

基于离散元法的橡胶颗粒沥青混合料细观结构分析

陈渊召, 李振霞

(华北水利水电学院 土木与交通学院, 450011 郑州)

摘要: 为分析橡胶颗粒沥青混合料的破坏机理及宏观力学性能差异的内在本质, 建立离散元模型, 首先系统研究间断级配橡胶颗粒沥青混合料、连续级配橡胶颗粒沥青混合料和普通沥青混合料的接触力矢量图、力链网络图及接触力局部放大图, 分别得到其内部的强力链、弱力链和变形特点, 提出了其承载能力排序和变形能力排序; 然后深入研究橡胶颗粒沥青混合料的位移矢量图和黏结接触破坏位置局部放大图, 得到橡胶颗粒沥青混合料的破坏机理. 结果表明, 承载能力由大到小依次为: 普通沥青混合料、间断级配橡胶颗粒沥青混合料、连续级配橡胶颗粒沥青混合料; 变形能力由小到大依次为: 普通沥青混合料、间断级配橡胶颗粒沥青混合料、连续级配橡胶颗粒沥青混合料.

关键词: 道路工程; 细观结构; 橡胶颗粒沥青混合料; 离散元法; 破坏机理

中图分类号: U416.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2013)04-0116-06

Meso-structure of crumb rubber asphalt mixture based on discrete element method

CHEN Yuanzhao, LI Zhenxia

(School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, 450011 Zhengzhou, China)

Abstract: To analyze failure mechanism and internal essence of macro-mechanical properties difference for crumb rubber asphalt mixture, discrete element models are established, contact force vector diagram, force chain network chart and contact force local enlarging graphs belong to gap gradation crumb rubber asphalt mixture, continuous grading crumb rubber asphalt mixture and asphalt mixture are systematically studied firstly, their internal strength chain, weak force chain and deformation characteristics are obtained respectively, their bearing capacity sorting and deformability sorting are proposed. Then, local enlarged drawing in adhesive contact failure position and displacement vector map of crumb rubber asphalt mixture are deeply researched, failure mechanism of crumb rubber asphalt mixture is obtained. The results show that their bearing capacity from big to small in proper order is asphalt mixture, gap gradation crumb rubber asphalt mixture, continuous grading crumb rubber asphalt mixture. Their deformability from big to small in proper order is asphalt mixture, gap gradation crumb rubber asphalt mixture, continuous grading crumb rubber asphalt mixture.

Key words: road engineering; meso-structure; crumb rubber asphalt mixture; discrete element method; failure mechanism

当前, 橡胶颗粒沥青路面的早期破坏问题比

较突出, 主要原因之一是当前设计多采用唯象方法研究沥青混合料的宏观属性, 即偏于重视沥青混合料的空隙率和高温稳定性等宏观性能, 并未从细观层次上对沥青混合料的结构组成和性能进行深入研究^[1-2]. 即使采用同一料源和相同级配, 沥青混合料的性能也会表现出很大的变异, 出现

收稿日期: 2012-05-16.

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200531881213);
华北水利水电学院高层次人才科研启动费资助项目(201210).

作者简介: 陈渊召(1974—), 男, 博士, 讲师.

通信作者: 陈渊召, cyz740513@ncwu.edu.cn.

宏观指标相近、使用性能差异很大的现象,究其原因,在于忽略了其内部微观结构的复杂多样性.长安大学的张硕对橡胶颗粒沥青混合料的组成设计、成型工艺、路用性能和除冰雪效果进行了研究,并提出在混合料中掺入水泥和消石灰提高耐久性的方法^[3].王端宜等进行了沥青混合料单轴压缩试验的离散元模拟,给出了与实际试验相符的本构行为,并针对模型细观参数对沥青混合料本构行为的影响进行了研究^[4-5].国内外学者对橡胶颗粒沥青混合料的性能进行了一些分析,但很少从微观结构层面进行深入研究,要正确解释混合料不同宏观力学性能差异的内在本质,从根本上分析其破坏机理,对沥青混合料的认识必须从宏观层次转化到微观细观层次.

