

透水路面现场透水性测试方法比较

赵金辉¹, 赵亚乾², 谢西¹, 林晨彤¹, 王臻¹, 蒋浩然¹

(1. 南京工业大学 城市建设学院, 江苏 南京 211816; 2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 现场准确测定透水路面(PP)的透水性是PP性能评价及维护的重要依据。以实验室透水混凝土(PC)试块测定结果为参照,通过试验比较了单环定水头法、单环变水头法、双环法等几种现场透水性测定方法的准确度,并进一步对透水环直径、测试水头等因素的影响进行了探讨。结果表明,现场测定PP透水系数时,测试水头在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准确度,可为PP现场透水性的准确测试提供借鉴。

关键词: 透水路面; 透水性测试; 单环透水试验; 双环透水试验

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)05-0114-06

Comparison of Field Permeability Test Methods for Permeable Pavement

ZHAO Jin-hui¹, ZHAO Ya-qian², XIE Xi¹, LIN Chen-tong¹, WANG Zhen¹,
JIANG Hao-ran¹

(1. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Accurate determination of permeability coefficient of the permeable pavement (PP) is an important basis for its performance evaluation and maintenance. Based on the testing results of laboratory permeable concrete (PC) specimen, the accuracy of the three field permeability test methods, such as constant water head single-ring method, falling water head single-ring method and double-ring method, was compared, and the influence of the diameter of the ring, testing water head and other factors were further discussed. The results showed that the double-ring field permeability test method had the highest accuracy in the field determination of PP permeability coefficient when water head was less than 50 mm and the inner ring diameter was above 200 mm. The results provide a good reference for the field test of PP permeability coefficient.

Key words: permeable pavement; permeability test; single-ring permeability test; double-ring permeability test

透水路面(PP)作为海绵城市建设的重要措施之一,应用日益广泛。实践表明,PP能够消减至少30%的入渗径流和70%的高峰径流量^[1-2]。目前通常采用测试透水系数来反映PP的透水性能,美国、加拿大以及欧洲等地对PP现场透水性测定方法进行了一些研究^[3-5],测试方法根据测试过程中透水环内水位控制方式可以分为定水头测试法和变

水头测试法,多数已有方法采用不同形式改进的多孔性土壤单环或双环渗透环试验^[6-7]。美国材料与试验协会(ASTM)基于渗透环试验提出的针对PP透水性测试的ASTM—C1701方法是一种单环定水头测试方法,而ASTM—D3385方法是一种土壤双环定水头测试方法。日本道路协会《排水性铺装技术指针》中提出的现场透水仪是一种单环变水头试

验方法。国内目前尚无统一的标准方法,已有研究表明,采用不同透水环改进方法进行透水性测试时结果差异较大^[8-9]。我国《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)提出了针对透水混凝土(PC)路面透水性的测试方法,该方法是一种针对PC试块的实验室测试方法。实验室测试的局限在于:①实验室测试主要针对新制备的透水性材料试块,难以满足已建成的PP现场原位透水性评价要求,此外,堵塞是PP推广应用面临的重要问题,尚未引起足够重视,未来也需要根据现场原位透水性测试来评价PP的堵塞程度,从而及时采取堵塞恢复维护措施^[10];②定水头和变水头测试都是在一定水头条件下进行的,测试水头、测试环的尺寸对现场测定结果有影响^[5,11];③实验室试验主要针对面层材料试块测试,试件侧面密封不透水,而实际路面现场测试中,由于面层中水平向侧渗等因素的影响,与实验室测试条件差异较大。因此,对不同测试方法及其准确性的影响因素进行研究,进而提出现场透水率测定的准确方法,对于已建成的PP透水率评价及抗堵塞维护管理具有重要价值。

1 试验材料和方法

1.1 试验装置

不同透水率测定方法所用的试验装置如图1所示。实验室试块测试装置的内筒直径为100 mm,参照我国《透水水泥混凝土路面技术规程》中的测试方法;单环测试装置的试验环直径从50 mm到300 mm分为5个规格,可进行单环定水头测试法或单环变水头测试法试验,与ASTM—C1701方法类似;双环测试装置的内环直径为200 mm、外环直径为500 mm,与ASTM—D3385方法类似。实验室试块测试法能够准确反映透水路面材料的渗透系数;双环测试法通过外环中的下渗水流,能够减少或消除内环下渗水流侧渗对测试结果的影响,提高透水率测定的准确性。

