

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.018

透水性混凝土强度-渗透性模型试验研究

崔新壮, 欧金秋, 张娜, 高智珺, 隋伟

(山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

摘要:高透水性是透水性混凝土的重要特征, 现有的透水性混凝土渗透系数测试装置存在试件侧壁渗漏问题, 为此提出了一种试件侧面防水涂抹+柔性夹层+套筒刚性壁的防侧漏复合结构, 提高了渗透系数测试精度。透水性混凝土的透水性和强度是一对矛盾体, 此消彼长, 但目前对它们之间关系缺乏系统的研究。通过室内渗透性和强度试验研究了多种因素(如:水灰比、集灰比、孔隙率)对透水性混凝土的强度和透水性的影响, 建立了强度-孔隙率模型、渗透性-孔隙率模型和强度-渗透性模型。研究表明:透水性混凝土与普通混凝土不同, 存在一个最佳水灰比, 最佳水灰比对应的强度最大; 强度和水灰比成开口向下的二次抛物线关系, 而孔隙率和集灰比均与渗透系数成正相关关系; 透水性混凝土强度和渗透性关系服从 Lorentzian 函数, 强度随渗透性的增大而逐渐降低, 降低速度先快后慢。在工程设计中应根据具体要求, 确定最佳的强度和渗透性组合。

关键词:透水性混凝土; 渗透系数; 强度-渗透性模型

中图分类号: TB302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)04-0114-07

Strength-permeability Model of Pervious Cement Concrete

Cui Xinzhuang, Ou Jinqiu, Zhang Na, Gao Zhijun, Sui Wei

(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China)

Abstract: High permeability is an important characteristic of pervious concrete. For the existing permeability testing devices of pervious concrete, the specimen sidewall leakage is serious due to the large numbers of open pores on the surface of specimens. To solve the problem, a new permeability testing method for pervious concrete was developed and a composite sidewall structure with waterproof daub, flexible rubber cushion and rigid sleeve sidewall was proposed. Meanwhile, the strength and permeability of pervious cement concrete are incompatible with a reciprocal relationship. However, limited research has been conducted on the relationship between them. Effects of water-cement ratio (W/C), aggregate-cement ratio and porosity on the properties of pervious concrete, including strength and permeability, were studied. Furthermore, strength-porosity model, permeability-porosity model and strength-permeability model were established. Tests reveal that: a) There is an optimum W/C of pervious concrete, at which strength reaches the maximum; b) The relationship between the strength and W/C shows a downward quadratic curve, and the permeability is proportional to porosity and aggregate-cement ratio; c) The relationship between strength and permeability of pervious cement concrete can be well fitted with the Lorentzian function, and the strength decreases when the permeability increases, but the rate of reduction decreases gradually. The optimum combination of strength and permeability should be determined based on

收稿日期: 2012-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279094, 51078222, 50708056); 山东省自然科学基金项目(ZR2011EEM012); 山东大学自主创新基金杰出青年培养项目(2010JQ001)

作者简介: 崔新壮(1974-), 男, 教授, 主要从事新型土工材料研究, (E-mail) cuixz@sdu.edu.cn.

the specific engineering requirements in design.

