

开裂沥青路面结构渗水量计算

但汉成¹, 李 亮¹, 李 凌²

(中南大学 土木工程学院, 410075 长沙, danhancheng@163.com; 2. 昆士兰大学 土木工程学院, 4072 布里斯班)

摘 要: 为合理估计路面渗水量和准确计算路面渗入率, 基于裂缝渗流理论模拟了路表水的渗入情况, 建立了裂缝和龟裂路面中雨水渗流的数学物理计算模型, 推导出了考虑裂缝和龟裂的沥青路面雨水渗入量的理论计算公式. 通过分析破损路面的渗入率和渗水量的试验结果, 发现路面破损(裂缝、龟裂)对路面水渗入量的影响非常大, 路面排水系统设计时须予以考虑. 计算分析建立的2种模型, 结果表明: 应根据路面的破损程度, 如路面裂缝长度、裂缝宽度、裂缝密度、路面龟裂密度和龟裂破损程度来估算路面的渗水量; 在确定路面厚度后, 排水基层厚度的确定, 不仅与排水基层的渗透系数有关, 还要考虑路面结构整体的强度要求.

关键词: 渗入率; 渗流理论; 排水基层; 路面龟裂; 裂缝渗流

中图分类号: U416.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)06-0105-07

Calculation for infiltration rate of flow in cracking asphalt pavement

DAN Han-cheng¹, LI Liang¹, LI Ling²

(1. School of Civil engineering, Central South University, 410075 Changsha, China, danhancheng@163.com; 2. School of Civil engineering, University of Queensland, 4072 Brisbane QLD, Australia)

Abstract: Based on the crack seepage theory for simulating the water infiltration in pavement, a mathematical model for calculating infiltration rate of pavement with cracks has been established and the theoretical calculation formula of infiltration rate has been deduced. The formula can be applied to evaluate the infiltration, optimize the drainage design and improve the efficiency of drainage system. Further, the map cracks distributed in pavement are also considered and included in another mathematical model for calculating the infiltration rate in pavement with map cracks. The experimental results for the infiltration rate and flow quantity of damaged pavement show that cracks and map cracks give a great contribution to the water quantity infiltrating into the pavement. It is suggested that the design of infiltration rate should take the cracks and map cracks into consideration reasonably. By calculating and analyzing the two models established in this paper, it shows that the evaluation of infiltration rate should be conducted according to the damage degree of pavement, such as crack length, crack width, crack density and the distribution of map cracks throughout pavement. Additionally, if the thickness of surface course of pavement is determined, the thickness of permeable base not only depends on the permeability coefficient of the material of permeable base but also the strength of pavement structure.

Key words: infiltration rate; percolation theory; permeable base; map crack; crack seepage

路表水渗入率表征着一定服务水平下道路面

层的透水能力,它是降雨在整个道路系统中渗透能力的综合表征. 渗入率的大小直接关系到排水基层厚度的设计以及排水基层材料的选择,进而影响到材料级配设计,路面结构的透水性也是其防排水分析应考虑的重要参数^[1]. 路面水的渗入产生的损害形式和机理已有大量文献^[2-3]阐述.

目前,国外关于路表水渗入率的设计方法主要为 Cedergren^[4]代表的水文学方法和 Ridge-

收稿日期: 2010-09-13.

基金项目: 湖南省交通厅科技项目(200731);中南大学优秀博士论文扶植基金项目(2009ybfz05);湖南省研究生创新基金项目(CX2009B051).

作者简介: 但汉成(1983—),男,博士研究生;

李 亮(1962—),男,教授,博士生导师;

李 凌(1968—),男,教授,博士生导师.

