

文章编号:1671-1637(2012)01-0006-07

水泥混凝土路面半刚性基层的孔隙水压力特性

盛燕萍¹, 陈拴发¹, 王 栋², 汪林兵²

(1. 长安大学 交通铺面材料教育部工程研究中心, 陕西 西安 710061;

2. 弗吉尼亚理工大学 土木与环境工程系, 弗吉尼亚 黑堡 24061)

摘 要:基于多孔介质弹性理论,运用 ABAQUS 有限元分析软件对水泥混凝土路面半刚性基层的孔隙水压力进行了数值模拟,计算了不同外部荷载和路面结构条件下的基层孔隙水压力分布规律。分析结果表明:在饱水状态下,基层孔隙水压力随面层厚度、面层模量、基层厚度与基层渗透系数的增大而减小,随基层模量的增大而增大,但面层和基层模量对孔隙水压力的影响不显著;孔隙水压力随交通荷载的增大而呈线性增大,在荷载相同时,荷载分布越密集,对基层孔隙水压力分布的影响越显著,加载模式只影响孔隙水压力的消散过程;孔隙水压力随车速度的增大而增大,消散过程加快。

关键词:路面工程;水泥混凝土路面;半刚性基层;多孔介质弹性理论;孔隙水压力;数值模拟

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Pore water pressure characteristics of semi-rigid base for cement concrete pavement

SHENG Yan-ping¹, CHEN Shuan-fa¹, WANG Dong², WANG Lin-bing²

(1. Engineering Research Center of Transportation Materials of Ministry of Education, Chang'an University,

Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering,

Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg 24061, Virginia, USA)

Abstract: The pore water pressure of semi-rigid base for cement concrete pavement was simulated by using finite element analysis software ABAQUS based on poroelasticity, and the distribution laws of pore water pressure along the base depth were calculated under different external loading conditions and pavement structures. Analysis result shows that in water-saturated state, pore water pressure decreases with the increase of surface thickness, surface elastic modulus, base thickness and base permeability, but increases with the increase of base elastic modulus. The elastic moduli of surface and base have no obvious impacts on pore water pressure. Meanwhile, pore water pressure linearly increases with the increase of traffic load. With the same load, denser load distribution impacts pore water pressure distribution more significantly. Loading modes only influence the dissipation of pore water pressure. With the increase of vehicle speed, pore water pressure increases, and its dissipation becomes fast. 2 tabs, 16 figs, 10 refs.

Key words: pavement engineering; cement concrete pavement; semi-rigid base; poroelasticity; pore water pressure; numerical simulation

Author resume: SHENG Yan-ping(1981-), female, lecturer, PhD, +86-29-82337366, shengyan-ping2003@yahoo. com. cn.

收稿日期:2011-09-23

基金项目:国家自然科学基金项目(50978031,51108038);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC054)

作者简介:盛燕萍(1981-),女,浙江临安人,长安大学讲师,工学博士,从事道路材料与结构研究。

0 引言

半刚性基层材料抗冲刷性能差是造成水泥混凝土路面板底脱空的主要原因。半刚性基层冲刷过程可以分为 3 个阶段:自由水的浸泡软化、静水压力下的溶蚀与动水压力下的冲刷^[1]。降水大部分会经过路面排水设施排出,但如果降水量较大或路表排水不畅时,小部分降水会沿着路面接缝渗入路面结构内部,并积聚在路面板接缝的底部,软化基层表面材料,使材料颗粒与基层基体之间的粘结力降低。在接缝没有形成水通道前,由于行车荷载的作用,自由水在浸泡的基层内部会产生孔隙水压力,加速磨蚀基层材料,并直接导致基层顶面颗粒脱落。水通道形成后,基层表面松散的颗粒极易被脉动水流冲刷带走,当脉动水流压力足够大时,自由水甚至会沿路面板之间的开口接缝处喷射而出,即形成典型的“唧泥”现象^[2]。可见冲刷第 2 阶段中孔隙水压力的存在对后续的冲刷起着重要的作用,因此,有必要对此进行研究。