Key words: pervious cement concrete; permeability; strength-permeability model

透水性混凝土是由特定级配的集料、水泥、外加剂和水等按特定比例,不含或含极少量的细集料,经特殊成型工艺制成的,集料骨架间含有大量贯通性孔隙的蜂窝状结构的混凝土。一般透水性混凝土的孔隙率在15%~25%之间,多为直径超过1 mm的大孔,渗透系数为2~6 mm/s,最高可达10 mm/s^[1-2]。由于透水性强,透水性混凝土被广泛用于道路、建筑、水利等领域排水结构。在透水性混凝土的配合比设计、施工方法及力学性能等方面已有较多研究。Meininger^[3]与Paine^[4]分别通过室内模型试验开展了透水性混凝土用于排水路面材料的研究,其中包括最佳孔隙率、水灰比、路面压实与养护方法以及基层要求、施工方法等。杨静等^[5]通过室内路面模型试验研究发现,添加硅粉及增塑剂可有效提高透水性混凝土的强度,并且能保证它的渗透性、耐磨性及耐冻融性满足工程要求。蒋正武等^[6]研究发现,级配、集料粒径与集灰比是影响透水性混凝土渗透系数与强度的关键参数。Kevern等^[7-8]在爱荷华州立大学对透水性混凝土配比设计、养护方法、质量控制等做了较系统研究,在密苏里大学堪萨斯分校通过现场实测对透水性混凝土路面的耐久性进行了探讨^[9],指出透水性混凝土中空隙系统对其透水性、强度及长期耐久性等有很重要的影响^[10]。曾伟等^[11]研究发现透水性混凝土的尺寸效应对强度影响较大。杨健荣^[12]对再生骨料透水性混凝土的应用性能进行了研究。郭鹏^[13]对钢渣透水性混凝土进行了应用研究。王金晶等^[14]通过试验研究表明,在透水性混凝土中掺加聚丙烯纤维,可减少混凝土的干缩,抑制混凝土的开裂,并对混凝土的抗压强度有所改善,聚丙烯纤维的掺入对混凝土的透水系数影响不大,满足透水要求。目前针对透水性混凝土结构性能的研究也较多,如Vancura等^[15]对现有透水性混凝土路面的刚度与疲劳性能进行了探讨;Goede等^[16]对已经运营20 a的2条透水性混凝土路面车载引起的应力进行了研究。

虽然人们已对透水性混凝土渗透性和强度等性能指标进行了大量研究,但实践证明,透水性混凝土的渗透性与强度是一对矛盾体,此消彼长,如何寻求合适的平衡点,是设计者关心的问题。因此研究强度与渗透性关系,建立强度-渗透性模型对于工程应用具有重要意义,而目前缺乏对此类模型的深入研究。另外,现有的透水性混凝土渗透性试验装置和

方法均未充分考虑试件侧面开放通道带来的侧壁渗漏影响,导致渗透系数测试精度不够。鉴于此,本文将根据透水性混凝土的自身特点,研制一种新的渗透性试验装置,提出渗透系数精确测试方法,并通过渗透性和强度试验,建立透水性混凝土强度-渗透性等关系模型。

1 透水性混凝土渗透试验装置研制

现有的一些混凝土渗透系数测试装置只适用于渗透性较低(流速小于0.01 mm/s)的普通混凝土。虽然针对孔隙率较大、渗透性较强(流速大于1 mm/s)的透水性混凝土也有人设计了一些测试装置,但存在一些缺陷,测试精度不够。目前透水性混凝土渗透系数测试装置的最大缺陷是没有充分考虑试件侧壁的渗漏问题。这是因为透水性混凝土试件表面分布着大量开口孔隙,这些孔隙直接与侧壁贯通形成开放通道,开放通道的阻力小,水很容易从开放通道流出(如图1(a)所示),从而改变渗流路径,使得所测渗透系数明显偏大。杨志峰^[17]曾试图将试件端部与套筒内壁接触处密封,这样虽然在一定程度上减小了侧漏,但试件侧面主体开放通道仍然存在,进入试件内部的水依然容易取道这些开放通道,从试件流出(如图1(b)所示),导致测试结果仍然偏大。本文研制了一种适用于精确测试透水性混凝土渗透系数的装置(专利号:ZL201120452399.9),其优点是可以防止侧壁渗漏,操作简便,价格低廉,测试精度高。

