

付建军,陈成,梁均,等.沿江堤路新老路基裂缝扩展微观机理[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(3):44-50.  
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.007

FU J J, CHEN C, LIANG J, et al. On Microscopic Mechanism of Crack Propagation of New and Old Roadbed Along River Road [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology ( Natural Science Edition ), 2022, 37(3):44-50. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.007

## 沿江堤路新老路基裂缝扩展微观机理

付建军<sup>1,3\*</sup>,陈成<sup>2</sup>,梁均<sup>4</sup>,李超群<sup>4</sup>

(1.湖南农业大学 水利与土木工程学院,湖南 长沙 410014;2.武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070;  
3.中国电建集团 中南勘测设计研究院有限公司,湖南 长沙 410014;4.长沙市公共工程建设中心,湖南 长沙 410014)

**摘要:**针对堤防路基改扩建工程中新老路基不均匀沉降和拼接处沥青层断裂等实际工程难题,通过建立新老路基结合处离散元模型,进行拓宽路基变形不协调和路面沥青层裂缝模拟,从微观角度分析了交通荷载、不同加载部位下新老路基拼接处不均匀沉降,以及各因素作用下路面沥青纵向裂缝的形成机理,并探讨了沥青层的变形破坏模式及平行黏结的断裂程度.结果表明:该离散元模型可以很好地模拟实际新老路基拼接处不均匀沉降;在交通荷载和沉降速度相同的情况下,加载部位位于新老路基交界处时,沥青路面纵向裂缝发展得更明显;在路基沉降速度和荷载作用部位相同的情况下,荷载越大,路面竖向沉降越大,沥青路面纵向裂缝发展得更明显.该离散元数值模拟研究成果为非刚性基层沥青路面的微观力学行为研究提供了一种辅助手段,弥补了室内试验可视化的不足,丰富了路基变形协调和沥青路面裂缝研究.

**关键词:**堤防道路;沥青裂缝;离散元;拓宽路基;不均匀沉降

**中图分类号:**U416.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)03-0044-07

## On Microscopic Mechanism of Crack Propagation of New and Old Roadbed Along River Road

FU Jianjun<sup>1,3</sup>, CHEN Cheng<sup>2</sup>, LIANG Jun<sup>4</sup>, LI Chaoqun<sup>4</sup>

(1. College of Water Resources & Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410014, China;  
2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
3. Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China;  
4. Changsha Municipal Public Works Bureau, Changsha 410014, China)

**Abstract:** In order to investigate the uneven settlement and cracks in the asphalt layer during the reconstruction and expansion of expressway subgrade, discrete element method (DEM) has been used to build a three-dimension model of widening roadbed. Based on the widening roadbed mode, the model of road sinking with differential settlement, the mechanism of crack formation in the asphalt layer, and the parameters that affect the extent of the cracking are studied. The simulation results show that the crack development is more significant when the traffic loads are applied above the joint of new and old subgrades. Moreover, with the increase of the axle load, the vertical settlement of pavement surface is increased, meanwhile, the extent of crack in the asphalt layer is increased, too. The present numerical research could investigate the micro mechanical behavior of the

收稿日期:2020-03-27

基金项目:湖南省科技厅重点研发项目(2022SK2099);湖南省水利厅科技项目(XSKJ2021000-23 XSKJ2021000-02);国家自然科学基金资助项目(51708438)

\*通信作者,E-mail: 664865581@qq.com

non-rigid asphalt layer as an assistant. It makes up for the lack of visualization of experimental tests, and also enriches the study of the uneven settlement of subgrade and the crack in asphalt layer.

**Keywords:** embankment road; asphalt cracks; discrete element method; widening roadbed; uneven settlement

堤防道路拓宽工程的病害,主要表现形式按路基拓宽的损坏机理可归结为2类:一是拓宽路基稳定性不足导致的损坏;二是新老路基不协调变形引起的损坏<sup>[1]</sup>,其中新老路基间的不均匀沉降是导致病害的主要原因.由于旧路基经过长时间的恒载和动载的作用,沉降固结基本完成,而新路基未来得及充分沉降,新旧路基结合处易产生不均匀沉降,进而导致路面产生纵向裂缝,水泥混凝土面板在荷载作用下产生断裂,沥青混凝土路面产生反射裂缝.这些工程病害不仅造成了巨大的工程经济损失,还对行车安全带来了严重的影响<sup>[2-3]</sup>.

