

## 双层排水沥青路面孔道自洁性能模拟

李刚<sup>1</sup>, 廖公云<sup>2</sup>, 汤赞成<sup>2</sup>, 曾明辉<sup>1</sup>, 许兵<sup>1</sup>

(1.江西省高速公路投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330025; 2.东南大学 交通学院)

**摘要:**雨天车辆轮胎荷载作用下双层排水沥青路面内部会出现动水压力,进而产生“虹吸”作用,带出堵塞孔道内部的尘土,这一效应被称为双层排水沥青路面的自洁。该文借助CT扫描技术获取断面图层,在Simpleware软件中采用三维重构技术构建了双层排水沥青路面几何模型,在有限元软件Flow-3D中建立基于流固耦合方程(FSI)和沉积物冲刷方程(Sediment Scour)的耦合模型,并初始化水膜厚度、轮胎运动条件和路表水文边界条件。对照分析了不同速度、不同水膜厚度以及不同杂物粒径条件下轮胎滚动作用对动水压力效应和孔道自洁作用的影响。分析得出:杂物粒径对自洁效应起决定性作用,相同动水压力条件下,小粒径杂物析出数量较多,大粒径杂物析出质量较大;较大轮胎速度和较大水膜厚度会产生较大动水压力,但对自洁性能影响较小。

**关键词:**双层排水沥青路面;孔道自洁;三维重构;流固耦合;沉积物冲刷

排水沥青路面空隙率高达20%左右,连通空隙率超过15%,雨天路面积水可以迅速渗透到排水路面结构层,此外,排水性沥青路面具备良好的降噪性能。自20世纪80年代开始,欧美各国陆续实施绿色结构(Green Structure)计划,将排水性沥青路面列为推荐路面。自21世纪初开始,中国也陆续开始使用这一路面结构。但排水性沥青路面使用过程中遇到了诸多工程难题,使用期孔道阻塞即是其中之一。

为改善排水性沥青路面孔道阻塞问题,国内外将单层排水沥青路面改为双层排水沥青路面。旨在将扬尘、雨水产生的杂物集中在路面结构上部,方便清理。但根据国外工程经验,即使双层排水沥青路面施工时对孔隙阻塞有了预防措施,其孔隙阻塞、排水能力和降噪能力大幅下降的趋势依旧无法杜绝。

为解决孔道阻塞的问题,国内外学者采用试验法进行了大量研究。Brown和Borst(2013)研究发现:排水断面越大,孔隙阻塞速度越快,并提出适当减小排水层厚度的解决方案;蒋玮、沙爱民等通过试验的方式研究了扬尘作用下不同粒径尘土对PAC-13C及PAC-13F的阻塞作用,得出了粗粒径的PAC-13C能长周期保持排水性能,提出加粗排水性沥青路面粒径的方式克服阻塞问题;谢西等研究了透水混凝土路面的阻塞及清洁效果,得出高压水和真空清洁方式效果最好。这些研究虽然对解决孔道阻塞问题具有指导

意义,但这些研究认为只有使用期定期清洁才能缓解孔道阻塞,没有考虑动水压力对孔道杂物的清洁作用。

降雨条件下路表会形成水膜,当有车辆行驶通过时轮胎—水膜—道路三者之间会产生耦合作用。车辆行驶过程中,轮胎的滚动作用以及平动作用会对路表水膜产生扰动,进而在路表水膜内部产生较大动水压力;这一动水压力一方面会对多孔路面结构内部产生冲刷作用;另一方面会反作用于轮胎,使得轮胎有一个向上托起的趋势,产生水漂现象;水漂现象又使得轮胎与路表的接触面积减小,大大削弱了动水压力对道路结构内部的作用。在轮胎—水膜—道路三者耦合作用过程中,动水压力对多孔路面结构的力学性能具有破坏作用,却能对孔道杂物具备冲刷作用;水漂作用虽然削弱了动水压力影响,客观上保护了多孔路面结构,但也增加了车辆行驶的危险性,并且对孔道清洁不利。该文旨在通过对轮胎—水膜—路面三者耦合作用的研究,探究考虑轮胎荷载和水漂作用综合影响下动水压力对多孔沥青路面结构的“自洁”机理。