way^[5]代表的水力学方法.我国目前采用的是Ridgeway提出的设计方法.对于沥青路面,现行JTJ018—97《公路排水设计规范》(简称《排规》)推荐的渗入率设计值为 $0.15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ^[6],这个值对轻微破损路面较为合理,但是路面很容易产生裂缝,高速公路由于超载和水损害的原因,在投入使用3~5 a后就开始出现龟裂、裂缝等损害,这种损害带来的维修和经济上的损失比由于采用高渗入率设计的排水设施尺寸所需要的投资要大.而且,损坏的路面也不一定能得到及时的维修,这样会导致路面的局部渗水量大,降低基层强度产生不均匀沉降进而形成坑槽等病害.因此,需提前做好应对由于路面破损而致使雨水大量渗入路面结构和基层,甚至路基内的措施,即需要做好排水设计.本文认为新建路面在设计排水基层时采用的路面渗水率设计值应该按照路面裂缝和龟裂的发育程度来确定,根据不同的破损程度制定不同的设计渗入率.由于不同地区的气候情况不尽相同,统一的设计值具有一定的片面性.龟裂一般发生在重复荷载作用的地方,龟裂是局部小面积的破损,裂缝是可以横贯整条路面,纵向可以延伸几十米甚至上百米.因此,有必要将裂缝和龟裂分开进行描述.吉青克^[7]研究的渗入率计算方法是建立在路面处于完好无损状态的假设基础之上,没有在理论推导中引入裂缝和龟裂渗水,只是将路面破损对渗入率大小的影响做了归纳性的阐述和分等级计算. CHEN^[8]研究了路面渗透性和裂缝宽度的联系,采用室内试验仪器制作出带有不同裂缝宽度的 SMA 和多孔沥青混合料(PA)试件,通过渗水试验将带裂缝的试件等效为具有一定渗透系数的多孔介质,建立渗透系数和裂缝之间的关系式,但是该关系式的建立没有应用于工程中路面渗水量的确定. HANSSON^[9]在确定路面水渗入量时,假设路面裂缝两壁为平行的平板,采用立方定律^[10]估算裂缝内的路面水渗入量,但并没有结合路面实际的裂缝破损程度和裂缝的分布密度进行计算,也没有给出合理确定路面水渗入率的具体方法.

本文参考《排规》推荐的设计方法,基于饱和渗流理论,考虑路表面裂缝和龟裂缝对渗入结构内的水量的影响,建立路面水在路面与排水基层之间水量交换的数学物理模型,从而阐明路面结构内部水流的机理,并对有裂缝和龟裂路面的渗入率进行分析,为路面排水基层设施设计提供参考.

1 路表水入渗计算模型

降落到路表面的水有几种产流方式:路表径

流、路面裂缝的渗流、面层内部的横向渗流,基层内部的横向、纵向渗流^[7].经过简化处理,在充分供水条件下,对路面裂缝渗入率有影响的因素有路表径流、裂缝渗流以及排水基层渗流.而裂缝渗流和面层渗流可简化为竖向渗流,排水层的渗流为横向渗流.

1.1 路面材料入渗模拟

基于毛管(即微管)束模型^[11]可推导出孔隙度和渗透率的公式^[12]为

$$q_i = - \frac{\pi r_i^4}{8\mu} \frac{dp}{dL} \quad (1)$$

式中: q 为渗流量, m^3/s ; r 为微管半径, m ;下标 i 为不同直径的微管; μ 为黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; N 为微管个数; p 为孔隙水压力, Pa ; L 为渗流长度, m .

多孔介质的总流量为

$$q = - \sum_{i=1}^N N_i \frac{\pi r_i^4}{8\mu} \frac{dp}{dL} \quad (2)$$

多孔介质的孔隙度为

$$\theta = - \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N N_i \pi r_i^2 \quad (3)$$

式中 A 为截面面积, m^2 .

假如用等直径的微管束模型描述多孔介质^[12],则通过路面孔隙入渗的水量为

$$q = - N \frac{\pi r^4}{8\mu} \frac{dp}{dL} \quad (4)$$

同样地,可以采用微管理论模拟沥青路面面层和排水基层的渗流情况,只是采用的微管直径不同.

1.2 裂缝水流动模拟

目前对裂缝(隙)中水渗流计算一般采用控制体积法和求解 Nernst-Stoke 方程的方法.对于路面裂缝中的水流来说,可以忽略压力沿裂缝宽度方向的变化,认为压力仅沿长度方向变化.由于求解 Nernst-Stoke 方程较为复杂,采用控制体积法求解裂缝(隙)水的渗流量会更为有效,而且精度完全能够满足工程要求^[13].控制体积法沿裂缝长度方向取若干个微分段,通过研究微分段中水流运动来得到问题的解.

采用控制体积法求解时,不可压缩液体遵循质量守恒定律,可以表示为^[14]

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{d}{dt} \int_V dV + \rho \oint_{\Omega} (u \cdot n) dA = 0, \quad (5)$$

$$\int_V dV = \frac{1}{2} \left(w_y + w_y + \frac{\partial w_y}{\partial y} dy \right) \approx w_y dy, \quad (6)$$

$$\oint_{\Omega} (u \cdot n) dA = - \frac{4}{3} \frac{\partial q_y}{\partial y} dy. \quad (7)$$

联立式(5)、(6)、(7)可以得到裂缝(隙)中

水的渗流运动的表达式^[14-15]为

$$\frac{\partial w_y}{\partial t} = \frac{4}{3} \frac{\partial q_y}{\partial y}, \tag{8}$$

