

横观各向同性沥青路面加铺结构力学响应研究*

蒋倩灵香, 黄旺

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 沥青混合料具有明显的横观各向同性特性, 基于各向同性弹性多层体系理论分析沥青路面结构存在局限性, 考虑沥青材料的横观各向同性能获取更准确的路面力学响应。文中通过改变沥青材料横观各向同性系数, 采用有限元方法对沥青加铺层结构力学变化进行分析。结果表明, 随着横观各向同性系数的增大, 旧沥青砼路面结构加铺层的剪应力与层底拉应力增大, 竖向压应变减小, 剪应力随深度变化先增大后减小, 旧沥青砼路面加铺沥青面层设计与施工中应考虑沥青横观各向同性的影响。

关键词: 公路; 旧沥青砼路面; 沥青加铺层; 力学响应; 横观各向同性

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)02-0084-05

目前大多数力学试验和路面结构计算模型将沥青混合料假定为均质各向同性材料, 而沥青混合料、基层和底基层材料的力学性能具有横观各向同性的性质。一般认为沥青混合料具备横观各向同性, 即垂直于压实方向的水平面上 2 个方向的材料特性相同, 而垂直方向和水平方向有显著差异。针对横观各向同性, 文献[1]研究了沥青路面材料各向同性和不同横观各向同性特性条件下沥青路面三向应变场的差异, 文献[2]运用横观各向同性弹性半空间地基模型分析了板的弯曲, 文献[3]研究了任意荷载作用下层状各向异性弹性地基直角坐标解; 文献[4]采用有限元方法对比分析了各向同性和不同横观各向同性条件下结构层间应力、应变及弯沉。基于各向同性分析路面设计可能会低估与剪应力、拉应力相关的永久变形和疲劳开裂, 故在沥青路面力学响应分析时应适当考虑混合料横观各向同性。该文选取中国典型的半刚性基层沥青路面结构, 以规范推荐的沥青混合料模量取值为依据建立三维有限元模型, 通过改变横观各向同性系数 α , 分析路面结构不同控制指标的变化, 为旧沥青砼路面沥青加铺结构设计提供理论参考。

1 沥青路面结构方程

假定横观各向同性体是理想的弹性结构, 根据胡克定律可得出其应变—应力线性函数。横观各向

同性和正交各向异性是复合材料中常见的 2 种类型。正交各向异性存在 2 个垂直面, 有 9 个计算参数, 其弹性本构方程为:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{1}{E_y} \mu_{xy} \sigma_y - \frac{1}{E_z} \mu_{xz} \sigma_z \\ \epsilon_y = -\frac{1}{E_x} \mu_{xy} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y - \frac{1}{E_z} \mu_{yz} \sigma_z \\ \epsilon_z = -\frac{1}{E_x} \mu_{xz} \sigma_x - \frac{1}{E_y} \mu_{yz} \sigma_y + \frac{1}{E_z} \sigma_z \\ \gamma_{yz} = \frac{1}{G_{yz}} \tau_{yz}, \gamma_{zx} = \frac{1}{G_{zx}} \tau_{zx}, \gamma_{xy} = \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy} \end{cases} \quad (1)$$

其矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\mu_{xy}}{E_y} & -\frac{\mu_{xz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\mu_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{xz}}{E_x} & -\frac{\mu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

横观各向同性的某一平面性质一致, 假定性质一致的平面是 X—Y。以 a 、 b 分别表示横观各向同

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478053); 交通运输部道路结构与材料交通行业重点实验室(长沙)开放基金重点资助项目(KFJ120201)

性中的横向和竖向,则有 $E_z = E_b, E_x = E_y = E_a, G_{xy} = G_a, G_{xz} = G_{yz} = G_b, \mu_{xz} = \mu_{yz} = \mu_{ab}, \mu_{zx} = \mu_{zy} = \mu_{ba}$, 其中 $G_a = E_a / 2(1 + \mu_a)$ (G_a 为水平剪切模量, G_b 为竖向剪切模量)。故横观各向同性材料的弹性常数减少为水平向弹性模量 E_a 、 μ_b 和水平法向的 E_b 、 G_b 、 μ_a 5 个参数,其矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_a} & -\frac{\mu_a}{E_a} & -\frac{\mu_{ab}}{E_b} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_a}{E_a} & \frac{1}{E_a} & -\frac{\mu_{ab}}{E_b} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{ba}}{E_a} & -\frac{\mu_{ba}}{E_a} & \frac{1}{E_b} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

(3)

