

文章编号:1671-8879(2015)03-0034-06

设置 OLSM-25 防裂层的沥青路面 细观结构数值分析

郭红兵^{1,2}, 陈拴发³

(1. 陕西交通职业技术学院 公路工程系, 陕西 西安 710018; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;
3. 长安大学 材料学院, 陕西 西安 710061)

摘要:为了解决刚性基层沥青路面存在的沥青面层反射裂缝问题,提出了采用开级配大粒径沥青碎石混合料(OLSM)作为裂缝缓解层的方法,以国内外 OLSM 参考级配为基础,结合试验段修筑情况,采用离散元方法,运用二维颗粒流程序,建立设置 OLSM-25 裂缝缓解层的沥青路面离散元模型,对其细观结构与抗裂性能进行离散元数值分析,从细观角度阐释了 OLSM-25 裂缝缓解层的抗裂机理。研究表明:在车辆荷载偏载作用下,当裂缝缓解层厚度相同时,OLSM-25 裂缝缓解层底部 A 点颗粒的竖向接触力、竖向运动速度及竖向位移量均小于普通 AC-25 裂缝缓解层的对应值,OLSM-25 裂缝缓解层的抗裂效果优于普通 AC-25 裂缝缓解层;在实际工程应用中,综合考虑应力缓解效果及变形能力两大因素,选择材料组成相对偏粗、空隙率适中的 2[#] 级配 OLSM-25 作为裂缝缓解层较为合适。

关键词:道路工程;开级配大粒径沥青碎石;二维离散元;细观结构;数值分析;抗裂机理;裂缝缓解层

中图分类号:U414.4 **文献标志码:**A

Numerical analysis on mesostructure open-graded large stone asphalt mixes (OLSM-25) anti-cracking layer in asphalt pavement

GUO Hong-bing^{1,2}, CHEN Shuan-fa³

(1. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, Shaanxi, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
3. School of Material Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to solve the problem of the reflective cracking in the rigid base asphalt pavement, with a method of using open-graded large stone asphalt mixes (OLSM) as the cracking relief layer, the discrete element model of asphalt pavement with OLSM-25 cracking relief layer was established by employing the discrete element method and the two-dimensional particle flow code according to the reference gradation of OLSM both at home and abroad and the condition of construction in the test roads. After numerical analyzing on mesostructure and anti-cracking

收稿日期:2014-05-10

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2008 318 812 10);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD 2010JC011);
陕西省教育厅专项科研计划项目(14JK1067)

作者简介:郭红兵(1976-),男,陕西扶风人,陕西交通职业技术学院副教授,长安大学工学博士,E-mail:329639783@qq.com。

performance of asphalt pavement with OLSM-25 cracking relief layer, the anti-crack mechanism of OLSM-25 cracking relief layer was demonstrated from the microscopic view. The results show that under the action of the asymmetric traffic load, the vertical contact force, the speed of the vertical movement and the vertical displacement of A point particle at the bottom of OLSM-25 cracking relief layer are less than the corresponding values of the ordinary AC-25 cracking relief layer with the same thickness, and the anti-cracking effect of OLSM-25 cracking relief layer is better than that of ordinary AC-25 cracking relief layer. In the practical engineering applications, it is more appropriate to take No. 2 gradation OLSM-25 composed of more coarse aggregates and medium porosity as the cracking relief layer by considering two factors-stress relief effect and the deformation ability. 3 tabs, 6 figs, 14 refs.

Key words: road engineering; OLSM; two-dimensional discrete element; mesostructure; numerical analysis; anti-cracking mechanism; cracking relief layer