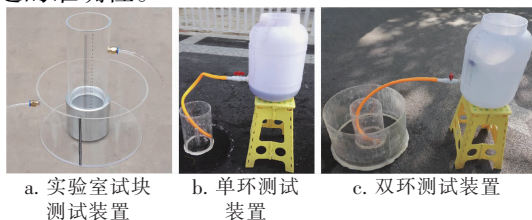


图1 试验装置

Fig.1 Schematics of experimental set-up

1.2 试验方法

1.2.1 PC试件制备及堵塞过程模拟

PC是常见的透水路面材料,本试验通过PC试件测试来反映不同方法的差异。试件制备方法:采用4.75~9.50 mm的花岗岩碎石为面层集料,碎石表观密度为2 652 kg/m³,堆积密度为1 469 kg/m³,孔隙率为44.6%,含泥率为0.6%;以42.5级普通硅酸盐水泥为黏结剂,添加聚羧酸缓凝高性能减水剂,与水拌合得到混合料,控制水灰比为0.3、集灰比为3.7、减水剂添加量为水泥质量的0.3%。将粗集料和50%的用水量加入强制式搅拌机拌合30 s,然后加入水泥、减水剂等继续拌合40 s,最后加入剩余的用水量拌合50 s以上,拌好的混合料放入长度和宽度均为1 000 mm、厚度为100 mm的模具压制成型,覆膜养护28 d。经测定,制备的试件透水系数(15℃)为(12.3±2.5) mm/s,连续孔隙率为(20±3.7)%,抗压强度为(24.5±3.4) MPa,平均弯拉强度为(3.25±0.95) MPa。

为了满足使用中已部分堵塞的PP透水性测试的需求,将模拟堵塞后的PC试件与新制PC试件进行对比,分析不同测试方法的适用性和准确性。堵塞模拟试验:采用黏土与0.075~1.18 mm的砂粒混合对PC试件进行重复多次堵塞试验,当堵塞后的PC试件透水能力下降到5 mm/s以下时,作为部分堵塞PC试件进行试验。

1.2.2 不同透水性测定方法的比较试验

采用实验室试块测定法、单环定水头测定法、单环变水头测定法及双环测定法在相同条件下分别测定新制与堵塞PC试件的透水系数,以实验室试块测定结果为参照,比较几种方法的准确性差异。单环定水头测定法以及双环测定法环内水头均稳定在5 cm(1 m水头相当于9.8 kPa,下同),而单环变水头测定法通过环内80 cm的初始水头渗透完所需时间计算透水系数。每组试验工况重复测试至少3次,透水系数可通过单位面积单位时间透过的水量计算,取稳定状态多次测量平均值。

1.2.3 透水环直径对测定透水系数的影响试验

采用50、100、150、200和300 mm的单环透水仪在相同条件下分别测定新制PC试件与堵塞PC试件的透水系数,比较不同尺寸的单环透水仪定水头法测定结果的差异,每组试验工况重复测试3次,取平均值。

1.2.4 测试水头对测定透水系数的影响试验

单环定水头试验中,控制透水环内水头分别为50、100、200、300、400、500、600、700、800、900、1 000 mm,在相同条件下分别测定新制 PC 试件与堵塞 PC 试件的透水系数,比较不同测试水头对单环定水头法测定结果的影响,每组试验工况重复测试3次,取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 不同方法对透水系数测定准确度的影响

相同条件下实验室测试法(A)、单环定水头测试法(B)、单环变水头测试法(C)和双环测试法(D)对新制与堵塞 PC 试件透水系数的测定结果如图2所示。可以看出,4种方法的测试结果差异较大。

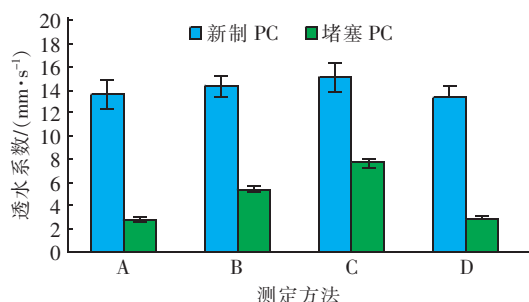


图2 不同透水性测定方法的结果比较

Fig. 2 Results comparison of different permeability test methods

对于新制的 PC 试件,不同方法的测定结果差异较小。其中,双环法由于可避免入渗水流的侧向流动,测定结果最接近实验室测试的透水系数,两者之间仅相差2.1%;单环变水头法的测定结果最大,为15.17 mm/s,双环法的测定结果最小,为13.46 mm/s,最大值与最小值相差12.7%;单环定水头法比单环变水头法更接近于实验室的测定结果。由于新制 PC 试件表面及内部孔隙贯通性良好,水流在竖直方向孔道中流动阻力较小,绝大部分渗透水流沿贯通性孔隙在重力作用下垂向渗透,横向侧渗比例较小,所以4种不同测试方法的结果差异不明显。