为了解决此问题,胡幼常等<sup>[4]</sup>分析了新路基在自重作用下的沉降和应力分布规律,提出换填一定厚度的软基,并在路堤底部铺一层土工格栅的处理方法来防止新老路基间的不均匀沉降;章定文等<sup>[5]</sup>的有限元模拟表明,拓宽路基的填筑将会引起不同位置的过大附加差异沉降,导致路面横坡比改变值超过路面结构的容许值,从而引起路面结构性破坏.以上研究多为静荷载下新老路基的不均匀沉降,阳恩慧等<sup>[6]</sup>的数值模拟表明,路基不均匀沉降导致上部路面结构在车辆荷载作用下出现破坏,严重影响路面服务性能;蒋鑫等<sup>[7]</sup>研究路面结构层不同的组合情况,找到交通荷载作用时路面结构最不利的受力位置,并在此基础上着重研究新老路基不均匀沉降变形情况及应力分布的规律.在交通荷载对公路拓宽工程路面结构的影响方面,冯德成等<sup>[8]</sup>等通过扩展有限元法研究路面在发生不均匀土基沉降时纵向裂缝的扩展,认为重载荷会引起纵向裂缝的扩展,随着土基沉降量的增加,裂缝扩展深度增加,但其并没有解释不均匀沉降与纵向裂缝的关系;邓卫东等<sup>[9]</sup>通过对半填半挖路基的弹塑性动力有限元分析表明,车载作用产生的差异沉降使挖方和填方交界处的沥青路面底部和表面出现局部的剪切破坏区,最大塑性变形发生在交界处的沥青路面底部;傅珍等<sup>[10]</sup>认为在沥青路面后期开裂中,最大拉应力和纵向开裂的位置均出现在新旧路基衔接处附近,且在靠近旧路基一侧;黄永强等<sup>[11]</sup>认为路基两侧沉降、一侧沉降和中心沉降这3种不均匀沉降形式对沥青混凝土路面结构破坏的影响规律相同,在未出现裂缝和塑性区前,路面结构各层的应力与不均匀沉降量呈线性变化规律,但未考虑交通荷载和路基拓宽所引起的不协调变形的同时影响下的响应<sup>[12]</sup>.综上所述,现有的计算和分析模型对于路面结构和路堤填土作了过多的简化,不能较好地模拟实际工况的细节.再者,由于路堤的宏观破坏都是细观结构累积发展的结果,有限元研究难以从细观层面解释其力学与变形机理.离散元法更适合模拟沥青混凝土裂缝的产生与扩展<sup>[13-17]</sup>.

有鉴于此,采用离散元(DEM)软件PFC3D建立三维新老路基结合处模型,从细观角度分析新老路基结合处的相互作用,揭示新老路基的不均匀沉降与纵向裂缝的因果关系,为路基拓宽的设计与施工提供参考.

## 1 离散元数值模型建立

### 1.1 PFC3D 离散元建模

翁效林等<sup>[18-19]</sup>在进行沉降平台模拟地基不协调变形差异沉降实验后,验证了差异沉降最大的地方发生在新老地基交界处,因此,着重以新老路基相交处的沥青路面结构为模拟对象,分析模型简图如图1所示.考虑到在实际工程中采用台阶开挖新老路基结合部的工后变形不协调,故在模型中采用多个独立墙单元实现工后路基表面的不均匀沉降.当差异沉降达到一定程度时,路面的结构层可能受损,部分附加应力传导至上部路面沥青层导致沥青路面开裂,产生纵向裂缝.由于离散元数值模拟的运算量及能力的局限性,模拟全尺寸的拓宽路基工程是不现实的.因此,重点研究在不均匀沉降作用下的沥青层和下方一定深度的路面结构层的模拟,建立考虑沥青结构层断裂的DEM模型,从而揭示交通荷载作用下新老路基的不均匀沉降与纵向裂缝产生及发展的关系.因此,对图1所示的新老地基拼接处进行了简化:首先,采用5个

独立上下自由移动的墙单元实现工后路基表面的不均匀沉降,对新老地基不均匀沉降进行模拟;然后,通过路基表面不均匀沉降数据反馈于上部沥青层和垫层的模拟,建立图1中沥青结构层的断裂模型来揭示新老路基的不均匀沉降与纵向裂缝产生及发展的演变规律.