0 引 言

为了解决半刚性基层沥青路面、旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构和刚性基层沥青路面共同存在的沥青面层反射裂缝问题,以及半刚性基层沥青路面的水损害问题,近年来中国部分学者提出开级配大粒径沥青碎石混合料(OLSM)^[1-4],并将其作为裂缝缓解层设置在沥青面层的下面层,铺筑在带有裂缝(或接缝)的半刚性基层、旧水泥混凝土路面板或贫混凝土刚性基层之上。目前中国针对 OLSM 缓解层沥青路面的研究仍处于室内试验路铺筑及宏观结构的力学分析阶段,很少从细观角度对其抗裂机理进行系统研究。为探索 OLSM 缓解层沥青路面结构的抗裂机理与理论依据,本文在已有研究成果基础上^[5-8],结合子靖(子洲—靖边)高速公路 OLSM-25 缓解层沥青路面试验段修筑情况,采用二维离散元法,对设置 OLSM-25 裂缝缓解层的沥青路面进行细观结构与抗裂机理分析,并从细观角度阐释 OLSM-25 裂缝缓解层的抗裂机理,为 OLSM 缓解层沥青路面抗裂设计提供理论依据。

1 试验段 OLSM-25 缓解层沥青路面结构

子靖高速公路是国家青岛—银川国道主干线(GZ35)陕西境内的重要路段。为了研究 OLSM 的抗反射裂缝能力和耐久性能,本文依托子靖高速公路实体工程开展 OLSM 缓解层沥青路面试验路研究。子靖高速公路 K124+266.8~K124+894.8 试验段 OLSM-25 缓解层沥青路面结构如图 1 所示。

4 cm SBS AC-13C沥青混凝土
5 cm SBS AC-20C沥青混凝土
9 cm OLSM-25裂缝缓解层
18 cm 贫混凝土基层
16 cm 水泥稳定碎石
20 cm 综合稳定土
土基

图 1 试验段 OLSM-25 缓解层沥青路面结构
Fig.1 Asphalt pavement structure with OLSM-25 cracking relief layer in test roads

2 离散元计算模型与参数

2.1 计算模型

结合子靖高速公路 OLSM-25 缓解层沥青路面试验段修筑情况,OLSM-25 缓解层沥青路面的二维离散元模型采用 5 层结构,自上而下依次为 4 cm AC-13 上面层(空隙率 3%)、5 cm AC-20 中面层(空隙率 6%)、9 cm OLSM-25 下面层(裂缝缓解层,空隙率 15%)、18 cm 贫混凝土基层、16 cm 水泥稳定碎石底基层,其中贫混凝土基层存在 1 cm 裂缝。经过对不同尺寸二维离散元计算模型的收敛性分析,最终确定 OLSM-25 缓解层沥青路面二维计算模型及二维离散元模型^[9],如下页图 2 所示。

2.2 计算参数

为了模拟沥青裹覆并浸润集料的本构行为,在 AC-13 上面层、AC-20 中面层、OLSM-25 下面层(裂缝缓解层)中采用平行粘接模型,其中 AC-13、AC-20 采用规范级配中值。对于 OLSM-25 裂缝缓解层,本文以国内外 OLSM-25 参考级配为基础,依据贝雷法采用 0.22 NMPS(取 4.75 mm)作为粗、细集料的分界点,应用变 I 法原理设计 OLSM-25 级配,

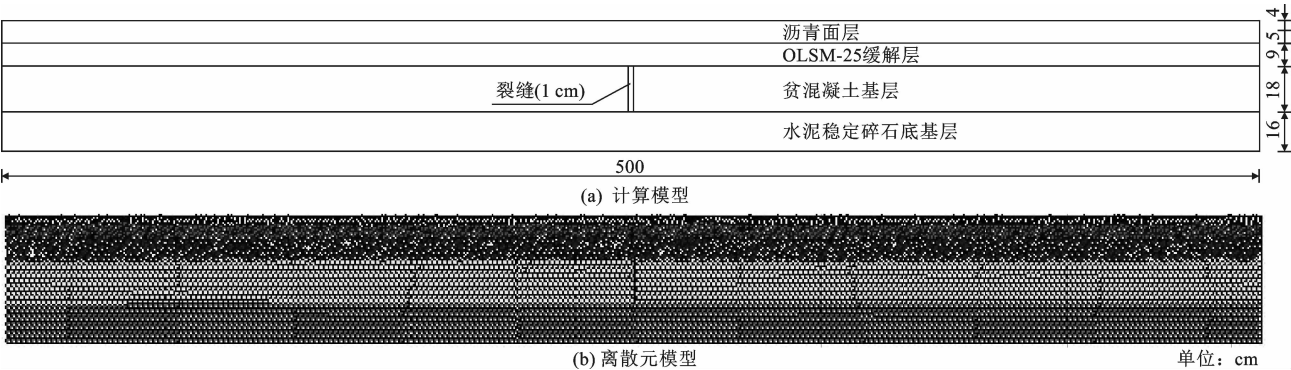


图 2 OLSM-25 缓解层沥青路面二维计算模型

Fig. 2 2D calculation model of asphalt pavement with OLSM-25 cracking relief layer

