

文章编号:1671-8879(2007)05-0006-05

路用多孔混凝土排水性能

郑木莲^{1,2}, 王崇涛^{1,3}, 王秉纲¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 同济大学
道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 中交第一公路勘察设计研究院, 陕西 西安 710065)

摘 要:作为路面排水基层的多孔混凝土,在具备一定力学强度的同时,应有足够的排水能力。表征多孔混凝土排水性能的主要指标为空隙率和渗透系数,空隙率又分为全空隙率和有效空隙率。采用体积法试验测试多孔混凝土的空隙率,并利用自行研制的渗透仪测试多孔混凝土的渗透系数。试验结果表明:多孔混凝土有效空隙率随全空隙率的增大而增大,有效空隙率与全空隙率的比值亦随之增大,二者之间存在二次项关系;渗透系数与空隙率之间存在幂指数关系,渗透系数随空隙率的增大而增大;抗压强度与空隙率之间存在线性相关性,随空隙率增大,抗压强度逐渐降低。

关键词:道路工程;多孔混凝土;空隙率;排水性能;渗透系数;抗压强度

中图分类号:U414

文献标志码:A

Drainage ability of porous concrete in road

ZHENG Mu-lian^{1,2}, WANG Chong-tao^{1,3}, WANG Bing-gang¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Road and Traffic
Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Chinese First Institute of Highway Survey and Design, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: As drainage base course, the porous concrete should have enough permeable ability as well as a certain strength. The porosity and permeability coefficient are the main drainage character targets of porous concrete with the former distinguished as whole porosity and effective porosity. The porosities of porous concrete were tested by using volume method, and the permeability coefficients of porous concrete were measured with the permeameter developed by the authors. The test results show that: the effective porosity and the ratio of effective porosity to whole porosity both increase with the whole porosity's increasing, and there exists binomial relationship between them; there is power exponential relationship between permeability coefficient and porosity, and the permeability coefficient increases with the increasing of porosity; there is liner relationship between compression strength and porosity, and the compression strength decreases with the increasing of porosity. 4 tabs, 6 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; porous concrete; porosity; drainage ability; permeability coefficient; compression strength

收稿日期:2006-05-25

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200631800005);国家“十一五”科技支持计划重大项目(2006BAF02A00)

作者简介:郑木莲(1977-),女,山东蒙阴人,长安大学副教授,同济大学博士后,E-mail: zhengmulian@163.com.

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不少研究^[1-3],力图通过合理设计排水基层材料以及内部排水系统,以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。

多孔混凝土亦称大孔混凝土或多孔贫混凝土,是一种新型的排水基层材料,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,从而减少以至消除路面的早期水损坏。作为排水基层的多孔混凝土,在有一定力学强度的同时,应有足够的渗透性,能迅速排出渗入其中的水。为此,本文对多孔混凝土排水性能进行了研究,并给出了试验结果。

1 空隙率

1.1 全空隙率和有效空隙率

表征多孔混凝土排水性能的主要指标有空隙率和渗透系数^[6]。空隙是指混凝土总体积扣除固体骨架所占体积后的剩余部分,它由三部分组成,即连天空隙、半连天空隙以及封闭空隙,三者之和为全空隙。其中,连天空隙是相互连通的空隙;封闭空隙是和其他空隙不连通的、孤立的那部分空隙;半连天空隙,也称为死端空隙,它有一端与其他空隙连通,另一端封闭。从排水角度分,空隙又分为有效空隙和无效空隙。有效空隙是指能通过水、排出水的空隙。从水流运动的角度讲,只有相互连通、不为结合水所占据的空隙才是有效的。半连天空隙中的水是相对停滞的,从水运动的角度来说是无效的,但其中的水在疏干时能排出,对于排水来说是有效的。因此,有效空隙应由连天空隙和半连天空隙两部分组成,封闭空隙是无效空隙。

全空隙率是全空隙体积占混合料总体积的百分比,习惯上简称空隙率。有效空隙率则是指有效空

隙体积占混合料总体积的百分比。

1.2 空隙率的测试方法

空隙率最常用的测定方法是量体积法或密封法。量体积法是用游标卡尺量取试件的长宽高,且每个数据各量 3 次以上取均值,计算出试件的体积,按照下式计算全空隙率及有效空隙率

$$n_0 = (1 - \frac{\rho_s}{\rho_t}) \times 100 \tag{1}$$

$$n_e = (1 - \frac{m_2 - m_1}{\gamma_w V}) \times 100 \tag{2}$$

式中: n_0 为试件的全空隙率(%); n_e 为试件的有效空隙率(%); ρ_s 为多孔混凝土的毛体积密度(g/cm^3),其值为 m_2/v ; ρ_t 为多孔混凝土的理论密度(g/cm^3); m_1 为试件浸水 24 h 后水中测得的质量(g); m_2 为试件从水中取出后,在 60℃ 的烘箱中烘 24 h 后的质量(g); v 为用量体积法测得的试件的体积(cm^3); γ_w 为水的密度(g/cm^3)。