孔隙水压力的数值模拟在沥青路面水损坏中的研究较多,Kutay 等基于 Lattice Boltzmann 法,分析了流动水对沥青路面结构内部孔隙水压力和剪应力的影响^[3];Zhou 等运用 Galerkin Weighted Residual 方法测算沥青路面孔隙水压力的大小^[4];Cui 等基于 Biot 固结方程,将沥青混合料看作多孔介质,对饱水沥青路面进行了快速 Lagrange 有限差分分析^[5];钟阳等将浸水沥青路面视为多层饱和弹性半空间轴对称体,利用 Hankel 和 Laplace 积分变换等数学方法以及 Boit 固结方程,推导出外部荷载作用下沥青路面超孔隙水压力问题的精确解^[6];罗志刚等运用轴对称有限元方法分析了不同等级轴载作用下沥青混凝土路面层间孔隙水压力的变化规律^[7];傅搏峰等运用有限元模拟分析了孔隙水压力对沥青路面受力状态的影响,以及在孔隙水存在的情况下,沥青路面在车载作用下的疲劳损伤过程^[8];董泽蛟等基于饱和多孔介质弹性理论,通过轴对称有限元的瞬态动力分析,计算了饱水沥青路面内部孔隙水压力的时程变化^[9]。可见多孔介质弹性理论在道路工程中的运用主要集中在沥青路面孔隙水压力的数值模拟中,对半刚性基层进行孔隙水压力的数值模拟鲜有报道。本文借鉴以上的研究成果,基于多孔介质弹性理论^[10],运用 ABAQUS 有限元软件,计算不同工况下水泥混凝土路面半刚性基层

受冲刷破坏的影响因素与规律。

1 多孔介质弹性模型

在弹性力学的基础上,将内部孔隙水压力的多孔结构,可以视为包含一个小圆孔的板,其理论模型见图 1。沿着孔的边缘的切向应力

$$\sigma = \frac{R^2/\rho^2 - 1}{R^2/r^2 - 1}t$$

式中: r 为孔的半径; R 为板的半径; t 为内部的压力分布; ρ 为液体的密度。

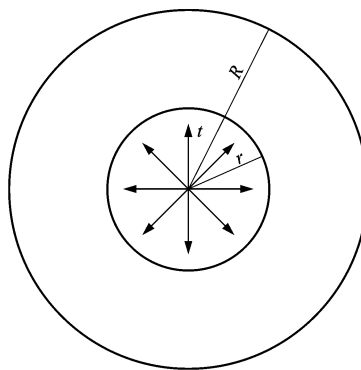


图 1 理论模型

Fig. 1 Theoretical model

也就是说,孔的边缘总是产生拉应力,从而产生内部应力,导致半刚性基层材料颗粒的松散脱落,最终造成破坏。

2 本构模型

半刚性基层水泥混凝土路面的孔隙水压力本构模型见图 2,可以看出,水泥混凝土面层被分成 I、II 两个部分,III 为半刚性基层,中间的缺口为路面板之间的接缝。假定面层和基层之间不透水,只有位于基层表面的接缝处具有渗透性,水泥混凝土面层和半刚性基层均处于饱水状态。计算时将水泥混凝土面层和半刚性基层分别划分为 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 的单元格,其中面层 I、II 均为 80 个单元格(编号为 1~80),基层 III 为 168 个单元格(编号为 1~168)。均布荷载作用于面板接缝的两侧,加载位置分别为 I 中的 1、2、3 单元格和 II 中的 18、19、20 单元格,加载区域和接缝处透水表面,见图 3。

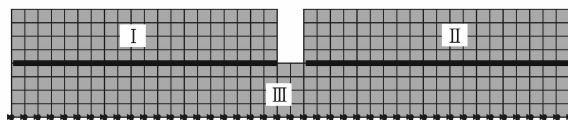


图 2 本构模型

Fig. 2 Constitutive model

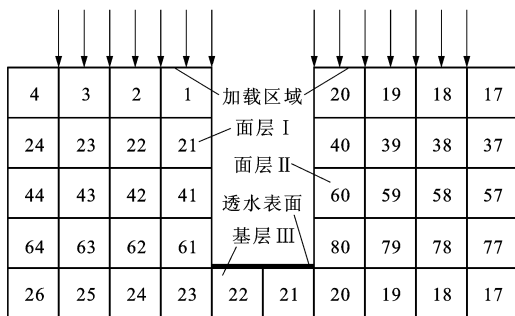


图3 加载区域和接缝处透水表面

Fig. 3 Loading area and permeable surface of joint

计算压力时不计重力,因为边界条件在临界状态下,所有由外部压力或水压力引起的压力梯度都在垂直方向上,假设面层和基层之间是紧密粘结的。

表2 路面结构材料计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of pavement materials