2 沥青路面加铺结构有限元模型

中国路面设计规范以双轮组单轴载 100 kN 作为标准轴载,以 BZZ—100 表示。荷载接触面形状为矩形时,竖向剪应力、面层剪应力及上面层层底拉应力的响应比圆形接触面时更敏感,故采用双轮荷载下矩形接触面,通过标准轴载 BZZ—100 换算。矩形边长为长边 26.70 cm、短边 13.35 cm,接地内侧边缘之间间距为 10.65 cm(见图 1)。

路面结构采用 10 cm 沥青加铺层+12 cm 旧沥青砼层+32 cm 基层及半无限体土基。在进行数值计算时,为节约计算时间,提高计算精度,路面结构模型尺寸采用 4 m×4 m×4.54 m(见图 2)。

根据相关研究,各向异性体的垂直弹性模量比

水平弹性模量大。将横观各向同性系数 α (水平模量与垂直模量的比值)作为调整标准,分别设置沥青混合料弹性模量的横观各向同性系数为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1, $\alpha = 1$ 表示沥青混合料材料各向同性。路面材料参数见表 1、表 2。

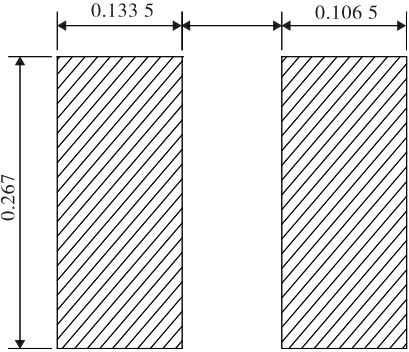


图 1 荷载接触面形状(单位:m)

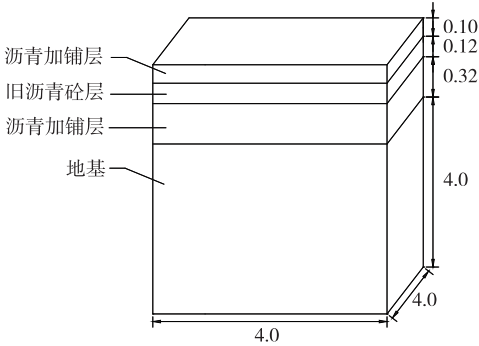


图 2 路面结构模型示意图(单位:m)

表 1 各向同性路面材料参数

层位	层厚/m	E_b /MPa	泊松比 μ	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
沥青加铺层	0.10	9 000	0.25	2 400
旧沥青砼层	0.12	8 500	0.25	2 400
基层	0.32	10 000	0.25	2 300
土基	∞	100	0.40	1 800

表 2 横观各向同性路面材料参数

层位	E_b /MPa	E_a /MPa	泊松比 μ	G_b /MPa	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
沥青加铺层	9 000	αE_b	0.25	3 600	2 400
旧沥青砼层	8 500	αE_b	0.25	3 400	2 400
基层	10 000	10 000	0.25	8 000	2 300
土基	100	100	0.40	40	1 800

将垂直于行车方向的 2 个端面、沿行车方向的 2 个端面及底部设为固定约束,对车轮荷载作用区域进行局部加密以提高计算精度,对其他区域网格朝车轮荷载作用区域作加密渐变处理(见图 3)。

