

文章编号: 1673-9469 (2019) 04-0025-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.005

孔隙走向引起的大空隙沥青混合料渗水性能方向差异

马谢¹, 陈俊^{2*}

(1. 苏州市建设工程质量安全监督站, 江苏 苏州 215002; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了分析大空隙沥青混合料中孔隙走向特征及其引起的渗水性能方向差异, 采用 X 射线 CT 扫描 4 组不同空隙率的大空隙沥青混合料马歇尔试件, 通过图像处理技术测试试件在径向和竖向截面内孔隙形状参数, 分析混合料中竖向和径向孔隙的分布差异。对旋转压实成型的大空隙沥青混合料试件, 沿着径向和竖向钻孔取芯, 采用开发的渗水仪, 测试芯样 12 个方向的渗水系数, 分析旋转压实试件在径向平面内 12 个角度和竖向平面内 12 个角度上渗水系数的差异。结果表明, 大空隙沥青混合料径向与竖向孔隙具有不同的分布特征, 径向空隙率更大, 孔径更均匀, 单位截面上径向孔隙数量更多; 大空隙沥青混合料的渗水系数存在明显的方向差异性, 竖直平面内不同角度上渗水系数的差异高于水平面内, 竖直平面内在越趋于水平的方向上渗水系数越大。

关键词: 大空隙沥青混合料; 空隙率; 分布特征; 渗透性; 方向差异性

中图分类号: U414

文献标识码: A

Permeability Anisotropy of Open Graded Friction Courses Due to Heterogeneous Distribution of Air Voids

MA Xie¹, CHEN Jun^{2*}

(1. Construction Quality and Safety Supervision Station of Suzhou, Suzhou, Jiangsu 215002, China;
2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Four types of open graded friction courses (OGFC) Marshall compacted samples with different air void contents were scanned with the X-ray computed tomography (CT). The air voids were obtained through digital image processing (DIP) of two-dimensional images. The difference of the air voids distribution on the horizontal and vertical section of the OGFC sample was analyzed. The horizontal and vertical cores were obtained by drilling the Superpave gyratory compactor (SGC) sample respectively. The permeability coefficients along twelve directions on the horizontal and vertical plane of each core were tested respectively using a developed constant head permeameter and a proposed permeability anisotropy test procedure. Results show that the air void on vertical section of the OGFC sample has more uniform size, content and quantity than that on the horizontal section. OGFC mixture has more interconnected air voids in the radial direction as compared to the vertical direction. Permeability anisotropy is existed inside the OGFC mixture. The degree of permeability anisotropy on the vertical plane is more than that on the horizontal plane of OGFC mixture. On the vertical plane, the permeability in the horizontal direction has the maximum value; while the minimum permeability was found when the water flow was in the vertical direction of SGC sample.

Key words: open graded friction courses; air voids; distribution characteristics; permeability; anisotropy

收稿日期: 2019-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50175095); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015B17014)

作者简介: 马谢(1994-), 男, 江苏溧阳人, 硕士研究生, 从事轨道施工及道路材料方面的研究。*通讯作者: 陈俊(1981-), 男, 江苏扬中人, 博士, 副教授, 研究方向为路面新材料与新技术。

使用多孔沥青混合料(OGFC)铺筑的排水性路面具有优良的排水、抗滑、降噪、防水溅等功能,这些功能主要依赖于多孔沥青混合料内部的大量连通孔隙^[1-2]。目前,通常采用混合料整体空隙率、连通空隙率等直接评价连通孔隙的多少。如李国强认为当空隙率达到17.3%以上时,混合料内部形成连通孔隙^[3];我国《公路沥青路面施工技术规范(JTG F40-2004)》要求OGFC空隙率为18%~25%^[4]。除了空隙率之外,渗水系数也常用于间接反映孔隙的连通程度^[5-6]。近年来,研究发现沥青混合料作为一种多相复合材料,不仅集料颗粒存在着分布不均,孔隙的走向也是不均匀的,存在着明显的方向差异性^[7-11]。但是,多孔沥青混合料中孔隙走向呈现出何种特征,孔隙走向是否会导致混合料渗水性能的方向差异性,实验室内如何测试渗水性能的方向差异程度等等这些问题没有得到深入研究。基于此,本文通过CT扫描和图像处理技术,提取多孔沥青混合料的孔隙特征,考虑到孔隙结构、分布和走向的复杂性,把在大量水平截面内的孔隙简化认为是竖直走向的孔隙,在大量竖直截面内的孔隙简化成水平走向的孔隙,并对比两种走向孔隙形状和分布的差异;采用自行研制的渗水仪,分析多孔沥青混合料渗水系数的方向差异。