层位	材料	层厚/cm	弹性模量/MPa	泊松比	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	水泥混凝土面层	15、20、25	3.1×10^4 , 3.9×10^4 , 4.5×10^4	0.15	1.0×10^{-4} , 1.0×10^{-5} , 1.0×10^{-6}
2	半刚性基层	20、30、40	2.5×10^3 , 3.5×10^3 , 4.5×10^3	0.25	1.0×10^{-2} , 1.0×10^{-3} , 1.0×10^{-4}

3 计算结果分析

影响半刚性基层孔隙水压力分布的主要因素包括:面层厚度 H_s 、面层模量 E_s 、面层渗透系数 K_s 、基层厚度 H_b 、基层模量 E_b 、基层渗透系数 K_b 、集中荷载 P 、均布荷载 q 、加载模式以及行车速度 V 。通过 ABAQUS 有限元,分析各因素对半刚性基层孔隙水压力分布的影响规律。

3.1 面层厚度

在计算面层厚度对孔隙水压力的影响时,取面层模量为 3.1×10^4 MPa,基层厚度为 20 cm,基层模量为 2.5×10^3 MPa,面层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,基层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,集中荷载为 2.5 kN,均布荷载为 $300 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,加载模式为静载。在3种不同面层厚度下,基层各计算点位置的孔隙水压力峰值见图4。

由图4可以看出:在相同面层厚度下,孔隙水压力峰值随基层深度的增大先迅速增大,在基层深度为 10 cm 处达到最大值,随后又略有降低,当至基层底部时,又略有上升。这是由于静水压力随基层深度线性递增,而超静水压力随基层深度非线性递减,两者叠加之后,孔隙水压力在基层深度为 10 cm 处达到最大值,此时在面层厚度为 25 cm 和 15 cm 处产生的孔隙水压力差值为 1.75 kPa,且在各基层深度处的孔隙水压力峰值均随面层厚度的增大而减小,说明面层厚

边界条件为:水平和竖直方向的位移是固定的;侧面各方向无约束;流体不能从侧面排出;基层表面接缝处完全透水,即该处超静孔隙水压力始终为 0。

利用本模型主要计算不同参数下,沿基层深度方向孔隙水压力的变化。主要影响参数有:外部荷载计算参数,包括集中荷载、均布荷载、加载模式与行车速度,见表1;路面结构材料计算参数,包括水泥混凝土面层和半刚性基层的厚度、弹性模量、泊松比与渗透系数,见表2。

表1 外部荷载计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of exterior load

集中荷载/ kN	均布荷载/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	加载模式	行车速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
2.5、5.0、7.5	600、300、200	静载与动载	10、30、60

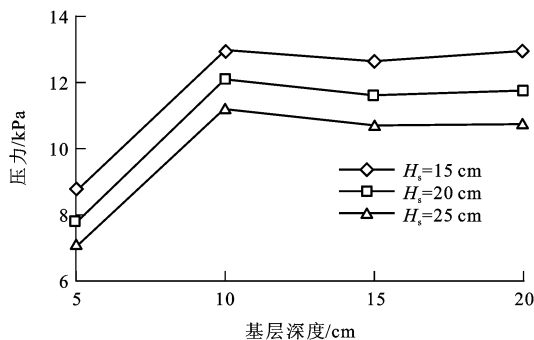


图4 不同面层厚度下的孔隙水压力峰值

Fig. 4 Peak pore water pressures of base at different surface thickness

度越大,半刚性基层受冲刷作用的影响越小。

3.2 面层模量

在计算面层模量对孔隙水压力的影响时,取面层厚度和基层厚度均为 20 cm,基层模量为 2.5×10^3 MPa,面层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,基层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,集中荷载为 2.5 kN,均布荷载为 $300 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,加载模式为静载。在3种不同面层模量下,基层各计算点位置的孔隙水压力峰值见图5。