根据泊肃叶解^[14]知,通过 y 断面的过流量为

$$q_y = - \frac{w_y^3}{12\mu} \frac{\partial P_y}{\partial y}. \tag{9}$$

对于路面面层材料来说,其本身就具有一定的渗透能力.雨水通过路面表面的孔隙渗入结构层中,进而渗入排水基层中.因此,本文将建立面层、排水基层之间的渗流计算模型,计算面层和排水基层之间的渗流量.模型的建立基于如下假设:

- 1) 密级配沥青混凝土的孔隙率一般为 2% ~ 5%,渗透系数一般在 $10^{-7} \sim 10^{-10}$ cm/s,与裂缝的渗透系数相比非常小,因此计算时忽略面层内部的横向渗流;
- 2) 排水基层与承重的基层之间要做好隔水措施,因此排水基层底面为不排水边界;
- 3) 路面水主要通过路面孔隙和裂缝渗入;
- 4) 忽略渗流过程中的动力因素^[15].

基于以上假设,建立如图 1 所示的渗流模型.

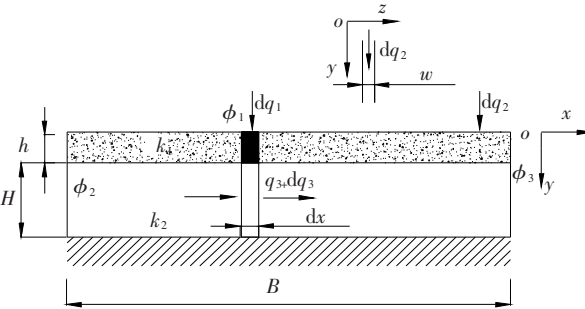


图 1 排水基层的渗流计算模型 1

距面层端点 x 处,取宽度为 dx 的微分段.在这个微分段中,水流透过面层孔隙而渗入排水基层中.假设面层上部的水头为 ϕ_1 ,下部的水头为 ϕ ,则水流透过面层的水头损失为 $\phi_1 - \phi$,若该段面层的厚度为 h ,则面层渗流的水力坡降为

$$J = \frac{\phi_1 - \phi}{h}.$$

采用等直径的微管模型模拟水在面层中的入渗情况,因此,通过该微分段面层渗入排水基层中的水量为

$$dq_1 = N \frac{\pi r_1^4}{8\mu} \frac{dp}{dy}, \tag{10}$$

空隙率为

$$\theta_1 = \frac{N\pi r_1^2}{1 \cdot dx}, \tag{11}$$

可得到

$$dq_1 = \rho g \frac{\theta_1 r_1^2}{8\mu} \frac{\phi_1 - \phi}{h} dx. \tag{12}$$

式中: $\frac{dp}{dy}$ 为水力梯度,可以用水力坡降 $\rho g \frac{\phi_1 - \phi}{h}$

代替; ρ 为流体(水)的密度; r_1 为面层材料的微管半径; θ_1 为面层材料的孔隙率; dq_1 为通过微分段 dx 的面层渗入水量; k_1 为面层材料的渗透系数; ϕ_1 为面层微分段顶面处的水头,假设以 $x = 0$ 处排水基层顶面作为位置水头 0 点,则面层顶面水头 $\phi_1 = h + B j_0$; ϕ 为面层微分段底面处的水头; h 为面层厚度; B 为路面横向宽度; J_0 为渗流路径的坡度,等于道路合成坡度 J_0 ,其中 $J_0 = \sqrt{i_h^2 + i_z^2}$, i_h 为道路横坡; i_z 为道路纵坡.

另外,可采用式(9)计算裂缝中的渗流量.裂缝的密度可表示为 $\gamma = \frac{Nw}{1}$,其物理意义为路面纵向单位长度内等宽裂缝的条数.其中 w 为裂缝的宽度, N 为裂缝的条数.因此,路面纵向每延米中,通过路面裂缝入渗的水量为

$$dq_2 = \rho g \frac{\gamma w^2}{12\mu} \frac{\phi_1 - \phi}{h} dx, \tag{13}$$

在排水基层中,通过相应宽度(dx)排水基层的渗流量为

$$q_3 = \rho g \frac{\theta_2 r_2^2}{8\mu} \frac{d(\phi_2 - \phi)}{dx} H. \tag{14}$$

式中: r_2 为排水基层材料的微管半径; θ_2 为排水基层材料的孔隙率; ϕ_2 为排水基层在上游断面($x = -B$)处的水头;当以 $x = 0$ 的排水基层顶部作为位置水头 0 点,则 $\phi_2 = B j_0$; $d(\phi_2 - \phi)$ 为宽度为 dx 的排水基层微分段中的水头损失.由于 $d(\phi_2 - \phi) = -d\phi$,因此

$$dq_3 = \rho g \frac{\theta_2 r_2^2}{8\mu} \frac{d^2(\phi_1 - \phi)}{dx^2} H \cdot dx. \tag{15}$$