1 多孔沥青混合料孔隙分布特征

1.1 材料

按表1所列矿料级配和沥青用量,采用马歇尔击实和旋转压实成型空隙率 VV 分别为17.1%、18.9%、20.6%和22.7%的OGFC-13混合料试件。沥青为高粘度改性沥青,集料为玄武岩,填料为石灰岩矿粉。

1.2 CT扫描试件

参照文献[12-13]所述方法,采用美国通用电气

生产的Discovery CT750 HD型CT仪,扫描表1成型的4组OGFC-13马歇尔试件,每隔0.625 mm扫描一个截面,共得到径向的圆截面102个,竖向的矩形截面155个。图1为试件一个径向截面和竖向截面的扫描图像、孔隙图像和三维重构的试件图像。

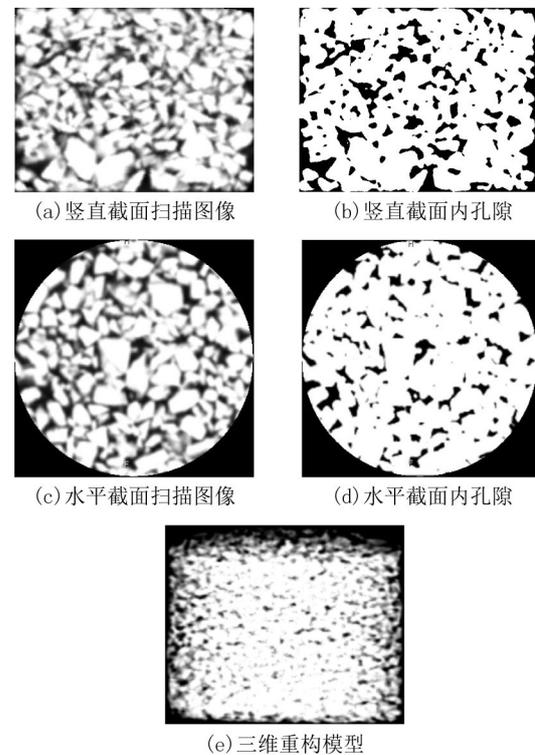


图1 马歇尔试件的CT扫描图像

Fig.1 Images in Marshall compacted samples by CT scanner

1.3 径向与竖向截面内孔隙分布与形状特征

1.3.1 孔隙形状与分布评价指标

采用截面单位面积上孔隙数量 k 和截面上孔隙面积占截面比例 p 评价截面内孔隙分布特征。采用孔隙的当量孔径 D 、孔隙当量椭圆的长短轴比值 q 及孔径级配评价孔隙的形状特征。其中,当量孔径是与孔隙面积相同的圆的直径,当量椭圆是与孔隙面积和惯性矩相同的椭圆。上述孔隙分布与形状指标可通过Image-Pro Plus6.0图像处理软件对CT扫

表1 OGFC-13矿料级配和沥青用量

Tab.1 Aggregate gradation and asphalt content of OGFC-13

序号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%										沥青用量 AC/%	孔隙率 VV/%
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075		
1	100	92.0	66.4	28.1	16.7	13.1	10.3	7.4	6.3	4.9	4.8	17.1
2	100	91.0	62.5	25.5	16.4	12.9	10.2	7.3	6.2	4.9	4.7	18.9
3	100	90	60.1	21.1	13.7	10.7	8.5	6.3	5.5	4.3	4.5	20.6
4	100	95	77.5	26.1	13.5	10.2	7.9	5.8	5.1	4.1	4.4	22.7