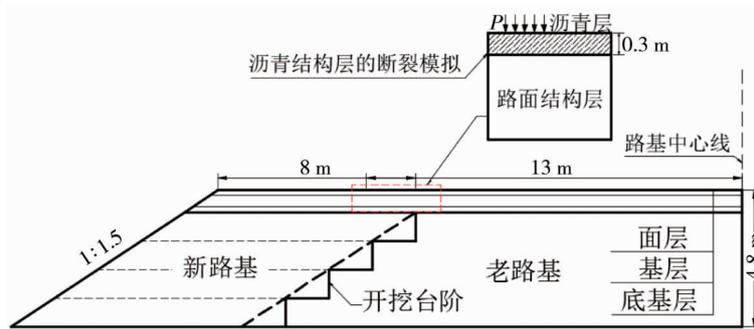


图1 新老路基拼接处

基层采用动态生成法生成一定孔隙率的颗粒集合体,集料颗粒的微观参数的选取与文献[20]保持一致,其中密度为  $2\ 500\text{ kg/m}^3$ , 颗粒法向刚度为  $5\times 10^8\text{ N/m}$ , 切向刚度为  $2\times 10^8\text{ N/m}$ , 颗粒摩擦系数设为 0.5;在基层上部建立沥青结构层,形成沥青层断裂模拟模型如图2所示,沥青结构层高度为 0.3 m.沥青层为骨架密实型沥青玛蹄脂 SMA-13, 颗粒采用规则排列,并采用平行黏结模型黏结以模拟沥青层的胶结料,在 PFC3D 中,平行黏结接触模型可以实现颗粒间力和力矩的传递,适用于模拟具有延展性的材料;文献[21]以 SBS 改性沥青 SMA13 混合料为例,通过对比三轴剪切试验和三维离散元模拟结果,得出可行的平行黏结模型细观模拟参数(见表1).在沥青层结构模拟中分别采用2种排列方式(如图3所示),对比后发现四边形排列下颗粒间的接触力传递存在竖向和水平方向,应力传递方式具有局限性,不如颗粒六边形“梅花状”排列时应力传递的各向同性.因此,沥青层颗粒呈六边形排列可以更好地模拟沥青层开裂的真实状态.通过赋予底部5个路基墙不同的沉降量,来模拟新老路基拼接处的变形不协调.另外,为了防止颗粒材料向外逃逸,在箱底设置辅助墙体,如图2所示.

表1 沥青层的 PFC3D 细观模拟参数

结构	集料颗粒 粒径/m	集料颗粒 密度/( $\text{kg/m}^3$ )	法向刚度 MN/m	切向刚度 MN/m	法向黏结强度 n_bond/MN	切向黏结强度 s_bond/MN	摩擦系数 fric
沥青层	0.004	2 600	200	200	10	10	0.3

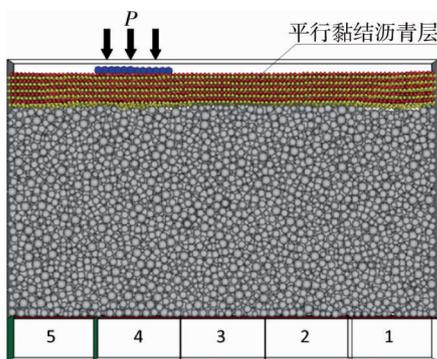


图2 沥青层断裂模拟模型

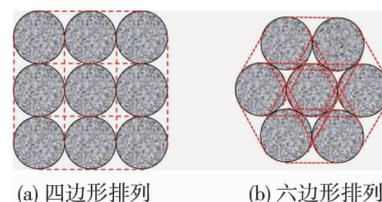


图3 沥青层颗粒排列方式及平行黏结模型(虚线)

### 1.2 伺服控制实现循环荷载

为了模拟真实情况下的车轮荷载,根据车轮模型的宽度在路基顶部沿 X 方向均布 1 排荷载球组成的颗粒簇 clump,如图2所示的最上面一层小球,且在颗粒簇上面生成墙单元以施加交通荷载.依靠 PFC3D 软件中的墙单元伺服控制程序,通过改变墙单元的上下运动速度精确控制加载大小,并与目标荷载值保持

