

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.02.006

透水铺装渗透性能计算方法探讨

宋剑英^{1,2}, 王建龙^{1,3}, 任希岩⁴, 李俊奇^{1,3}, 孙 铮¹

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京市首都规划设计工程咨询开发有限公司, 北京 100045; 3. 北京建筑大学 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 100044; 4. 中规院<北京>规划设计公司, 北京 100044)

摘 要: 透水铺装系统对雨水径流具有良好的促渗减排效果,在海绵城市建设过程中得到了广泛应用,但关于透水铺装渗透性能的监测和计算方法,在国内外研究和工程应用中尚未形成成熟的方法。针对上述问题,通过对国内外渗透速率计算方法的综述,分析了各种计算方法用于透水铺装渗透性能计算的可行性,探讨了基于达西定律的监测方法在透水铺装渗透性能监测中的局限性,并根据达西定律衍生公式的适用条件,提出了各种衍生公式用于透水铺装渗透过程计算的可行性,以为透水铺装的推广和效果评估提供科学依据。

关键词: 透水铺装; 雨水径流; 渗透系数; 达西定律

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)02-0034-07

Discussion on the Permeability Calculation Method of Permeable Pavement

SONG Jian-ying^{1,2}, WANG Jian-long^{1,3}, REN Xi-yan⁴, LI Jun-qi^{1,3}, SUN Zheng¹

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment<Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Capital Urban Planning & Design Consulting Development Corporation, Beijing 100045, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 4. CAUPD Beijing Planning & Design Consultants Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Permeable pavement system has been widely used in the construction of sponge cities due to its well characteristics of promoting seepage and emission reduction for rainwater runoff. However, mature calculation and monitoring methods of permeation performance have not been established during the study and application of permeable pavement domestic and international. Through a review of the calculation methods of permeability coefficients, the calculation methods of permeability coefficients of permeable pavements are systematically analyzed. The limitations of monitoring methods based on Darcy's law in practical engineering applications were explored. According to the applicable conditions of the derived formulas based on Darcy's law, the feasibility of the derived formula for calculating the infiltration process of permeable pavement was put forward, which provide a scientific basis for the

popularization and application of permeable pavement and effect evaluation.

Key words: permeable pavement; stormwater runoff; permeability coefficient; Darcy's law

透水铺装作为典型的低影响开发措施之一,不但可以削减雨水径流外排总量,还能起到削减峰值流量的作用。此外,透水铺装还能通过滞蓄和过滤作用对雨水径流进行调节、净化,其多孔材质还能吸收热量,缓解城市热岛效应,改善局部生态环境,恢复城市水文自然循环过程。因此,透水铺装在海绵城市建设过程中得到了广泛应用^[1]。

目前,关于透水铺装的研究主要集中在水量的控制效果、水质的净化效果和透水铺装材料强度及堵塞对渗透性能的影响等方面。在水量方面,主要围绕降雨强度、铺装结构等因素研究其水文特性及产汇流规律^[2]。透水铺装对径流污染控制的研究主要集中在铺装结构方面,透水铺装的结构、材质是影响其水质净化效果的重要因素,而透水铺装的渗透性能和许多影响因素有关,比如铺装面层的类型、砖缝大小、填料层粒径级配、基层厚度等^[3]。透水铺装渗透性能的研究主要集中在透水铺装的堵塞与强度等方面。在堵塞方面,主要是通过系统研究堵塞程度与渗透性能之间的关系,用于量化评估透水铺装对雨水径流量和水质的控制效果^[4]。透水铺装的面层渗透性能还与其材质强度相关,面层材质越密实,其抗压强度越高,透水铺装面层渗透性能越低。因此,在保证透水铺装强度达标的同时如何保证其渗透性能是目前研究热点之一。然而对于透水铺装系统整体渗透规律,尤其与渗透过程相结合的研究较少,因此,如何准确计算透水铺装的整体渗透性能,对于量化评估透水铺装的水量及水质控制效果和优化设计参数至关重要。

1 透水铺装构造及渗透特点

透水铺装构造一般由四部分构成,由上到下依次为:面层、找平层、基层及土基层^[5](见图1)。透水铺装面层是实现铺装内部与地表环境进行水、气交换的界面,为多孔材质,面层孔隙率一般不宜小于20%。面层可采用透水砖、透水混凝土、透水沥青,其构造分别见图1(a)~(c)。找平层可为面层找平底面,同时还可净化面层下渗的雨水,厚度一般为25~50 mm^[6]。目前,找平层使用材料一般有细砂、中砂、粗砂,以及干硬性砂浆等。为保证铺装整