根据渗流的连续性,在 dx 微分段内,通过面层孔隙和裂缝渗入排水基层的渗流量总和为 $dq_1 + dq_2$,其大小应等于排水基层在该微分段内渗流量的增量 dq_3 ,即

$$\frac{d^2(\phi_1 - \phi)}{dx^2} = \alpha^2(\phi_1 - \phi), \tag{16}$$

$$\text{其中 } \alpha = \sqrt{\frac{\theta_1 r_1^2 + \frac{2}{3} \gamma w^2}{H h \theta_2 r_2^2}}.$$

式(16)为路面面层(考虑路面孔隙和裂缝渗透性)与排水基层之间水量交换的渗流平衡方程.

1.3 龟裂路面裂缝水流动的模拟

基于 1.1 的假设条件,建立如图 2 所示的渗流模型.

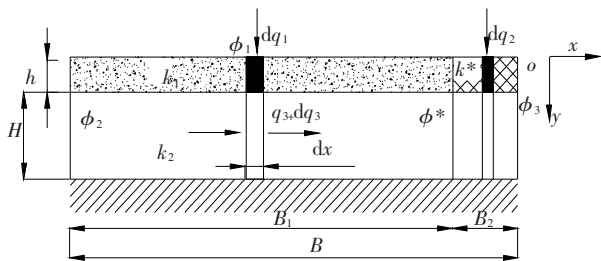


图2 排水基层的渗流计算模型2

由于龟裂破损路面表面裂缝并不规则,计算龟裂入渗水量,采用等效渗透系数,即将龟裂路面处的区域进行面积等效.设路面龟裂的面积为 A^* ,沿垂直于纸面单位厚度的龟裂宽度为 $B_2 = A^*/1$.龟裂部分的渗透系数为 k^* ;排水基层中在 $x = B_2$ 处的水头为 ϕ^* .龟裂位置的渗透系数可以按现场变水头试验测出,计算公式为

$$K = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right). \quad (17)$$

式中: K 为渗透系数, cm/s ; a 为储水管的横截面积, cm^2 ; L 为试件高度, cm ; A 为试件横截面积, cm^2 ; t 为试验经过的时间, s ; h_1 为计时开始时的水头, cm ; h_2 为计时结束时的水头, cm .

2 路面渗入率的计算

2.1 模型解析

求解式(16)可得其通解为

$$\phi_1 - \phi = C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x}. \quad (18)$$

式中 C_1 和 C_2 为积分常数.

为确定积分常数,给出边界条件:

当 $x = 0$ 时, $\phi = \phi_3$;

当 $x = -B$ 时, $\phi = \phi_2$.

结合边界条件,可得积分常数解析式为

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\phi_1 \beta^2 - \phi_3 \beta^2 - \phi_1 \beta + \phi_2 \beta}{\beta^2 - 1}, \\ C_2 = \frac{\phi_1 \beta - \phi_2 \beta - \phi_1 + \phi_3}{\beta^2 - 1}. \end{cases} \quad (19)$$

式中 $\beta = e^{\alpha B}$.

2.2 面层与排水基层渗水量计算

1) 模型1

通过路面面层渗入的水量(包括通过孔隙和裂缝的渗入水量总和)可表示为

$$q_m = \int_{-B}^0 (dq_1 + dq_2) dx. \quad (20)$$

将 C_1 和 C_2 带入式(18),并联合式(12)、(13)、(20)可得总水量为

$$q_m = \frac{\frac{\theta_1 r_1^2}{8\mu} + \frac{\gamma w^2}{12\mu}}{\alpha h (\beta^2 - 1)} \times$$

$$(2\phi_1 \beta^2 - \phi_2 \beta^2 - \phi_3 \beta^2 - 4\phi_1 \beta + 2\phi_2 \beta + 2\phi_3 \beta + 2\phi_1 - \phi_2 - \phi_3). \quad (21)$$

因为路面横向宽度 B 相对于路面厚度来说是较大值,因此, $\beta = e^{\alpha B}$ 近似于无穷大,式(21)可简化为

$$q_m = \frac{\rho g \left(\frac{\theta_1 r_1^2}{8\mu} + \frac{\gamma w^2}{12\mu} \right)}{\alpha h} (2\phi_1 - \phi_2 - \phi_3). \quad (22)$$