一致.加载的车轮荷载取轴重为 2 t,速度为 100 km/h 普通行车交通荷载,采用如图 4 所示简谐荷载来实现循环加载,以模拟真实荷载作用沥青混凝土面层的变形情况.加载的部位分别选取新老路基交界处、老路基和新路基这 3 个位置所对应的沥青层上.加载中记录颗粒的位移、运动速度矢量和应力链分布传递情况,以及沥青层的变形和平行黏结断裂的发展状态.

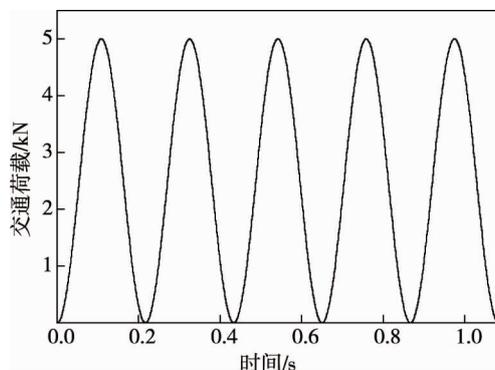


图4 行车荷载模拟

## 2 结果与讨论

### 2.1 新老路基表面不均匀沉降

旧路拓宽改造工程中新填筑的路基,由于地基的压缩固结而产生不均匀沉降,在荷载作用下必将引起路基表层差异沉降的存在,继而引起路面结构层的部分脱空或者开裂.新老路基表面的不协调变形值与文献[22]采用离心机试验所得到的新老路基拼接处变形不协调曲线接近,以体现这一沉降趋势.通过比较路基墙的沉降量结果,可以看出新老路基拼接处表面沉降由老路基一侧到新路基一侧不断增加,由 0.66 cm 增加至 1.21 cm.新老路基顶面的不协调变形由新老路基的工后沉降组成,最大差异沉降为 0.55 cm,不协调变形在新老路基顶面呈现下凹式勺形的曲线形态.在路面结构层模型的路基表面分为 1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>的路基墙,在颗粒流软件 PFC3D 中通过赋予 1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>墙单元不同的下沉速度模拟新老地基表层的工后不均匀沉降.图 5 显示出模拟地基差异沉降条件下,沥青层路面结构模型所对应的路基表面沉降变化曲线.拓宽路基沉降趋势进一步向老路基坡脚的拼接处发展,这必然导致新老路基结合处出现拉应力区,从而诱发沥青路面出现纵向裂缝.通过以上墙位移控制模拟路基表面不均匀沉降曲线,可将其作为位移边界条件施加到拓宽路面结构层底面,进一步分析新老路基不均匀沉降下沥青层纵向裂缝的发展特性.

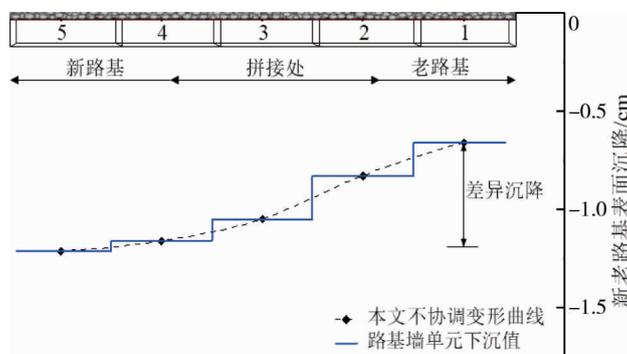


图5 新老路基拼接处表面沉降

### 2.2 不同的加载部位对裂缝的影响

图 6 为不同加载部位下的路基及沥青层形态变化图.观察可知:当加载部位位于新路堤侧,沥青层的右

段与路基产生脱空;当加载部位于中间时,沥青层的两端与路基产生脱空;当加载部位于右边时,沥青层的左端与路基产生脱空.因为沥青层具有就很好的延展性,脱空后仍能保持协调性变形,路的表面将形成凹凸不平面,不利于高速行驶安全,另外路面下形成的脱空区可能积水,车辆通过时会引起脱空区的凹陷,或产生新的裂缝,进而对公路寿命安全产生影响.