结合空隙率(15%~20%)要求,提出 OLSM-25 推 下限为 1#~3# 级配(表 1);沥青混合料的马歇尔试
荐级配范围,以 OLSM-25 推荐级配的上限、中值、 验技术性能见表 2。

表 1 1#~3# OLSM-25 级配组成													
级配类型	通过各筛孔(mm)的质量分数/%												
	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1# 级配	100	95	71	61	52	39	22	17	10	6	4	2	1
2# 级配	100	85	62	52	44	32	17	13	7	4	3	2	1
3# 级配	100	75	52	43	35	25	12	8	4	2	1	1	0

表 2 沥青混合料马歇尔试验技术性能								
Tab. 2 Technical performance of Marshall test of asphalt mixtures								
沥青混合料类型		最佳油石比/%	空隙率/%	稳定度/kN	流值/0.1 mm	沥青饱和度/%	毛体积密度/(g·cm ⁻³)	残留稳定度/%
OLSM-25	1# 级配	3.30	14.9	15.56	33.73	65.84	2.191	89.1
	2# 级配	3.05	16.8	11.48	35.75	65.45	2.127	81.6
	3# 级配	2.90	19.5	10.32	31.85	65.16	2.115	77.5
AC-25		4.04	4.0	12.54	29.40	66.42	2.429	91.0

注:试验用原材料采用克拉玛依 90# 道路石油沥青,山西柳林石灰岩制作的粗、细集料及矿粉。

在试验段 OLSM 缓解层沥青路面结构中,采用 1# 级配 OLSM-25 作为裂缝缓解层。运用二维颗粒流程序,采用激增颗粒数量排斥法生成相应级配的 AC-13、AC-20 及 1# 级配 OLSM-25 沥青混合料;在贫混凝土基层、水泥稳定碎石底基层中采用接触粘接模型。为了反映贫混凝土刚性基层材料、水泥稳定碎石半刚性底基层材料的板体性和致密性,采用等粒径颗粒材料规则分布的方式建立刚性基层、半刚性底基层的二维离散元模型。设置 OLSM-25 裂缝缓解层的沥青路面各结构层材料的计算参数^[10-12],见表 3。

表 3 中 AC-13 上面层、AC-20 中面层、OLSM-25 裂缝缓解层采用平行粘接模型,而贫混凝土基层、水稳碎石底基层则采用接触粘接模型。对于沥青面层中平行粘接模型的材料细观参数取值,是利用静压成型的沥青砂浆试件,采用 UTM-25 万能试

表 3 材料的计算参数				
Tab. 3 Calculation parameters of materials				
参 数		AC-13 上面层	AC-20 中面层	OLSM-25 裂缝缓解层
面层 平行 粘接 模型	颗粒半径 r/mm	4.75~6.6	6.6~9.5	9.5~15.75
	颗粒密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 400	2 500	2 600
	法向刚度 $(\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1})$	10^7	10^8	10^9
	切向刚度 $(\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1})$	10^7	10^8	10^9
	法向强度/Pa	10^{10}	10^9	10^8
	切向强度/Pa	10^{10}	10^9	10^8
参 数		贫混凝土基层		水稳碎石底基层
基层	颗粒半径 r/mm	10		10
接触	颗粒密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 300		1 800
粘接	法向强度/Pa	10^{10}		10^{10}
模型	切向强度/Pa	10^{10}		10^{10}

验机对沥青混合料进行 SPT 试验,测试其不同油石比和不同温度条件下的动态模量和相位角,基于时

温等效原理确定了沥青砂浆和混合料的动态模量主曲线,并根据试验测得的动态模量和相位角,以及由沥青混合料的粘弹性本构模型推导所得的宏细观参数对应关系,得到沥青混合料的平行粘接模型细观参数取值。对于贫混凝土基层、水稳碎石底基层接触粘接模型的材料细观参数取值,参照文献[11]。