3 静载下沥青路面力学分析

3.1 剪应力

沥青加铺层剪应力随横观各向同性系数 α 的变

化见图4。

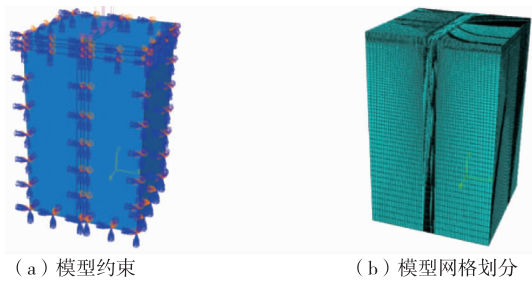


图3 结构模型约束和模型网格划分

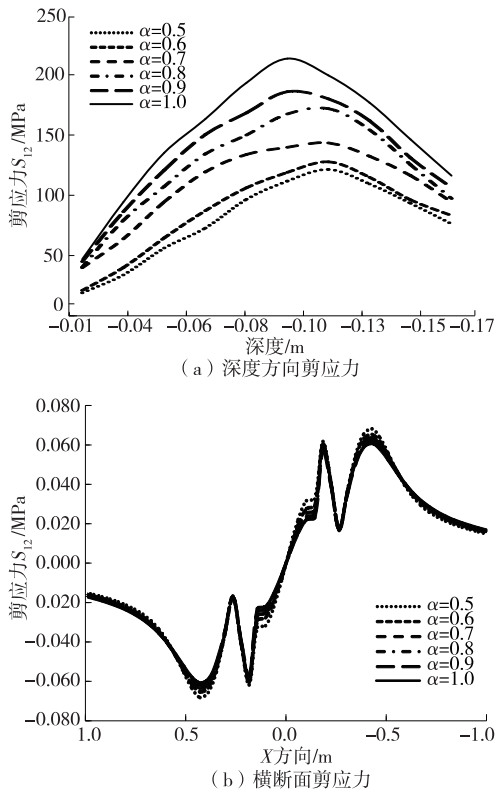


图4 不同横观各向同性系数 α 下沥青加铺层剪应力的变化

由图4可知:1)不同横观各向同性系数 α 下,沥青加铺层剪应力随着深度的变化并不是持续增加,存在各自的峰值,但 α 取不同值时剪应力峰值都不在沥青加铺层中间位置(沥青加铺层厚度为0.10 m),而是出现在其附近。 $\alpha=1.0$ 时,剪应力在深度0.09 m处出现峰值; $\alpha=0.8$ 时,剪应力在深度0.108 m附近出现峰值; $\alpha=0.5$ 和0.6时,剪应力在深度0.112 m附近出现峰值。随 α 增长,沥青加铺层中越快出现剪应力峰值点。以中心为分界点,沥青路面表面荷载位置向中心位置剪应力增长较快,中心位置往下受力慢慢趋于稳定,剪应力缓慢减小。2)横断面剪应力曲线相对紧密,说明横观各向同性系数 α 对横断面剪应力的影响较小。剪应力曲线关

于原点反向对称, x 在(0.1,0.4)和(-0.4,-0.1)时曲线关于荷载中心反向对称。

取深度0.08 m附近最大剪应力进行横观各向同性的横向对比,结果见图5。由图5可知:随横观各向同性系数 α 的增长,沥青加铺层受到的剪应力减小,沥青加铺层的剪应力水平随沥青砼材料水平模量的增加而有所降低。

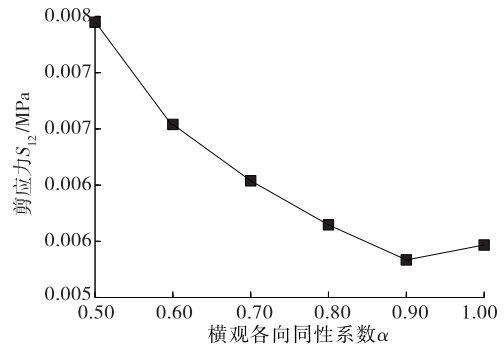


图5 沥青加铺层剪应力最大值随横观各向同性系数 α 的变化

3.2 沥青加铺层层底拉应力

沥青加铺层层底拉应力随横观各向同性系数 α 的变化见图6、图7。

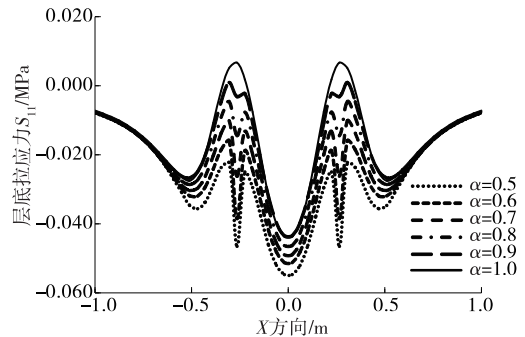


图6 不同横观各向同性系数 α 下沥青加铺层层底拉应力随横断面的变化

由图6可知:不同横观各向同性系数 α 下,随横断面的变化,双轮荷载作用下沥青加铺层层底拉应力在荷载作用位置呈现2个峰值,应力曲线在双轮荷载位置出现明显下凹。 $\alpha=0.5$ 时,应力曲线变化突出,荷载中心出现与路幅中心类似的负向峰值; α 逐渐接近于1.0时,应力曲线的变化变缓; $\alpha=1.0$ 即各向同性时,应力曲线变化圆滑,荷载作用位置不存在突变。

