

文章编号:1671-8879(2008)01-0014-04

## 贫混凝土透水基层材料渗透性能室内试验

田 波<sup>1</sup>, 牛开民<sup>1</sup>, 穆占领<sup>1</sup>, 谭 华<sup>2</sup>

(1. 交通部公路科学研究院, 北京 100088; 2. 广西交通科学研究所, 广西南宁 530001)

**摘要:**渗透系数和孔隙率是表征贫混凝土透水基层渗透性能的主要指标。利用垂直和水平渗透仪分别测试了多孔贫混凝土的渗透系数, 并分析了其满足达西定律的水头范围, 得出孔隙率与渗透系数的关系。结果表明:多孔贫混凝土只要保证水力梯度小于 0.04, 就能满足达西定律的要求;有效孔隙率和全孔隙率之间呈相关性良好的线性关系, 有效孔隙率和渗透系数之间满足相关性良好的幂指数关系, 贫混凝土透水基层的临界排水有效孔隙率为 14.4%。

**关键词:**道路工程; 贫混凝土; 透水基层; 渗透系数; 孔隙率

**中图分类号:**U414; TU37

**文献标志码:**A

### Indoor test on permeability property of permeable lean concrete

TIAN Bo<sup>1</sup>, NIU Kai-min<sup>1</sup>, MU Zhan-ling<sup>1</sup>, TAN Hua<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Highway, Ministry of Communications, Beijing 100088, China;

2. Guangxi Research Institute of Transportation, Nanning 530001, Guangxi, China)

**Abstract:** Permeability coefficient and porosity are the main drainage characters of porous concrete, this paper adopted vertical and horizontal permeameters to test the permeability coefficients of porous lean concrete, analyzed the waterhead for meeting Darcy Law, and drew the relationships between porosity and permeability coefficient. The results show that porous lean concrete can meet the demand of Darcy Law when the hydraulic gradient is less than 0.04; there is a good liner relationship between effective porosity and whole porosity, and there is good power exponent relationship between effective porosity and permeability coefficient; the critical effective permeable porosity for porous lean concrete is 14.4%. 3 tabs, 7 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; permeable lean cement; permeable base; permeability coefficient; porosity

## 0 引言

越来越多的实践表明, 进入路面结构内的水是造成或加速路面结构损坏的主要原因。对此, 国内外有关专家进行了大量的研究<sup>[1-6]</sup>, 通过合理设计排水基层材料以及内部排水系统, 力图减少直至消除

路面的水损坏, 从而提高路面的使用性能, 延长其使用寿命。多孔贫混凝土是一种新型的透水基层材料, 是由水泥、粗集料和水拌制而成的贫混凝土。这种混合料无砂或少砂, 硬化后存在较多和较大的孔隙, 具有良好的排水性能, 可以形成顺畅的路面结构内部排水系统, 及时排除路面结构中的自由水, 从而

收稿日期: 2007-02-20

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200131878831)

作者简介: 田 波(1973-), 男, 陕西商州人, 副研究员, 博士, E-mail: b. tian@rioh. cn.

减少或消除路面的早期水损坏。贫混凝土透水基层在具有一定力学强度的同时,还有足够的渗透性,能迅速排出渗入其中的水。表征多孔贫混凝土排水性能的主要指标有空隙率和渗透系数。本文通过室内试验与理论分析,测试多孔贫混凝土的渗透系数与孔隙率,并分析其相互之间的关系,以期为材料组成与路面结构设计提供依据。

## 1 水力梯度与流速的关系

渗透系数<sup>[6-7]</sup>是评价多孔贫混凝土基层材料的重要指标之一。欲确定试件的渗透系数,必须先获得试件水力梯度和渗流速度关系曲线,图 1 中曲线斜率即为试件的渗透系数。渗透系数是条件参数,随着取值方法的不同而不同,在渗透系数取值方法中有切线和割线之分。在水头很低的时候,水力梯度和流速呈线性关系,其直线斜率为渗透系数;当水头增大时,流速和水力梯度关系呈非线性关系;整体上流速和水力梯度呈非线性关系。图 1 的关系曲线上,通过原点的一段直线“线 1”,满足达西定律的要求,其直线斜率即为渗透系数;“线 2”是曲线上某点切线,数值上其斜率小于“线 1”的斜率。“线 1”的斜率是唯一的,可以通过采用较为灵敏的差压变送器测得;而“线 2”的斜率随点的位置变化而变化,大部分情况下,由于在试验中采用较为粗糙的玻璃管做微压计,因而不能量测到很低水头下的流速,而误认为“线 2”是满足达西定律的。“线 1”和“线 2”的区别在于前者通过坐标原点,而后者与纵轴有截距;“线 3”为不通过原点的割线;数值上“线 1”的斜率明显大于“线 3”的斜率。