在 OLSM-25 缓解层沥青路面的二维离散元分析中,车辆荷载作用采用标准轴载 BZZ-100,轮胎内压 0.7 MPa。经过对中荷载(车轮荷载作用在基层裂缝正上方中部)、偏荷载(车轮荷载作用在基层裂缝单侧)2 种荷载作用位置对比分析可知^[13],偏荷载作用为最不利荷载位置。在二维颗粒流程序(PFC^{2D})加载模型中^[14],以 25 个连在一起的小球颗粒(半径 $r=4.26\text{ mm}$)表示标准轴载 BZZ-100 作用,在各小球颗粒上施加 4 kN 竖向力,则 25 个连在一起的小球颗粒总宽度为 21.3 cm,荷载 $P=100\text{ kN}$ 。对于设置 OLSM-25 裂缝缓解层的沥青路面结构,其车辆荷载偏载作用见图 3。

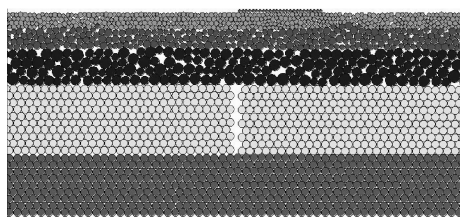


图 3 车辆荷载偏载作用
Fig. 3 Eccentric load effect of vehicle

3 设置 OLSM-25 裂缝缓解层的沥青路面细观结构分析

3.1 设置不同类型裂缝缓解层的沥青路面细观结构对比分析

为比较不同类型裂缝缓解层在 BZZ-100 偏载作用下的力学响应,此处采用相同厚度的普通 AC-25 裂缝缓解层代替 OLSM-25 裂缝缓解层,分别对设置 2 种不同类型裂缝缓解层的沥青路面细观结构进行对比分析。计算模型采用试验段 OLSM-25 缓解层沥青路面基本结构(图 2),主要计算参数见表 2。主要考察普通 AC-25 裂缝缓解层与 OLSM-25 裂缝缓解层底部 A 点颗粒的竖向接触力、竖向运动速度及竖向位移(图 4)。

在 BZZ-100 偏载作用下,设置 2 种不同类型裂缝缓解层的沥青路面离散元数值模拟结果及其对比分析,见图 5。由图 5 可知,在 BZZ-100 偏载作用下,当采用厚度 9 cm 的普通 AC-25 裂缝缓解层时,

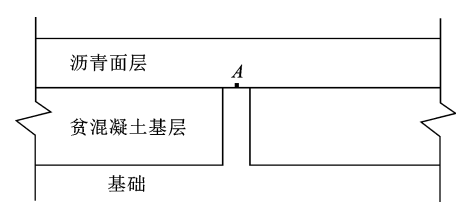


图 4 OLSM-25 缓解层沥青路面监测点位置
Fig. 4 Position of monitoring point of asphalt pavement with OLSM-25 cracking relief layer

