

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0054-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.011

不同裂缝形式下沥青混凝土路面内孔压变化规律研究

俞逸舟

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 为了研究车辆荷载作用下沥青混凝土路面中裂缝孔压的变化规律及其对路面质量的影响, 基于 Biot 固结理论及裂隙渗流和流固耦合理论, 利用 COMSOL Mutiphysics 建立沥青混凝土路面结构三维流固耦合模型。对比当车辆移动荷载经过时无裂缝、横向裂缝、纵向裂缝和交叉裂缝四种路面情况下沥青混凝土路面的孔隙水压力增长、消散规律和路面形变。数值分析结果表明: 相对于横向裂缝, 纵向裂缝的存在更有利于孔隙水压力的消散; 横向裂缝和交叉裂缝存在时孔隙水压最大, 从而加剧了路面的水损害; 裂缝对路面形变无显著影响。

关键词: 沥青混凝土路面; 裂缝; 孔隙水压力; 水损坏

中图分类号: U416

文献标志码: A

Study on pore water pressure of asphalt concrete pavement with different cracks

YU Yizhou

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on Biot consolidation theory, fluid flow through fractures and fluid-solid coupling theories, a three-dimension model of concrete pavement is established in COMSOL Mutiphysics software to study variation of the pore water pressure through fractures and whether it can exert bad effects on the pavement under the vehicle loads condition. The displacement of pavement, variation trend and dissipating regular of pore water pressure are compared while vehicle passed the reference line of the road under four different pavement conditions, including non-crack, horizontal crack, perpendicular crack and cross crack. The results of numerical analysis show that perpendicular crack has a positive effect on the dissipation of pore water pressure compared to the horizontal one. Pore water pressure reaches peak on the pavement full of horizontal and cross cracks, which damage the road itself to some extent. Fractures have no significant effects on the displacement of the pavement.

Key words: concrete pavement; crack; moisture damage; pore water pressure.

沥青混凝土路面具有结构承载力高、耐久性好、寿命长等特点, 在我国城镇及乡村道路中得到广泛应用。而在实际工程中沥青混凝土路面反弹颠簸大, 其路面变形受移动荷载及不同干湿条件影响, 路面设置的接缝极易破坏, 存在着较为突出的路面早期水损坏问题^[1-2]。绝大多数沥青混凝土路面在施工完成后的一年到二年内都会发生不同程度的损坏^[3-11]。国内关于沥青混凝土裂缝内水压力的研究主要集中于

试验层面^[12-13], 且大多研究基于静水压力作用条件下, 而实际工程中路面多是承受移动荷载。为了研究移动车辆荷载作用下不同裂缝形式的沥青混凝土路面内孔压变化规律, 本文引入裂隙渗流理论及比奥固结理论, 并讨论对数值分析模型的适用性; 采用 COMSOL Mutiphysics 建立四种路面模型; 对比分析车辆移动荷载经过时沥青混凝土路面孔隙水压变化规律。通过数值分析研究, 可为实际沥青混凝土

收稿日期: 2018-03-06

基金项目: 国家重大专项 (ZB01K08)

作者简介: 俞逸舟 (1992-), 男, 浙江宁波人, 硕士, 从事岩土力学方面的研究。

土路面施工提供一定借鉴意义。

1 裂隙渗流理论

路面裂缝中存在的孔隙水是沥青混凝土路面水损坏中最为关键的影响因素，路面水损坏作用与孔隙水压力以及沥青混凝土颗粒中的应力应变情况有关。因此研究沥青混凝土路面破坏形式首先需要研究孔隙水压与行车荷载的耦合作用。