由图5可以看出:孔隙水压力在基层深度增大为 10 cm 处达到最大值,此时面层模量为 3.1×10^4 MPa 和 4.5×10^4 MPa 处产生的孔隙水压力差值仅为 0.21 kPa。且在各计算点位置处,孔隙水压力峰值均随面层模量的增大而减小,但影响不显著,说明

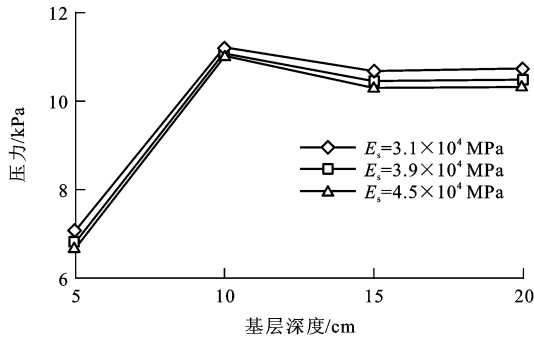


图 5 不同面层模量下的孔隙水压力峰值

Fig. 5 Peak pore water pressures of base at different surface moduli

面层模量对半刚性基层受冲刷作用的影响不显著。

3.3 面层渗透系数

在计算面层渗透系数对孔隙水压力的影响时,取面层厚度和基层厚度均为 20 cm,面层模量为 3.1×10^4 MPa,基层模量为 2.5×10^3 MPa,基层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,集中荷载为 2.5 kN,均布荷载为 $300 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,加载模式为静载。在 3 种不同面层渗透系数下,基层各计算点位置的孔隙水压力峰值见图 6。

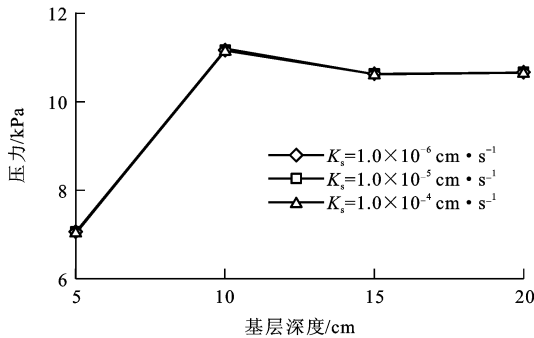


图 6 不同面层渗透系数下的孔隙水压力峰值

Fig. 6 Peak pore water pressures of base at different surface permeabilities

由图 6 可以看出:孔隙水压力在基层深度增大为 10 cm 处达到最大值,不同面层渗透系数所产生的基层孔隙水压力峰值几乎一致,这是由于计算模型假设的边界条件是面层和基层之间不透水。

3.4 基层厚度

在计算基层厚度对孔隙水压力的影响时,取面层厚度为 20 cm,面层模量为 3.1×10^4 MPa,基层模量为 2.5×10^3 MPa,面层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,基层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,集中荷载为 2.5 kN,均布荷载为 $300 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,加载模式为静载。在 3 种不同基层厚度下,基层各计算点位置的

孔隙水压力峰值见图 7。

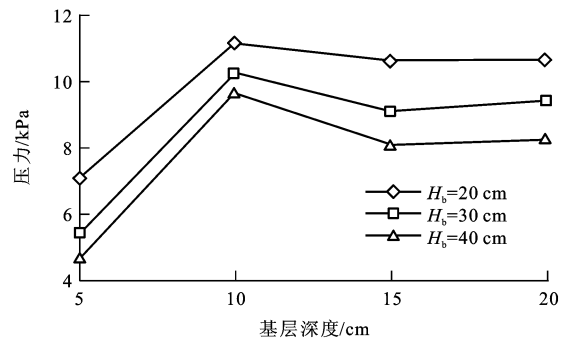


图 7 不同基层厚度下的孔隙水压力峰值

Fig. 7 Peak pore water pressures of base at different base thicknesses

由图 7 可以看出:孔隙水压力在基层深度增大为 10 cm 处达到最大值,此时基层厚度分别为 20 cm 和 40 cm 处产生的孔隙水压力差值为 1.49 kPa,且在基层各计算点位置的孔隙水压力峰值均随基层厚度的增大而减小,说明基层厚度越大,半刚性基层受冲刷作用的影响越小。

