

文章编号:0451—0712(2006)08—0341—05

中图分类号:U414.180.1

文献标识码:A

排水基层多孔混凝土的物理力学性质

孙家伟¹, 王崇涛^{2,3}, 郑木莲², 王秉纲²

(1. 广东西部沿海高速公路珠海段有限公司 中山市 528467; 2. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室 西安市 710064;
3. 中交第一公路勘察设计院 西安市 710075)

摘要: 多孔混凝土作为路面的基层,应具有良好的物理性质和力学性质,前者主要指其排水、收缩及抗冲刷等性能,后者主要指其强度和应力—应变特性。通过试验与分析,给出多孔混凝土有效空隙率和全空隙率,及渗透系数与空隙率的关系;得出多孔混凝土强度随龄期的发展规律,弯拉强度、劈裂强度与抗压强度的相关关系,抗压强度与空隙率的关系以及两种形式下的双对数疲劳方程;提出多孔混凝土弯拉弹性模量与弯拉强度,以及抗压弹性模量与轴心抗压强度的关系;得出多孔混凝土的温缩系数和干缩系数。

关键词: 道路工程; 多孔混凝土; 空隙率; 渗透系数; 强度; 疲劳方程; 模量

多孔混凝土是由水泥、粗集料和水拌制而成的贫混凝土。这种混合料无砂或少砂,其硬化后存在较多和较大的孔隙,由于这些孔隙的存在,使得多孔混凝土具有良好的排水性能。为解决路面结构水损坏问题,采用多孔混凝土排水基层便是有效途径之一。

多孔混凝土亦称为大孔混凝土或多孔贫混凝土,作为一种新型排水基层材料而介于水泥稳定碎石和普通混凝土之间。由于具有更开的级配,并较水泥稳定碎石的水泥用量有所增大,因而多孔混凝土的排水性能和强度都比水泥稳定碎石有很大提高^[1]。这种多孔混凝土排水基层的应用目前尚不多见,法国曾经在1974年和1976年修建了多孔贫混凝土路面试验路;1979~1981年在戴高乐机场水泥混凝土路面结构中,将10 cm厚的多孔贫混凝土铺设于面板与水泥处治基层之间,以增加基层的排水功能。国内广西交通科研所等单位修筑过多孔贫混凝土排水基层试验路和实体工程^[2],对多孔混凝土进行过一些研究。

多孔混凝土作为路面的基层,应具有良好的物理性质和力学性质,前者主要指其排水、收缩及抗冲刷等性能,后者主要指其强度和应力—应变特性。

1 排水特性

衡量多孔混凝土渗透性常用的指标为空隙率和

渗透系数。其空隙率一般均在25%以上,且渗透系数较大,常用测定方法不能适用于多孔混凝土,因此必须有较为准确测定这些指标的方法。

1.1 空隙率

多孔混凝土的空隙率按照其排水性能的不同,可分为有效空隙率和全空隙率。空隙率的测定方法最常用的是量体积法。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,可采用胶带密贴蜡封法测定试件的全空隙率及有效空隙率。

大量试验表明,有效空隙率随全空隙率的增大而增大,二者之间存在相关性良好的二次项关系。即:

$$n_e = -0.166 \ln_0^2 + 12.745n_0 - 209.61$$
$$R = 0.9848 \tag{1}$$

式中: n_e 为有效空隙率,%; n_0 为全空隙率,%。

1.2 渗透系数

目前在试验室测定材料的渗透系数通常有两种方法:常水头法与变水头法。渗透性能较差的材料,由于流量太小常水头法难于准确测定,常采用变水头法试验,其适合测试渗透系数 $k < 1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 的材料。一般多孔混凝土的渗透系数不小于 0.35cm/s ,应采用常水头法测定。