### 1 计算模型的建立

#### 1.1 基本假定

双层排水沥青路面轮胎—水膜—道路耦合作用下孔道“自洁”作用是一个复杂的FSI(流固耦合)问题,

涉及汽车轮胎驱动机理、轮胎运动对水膜的复杂作用、水膜产生动水压力对轮胎的反向作用以及轮胎荷载动水压力对沥青路面孔道的冲刷作用。研究作出如下简化假设:

(1) 轮胎不会因为水漂作用旋转受到阻滞,轮胎长期保持匀速转动状态。

(2) 双层排水沥青路面集料具有相同的力学性能,不考虑各向异性状态。

(3) 双层排水沥青路面孔道结构采用 CT 扫描三维重构技术,假设 CT 扫描与重构精度足够高,足以表征沥青路面的几何性状。

## 1.2 计算模型建立过程

(1) 对制作好的双层排水沥青路面马歇尔试件进行 CT 扫描,并导入 Simpleware 软件中进行三维重构。

(2) 将重构完成的三维路面结构模型导入 Flow-3D 中,预设阻塞尘土以及路表水膜。

(3) 增加 Sediment-Scour(沉积物冲刷)计算模块,设置孔道中杂物沉积及冲刷的各项参数,考虑双层排水沥青路面孔道内部动水压力对尘土的沉积和冲刷效应以及沉积冲刷对孔道几何构造的影响。

(4) 在 Flow-3D 中加入轮胎,并对轮胎施加轴载作用以及初始速度。

(5) 采用 Couple-Motion(耦合运动)计算模型,模拟轮胎-水膜-路面三者耦合作用下孔道中杂物的冲刷作用。

## 2 多孔沥青路面三维重构技术

三维重构技术起源于 Allan M.Cormack 和 Godfrey N.Hounsfield 开发的 X 射线断层成像仪。之后随着时代的发展,诸如 GNA(凝聚型社区结构发现算法)、GDA(高斯判别分析法)、LMA(一种神经网络算法,为牛顿法和梯度下降法混合的一种算法)、VRM(基于体积数据结构的重建方法)的算法层出不穷,并被广泛用于机械、医疗等领域。而三维重构技术与有限元技术等数值模拟技术的结合也在近几年得到重视。三维重构技术具有以下流程:导入需要重构的物体断面图组→根据灰度设置阈值条件→三维重构→储存并导出为合适的文件。

其中,根据灰度确定阈值条件是三维重构的一个难点,由于 CT 扫描本身具有一定局限性,物体边界处产生阴影,影响三维重构时 Simpleware 软件对集料和

空气边界的判定。

如图 1 所示,双层排水沥青路面 CT 扫描图中灰度指数较低的部分一般为集料,灰度指数较高(接近 255)的部分一般为空气。但由于阴影的作用部分集料之间小的孔道被判定为集料,部分接近空气部分的集料被判定为空气。因此,研究假设阴影造成的 CT 扫描以及三维重构的误差较小,忽略不计,且假设直径小于 0.5 mm 的孔道对排水效应影响不大,“自洁”作用对直径小于 0.5 mm 的孔道效应也可忽略不计。三维重构后的沥青混合料试件如图 2 所示。