如不计排水层末端水流的流速水头,则 $\phi_3 = 0$, $\phi_1 = h + BJ_0$, $\phi_2 = BJ_0$,式(22)简化为

$$q_m = \frac{\rho g \left(\frac{\theta_1 r_1^2}{8\mu} + \frac{\gamma w^2}{12\mu} \right)}{\alpha h} (2h + BJ_0). \quad (23)$$

将 α 带入式(23),简化为

$$q_m = \frac{\rho g \left(\frac{\theta_1 r_1^2}{8\mu} + \frac{\gamma w^2}{12\mu} \right)}{h \sqrt{\frac{\theta_1 r_1^2 + \frac{2}{3} \gamma w^2}{H h \theta_2 r_2^2}}} (2h + BJ_0). \quad (24)$$

根据式(1)~(3)可得

$$v = - \left(\frac{\theta}{8} \sum_{i=1}^N \frac{N_i r_i^4}{N_i r_i^2} \right) \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dL}. \quad (25)$$

根据微管渗流理论可知,路面渗透率为

$$K = \frac{\theta}{8} \sum_{i=1}^N N_i r_i^4 / \sum_{i=1}^N N_i r_i^2. \quad (26)$$

假设微管直径为统一直径 r ,渗透率为

$$K = \frac{\theta}{8} r^2. \quad (27)$$

将式(27)带入式(24),式(24)简化为

$$q_m = \frac{\rho g}{\mu} \sqrt{\frac{H K_2}{h} \left(K_1 + \frac{\gamma w^2}{12} \right)} (2h + BJ_0). \quad (28)$$

式中: q_m 为全宽裂缝时的路面渗水量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; K_1 , K_2 分别为面层和排水基层的渗透率, m^2 .

将渗透率转化为渗透系数可表示为

$$q_m = \frac{g}{v} \sqrt{\frac{v}{g} \frac{H k_2}{h} \left(\frac{v}{g} k_1 + \frac{\gamma w^2}{12} \right)} (2h + BJ_0). \quad (29)$$

式中 v 为水的动力黏度, m^2/s .

当路面无破损时(不考虑裂缝存在)可得路面水的渗入量为

$$q' = \sqrt{\frac{H k_2 k_1}{h}} (2h + BJ_0). \quad (30)$$

则无损与有裂缝存在路面的渗水量差值为

$$\Delta q = \frac{g}{v} \sqrt{\frac{v}{g} \frac{Hk_2}{h} \left(\frac{v}{g} k_1 + \frac{\gamma w^2}{12} \right)} (2h + BJ_0) - \sqrt{\frac{Hk_2 k_1}{h}} (2h + BJ_0). \tag{31}$$

设裂缝长度为 L_c , $\lambda = \frac{L_c}{B}$, 则长为 L_c 裂缝的渗水量为 $q_c = \lambda \cdot \Delta q$, 因此, 路面总体渗水量为

$$Q_m = [(1 - \lambda) \sqrt{\frac{Hk_2 k_1}{h}} + \lambda \frac{g}{v} \sqrt{\frac{v}{g} \frac{Hk_2}{h} \left(\frac{v}{g} k_1 + \frac{\gamma w^2}{12} \right)}] (2h + BJ_0). \tag{32}$$

另外, 路面的渗入率为

$$I_m = [(1 - \lambda) \sqrt{\frac{Hk_2 k_1}{h}} + \lambda \frac{g}{v} \sqrt{\frac{v}{g} \frac{Hk_2}{h} \left(\frac{v}{g} k_1 + \frac{\gamma w^2}{12} \right)}] \times \left(2 \frac{h}{B} + J_0 \right). \tag{33}$$

从路面水渗入率表达式可看出, 路面渗入率与路面面层和排水基层的渗透系数、厚度、路面横

向宽度、裂缝的分布密度和宽度等因素都有关系.

2) 模型 2

根据模型 1 的解析方法, 可得

$$q^* = \sqrt{\frac{Hk_2 k_1}{h}} (2h + B_1 J_0) + \sqrt{\frac{Hk_2 k^*}{h}} (2h + B_2 J_0). \tag{34}$$

从式(34)可看出, 合理计算路面在龟裂情况下的渗入量, 应调查路面龟裂破损的程度, 然后将路面按破损面积大小换算成一定宽度并且具有某个渗透系数的路面面层, 进而计算不同破损程度的路面的渗入率.

3 讨论分析

3.1 试验分析

为对比分析路面在 2 种情况下(即没有出现早期破损和发生裂缝和龟裂的路面)路面渗入率的大小, 在湖南省某高速公路沥青路面测定了路面发生龟裂处的渗水系数, 并换算成渗入率, 与未破损处路面进行对比, 结果见表 1.