1 橡胶颗粒沥青混合料离散元模型

1.1 离散元模型建立方法的选择

橡胶颗粒沥青混合料是非均质复合材料,借助于蒙特卡罗随机抽样原理,可用计算机模拟产生出在统计意义上与原型结构相同的均匀分布的随机骨料结构,既可以生成用于模拟卵石骨料的圆形骨料结构,也可以生成用于模拟碎石骨料的角形骨料结构,在空间上随机确定骨料的位置、形状和尺寸,进而可建立虚拟细观结构数值模型,运用软件计算分析模型加载破坏过程中的力学特征.鉴于上述原因,本文在建立沥青混合料离散元模型时采用了基于随机抽样原理的细观建模方法,根据蒙特卡罗方法建立沥青混合料的随机模型,即在模型计算区域内根据具体级配方案和空隙率要求,随机生成不同粒径集料的坐标位置,模拟橡胶颗粒沥青混合料的内部细观构造,所有颗

粒由颗粒流离散元分析软件 PFC2D 中内置的随机生成器生成.由于本文的工作侧重橡胶颗粒沥青混合料在轮载作用下的受力、变形特点和破坏机理研究,为了减少计算模型颗粒单元总体数目和计算工作量,采用二维计算模型.

1.2 建立离散元模型

根据文献[4,6-10]的研究,考虑典型工况,行车荷载采用 BZZ-100,轴重为 100 kN,轮压为 0.7 MPa,双轮中心间距为 32 cm,轮胎接触面形状简化为 18.9 cm × 18.9 cm 的正方形.利用对称性,以双轮中心为对称面,取二维计算模型尺寸大小为长度 36 cm × 深度 4 cm,在深度方向上只考虑了取弹性路面上面层(即橡胶颗粒沥青混合料)作为本文的研究对象.分别针对间断级配和连续级配两种级配类型建立模型,具体级配见表 1,橡胶颗粒质量分数均为 3%.在 PFC2D 软件中随机生成相应的离散元模型如图 1、2 所示.

表 1 橡胶颗粒沥青混合料级配

筛孔尺寸/mm	通过率/%	
	连续级配 XJAC-13	间断级配 XJSMA-13
16.000	100.0	100.0
13.200	96.8	98.0
9.500	61.1	75.2
4.750	27.5	45.4
2.360	21.9	35.1
1.180	19.0	26.6
0.600	16.9	20.2
0.300	14.7	14.3
0.150	12.7	9.9
0.075	9.5	5.7

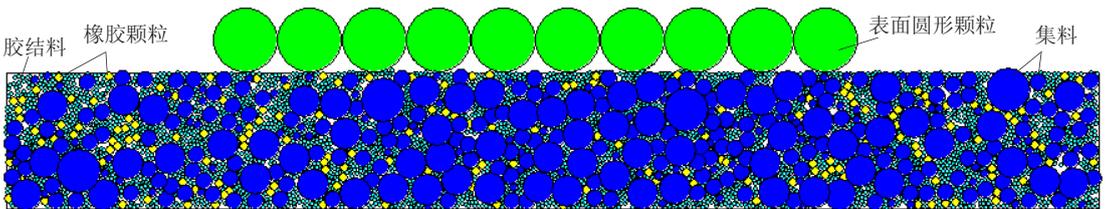


图 1 间断级配 XJSMA-13 离散元模型

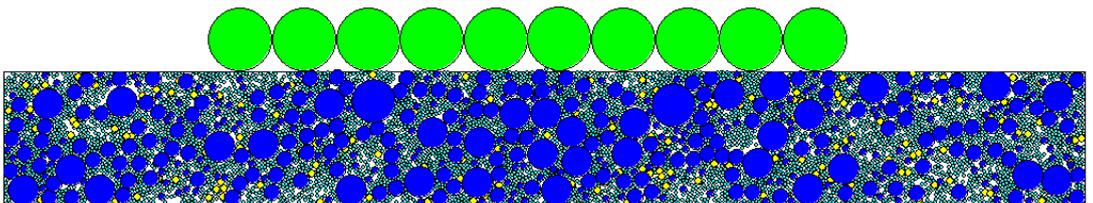


图 2 连续级配 XJAC-13 离散元模型

在图 1 和图 2 中,用黄色表示的小颗粒代表橡胶颗粒,用深蓝色表示的颗粒代表各档粗细集料,用浅蓝色小颗粒表示由沥青胶浆和更小粒径细集料形成的胶结料.两个模型对比可以看出,在图 1 中粗集料之间发生接触、挤嵌的情况比较多,表现出明显的骨架密实结构;图 2 中粗集料大多分散在细集料中,相互之间并没有形成明显的骨架嵌挤结构,离散元模型体现出明显的悬浮密实结构的特征.轮胎作用在弹性路面表面上的荷载采用位于路面表面的一组圆形颗粒来传递,颗粒施加于路面表面的压力等于轮压;橡胶颗粒沥青混合料离散元模型微观参数参考文献[1-2, 6-10]中的相关研究.