目前关于多孔混凝土渗透系数的测定,我国还没有制定统一的试验方法。为此利用自行研制的常水头渗水仪(图1)进行渗透试验,根据试验结果回归

出多孔混凝土渗透系数与空隙率之间存在相关性较好的幂指数关系,即:

$$k = 1.0 \times 10^{-7} n_e^{5.3961} \quad (R = 0.9546) \quad (2)$$

式中: k 为多孔混凝土渗透系数, cm/s ; 其余符号意义同前。

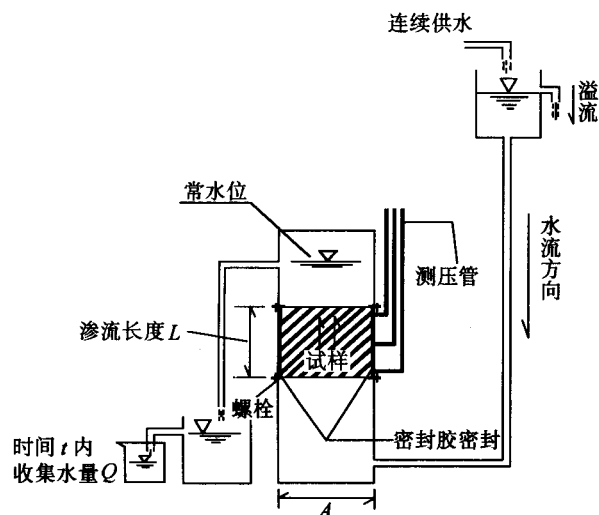


图 1 多孔混凝土渗透仪

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,从而大大简化试验过程。

2 强度特性

强度是多孔混凝土硬化后的主要力学性质。只有达到强度要求,才能研究其他物理性质。对多孔混凝土基层而言,不管是水泥混凝土路面,还是沥青混凝土路面,通常结构设计时采用弯拉强度作为设计指标,配合比设计时可采用抗压强度指标。此外,施工质量检测时,通常采取钻芯取样的方法,对于钻取的芯样,有时需进行劈裂试验以评价其强度。

2.1 强度随龄期的增长规律

多孔混凝土成型初期,水泥水化不充分,强度未充分形成。在正常的养生条件下,其强度将随龄期的增加而增长。

通过试验,得出多孔混凝土 28 d 抗压强度和 90 d 抗压强度与其 7 d 抗压强度的关系如式(3)和(4)所示:

$$f_{c,28} = 0.9798 \cdot f_{c,7} + 1.2881 \quad (R = 0.9640) \quad (3)$$

$$f_{c,90} = 6.1781 \cdot \ln f_{c,7} - 2.5947 \quad (4)$$

式中: $f_{c,28}$ 为多孔混凝土 28 d 抗压强度, MPa;

$f_{c,90}$ 为多孔混凝土的 90 d 抗压强度, MPa; $f_{c,7}$ 为多孔混凝土的 7 d 抗压强度, MPa。

此外,其 90 d 劈裂强度 $f_{p,90}$ (MPa) 与 28 d 劈裂强度 $f_{p,28}$ (MPa) 的关系如式(5)所示:

$$f_{p,90} = 1.2545 \cdot \ln f_{p,28} + 1.2467 \quad (5)$$

$$R = 0.9308$$

2.2 强度之间的关系

同普通混凝土一样,多孔混凝土的强度,无论抗压强度、弯拉强度或劈裂强度,主要取决于水泥的活性、水泥用量和水灰比等因素。一定条件下,弯拉强度、劈裂强度与抗压强度有密切的关系。抗压强度大时,弯拉强度和劈裂强度也大,反之亦然,但弯拉强度和劈裂强度较抗压强度低得多。

建立多孔混凝土弯拉强度及劈裂强度与抗压强度的经验关系式有很大的实际意义,当弯拉强度、劈裂强度与抗压强度的相关性满足一定要求时,不仅可用抗压强度进行路面混凝土的配合比设计,而且可用于施工质量控制,乃至用抗压强度作为判断路面混凝土质量是否合格的依据。

试验研究表明,多孔混凝土 28 d 弯拉强度、劈裂强度和抗压强度之间存在如式(6)和式(7)所示相关性良好的幂指数关系:

$$f_{r,28} = 0.5033 f_{c,28}^{0.7012} \quad (R = 0.9367) \quad (6)$$

$$f_{p,28} = 0.4372 f_{c,28}^{0.4538} \quad (R = 0.8587) \quad (7)$$

式中: $f_{r,28}$ 为多孔混凝土 28 d 弯拉强度, MPa; 其余符号意义同前。

为便于应用,根据回归方程预测出多孔混凝土抗压强度与弯拉强度和劈裂强度的关系,如表 1 所示。

表 1 多孔混凝土抗压强度与弯拉强度和劈裂强度的关系

抗压强度/MPa	3	4	5	6	8	10
弯拉强度/MPa	1.09	1.33	1.56	1.77	2.16	2.53
劈裂强度/MPa	0.71	0.82	0.91	0.99	1.12	1.24