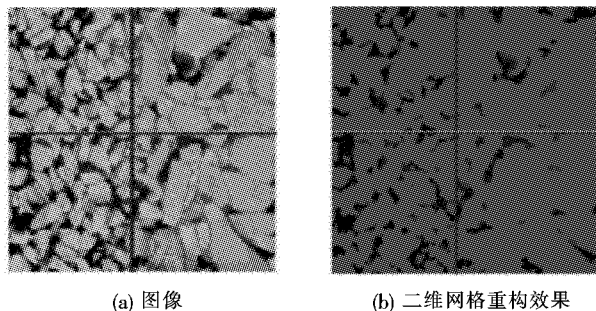


图 1 CT 扫描

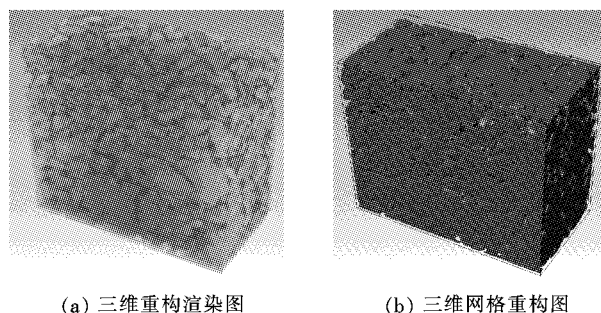


图 2 沥青混合料试件三维重构图

三维重构所得路面模型尺寸较小,且文件格式为 igs 格式,不利于保存,该文将文件保存为 stl 格式,采用 Flow-3D 中的 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation)功能重构双层排水沥青路面 PAC 试件,并通过镜像阵列方式构建双层排水沥青路面。将路面结构力学模型设为 Deformable Solid,并设置力学参数,路面结构尺寸及力学参数如表 1 所示。

表 1 双层排水沥青路面几何及力学参数

几何尺寸/(m×m×m)	弹性模量/MPa	泊松比
0.5×0.2×0.065	2 000	0.25

## 3 轮载作用下孔道“自洁”效应分析

轮胎-水膜-路面三者耦合作用下孔道中杂物的

冲刷作用为水漂模型、动水压力模型以及沉积物冲刷模型三者耦合的模型,本质都是流固耦合模型。流固耦合(FSI)分析是计算流体力学和固体力学的耦合分析,宏观思路主要有 Lagrangian—Lagrangian 法、Eulerian—Eulerian 法和 Lagrangian—Eulerian 法,耦合面上计算主要包括迭代法(即流体固体不同时计算,采用迭代收敛的方式进行计算)和直接法(直接将流体力学微分方程与固体力学微分方程耦合为一个方程,同时计算流体和固体的力学响应)。随着流固耦合算法的不断改良并运用于实际工程,很多实际工程中存在的问题得到了理论上的解释。

研究综合考虑了车辆轴载作用下多孔沥青路面路表的水漂效应、动水压力效应以及孔道杂物冲刷效应,探究了双层排水沥青路面在轴载作用下的复杂机理。

### 3.1 考虑水漂效应的动水压力分析

动水压力是排水性沥青路面在降雨天气车辆荷载作用下的结果。根据国内外学者的研究结果,车辆在不同路段上以不同行驶速度行驶时产生的孔隙内动水压力是不同的。高阳等通过动应力传感器,结合理论分析,阐释了路表动水压力正负交替,且随速度增长指数增长的过程,分析得到路表动水压力集中在 25~350 kPa 范围内。

水漂指轮胎与路面在水层作用下脱离接触而引起的车辆方向的失控,根据原因,水漂可以分为 3 类:动水压力引起的动力水漂,水膜中混入泥浆改变水膜物理性能产生的黏滞性水漂以及轮胎路面橡胶反源性水漂,其中,动力水漂最为常见。动力水漂不仅使轮胎打滑,影响驾驶,也会很大程度上削弱动水压力。水漂效应使得匀速行驶的车辆产生的动水压力逐渐趋于稳定,有利于排水路面结构内部受力(图 3)。

由图 3 可知:车辆启动时,轮胎动载作用下轮胎下部双层排水沥青路面结构内部动水压力最大,之后动水压力作用将轮胎抬起,使得轮胎运动和荷载作用对孔道中水的扰动减小,进而轮胎底部动水压力减小;随着动水压力的减小轮胎与水的接触面又会失去平衡,轮胎产生向下加速度;随着时间的推移,轮胎动水压力形成最终的动态平衡。

研究以水膜厚度 5 mm、车速 70 km/h、孔道杂物当量粒径 0.1 mm 为标准组,变化水膜厚度、车速以及孔道杂物当量粒径条件,探究不同水膜厚度、不同车速、不同孔道杂物当量粒径条件下的动水压力,旨在探究动水压力对孔道自洁效应的影响。试验结果见图 4~6。