表 1 龟裂路面渗水系数测定					
编号	上面层结构	龟裂面积	渗水系数	渗透系数	渗入率
		A / cm^2	$C_w / (\text{ml} \cdot \text{min}^{-1})$	$K / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$I / (\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1})$
1	5 cmSBS, SMA - 16	0	42.5	0.000 582	0.061 3
		1 000	1 286.4	0.017 614	1.854 1
2	4 cmSBS, SMA - 13	0	34.1	0.000 467	0.049 2
		2 550	2 698.6	0.036 951	3.894 2
3	6 cmRMB, Domix, SMA - 16	0	10.6	0.000 145	0.015 3
		1 300	1 658.2	0.022 705	2.389 4
4	4 cmRMB, Domix, SMA - 13	0	9.5	0.000 130	0.013 7
		2 000	2 446.3	0.033 496	3.527 8
5	4 cmSBS, SMA - 13	0	12.2	0.000 167	0.017 6
		600	520.0	0.007 120	0.749 5
6	4 cmRMB, SMA - 13	0	10.3	0.000 141	0.014 9
		620	884.2	0.012 107	1.275 9

路面在龟裂后的渗水系数和渗入率相对于未破损路面增长的倍数相当可观, 约为 30 ~ 260 倍, 龟裂部位的表面水渗入率约为 1.0 ~ 4.0 $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均约为 2.28 $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 比《排规》0.15 $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 高出很多. 1996 年同济大学在上海开裂的旧沥青混凝土路面上进行了路表面水渗入率的试验测定^[6], 对于沥青混凝土路面, 不同类型和破损状况的裂缝表面水渗入率在 0 ~ 1 250 $\text{cm}^3 / (\text{h} \cdot \text{cm})$ 缝范围内, 平均约为

371 $\text{cm}^3 / (\text{h} \cdot \text{cm})$ 缝, 也高于《排规》中的 150 $\text{cm}^3 / (\text{h} \cdot \text{cm})$ 缝. 当然, 龟裂部位和裂缝部位的渗入率肯定会相对较高, 因此, 对路面破损情况的调查是确定路表面设计渗入率的关键.

3.2 计算分析

对于具有某种破损程度的路面, 设置排水基层时, 可在调查研究基础上, 结合面层材料的渗透系数, 采用式(32)、(33)来估算路表水的渗入量和渗入率.

3.2.1 裂缝密度的分析

根据本文定义,路面裂缝的分布密度是路面纵向单位长度横向裂缝的条数,可以用路面横向裂缝的纵向平均间距来描述,即横向裂缝条数为

表 2 计算参数表

$v/(m^2 \cdot s^{-1})$	$g/(m \cdot s^{-1})$	H/m	h/m	$k_1/(m \cdot s^{-1})$	$k_2/(m \cdot s^{-1})$	B/m	J_0	γ	w/m
1.0×10^{-6}	9.8	0.1	0.18	0.000 1	0.01	10	0.02	0.000 1	0.001

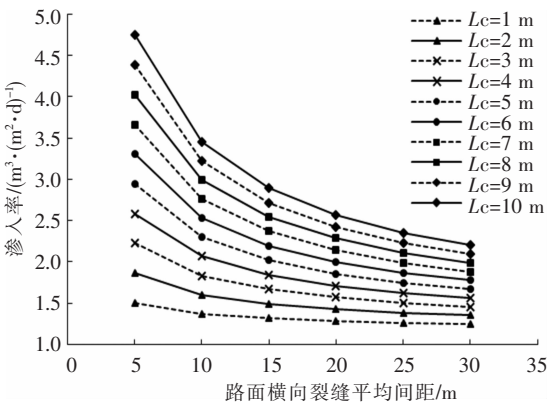


图 3 不同裂缝长度和不同裂缝间距对渗透率的影响

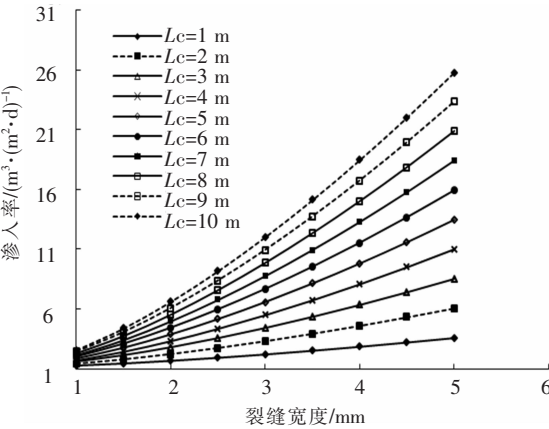


图 4 裂缝宽度对路面渗透率的影响(间距为 20 m)

