG Fa-zhou¹, XIAO Wang-xin²

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China;

2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to reduce the asphalt layer thickness and the reflective crack in long-life composite pavement, the cold mix CEAC is applied to high compressive stress area (binder course), meanwhile, the large particle sized asphalt macadam and cement stabilized macadam are used for composite base. The influence of its design control parameters, macro mechanical parameters (elastic modulus) of pavement materials and thickness of each structural layer on the long-life composite pavement is analysed by 3D finite element model. The result shows that the maximum tensile stress and the maximum shear stress of each layer of material are more suitable as strength control parameters. The CEAC long-life composite pavement structure is proposed combining the project and applied in Yichang test road.

Key words: road engineering; cement emulsified asphalt concrete (CEAC) link layer; 3D finite element analysis; long-life composite pavement; design index

0 引言

多功能长寿命路面是当前路面发展趋势, 主要通过合理的结构和材料组合设计使损坏主要控制在路面的表层, 路面主体结构可长时间安全运营^[1]。设计核心是要求路面结构的表面层具有排水、降噪、抗滑和抗磨损的能力, 联结层位于高压应力区, 要求具有良好的承载力、抗车辙能力和耐久性, 其结

构破坏形式基本上消除了传统上普遍存在的基层疲劳损坏, 保证不发生从下而上的疲劳裂缝, 延长道路长期的使用寿命, 其设计模式见图1。

欧美发达国家的长寿命沥青路面研究和应用方面已有较多文献报道^[1-5], 主要思路是通过增加路面沥青层厚度达到长寿命路面的设计目的, 美国的长寿命路面平均沥青层厚度为17.4~35.3 cm^[6], 欧洲的长寿命路面沥青层厚度也大多在20 cm以上^[7]。

收稿日期: 2014-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51072149); 交通运输部科技项目(2015319811320); 湖北省公路科技项目(2013-9)

作者简介: 付军(1972-), 男, 湖北松滋人, 博士研究生, 副教授。(fjgrant@whut.edu.cn)



图 1 国际长寿命沥青路面设计模式

Fig. 1 International long-life asphalt pavement design mode

我国长寿命沥青路面尚处于探索阶段，其中广深高速公路长寿命试验段的面层厚度达到了 32 cm^[8]。江苏省沿江高速公路，其长寿命试验段路面总厚度 76 cm，沥青混凝土层厚度为 25 cm。苏南到上海的沪宁高速公路改建长寿命路面试验段，沥青混凝土层厚度达到 27 cm^[9]。相较之下，我国现阶段半刚性沥青路面典型双层沥青混凝土组合厚度一般在 10 cm 左右。考虑到我国现阶段的具体国情，完全照搬欧美发达国家长寿命路面设计思路必然会带来极大的成本压力，因此亟待寻找适合当前国情的长寿命路面结构与材料体系。

1 新型长寿命复合式路面概念设计

冷拌水泥乳化沥青混凝土 (cement emulsified asphalt cement 简称 CEAC) 是经过水泥水化硬化与沥青胶结共同作用而将骨料紧密结合在一起的、兼有刚性与柔性的半柔性复合材料。相关试验表明^[10]其具有模量高 (28 d, 2 500 ~ 3 600 MPa)、抗车辙 (动稳定度达到 20 000 次/mm)、水稳性好 (浸水残留稳定度 $\geq 90\%$)、冻融劈裂强度比大 ($\geq 90\%$)、耐久性好，温度敏感性低的优点。同时 CEAC 在一定程度上可以起到防水封层的效用，避免雨水渗入基层和土基，且无需设置伸缩缝，路面行车平整性和舒适性也得到了保证。因此 CEAC 很适宜用于多功能长寿命路面的路面联结层。另外，针对我国半刚性沥青路面常见的反射裂缝问题，在半刚性水泥稳定碎石基层上设置柔性大粒径沥青碎石过渡基层，降低反射性裂纹的危害，形成复合式基层 (图 2)，保证路面整体的承载力。该路面结构与材料组合与多功能长寿命路面道路材料的要求非常吻合，具有很好的发展前景。