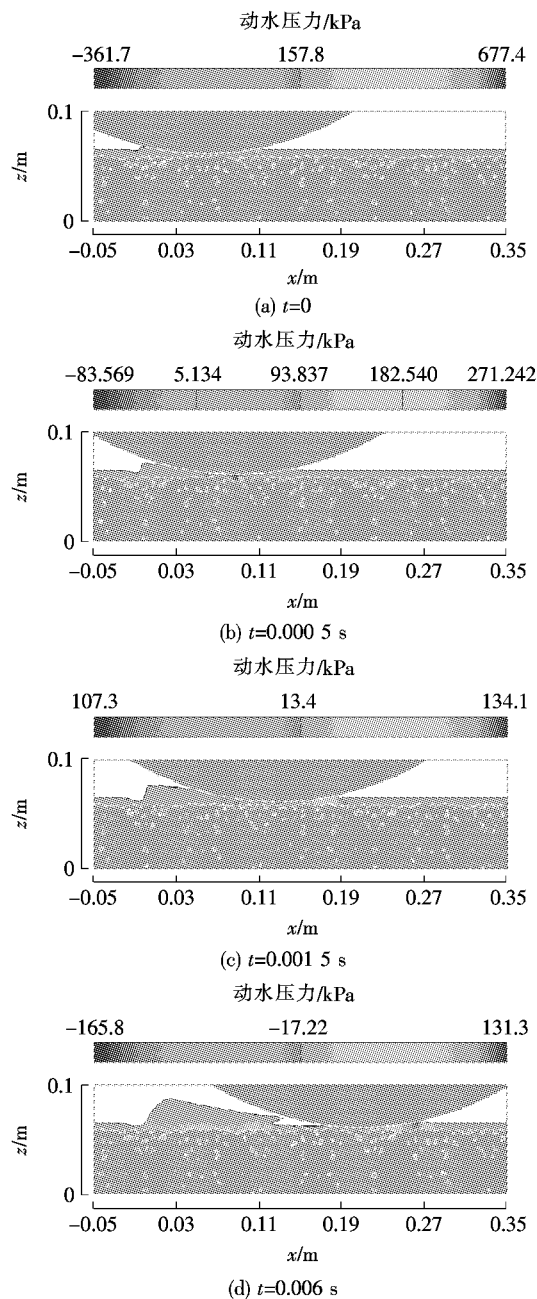


图 3 双层排水沥青路面

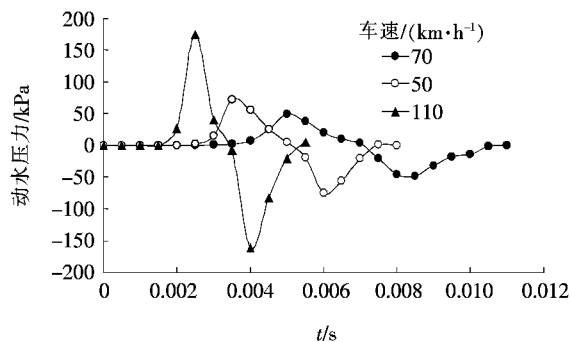


图 4 路面板表面(1.71 m, 1.71 m)处不同车速条件下动水压力随时间的分布

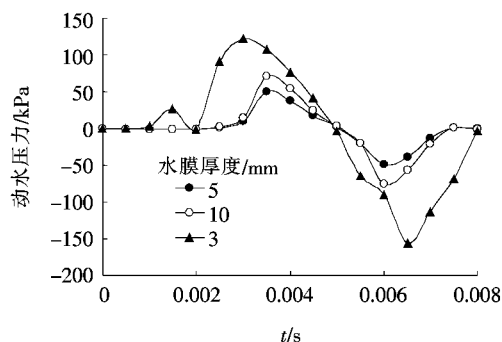


图5 路面板表面(1.71 m,1.71 m)处不同水膜厚度条件下动水压力随时间的分布

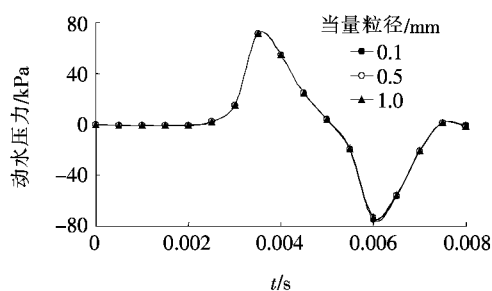


图6 路面板表面(1.71 m,1.71 m)处不同孔道杂物当量粒径下动水压力随时间的分布

由图4可知:孔道内部动水压力随车速增加呈指数增长,车速每提高30 km/h,最大动水压力就会增长将近1倍。

由图5可知:孔道内部动水压力随水膜厚度增长而增大,当水膜厚度大于5 mm时,动水压力急速增长,原因在于水膜厚度越大,水膜与轮胎接触面积越大,轮胎对水膜的扰动越大,动水压力越大。

由图6可知:孔道杂物粒径小于1.0 mm时杂物粒径对动水压力影响不大,此时杂物尚不能完全阻塞孔道,影响动水压力。

### 3.2 孔道杂物冲刷效应

孔道阻塞问题是双层排水沥青路面一直以来面临的重大工程难点,现阶段虽然有诸多孔道杂物清理方式,但这些方式均耗时耗力,且养护成本巨大。近年来,国内外在研究排水性沥青路面孔道阻塞时也着重研究排水性沥青路面孔道阻塞的原因,且认为孔道阻塞无法在设计阶段得到预防。该文致力于探究双层排水沥青路面孔道杂物的自我清洁能力,并阐释“自洁”的产生机理,为设计及使用阶段预防孔道阻塞提供参考。

为耦合分析“自洁”效应中的轮胎—路面—孔道杂物—水膜各组成部分,研究采用Flow—3D中的Coupled—Motion模块耦合分析滚动轮胎、水膜和路表的