3.5 基层模量

在计算基层模量对孔隙水压力的影响时,取面层厚度和基层厚度均为 20 cm,面层模量为 3.1×10^4 MPa,面层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,基层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,集中荷载为 2.5 kN,均布荷载为 $300 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,加载模式为静载。在 3 种不同基层模量下,基层各计算点位置的孔隙水压力峰值见图 8。

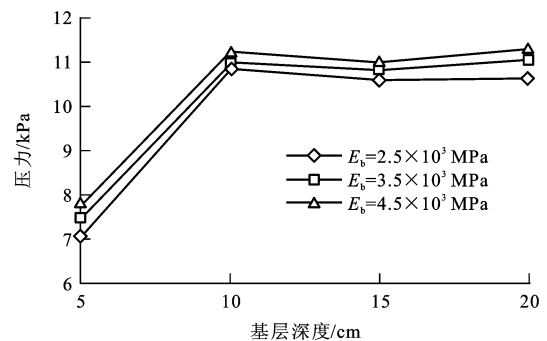


图 8 不同基层模量下的孔隙水压力峰值

Fig. 8 Peak pore water pressures of base at different base moduli

由图 8 可以看出:孔隙水压力在基层深度达到 10 cm 处最大,此时基层模量为 2.5×10^3 MPa 和 4.5×10^3 MPa 处产生的孔隙水压力差值为 0.39 kPa。且在各计算点位置的孔隙水压力峰值均随基层模量的增大而增大,但影响不显著,说明基层模量对半刚性基层受冲刷作用的影响不显著。

3.6 基层渗透系数

在计算基层渗透系数对孔隙水压力的影响时,取面层厚度和基层厚度均为 20 cm,面层模量为 3.1×10^4 MPa,基层模量为 2.5×10^3 MPa,面层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,集中荷载为 2.5 kN,均布荷载为 $300 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,加载模式为静载。在 3 种不同基层渗透系数下,基层各计算点位置的孔隙水压力峰值见图 9。

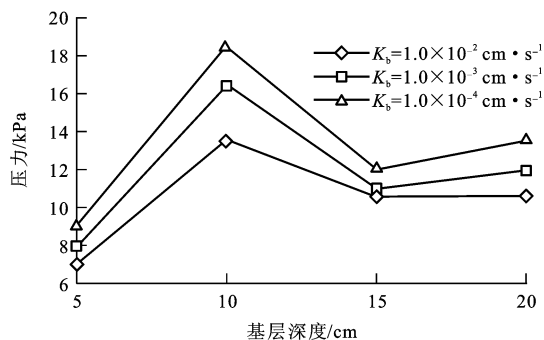


图 9 不同基层渗透系数下的孔隙水压力峰值

Fig. 9 Peak pore water pressures of base at different base permeabilities

由图 9 可以看出:孔隙水压力在基层深度达到 10 cm 处最大,此时基层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 处产生的孔隙水压力差值为 4.97 kPa,且在基层各计算点位置的孔隙水压力峰值均随基层渗透系数的增大而减小,说明基层渗透系数越大,半刚性基层受冲刷作用的影响越小。

3.7 集中荷载

在计算集中荷载对孔隙水压力的影响时,取面层厚度和基层厚度均为 20 cm,面层模量为 3.1×10^4 MPa,基层模量为 2.5×10^3 MPa,面层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,基层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,均布荷载为 $300 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$,加载模式为静载。在 3 种不同集中荷载下,基层各计算点位置的孔隙水压力峰值见图 10。

由图 10 可以看出:孔隙水压力在基层深度达到 10 cm 处最大,此时集中荷载为 2.5 kN 和 7.5 kN 处产生的孔隙水压力差值为 22.32 kPa,且基层各计算点位置的孔隙水压力均随荷载的增大而呈正比例增大,当集中荷载由 2.5 kN 增大到 5.0 kN 再到 7.5 kN 时,孔隙水压力峰值由 11.16 kPa 增大到 22.32 kPa 再到 33.48 kPa,说明集中荷载对半刚性基层受冲刷作用的影响非常显著,荷载越大,半刚性基层受冲刷作用越明显。