2 离散元模拟分析

2.1 受力和变形分析

2.1.1 受力分析

图 3~5 分别为整个系统达到平衡时的间断级配橡胶颗粒沥青混合料、连续级配橡胶颗粒沥青混合料和普通沥青混合料的接触力矢量图、力链网络图及接触力局部放大图.接触力线条的粗细表示接触力的大小,线条越粗表示接触力越大,黑色表示压力,红色表示拉力.图中橡胶颗粒沥青混合料中的黄色颗粒表示橡胶颗粒,普通沥青混合料中的橙色颗粒表示将橡胶颗粒还原为石料.

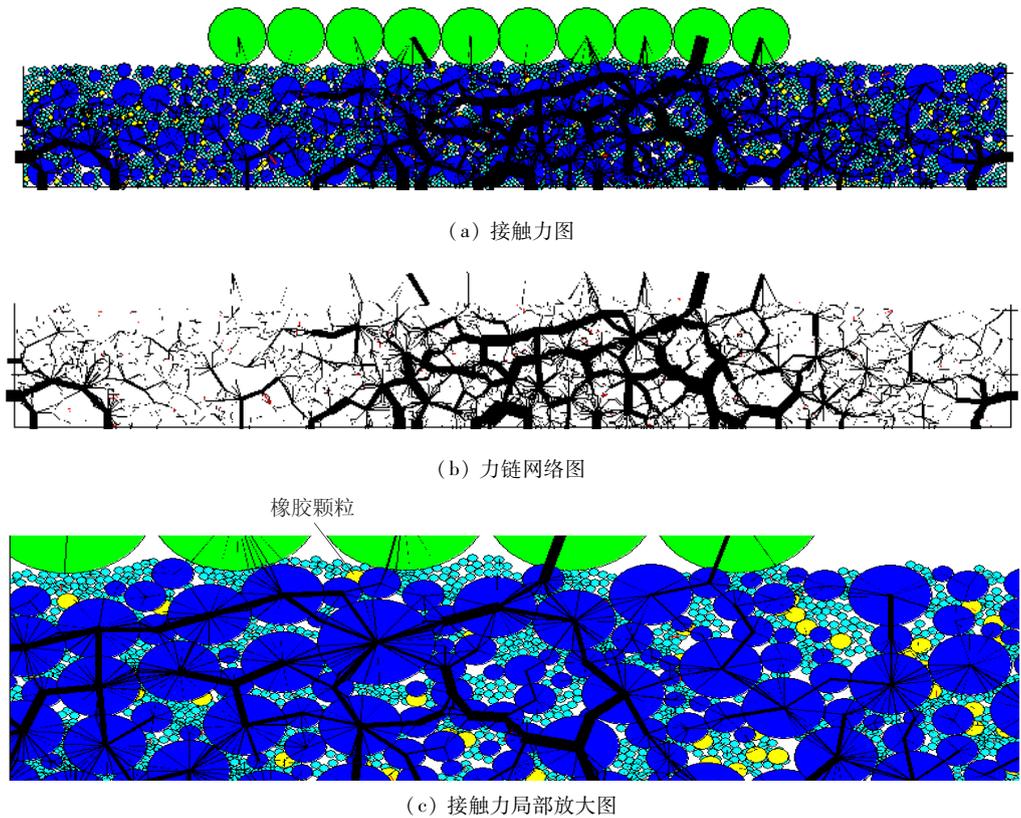


图 3 间断级配橡胶颗粒沥青混合料接触力

从图中可以看出,对于间断级配橡胶颗粒沥青混合料来说,强、弱力链主要是由不同粒径的粗细集料颗粒形成,橡胶颗粒由于刚度小、弹性变形大,基本不参与混合料内部主要受力骨架和传力路径的构成,即混合料内部的强力链主要由大粒径的粗集料颗粒构成,弱力链主要由较小粒径的细集料颗粒构成,橡胶颗粒对弱力链的形成贡献较少,造成混合料内部受力不够均衡,见图 3(c)接触力局部放大图;对于连续级配橡胶颗粒沥青混合料来说,由于较大粒径的粗集料颗粒数量相对较少,因此构成的强力链数目也相应较少,并且