2.3 强度与空隙率的关系

多孔混凝土是骨架空隙结构,其强度靠水泥胶浆的粘结力和粗集料间的摩阻力形成,集料与集料之间近于点接触。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,之间存在的关系如式(8)和式(9):

$$f_{c,7} = -0.3806 n_e + 17.058 \quad (R = 0.8631) \quad (8)$$

$$(9)$$

$$f_{c,7} = -0.754\,5n_0 + 30.873 \quad (R = 0.892\,8)$$
(9)

式中符号意义同前。

根据式(8)和式(9),可以得出多孔混凝土 7 d 抗压强度与空隙率的对应关系如表 2 所示。

表 2 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

2.4 疲劳特性

采用应力控制模式和三分点加载方式,加载波形统一采用正弦波,对于 49 根 15 cm×15 cm×55 cm 的梁式试件,在 MTS850 试验机上进行了疲劳试验^[3]。

对试验结果进行处理分析,得出多孔混凝土疲劳寿命及等效疲劳寿命均服从双参数威布尔分布:

$$\rho = F(\overline{N}) = 1 - \exp\left(-\frac{\overline{N}^m}{t_0}\right), \overline{N} \geq 1, m \text{ 和 } t_0 > 0$$
(10)

或变形为:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(\overline{N})} = m \ln \overline{N} - \ln t_0$$
(11)

式中: m 和 t_0 分别为形状参数和尺度参数。

通过双参数威布尔分布模型建立不同失效概率下多孔混凝土两种形式的双对数疲劳方程,其中失效概率为 50% 时的疲劳方程为:

$$\lg S = \lg 1.021\,6 - 0.046\,(1 - R) \lg N$$
(12)

或:

$$\lg \overline{S} = \lg 1.049\,3 - 0.048\,6 \lg N$$
(13)

式中: S 为应力水平; R 为低高应力比; N 为疲劳寿命; \overline{S} 为等效力水平。

3 应力—应变特性

多孔混凝土是一种多相复合材料,其应力—应变特性是其各组成相,即集料和水泥石等应力—应变性状的组合。集料和水泥石的应力—应变关系虽然都是线性的,但其弹性模量值相差很大,促使多孔混凝土的应力—应变曲线呈非线性。但类似于普通混凝土的应力—应变曲线在极限荷载的 30% 以内时,呈线性性状,或者在应力级位低于 50% 时,可近似视为线性的,以弹性模量表征。

3.1 弯拉弹性模量

多孔混凝土的弯拉弹性模量,采用小梁试件进

行三分点加荷的方式,测定 2 kN 至 50% 极限荷载处的弦线模量,用跨中挠度公式反算求得。

通过试验,得出多孔混凝土弯拉弹性模量与弯拉强度之间存在相关性较好的幂指数关系:

$$E_b = 1.185\,8\,f_r^{0.464\,9} \quad (R = 0.848\,6)$$
(14)

式中: E_b 为多孔混凝土的弯拉弹性模量, 10^4 MPa; f_r 为多孔混凝土弯拉强度, MPa。

3.2 抗压弹性模量

根据水泥混凝土试验规程中抗压弹性模量的试验方法,进行多孔混凝土抗压弹性模量的测试。通过 15 cm×15 cm×30 cm 棱柱体抗压弹性模量试验,得出多孔混凝土抗压弹性模量与轴心抗压强度之间存在相关性良好的幂指数关系:

$$E_c = 0.685\,2\,f_c^{0.632\,1} \quad (R = 0.995\,9)$$
(15)

式中: E_c 为多孔混凝土的抗压弹性模量, 10^4 MPa; f_c 为多孔混凝土轴心抗压强度, MPa。

4 收缩特性

作为一种基层材料,类似于其他半刚性材料或刚性材料,多孔混凝土同样也存在收缩现象。导致基层产生收缩变形的因素很多,其中主要有环境温度、相对湿度等外因,以及组成材料与外掺剂相互作用生成新相的相变过程等内因。这些因素引起的收缩可归纳为硬化收缩、温度收缩及干燥收缩三类。多孔混凝土在材料结构形成过程中生成新相的量非常小,实际中只考虑其温度收缩和干燥收缩两部分。反映多孔混凝土温缩和干缩性的常用指标是其温缩系数和干缩系数。