比奥固结理论从较为严格的固结机理推导了岩土体中孔隙压力的消散和土体的固结变形之间的关系。岩土体的变形由附加应力和动水压力对土体的协同作用导致。上部荷载造成岩土体体积应变，动水压力亦对岩土体造成压缩或拉伸。这两种荷载造成的体积应变会对动水压力造成影响，而动水压力造成的压缩或者拉伸也对上部荷载产生反作用，两者达到平衡状态时得到的土体变形即为岩土体的最终变形。比奥固结理论系统地讨论了流固耦合理论，能够相对准确地反映饱和土体因外力产生的土体内部附加应力和孔隙压力的相互影响直至平衡的整体过程。沥青混凝土路面中由于受到孔隙水的作用，其性质跟土体类似。若假设沥青混凝土路面中水达到饱和状态，路面本身的变形十分微小，且沥青混凝土和孔隙水不能被压缩，便可利用比奥固结理论来模拟沥青混凝土在行车荷载下的水损坏作用。

数值模拟中裂缝常规的处理方式是建立实体单元，单独划分网格，而由于裂缝的尺寸与模型相比很小，划分出的网格非常的细小，不仅计算难以收敛，结果也往往和实际情况不相符。裂隙渗流理论以达西定律为基础，对裂缝的切向求梯度，规定了流体只沿着裂缝的切向流动，而不沿着其他方向流动。通过裂隙渗流理论，可以不用建立实体单元来描述裂缝，并且计算出的结果要比实体单元可靠，理论公式如下所示：

$$\vec{q}_f = -\frac{k_f}{\mu} d_f (\nabla_T p + \rho g \nabla_T D) \quad (1)$$

$$d_f \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_f \rho) + \nabla_T (\rho \vec{q}_f) = d_f Q_m \quad (2)$$

公式(1)为达西定律对于裂缝切向方向求梯度，公式(2)为质量守恒定律。 \vec{q}_f 为裂缝中单位长度的体积流率， k_f 为裂缝的渗透系数， μ 为动力粘度， d_f 为裂缝宽度， ∇_T 为裂缝沿着切线平面的梯度算子， ρ 为流体密度， p 是水压力， D 代表垂直坐标， ε_f 为裂缝孔隙度， Q_m 为质量源项。

2 流固耦合数学模型

2.1 路面结构模型及材料参数

根据黄上公路实际情况，采用面层、中间层和基层三层结构来模拟沥青混凝土路面，沥青混凝土路面基层下为路基。参考黄上公路实际路面厚度以及公路水泥沥青混凝土路面设计规范(JTGD40-2011)^[14]，路面的宽度取为12 m，并在两侧设置缓冲带，沥青混凝土面层的厚度取为0.15 m，中间层的厚度取为0.20 m，基层的厚度取为0.3 m，各层材料参数如表1所示。基层下部铺设厚度为1 m的普通路面代表路基。路基下取一个宽度大于路基，厚度远远大于沥青混凝土层和路基层之和的地基层，代表实际情况中路面之下的路基，并且平面尺寸远大于上部主要研究部分，以此消除边界效应，其材

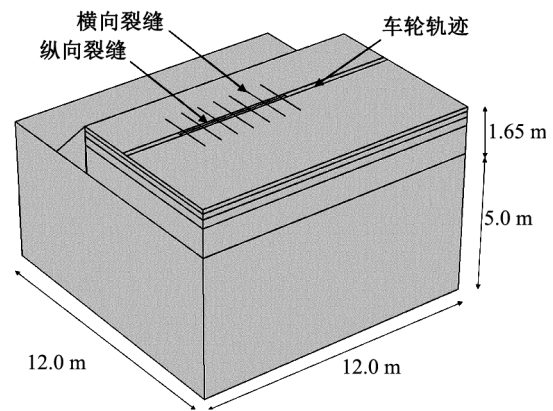


图1 简化后沥青混凝土路面模型
Fig.1 Simplified model of concrete pavement

表1 沥青混凝土路面各层路面参数

Tab.1 Table of parameters of each layer in concrete pavement

沥青混凝土路面分层	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	杨氏模量/MPa	孔隙率	比奥固结系数	渗透系数/(ms ⁻¹)
面层	2 500	0.25	1 000	0.05	1	1.5 × 10 ⁻⁸
中间层	2 200	0.3	1 500	0.05	1	1.5 × 10 ⁻⁸
基层	1 980	0.35	750	0.05	1	1.5 × 10 ⁻⁸