FSI(流固耦合)力学响应,采用Sediment—Scour模块分析动水压力作用下孔道杂物的冲刷清理过程。并在最终的数值模拟模型中将两个模块合并,综合分析了车辆荷载作用→路面产生力学响应→水膜扰动→动水压力产生→孔道内杂物得到清理的全过程。

为模拟双层排水沥青路面在动水压力作用下的“自洁”作用,研究在路面结构孔道内部布置了部分尘土,在预设水将孔道填充之后以轮胎运动的方式经过水膜,产生动水压力,进而模拟尘土“自洁”的效应。孔道“自洁”效应采用Sediment—Scour(沉积物冲刷模型)进行模拟。模型计算公式如下:

$$V_f = SCRALP \sqrt{\frac{\tau - \tau_c}{\rho}} \quad (1)$$

$$\tau_c = vof \times \rho_s \times R_s \times g(\rho_s + \rho_f) \quad (2)$$

式中: $V_f$ 为杂物上升速度(m/s); $SCRALP$ 为冲淤率,一般取为0.1; $\tau_c$ 为临界剪应力; $vof$ 为杂物在液体中的体积含量; $\rho_s$ 、 $\rho_f$ 、 $R_s$ 分别为杂物密度、流体密度以及杂物当量直径。

将尘土预设参数导入模型后,即可在Flow—3D中进行数值仿真模拟,模拟结果如表2~4所示。

表2 不同车速条件下路面板表面一次动水压力循环析出杂物数量

车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	析出杂物 质量/mg	析出杂物速度/ (mg·s <sup>-1</sup> )
50	4.63	160.76
70	4.94	240.14
110	3.93	300.21

由表2可知:车速越快,动水压强越大,单位时间析出杂物质量较大,但是速度较快时,与路面结构接触时间会减少,因此一次轮载作用产生动水压力析出杂物的数量反而不会多。因此,同等车流量条件下车速越快孔道自洁效应不一定好,并且还会因为动水压力过大对结构内部产生损伤。