图7~图9显示在3种加载位置下,从初始到破坏3个加载阶段沥青层路基的颗粒应力链分布变化图、位移及速度矢量变化图.可以看出随着荷载次数的增加,应力集中于加载区下方,且颗粒位移逐渐增大,并呈现向周围区域扩散的趋势.应力链集中在加载的部位附近,表明沥青在这些区域发生剪切破坏,平行黏结断裂形成裂缝,符合典型交通荷载下生成一对交叉裂缝.沥青底层的破坏是荷载超过了沥青抗剪强度导致的剪切破坏.另外,在第3阶段,加载处附近的区域由于沥青层的凹陷产生翘起,继而在沥青层下方形成脱空区域,并具有扩大的趋势.可以预测当过往车辆通过脱空区上方时,会产生新的凹陷和裂缝.

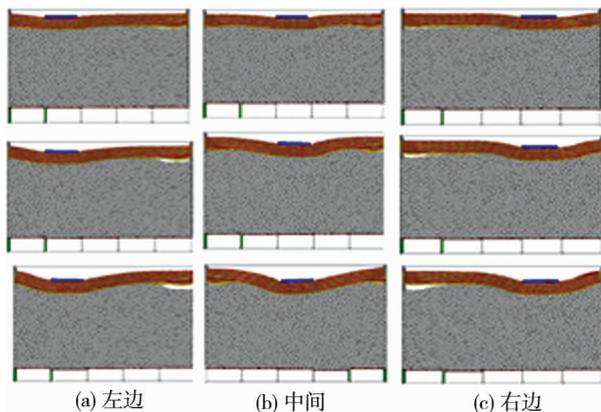


图6 不同加载部位的沥青层形态变化(从上至下依次为加载初、中、末期,下同)