强力链分布在大粒径粗集料分布相对较集中的区域,所以在混合料内部没有形成分布均衡的整体骨架结构.另外由于小粒径的细集料颗粒比较多,因此形成的弱力链在整个受力区域内分布比较密.混合料内的橡胶颗粒在一定程度上也参与了弱力链的形成,见图 4(c)接触力局部放大图.对于普通沥青混合料来说,所有粗细集料全部参与强、弱力链的形成,共同构成受力骨架和传力路径,使得整个混合料内部受力比较均衡,见图 5(c)接触力局部放大图.

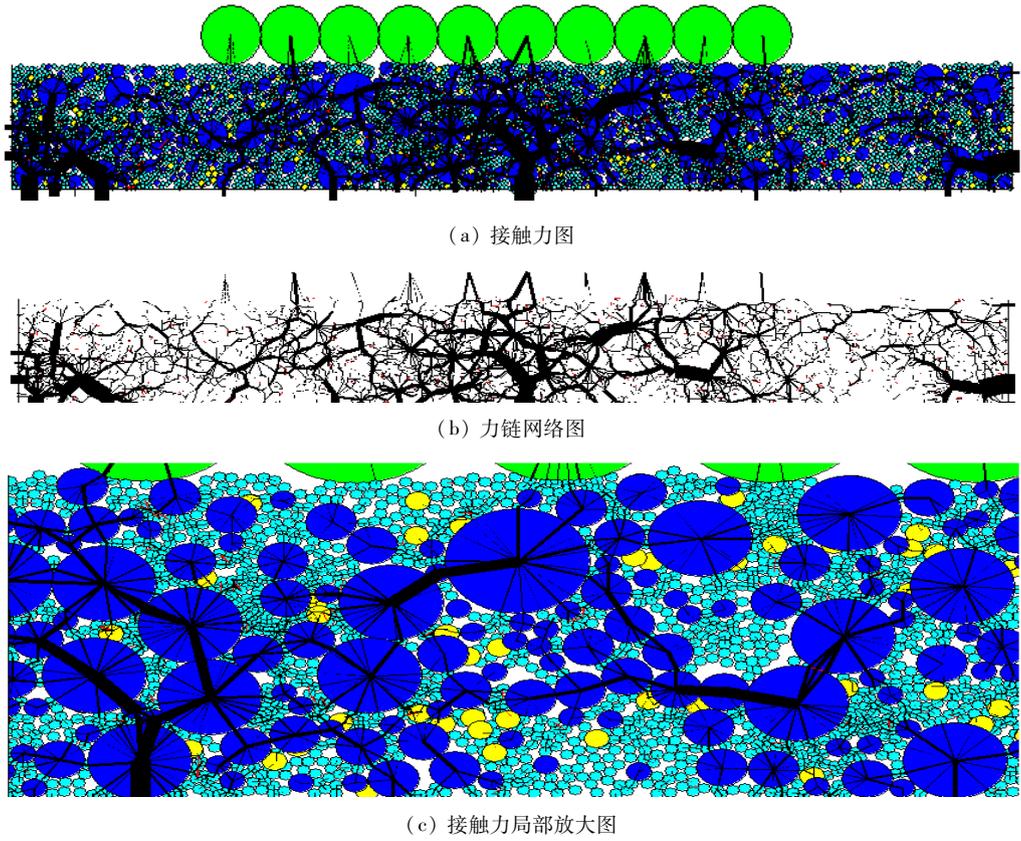


图4 连续级配橡胶颗粒沥青混合料接触力

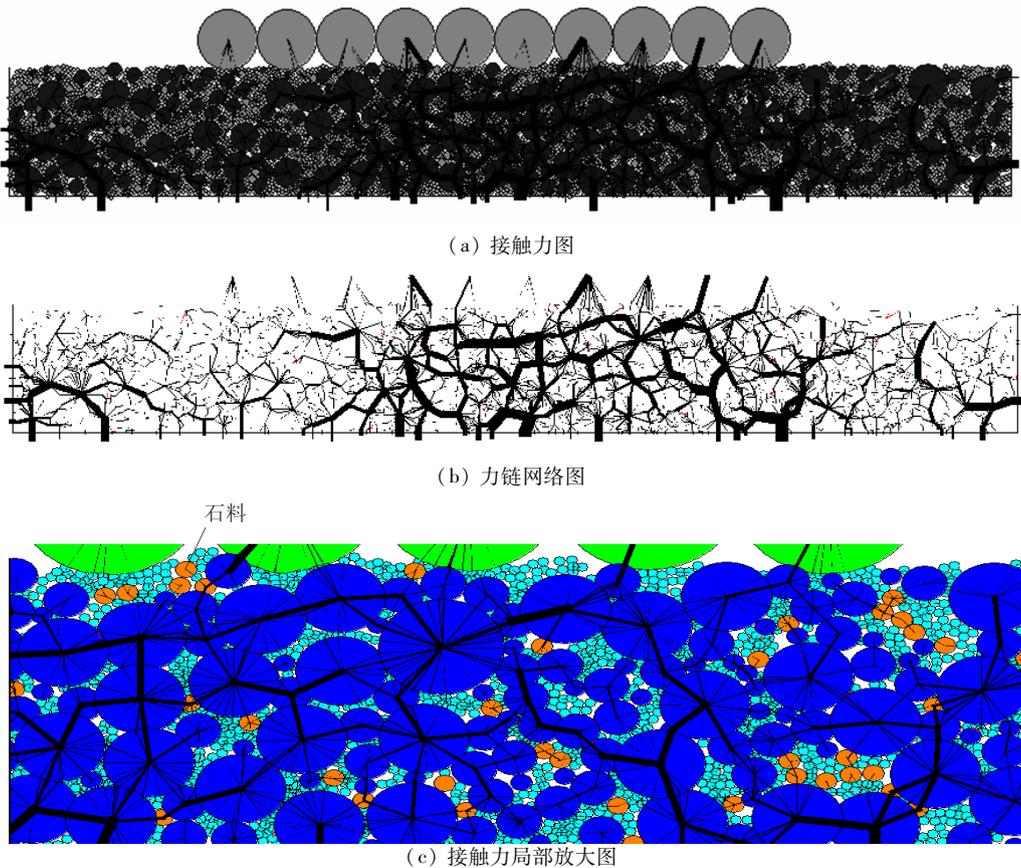


图5 普通沥青混合料接触力

综合以上分析,对于橡胶颗粒沥青混合料,虽然间断级配混合料中的橡胶颗粒基本不参与力链

构成,但其内部粗集料较多,构成骨架嵌挤结构,形成主要传力路径,所以路面承载能力和强度较