4.1 温度收缩

目前半刚性基层材料和贫混凝土、碾压混凝土等刚性基层材料,通常采用贴应变片的方法测试其温度收缩系数^[4,5]。这种方法对于表面相对光滑的材料,测试结果较为准确,但多孔混凝土无细集料填充,表面非常粗糙,贴应变片法不再适用,需采用适宜的方法,如传感器法(图 2)。

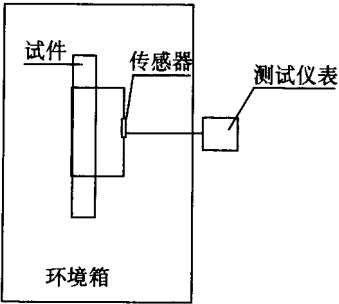


图 2 温缩系数测试系统示意

试验选用表 3 所示 4 种配合比,振动成型 10 cm×10 cm×40 cm 的梁式试件,标准养生 90 d。温度收缩系数测试系统由温度环境箱、测试传感器及测试仪表组成。其中环境箱温度调节范围为-30~60℃,温度控制精度为±0.1℃;测试传感器及测试仪表精度为 1 μm/m/℃,传感器自身温度系数为 10 μm/m/℃。通过试验得出多孔混凝土的温缩系数曲线如图 3 所示。

表 3 多孔混凝土的配合比			
级配	配合比/(kg/m ³)		
	集料	水泥	水
级配 1	1 668	185.3	72.3
级配 2	1 720	191.1	74.5
级配 3	1 757	195.2	76.1
级配 4	1 782	198.0	77.2

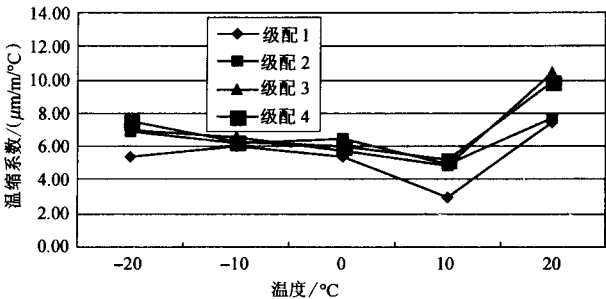


图 3 多孔混凝土温缩系数曲线

图 3 表明,4 种级配的多孔混凝土温缩系数在-25~5℃温度区间内基本不变,在 5~15℃区间内有所减小,之后在 15~25℃区间增大。从整个温度区间情况来看,温缩系数介于 3~10 μm/m/℃ 之间,数值相差不大。计算温度应力时可根据图 3 所示结果,对于不同级配、不同温度区间取不同的温缩系数值。对整个区间而言,可取其平均值,即级配 1~4 分别为 5.4 μm/m/℃、6.5 μm/m/℃、6.9 μm/m/℃和 7.0 μm/m/℃,或平均为 6.5 μm/m/℃。

4.2 干燥收缩

干燥收缩是多孔混凝土材料因内部含水量的减小引起的体积收缩现象。干燥收缩是水的蒸发而产生的“毛细管作用”、“吸附水及分子间力作用”、矿物晶体或胶凝体的“层间水作用”等引起的整体宏观体积的变化。

本文根据试验规程^[6]中混凝土干缩试验规定,干缩室内控制温度为(20±2)℃,相对湿度为(60±5)%。试验结果得出多孔混凝土干缩率随龄期的增

长关系如表 4 和图 4 所示。

表 4 多孔混凝土干缩试验结果

材料编号	28 d 抗压强度/MPa	水泥用量/kg/m ³	干缩系数/×10 ⁻⁶							
			3 d	7 d	14 d	28 d	60 d	90 d	180 d	
多孔混凝土 1	6.03	168	50	125	175	225	275	292	332	
多孔混凝土 2	8.12	180	55	128	182	242	286	315	352	

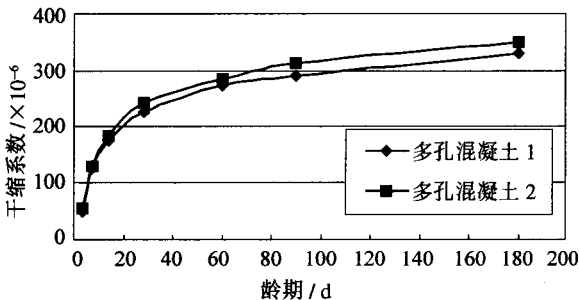


图 4 多孔混凝土干缩试验结果

试验结果表明,多孔混凝土的收缩量在 14 d 左右已经完成 50%,28 d 之内完成绝大部分,90 d 后干缩变形基本稳定。多孔混凝土空隙率大,失水快,因此要注意早期的饱水养护,否则会使其收缩量增加,从而增大其开裂的机率。