由文献[7]可知:直到完全水化为止,水泥可与占其质量 1/4 的水成为化学上持久的结合状态;这种化学结合水会发生体积收缩,收缩后其体积仅占原始自由水体积的 3/4;除化学结合水外,其他自由水只起到促进水泥完全水化的作用,并最终在干燥空气中散失。

由此得到计算多孔混凝土理论密度的公式为

$$\rho_t = \frac{100 + P_c + P_c \times 1/4}{100/\rho + P_c/\rho_c + P_c \times 1/4 \times 3/4} \rho_w \tag{3}$$

式中: P_c 为水泥与集料质量比; ρ_c 为水泥的相对密度,此处取 3.1; ρ 为集料的表观密度; ρ_w 为水的密度,取 $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

对于表面不平整又不宜再切割的试件,用量体积法测出的空隙率精度偏低。形状不规则的试件,如成型拆模过程中缺角或掉角,体积不容易通过游标卡尺测得,而又缺少切割条件时,可采用密封法^[8]测其全空隙率或有效空隙率。

1.3 有效空隙率与空隙率的关系

采用振动法成型多孔混凝土试件,养生至一定龄期,对于较规则试件采用量体积法,不规则试件采用密封法测空隙率,试验结果见表 1 和图 1。

表 1 多孔混凝土空隙率测试结果

	%							
n_s	24.28	28.00	28.23	30.31	30.96	31.70	31.80	32.27
n_0	30.33	31.97	32.20	33.18	33.69	34.75	34.12	34.22
n_s/n_0	80.93	88.02	87.67	91.35	91.90	91.22	93.20	94.30
n_e	32.97	33.00	33.12	33.37	33.57	33.64	34.06	
n_0	34.49	35.68	34.76	35.38	35.80	34.99	35.46	
n_e/n_0	95.59	92.49	95.28	94.32	93.77	96.14	96.05	

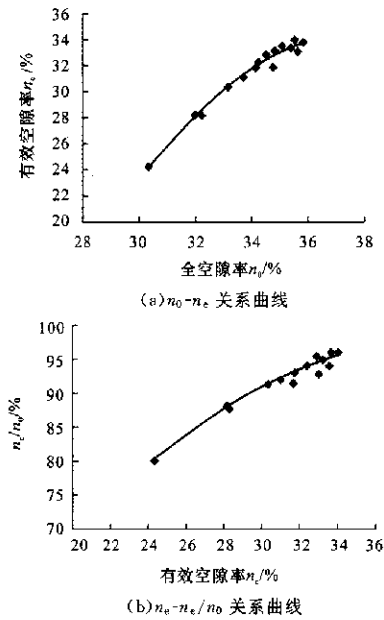


图1 多孔混凝土有效空隙率与全空隙率的关系

由表1和图1可以看出,多孔混凝土有效空隙率随全空隙率的增大而增大,且有效空隙率与全空隙率的比值随有效空隙率的增大而增大。经过回归,得出多孔混凝土两种空隙率之间存在良好的二次多项式关系

$$n_e = -0.166\,1\,n_0^2 + 12.745\,n_0 - 209.61$$
$$R = 0.984\,8$$

(4)

$$n_e/n_0 = -0.059\,1\,n_e^2 + 5.012\,2\,n_e - 6.684\,6$$
$$R = 0.974\,8$$

(5)

2 渗透系数与空隙率

渗透系数是表征多孔混凝土排水性最直接有效的指标,同时也是多孔混凝土材料组成设计和多孔混凝土基层路面结构设计的重要指标。多孔混凝土渗透系数的研究基于 Darcy 试验定律,即

$$V = K$$

(6)

式中: $V = q/A$,为渗透流速, q 为单位时间水流的体

积; A 为横截面积; $i = (h_1 - h_2)/L$,为水力梯度; $(h_1 - h_2)$ 为水头差, L 为渗流长度; K 为渗透系数,亦称水力传导系数。多孔混凝土的渗透系数与自身性质和水的物理性质有关,前者主要指孔径大小、空隙分布、连通度及空隙率等,后者如密度和粘度等。水的物理性质一定时,渗透系数主要取决于多孔混凝土的性质,它是表征水在多孔混凝土中流动难易程度的定量指标。

渗透系数的测试方法按照水头状况分为常水头法和变水头法两种。一般说来,粘质土、细粒土等渗透性能较差的材料,渗透系数 $K < 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,由于流量太小而难于准确测定,常采用变水头法试验^[8-9]。常水头渗透试验适用于渗透系数较大的砂类土等材料,多孔混凝土的渗透系数通常不低于 0.35 cm/s ,因此应采用常水头法试验测定其渗透系数。

