

# The Mixture's Proportion Design Method and Frost Resistance of Porous Concrete

Ailing Yao<sup>1</sup>, Runshu Hao<sup>1</sup>, Weike He<sup>2</sup>, Xiaochen Zhang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an Shannxi

<sup>2</sup>Hailaer Highway Maintenance Management of Hulunbuir City Highway Administration in Inner Mongolia Autonomous Region, Hulunbuir Inner Mongolia

<sup>3</sup>China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Taiyuan Shanxi  
Email: 550763402@qq.com

Received: Feb. 20<sup>th</sup>, 2018; accepted: Mar. 6<sup>th</sup>, 2018; published: Mar. 14<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

As there is no unified method to design the mixture's proportion of porous concrete currently, this paper brings forward the volume calculation method, which is suitable for the design method of mixture's proportion of porous concrete based on the aggregate gradually filling. The relationships between the measured porosity and the target porosity are verified by the tests. Combined with the alpine regional characteristics in Hulunbuir, the tests of frost resistance of porous concrete are tested at the same time. The research results show that on the basis of determining the mixing proportion of aggregate, the porosity of porous concrete can be designed accurately by the volume method with the volume relationship among the target porosity, aggregates volume and cement slurry volume. The differences between the measured porosity of the porous concrete and the target porosity are only 0.8%~2.3%, and there exist a good correlation between both. Moreover, the frost resistance of porous concrete also has a positive correlation with the measured porosity. The freeze-thaw cycles significantly decreases with the increase of the measured porosity. Therefore, the frost resistance should be attention when using the porous concrete in cold area.

## Keywords

Porous Concrete, Mixture's Proportion, Volume Calculation Method, Frost Resistance, Measured Porosity

---

# 多孔混凝土的配合比设计方法及其抗冻性能

姚爱玲<sup>1</sup>, 郝润姝<sup>1</sup>, 何伟科<sup>2</sup>, 张晓晨<sup>3</sup>

<sup>1</sup>长安大学, 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安

<sup>2</sup>内蒙古自治区呼伦贝尔市公路管理局海拉尔公路养护管理处, 内蒙古 呼伦贝尔

<sup>3</sup>中铁咨询太原设计院, 山西 太原  
Email: 550763402@qq.com

收稿日期: 2018年2月20日; 录用日期: 2018年3月6日; 发布日期: 2018年3月14日

## 摘要

多孔混凝土配合比设计目前没有统一的方法, 针对此本文提出适合于多孔混凝土的配合比设计方法——集料逐级振实填充基础上的体积算法; 通过试验验证了实测孔隙率与目标孔隙率之间的关系; 同时结合呼伦贝尔高寒的地区特点, 测试了多孔混凝土的抗冻性能。研究表明, 在确定好集料掺配比例的基础上, 采用体积设计法, 以目标孔隙率、集料体积、水泥浆体积三者之间的体积关系可以比较准确地对多孔混凝土的孔隙率进行设计; 多孔混凝土的实测孔隙率与目标孔隙率差值仅为0.8%~2.3%, 两者存在很好的线性关系。多孔混凝土的抗冻性能与实测孔隙率之间也有着良好的相关性, 随着实测孔隙率的增大, 其冻融循环次数在显著减小。因此, 在寒冷地区, 使用多孔混凝土时一定要关注其抗冻性能。

## 关键词

多孔混凝土, 配合比设计, 体积算法, 抗冻性能, 实测孔隙率

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

水是导致路面产生早期病害的主要原因[1][2]。这是因为普通沥青路面采用的半刚性基层在配合比设计时多遵从密实级配原理, 使得进入路面结构内部的雨(雪)水不能顺畅排出或排出不彻底, 浸湿各结构层和路基土, 在行车荷载反复作用下, 路面会产生唧泥现象, 使得下承层强度下降, 造成路面结构破坏; 对于重载高寒地区, 在冬季, 自由水的冰冻膨胀易引起道路的不均匀冻胀[3][4], 导致路面开裂, 对路面的耐久性产生非常大的影响。因此, 能够顺畅的排出路面结构内部的水, 对于提高沥青路面的耐久性有着重要的意义。多孔混凝土排水型基层能够有效地解决路面结构内部雨(雪)水的排出问题。