料参数如表 2 所示。由于车辆其本身为中间对称,并且路面的形状、边界条件也对称于汽车的中轴。因此根据对称性,可以取路面模型的一半进行计算,简化后的路面模型如图 1 所示。为了通过控变量法研究裂缝的不同方向对水损坏的不同反应情况,将横纵向裂缝的取值保持一致,裂缝的材料参数取值如表 3 所示。裂缝的渗透系数取 0.02 m/s,以保证路面的水能够通过裂缝迅速的排入路面中。

2.2 边界条件

通过应力场和渗流场的耦合求解,边界条件分为固体力学的边界条件和达西渗流定律的边界条件。固体力学的边界条件:在四周约束模型,使模型只产生竖向位移,而不产生径向位移。并且在模型的底部添加固定约束,使模型既不产生竖向位移,也不产生径向位移。达西渗流定律边界条件:模型顶部设置初始孔隙水压力为零,设置模型四周的水头为零,其他位置设置为不透水边界条件。

2.3 荷载施加

根据实际工程中路面所受的荷载,采用正弦函数来描述轮压,轮压的作用方程参考前人的研究^[3],如下式:

$$\begin{cases} P = P_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{T}t\right) & 0 \leq t \leq T \\ p = 0 & t > T \end{cases} \quad (3)$$

式中 P_{\max} 为轮压的峰值荷载,轮压的作用曲线如图 2 所示。

轮压峰值取值依据黄上公路的车辆荷载,黄上公路行车多为大型货车,且超载情况严重。根据陈

忠达^[10]的研究,轮压与车辆荷载的关系如表 4 所示,参考公路工程技术标准(JTGB01-2014)^[15],大型货车的正常轮压为 0.7 MPa,考虑到超载的情况取轮压值为 1.0 MPa。

黄上公路的设计车速为 80 km/h,而黄上公路主要行车类型为大型货车,平均车速未达到设计车速,因此车速取 72 km/h,轮距取 2 m。

3 计算结果及分析

为了便于分析,在模型上取若干参考位置如图 3 所示:在横向和纵向裂缝交点下沥青混凝土表层中间取一点,以便观察横纵裂缝交点下的参数;在沿着车辙路线的沥青混凝土表层下取一条线,用以分析车辆通过的情况下路面响应;在垂直车辙方向取一条线,观察与车辙方向垂直的路面反应情况。

3.1 参考点下孔隙水压力变化

由图 4 可以看出,随着荷载逐渐向参考点移动,

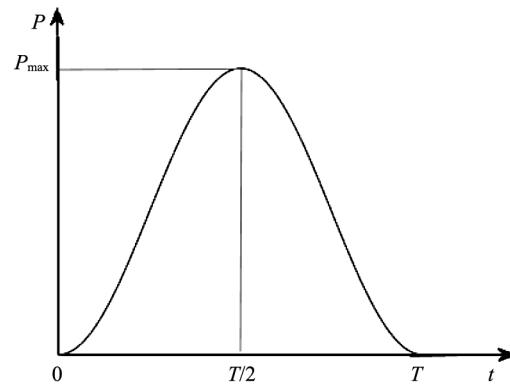


图 2 轮压作用曲线

Fig.2 Curve of wheel pressure

表 2 沥青混凝土路面下土层参数

Tab. 2 Table of parameters of lower soil layer under concrete pavement

参数	渗透系数/(m·s ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	孔隙率	杨氏模量/MPa	比奥固结系数
取值	1.5 × 10 ⁻⁶	2 500	0.25	0.2	1 000	1

表 3 沥青混凝土路面裂缝参数

Tab. 3 Table of crack parameters of concrete pavement

参数	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	孔隙率	杨氏模量/MPa	比奥固结系数	渗透系数/(m·s ⁻¹)	粘聚力/kPa	内摩擦角/deg
取值	1 600	0.4	0.08	42	1	0.02	25	20