高;而对于连续级配混合料,虽有部分橡胶颗粒参与力链的构成,但主要传力路径还是由不同粒径的粗细集料颗粒构成,而其内部粗细集料相对较少,造成路面承载能力和强度较间断级配要差. 间断级配橡胶颗粒沥青混合料与普通沥青混合料相比,普通混合料中所有粗细集料都参与力链的形成,有更多的集料构成传力路径,其内部受力比橡胶颗粒沥青混合料更均衡,所以普通沥青路面的承载能力和强度更高.

2.1.2 变形分析

离散元法用颗粒间的位置重叠量表示发生变形的程度,通过图 3(c)、4(c)和 5(c)可看出,对于橡胶颗粒沥青混合料来说,无论是间断级配还是连续级配,混合料中橡胶颗粒都有明显的重叠现象存在,而集料部分基本上没有明显的重叠现象,这是因为橡胶颗粒强度低,弹性大,在荷载作用下会发生较大变形,石料与橡胶颗粒相比强度要大得多,变形能力差,在荷载作用下不会发生较大变形. 对于普通沥青混合料来说,若将橡胶颗粒还原为石料后,可以看到,这些颗粒基本上没有明显的颗粒重叠现象,说明在荷载作用下普通沥青混合料发生的变形量很小. 由上述分析可见,由于橡胶颗粒的掺入,无论是间断级配还是连续级配,橡胶颗粒沥青混合料的变形能力都强于普通沥青混合料.