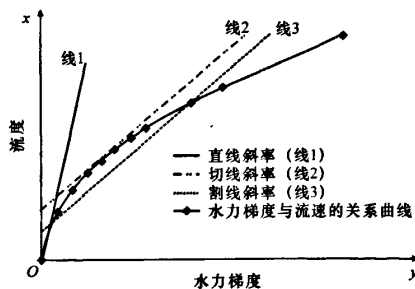


图 1 水力梯度与流速的关系

选择哪条直线的斜率作为该试件的渗透系数,应取决于其使用目的。一般选用满足达西定律条件时的斜率,因为这个斜率唯一且线性。但文献[8]中选用的取值方法却是割线斜率(线 3),其要求在 0.2~0.5 之间的割线斜率为所求渗透系数。表 1 列出相同材料在不同原则下的室内垂直渗透系数。

表 1 不同原则下的渗透系数比较

级配名称	渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )		
	满足达西定律	通过原点和 0.2 梯度对应点	文献[8]
加州水泥透水基层(CA)级配	7.80	3.49	2.33
AASHTO 67# 级配	8.90	4.62	3.00

若采用加州水泥透水基层级配和 AASHTO 67# 级配,选用水泥用量为  $180 \text{ kg/m}^3$ ,水灰质量比为 0.41 进行成型试件,每组试件 6 个,分别测定各组试件在不同水头下的水力梯度和渗流速度。在试验中,由于设备设计的原因,在低水头(小水力梯度)时工作性能优良,而在大水头(大水力梯度)时测试数据存在波动现象。所以,试验中没有进行较大水头的测定,而仅按直线原则外延得到水力梯度为 0.5 时的数据,并用虚线连接。试验曲线见图 2 和图 3,试验数据汇总见表 1。

由表 1 可见,同一个试件在满足达西定律时的渗透系数大约是文献[8]中渗透系数的 3~4 倍。选用满足达西定律的渗透系数用于各试件之间渗透系数的横向比较,因为这个渗透系数相对比较稳定。

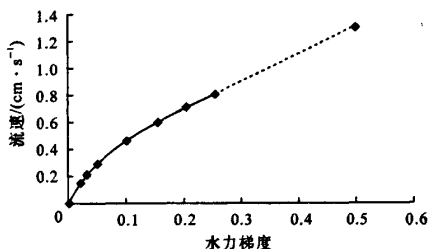


图 2 CA 级配的水力梯度与流速的关系

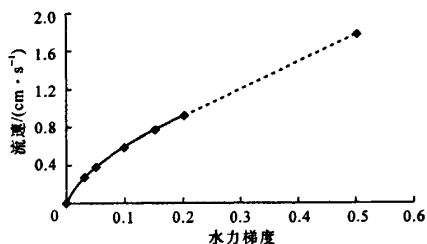


图 3 AASHTO 67# 级配的水力梯度与流速的关系

## 2 满足达西定律的水头范围

不同孔隙率试件的流速和水力梯度关系图上存在一个线性和非线性的分界点。为求得不同孔隙率试件的达西定律适用范围,分别按不同孔隙率成型 4 组试件,每组试件为 3 个。各组试件的平均有效孔隙率见表 2。相应水力梯度和流速关系曲线见图 4。各组试件的流速和水力梯度关系的线性范围所