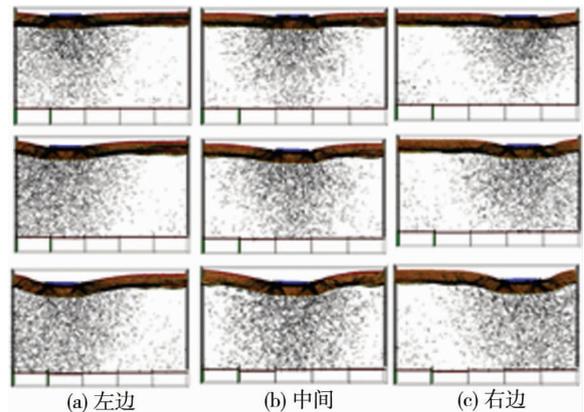


图7 不同加载部位的应力链分布变化

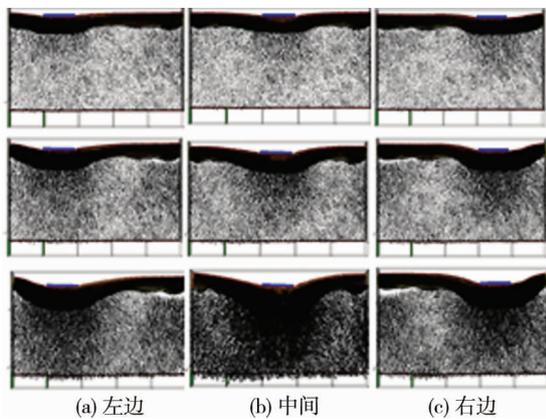


图8 不同加载部位的位移矢量变化

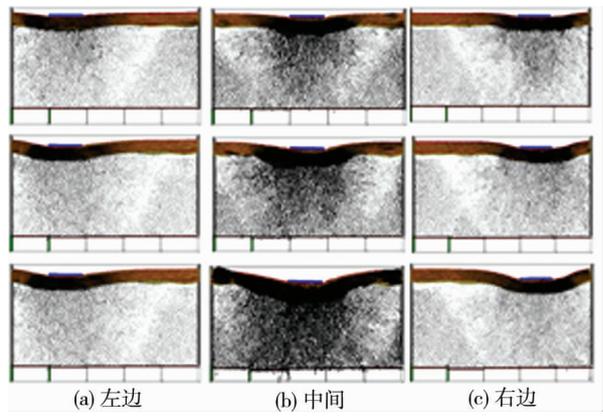


图9 不同加载部位的速度矢量变化

如图10所示,不同加载位置的沥青路面沉降量不同,加载靠近新路基时的沉降(7.7 mm)略大于加载靠近老路基时的沉降(6.11 mm),并且荷载作用在中间时位移最大(10.72 mm).因为右边沥青层下部老路基的固结程度较高,相对更稳定,同时由于新路基土的孔隙更大,固结程度较低,所以加载在靠近右边老路基时比靠近左边新路基时的沉降小.新路基土不能提供足够的围压阻止老路基土向新路基土扩散,致使在新老路基拼接处上方结合处沥青层的沉降大于新路基一侧,加剧了纵向裂缝的产生.这一现象也可以通过图7应力链分布图及图9颗粒速度矢量图体现.当左边加载时,剪切面的走向与新老路基的拼接斜面趋近,这会导致新路基沉降进一步加大;当中间加载时,形成了漏斗形状的2个剪切面,加载下方区域的颗粒平均位移和速度明显增大,表明新路基沉降进一步恶化.

图11为加载第2阶段后观测的沥青破坏模式.其中加载区下方为破坏模式一,沥青层发生剪切破坏,继而出现发展成扩散型的贯穿裂缝.平行黏结的断裂代表该处的剪应力超过了沥青层的剪切强度.另外一

种为破坏模式二,由于凹陷沥青层发生翘起,沥青层的下部分产生弯曲变形,属于挤压破坏。



图10 不同加载位置沥青路面沉降值比较

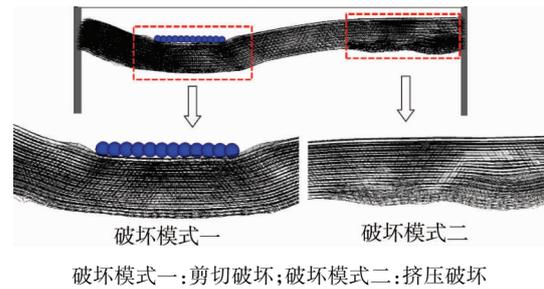


图11 左边加载时沥青层的变形破坏及平行黏结断裂

### 2.3 荷载大小对裂缝的影响

通过在路基中间模拟5 t载重车荷载,得到的应力链分布和位移矢量图如图12所示.通过与图7、图8中2 t普通行车轴重荷载下得到的结果做比较,可以发现当外加荷载越大,其最终路面沉降和最大应力都增大,且随着交通荷载的增大,路面的竖向沉降整体增大,加载位置下的颗粒应力集中且下沉明显,另外沥青层两端翘起脱空更明显,沥青层破坏得更严重.结果表明:当重载车辆经过新老路基交接处时会加速路基的劣化,与文献[15]中的结果趋势一致,即在交通荷载作用下,新旧路基结合处的竖向差异沉降发展迅速,加剧了纵向裂缝的形成。

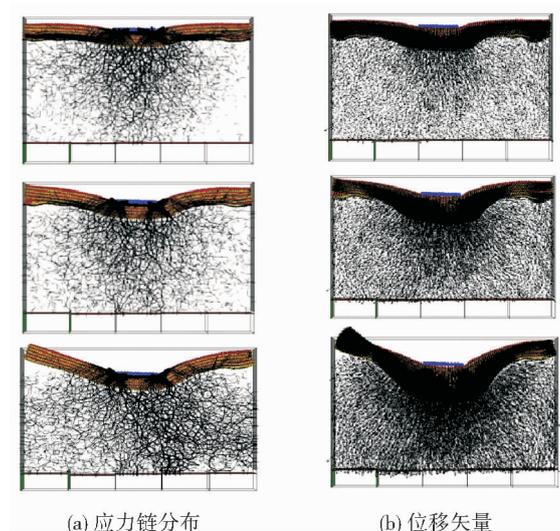


图12 5 t重荷载作用下沥青层的应力链分布和位移矢量

## 3 结论

- 1) 差异沉降主要发生在新老路基拼接处,在交通荷载作用下,新老路基拼接处出现变形不协调,且随着交通荷载轴重的增大,不均匀沉降增大。
- 2) 在交通荷载和沉降速度相同的情况下,加载部位于新老路基交界处时,相较于单独作用于新路基和单独作用于老路基,沥青路面纵向裂缝发展得更明显。
- 3) 当路面交通荷载越大,拼接处沥青路面出现局部剪切破坏区,纵向裂缝发展得更明显,不均匀沉降增大。
- 4) 可视化模拟结果为研究拓宽路基变形不协调等问题提供了新的辅助手段.考虑本数值研究的局限性,后续研究将考虑进行缩尺室内拓宽路基拼接处模型试验,以验证本数值模拟的结论。