从图 3、4 可看出裂缝的宽度和长度对路面水渗透率的影响相当明显. 裂缝为水渗入路面内部的主要通道,因此路面设计时采用裂缝或者是接缝的渗水率作为设计指标是需要计算的,采用统一经验标准有片面性. 从 Ridgeway 和同济大学的路面渗水率测试试验^[6]来看,裂缝一般发育情况下的路面渗透率约为 $230 \sim 300 \text{ cm}^3/(\text{h} \cdot \text{cm})$,充分发育情况下更大. 这说明后期路面破损产生的裂缝对路面水渗透率的影响很大.

3.2.2 路面局部龟裂程度分析

通过理论推导得出在路面一定龟裂破损情况下路面水渗入结构层和排水层的渗入量为

$$q^* = \sqrt{\frac{Hk_2k_1}{h}}(2h + B_1J_0) + \sqrt{\frac{Hk_2k^*}{h}}(2h + B_2J_0).$$

(35)

1 时的纵向距离. 计算参数取值见表 2. 路面裂缝的平均间距、裂缝长度和宽度对路面水渗透率的影响见图 3、4.

为直观体现龟裂部位对路面水渗入量的影响,做了简单计算分析,分析时采用表 1 测得的路面龟裂位置的渗透系数,约为 $0.01 \sim 0.04 \text{ cm/s}$. 单位面积的龟裂路段,按照龟裂程度换算 B_2 的大小,轻微龟裂路面 B_2 为 $0 \sim 50 \text{ cm}$,中等龟裂路面 B_2 为 $50 \sim 200$,严重龟裂路面 $B_2 > 200 \text{ cm}$. 计算结果见图 5.

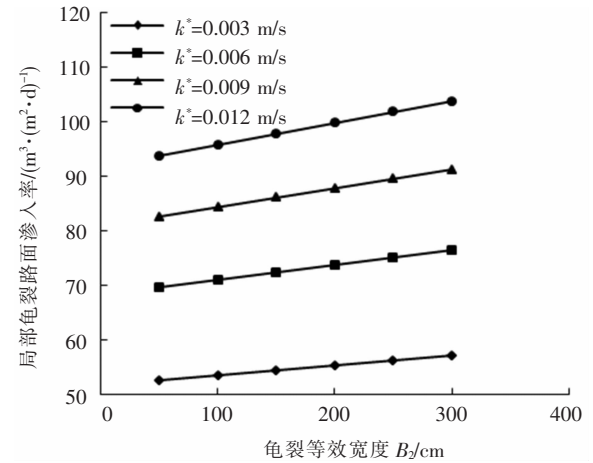


图 5 局部龟裂路面渗透率计算

图 5 仅是路面发生局部龟裂时,路面的渗透率与龟裂部位破损程度的关系. 事实上,路面不可能大面积处于这种高渗水的状态. 因此,在计算整体路面由于龟裂而产生的渗水,还需要调研龟裂部位在某段路面上的分布状况,以及龟裂裂缝的破损程度.

3.2.3 关于排水基层厚度及材料的选定

当确定了面层厚度和材料组成后,如何选择排水基层的厚度和渗透系数. 按路面水最大入渗量的情况进行研究,即 $\lambda = 1$,可得

$$Hk_2 = \frac{hvQ_M^2}{g(2h + BJ_0)^2 \left(\frac{v}{g}k_1 + \frac{\gamma w^2}{12} \right)}.$$

我国沥青面层的厚度通常为 $16 \sim 24 \text{ cm}$,基层厚度通常为 $30 \sim 40 \text{ cm}$. 对于排水基层,厚度太小不能满足排水要求,厚度太大又不利于施工,通常变化在 $8 \sim 15 \text{ cm}$ ^[12]. 作为路面结构的基层或基层的一部分,也可按承受荷载的需要增加排水基层的厚度,但这时须对结构设计方案(增加其他

结构层的强度或厚度)考虑经济因素,通常采用排水层替代部分面层^[16]。

根据 Ridgeway 和同济大学数据^[6]可知路面渗入率的变化范围为 $0 \sim 300 \text{ cm}^3/(\text{h} \cdot \text{cm})$ 。本文取 $300 \text{ cm}^3/(\text{h} \cdot \text{cm})$ 作为计算渗入率;排水基层的渗透系数取为 $1.0 \sim 2.0 \text{ cm/s}$,其他计算参数见表1,计算结果见图6。