描的截面图像采集和处理得到。

1.3.2 径向与竖向截面内孔隙分布差异

由于沥青混合料内部孔隙分布和走向十分复杂，本节将竖向截面图像内提取的大量孔隙简化看成试件中水平走向的孔隙，把径向截面图像内分布的大量孔隙看成是试件中垂直走向的孔隙。表 1 中 4 组 OGFC-13 的竖向和径向截面上单位面积孔隙的数量如图 2 所示。由图 2 可知，同一组 OGFC-13 试件中，单位面积竖向截面内孔隙的数量多于径向截面内的孔隙数，说明在同一空隙率的试件内，垂直走向的孔隙数量少于水平走向（径向）孔隙。另一方面，无论是竖向截面还是径向截面，空隙率越大的试件，其单位面积上孔隙的数量越多。图 3 竖向和径向截面上孔隙面积与截面面积的比值也呈现类似的规律。

1.3.3 径向与竖向截面内孔隙形状差异

图 4 为 4 组 OGFC-13 竖向和径向截面上孔隙的当量直径，可明显看出，竖直截面中孔隙的当量孔

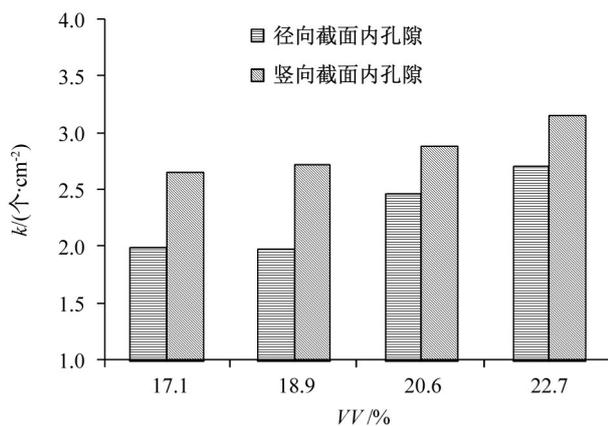


图 2 竖向和径向截面单位面积上孔隙的数量

Fig.2 Quantity of air voids per unit area on vertical and radial section

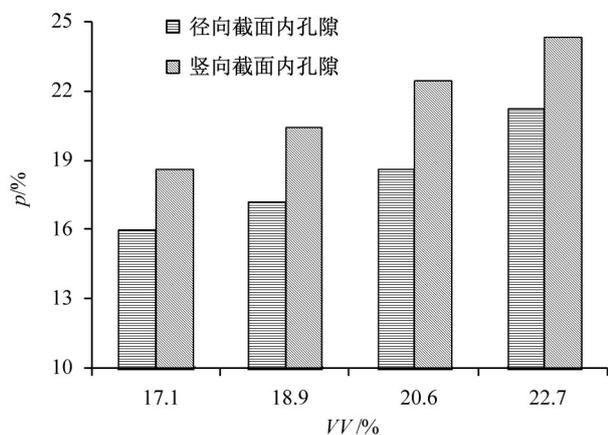


图 3 孔隙面积与竖向和径向截面面积的比值

Fig.3 Area ratio of air void to vertical and radial section

径略小于水平截面中的孔隙，说明水平走向的孔隙直径小于垂直走向的孔隙。考虑到图 2 中呈现出水平走向的孔隙数量多于垂直孔隙的规律，可以得出：多孔沥青混合料中水平走向孔隙“量多且孔细”，垂直孔隙相对“量少而孔粗”。不仅如此，从图 4 还可以看出，随着空隙率的增大，垂直走向和径向孔隙的孔径均呈现增大的趋势。

图 5 为两个方向截面上孔隙当量椭圆的长短轴比值，其值越接近 1，说明孔隙越接近于圆孔。从图 5 可见，两向截面内孔隙当量椭圆的长短轴比均大于 1，说明垂直走向和水平走向的孔隙形状都不接近于圆，长轴是短轴的 2.4 ~ 2.8 倍。此外，长短轴比值的大小与孔隙走向（垂直截面还是径向截面）没有明显的关系，可见不存在哪个方向截面内孔隙或哪个走向的孔隙更接近于圆形。