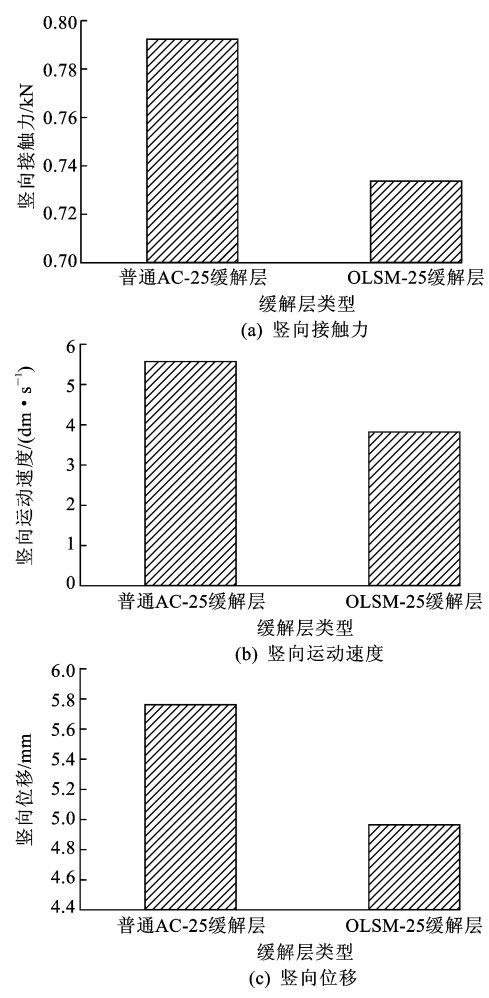


图 5 OLSM-25 缓解层沥青路面 A 点颗粒力学响应对比分析
Fig. 5 Comparative analysis of mechanical response of A point particle in asphalt pavement with OLSM-25 cracking relief layer

其底部 A 点颗粒的竖向接触力、竖向运动速度及竖向位移依次为 0.792 kN、5.545 dm/s 和 5.756 mm;当采用厚度 9 cm 的 OLSM-25 裂缝缓解层时,其底部 A 点颗粒的竖向接触力、竖向运动速度及竖向位移依次为 0.733 kN、3.772 dm/s 和 4.970 mm;后者 A 点颗粒的竖向接触力、竖向运动速度及竖向位移比前者分别减小了 7.4%、32.0%和 13.7%,说明采用 OLSM-25 作为裂缝缓解层,可有效缓解基层裂缝尖端位置的荷载应力集中现象;同时由于其大

粒径矿料所形成的良好骨架作用以及大空隙结构,大粒径矿料颗粒之间产生相对移动的可能性较小,在车辆荷载作用下不会发生突然的瞬时大变形,并且竖向变形产生的过程较慢。在车辆荷载偏载作用下,OLSM-25 裂缝缓解层的抗裂效果优于普通 AC-25 裂缝缓解层。

设置不同类型裂缝缓解层的沥青路面细观结构对比分析结果表明:与普通 AC-25 裂缝缓解层相比,OLSM-25 混合料中大粒径矿料多、空隙率大,在车辆荷载作用下,这种大粒径多空隙结构能够消减基层裂缝尖端应力应变的传递能力,有效缓解基层裂缝尖端位置的荷载应力集中现象;在裂缝缓解层厚度相同条件下,一方面 OLSM-25 的粗集料粒径比普通 AC-25 的粗集料粒径大,大粒径矿料颗粒之间产生相对移动的可能性较小,在车辆荷载作用下不会发生突然的瞬时大变形;另一方面,OLSM-25 的粗、细集料颗粒总数比普通 AC-25 的粗、细集料颗粒总数少,从而使细集料颗粒之间可能产生错动的薄弱接触面数量减少,并且大粒径矿料之间接触力的传递路径及方向明确,在车辆荷载作用下,OLSM-25 混合料中粗、细集料颗粒产生竖向变形的过程较慢。与普通 AC-25 裂缝缓解层相比,OLSM-25 裂缝缓解层具有良好的应力缓解效果及竖向变形减缓能力。

3.2 设置不同级配 OLSM-25 裂缝缓解层的沥青路面细观结构对比分析

为比较不同级配 OLSM-25 裂缝缓解层在 BZZ-100 偏载作用下的力学响应,以 OLSM-25 推荐级配为基础,分别对设置 1[#] 级配(上限)、2[#] 级配(中值)、3[#] 级配(下限)OLSM-25 裂缝缓解层的沥青路面细观结构进行对比分析。在 BZZ-100 偏载作用下,设置 1[#]~3[#] 级配 OLSM-25 裂缝缓解层的沥青路面离散元数值模拟结果及对比分析见图 6。由图 6 可知,在 BZZ-100 偏载作用下,随着 1[#]~3[#] 级配 OLSM-25 空隙率的增大,其底部 A 点颗粒的竖向接触力呈总体降低趋势,A 点颗粒的竖向运动速度、竖向位移呈总体增大趋势。对于 1[#]~3[#] 级配 OLSM-25 裂缝缓解层,其空隙率依次为 14.9%、16.8%、19.5%(增幅 31%),其底部 A 点颗粒的竖向接触力依次为 0.733、0.201、0.133 kN(降幅 82%);A 点颗粒的竖向运动速度依次为 3.772、4.788、6.604 dm/s(增幅 75%);A 点颗粒的竖向位移依次为 4.970、7.667、8.964 mm(增幅 80%)。由此可见,从缓解应力效果方面考虑,应优先选择材料