表 2 各组试件的平均有效孔隙率

编 号	试件组 1	试件组 2	试件组 3	试件组 4
平均有效孔隙率/%	15.5	26.4	31.1	34.0

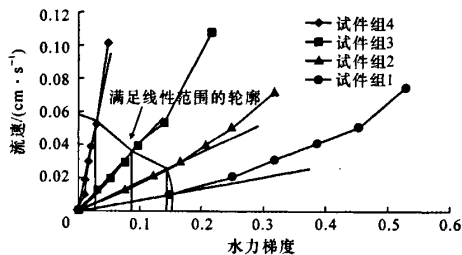


图 4 达西定律适用范围

对应的水力梯度分别为:0~0.15(试件组 1),0~0.14(试件组 2),0~0.08(试件组 3),0~0.03(试件组 4)。由此可见,孔隙率小的试件,满足达西定律的水头范围较大。因此,在测定渗透系数时,水头差可采用大值;孔隙率大的试件,满足达西定律的水头范围较小,因此,在试验时水头差应采用低值。

总之,渗透系数在 0~7 cm/s 之间的多孔隙贫混凝土试件,只要保证测试水力梯度小于 0.04,就能满足达西定律的要求。

### 3 水平渗透系数和垂直渗透系数

试件的渗透系数分为水平渗透系数和垂直渗透系数。在考虑路面中雨水下渗时,应采用垂直渗透系数;而考虑路面内部排水时,由于水流是朝水平方向渗流,应该采用水平渗透系数。

张鹏飞<sup>[9]</sup>曾设计了两种渗透仪,分别为垂直渗透仪和水平渗透仪。应用这两种仪器对同一个试件分别测定水平和垂直渗透系数,结果发现,水平渗透系数大约是垂直渗透系数的 1.1~1.3 倍。

本文模拟现场压实过程,加工成型 60 cm×60 cm×20 cm 的试验板,分别在垂直方向和水平方向进行钻芯(图 5)。芯样为符合要求的垂直芯样和水平芯样,可直接在垂直渗透系数测定仪上测定其渗透系数,数据见表 3。测试数据表明,水平渗透系数是垂直渗透系数的 0.95~1.60 倍。水平渗透系



图 5 在试验板垂直方向和水平方向钻芯

表 3 垂直渗透系数与水平渗透系数的关系

芯样	项目	垂直渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )						水平渗透系数/(cm·s <sup>-1</sup> )		
芯样 1	实测	3.91	3.12	3.75	2.95	2.53	3.82	3.30	3.82	2.88
	平均	3.35						3.33		
芯样 2	实测	1.81	3.34	2.17	3.03	2.45	2.55	4.34	2.55	3.08
	平均	2.56						3.32		
芯样 3	实测	1.19	1.11	0.90	0.75	1.65	2.34	1.77	2.34	2.41
	平均	1.32						2.17		
现场 施工 芯样	实测	8.48	6.74	9.73	6.25	7.73	4.54	5.81	6.84	
		3.32	5.51	7.50	8.47	6.78	8.39			
		1.85	7.63							
	平均	6.64						6.33		

数和垂直渗透系数之间的差异,应该与试件垂直方向的孔隙结构和水平方向的孔隙结构的差异有关,而不是试验方法不同引起的<sup>[10]</sup>。换言之,如果多孔贫混凝土透水基层的孔隙分布是各向同性的话,各个方向的渗透系数应该是相同的。

## 4 孔隙率与渗透系数的关系

### 4.1 有效孔隙率与全孔隙率的关系

根据 181 组试验结果,回归出有效孔隙率与全孔隙率之间的关系。图 6 表明( $n$  为试验组数),有效孔隙率  $V_e$  和全孔隙率  $V_a$  之间为线性关系,其方程为

$$V_e = 0.721V_a + 7.51, R^2 = 0.957, n = 181$$

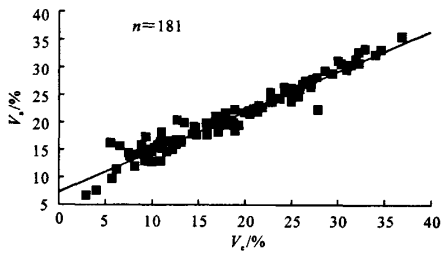


图 6 有效孔隙率与全孔隙率的关系

### 4.2 有效孔隙率与渗透系数的关系

根据大量试验结果(图 7),回归出有效孔隙率与渗透系数的关系。有效孔隙率为采用抽真空测试方法测得;渗透系数为完全满足达西定律条件下的渗透系数,水头差为 30 Pa。