该渗透仪主体结构(如图2所示)包括:储水套筒、进水软管、进水口、有机玻璃套筒、橡胶垫层、圆柱形试件、出水口、烧杯。其中有机玻璃套筒分为3节,用法兰螺栓连接;上下2节分别设置进水口和出水口;中间1节套筒的设计对防止侧壁渗漏至关重要,它由左右2个半套筒组成。为防止透水性混凝土试件侧漏,采用了试件侧面防水涂抹+柔性夹层+套筒刚性壁的复合结构,即:试验前用黄油或凡士林涂抹试件侧面,以封堵试件开口空隙;套筒内敷橡胶柔性垫层,这样试件与套筒间就由刚性连接变为柔性连接,进一步防止侧壁渗漏,使水的渗流路径达到图1(c)所示的理想状态。

2 强度和渗透性试验

2.1 试验材料

水泥为济南产山水牌42.5普通硅酸盐水泥;粗

集料是粒径为 5~10 mm 的石灰岩碎石,压碎值为 8.6%,表观密度为 2 665 kg/m³,堆积密度为 1 655 kg/m³,孔隙率为 38%;外加剂为山东华志混凝土有限公司生产的氨基磺酸盐系高效减水剂,具有高效减水、超塑化、增强等功能,其用量根据水泥净浆流动度试验结果选取。

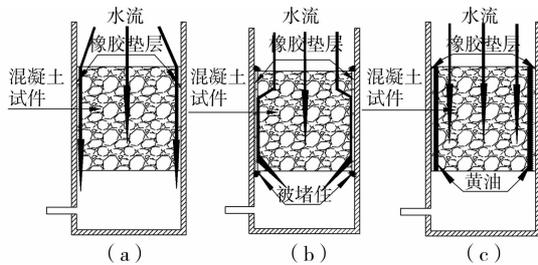


图 1 渗流路径示意图

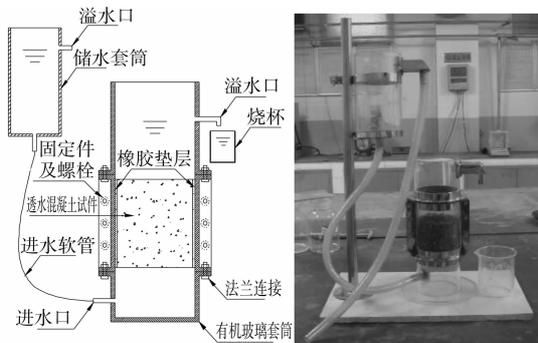


图 2 透水性混凝土渗透系数测试装置

2.2 配合比

试验采用体积法进行配合比设计:采用单粒级粗集料作为骨架,水泥净浆薄层包裹在粗骨料颗粒的表面,作为集料颗粒之间的胶结层,形成骨架-空隙结构的多孔混凝土材料。配合比设计需要确定的几个关键参数有:集料在紧密堆积下的空隙率 V ,可通过试验测定;所拌混凝土的目标孔隙率 P 和水灰比 W/C ,试验中目标孔隙率取 10%、15%、20% 和 25%;水灰比取 0.32、0.34、0.36、0.38 和 0.40。共对 20 种配合比进行了研究。

2.3 试件的制作与养护

透水性混凝土的拌合采用水泥裹石法:先将集料和 15% 的水加入搅拌机预拌 30 s,使集料表面润湿;再加入水泥拌和,以形成包裹集料表面的水泥粉壳;最后将外加剂和剩余的水混合均匀后倒入,搅拌约 120 s,待均匀混合后出料装模。试件有 3 种尺寸规格:100 mm×100 mm×100 mm,用于抗压强度测试;400 mm×100 mm×100 mm,用于抗折强度测试;(100 mm×100 mm,用于渗透系数的测试。成型方法采用振动成型,振动时间为 15 s。养护方法

采用标准养护。试件成型 24 h 后拆模,将试件置于标准养护室内养护。

2.4 强度试验

参照《普通混凝土力学性能试验方法标准(GB/T 50081—2002)》^[18]进行强度试验。采用液压万能压力机加压,加载速度为 0.5~0.8 MPa/s,试验中取 3 个试件的均值作为测试值。