对于堵塞 PC 试件,不同方法的测定结果差异明显。其中,单环变水头法的测定结果最大,为7.69 mm/s,是实验室法测定值(2.75 mm/s)的2.8倍;同样地,双环法最接近实验室法的测定结果,两者相差4%。在部分堵塞的 PC 试件面层中,大粒径的颗粒会堵塞在距表面2 cm 以内深度的孔隙中^[12],小粒径的颗粒进入透水混凝土内部后在孔径

减小或孔隙方向急剧变化处会形成聚集堵塞现象^[13]。在测定透水系数时,渗入的水流垂向渗透过程中由于孔道部分被堵塞,阻力较大,在测试水头作用下,侧向渗透比例较大。因此,被堵塞的透水混凝土单环透水试验时侧渗比例较大,其测定结果与实验室测定法和双环法相差较大。

分析认为,在现场测定已部分堵塞的 PC 透水性时,单环定水头法和单环变水头法的测定结果已经不能反映 PC 的真实透水性能,应通过钻芯取样后实验室测定或通过双环法在现场测定。

2.2 透水环直径对单环法测定结果的影响

不同直径的单环透水仪测定结果如图3所示。对于新制的 PC 试件,实验室测定法测得的透水系数为13.74 mm/s,以此作为其实际透水系数参照。可以看出,测得的透水系数随着透水环直径的增大而逐渐减小。当直径>200 mm 时,测定结果比较接近实验室 PC 试件的实际透水系数。当透水环直径过小时,透水混凝土内部的水平侧渗面积与透水仪的垂直测试面积比值较大,在测试水头的作用下,测定过程中侧渗比例较大,其测定结果较实际值偏大。此外,实际测试中,由于测试面积小,透水混凝土在铺筑过程中碾压插捣不均匀等偶然因素对测定结果的影响也较大。而当透水环的直径过大时,一方面,虽然侧渗的影响减小,但测试需要的水量较大,透水仪中的水头较难保持恒定,也会影响测试准确性;另一方面,过大的直径在测定时难以保证路面的水平,若在透水仪测定范围内路面存在坡度,水流透过路面表层后在透水混凝土内部流动状态会较复杂,此时的测定结果也不能准确反映透水混凝土路面真实的透水性能。

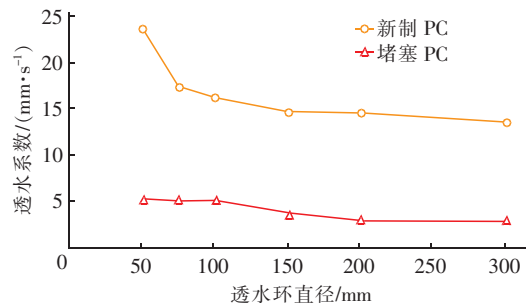


图3 透水环直径对透水性测定结果的影响

Fig. 3 Effect of the ring diameter on permeability test results

在测定被堵塞的透水混凝土试件时,以实验室

测定法测得的透水系数(2.75 mm/s)为参照,不同直径的透水环单环定水头法测定结果表明,当透水环直径>200 mm时,测定结果更接近透水混凝土试件的真实透水系数。随着透水环直径的增大,透水混凝土路面被堵塞程度不均匀以及堵塞物分布不均等因素对透水系数的影响会逐渐减小,测定结果能较好地反映透水混凝土路面的真实透水能力。

综上可知:透水仪直径过大或过小都不能准确反映透水混凝土路面的真实透水性能,在测定新建路面时,直径为200~300 mm的透水环的测定结果较为准确;在测定被堵塞的路面时,直径在200 mm以上的透水环的测定结果具有较好的准确度。