渗透系数与空隙率均可作为表征多孔混凝土排水性能的指标,虽然渗透系数更为直观,但渗透系数的测定需要专门的渗透仪,测试过程相对麻烦。利用自行研制的常水头渗透仪(图2)^[7],对研究提出的4种级配的多孔混凝土表2,测试其渗透系数与空隙率,结果如表3所示。

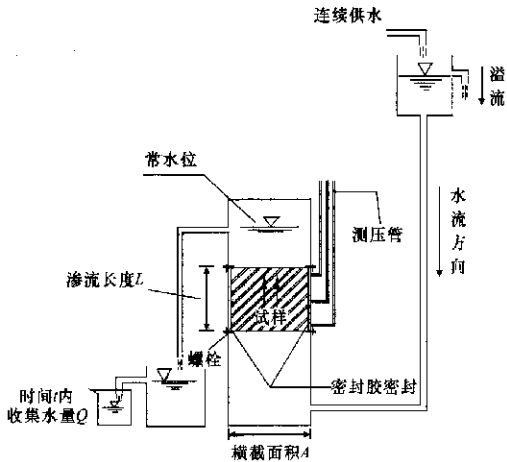


图2 多孔混凝土渗透仪

表2 多孔混凝土的集料级配要求

筛径/mm	31.50	25.00	20.00	16.00	10.00	5.00	2.50
级配 1/%	100		76~87		0~5		
级配 2/%	100		76~87		50~71	0~5	
级配 3/%	100		90~100		20~55	0~10	0~5
级配 4/%		100		25~60		0~10	0~5

表3 多孔混凝土渗透系数与空隙率测试结果

编 号	1-1	1-2	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	4-1	4-2
渗透系数/(cm·s ⁻¹)	14.56	18.99	3.65	6.53	6.26	10.25	7.73	17.25	10.73	12.22
有效空隙率/%	32.88	33.82	25.20	28.49	29.20	31.41	28.32	33.50	30.65	29.80

对表3中试验结果进行线性回归和幂指数回归,结果如图3及式(7)、式(8)所示。

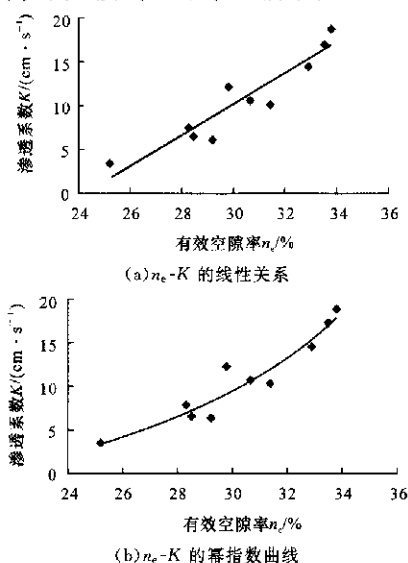


图3 多孔混凝土渗透系数与有效空隙率的关系

$$K = 1.7323 n_e - 41.718, \quad R = 0.9339 \quad (7)$$

$$K = 1.0 \times 10^{-7} n_e^{5.3961}, \quad R = 0.9546 \quad (8)$$

由相关系数比较可知,渗透系数 K 与有效空隙率 n_e 符合相关性较好的幂指数关系。建议实际使用过程中采用式(8)的形式,通过测量有效空隙率,可间接得到其渗透系数,从而大大简化了试验过程。

3 强度与空隙率

多孔混凝土是骨架空隙结构(图4),空隙率越大,其接触点越少,相应地强度越低,即空隙率和强度是此消彼长的关系^[10]。

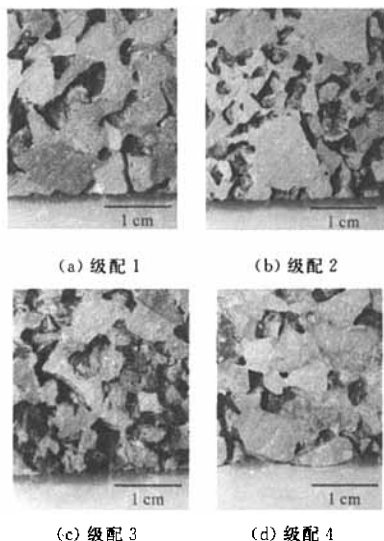


图4 4种级配多孔混凝土上的切片

根据表2所示,变化4种级配的水泥用量和灰质量比,采用振动法成型多孔混凝土试件,标准养生7 d,得出其抗压强度与有效空隙率和全空隙率的相关关系,如图5、图6及式(9)、式(10)所示。