表3 不同水膜厚度条件下路面板表面一次动水压力循环析出杂物数量

水膜厚度/ mm	析出杂物 质量/mg	水膜厚度/ mm	析出杂物 质量/mg
3	4.62	10	4.75
5	4.63		

由表3可知:水膜厚度越大,动水压力越大,析出杂物质量越大,但差别并不明显,原因在于水膜厚度大

时虽然整体动水压力增大,但只集中在路表面,路面结构内部受到的动水压力扰动较小。

表4 不同孔道杂物粒径条件下路面板表面一次动水压力循环析出杂物数量

孔道杂物 粒径/mm	析出杂物 质量/mg	析出杂物颗 粒量/个
0.1	4.63	2 013
0.5	20.50	71
1.0	40.30	18

由表4可知:杂物当量粒径越大,析出数量越少,由式(1)可知:当量粒径越小临界剪切力越小,杂物越容易被析出,试验与公式结论一致。但由于单个小粒径颗粒质量远小于大粒径颗粒的质量,因此大粒径颗粒析出质量反而大,相同质量的杂物大粒径更容易被析出。

#### 4 结论

基于Flow-3D中各流体力学计算模块,对双层排水沥青路面“自洁”机理进行了研究,分析了水漂作用、轮胎荷载作用、轮胎平动和滚动作用等对双层排水沥青路面孔道杂物的析出影响,可得如下结论:

(1) 水漂现象不仅会影响车辆行驶的安全性,也会削弱轮胎荷载对路表的动水压力作用,使得动水压力趋于平稳。

(2) 车速越快,路表动水压力越大,单位时间析出孔道杂物越多,但一次荷载循环作用下析出杂物反而不一定多。

(3) 水膜厚度越大,路表动水压力越大,但单位时间析出孔道杂物差别不大,原因在于较厚的水膜会阻断轮胎对孔道内部水的扰动。

(4) 孔道内部杂物粒径不会影响动水压力的大小,同等动水压力条件下小颗粒析出数量较多,大颗粒析出质量较大。

#### 参考文献:

- [1] Razzaghmanesh M, Borst M. Investigation Clogging Dynamic of Permeable Pavement Systems Using Embedded Sensors[J].Journal of Hydrology, 2018, 557(C):887—896.
- [2] Siriwardene N R, Deletic A, Fletcher T D. Clogging of Stormwater Gravel Infiltration Systems and Filters: Insights from a Laboratory Study [J]. Water Research, 2007, 41(7):1 433—1 440.
- [3] Welker A L, Jenkins J K G, Mccarthy L, et al. Examination of the Material Found in the Pore Spaces of Two Permeable Pavements[J].Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2013, 139(4):278—284.
- [4] Brown R A, Borst M. Assessment of Clogging Dynamics in Permeable Pavement Systems with Time Domain Reflectometers[J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 139(10):1 255—1 265.
- [5] Yong C F, Mccarthy D T, Deletic A. Predicting physical Clogging of Porous and Permeable Pavements[J].Journal of Hydrology, 2013, 481:48—55.
- [6] 蒋玮,沙爱民,肖晶晶,等.多孔沥青混合料的空隙堵塞试验研究[J].建筑材料学报, 2013(2).
- [7] 谢西,姜成,林晨彤,赵金辉.透水混凝土路面阻塞及恢复效果研究[J].中外公路, 2019(1).
- [8] 徐杰,康爱红,娄可可,等.透水沥青混合料空隙堵塞行为特性研究[J].住宅与房地产, 2016(15).
- [9] Coleri E, Harvey J T, Yang K, et al. Micromechanical Investigation of Open-Graded Asphalt Friction Courses' Rutting Mechanisms[J].Construction & Building Materials, 2013, 44:25—34.
- [10] 马涛,张斯琦,陈泳陶.基于离散元法的多孔沥青混合料空隙衰变研究[J].建筑材料学报, 2017(5).
- [11] Allan M, Cormack, 王纯,秦家楠.早期二维重建及近来由此而生的一些课题[J].世界科学译刊, 1980(10).
- [12] 高阳,邹晓翎,张童童.考虑动水压力影响的沥青路面损伤机理研究综述[J].中外公路, 2018(4).
- [13] 刘清泉.国外有关水漂的研究以及我国在制定防滑标准中的考虑[J].公路, 1986(9).
- [14] 唐勇斌,徐国元,龙翔,等.路面结构内部排水系统排水效果的数值分析[J].中外公路, 2016(5).