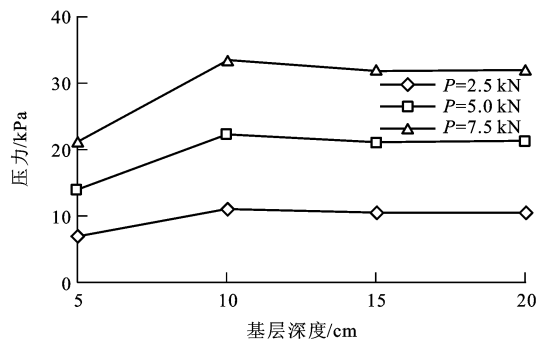


图 10 不同荷载下的孔隙水压力峰值

Fig. 10 Peak pore water pressures of base at different loads

3.8 均布荷载

在计算均布荷载对孔隙水压力的影响时,取面层厚度和基层厚度均为 20 cm,面层模量为 3.1×10^4 MPa,基层模量为 2.5×10^3 MPa,面层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,基层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,集中荷载为 2.5 kN,加载模式为静载。在 3 种不同均布荷载下,基层各计算点位置的孔隙水压力峰值见图 11。

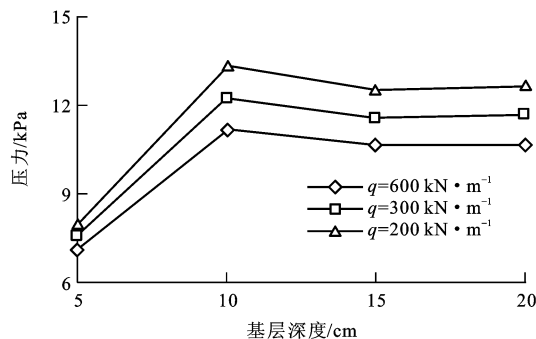


图 11 不同均布荷载下的孔隙水压力峰值

Fig. 11 Peak pore water pressures of base at different distributed loads

由图 11 可以看出:孔隙水压力在基层深度为 10 cm 处达到最大值,此时均布荷载为 $600 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $200 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 处产生的孔隙水压力差值为 2.18 kPa,且在基层各计算点位置的孔隙水压力峰值随均布荷载的增大而减小,说明荷载越集中,半刚性基层受冲刷作用的影响越大。

3.9 加载模式

为了模拟由表面粗糙的路面引起的荷载,采用振动荷载代替集中荷载作用于车轮上。荷载的最大值是 2.5 kN,每 0.01 s 荷载由最大值到 0 交替变化。在计算加载模式对孔隙水压力的影响时,取面层厚度和基层厚度均为 20 cm,面层模量为 3.1×10^4 MPa,基层模量为 2.5×10^3 MPa,面层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,基层渗透系数为 $1.0 \times$

$10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 集中荷载为 2.5 kN , 均布荷载为 $300 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。在振动荷载和集中荷载作用下, 4 种不同基层计算点位置的孔隙水压力随时间的变化趋势分别见图 12、13。