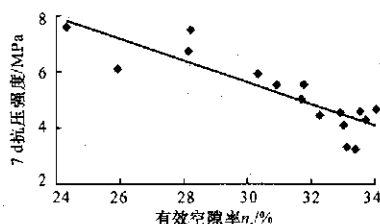


图5 7 d抗压强度与有效空隙率的关系

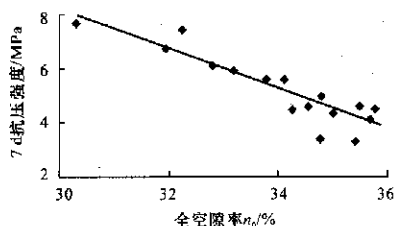


图6 7 d抗压强度与全空隙率的关系

$$f_{c,7} = -0.3806 n_e + 17.058$$

$$R = 0.8631 \quad (9)$$

$$f_{c,7} = -0.7545 n_0 + 30.873$$

$$R = 0.8928 \quad (10)$$

式中: $f_{c,7}$ 为7 d抗压强度。

上述关系式表明,多孔混凝土抗压强度与空隙率之间存在着良好的线性相关性,随着空隙率的增大,抗压强度逐渐降低。而且,抗压强度与全空隙率的相关性大于有效空隙率。原因在于有效空隙率是就排水性能而定义的空隙率,它指相互联通或半联通的空隙所占的比率,不包括封闭空隙。但封闭空隙的存在同样使得集料之间接触机会减少,从而引起强度的降低。若不考虑此部分空隙,必然会引起强度与空隙率关系增大离散性。而用全空隙率则避免了上述问题,因而与抗压强度的相关性较好。

根据式(9)、式(10),可以得出多孔混凝土7 d抗压强度与有效空隙率和全空隙率的对应关系,如表4所示。

表4 多孔混凝土7 d抗压强度与空隙率的关系

7 d抗压强度 / MPa	3	4	5	6	8	10
有效空隙率 / %	36.94	34.30	31.68	29.05	23.80	18.54
全空隙率 / %	36.94	35.62	35.62	32.97	30.32	27.67

4 结 语

(1) 表征多孔混凝土排水性能的指标是空隙率和渗透系数,空隙率分为全空隙率和有效空隙率,其

值可采用量体积法和密封法测试。通过大量试验,得出有效空隙率随全空隙率的增大而增大,有效空隙率与空隙率的比值亦随之增大,其相互之间存在相关性良好的二次项关系。

(2) 渗透系数是表征多孔混凝土排水性能直接有效的指标。根据常水头试验法原理,利用自行研制的渗透仪测试多孔混凝土的渗透系数,根据结果回归出多孔混凝土渗透系数与空隙率之间存在良好的幂指数关系。据此可通过多孔混凝土的有效空隙率间接得出其渗透系数,从而大大简化了试验过程。

(3) 多孔混凝土属于骨架空隙结构,其抗压强度与空隙率之间存在线性相关关系,随着空隙率的增大,抗压强度逐渐降低。而且,抗压强度与全空隙率的相关性优于有效空隙率。

参考文献:

References:

- [1] 郑木莲,王秉纲,胡长顺. 大孔混凝土组成设计及路用性能[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(4):6-10.
ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang, HU Chang-shun. Component design and performance of porous concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(4): 6-10.
- [2] 郑木莲,王秉纲,胡长顺. 多孔混凝土疲劳性能的研究[J]. 中国公路学报,2004,17(1):7-11.
ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang, HU Chang-shun. Study of fatigue property of porous concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 7-11.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 倪富健,徐皓,冷真,等. 沥青性质对排水沥青混合料性能的影响[J]. 交通运输工程学报,2003,3(4):1-4.
NI Fu-jian, XU Hao, LENG Zhen, et al. Influence of asphalt properties on porous asphalt mixture performance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 1-4.
- [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] W 且尔宁. 土木工程师用水泥化学与物理性能[M]. 曾镜鸿,译. 北京:中国建筑工业出版社,1987.
- [8] 郑木莲. 多孔混凝土排水基层研究[D]. 西安:长安大学,2004.
- [9] Lindly J K. Open-graded highway bases make permeameter setup important[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(2): 144-148.
- [10] 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.

西汉高速公路国庆节全线通车

“蜀道之难难于上青天!”。自古以来,人们把翻秦岭过巴山、连接西北城市——西安和西南城市——成都的道路称为蜀道。2002年底开工的西(西安)汉(汉中)高速公路,目前已基本完成路基及桥隧工程,即将全线通车,届时驱车从西安到汉中将由现在的6 h缩短为3 h。西汉高速公路,全长260 km,共有桥梁676座,隧道156座,全线为双向四车道,全封闭,全立交,工程总投资约145亿元。

西汉高速公路通车后,西安至成都公路交通将基本实现高速化,驱车仅需8 h,实现了“千里蜀道一日还”的梦想,蜀道也将告别“行路难”的历史。