体的渗透能力,宜选择中、粗砂。基层是影响透水铺装滞水能力的重要部分,并且能传递面层的荷载。透水基层的材料一般是天然砂砾,或者级配碎石和无砂混凝土的组合,这类材料强度和稳定性较好,且孔隙率较高,一般大于15%。

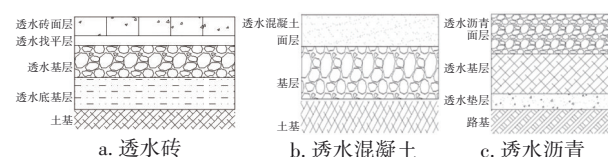


图1 透水铺装结构类型

Fig.1 Permeable pavement structure types

透水铺装的渗透过程受其结构的影响,与传统土壤渗透过程相比,其边界条件更为复杂。首先渗透介质为多层结构,分层明显,每层介质也是非均质;其次渗流流态不易确定,受介质密度等因素的影响,流态可能会在层流与紊流之间不断变化;最后其含水率会影响渗透的过程,随着渗透过程的进行,透水铺装最终达到饱和持水状态,也就是稳定渗透状态。因此透水铺装渗透过程的边界条件可概括为:多层非均质结构、入渗初期为非饱和持水、渗流流态不能保持恒定层流。

2 透水铺装渗透性能计算方法

目前关于透水铺装渗透性能的研究中大多采用达西定律,达西定律认为饱和土壤中水的渗流速度与水力坡降呈线性关系,故又称线性渗流定律。最能直接衡量透水铺装透水性能的参数是渗透系数^[7],而目前关于透水铺装渗透系数测定方法的研究大多是基于面层,常用的计算方法也都是基于达西定律,可分为实验法与现场测定两种。国际标准 *Bituminous Mixtures — Test Methods for Hot Mix Asphalt Part 19: Permeability of Specimen* (EN 12697—19)给出的透水铺装面层渗透系数实验测定方法是在常水头的条件下通过达西定律计算的。计算公式具体如下:

$$Q = K \times A \times J = K \times A \times \frac{H}{L} \quad (1)$$

$$K = \frac{QL}{AH} \quad (2)$$

式中: Q 为透水砖的稳定出流量, m^3/s ; K 为渗透

系数, m/s ; J 为水力坡降; H 为常水头高度, m ; L 为水流的路径, m ; A 为过水断面面积, m^2 。

上述标准中透水铺装面层渗透系数的计算方法采用达西定律, 而达西定律的适用条件为: 恒温, 流体流态为恒定层流, 均质砂土, 多孔介质为均质各向同性, 且不发生形变, 渗透速率符合线性关系。如前所述, 实际的透水砖面层由砖体与砖缝构成, 砖体多为多孔介质结构, 砖缝多由中砂填充。可见面层为非均质, 与达西定律均质砂土入渗条件不一致。此外, 透水铺装为多层介质结构, 整体为非均质, 每层介质的孔隙率、密度都不同, 渗流在每层介质中的惯性力与黏滞力也均不相同, 故透水铺装渗流过程中, 渗流流速在每层介质中是不同的, 不符合线性关系。因此, 采用达西定律计算透水铺装的渗透系数与其适用条件存在一定偏差。

《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009) 给出了透水沥青现场测定渗透系数的计算方法, 即通过单位时间单位面积水量的变化计算透水铺装面层的渗透系数, 计算公式如下:

$$K = (V_2 - V_1) / [(t_2 - t_1) \times A'] \times 10 \quad (3)$$

式中: V_1 为第一次读数时的水量, mL ; V_2 为第二次读数时的水量, mL ; t_1 为第一次读数时的时间, s ; t_2 为第二次读数时的时间, s ; A' 为标准环的内截面积, cm^2 。

上述计算方法认为渗透速率与渗透系数相同, 这个假设的前提也是基于达西定律。式(3)中将渗透速率近似等于渗透系数, 因为实际的透水铺装包含土基层, 水流渗透的路径要远大于常水头距离面层的高度, 导致常水头高度近似等于水流路径, 水力坡度近似等于1。由此则有:

$$Q = K \times A \times J = A \times v \quad (4)$$

$$v = K \times J \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知, 水力坡度近似等于1时, 渗透系数近似等于渗透速率。可见透水铺装渗透系数的测量方法都是基于达西定律, 而达西定律的适用条件与透水铺装多层结构、介质非饱和持水、流态非恒定层流的渗流过程存在较大的偏差。因此, 采用达西定律计算透水铺装的渗透性能存在一定误差。