2.3 水头高度对透水系数测定结果的影响

不同水头高度下透水系数的测定结果如图4所示。可以看出,测得的透水系数随水头高度的增加而增加;测试水头对新制PC透水系数测定结果的影响比对堵塞PC的影响要小。

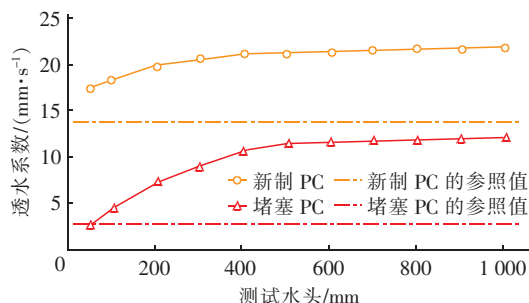


图4 测试水头高度对透水性测定结果的影响

Fig.4 Effect of testing water head on permeability test results

通常认为多孔路面中的渗流可近似通过达西定律来表示^[9,14],当流体流经透水路面多孔面层介质时,渗透流速与水头损失成正比且与流经距离成反比,即:

$$\begin{cases} \frac{Q}{t} = KIA = K \frac{dh}{L} A \\ v = KI \end{cases} \quad (1)$$

式中: K 为渗透系数,cm/s; Q 为渗流量,cm³; A 为试件断面面积,cm²; I 为水力坡度; L 为水流流经试件的厚度,cm; dh 为水头差,cm; t 为试验持续时间,s; v 为渗透流速,cm/s。

式(1)主要适用于透水性良好的多孔介质渗流规律。对于PC透水性测试的垂向渗透过程而言,在近似于零的测试水头下, I 值近似为1,因此,渗透

流速 v 数值上等于渗透系数 K 。而在有一定测试水头的条件下, I 值>1,渗透流速 v 与渗透系数 K 在数值上并不相等。此外,对于细粒多孔介质(如黏土层)或者堵塞状态多孔介质而言,由于颗粒的结合水膜或堵塞物部分阻塞了孔隙间的通道, I 值较小时,克服不了结合水膜的阻力,只有 I 大于某一起始水力坡度 I' ,才具有透水性^[15]。因此,渗透流速 v 可表示为:

$$v = K(I - I') \quad (2)$$

基于以上分析,进一步计算试验数据对应的渗透流速与渗透水力坡度之间的关系,如图5所示。

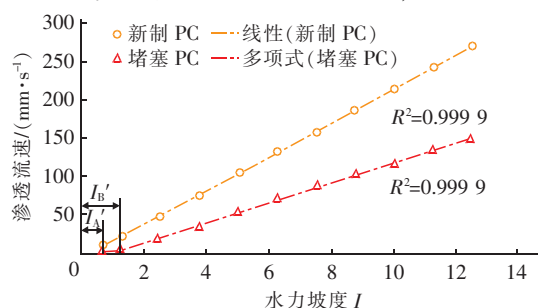


图5 渗透流速与水力坡度的关系

Fig.5 Relationship between seepage velocity and hydraulic slope

由图5可以看出,新制PC和堵塞PC试件在低水头条件下都存在初始水头,分别为 I_A' 和 I_B' ,新制PC的 I_A' 由于孔隙内部无堵塞物,起始水力坡度范围较小,此后,渗透流速与水力坡度呈良好线性关系,曲线斜率即为渗透系数 K 。堵塞PC的 I_B' 由于孔隙内堵塞物存在,起始水力坡度较大,与图4中初始阶段规律一致。此外,堵塞PC在高水力坡度下的渗透流速与水力坡度也呈非良好线性关系,分析其主要原因在于堵塞PC面层中可能的非层流状态。达西定律主要适用于层流状态,Youngs等研究指出^[16],多孔介质中层流会在雷诺数 $Re > 1$ 的条件下转变为紊流,而Dybbs和Edward研究发现,多孔介质中雷诺数介于1~10之间时存在一个过渡区,多孔介质中由于孔隙的大小和形状不均,层流和紊流之间的过渡比较平缓。堵塞透水混凝土路面局部空隙内可能的紊流使得渗流规律不完全符合达西线性渗透规律^[17]。因此,从试验结果来看,新制PC孔隙内的水流处于近似层流状态,渗透流速与测试水头呈线性正相关关系;而堵塞PC内部由于堵塞物占据了部分孔隙,孔道减小,实际渗透流速增大,