2.5 渗透性试验

利用自行研制的渗透仪,透水性混凝土渗透系数的测试方法如下:

1) 将一定龄期的试件取出,擦干表面并在侧面涂抹黄油或凡士林,然后敷以柔性橡胶垫层;将试件安装在有机玻璃套筒的中间段,并将固定螺栓拧紧;最后将套筒 3 部分连接,并用软管与储水套筒连接。

2) 打开水龙头,从储水套筒开始缓慢注水,水流自下而上灌满整个试件套筒,且储水套筒和试件套筒均开始溢流;调节储水套筒高度使水位差保持在尽量小的水平,以保证水流处于层流状态;静置数分钟,待水流稳定且气泡排净后开始测试。

3) 开启秒表,同时用烧杯接取一定时间内的渗流量,计算单位时间内水的体积流量 Q ,由 $v = Q/A$ (A 为试件横截面积) 得水的渗流速度;重复试验 3 次,取其平均值;用直尺测定水头损失 Δh ,由 $i = \Delta h/l$ (l 为试件长度) 得到相应的水力梯度。改变储水套筒高度,以改变水力梯度,重复上述步骤 (不少于 6 次)。

渗流速度随水力梯度的变化曲线如图 3 所示。可见,当水力梯度较小时,渗流速度随水力梯度线性增长,但当水力梯度达到临界值时,增长速度将逐渐变缓。这一过程反映了透水性混凝土中水的流动从层流到紊流的过渡过程。在透水性混凝土工程应用中,水的流动一般是层流,所以根据达西定律,本文取渗流速度-水力梯度曲线最初直线段的斜率作为透水性混凝土的渗透系数。

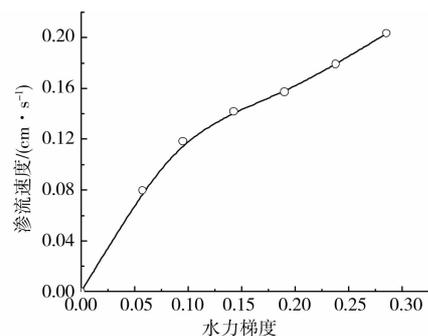


图 3 渗流速度-水力梯度曲线

3 试验结果及分析

3.1 实测孔隙率与目标孔隙率的关系

孔隙率是表征多孔材料排水性能的重要指标,其性能直接关系到材料的排水能力和强度刚度等。孔隙率的测试采用量体积法,用游标卡尺量取试件的直径和高度,每个数据各量3次以上取均值,按下式计算孔隙率:

$$n_e = \left(1 - \frac{m_2 - m_1}{V\rho_w}\right) \times 100 \quad (1)$$

式中: n_e 为试件实测孔隙率; m_1 为试件浸水 24 h 后在水中测得的质量; m_2 为试件从水中取出后在的 60℃ 烘箱内烘 24 h 后的质量; V 为体积法测出的试件体积; ρ_w 为水的密度。

图 4 所示为实测孔隙率与目标孔隙率的关系曲线。可见所有数据点均在直线 $y = x$ 附近,说明实测孔隙率与目标孔隙率非常接近。其中水灰比为 0.36 时,实测孔隙率的点基本落在直线 $y = x$ 上,说明此时实测孔隙率与目标孔隙率最为接近;水灰比为 0.38 时,实测孔隙率的点均位于直线 $y = x$ 的上方,说明实测孔隙率略大于目标孔隙率。