由图7可知:不同横观各向同性系数 α 从0.5增长到1.0,层底拉应力减小39.5%。而以各向同性特性进行加铺层力学分析,沥青加铺层底部最大拉

应力偏小。

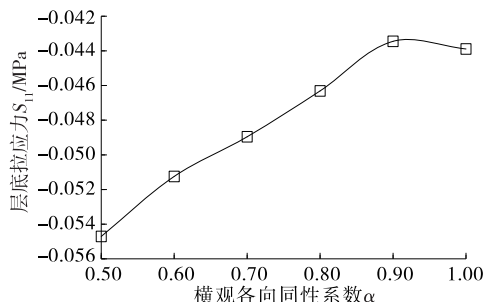


图7 沥青加铺层层底拉应力随横观各向同性系数 α 的变化

3.3 土基顶部竖向压应变

土基顶部竖向压应变随横观各向同性系数 α 的变化见图8、图9。

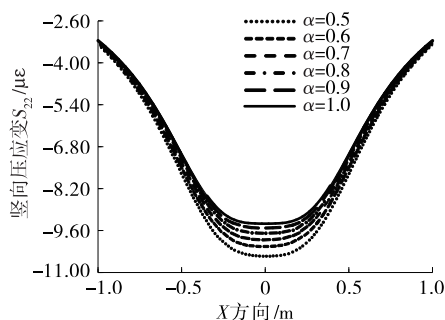


图8 不同横观各向同性系数 α 下土基顶部竖向压应变随横断面的变化

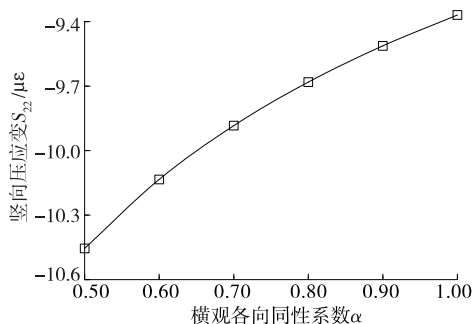


图9 土基顶部竖向压应变随横观各向同性系数 α 的变化

由图8可知:不同横观各向同性系数 α 下,沥青加铺结构土基竖向压应变关于路幅中心位置对称,呈U状,横断面-0.5、0.5 m位置向外延伸,土基竖向压应变逐渐减小,即压应变自中心位置向两边减小;不同 α 下,土基顶部竖向压应变的变化趋势一致;竖向压应变随 α 的增大而减小。

由图9可知:随横观各向同性系数 α 的增大,土基竖向压应变减小。 $\alpha=0.8$ 时, $S_{22}=-9.68\mu\epsilon$; $\alpha=0.9$ 时, $S_{22}=-9.55\mu\epsilon$; $\alpha=1.0$ 时, $S_{22}=-$

$9.4\mu\epsilon$; $\alpha=0.5\sim 0.6$ 时,竖向压应变迅速减小; $\alpha=0.6\sim 1.0$ 时,竖向压应变变化减缓。而以各向同性特性进行加铺层力学分析,所得土基顶部竖向压应变偏小,不符合结构设计安全性要求。

4 结论

横观各向同性系数对沥青路面加铺结构的剪应力、加铺层层底拉应力和竖向压应变存在影响,前述路面结构条件下,竖向剪应力峰值随横观各向同性系数的增大而增大,并且随着深度从0.02 m增加到0.17 m,竖向剪应力先增大后减小;改建路面加铺层层底拉应力和土基竖向压应变随横观各向同性系数的增大而减小。旧沥青砼路面加铺沥青面层设计与施工中应适当考虑沥青横观各向同性的影响。

参考文献:

- [1] 董泽蛟,刘美丽,郑好,等.考虑横观各向同性特性的沥青路面动力学分析[J].中国公路学报,2012,25(5):18-23.
- [2] 王有凯,龚耀清.任意荷载作用下层状横观各向同性弹性地基的直角坐标解[J].工程力学,2006,23(5):9-13+19.
- [3] 王春玲,周亮,李华.横观各向同性弹性半空间地基上正交异性矩形中厚板弯曲解析解[J].计算力学学报,2012,29(3):412-416.
- [4] 郭楠,陈正汉,杨校辉,等.各向同性土与横观各向同性土的力学特性和持水特性[J].西南交通大学学报,2019,54(6):1235-1243.
- [5] 张妍.沥青混凝土路面病害与加铺层的力学分析[D].西安:长安大学,2005.
- [6] 张艳红.基于旧路三维裂缝的京津塘高速公路加铺层力学分析[D].西安:长安大学,2010.
- [7] 张名成.沥青路面改建结构设计与复合式冷再生技术研究[D].西安:长安大学,2010.
- [8] 杜荣耀.高速公路沥青路面维修方案选择和加铺层设计研究[D].西安:长安大学,2011.
- [9] 游凌云.考虑横观各向同性特性的旧路面沥青加铺层力学行为研究[D].长沙:湖南大学,2016.
- [10] 陈团结,钱振东,黄卫.交通荷载作用下旧沥青路面裂缝对加铺层的影响[J].公路交通科技,2006,23(4):23-26.
- [11] 栗振锋,王秉刚,郭向云.基于横观各向同性倒装式沥青路面结构分析[J].重庆建筑大学学报,2007,29(1):65-69.
- [12] 杨涛,郑健龙,关宏信,等.考虑材料正交各向异性时的沥青路面结构力学性能[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(12):4282-4290.
- [13] 殷立文,丁静声.荷载接触面形状对沥青路面力学响