5 结 语

(1)表征多孔混凝土排水性能的指标为空隙率和渗透系数,前者又分为有效空隙率和全空隙率。通过试验得出多孔混凝土有效空隙率和全空隙率的关系,及渗透系数与空隙率的关系。

(2)得出多孔混凝土强度随龄期的发展规律,弯拉强度、劈裂强度与抗压强度的相关关系,抗压强度与空隙率的关系,以及失效概率为 50%的两种形式下的双对数疲劳方程。

(3)提出多孔混凝土弯拉弹性模量与弯拉强度,以及抗压弹性模量与轴心抗压强度的关系。

(4)进行多孔混凝土的温度收缩和干燥收缩试验,得出其温缩系数和干缩系数。

参考文献:

[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).
[2] 广西交通科学研究所. 高等级公路水泥混凝土路面贫混凝土基层及排水系统的应用研究[R]. 课题研究总结报告,1999.
[3] 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).

[4] 沙爱民. 半刚性路面材料结构与性能[M]. 北京:人民交通出版社,1998.

[5] 徐江萍,王秉纲,等. 贫混凝土基层材料温度收缩系数的研究[J]. 重庆交通学院学报,2003,22(1).

[6] JTJ 053—94,公路工程水泥混凝土试验规程[S].

Physical and Mechanical Performance of Porous Concrete
for Drainage Base

SUN Jia-wei¹, WANG Chong-tao^{2,3}, ZHENG Mu-lian², WANG bing-gang²

(1. Zhuhai Section of Guangdong Western Coastal Expressway Co., Ltd, Zhongshan 528467, China;

2. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064; China;

3. The First Highway Survey and Design Institute of China, Xi'an 710075, China)

Abstract: As base course material, porous concrete should has good physical and mechanical performance, and the former refers to the characters of drainage, shrinkage, anti-erosion and etc., while the latter refers to the characters of strength and stress-strain. According to tests and analysis, the relationship of effective porosity and total porosity, permeability coefficient and porosity of porous concrete are adduced. The strength development with time, relationships between flexural tensile strength, split strength and compression strength, the relationship between compression and porosity, and two types of double logarithm fatigue equation of porous concrete are got. The relationships between flexural tensile elastic module and flexural tensile strength, compression elastic module and compression strength of porous concrete are drawn. Last, the temperature contraction coefficient and dry shrinkage coefficient of porous concrete are advanced.

Key words: road engineering; porous concrete; porosity; permeability coefficient; strength; fatigue equation; modulus

杭甬高速公路三期拓宽工程封道施工

杭甬高速公路正在拓宽,该工程已经进行到第三期,眼下任务过半,开山爆破基本结束,即将进行桥梁拼接、道路纵坡等施工,届时有部分路段临时封道,或借道通行,对局部道路通行可能有影响,还请驾驶员多加谅解。

该工程起点位于杭甬高速公路与上三高速公路交叉处,全长 80.82 km,投资总概算 22.1 亿元。主要工程量包括拼接改建特大桥 3 座、大桥 11 座、中桥 58 座、互通 6 处、通道 162 个、服务区 1 个,并完成相应交通工程及沿线设施和环保绿化工程。预计 2007 年 12 月完工通车。

由于地质原因,沪杭甬高速公路的路面沉降较为严重,有的路面落差达到 2 m 以上,造成“桥头跳”、震动大等行车不安全因素。因此在三期拓宽工程建设时,还要进行路面纵坡调整工程。

该项工程从 7 月初开始,11 月份结束,明年 3 月再次开始,到 9 月份结束,分两个作业区进行。届时,该路段 4 车道将封闭两个车道,车辆拥堵情况将十分严重。为此,建设单位将在封道路段设专人指挥,并配备清障车、巡逻车等专门机械设备,沿途还设置了专用照明灯和震动带,方便晚上行驶的司机看清道路设置状况。

同时,由于该工程是在原来的硬路肩基础上加宽,一些原有的护栏已不能起到保护作用,发生冲撞后,车辆很容易冲破护栏,造成交通事故,因此,司机在行驶到该路段时要千万注意路面状况。