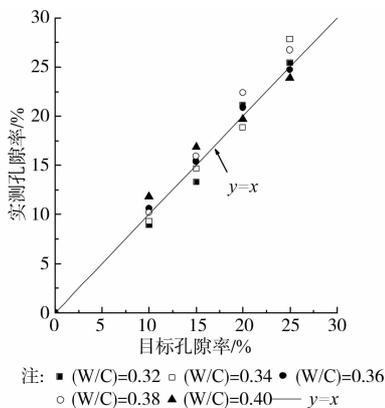


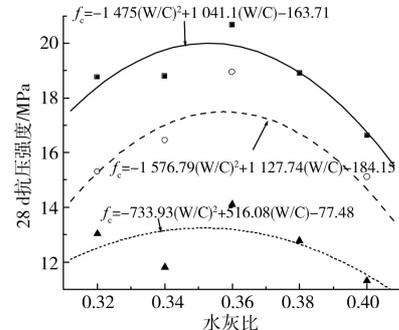
图 4 实测孔隙率与目标孔隙率的关系曲线

3.2 水灰比对强度的影响

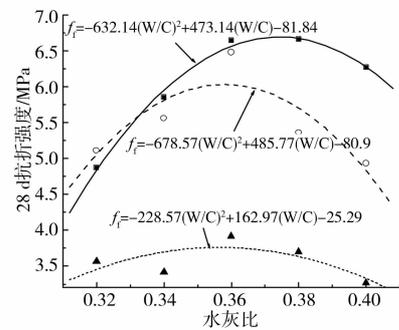
图 5 所示为透水性混凝土强度随水灰比的变化曲线。可见,透水性混凝土抗压强度、抗折强度和水泥灰比之间的关系与普通水泥混凝土抗压强度随水灰比降低而提高的关系不同,存在着一个最佳水灰比。在 0.32~0.40 的水灰比范围内,强度和水泥灰比成开口向下的二次抛物线关系。由图 5 可见,当目标孔隙率为 20% 和 25% 时,最佳水灰比基本在 0.35~0.36 之间;但当目标孔隙率为 15% 时,抗折强度对应的最佳水灰大于抗压强度对应的最佳水灰比。

出现最佳水灰比的原因主要是由于当水灰比提高时,集料表面的水泥浆体厚度减薄、强度下降,造

成集料间粘结强度下降而使透水性混凝土强度降低;当水灰比过小时,虽然集料表面的水泥浆体厚度增加、强度提高,但会造成混凝土成型困难、不够密实,从而使透水性混凝土强度降低。



(a) 抗压强度



(b) 抗折强度

注: ■ 实测值($P=15\%$) ○ 实测值($P=20\%$) ▲ 实测值($P=25\%$)
— 拟合曲线($P=15\%$) - - - 拟合曲线($P=20\%$) ···· 拟合曲线($P=25\%$)

图 5 强度随水灰比的变化曲线

3.3 孔隙率对强度的影响

图 6 所示为透水性混凝土强度随孔隙率的变化曲线。可见,随着孔隙率的增大,抗压强度和抗折强度均减小。这是由于随着孔隙率的增大,水泥浆量减少,骨料间的粘聚力减小;同时随着孔隙率的增大集料间的粘节点和粘结面积减小,进而造成了混凝土强度的降低。可见在孔隙率增大、透水性增强的同时,强度减小了,透水性混凝土在追求高渗透性的同时,也要兼顾强度方面的考虑。对不同的水灰比,透水性混凝土强度与目标孔隙率的关系曲线均可用统一的 Lorentzian 函数进行拟合^[19]:

$$f_c = 10.710 + \frac{1200.436}{\pi} \cdot \frac{12.792}{4(P - 5.128)^2 + 163.635} \quad (R^2 = 0.927) \quad (2)$$

$$f_t = 16.278 + \frac{2263.80}{\pi} \cdot \frac{44.267}{4(P - 8.967)^2 + 1959.967} \quad (R^2 = 0.839) \quad (3)$$