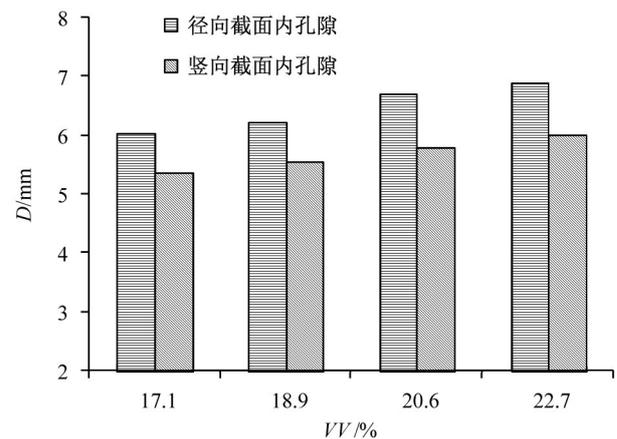


图 4 竖向和径向截面内孔隙的平均当量孔径

Fig.4 Average equivalent size of air voids on vertical and radial section

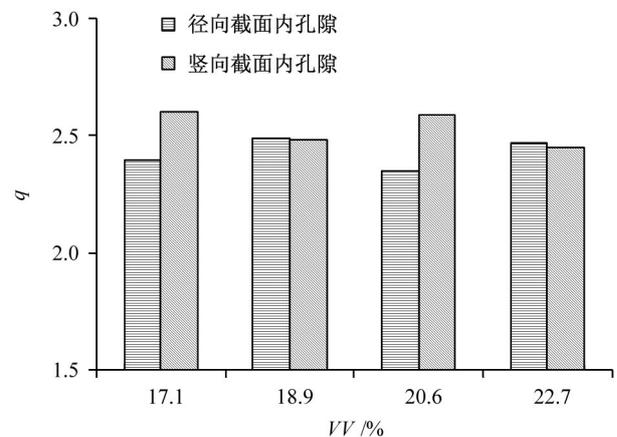


图 5 竖向与径向截面内孔隙当量椭圆的长短轴比

Fig.5 Ratios between long and short axes of equivalent ellipses of air voids on vertical and radial section

对4组OGFC-13混合料内竖向和径向截面内的孔隙当量直径进行统计,计算其不同孔径范围内的含量,结果如图6所示。从图6可见,4组混合料中孔隙直径的分布规律相似;除2~4mm档孔径之外,孔径越大,孔隙数量越少;孔径在2~4mm之间的孔隙数量占孔隙总数的35%左右,其比例远高于其他孔径范围的孔隙。

为了精确分析竖向和径向截面内孔径的均匀程度,计算两个方向截面内所有孔隙孔径的变异系数,结果如图7所示。随着空隙率的增大,竖向截面和水平截面内孔隙直径的变异系数逐渐降低;在同一空隙率下,竖向截面内孔径的变异系数小于径向截面,即水平走向的孔隙尺寸更为均匀。

2 多孔沥青混合料渗水系数方向差异测试

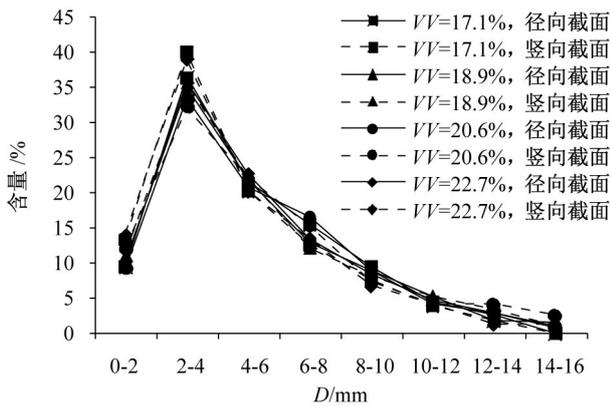


图6 孔径在不同范围内的含量
Fig.6 Distribution of air void size

2.1 测试方法

为了更精细地分析渗水系数方向差异,本文不仅考虑沥青混合料的竖向和径向两个方面,还把方向差异性分为两部分加以分析,即试件水平面内12个方向的渗水系数差异性和竖直平面内12个方向的渗水系数差异性,这两个平面内24个方向渗水系数测试流程如图8所示。具体步骤为:

(1) 在同一级配和沥青用量下,旋转压实成型高度和直径分别为120mm和150mm的OGFC圆柱体试件共6个。

(2) 对其中的3个试件,采用钻孔机沿试件的径向钻取圆柱体芯样,芯样直径为100mm,把芯样的两个端部切平,得到高度为100mm的小圆柱体芯样。

(3) 采用图9所示的自行研发的恒水头渗水仪,在水头高度为500mm时,测试 $t(s)$ 时段内通过试

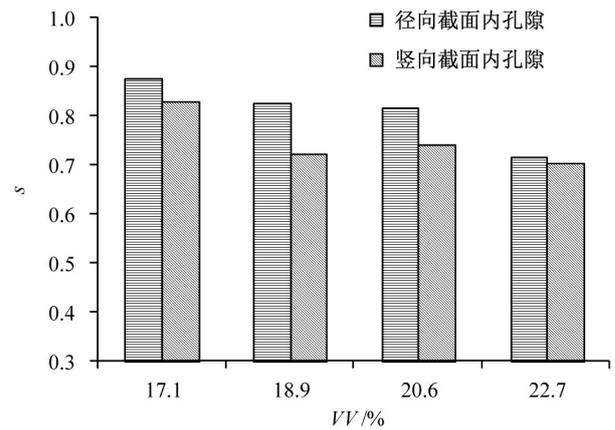


图7 孔径的变异系数
Fig.7 Variation coefficient of air void size

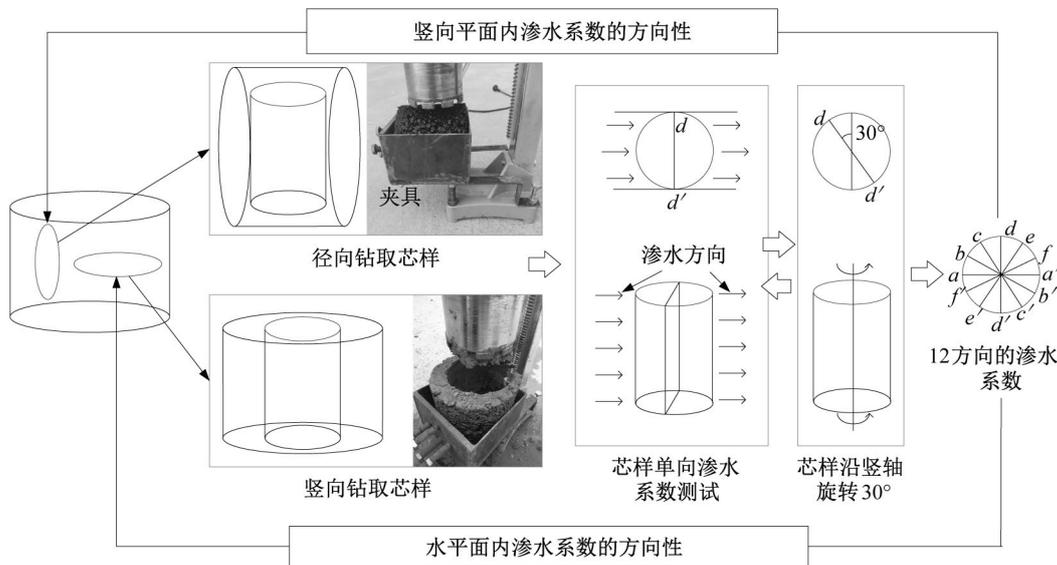


图8 试件24个方向渗水系数的测试流程图

Fig.8 Flowchart of measurement on permeability in 24 directions

件的水量 $V(\text{mL})$ ，并按式 (1) 计算小圆柱体芯样单向的渗水系数 $PC(\text{mL/s})$ ，在芯样圆形端部标记出渗水断面的位置。

$$PC = \frac{V}{t} \quad (1)$$

(4) 从渗水仪中取出芯样，在刚刚标记的渗水断面位置基础上，对芯样的竖轴旋转 30° 后再次放入渗水仪。

(5) 重复步骤 (3) 和 (4) 11 次，测得芯样 12 个方向的渗水系数，以评价旋转压实后的大圆柱体试件在竖向平面内渗水系数的方向差异性。

(6) 对步骤 (1) 成型的另外 3 个试件，竖向钻孔取芯，端部切平后，也得到高度为 100 mm 的小圆柱体芯样，并重复步骤 (3) 和 (4) 12 次，测得芯样 12 个方向的渗水系数，以评价旋转压实后的大圆柱体试件在水平平面内渗水系数的方向差异性。

对于径向钻取得到的芯样，渗水系数测试的 12 个方向为竖向平面内的方向， $d \rightarrow d'$ 和 $d' \rightarrow d$ 两个方向的渗透系数分别代表水流从上至下和从下至上通过图 8 大圆柱体试件时的渗水系数。