2 轮载作用下水泥乳化沥青混凝土复合式路面结构响应分析

长寿命复合式路面虽然也已成为国内外研究热

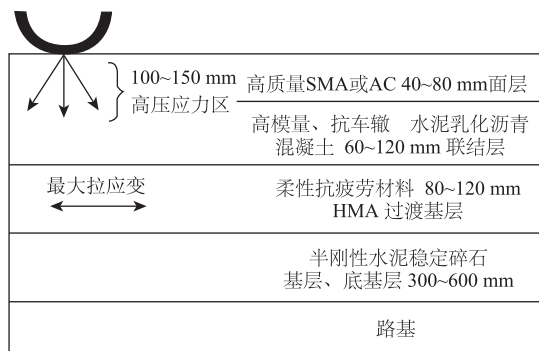


图 2 长寿命复合式路面设计概念

Fig. 2 Long-life composite pavement design concept

点，但迄今为止尚未提出明确的设计方法、设计指标及规范，也没有通用的长寿命复合式路面典型结构。本文针对冷拌水泥乳化沥青混凝土和大粒径沥青碎石复合式路面，利用 ANSYS 软件建立了路面结构的三维有限元模型，讨论分析了本文中长寿命路面设计控制参数。

2.1 三维有限元模型及标准车轮荷载

有限元法分析复合式路面的荷载应力，可以按照假设的复合式路面模型的大小来求解有限尺寸的路面模型，减小弹性层状体系理论水平方向无限大假设所带来的误差，且能考虑各种各样的荷载情况和模型的实际边界条件，求解所得到的结果可以是整个模型上的应力场和位移场，由此也可以更方便更全面地分析路面的受力状况。

模型使用有限元软件 ANSYS 建立，假定各结构层材料是各向同性的、均匀、连续弹性体，各层间的竖向及水平位移连续。边界条件假设为：底面没有 z 方向的位移，左、右两面没有 y 方向的位移，前、后两面没有 x 方向的位移，面层表面为自由面。其中 x 为行车方向， y 为路面横向方向， z 为垂直于路面向上方向，模型选用 Solid45 单元。车轮荷载采用标准轴载 BZZ - 100，轮胎标准内压 0.7 MPa，单轮荷载简化为矩形 18.9 cm $\times$ 18.9 cm，接触面积为 357.21 cm²，双轮边缘间隙 13.1 cm，两侧边缘间隙 138.1 cm^[11]。车轮加载最不利位置如图 3 所示，有限元模型如图 4 所示。

2.2 水泥乳化沥青混凝土复合式路面结构组合参数分析

长寿命复合式路面的初步结构与材料确定后，重点对水泥乳化沥青混凝土及沥青碎石过渡基层的厚度和材料参数 (弹性模量) 的组合参数展开研究。长寿命复合式路面组合与基础材料参数 (弹模、泊松比) 如表 1 所示，水泥乳化沥青混凝土及沥青碎

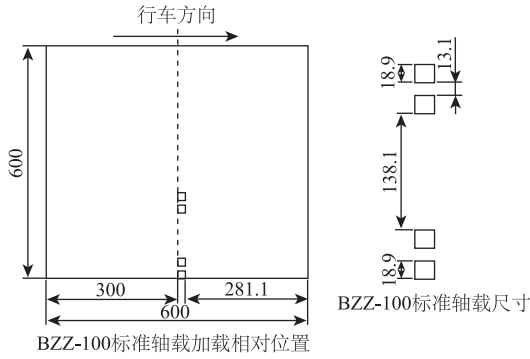


图 3 模型及 BZZ-100 标准轴载加载位置 (单位: cm)

Fig. 3 Model and loading position of BZZ-100 standard axle load (unit: cm)