3.4 渗透系数与孔隙率的关系

图 7 所示为渗透系数随孔隙率的变化曲线。可

见,孔隙率和渗透系数成正相关关系,渗透系数随孔隙率的增大而增大,且增大速率越来越快;水灰比对渗透系数的影响较小。水泥浆用量减少则孔隙率增大,混凝土内部过水孔道增多且平均孔径增大,水受到的粘滞阻力减小,这将导致水流速度加快,渗透系数增大。渗透系数与目标孔隙率的关系可用二次函数进行拟合,得到渗透性-孔隙率模型,式中 k 为渗透系数(mm/s), P 为目标孔隙率(%)。

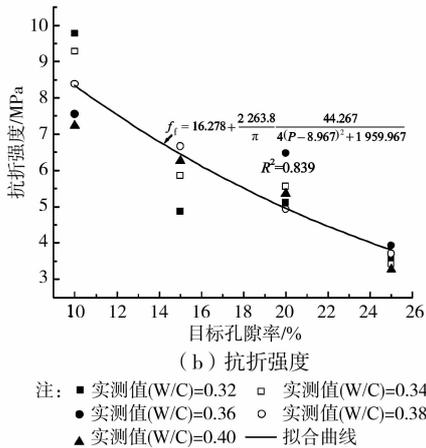
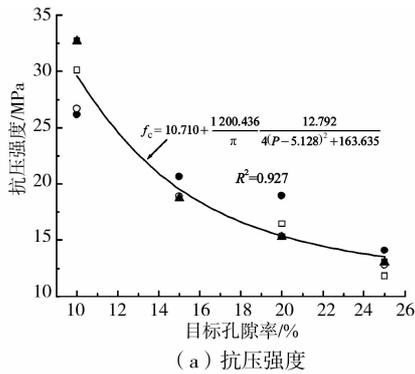


图 6 强度随孔隙率的变化曲线

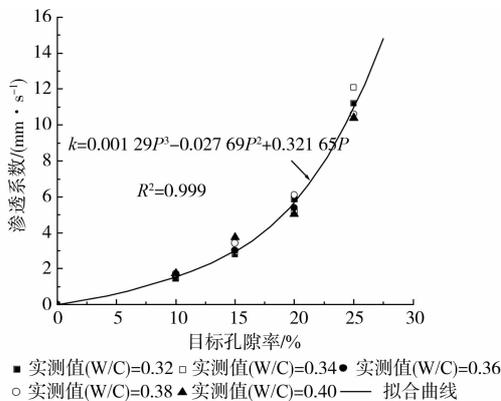


图 7 渗透系数随孔隙率的变化曲线

3.5 集灰比对渗透系数的影响

图 8 为渗透系数随集灰比的变化曲线。可见,与孔隙率类似,集灰比与渗透系数也成正相关关系,

随着集灰比的提高,渗透系数逐渐增大。这是因为随着集灰比的增大,水泥浆量减少,集料间孔隙增多,孔径增大对水的粘滞阻力减小。集灰比小于 5.5 时,水灰比对渗透系数的影响不大;当集灰比大于 5.5 时,水灰比的影响较大。渗透系数-集灰比曲线族呈倒置的“扫帚形”。

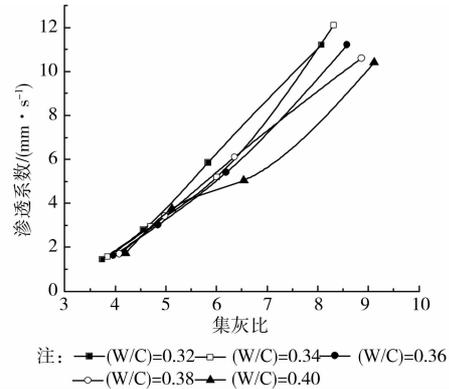


图 8 渗透系数随集灰比的变化曲线

3.6 强度-渗透性模型

图 9 所示为不同水灰比下强度随渗透系数的变化曲线。可见,抗压和抗折强度均随渗透性的提高而降低,但降低的速率逐渐减小。抗压和抗折强度与渗透系数的关系曲线均可用 Lorentzian 函数进行拟合^[19]:

$$f_c = 12.525 + \frac{740.26}{\pi} \cdot \frac{1.673}{4(k + 0.778)^2 + 2.799} \quad (R^2 = 0.927) \quad (4)$$

$$f_t = 3.0319 + \frac{425.875}{\pi} \cdot \frac{4.939}{4(k + 3.429)^2 + 24.397} \quad (R^2 = 0.842) \quad (5)$$