目前, 关于透水铺装渗透性能方面的研究主要采用上述两种方法。例如, 赵金辉等^[8]采用现场测

定法比较了渗透系数不同测定方法对测定结果的影响, 提出测试水头高度在50 mm以下、内环直径在200 mm以上的双环定水头法的测定结果具有良好的精度。张炯^[9]发明了一种透水砖新型渗透系数测试仪, 利用达西定律将入渗量与渗出量相结合, 推导出变水头条件下渗透系数的计算公式, 其研究也是建立在达西定律的基础上。由此可见, 目前关于透水铺装渗透性能的研究都是借助达西定律, 且大多局限于面层渗透性能的分析, 尚缺乏对透水铺装整体渗透性能的研究。

达西定律在土壤渗透性能研究中应用广泛, 如渗透补给地下水研究、黏土的渗透等。而随着研究方法与监测设备的不断发展, 许多研究人员对达西定律的线性关系提出了不同观点。例如对于地下水的研究, 多位学者发现随着渗流流速(水力坡度)的增加, 地下水的运动规律逐渐偏离达西定律的线性方程。1901年Forchheimer通过实验发现随着渗透速率的增大, 渗流速度与水力梯度之间的关系逐渐偏离线性关系, 水力坡降 J 和渗流速度 v 之间呈非线性关系:

$$J = av + bv^2 \quad (6)$$

式中: a 、 b 为常数。

针对达西定律适用条件的研究, 1983年Bear在《多孔介质流体动力学》中归纳了达西定律的适用条件, 达西定律的适用范围是雷诺数 $Re < (1 \sim 10)$ 的层流运动, Re 值大于此范围的层流或紊流运动时渗流为非线性关系。而万军伟等^[10]通过透水石实验验证了即使在 $Re < (1 \sim 10)$ 的条件下, 渗流过程呈现出随着 Re 的增大, 水流阻力逐渐增大的趋势, 服从非线性渗流规律, 并提出达西线性渗流定律只是对斜率变化不大的非线性渗流规律的近似表征, 孔隙介质的渗流不存在线性流动关系。越来越多的研究表明, 达西定律描述的渗流运动并非适用于所有介质的渗流过程。因此, 对于透水铺装这种复杂的多层介质结构, 在工程应用时, 需要依据实际渗流过程对达西定律进行修订, 以提高其计算精度, 或者找到精度更高、适用性更好的经验公式来描述其渗流过程。

3 达西定律衍生公式及应用

在入渗公式的研究方面, 国外学者基于达西定律相继提出了Green-Ampt、Philip、Horton等入渗公

式。其中 Horton 公式是经验公式,没有明确的物理意义,Green-Ampt 模型和 Philip 模型的参数有明确的物理意义,常用于分析渗透速率与土壤特征的关系。

3.1 Green-Ampt 公式

Green-Ampt 公式是 1911 年由 Green 和 Ampt 基于毛细管理论提出的土壤水分入渗物理模型。最初的 Green-Ampt 模型是基于均质性土壤的水分入渗过程推导出来的,应用该模型需要满足以下 5 个假设^[11]:①湿润土壤为饱和持水状态,水在土壤中的迁移过程符合达西定律。②湿润锋前的土壤空气压力为恒定值。③湿润区土壤含水率保持不变。④湿润锋处水压为恒定值。⑤可以忽略湿润锋由初始含水量变为饱和含水量的土层厚度。Green 和 Ampt 假定在入渗过程中,含水土壤剖面中存在湿润锋面,在湿润锋面与土表面间的土壤处于饱和状态,同时湿润锋面处存在一个恒定的吸力。其基本表达式为:

$$i(t) = k_s \frac{Z_f + S_f + H'}{Z_f} \quad (7)$$

式中: $i(t)$ 为土壤渗透速率,cm/min; k_s 为饱和导水率,cm/min; H' 为土壤表层积水深度,cm; S_f 为湿润锋面吸力,cm; Z_f 为湿润锋深度,cm。