Krystian Eyman [5]第一次提出了多孔混凝土的配合比设计方法; 法国、德国等欧洲国家将多孔混凝土薄层作为普通水泥混凝土路面的磨耗层, 发现多孔混凝土耐久、抗冻性好, 降噪效果明显[6]。在国内, 多孔混凝土已经应用于公园、公路、隧道等大型工程中, 并取得了良好的效果。但是, 目前并未有人提出统一的多孔混凝土配合比设计方法。本文以内蒙古交通厅科技项目为研究依托, 提出在集料逐级振实填充试验的基础上以体积法设计多孔混凝土孔隙率的配合比设计方法, 考虑依托工程呼伦贝尔的气候特点, 测定了多孔混凝土的抗冻性能, 分析了抗冻性能与实测孔隙率之间的关系, 从而为多孔混凝土作为路面基层材料提供理论支撑。

## 2. 体积法确定多孔混凝土的配合比

多孔混凝土的级配设计应满足一定的孔隙率要求, 在组成上的最大特点是混合物中缺少填充料, 孔隙基本上都变成了连通孔隙。本文提出体积法设计多孔混凝土, 其基本思路是逐级嵌挤, 振实集料, 计

算出集料的骨架间隙体积, 该体积即是水泥浆体积与多孔混凝土设计的目标孔隙率之和。即集料之间相互接触嵌挤形成骨架结构, 同时一定稠度的水泥浆包裹在集料表面。由于水化作用, 水泥浆将集料粘结成一个整体, 从而形成具有一定力学强度的多孔材料。

## 2.1. 原材料

所用原材料包括粗集料、水泥、水。粗集料是多孔混凝土骨架结构的主要构成者, 承担着相当一部分荷载作用。因此, 粗集料应以洁净、干燥、富有棱角且以形状接近立方体者为宜。经检验, 试验所用粗集料的含泥量、针片状颗粒含量以及压碎值均满足《公路工程集料试验规程》(JTG E42-2005) [7]的要求。试验采用冀东水泥有限公司的 P.O.42.5 的水泥, 其初凝和终凝时间分别为 204 min、261 min。其他指标均符合技术规范的要求。水为生活用水。

## 2.2. 级配设计

多孔混凝土是介于水泥开级配稳定碎石和普通混凝土之间的一种材料[8]。结合其路用性能要求和国外经验, 试验过程中多孔混凝土目标孔隙率范围为 15%~30%。根据逐级填充理论, 选择标准振动台对集料进行振动填充, 以每次填充完成后集料的振实密度作为评价集料嵌挤效果的指标。振实密度越大, 表明集料的嵌挤效果愈好。集料按规格分为 A-19~26.5 mm、B-16~19 mm、C-13.2~16 mm、D-9.5~13.2 mm 四种, 经逐级填充振实后得到各规格的质量比为: A:B:C:D = 58:14.5:14.5:13。此时, 对应的集料的振实密度  $\rho_{\text{振实}}$  为 1.746 g/cm<sup>3</sup>。

## 2.3. 体积法计算配合比

按照《公路工程集料试验规程》(JTG E42-2005) [9]的要求测定混合集料的密度指标, 并按照式(1)计算孔隙率, 计算结果见表 1。

$$P' = 1 - \frac{\rho_{\text{振实}}}{\rho_{\text{表观}}} \times 100\% \quad (1)$$

根据已知设计参数: 混合集料孔隙率  $P'$ 、目标孔隙率  $P$ 、集料质量折减系数(0.98)、水泥密度  $\rho_c$ (3.15 g/cm<sup>3</sup>)等, 采用单位体积法, 由式(2)~式(4)计算多孔混凝土的配合比。

首先考虑集料的质量折减系数, 计算每立方米中集料的单位质量:

$$m_g = 0.98\rho \quad (2)$$

每立方米多孔混凝土中水泥浆的体积为:

$$V_{c+w} = P' - P \quad (3)$$

即:

$$m_c/\rho_c + m_w/\rho_w = P' - P \quad (4)$$

在混合集料孔隙率  $P'$  确定的前提下, 单位体积多孔混凝土中水泥浆体积与目标孔隙率  $P$  负相关。当目标孔隙率确定后, 单位体积多孔混凝土所用水泥浆的体积也随之确定。因此, 只需确定水泥浆中的水灰比  $w/c$ , 即可根据式(2)~式(4)分别计算单位体积多孔混凝土中集料、水泥与水的质量。