透水性混凝土强度-渗透性模型表明,透水性混凝土的强度和透水性是一对矛盾体,在工程设计中易顾此失彼,所以应该根据具体工程的特点与要求,确定最佳的强度和渗透性组合。近年来,作者在国家自然科学基金等项目资助下将透水性混凝土应用到软弱地基加固和液化地基的抗震设计中,提出了透水性混凝土桩新型复合地基技术。当渗透系数为 2 mm/s 时,由图 9(a)知抗压强度达 25 MPa,通过大量研究发现,此时透水性混凝土能满足复合地基的设计要求^[20]。

4 结论

针对现有透水性混凝土渗透系数测试装置存在试件侧壁渗漏问题,提出了一种试件侧面防水涂

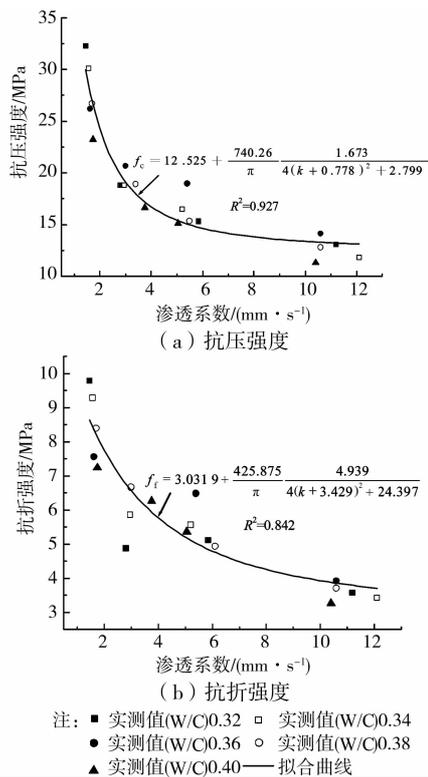


图9 强度随渗透系数的变化曲线

抹+柔性夹层+套筒刚性壁的防侧漏方法,研制了一种新型透水性混凝土渗透性测试装置。并通过渗透性试验和强度试验等,研究了透水性混凝土强度和渗透性等关键指标间的关系,取得了如下主要研究结论:

1)透水性混凝土与普通混凝土不同,存在一个最佳水灰比,最佳水灰比对应的强度最大;强度和灰水比成开口向下的二次抛物线关系。

2)透水性混凝土孔隙率和集灰比均与渗透系数成正相关关系。集灰比小于5.5时,水灰比对渗透系数的影响不大;集灰比大于5.5时,水灰比的影响较大。

3)透水性混凝土强度和渗透性关系服从Lorentzian函数,强度随渗透性的提高而降低,但降低的速率逐渐减小。由强度-渗透性模型可以看出强度和透水性是一对矛盾体,在设计时须根据工程要求和强度-渗透性模型确定最优配合比。

参考文献:

[1] Montes F, Valavala S, Haselbach L. A new test method for porosity measurements of Portland cement pervious concrete [J]. Journal of ASTM International, 2005, 2(1): 73-82.

[2] Tennis P D, Leming M L, Akers D J. Pervious

concrete pavements [R]. EB302 Portland Cement Association Skokie Illinois and National Ready Mixed Concrete Association, Maryland: Silver Spring, 2004.