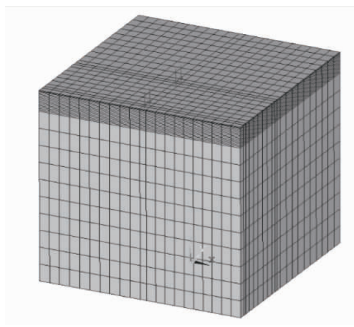


图 4 路面三维有限元模型示意图

Fig. 4 Three-dimensional finite element model of pavement
石弹性模量匹配系数和厚度组合如表 2 及表 3 所示。水泥乳化沥青混凝土联结层、沥青碎石过渡基层弹模及厚度对路面结构的影响见图 5 ~ 图 12。

表 1 长寿命复合式路面基础材料参数

Tab. 1 Long-life composite pavement foundation material parameters

结构层	基础弹性模量/MPa	泊松比
SMA13	1 385 (1 200 ~ 1 600)	0.28
乳化沥青水泥混凝土联结层	2 800	0.27
半开级配沥青碎石过渡基层 AM25	720	0.30
水泥稳定碎石基层	1 550 (1 300 ~ 1 700)	0.15
水泥稳定碎石底基层	1 480 (1 300 ~ 1 700)	0.15
土基	50	0.35

表 2 长寿命复合式路面弹性模量参数范围

Tab. 2 Long-life composite pavement elastic modulus parameter ranges

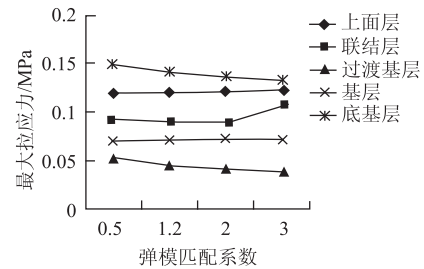
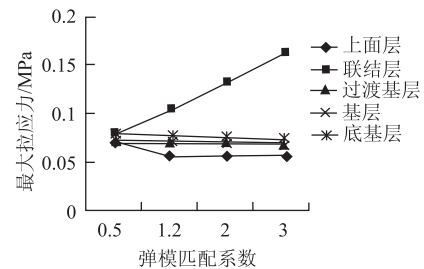
结构层	基础弹性模量 × 系数/MPa			
	× 0.5	× 1.2	× 2	× 3
上面层 SMA13	692.5	1 662	2 770	4 155
水泥乳化沥青混凝土联结层	1 400	3 360	5 600	8 400
半开级配沥青碎石过渡基层 AM25	360	864	1 440	2 160
水泥稳定碎石上基层	775	1 860	3 100	4 650
水泥稳定碎石下基层	775	1 860	3 100	4 650
水泥稳定碎石底基层	740	1 776	2 960	4 440

表 3 长寿命复合式路面模型结构几何参数及范围

Tab. 3 Long-life composite pavement model geometric parameters and ranges

结构层	长度/cm	宽度/cm	厚度变化/cm
上面层 SMA13	600	600	4
乳化沥青水泥混凝土联结层	600	600	4, 6, 8, 10
半开级配沥青碎石过渡基层 AM25	600	600	4, 6, 8, 10
水泥稳定碎石基层	600	600	36
水泥稳定碎石底基层	600	600	18
土基	600	600	600

图 5 ~ 图 6 说明, 当联结层弹模匹配系数增长时, 对整体最大拉应力的降低是有一定好处的, 但是联结层所受最大剪应力上升幅度较大, 故在选择联结层弹模时不宜过高。从图 7 ~ 图 8 可以看出, 当过渡基层弹模匹配系数增长时, 最大剪应力和最大拉应力所在的结构层其应力都有一定幅度的下降, 而应力储备总体变化幅度均不大, 故在选择过渡基层弹性模量时可以适当增加。图 9 ~ 图 10 表明, 增大联结层的厚度对结构整体的受力能起到较大的好处, 尤其是对底基层的影响较为积极, 但一味增加联结层厚度对降低其自身最大剪应力的影响越来越小, 而且从经济角度考虑也并非联结层越厚越好, 因此可以结合实际选择适当厚度。过渡基层厚度的影响见图 11 ~ 图 12, 显然增加过渡基层的厚度会