初始提出的 Green-Ampt 模型因为其适用条件的限制,在实际工程应用中存在一些误差,为扩展该模型的应用范围,国外学者对该模型进行了研究,并不断引入新参数,扩展了该模型的适用范围。目前,Green-Ampt 入渗模型不仅适用于均质土壤,还可模拟初始含水量不均匀土壤、分层土壤的水分入渗过程,以及浑水、泥沙水灌溉条件下土壤水分入渗过程,其适用条件可用于非均质非饱和介质的渗透速率计算。透水铺装面层为非均质材料,由上而下的面层、找平层、基层和土基层的材质各不相同,入渗初期透水铺装为非饱和持水状态,渗透条件与 Green-Ampt 公式的适用条件相似,且透水铺装面层为多孔结构,雨水湿润材料中的固相介质颗粒形成吸湿水和薄膜水,并在小孔隙内形成毛管水,而 Green-Ampt 入渗公式是基于毛细管理论提出的,与透水铺装面层的渗透条件基本相同。因为 Green-Ampt 入渗公式的参数有实际的物理意义,可以根据实际介质渗透条件对公式进行修订,从而得出适合不同类型介质渗透条件的渗透参数。因此,

理论上可以 Green-Ampt 入渗公式为基础,通过透水铺装渗透实验或模型误差分析,对该公式进行修订,建立适合于描述透水铺装渗透性能的经验公式。

3.2 Horton 公式

Horton 公式是计算入渗曲线的常用经验公式,是 R. E. Horton 在 1933 年研究了大量不同类型土壤入渗过程的基础上建立的经验模型。由于 Horton 公式的参数灵活,并与实际观测数据拟合度高而被广泛应用,但是公式参数多,且为经验公式,没有实际的物理意义。又因为该公式适用的前提条件为降雨强度超过入渗强度,为超渗产流模型,所以在实际应用时要根据实际情况进行修正。Horton 模型的基本公式为:

$$i(t) = i_c + (i_0 - i_c)e^{-kt} \quad (8)$$

式中: i_c 为稳定入渗速率,cm/min; i_0 为初始入渗速率,cm/min; t 为时间,min; k 为与土壤特性有关的经验常数。

许多研究表明,Horton 公式与多种土壤、下垫面的入渗数据有很高的拟合度^[12-14]。Horton 模型对渗透介质的性质与含水率没有特定的要求,但因为其是超渗产流模型,故降雨强度大于面层入渗速率时,其适用条件可用于透水铺装渗透速率的计算,降雨强度较小时则不能用于透水铺装渗透速率的计算。现有雨水管理模型中为了简化建模过程,对于透水铺装的下渗计算一般选用 Horton 模型计算,而透水铺装面层的渗透系数达到 0.1 mm/s,基层碎石渗透系数更大,当降雨强度较小时,透水铺装的产流过程一般为蓄满产流,与 Horton 公式的提出条件不一致,故在降雨强度小于透水铺装入渗率时,采用 Horton 公式存在一定的误差。Horton 模型虽然对不同的下垫面渗透过程都有很好的拟合精度,但是因为公式中涉及初始入渗速率及稳定入渗速率,所以一般需要通过实验测得这两个参数,才能使用该公式。因透水铺装的结构和介质均需要满足一定的功能设计要求,因此该公式的初始入渗率可以采用面层的渗透系数,稳定入渗速率采用经验值,理论上也可用于透水铺装渗透性能的计算。

3.3 Philip 公式

1957 年 Philip 基于非饱和半无限土壤垂直入渗条件,在系统研究 Richard 方程的基础上,提出了能较好描述短历时土壤水分一维垂直入渗情况的入

渗模型,该模型为半经验半理论性的模型,具有明确的物理意义,入渗公式中只含有两个入渗参数,形式简单,能表述土壤水分的入渗过程,在世界范围内得到较广泛的应用。

Philip 入渗公式具体如下:

$$I = St^{0.5} + i_c t \quad (9)$$

$$i(t) = \frac{1}{2} St^{-1/2} + i_c \quad (10)$$

式中: I 为累积入渗量,表示自入渗开始至 t 时刻的入渗总量, cm; S 为吸湿率, $\text{cm}/\text{min}^{1/2}$, 表示土壤由基质势差引起吸水的速率。