**Table 1.** Porosity calculation results of porous concrete aggregates

**表 1.** 多孔混凝土混合集料的孔隙率计算结果

表观密度(g/cm <sup>3</sup> )	表干密度(g/cm <sup>3</sup> )	毛体积密度(g/cm <sup>3</sup> )	振实堆积密度(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙率(%)
2.778	2.767	2.760	1.746	37.15

## 2.4. 水灰比的确定

多孔混凝土可采用的水灰比范围较小,通常介于 0.24~0.30 之间。水灰比过大,富余浆料过多而滴落,造成富余浆料在混凝土底部堆积,破坏原有孔隙结构,不利于多孔混凝土排水性能的发挥;水灰比过小,水泥浆不能很好的包裹集料,粘结作用不能得到充分发挥,影响混凝土的整体强度及均匀性。试验过程中在集料级配、试件成型方法确定的前提下,选择水泥用量最大(目标孔隙率为 15%)的多孔混凝土作为研究对象,采用振动台法进行试验,以水灰比、拌和时间、振动时间为三个影响因素,设计正交试验来最终确定出试件成型的具体试验条件。通过正交设计试验,以 7 d 抗压强度作为试验分析指标,确定了多孔混凝土的最佳水灰比为 0.26、拌和时间为 40 s、振动时间为 30 s 的试验参数。

根据试验结果,计算得到单位体积多孔混凝土内各组成成分的质量,见表 2,该表同时给出了多孔混凝土的 7 d 无侧限抗压强度值。

## 3. 多孔混凝土抗冻性能分析研究

### 3.1. 实测孔隙率的测定结果

多孔混凝土区别于普通密实型混凝土,其内部分布着众多连通孔隙,这些连通孔隙的存在有利于排水作用的发挥,同时也制约着材料的强度,因此有必要对这些连通孔隙进行实际测定,在保证实测孔隙率的前提下了解其抗冻性能。

试验采用的多孔混凝土试件尺寸是 100 mm × 100 mm × 400 mm 的棱柱体试件,由于其尺寸较大,本文参照网篮法的试验原理,制作用于大尺寸试件实测孔隙率测试的设备。将试件在标准养生条件下养生到 7 d、28 d,分别测试两个龄期的实测孔隙率,分析实测孔隙率与目标孔隙率的关系,验证用目标孔隙率设计实际孔隙率的可行性,试验结果如图 1 所示。

图 1(a)表明了多孔混凝土实测孔隙率与目标孔隙率很接近,两者差值在 0.8%~2.3%之间,表明可用本文给出的体积法来设计多孔混凝土的孔隙率;图 1(b)表明两者之间呈线性关系,且相关性很好,相关系数都大于 0.99,同时说明龄期的增长并未影响目标孔隙率对实测孔隙率的控制。测定不同尺寸的多孔混凝土试件的实测孔隙率,分析试验结果可得多孔混凝土的实测孔隙率与目标孔隙率之间均满足  $y = kx + b$  的线性通式,且根据试验数据可以得出 k 值的取值范围为 0.9~1.1, b 值的取值范围为 0.5~2.5。在实践中,可以根据这一结果,由目标孔隙率预测实测孔隙率。

### 3.2. 抗冻性能试验方法

多孔混凝土抗冻性能是指混凝土在饱水状态下经受多次冻融循环,保持或不明显降低原有性质的能力。鉴于呼伦贝尔地区冬季严寒的气候条件,本试验采用快冻法测试多孔混凝土饱水试件在浸水、快速冻融等不利条件下的抗冻性能。

Table 2. The results table of mixture's design of porous concrete (per cubic meter)

表 2. 多孔混凝土配合比设计结果(每立方米)

目标孔隙率(%)	粗集料质量(kg)	水质量(kg)	水泥质量(kg)	水灰比	7 d 无侧限抗压强度(MPa)
15	1711	99	380	0.26	8.3
20		76	294		5.8
25		54	208		3.5
30		32	123		2.2

将 100 mm × 100 mm × 400 mm 试件养生至 28 d，采用全自动冻融试验装置进行试验。试验前 4 d 将试件浸泡在 20℃ ± 2℃ 的饱和石灰水中，浸泡完成后将试件表面擦干，装入橡胶试盒，注满水后开始试验，如图 2 所示。试验中，每次冻融循环应在 2 h~5 h 内完成，试件冻融时中心温度应分别保持在 -18℃ ± 2℃ 和 5℃ ± 2℃。