最后,得到回归方程

$$k = (V_e/20.466)^{4.756} - 0.3894$$

$$R^2 = 0.90, n = 278$$

式中: $k$  为渗透系数(cm/s),在水头差 30 Pa 条件下测得。

### 4.3 临界排水孔隙率

通过约 500 个试件的试验发现,当试件有效孔

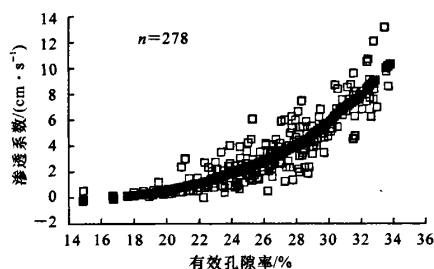


图7 有效孔隙率与渗透系数的关系

隙率小于某个值时,试件不再渗水。由图7可见,在有效孔隙率小于14.4%时,试件渗透系数为0。也就是说,试件排水的临界孔隙率为14.4%,对应全孔隙率(体积法)为17.7%。

## 5 结 语

(1)针对贫混凝土透水基层材料的渗透性能展开研究,试件的渗透系数大小等于试件水力梯度与渗流速度关系曲线上的斜率,不同的取值方式对应不同的渗透系数;满足达西定律条件的渗透系数等于过原点的直线段的斜率。

(2)通过试验,给出不同孔隙率时满足达西定律的水头范围,为后续测试多孔混凝土试件的渗透系数提供依据。

(3)通过对室内试件和现场钻芯试件的分析,明确了垂直渗透系数和水平渗透系数之间的关系。

(4)试件的有效孔隙率与全孔隙率呈线性关系,其回归公式为  $V_e = 0.721V_c + 7.51$ 。

(5)给出了试件有效孔隙率和渗透系数的回归方程:  $k = (V_e / 20.466)^{4.756} - 0.3894$ ;多孔贫混凝土的临界排水有效孔隙率为14.4%,为指导设计多孔混凝土提供了依据。

## 参考文献:

### References:

- [1] 谈至明. 公路排水系统设计参数研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 7-11.  
TAN Zhi-ming. Research on design parameters of highway drainage system [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (2): 7-11.
- [2] 郑木莲. 多孔混凝土排水基层研究[D]. 西安: 长安

大学, 2004.

- [3] 徐皓, 倪富健, 陈荣生, 等. 排水性沥青混合料耐久性[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(2): 27-31.  
XU Hao, NI Fu-jian, CHEN Rong-sheng, et al. Durability of porous asphalt mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5 (2): 27-31.
- [4] 郑木莲, 陈拴发, 王秉纲. 水泥混凝土路面多孔混凝土基层的接缝间距[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 29-34.  
ZHENG Mu-lian, CHEN Shuan-fa, WANG Bing-gang. Joint space for porous concrete base of cement concrete pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20 (4): 29-34.
- [5] 郑木莲, 陈拴发, 王崇涛. 多孔混凝土的强度特性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(4): 20-25.  
ZHENG Mu-lian, CHEN Shuan-fa, WANG Chong-tao. Strength character of porous concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26 (4): 20-25.
- [6] 郑木莲. 多孔混凝土的渗透系数及测试方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(4): 41-46.  
ZHENG Mu-lian. Permeability coefficient and test method of porous concrete [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(4): 41-46.
- [7] 郑木莲, 王崇涛, 王秉纲. 路用多孔混凝土排水性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(5): 6-10.  
ZHENG Mu-lian, WANG Chong-tao, WANG Bing-gang. Drainage ability of porous concrete in road [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5): 6-10.
- [8] AASHTO T215-70/ASTM D2434-74, Standard method of test for permeability of granular soils (constant head) [S].
- [9] 张鹏飞. 路面内部排水系统研究[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [10] 田波, 牛开民, 谭华, 等. 贫混凝土透水基层的排水能力[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 31-35.  
TIAN Bo, NIU Kai-min, TAN Hua, et al. Discharge ability of lean cement subdrainage base [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 31-35.