目前对 Philip 公式的研究主要是分析公式对不同土壤的适用性^[15-17]。透水铺装因其面层的多孔结构具有很好的渗透性能,可以将其渗透过程近似看作一维入渗,初期入渗是非饱和条件,而且透水铺装的底层结构是土基可以等效为半无限的土壤入渗,理论上符合 Philip 公式的适用条件。与 Green-Ampt 公式相比, Philip 公式有明确的物理意义,公式结构简单,涉及参数少,而且对不同土壤渗透过程的描述具有很高的精度,同时还可以进行修订,为透水铺装渗透性能计算研究提供参考。

3.4 等效渗透系数公式

等效渗透系数是基于分层介质结构渗透过程提出的,常用于简单地地质条件非均质含水层的岩层入渗计算。因为非均质岩层是由许多透水性各不相同的薄层相互交替组成的层状岩层,入渗方向按层面的方向划分可分为水平成层、垂直成层和倾斜成层,对于不同方向的入渗,等效渗透系数分别给出了相应的公式。

透水铺装的渗透过程可近似看作一维垂直入渗(见图2),其表达式为:

$$K_z = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{K_i}} \quad (11)$$

式中: K_z 为等效渗透系数, cm/min ; M_i 为每层介质的厚度, cm; K_i 为每层介质的渗透系数, cm/min 。

对于简单非均质土壤的入渗过程,等效渗透系数的计算精度高、方法简洁^[18]。同时对于透水铺装的多层结构,每一层的渗透系数都不相同,水流可近似看作垂直穿过每一层介质,符合等效渗透系数的适用条件。对不同类型透水铺装整体渗透性能

的研究表明,采用等效渗透系数法研究透水铺装的渗透机理存在一些难点,首先基于等效渗透系数的计算公式,每一层结构的渗透系数都参与计算,比如,透水砖铺装的面层为砖与缝的非均质结构,砖体为多孔材质,砖缝一般为中砂,这两种结构均需参与计算。其次对于饱和持水下的透水铺装,渗流长度就是每层介质的厚度,但是入渗初期水流不同时刻的入渗位置难以确定,且等效渗透系数的计算是以达西定律为前提的,故等效渗透系数只能用于恒水头,介质为饱和持水时的渗透过程,即计算的是稳定渗透系数。目前,等效渗透系数公式主要用于计算和探究岩层等大尺度的渗透规律,对于小尺度透水铺装渗透的可行性还有待进一步研究的验证。

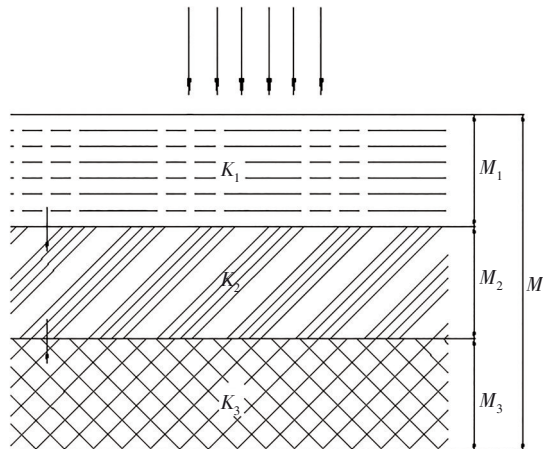


图2 等效渗透系数计算示意

Fig.2 Calculation of equivalent permeability coefficient

综上所述,不同渗透性能计算方法的适用条件和透水铺装渗透特征比较见表1。由表1可知,现有的渗透公式与透水铺装的渗透过程均存在一定差异。达西定律的衍生公式根据土壤入渗过程的实际情况进行了改进和修订,其中 Green-Ampt 公式克服了达西定律的局限条件,可以适用于非饱和非均质介质的渗透速率计算,而 Horton、Philip 公式虽然对多种类型下垫面渗透速率的计算有很高的拟合精度,但是因为公式的适用条件限制,故在应用上有一定的局限性。考虑到透水铺装特殊的多层、非均质结构特征,等效渗透系数方法在理论上比其他经验公式更适合用于透水铺装渗透过程的描述,但在应用尺度上存在较大差异,因此,需要通过实验进一步去验证其适用性。

表 1 经验公式及其用于透水铺装渗透过程的可行性分析
Tab.1 Empirical formula and its feasibility analysis for infiltration process of permeable pavement