图 5 联结层弹模匹配系数对各层 $\sigma_{\max}$ 的影响Fig. 5 Effect of link layer elastic modulus matching coefficient on $\sigma_{\max}$ of each layer图 6 联结层弹模匹配系数对各层 $\tau_{\max}$ 的影响Fig. 6 Effect of link layer elastic modulus matching coefficient on $\tau_{\max}$ of each layer

对结构拉应力和剪应力都有一定好处,但除底基层外影响并不是很大,且过渡基层主要起到消除疲劳破坏的作用,且价格较高,所以其厚度选择并非越大越好。因此,综合考虑以上因素后提出宜昌长寿复合式路面的路面结构组合型式(图13),并成功应用于宜昌城区的试验路段。

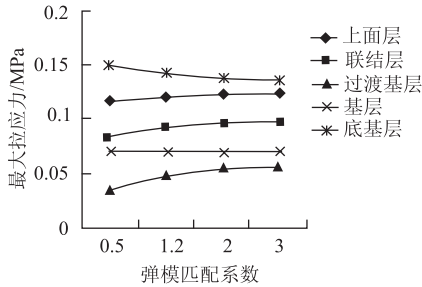


图7 过渡基层弹模匹配系数对各层 $\sigma_{\max}$ 的影响

Fig. 7 Effect of transition base elastic modulus matching coefficient on $\sigma_{\max}$ of each layer

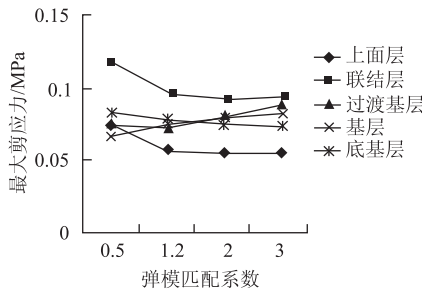


图8 过渡基层弹模匹配系数对各层 $\tau_{\max}$ 的影响

Fig. 8 Effect of transition base elastic modulus matching coefficient on $\tau_{\max}$ of each layer

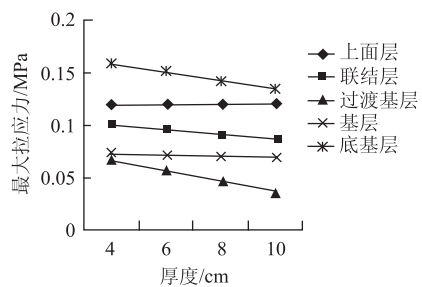


图9 联结层厚度对各层 $\sigma_{\max}$ 的影响

Fig. 9 Effect of link layer thickness on $\sigma_{\max}$ of each layer

3 水泥乳化沥青混凝土复合式路面控制设计指标分析

我国当前沥青路面设计规范以弹性层状体系理论为基础^[12],刚度指标以双轮间隙路表弯沉控制,路面抗弯拉验算指标以各层层底拉应力为设计控制指标,即相当在平面应力状态下 σ_x 为控制指标,路