表 4 轮压与车辆荷载的关系

Tab. 4 Table of relationship between wheel pressure and vehicle load

轮压 p/MPa	0.7	0.8	0.9	1.0
轴载/kN	100	122.8	147.2	173.1

参考点处的孔隙水压力短时间内便可上升至峰值(80.9 kPa), 此时荷载主要由孔隙水来承担; 随着荷载的移动孔隙水压力逐渐减小至负值(-11.4 kPa), 此时孔隙水又重新吸回孔隙处; 当荷载继续移动时, 负的孔隙水压力也随之逐渐消散。上述分析得出: 在移动荷载作用下, 沥青混凝土路面中的孔隙水压力具有波动性质, 不断对路面内部孔隙产生“类泵吸”作用, 混合料被孔隙水不断地冲刷, 进而导致了路面的损坏。在无裂缝的情况下, 车辆通过后的孔隙水压要远大于其他几种情况。这是由于路面的渗透性很差, 并且路面中的水为饱和状态, 当车辆通过时, 由于路面内部的水流动极慢, 产生的孔隙水压力难以消散, 因此产生了极大的孔隙水压力。

3.2 车辙下孔隙水压力变化

图5—图8分别为无裂缝、纵向裂缝、横向裂缝和交叉裂缝存在的情况下车辙路线上的孔隙水压力。前车轮经过参考车辙路线所需的时间为0.5 s, 当车轮驶离车辙路线时(0.5 s), 各不同路面情况下的孔隙水压力均达到最大值。由于此时边界不透水,

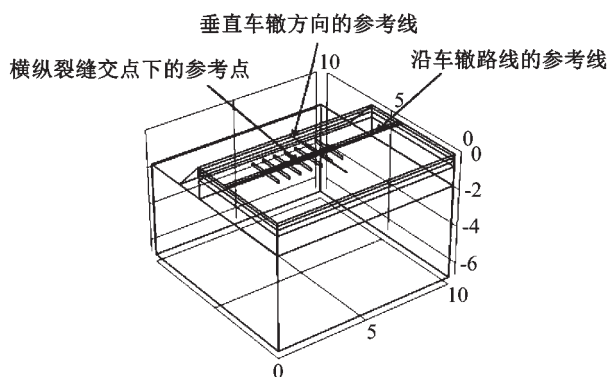


图3 模型选用的参考点及参考线

Fig.3 Reference points and reference lines in model

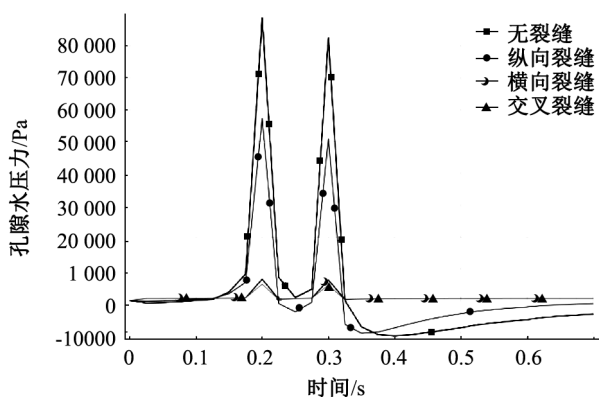


图4 参考点的孔隙水压力

Fig.4 Pore moisture pressure at reference points

孔隙水压力在前后车轮的作用下积聚在边界无法消散, 从而达到了一个极大值。可以看出, 当裂缝不存在时, 三条曲线的峰值孔隙水压力的值大致相同, 路面在裂缝不存在时保持各项同性, 故车轮通过任何一个位置时车轮下的孔隙水压力都保持相同。图6中曲线的峰值与图5中的峰值相同, 而车辙路线的中间区域的峰值孔隙水压力低于路线两端区域,