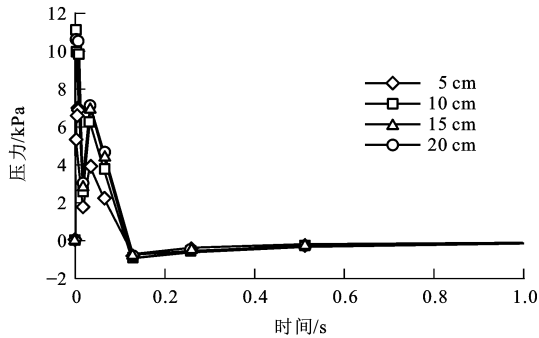


图 12 振动荷载下的基层孔隙水压力

Fig. 12 Pore water pressures of base under vibrated load

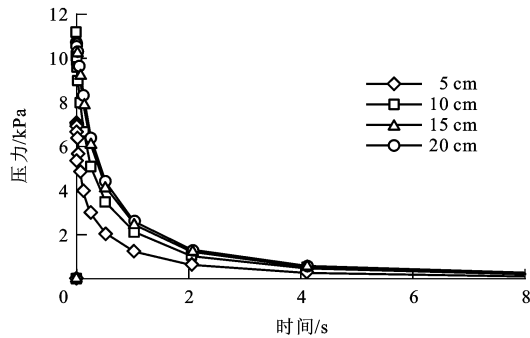


图 13 集中荷载下的基层孔隙水压力

Fig. 13 Pore water pressures of base under concentrated load

由图 12、13 可以看出: 在 2 种荷载下基层孔隙水压力的消散过程不同, 振动荷载作用下孔隙水压力出现负值。将图 12、13 各基层深度处的孔隙水压力峰值列于图 14, 可以看出在 2 种荷载下的孔隙水压力峰值变化是一致的, 说明水泥路面表面粗糙程度与半刚性基层的受冲刷作用影响程度无关。

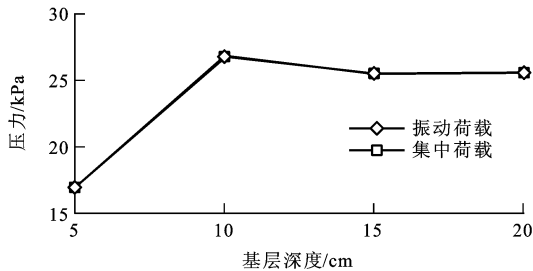


图 14 不同加载模式下的基层孔隙水压力峰值

Fig. 14 Peak pore water pressures of base under different loading modes

3.10 行车速度

为了计算不同行车速度下的孔隙水压力, 在水泥混凝土路表上加载一刚性轮胎, 并施加一个行车

速度, 基本计算模型见图 15。由于模型尺寸的限制, 车速设定值较小, 为 10 、 30 、 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。为了使计算结果收敛, 垂直于路面施加一个 250 N 的集中荷载。在计算行车速度对孔隙水压力的影响时, 取面层厚度和基层厚度均为 20 cm , 面层模量为 $3.1 \times 10^4 \text{ MPa}$, 基层模量为 $2.5 \times 10^3 \text{ MPa}$, 面层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 基层渗透系数为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 集中荷载为 2.5 kN , 均布荷载为 $300 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 加载模式为静载。不同车速下孔隙水压力随时间的变化过程见图 16。

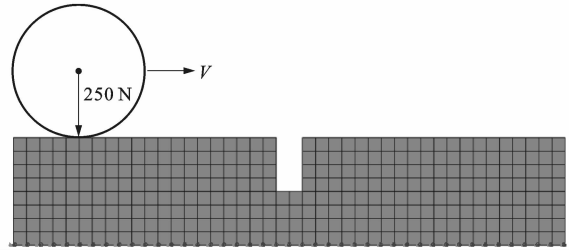


图 15 计算模型

Fig. 15 Calculation model

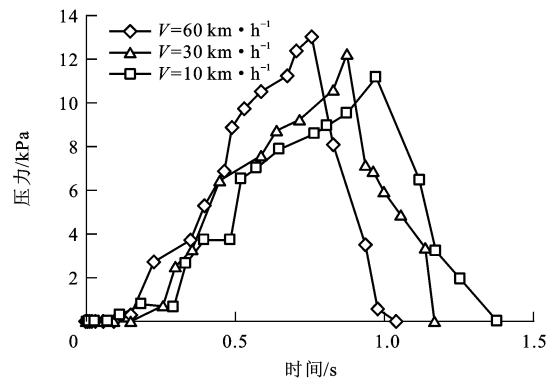


图 16 不同车速下的孔隙水压力

Fig. 16 Pore water pressures at different vehicle speeds

由图 16 可以看出: 孔隙水压力从 0 开始先增大至最高点, 后再次减小为 0。时间相同时, 孔隙水压力峰值随行车速度的增大而增大, 行车速度为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 处产生的孔隙水压力差值为 1.91 kPa ; 孔隙水压力的消散所需时间随着行车速度的增大而减小, 当行车速度为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 孔隙水压力的消散时间为 1.04 s , 车速为 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 消散时间为 1.37 s , 这说明行车速度越高, 半刚性基层受冲刷作用的影响越大。