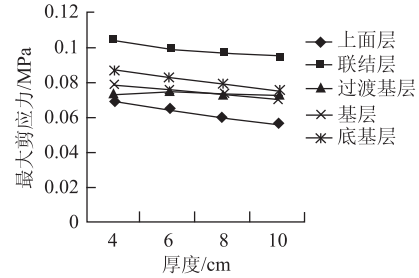


图10 联结层厚度对各层 $\tau_{\max}$ 的影响

Fig. 10 Effect of link layer thickness on $\tau_{\max}$ of each layer

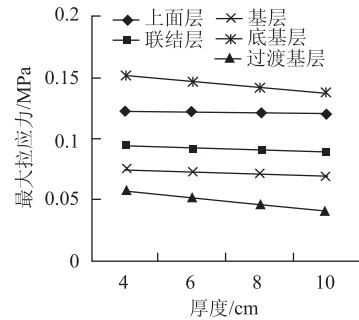


图11 过渡基层厚度对各层 $\sigma_{\max}$ 的影响

Fig. 11 Effect of transition base thickness on $\sigma_{\max}$ of each layer

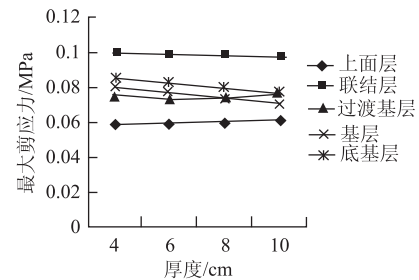


图12 过渡基层厚度对各层 $\tau_{\max}$ 的影响

Fig. 12 Effect of transition base thickness on $\tau_{\max}$ of each layer

面抗剪验算指标则以面层剪应力 τ_{xy} 为控制指标,计算图示如图14所示。

但理论和实践表明,基于弹性层状体系理论基础上的路表弯沉无法反映和包容路面结构的多样性及各种损害类型,沥青面层拉应力指标在设计中也起不到控制作用^[13]。路面三维有限元分析时控制设计指标也无明确规定,尤其是强度控制指标—应力分析中仍然存在弯拉正应力 σ_x , σ_y , σ_z 和最大拉应力 σ_1 、剪应力与最大剪应力的取舍问题。下面给予简要分析。路面结构在三维空间中任意一点应力状态表征如图15所示,式(1)和(2)分别为其应力状态矩阵及主应力和最大剪应力向量。

抗滑、耐磨SMA沥青混凝土上面层	厚度: 4 cm 弹性模量: 1 385 MPa
黏油层	
高模量、高承载、抗车辙 乳化沥青水泥混凝土联结层	厚度: 8 cm 弹性模量: 2 800 MPa
防裂、抗疲劳 沥青碎石过渡基层	厚度: 8 cm 弹性模量: 720 MPa
稀浆封层	
水泥稳定碎石基层	厚度: 2×18 cm 弹性模量: 1 550 MPa
水泥稳定碎石底基层	厚度: 18 cm 弹性模量: 1 480 MPa
土基	

图 13 宜昌长寿命复合式路面结构

Fig. 13 Yichang long-life composite pavement structure

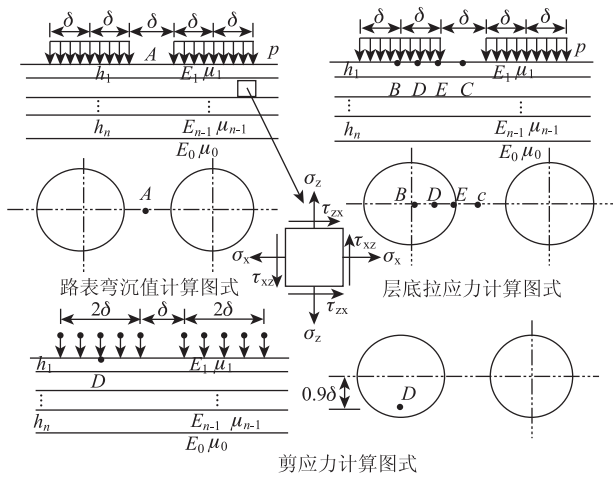


图 14 我国沥青路面设计指标计算图示

Fig. 14 Schematic diagram of calculating China asphalt pavement design index

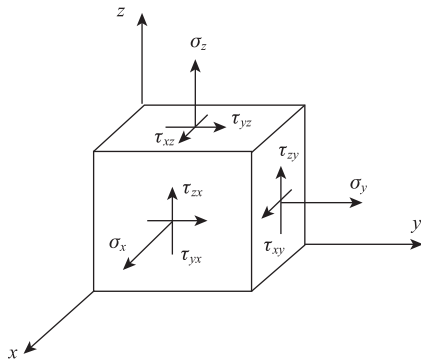


图 15 路面内一点的空间应力状态

Fig. 15 Space stress state of a point in pavement

$$\text{应力状态矩阵} \sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{其对应主应力和最大剪应力如下: } \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{\max} \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