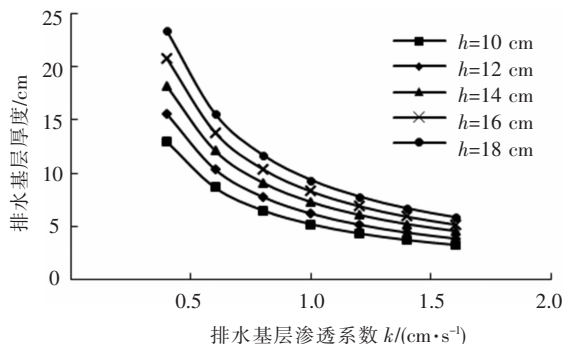


图6 沥青路面排水基层渗透系数与厚度的关系

从图6可看出当表面水渗入量一定时,透水材料的渗透系数越大,则所需要的排水基层厚度越薄。需要说明的是,分析只是从渗透系数的角度。在确定路面的厚度后,对排水基层的厚度的确定,不仅与排水基层的渗透系数有关,而且还要考虑到路面结构整体的强度要求。例如,如果采用渗透系数较大的排水基层材料,其孔隙率较大,但是其强度比孔隙率小的同种材料要小,因此在满足排水设计的同时还需要满足基层强度的要求。这样可以找到一个平衡点来确定最合理的排水基层材料类型和厚度。

4 结 论

1) 在考虑路面裂缝分布特征对路面水渗入率的影响的基础上,通过建立面层和排水基层之间的渗流平衡方程,推导出了路面水渗入量和路面水渗入率的理论计算公式;在考虑沥青路面由于龟裂产生的局部渗水的基础上,建立了龟裂破损路面渗水量计算模型,通过求解得到了渗水量的表达式。

2) 通过分析关于破损路面渗入水量的已有试验和本文试验成果,发现路面水渗入率增长倍数大约为 $30 \sim 260$ 倍。因此,在路面设计时需考虑裂缝和龟裂的渗入率,而不是采用统一的经验标准。规范中的推荐值对于路面后期不同破损程度的渗水情况估计不准,需要考虑路面的破损程度,如裂缝长度、宽度、密度、路面龟裂密度和龟裂破损程度来估算路面的渗水量。

3) 当确定了路面水渗入量之后,排水基层材料的选择取决于其渗透系数。渗透系数越大,所需

要的排水基层厚度越薄。除此之外,在基层材料选择时,排水基层的厚度不仅与排水基层的渗透系数有关,而且还要考虑路面结构整体强度要求。

参考文献:

- [1] 张林洪,王苏达,吴培关,等. 沥青路面结构的渗透性能测试研究[J]. 中南公路工程,2005,30(3):10-14.
- [2] 沙庆林. 沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [3] 沈金安. 关于沥青混合料的均匀性和离析问题[J]. 公路交通科技,2001,18(6):20-24.
- [4] CEDERGREN H R. Drainage of highway and airfield pavement [M]. New York: John Wiley & Sons, 1974.
- [5] RIDGEWAY H H. Infiltration of water through the pavement surface [J]. Transportation Research Record, 1976, 616:98-100.
- [6] JTJ 018-97 公路排水设计规范[S]. 北京:人民交通出版社出版,1997.
- [7] 吉青克. 基于面层渗透系数的路表水渗入率设计[J]. 岩土工程学报,2005,27(9):1045-1049.
- [8] CHEN J S, LIN K Y, YOUNG S Y. Effect of crack width and permeability on moisture-induced damage of pavements [J]. Journal of materials in Civil Engineering - ASCE. 2004, 16(3):276-282.
- [9] HANSSON K, LUNDIN L C, SIMUNEK J. Modeling water flow patterns in flexible pavements [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1936:133-141.
- [10] FREEZE R A, CHERRY J A. Groundwater [M]. Englewood Cliffs N J: Prentice Hall, 1979.
- [11] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999:37-38,401-403.
- [12] 但汉成,李亮,杨小礼,等. 基于渗流理论的沥青路面渗入率计算与分析[J]. 中南大学学报:自然科学版,2010,41(2):742-748.
- [13] SLOWIK V, SAOUMA V E. Water pressure in propagating concrete cracks [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(2):235-242.
- [14] 李宗利,任青文,王亚红. 岩石与混凝土水力劈裂缝内水压分布的计算[J]. 水利学报,2005,36(6):656-661.
- [15] 王洪江,吴爱祥,刘金枝,等. 排土场浸出过程中的渗流规律[J]. 中南大学学报:自然科学版,2006,37(2):390-395.
- [16] JTJ 052-2000 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[s]. 北京:人民交通出版社,2000.

(编辑 赵丽莹)