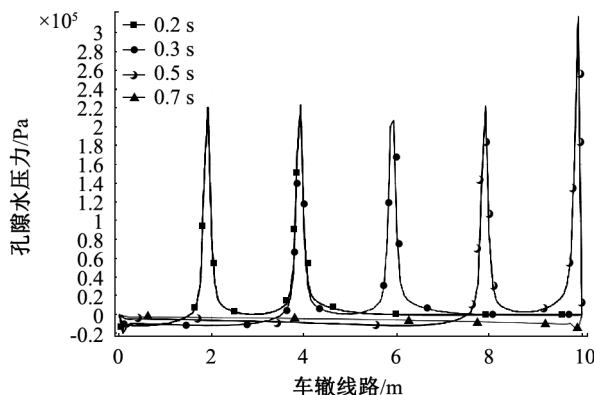


图5 车辙线路上的孔隙水压力(无裂缝)

Fig.5 Pore moisture pressure on the track (no cracks)

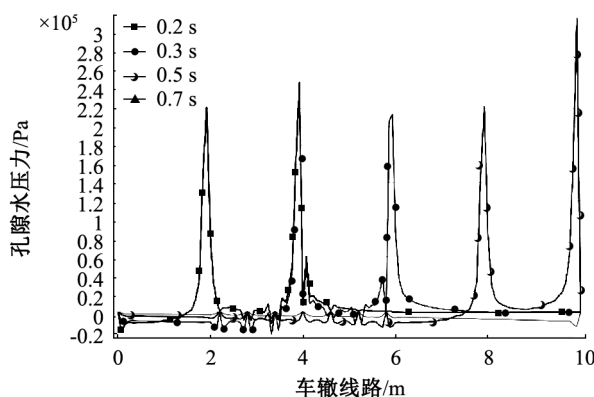


图6 车辙线路上的孔隙水压力(纵向裂缝)

Fig. 6 Pore moisture pressure on the track (longitude cracks)

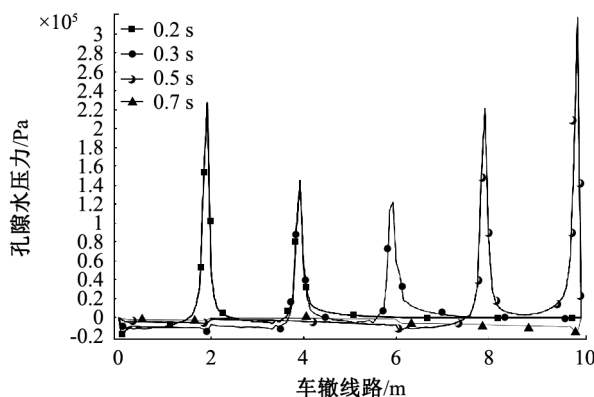


图7 车辙线路上的孔隙水压力(横向裂缝)

Fig. 7 Pore moisture pressure on the track (transverse cracks)

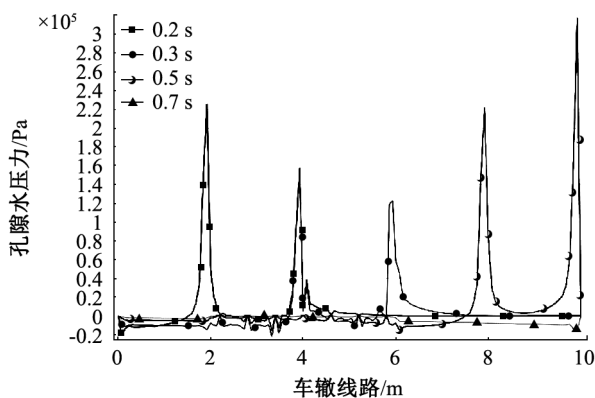


图8 车辙线路上的孔隙水压力(交叉裂缝)

Fig.8 Pore moisture pressure on the track (cross cracks)