2.2 测试装置

混合料芯样渗水系数的测试装置为自行制作的常水头渗水仪，如图 9 所示。渗水仪包括水箱、球阀和试件卡槽三部分，水箱的水头高度为 500 mm，测试所用的试件为钻孔取得的芯样，它通过高弹、软性硅胶固定在渗水仪卡槽中。对芯样沿竖轴旋转不同角度后的渗水系数测试，能够获得芯样水平面内不同方向的渗水系数。芯样不同方向的渗水系数反映了包含芯样的大尺寸圆柱体试件（旋转压实得到）渗水性能的方向差异性，如对于竖向

钻取的芯样，经图 8 测试得到圆柱体试件在水平面内不同方向的渗水系数；对径向钻取的芯样，测试得到圆柱体试件在竖直平面内不同方向的渗水系数。

2.3 测试结果

对表 1 中 4 组试件分别测试 24 个方向的渗水系数，图 10 为 OGFC-13 竖向平面内 12 个方向和水平平面内 12 个方向的渗水系数分布图。

从图 10(a) 可以看出，同一混合料类型、相同空隙率下，在混合料试件的竖向平面内，不同方向的渗水系数差异十分明显，渗水系数的最小值一般出现在试件的竖直方向上，而最大渗水系数往往出现在与竖轴夹角为 90° 的方向上。由此说明，多孔沥青混合料水平或接近水平方向的连通孔隙要比竖向孔隙更为丰富，这验证了上文孔隙走向特征分析的正确性。此外，图中还显示，竖向平面内渗水系数的方向分布曲线接近于“ ∞ ”形状或椭圆形状，这可能与旋转压实对混合料的揉搓碾压作用有关。同时，空隙率越小，“ ∞ ”形状越明显；空隙率越大，椭圆形越明显。

另一方面，同一沥青混合料的竖向平面内，与竖轴夹角为 0° 和 180° 的渗水系数也不完全相同，即相反方向上的渗水系数不同。类似的现象也出现在 30° 与 210° 、 60° 与 240° 、 90° 与 270° 、 120° 与 300° 、 150° 与 330° 的两个相反方向上。这就说明，多孔沥青混合料渗水系数的角度差异性，不仅表现在不同角度之间，还表现在同一角度的相反方向之间。

从图 10(b) 可以看出，渗水系数在水平平面 12 个方向上也不相同，可见渗水系数的方向差异性，不仅在试件的竖向平面内存在，水平面内同样具有渗水系数的方向差异性，但是与竖向平面不相同的

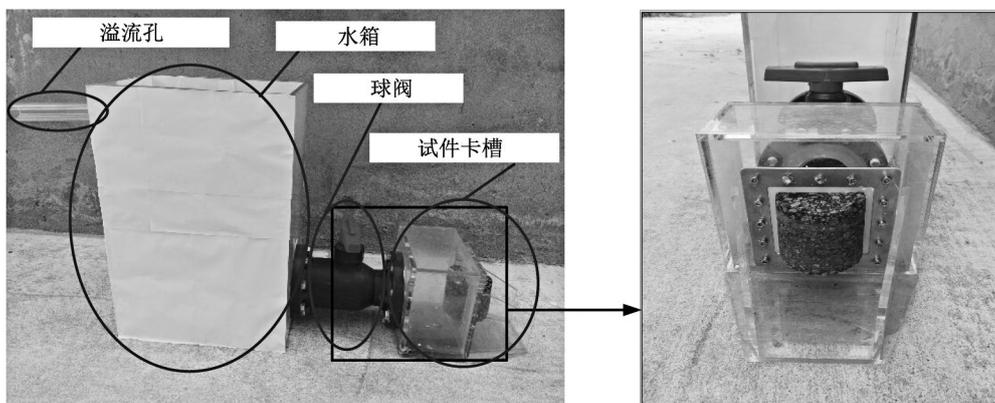
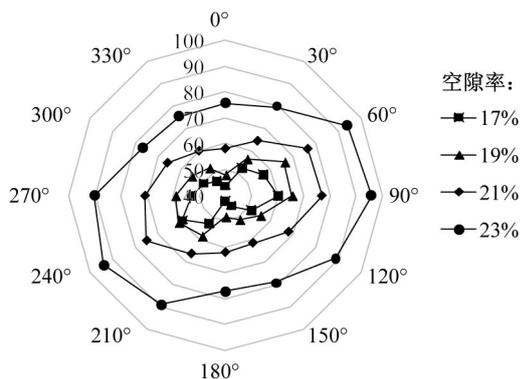
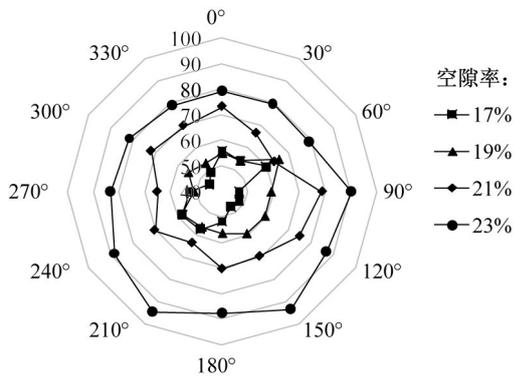