现以表 4 所示的水泥乳化沥青混凝土路面模型组合为例, 分析三维有限元模型时路面结构应力响应分量。

表 4 水泥乳化沥青混凝土路面模型组合及计算参数

Tab. 4 CEAC pavement model combinations and calculation parameters

结构层	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比
SMA 面层	4	1 385	0.28
CEAC 联结层	8	2 800	0.27
沥青碎石过渡基层	8	720	0.30
水泥稳定碎石下基层	36	1 550	0.15
水泥稳定碎石底基层	18	1 480	0.15
土基	600	50	0.35

从图 16 可知, 三向正应力 σ_x , σ_y , σ_z 的拉应力区极值大小排序具有不确定性, 底基层和下基层为 $\sigma_x > \sigma_z > \sigma_y$, 面层、联结层和过渡基层为 $\sigma_y > \sigma_x > \sigma_z$ 。因此, 三维有限元分析时正应力 $\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z\}$ 并不适合作为强度指标。另外 σ_1 总是在三向主应力中居于最值地位, 即路面三维结构分析中的任何一层中总有 $\sigma_1 > \max \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z\}$, 因此, 各层材料以 σ_1 作为沥青路面的强度设计指标较为合适, 其强度验算准则为 $\sigma_1 \leq [\sigma]$, $[\sigma]$ 为材料的许用疲劳强度。图 17 则表明, 路面各层的最大剪应力 $\tau_{\max} \geq \max \{\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}\}$, 因此应选用最大剪应力作为抗剪强度指标, 其强度验算准则为 $\tau_{\max} \leq [\tau]$, $[\tau]$ 为材料的许用剪切疲劳强度。刚度控制指标方面则继续选用路表弯沉 L 为综合控制设计指标。