由于多孔混凝土孔隙大，试件均匀性和抗冻性较普通混凝土差，因此本次试验过程中每 10 次循环进行一次称重，不计算试件的相对动弹性模量。试验至试件质量损失达到 5% 时结束，以最后一次称重时所经历的循环次数作为该试件的最大冻融循环次数。

多孔混凝土试件质量变化率按式(5)计算：

$$w_n = \frac{m_0 - m_a}{m_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $w_n$ —— $n$  次冻融循环后的试件质量变化率(%)；

$m_0$ ——冻融试验前的试件质量(kg)；

$m_a$ —— $n$  次冻融循环后的试件质量(kg)。

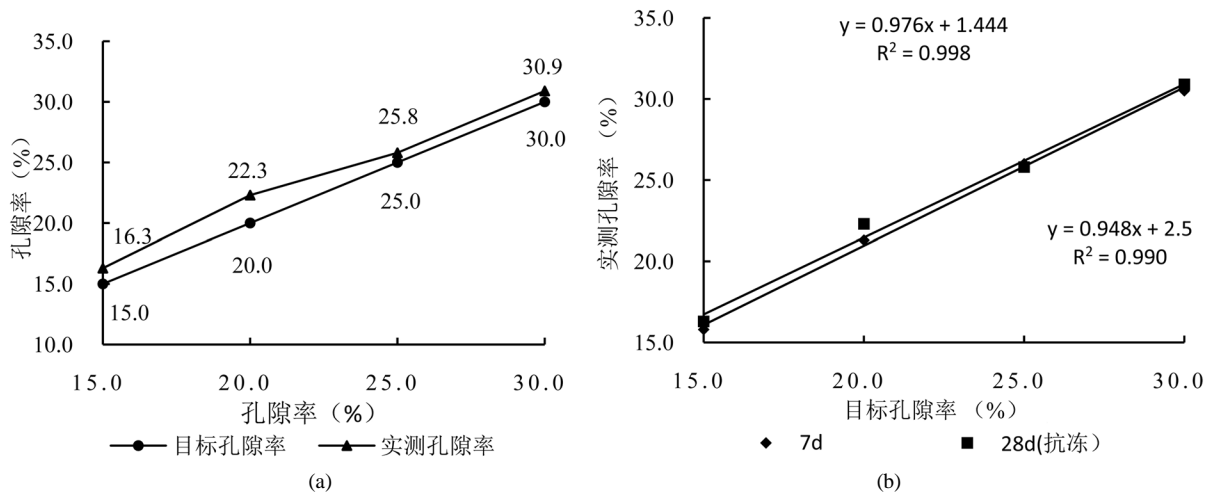


Figure 1. The relation between the measured porosity of specimen and the target porosity  
图 1. 试件实测孔隙率 - 目标孔隙率关系图



Figure 2. Frost resistance test  
图 2. 抗冻性能试验

### 3.3. 实测孔隙率与抗冻性能关系分析

多孔混凝土的抗冻性能与其内部实测孔隙率的大小有着密切的关系。通过对多孔混凝土实测孔隙率与抗冻性能的关系分析,可实现对其抗冻性能的有效预测。不同孔隙率下的冻融循环次数见表3。

表3数据表明,多孔混凝土所能经受的最大冻融循环次数与实测孔隙率密切相关,两者呈负相关。根据表中数据绘制最大冻融循环次数与实测孔隙率关系图,如图3所示。

由图3可知:多孔混凝土试件最大冻融循环次数随着实测孔隙率的增大呈显著降低的趋势,且二者相关性较好。当试件的实测孔隙率从16.3%增大到30.9%时,其最大冻融循环次数从65次下降到10次,降幅达85%。

为了进一步分析试验过程中各孔隙率试件质量的变化,将各组试件冻融循环后的质量变化率汇总于表4。

根据表4中的试验数据可绘制目标孔隙率为15%~25%的试件冻融循环次数与质量变化率关系图。由

**Table 3.** The results summary table of frost resistance test of porous concrete

**表 3.** 多孔混凝土抗冻性能试验结果汇总表

目标孔隙率(%)	实测孔隙率(%)	最大冻融循环次数(次)
15	16.3	65
20	22.3	40
25	25.8	35
30	30.9	10

**Table 4.** The summary table of mass change after the freeze-thaw cycles of porous concrete

**表 4.** 多孔混凝土冻融循环后质量变化率汇总

目标孔隙率(%)	冻融循环次数(次)	质量变化率(%)
15	10	0.5
	20	1.08
	30	2.04
	40	3.82
	50	4.5
	60	4.82
20	65	5.63
	10	1.06
	20	1.99
	30	3.16
	40	5.84
	10	1.04
25	20	2.33
	30	4.75
	35	5.34
30	10	5.12