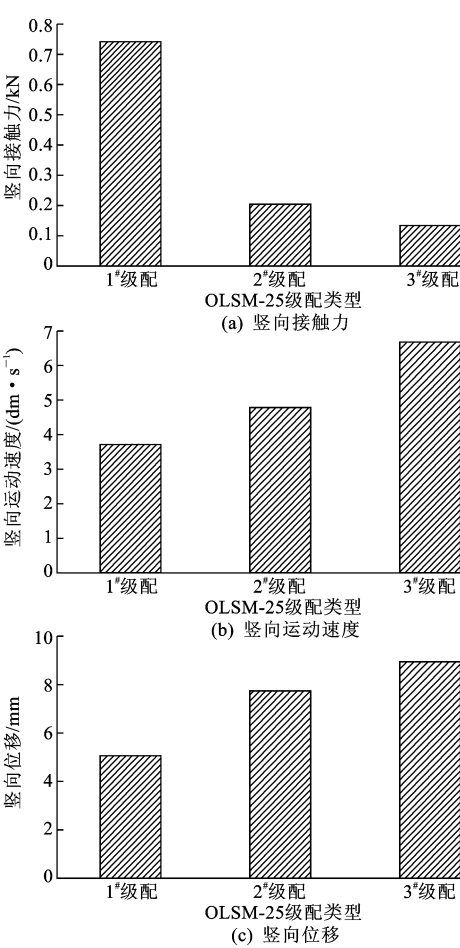


图 6 1[#]~3[#] 级配 OLSM-25 缓解层沥青路面

A 点颗粒力学响应对比分析

Fig. 6 Comparative analysis of mechanical response of A point particle in asphalt pavement with No. 1 to No. 3 gradations OLSM-25 cracking relief layer

组成偏粗的 3[#] 级配 OLSM-25 作为裂缝缓解层;从变形能力方面考虑,空隙率相对较小的 1[#] 级配 OLSM-25 裂缝缓解层底部 A 点颗粒的竖向运动速度及竖向位移最小。

设置不同级配 OLSM-25 裂缝缓解层的沥青路面细观结构对比分析结果。

(1)不同级配 OLSM-25 裂缝缓解层的应力缓解效果。在 1[#]~3[#] 级配 OLSM-25 材料组成中,粗集料含量逐渐增多,细集料含量相对减少,空隙率逐渐增大,其自身混合料颗粒之间的接触力分布趋于离散,OLSM-25 裂缝缓解层底部 A 点颗粒的竖向接触力逐渐减小。这是因为 OLSM-25 混合料中大粒径矿料多、空隙率大,由大粒径矿料相互嵌挤形成良好的骨架空隙结构,在车辆荷载作用下,能够有效改变或阻断基层裂缝自下而上的扩展路径,延缓基层裂缝向上扩展的速度,对其自身的车辆荷载应力起到了有效的缓解及消散作用。并且 OLSM-25 裂

缝缓解层的空隙率越大,其大空隙结构的衰变行为对其自身颗粒的竖向接触力缓解及消散效果越明显。从缓解应力效果方面考虑,应优先选择材料组成偏粗、空隙率较大的 3[#] 级配 OLSM-25 作为裂缝缓解层;但并非 OLSM-25 材料组成越粗、空隙率越大,其路用性能越好;当 OLSM-25 材料组成偏粗、空隙率过大时,在 OLSM-25 裂缝缓解层施工过程中容易出现混合料离析问题。