其原因可能是纵向裂缝的存在导致了部分孔隙水压力的消散。图7中的曲线大致与裂缝不存在时的曲线相同,但是0.2 s时前车轮下的孔隙水压力峰值大于其他峰值,并且车轮通过之后孔隙水压力有较大波动。在横向裂缝存在的情况下,车辆通过后孔隙水压在一定的时间内仍然有很大的波动,不利于路面抵抗水损坏性能的发。如图8,交叉裂缝存在的情况下,车辙两端(即裂缝不存在的地方)达到的峰值孔隙水压力与裂缝不存在时保持一致,无裂缝存在位置达到的峰值孔隙水压力则小于横向裂缝存在时的峰值孔隙水压力,交叉裂缝在压实路面的条件下更利于孔隙水压力的消散。交叉裂缝存在时孔隙水压力的波动较大,这不利于路面抵抗水损坏。纵向裂缝和交叉裂缝存在的情况下,孔隙水压力的峰值比无裂缝和横向裂缝时小,这说明路面中的孔隙水压力能够沿纵向裂缝方向消散,而横向裂缝对孔隙水压力的消散则没有明显作用。

4 结论

1) 利用比奥固结理论和裂隙渗流理论,对沥青混凝土路面的渗流场和应力场进行模拟,可有效反映动荷载下沥青混凝土路面内的孔隙水压力的剧增和耗散过程,以及裂缝对路面渗流场及应力场的影响,同时可减小裂隙的建模难度及求解时间。

2) 当车辆移动荷载经过时,路面内部的孔隙水压力呈波动状态,混合料不断受到孔隙水的冲刷,导致沥青混凝土路面的水损坏。路面中的孔隙水压力能够沿纵向裂缝的方向消散,而横向裂缝对孔隙水压力的消散则未有明显的作用;横向裂缝和交叉裂缝存在的情况下,路面中的孔隙水压力最大,说

明横向裂缝和交叉裂缝存在时,沥青混凝土路面抵抗进一步的水损坏能力最差,出现这两种裂缝时应及时修复。

参考文献:

- [1] 刘涛,崔勇欣.公路路面早期水损害形成原因及防治措施[J].技术与市场,2013(9):90.
- [2] 游金梅,宋建国.路面结构排水设计及排水数值模拟[J].公路工程,2017(4):164-168.
- [3] BAHADOR M, EVANS T M, GABR M A. Modeling Effect of Geocomposite Drainage Layers on Moisture Distribution and Plastic Deformation of Road Sections[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(9): 1407-1418.
- [4] DAN Hancheng, XIN pei, LI Ling, et al. Capillary effect on flow in the drainage layer of highway pavement[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2012, 39(6): 654-666.
- [5] 王文胜.浅埋大跨黄土隧道下穿公路方案比选[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(2):45-49.
- [6] 邵博文,岳祖润.深季节冻土区哈齐客专路基现场试验[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(1):66-70.
- [7] 岳祖润,程佳.季节性冻土地区保温护道路基温度场数值模拟[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(3):25-29.
- [8] 刘建敏.横向加筋注浆技术防治高速公路桥头跳车技术研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(4):39-47.
- [9] 董泽蛟.水-荷载耦合作用下路面孔隙水压力研究[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(10):1614-1617.
- [10] 颜华,胡华锋,曾晓辉,等.静水作用下板式无砟轨道CA砂浆力学性能变化[J].高速铁路技术,2014,5(4):56-61.
- [11] 张凌之,徐坤,杨荣山.双块式无砟轨道轨枕脱空处水的特性研究[J].铁道标准设计,2014(2):17-21.
- [12] 徐世焯,王建敏.静水压力下沥青混凝土双K断裂参数试验测定[J].水利学报,2007,38(7):792-798.
- [13] 黄云,金峰,王光纶,等.高拱坝上游坝踵裂缝稳定性及其扩展[J].清华大学学报:自然科学报,2002,42(4):555-559.
- [14] JTG D40-2011,公路水泥沥青混凝土路面设计规范[S].
- [15] JTG B01-2014,公路工程技术标准[S].

(责任编辑 王利君)