- [3] Meininger R C. No-fines pervious concrete for paving [J]. Concrete International, 1988, 10(8): 20-27.
- [4] Paine J. Portland cement pervious pavement construction [J]. Aberdeen's concrete construction, 1992, 37(9).
- [5] Yang J, Jiang G L. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3): 381-386.
- [6] 蒋正武,孙振平,王培铭.若干因素对多孔透水混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2005,8(5): 513-519.
- Jiang Z W, Sun Z P, Wang P M. Effects of some factors on properties of porous pervious concrete [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5): 513-519.
- [7] Kevern J T, Wang K J, Suleiman M T, et al. Pervious concrete construction: methods and quality control [C]//Concrete Technology Forum-Focus on Pervious Concrete, National Ready Mix Concrete Association, Nashville, TN, May, 2009: 23-25.
- [8] Schaefer V R, Wang K J, Kevern J T, et al. Mix design development for pervious concrete in cold weather climates [R]. Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Ames, Iowa, 2009.
- [9] Kevern J T, Wang K J, Schaefer V R. Durability and performance of the pervious concrete overlay at MnROAD [J]. American Concrete Institute, ACI Special Publication, 2009, 282(Sup): 43-53.
- [10] Kevern J T, Wang K J, Schaefer V R. Test methods for characterizing air void systems in Portland cement pervious concrete [J]. ASTM Special Technical Publication, 2010, 1511: 119-134.
- [11] 曾伟,石云兴,彭小芹,等.透水混凝土尺寸效应的试验研究[J].混凝土,2007,5:15-18.
- Zeng W, Shi Y X, Peng X Q, et al. Experimental study on size effect of pervious concrete [J]. Concrete, 2007, 5: 15-18
- [12] 杨健荣.再生骨料透水性混凝土应用性能研究[D].北京:北京建筑工程学院,2009.
- [13] 郭鹏.钢渣透水混凝土在轻交通路面结构中的应用研究[D].重庆:重庆交通大学,2010.
- [14] 王金晶,刘志奇.透水性混凝土中掺聚丙烯纤维的可行性试验[J].混凝土与水泥制品,2009(4): 41-44.
- Wang J J, Liu Z Q. Feasibility tests on porous concrete with polypropylene fiber [J]. China Concrete and

Cement Products, 2009(4): 41-44.

- [15] Vancura M, MacDonald K, Khazanovich L. Structural analysis of pervious concrete pavement [J]. Transportation Research Record, 2011, 2226: 13-20.
- [16] Goede W, Haselbach L. Investigation into the structural performance of pervious concrete [J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 138(1): 98-104.
- [17] 杨志峰. 多孔混凝土透水基层材料组成设计与性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [18] 中华人民共和国行业标准. 普通混凝土力学性能试验方法标准 GB/T 50081-2002[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [19] 周剑平. Origin 实用教程 7.5[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [20] 崔新壮, 王聪, 周亚旭, 等. 透水性混凝土桩减压减震耦合抗震机理研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2012, 42(4): 86-91.
- Cui X Z, Wang C, Zhou Y X, et al. Anti-earthquake mechanism of pervious concrete pile composite foundation [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2012, 42(4): 86-91.

(编辑 薛婧媛)

(上接第 108 页)

- [14] Xu B, Lu J F, Wang J H. Dynamic response of a layered water-saturated half-space to a moving load [J]. Computer and Geotechnics, 2008, 35:1-10.
- [15] Biot M A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media [J]. Journal of Applied Physics, 1962, 33:1482-1498.
- [16] Chen T C, Chen R H, San-shyan L. A nonlinear homogenized model applicable to reinforced soil analysis [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2000, 18(6): 349-366.
- [17] Michalowski R L, Zhao A. Continuum versus structural approach to stability of reinforced soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1995, 121(2): 152-162.
- [18] Suiker A S J. Surface waves in a stratified half space with enhanced continuum properties. Part 1: Formulation of the boundary value problem [J]. European Journal of Mechanics A: Solids, 1999, 18:749-768.

(编辑 胡玲)