(2)不同级配 OLSM-25 裂缝缓解层的变形能力。随着 1[#]~3[#] 级配 OLSM-25 大粒径矿料含量增加及其空隙率增大,其大粒径和多空隙结构具有较大的塑性变形能力,并且 OLSM-25 的收缩系数较小,在车辆荷载作用下,其大粒径多空隙结构发生衰变,这种大粒径和多空隙结构的衰变行为有效减缓了其自身颗粒的竖向运动速度及竖向位移。OLSM-25 材料组成中粗集料含量越多、空隙率越大,其自身颗粒的竖向运动速度及竖向位移越大;从变形能力方面考虑,空隙率相对较小的 1[#] 级配 OLSM-25 裂缝缓解层底部 A 点颗粒的竖向运动速度及竖向位移最小。在不同级配 OLSM-25 裂缝缓解层的实际工程应用中,应综合考虑应力缓解效果及变形能力两大因素,选择材料组成相对偏粗、空隙率适中的 2[#] 级配 OLSM-25 作为裂缝缓解层,既达到缓解应力的目的,又满足其路用性能要求,同时具有一定程度的变形能力。

4 结 语

(1)设置不同类型裂缝缓解层的沥青路面细观结构对比分析结果表明,在车辆荷载偏载作用下,当裂缝缓解层厚度相同时,OLSM-25 裂缝缓解层底部 A 点颗粒的竖向接触力、竖向运动速度及竖向位移均小于普通 AC-25 裂缝缓解层的对应值。采用 OLSM-25 裂缝缓解层可有效缓解基层裂缝尖端位置的荷载应力集中现象,不会发生突然的瞬时大变形,OLSM-25 裂缝缓解层的抗裂效果优于普通 AC-25 裂缝缓解层。

(2)设置 1[#]~3[#] 级配 OLSM-25 裂缝缓解层的沥青路面细观结构对比结果表明,在车辆荷载偏载作用下,随着 1[#]~3[#] 级配 OLSM-25 空隙率的增大,其底部 A 点颗粒的竖向接触力呈总体降低趋势,竖向运动速度、竖向位移呈总体增大趋势。在实际工程中,综合考虑应力缓解效果及变形能力两大因素,选择材料组成相对偏粗、空隙率适中的 2[#] 级配 OLSM-25 作为裂缝缓解层较为合适。

(3)在不同类型裂缝缓解层细观结构对比分析、以及不同级配 OLSM-25 裂缝缓解层细观结构对比分析的基础上,综合考虑裂缝缓解层的应力缓解效果及变形能力两大因素,从细观角度阐释了 OLSM-25 裂缝缓解层的抗裂机理。

(4)在试验段 OLSM-25 裂缝缓解层沥青路面修筑时,主要考虑 OLSM-25 施工中的离析问题,仅采用 1[#] 级配 OLSM-25 作为裂缝缓解层;在后续研究中,将采用 2[#]、3[#] 级配 OLSM-25 作为裂缝缓解层,结合试验段 OLSM-25 裂缝缓解层沥青路面长期性能监测数据进行抗裂性能对比分析,为 OLSM-25 裂缝缓解层沥青路面进一步推广应用奠定基础。

参考文献:

References:

- [1] 付其林,陈拴发,陈华鑫,等. 开级配大粒径沥青碎石混合料的高温稳定性[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(2):20-24.
FU Qi-lin, CHEN Shuan-fa, CHEN Hua-xin, et al. High temperature stability of open-graded large stone asphalt mixes[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 20-24. (in Chinese)
- [2] 付其林,陈拴发,陈华鑫,等. 开级配大粒径沥青混合料路用性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(7):77-80.
FU Qi-lin, CHEN Shuan-fa, CHEN Hua-xin, et al. Research on pavement performance of open-graded large stone asphalt mixes[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(7): 77-80. (in Chinese)
- [3] Chummuneerat S, Jitsangiam P, Nikraz H. Performances of hydrated cement treated crushed rock base for Western Australian roads[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(6): 432-438.
- [4] 付其林,陈拴发,陈华鑫. 级配对开级配大粒径沥青碎石路用性能的影响[J]. 郑州大学学报:工学版,2010,31(3):82-86.
FU Qi-lin, CHEN Shuan-fa, CHEN Hua-xin. Influence of aggregate gradation on pavement performance of open-graded large stone asphalt mixes[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2010, 31(3): 82-86. (in Chinese)