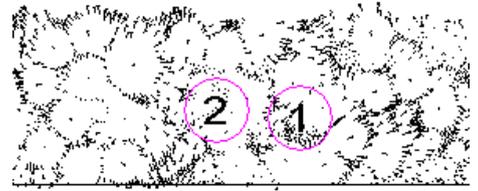
2.2 破坏机理细观分析

2.2.1 位移分析

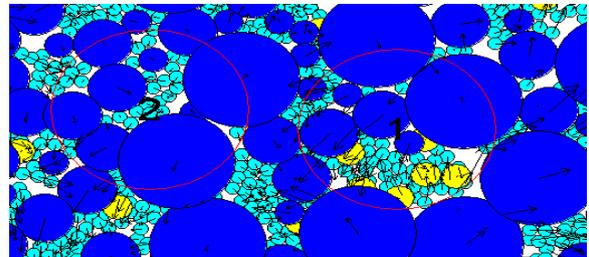
图 6 为整个系统达到平衡时的间断级配橡胶颗粒沥青混合料位移矢量图,箭头方向表示位移方向,箭头长短表示位移大小. 图 6 中圆 1 和圆 2 是两个圆形测量域,其中圆 1 内有橡胶颗粒存在,圆 2 内没有橡胶颗粒存在. 通过图 6 可看出,在橡胶颗粒沥青混合料中,在没有橡胶颗粒的区域,粒径较大的粗集料颗粒位移很小,而周围小粒径的细集料和胶结料颗粒位移相对较大,说明由粗集料构成的骨架结构在受力过程中基本是稳定的,不会产生较大的位置改变. 在有橡胶颗粒存在的区域,位移情况则发生了变化,不仅是小粒径的细集料和胶结料颗粒位移较大,与橡胶颗粒相邻的部分粗集料也发生了较大的位移,这是因为橡胶颗粒发生了较大变形,导致周围粗集料的位置发生改变,此时由粗集料构成的骨架结构在受力过程中已经发生变动,从而引发混合料内部松动.

根据 PFC2D 软件离散元计算结果,可得到测量域圆 1 和圆 2 的应变率大小平均值,见表 3. 可看出,在离散元时步迭代计算过程中,测量域圆 1

内发生的应变比圆 2 内要大得多,说明沥青混合料内有橡胶颗粒分布的地方存在局部相对大变形,在荷载作用下变形比周围区域要大.



(a) 位移图



(b) 位移局部放大图

图 6 间断级配橡胶颗粒沥青混合料位移
表 3 测量域应变率平均值

测量域	$\epsilon_x/10^{-2}$	$\epsilon_y/10^{-2}$	$\gamma_{xy}/10^{-2}$	橡胶颗粒
圆 1	4.274	9.948	2.433	有
圆 2	1.819	3.559	1.125	无

2.2.2 黏结接触破坏分析

根据离散元理论,颗粒体被视为刚性体,橡胶颗粒沥青混合料的破坏主要由颗粒之间的黏结接触破坏来反应. 平行连接模型描述单元间接触和黏结,当拉应力分布范围越来越小,表明颗粒单元之间的接触已经失效,裂纹已经出现或扩展. 下面对荷载作用下橡胶颗粒沥青混合料内部的黏结接触破坏进行分析,图 7 为整个系统达到平衡时,间断级配橡胶颗粒沥青混合料内部黏结接触发生破坏的局部放大示意图,裂纹萌生位置用细线标识,从图 7 中可看出,在有橡胶颗粒的个别地方首先产生黏结接触破坏,说明在荷载作用下橡胶颗粒和橡胶颗粒接触面以及橡胶颗粒和石料接触面为相对弱界面,首先发生破坏.