经验公式	公式适用条件	透水铺装渗透特征	可行性分析
达西定律	均质砂土渗透,等温,渗流流态为恒定层流,渗流水头恒定,介质饱和持水	①入渗介质为多层非均匀结构; ②渗流流态不能保证为层流; ③渗流流速受多层介质影响,随渗流过程而变化; ④入渗初期介质为非饱和持水	适用条件与透水铺装多层非均质结构、入渗初期为非饱和持水、渗流流态不能保持恒定层流的渗透特征不符
Green-Ampt 公式	适用于均质与非均质介质渗透,对介质含水率没有要求,对渗流流态没有要求		适用条件完全满足透水铺装渗透的特征,且该公式是基于毛细管理论提出的,与透水铺装面层的入渗过程相符,但该公式涉及参数较多,相比其他经验公式,该公式较为复杂
Horton 公式	适用于均质与非均质介质渗透,对介质含水率没有要求,对渗流流态没有要求,但是渗流运动必须为超渗产流		对介质的含水率与性质没有特定的要求,且对不同介质的渗透过程都有很好的拟合精度,但该公式为超渗产流模型,故当降雨强度小于面层的入渗率时,该公式拟合存在一定的误差
Philip 公式	适用于均质与非均质介质渗透,对介质含水率没有要求,对渗流流态没有要求,主要用于模拟一维垂直入渗过程		该公式是基于非饱和半无限土壤垂直入渗条件提出的,满足透水铺装非饱和非均质的渗透特征,且对不同介质的渗透过程有很高的拟合精度,但该公式主要用于模拟一维垂直入渗过程
等效渗透系数公式	介质为分层结构,各层介质为均质,饱和持水,流态为恒定层流		公式结构与透水铺装的多层结构一致,但面层渗透系数不易确定;介质非饱和持水时,渗流路径长度不易确定;目前主要用于研究大尺度岩层的渗透规律,对于应用小尺度透水铺装渗透的可行性需要进一步研究验证

4 结论与展望

目前,对透水铺装渗透方面的研究及测定方法已取得了许多成果,但大都是基于面层的渗透性能研究,且均基于达西定律。由于透水铺装为多层非均质结构、入渗初期为非饱和持水、渗流流态不能保持恒定层流等,因此基于达西定律不能完全描述透水铺装的渗透过程。

通过不同渗透公式适用条件的比较得出:Green-Ampt 公式的适用条件较符合透水铺装的渗透过程,Horton 公式对描述不同下垫面的渗透过程有很高的拟合精度,但是仅适用于降雨强度大于介质入渗率的情况。因为 Philip 公式描述的是一维垂直入渗过程,所以只能用于短历时、铺装表面没有产生径流的渗透过程。等效渗透系数公式在结构上符合透水铺装由上到下的多层级结构,与透水铺装的渗透过程相近,但在应用尺度上存在较大差异,仍有待进一步去验证。

透水铺装渗透过程的准确描述与计算,对于透水铺装系统的评估具有重要意义。因此,在今后研究和工程实践中仍有待于根据透水铺装的结构特点,探求能够准确描述透水铺装整体渗透性能的计算方法。

参考文献:

[1] 韦甦,吴力平,李军. 透水砖应用于海绵城市建设的若干问题探讨[J]. 中国给水排水,2017,33(12):1-5.
WEI Su, WU Liping, LI Jun. Discussion on the application of water permeable brick in the construction of sponge city [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (12): 1-5(in Chinese).

[2] FASSMAN E A, BLACKBOURN S. Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15: 475-485.

[3] 马昱斐,谢昊文,高成. 新型透水铺装导水结构渗透系数的研究[J]. 人民珠江,2017,38(6):24-28.
MA Yufei, XIE Haowen, GAO Cheng. A study on hydraulic conductivity of a new-style water structure of permeable pavement [J]. Pearl River, 2017, 38 (6): 24-28(in Chinese).

[4] DEO O, SUMANASOORIYA M, NEITHALATH N. Permeability reduction in pervious concretes due to clogging: experiments and modeling [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010,22(7):741-751.