于目标孔隙率为 30%的试件经过 10 次冻融循环后质量变化率已超过 5%，按规范要求此时试验已结束，故不绘制冻融循环次数与质量变化率关系图。

图 4~图 6 表明：在目标孔隙率为 15%~25%的研究范围内，随着抗冻循环次数的增加，多孔混凝土试件质量损失的变化率不断加大；图 4 中冻融循环次数从 10 次增加到 40 次时，相邻两点间的斜率不断增大，而从第 40 次到第 60 次循环的过程中相邻两点间的斜率较之前趋于平缓，随后迅速增大。产生这种现象的原因为，在前期的冻融循环中，水泥石间的有效联结被破坏，同时微裂缝产生，试件的质量损失主要由硬化后水泥浆壳的剥落引起；随着冻融循环的继续，多孔混凝土内部已产生的微小裂缝迅速发展，在这个阶段，多孔混凝土的破坏以裂缝的发展为主；最终裂缝扩展至整个试件，试件迅速被破坏。而图 5 和图 6 由于孔隙率比较大，质量损失率并未出现图 4 的这种现象，而是一直呈现出增长的趋势。

在需要利用多孔混凝土的排水功能时，应结合表 2 的 7 d 龄期的无侧限抗压强度与表 4 的冻融循环次数，结合两者之间的关系，考虑公路等级、交通荷载、气候环境来综合确定多孔混凝土所需的孔隙率。

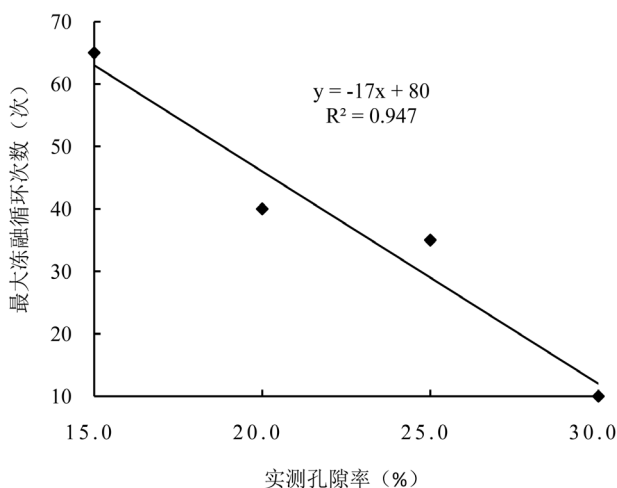


Figure 3. The relation diagram between maximum freeze-thaw cycles and the measured porosity of porous concrete

图 3. 多孔混凝土最大冻融循环次数 - 实测孔隙率关系图

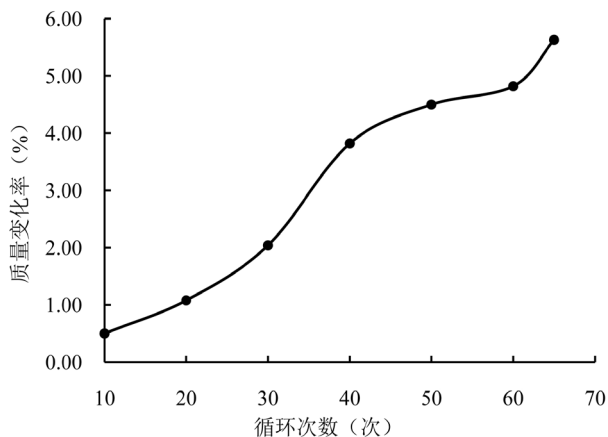
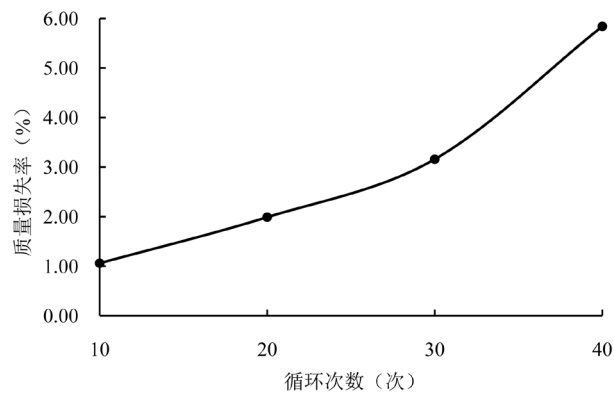