渗流过渡为不规则的相互混杂的过渡流,甚至在局部空隙出现紊流,导致局部水头损失急剧增大,不完全符合达西线性定律。

此外,从图4可以看出,新制PC和堵塞PC采用单环试验在高水头条件下的表观渗透系数均高于实验室试块的渗透系数,与2.1节试验结果一致,其结果主要是由于水平方向侧渗及高水头条件下水力坡度 >1 导致的。总体而言,低测试水头条件下的测定结果更接近于实验室参照透水系数,考虑到起始水力坡度的存在,结合实际应用环境中PC路面积水深度一般较小,建议在测定其透水系数时,测定水头高度应保持在 $0\sim 50\text{ mm}$ 之间,以获得更接近路面真实透水性的测试结果。

3 结论

① 实验室试块测定法、单环定水头测定法、单环变水头测定法和双环测定法在测定新建PC路面的透水系数时其结果差别不明显,其中双环法能较好地反映PC路面的真实透水性能;在测定被堵塞的PC路面时,不同方法的测定结果可相差2.8倍,单环测定法(定水头和变水头)的测定结果不能真实反映透水混凝土路面的透水性能,应该通过钻芯取样在实验室测定或是通过双环法现场测定。

② 采用单环定水头法测定透水混凝土的透水系数时,透水仪直径影响透水率测定的准确性。对于新建的透水混凝土路面,直径在 $200\sim 300\text{ mm}$ 的透水仪的测定结果可较好地满足测定准确性要求;而对于被堵塞的路面,直径为 200 mm 以上的透水仪的测定结果可较好地满足测定准确性要求。

③ 测定水头对透水系数测定结果的影响与透水混凝土的堵塞状态密切相关,新建的透水混凝土路面比被堵塞的透水混凝土路面受测定水头高度的影响要小。结合路面径流入渗的实际情况,建议测定水头高度在 $0\sim 50\text{ mm}$ 之间,测定结果更接近路面真实的透水性能。

④ 综合分析,在现场测定透水混凝土路面的透水系数时,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准确度。

参考文献:

[1] Collins K A, Hunt W F, Hathaway J M. Hydrologic comparison

of four types of permeable pavement and standard asphalt in eastern north Carolina [J]. J Hydrol Eng, 2008, 13 (12): 1146 - 1157.

[2] Liu Y, Bralts V F, Engel B A. Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model [J]. Sci Total Environ, 2015, 511: 298 - 308.

[3] Dierkes C, Kuhlmann J, Kandasamy J, et al. Pollution retention capability and maintenance of permeable pavements [A]. Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage [C]. Portland: American Society of Civil Engineers, 2002.

[4] Beecham S, Kandasamy J, Pezzaniti D. Influence of clogging on the effective life of permeable pavements [J]. Water Management, 2009, 162(3): 211 - 220.

[5] Li H, Harvey J, Kendall A. Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance [J]. Build Environ, 2013, 59: 536 - 546.

[6] Fassman E A, Blackbourn S. Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils [J]. J Hydrol Eng, 2014, 15(6): 475 - 485.

[7] Lucke T, Beecham S. Field investigation of clogging in a permeable pavement system [J]. Build Res Inf, 2011, 39 (6): 603 - 615.

[8] Li H, Kayhanian M, Harvey J T. Comparative field permeability measurement of permeable pavements using ASTM C1701 and NCAT permeameter methods [J]. J Environ Manage, 2013, 118: 144 - 152.

[9] 黄大伟, 魏姗姗, 王原原, 等. 透水混凝土孔隙率快速检测方法 [J]. 建材发展导向, 2014(24): 51 - 53.
Huang Dawei, Wei Shanshan, Wang Yuanyuan, et al. Rapid detection method of porosity of permeable concrete [J]. Development Guide to Building Materials, 2014 (24): 51 - 53 (in Chinese).

[10] Dougherty M, Hein M, Martina B A, et al. Quick surface infiltration test to assess maintenance needs on small pervious concrete sites [J]. J Irrig Drain Eng, 2011, 137 (8): 553 - 563.

[11] Qin Y, Yang H, Deng Z, et al. Water permeability of pervious concrete is dependent on the applied pressure and testing methods [J]. Adv Mater Sci Eng, 2015. DOI: 10.1155/2015/404136.

[12] 李波, 杨小龙. 透水混凝土路面空隙维护前后堵塞物的位置与深度 [J]. 中外公路, 2013, 33(6): 55 - 58.

Li Bo, Yang Xiaolong. Location and depth of pervious

(下转第124页)