[5] 许浩浩,吕伟娅. 透水铺装系统控制城市雨水径流研究进展[J]. 人民珠江, 2018, 39(10): 29-33.
XU Haohao, LÜ Weiya. Research progress of urban

- stormwater runoff control by permeable pavement technology [J]. *Pearl River*, 2018, 39 (10): 29-33 (in Chinese).
- [6] AL-RUBAEI A M, VIKLANDER M, BLECKEN G T. Long-term hydraulic performance of stormwater infiltration systems [J]. *Urban Water Journal*, 2015, 12 (8): 660-671.
- [7] CHU L, FWA T F. Evaluation of surface infiltration performance of permeable pavements [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 238: 136-143.
- [8] 赵金辉, 赵亚乾, 谢西, 等. 透水路面现场透水性测试方法比较[J]. *中国给水排水*, 2019, 35 (5): 114-118, 124.
- ZHAO Jinhui, ZHAO Yaqian, XIE Xi, *et al.* Comparison of field permeability test methods for permeable pavement [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35 (5): 114-118, 124 (in Chinese).
- [9] 张炯. 一种路面透水砖渗透系数测试仪: 201721815331.6 [P]. 2017-12-22.
- ZHANG Jiong. A Tester for Permeability Coefficient of Pavement Permeable Bricks: 201721815331.6 [P]. 2017-12-22 (in Chinese).
- [10] 万军伟, 黄琨, 陈崇希. 达西定律成立吗? [J]. *地球科学*, 2013, 38 (6): 1327-1330.
- WAN Junwei, HUANG Kun, CHEN Chongxi. Reassessing Darcy's Law on water flow in porous media [J]. *Earth Science*, 2013, 38 (6): 1327-1330 (in Chinese).
- [11] HSU S Y, HILPERT M. Incorporation of dynamic capillary pressure into the Green - Ampt model for infiltration [J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10 (2): 642.
- [12] 张晓凤, 张旭, 蒋晶, 等. 北京奥林匹克森林公园典型下垫面入渗特性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2012, 52 (2): 223-228.
- ZHANG Xiaofeng, ZHANG Xu, JIANG Jing, *et al.* Soil infiltration characteristics of typical underlying surfaces in the Olympic Forest Park, Beijing [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2012, 52 (2): 223-228 (in Chinese).
- [13] 宋小帅, 康峰峰, 韩海荣, 等. 辽河源典型森林类型的土壤水文效应[J]. *水土保持通报*, 2015, 35 (2): 101-105.
- SONG Xiaoshuai, KANG Fengfeng, HAN Hairong, *et al.* Soil hydrological effects of typical forest types in upper reaches of Liaohe River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35 (2): 101-105 (in Chinese).
- [14] 吴冰, 朱元骏, 邵明安. 降雨强度对含砾石土壤产沙及入渗的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25 (6): 87-91.
- WU Bing, ZHU Yuanjun, SHAO Ming'an. Effect of rainfall intensity on sediment yield and infiltration on stony soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (6): 87-91 (in Chinese).
- [15] 程诗念, 樊贵盛. 支持向量机的盐碱土壤 Philip 入渗模型参数预测研究[J]. *节水灌溉*, 2017 (9): 47-50.
- CHENG Shinian, FAN Guisheng. Saline-alkali soil Philip infiltration model parameters prediction based on support vector machine [J]. *Water Saving Irrigation*, 2017 (9): 47-50 (in Chinese).
- [16] 李昊哲, 樊贵盛. 冻融土壤 Philip 入渗模型参数的 BP 预报模型[J]. *节水灌溉*, 2017 (5): 5-10.
- LI Haozhe, FAN Guisheng. The BP forecasting model based on the Philip infiltration model under freezing thawing condition [J]. *Water Saving Irrigation*, 2017 (5): 5-10 (in Chinese).
- [17] 范严伟, 赵文举, 王昱. 初始含水率对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响[J]. *兰州理工大学学报*, 2014, 40 (5): 60-64.
- FAN Yanwei, ZHAO Wenju, WANG Yu. Influence of initial water content on parameters of Philip model of vertical one-dimensional infiltration [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2014, 40 (5): 60-64 (in Chinese).
- [18] 陈小茜, 曾斌, 王春晖, 等. 基于颗粒流理论的层状非均质介质等效渗透系数研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45 (2): 7-12.
- CHEN Xiaoxi, ZENG Bin, WANG Chunhui, *et al.* A study of the equivalent hydraulic conductivity of layered heterogeneous media with the particle flow theory [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2018, 45 (2): 7-12 (in Chinese).

作者简介: 宋剑英 (1996-), 男, 北京人, 硕士研究生, 研究方向为城市雨水控制利用。

E-mail: 1240644727@qq.com

收稿日期: 2020-02-24

修回日期: 2020-03-27

(编辑: 丁彩娟)