裂纹萌生位置

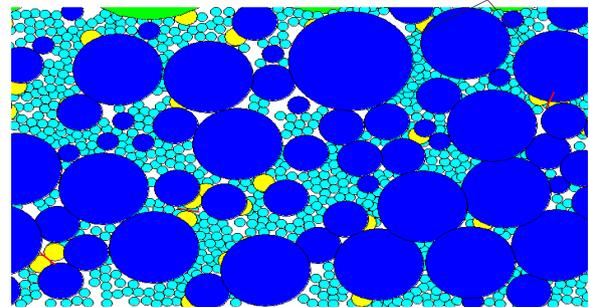


图 7 间断级配橡胶颗粒沥青混合料黏结接触破坏位置局部放大图

因此,内部橡胶颗粒分布区域存在局部相对大变形.在该区域,颗粒之间的接触状态以石料-橡胶颗粒为主,在反复加载和卸载过程中,石料和橡胶颗粒间的相对位置由于橡胶颗粒的局部大变形发生较大的变动,这个不断重复的过程使石料和橡胶颗粒间的沥青粘结强度逐渐降低,使石料和橡胶颗粒间的接触面逐渐变为相对弱界面,容易引起该处沥青与石料和橡胶颗粒之间的剥离,当橡胶颗粒或石料位于路面表面时,容易产生表面颗粒脱落现象.即使在路面混合料内部,由于橡胶颗粒的大变形,相邻粗集料发生较大位移,粗集料位置在外荷载反复加载和卸载过程中发生较大扰动,使得该处骨架结构逐渐被破坏,变得趋于不稳定,容易松动破坏,总体上表现为路面在荷载作用下容易发生松散破坏,耐久性差.

3 结 论

1) 橡胶颗粒沥青混合料内部的强力链主要由大粒径的粗集料颗粒构成,弱力链主要由较小粒径的细集料颗粒构成,橡胶颗粒几乎不参与力链的构成,而普通沥青混合料内部所有集料均参与受力,强、弱力链在橡胶颗粒沥青混合料内部的数目比普通混合料要少且分布相对不均衡,造成其承载能力下降.其承载能力从大到小排序为:普通沥青混合料、间断级配橡胶颗粒沥青混合料、连续级配橡胶颗粒沥青混合料.

2) 在变形方面,橡胶颗粒沥青混合料在荷载作用下内部的橡胶颗粒有重叠现象存在,橡胶颗粒沥青混合料发生了较大变形,而普通沥青混合料内部几乎没有重叠现象发生,普通沥青混合料并未发生大的变形.变形能力从大到小排序为:普通沥青混合料、间断级配橡胶颗粒沥青混合料、连续级配橡胶颗粒沥青混合料.

3) 橡胶颗粒沥青混合料内部有橡胶颗粒分布的地方,在荷载作用下发生的局部变形比周围区域要大.在行车荷载的反复加载和卸载过程中,该区域的石料和橡胶颗粒之间的相对位置由于橡胶颗粒的局部大变形而发生较大的变动,不仅造

成原有骨架结构的松动,还使石料和橡胶颗粒之间的接触面逐渐变为相对弱界面,容易引起该处沥青与石料和橡胶颗粒之间的剥离,结果导致路面在荷载作用下容易发生松散破坏,耐久性差.

参考文献

- [1] CHANG Mingfeng, PEI Jianzhong, CHEN Shuanfa. Numerical simulation of biaxial test for granular materials based on discrete element method [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010 (5):47-56.
- [2] 裴建中. 沥青路面细观结构特性与衰变行为[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [3] VAN KIRK J L. An overview of caltrans experience with rubberized asphalt concrete[R]. Washington DC:71 st Annual Meeting of Transportation Research Board, 1992:45-51.
- [4] 王端宜,赵熙. 沥青混合料单轴压缩试验的离散元仿真[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2009,37 (7):23-29.
- [5] 张肖宁. 基于 X-ray CT 的沥青混合料计算机辅助设计技术的研究进展[J]. 交通科学与工程,2010,26 (2):1-8.
- [6] 万成. 基于 X-ray CT 和有限元方法的沥青混合料三维重构与数值试验研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
- [7] ZHAO Xi, WANG Duanyi. Simulating mechanical properties of compaction on asphalt pavements [J]. Science Technology and Engineering, 2009(8): 45-54.
- [8] YANG Gang, ZHANG Xiaoning. Research on asphalt mixture structure by discrete element method [J]. Science Technology and Engineering, 2007(2):78-86.
- [9] 陈俊,黄晓明. 基于离散元法的沥青混合料虚拟疲劳试验方法[J]. 吉林大学学报:工学版,2010(2): 56-62.
- [10] 陈俊,黄晓明. 基于离散元方法的沥青混凝土断裂机理分析[J]. 北京工业大学学报,2011(2):83-92.

(编辑 魏希柱)