图 9 研发的常水头渗水仪

Fig.9 Constant head permeameter



(a) 竖向平面内 12 个方向渗水系数



(b) 水平面内 12 个方向渗水系数

图 10 OGFC-13 渗水系数在 24 个方向的分布 (单位: mL/s)
Fig.10 Distribution of permeability in 24 directions of OGFC-13

是,水平面内角度与渗水系数之间的关系并不明确。

3 结论

1) 马歇尔击实或旋转压实成型的多孔沥青混合料中孔隙分布不均匀,相比于竖直走向的孔隙,水平走向的空隙率更大,孔径更均匀,单位截面上孔隙数量更多。

2) 孔隙分布的不均匀导致多孔沥青混合料的渗水系数存在方向差异性,采用开发的渗水仪能测试同一试件在多个方向上的渗水系数。

3) 多孔沥青混合料渗水系数的方向差异性不仅表现在竖直平面的不同方向之间,还表现在水平面内的各方向之间;竖向平面内,在越趋于水平的方向上,渗水系数越高;空隙率越小,多孔混合料渗水系数的方向差异性越大。

参考文献:

[1]COLWILL D M, BOWSKILL G J, NICHOLLS J C, et al.Porous Asphalt Trials in the United Kingdom[J]. Transportation Research Record, 1993, 1427(1): 13-21.

[2]ALVAREZ A E, MARTIN A E, ESTAKHRI C.A Review of Mix Design and Evaluation Research for Permeable Friction Course Mixtures[J].Construction and Building Materials, 2011, 25(3): 1159-1166.

[3]李国强, 邓学钧.路面透水表层临界空隙率研究[J].中国公路学报, 1996, 9(2): 28-33.

[4]JTG F40-2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].

[5]LINK R E, TAN S A, FWA T F.Automatic Field Permeameter for Drainageproperties of Porous Asphalt Mixes[J].Journal of Testing Evaluation, 1999, 27(1): 57-62.

[6]CHEN J, LI H, HUANG X, et al.Permeability Loss of Open Graded Friction Course Mixtures Due to Deformation-Related and Particle-Related Clogging: Understanding from a Laboratory Investigation[J].Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(11), 04015023.

[7]MASAD E, MUHUTHAN B, SHASHIDAR N, et al.Internal Structure Characterization of Asphalt Concrete Using Image Analysis[J].Journal of Computing in Civil Engineering, 1999, 13(2): 88-95.

[8]AL-OASMARI A, MAD E.Three Dimensional Simulation of Fluid Flow in X-ray CT Images of Porous Media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28: 1327-1360.

[9]KUTAY M E, AYDILEK A H, MASAD E, et al.Computational and Experimental Evaluation of Hydraulic Conductivity Anisotropy in Hot-mix Asphalt[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2007, 8(1): 29-43.

[10]MASAD E, AL-OMARI A, CHEN H C.Computations of Permeability Tensor Coefficients and Anisotropy of Asphalt Concrete Based on Microstructure Simulation of Fluid Flow[J].Computational Materials Science, 2007, 40: 449-459.

[11]GRUBER I, ZINOVIK I, HOLZER L, et al.A Computational Study of the Effect of Structural Anisotropy of Porous Asphalt on Hydraulic Conductivity[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 66-77.

[12]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(2): 1-8.

[13]谭忆秋, 任俊达, 纪伦, 等.基于 X-ray CT 的沥青混合料空隙测试精度影响因素分析[J].哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(6): 65-71.

(责任编辑 王利君)