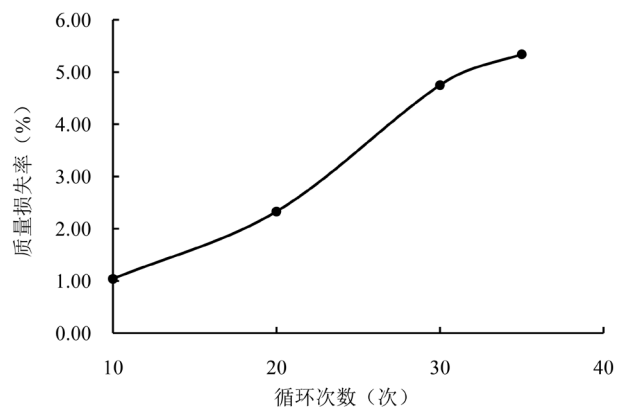
Figure 4. The relation diagram between mass loss and freeze-thaw cycles (15%)

图 4. 多孔混凝土质量损失率 - 冻融循环次数关系图(15%)



**Figure 5.** The relation diagram between mass loss and freeze-thaw cycles (20%)

**图 5.** 多孔混凝土质量损失率 - 冻融循环次数关系图(20%)



**Figure 6.** The relation diagram between mass loss and freeze-thaw cycles (25%)

**图 6.** 多孔混凝土质量损失率 - 冻融循环次数图(25%)

#### 4. 结语

1) 多孔混凝土作为一种良好的基层排水材料,其配合比设计不同于普通混凝土,本文采用逐级振实嵌挤的方法,用标准振动台振实逐级填充的四挡混合料,按照最大振实密度确定出集料各档集料的掺配比例。

2) 提出基于目标孔隙率的体积法来确定多孔混凝土的配合比;按该方法设计的混凝土的实测孔隙率与设计的目标孔隙率非常接近,只差 0.8%~2.3%,实测孔隙率与目标空隙率呈线性关系,相关系数均大于 99%。

3) 实测孔隙率的大小几乎不受养生龄期的影响,28 d 与 7 d 龄期的实测孔隙率与设计的目标孔隙率是一致的。

4) 冻融循环试验表明了随着实测孔隙率由小变大,最大的冻融循环次数在呈线性减小。在寒冷地区使用多孔混凝土时,一定要关注其抗冻能力。

#### 基金项目

内蒙古交通厅科技项目。

#### 参考文献

[1] Judycki, J. (2011) Determination of Equivalent Axle Load Factors on the Basis of Fatigue Criteria for Flexible and



Semi-Rigid Pavements. *Road Materials & Pavement Design*, **11**, 187-202.

<https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690266>

- [2] Tarefder, R.A. and Ahmad, M. (2015) Evaluation of Pore Structure and Its Influence on Permeability and Moisture Damage in Asphalt Concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, **18**, 274-283.  
<https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1065995>
- [3] Drake, J. (2014) Winter Effluent Quality from Partial-Infiltration Permeable Pavement Systems. *Journal of Environmental Engineering*, **2014**, 140. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000854](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000854)
- [4] Kim, H.K. and Lee, H.K. (2010) Influence of Cement Flow and Aggregate Type on the Mechanical and Acoustic Characteristics of Porous Concrete. *Applied Acoustics*, **71**, 607-615. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.02.001>
- [5] Fuchs, D.G. and Buys, F.R. (1993) Noise-Reducing Concrete Pavements. *Proceeding of 5th International Conference on Concrete Design and Rehabilitation*, West Lafayette, 20-22 April 1993, 25-30.
- [6] Caestecker, C. (1997) Test Section of Noiseless Cement Pavement. *Proceeding of 6th International Purdue Conference on Concrete Design and Material for High Performance*, Indianapolis, 18-21 November 1997, 13.
- [7] 交通部公路科学研究所. JTG E42-2005. 公路工程集料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [8] 郑木莲. 多孔混凝土排水基层研究[D]: [博士学位证书]. 西安: 长安大学, 2004.
- [9] 交通部公路科学研究所. JTG E42-2005. 公路工程集料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)