- 应的影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2010,29(4):544—547.
- [14] 胡迎斌.考虑横观各向同性的粘弹性沥青路面力学响应分析[D].长沙:湖南大学,2017.
- [15] 鲁巍巍,郑健龙.横观各向同性黏弹性沥青路面的动力响应[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(4):964—970.
- [16] 颜可珍,满建宏,石挺魏,等.考虑层间接触状态的横观各向同性结构动力响应解析解[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(11):97—105.
- [17] 肖鑫,张肖宁.排水沥青混合料各向异性空隙结构对渗水特性的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(1):91—96.
- [18] 李来建.沥青路面改建设计的实践与探讨[J].中外公路,2004,24(6):23—25.
- [19] 王德印.沥青路面加铺沥青层在交通荷载作用下的寿命分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2005.
- [20] 倪亚敏.旧路改建沥青加铺层结构分析研究[D].西安:长安大学,2007.
- [21] 陶峰,张鹏,张虎.沥青路面现场冷再生技术在路网改建工程中的应用[J].交通世界(建养·机械),2007(5):74—76.
- [22] 周文.海南沥青路面现场热再生沥青混合料性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 武淑玲.交通荷载对路基作用的研究现状[J].交通标准化,2011(18):81—84.
- [26] 林骋.交通荷载作用下沥青路面数值模拟分析[D].杭州:浙江大学,2015.
- [27] 黄万坦,魏为成.半刚性基层沥青路面动力响应分析[J].黑龙江交通科技,2012(1):53—54.
- [28] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [29] UZAN J. Resilient characterization of pavement materials[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1992, 16(6): 453—459.
- [30] WANG L, HOYOS L R, WANG J, et al. Anisotropic properties of asphalt concrete: Characterization and implications for pavement design and analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005, 17(5): 535—543.

收稿日期:2021—03—16

(上接第51页)

- [31] 刘中正,梁岩,韩涛,等.3D打印技术在临床医学中的应用[J].解放军医药杂志,2016,28(11):6—9.
- [32] 贾丹阳,李琦君,孙忠逸,等.三维打印模型技术在制药领域中的研究进展[J].中国医药工业杂志,2018,49(2):135—141.
- [33] 张杨阳,胡宇凡,万欣宇.3D打印技术在航空制造领域的发展探究[J].电脑编程技巧与维护,2015(9):89—90+94.
- [34] 金大元.3D打印技术及其在军事领域的应用[J].新技术新工艺,2015(4):9—13.
- [35] 季安康,王海飙.基于BIM的3D打印技术在建筑行业的应用研究[J].科技管理研究,2016,36(24):184—188.
- [36] 王子明,刘玮.3D打印技术及其在建筑领域的应用[J].混凝土世界,2015(1):50—57.
- [37] 华敏杰.3D打印技术在岩石力学试样制备方面的应用探讨[D].南京:南京大学,2015.
- [38] FERESHTEJAD S, SONG J J. Fundamental study on applicability of powder-based 3D printer for physical modeling in rock mechanics[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(6): 2065—2074.
- [39] VOGLER D, WALSH S D C, DOMBROVSKI E, et al. A comparison of tensile failure in 3D-printed and natural sandstone[J]. Engineering Geology, 2017, 226: 221—235.
- [40] ZHOU T, ZHU J. An experimental investigation of tensile fracturing behavior of natural and artificial rocks in static and dynamic brazilian disc tests[J]. Procedia Engineering, 2017, 191: 992—998.
- [41] JU Y, WANG L, XIE H, et al. Visualization of the three-dimensional structure and stress field of aggregated concrete materials through 3D printing and frozen-stress techniques[J]. Construction and Building Materials, 2017, 143: 121—137.
- [42] HUANG W, ZHANG X, YIN Y, et al. A numerical implementation of the three-dimensional viscoelastic model for asphalt mastic[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(5): 543—551.
- [43] 张肖宁,孙杨勇.粗集料的表面微观纹理的激光测量方法及分形性质研究[J].公路交通科技,2011,32(1):56—60.
- [44] 陈搏.基于胎/路有效接触特性的沥青路面抗滑性能评价方法研究[D].广州:华南理工大学,2018.

收稿日期:2021—05—27