## 参考文献:

- [1] 杨涛,李磊,李国维.公路双侧拓宽差异沉降控制标准研究[J].公路交通科技,2014,31(5):15-20.
- [2] 凌建明,钱劲松,黄琴龙,等.路基拓宽工程处治技术及其效果[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(1):45-49.
- [3] Han J, Oztoprak S, Parsons R L, et al. Numerical Analysis of Foundation Columns to Support Widening of Embankments[J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(6): 435-448.
- [4] 胡幼常,赵镇君,张培,等.换填与加筋结合处理路基加宽下软土地基的效果分析[J].公路交通科技,2009,26(5):35-39.
- [5] 章定文,刘松玉.堤防扩建工程中新路填筑对老路影响的参数分析[J].公路交通科技,2006,23(7):31-34.
- [6] 阳恩慧,邱延峻,向可明.山区公路典型沥青路面结构容许横向沉降差研究[J].岩土力学,2010,31(10):3329-3336.
- [7] 蒋鑫,邱延峻.旧路拓宽全过程三维有限元分析[J].工程地质学报,2005,13(3):419-423.
- [8] 冯德成,田林,曹鹏.基于扩展有限元方法的路基不均匀沉降纵向裂缝分析[J].工程力学,2011,28(5):149-154.
- [9] 邓卫东,张兴强,陈波,等.路基不均匀沉降对沥青路面受力变形影响的有限元分析[J].中国公路学报,2004(1):16-19.
- [10] 傅珍,王选仓,陈星光,等.堤防拓宽差异沉降对路面结构的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2008(3):36-39.
- [11] 黄永强,李海波,马兴峰,等.路基不均匀沉降对沥青混凝土路面结构影响数值分析[J].公路工程,2012,37(5):34-40.
- [12] Chai J C, Miura N. Traffic Load Induced Permanent Deformation of Road on Soft Subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907-916.
- [13] Kim H, Wagoner M P, Buttlar W. Simulation of Fracture Behavior in Asphalt Concrete Using a Heterogeneous Cohesive Zone Discrete Element Model[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(8): 552-563.
- [14] Kim H, Buttlar W G. Micromechanical fracture modeling of asphalt mixture using the discrete element method[M]. Advances in pavement engineering. 2005: 1-15.
- [15] MAHMOUD E, MASAD E, NAZARIAN S. Discrete Element Analysis of the Influences of Aggregate Properties and Internal Structure on Fracture in Asphalt Mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(1): 10-20.
- [16] Kutay M E, Adhikari S, You Z. Dynamic Modulus Simulation of the Asphalt Concrete Using the X-ray Computed Tomography Images [J]. Materials and Structures, 2009, 42(5): 617-630.
- [17] 严琼,乔可帅,陈钊,等.基于连续-离散耦合的公路拓宽路基变形及换填处治宏观分析[J].公路交通科技,2017,34(10):26-33.
- [18] 翁效林,张留俊,李林涛,等.拓宽路基差异沉降控制技术模型试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(1):159-164.
- [19] Weng X L, Wang W. Influence of Differential Settlement on Pavement Structure of Widened Roads Based on Large-scale Model Test [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(1): 90-96.
- [20] 唐羽,吴国雄,余苗,等.沥青路面三点弯曲试验的离散元模拟[J].公路交通科技,2018,35(12):15-18.
- [21] 王昊鹏,焦丽亚,王潇婷,等.基于离散元方法的沥青混合料三轴剪切试验模拟研究[J].中外公路,2014,34(4):256-261.
- [22] 孟庆山,孔令伟,郭爱国,等.高速公路高填方路堤拼接离心模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007(3):580-586.