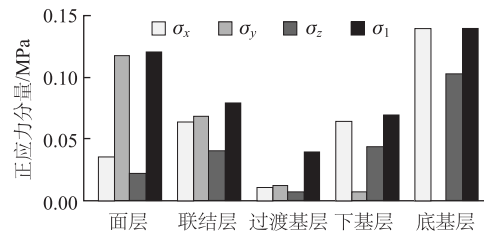


图 16 路面各结构层正应力分量对比

Fig. 16 Comparison of normal stress components in each pavement structural layer

4 结论

冷拌水泥-乳化沥青混凝土应用于高压应力区(联结层), 并设置大粒径沥青碎石与水泥稳定碎石复合式基层, 已应用于宜昌城区的试验路段, 可为

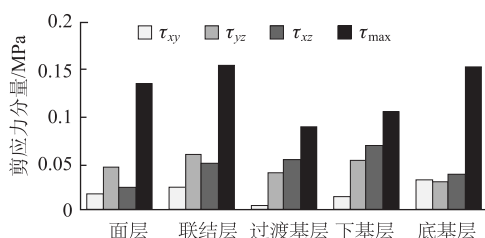


图 17 路面各结构层剪应力分量对比

Fig. 17 Comparison of shear stress components in each pavement structural layer

长寿命复合式路面的结构与材料组合提供参考。长寿命复合式路面三维结构分析设计时,以各层材料最大拉应力、最大剪应力为强度控制指标更为合适。路面材料宏观力学参数(弹性模量)与各层结构厚度对长寿命复合式路面影响较大。水泥-乳化沥青混凝土中乳化沥青与集料、水泥界面的相互作用及性能,乳化沥青黏弹性特性及其对复合材料破坏机理的影响需要在后续工作中进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] TIMM D H, NEWCOMB D E. Perpetual Pavement Design for Flexible Pavements in the US [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2006, 7 (2): 111 - 119.
- [2] 曾宇彤, 陈湘华, 王端宜. 美国永久性路面结构 [J]. 中外公路, 2003, 23 (3): 59 - 62.
ZENG Yu-tong, CHEN Xiang-hua, WANG Duan-yi. Perpetual Pavement Structures in America [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2003, 23 (3): 59 - 62.
- [3] NEWCOMB D. Perpetual Pavements: A Synthesis [R]. Lanham: Asphalt Pavement Alliance, 2002.
- [4] 马庆雷. 基于刚性基层的耐久性沥青路面结构研究 [D]. 西安: 长安大学, 2006.
MA Qing-lei. Study on Durable Asphalt Pavement Structure Based on Rigid Base [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [5] 赵志斌, 刘沐宇, 卢志芳, 等. 长江隧道刚性基层沥青路面的抗车辙性能 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2011, 44 (1): 90 - 93.
ZHAO Zhi-bin, LIU Mu-yu, LU Zhi-fang, et al. Study of Rutting Resistance of Rigid Pavement Construction in Yangtze River Tunnel [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44 (1): 90 - 93.
- [6] MAHONEY J P. Study of Long-lasting Pavements in Washington State [J]. Transportation Research Circular, 2001, 503: 88 - 95.
- [7] FERNE B W, NUNN M. The European Approach to Long Lasting Asphalt Pavements: A State-of-the-art Review by ELLPAG [C] // International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements. Auburn, Alabama: 2004.
- [8] 崔鹏, 孙立军, 胡晓. 高等级公路长寿命路面研究综述 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (10): 10 - 14.
CUI Peng, SUN Li-jun, HU Xiao. Perpetual Pavements on High-grade Highway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (10): 10 - 14.
- [9] 许志鸿, 孙洪燕, 陈兴伟, 等. 沪宁高速公路扩建工程沥青路面结构研究试验路观测与分析 [J]. 公路工程, 2007, 32 (6): 102 - 105, 173.
XU Zhi-hong, SUN Hong-yan, CHEN Xing-wei, et al. Research on Asphalt Pavement Structure of Shanghai-Nanjing Expressway Extension Survey and Analysis of Test Section [J]. Highway Engineering, 2007, 32 (6): 102 - 105, 173.
- [10] 余春林, 付军, 万尧方, 等. 半柔性水泥乳化沥青混凝土面层材料的研究与应用 [J]. 建材世界, 2011, 32 (1): 26 - 29, 33.
YU Chun-lin, FU Jun, WAN Yao-fang, et al. Research of Semi-flexible Cement Emulsified Asphalt Concrete Surface Layer Material [J]. The World of Building Materials, 2011, 32 (1): 26 - 29, 33.
- [11] 陆辉, 孙立军. 轮载作用下沥青路面三维非线性有限元分析 [J]. 土木工程学报, 2004, 37 (7): 64 - 67, 96.
LU Hui, SUN Li-jun. Analysis on Asphalt Pavement under Type Load by 3D Finite Element Method [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37 (7): 64 - 67, 96.
- [12] 崔鹏, 邵敏华, 孙立军. 长寿命沥青路面设计指标研究 [J]. 交通运输工程学报, 2008, 8 (3): 37 - 42.
CUI Peng, SHAO Min-hua, SUN Li-jun. Research on Design Indices of Perpetual Asphalt Pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8 (3): 37 - 42.
- [13] 姚祖康. 对我国沥青路面现行设计指标的评述 [J]. 公路, 2003 (2): 43 - 49.
YAO Zu-kang. A Review on Design Criteria of Asphalt Pavements [J]. Highway, 2003 (2): 43 - 49.