4 结 语

基于多孔介质弹性理论, 运用 ABAQUS 有限元分析软件对水泥混凝土路面半刚性基层内的孔隙水压力分布进行数值模拟, 计算不同外部荷载

和路面结构条件对基层孔隙水压力的影响规律,从力学角度分析各因素对半刚性基层冲刷破坏作用的影响,基层内部的孔隙水压力数值模拟结果如下。

(1)在饱水状态下,基层材料的孔隙水压力随水泥混凝土面层厚度和模量的增大而减小,但面层模量的影响相对较小;基层孔隙水压力随基层厚度和渗透系数的增大而减小,随基层模量的增大而增大,但基层模量对孔隙水压力的影响不显著。这说明水泥混凝土面层厚度、基层厚度和渗透系数对半刚性基层受冲刷作用的影响比较明显。

(2)基层孔隙水压力随交通荷载的增大而呈线性增长。在荷载值相同时,荷载分布越密集,基层孔隙水压力越大,其对基层孔隙水压力有显著的影响。这说明荷载越大、分布越集中,半刚性基层受冲刷作用越明显。

(3)水泥混凝土路面表面粗糙程度对基层孔隙水压力的变化没有影响,基层孔隙水压力随车速度的增大而增大,其消散过程随车速度的增大而加快。这说明水泥路面表面粗糙程度与基层的受冲刷作用影响程度无关,但行车速度越高,半刚性基层受冲刷作用的影响越大。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 盛燕萍. 基于抗冲刷性能的水泥混凝土路面半刚性基层材料组成设计研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
SHENG Yan-ping. Study on mix design of semi-rigid base for concrete pavement based on anti-erosion performance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [2] 沙爱民. 半刚性基层的材料特性[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 1-5.
SHA Ai-min. Material characteristics of semi-rigid base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 1-5. (in Chinese)
- [3] KUTAY M E, AYDILEK A H, MASAD E. Laboratory validation of lattice Boltzmann method for modeling pore-scale flow in granular materials[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(8): 381-395.
- [4] ZHOU Chang-hong, WANG Zhe-ren, CHEN Jing-yun, et al. Numerical computation and analysis on dynamic pore water pressure in asphalt pavement[C]//ASCE. International Conference on Transportation Engineering 2007. Reston: ASCE, 2007: 2981-2986.
- [5] CUI Xin-zhuang, JIN Qing, SHANG Qing-sen, et al. Numerical simulation of dynamic pore pressure in asphalt pavement [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2009, 25(1): 79-82.
- [6] 钟 阳, 耿立涛, 周福霖, 等. 沥青路面超孔隙水压力计算的刚度矩阵法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2006, 22(1): 25-29.
ZHONG Yang, GENG Li-tao, ZHOU Fu-lin, et al. Computing the express pore fluid stress of flexible pavement by stiffness matrix method[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2006, 22(1): 25-29. (in Chinese)
- [7] 罗志刚, 凌建明, 周志刚, 等. 沥青混凝土路面层间孔隙水压力计算[J]. 公路, 2005(11): 86-89.
LUO Zhi-gang, LING Jian-ming, ZHOU Zhi-gang, et al. Calculation of interbedded pore water pressure of asphalt concrete pavement [J]. Highway, 2005 (11): 86-89. (in Chinese)
- [8] 傅博峰, 周志刚, 陈晓鸿, 等. 沥青路面水损害疲劳破坏过程的数值模拟分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(1): 51-58.
FU Bo-feng, ZHOU Zhi-gang, CHEN Xiao-hong, et al. The numerical simulation analysis of asphalt pavement moisture damage fatigue failure process [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2006, 27(1): 51-58. (in Chinese)
- [9] 董泽蛟, 曹丽萍, 谭忆秋. 饱水沥青路面动力响应的空间分布分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(4): 79-82, 89.
DONG Ze-jiao, CAO Li-ping, TAN Yi-qiu. Spatial distribution of dynamic response for saturated asphalt pavement[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(4): 79-82, 89. (in Chinese)
- [10] WANG H F. Theory of Linear Poroelasticity with Applications to Geomechanics and Hydrogeology [M]. Princeton: Princeton University Press, 2000.