

文章编号: 1671-8879(2003)04-0006-05

# 大孔混凝土组成设计及路用性能

郑木莲, 王秉纲, 胡长顺

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 提出了路面大孔混凝土排水基层材料的配合比设计方法。试验表明其具有较高的强度及排水能力。通过试验及机理分析得出其具有较小的温度及干燥收缩性、良好的抗冻性等路用性能。

**关键词:** 大孔混凝土; 配合比; 强度; 空隙率; 渗透系数; 收缩; 抗冻

**中图分类号:** U 414. 18 **文献标识码:** A

## Component design and performance of porous concrete

ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang, HU Chang-shun

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The paper put forward the mix design for base course material of porous concrete. Tests show that the concrete has higher strength and good permeability, the concrete also has good performance as less temperature season shrinkage and good frost resistance.

**Key words:** porous concrete; mixture ratio; strength; percentage of void; permeability; coefficient; shrinkage; frost resistance

公路作为一种露天的公用设施, 很多病害是由自然环境因素引起的。调查研究表明, 降水通过路面接缝、裂缝和空隙渗入到路面结构内而形成内部滞水, 地下水通过毛细作用上渗到路面结构而积滞其内, 是造成路面结构过早损坏的主要原因。对此, 国内外进行了不少研究<sup>[1~6]</sup>, 力图通过设计合理的排水材料以及内部排水系统以减少直至消除路面的水损坏。

目前常用的透水材料有两大类: 一类是水泥或沥青处治碎石集料; 另一类是未经处治的级配碎石集料。较之水泥处治碎石, 大孔混凝土(也称无砂大孔混凝土或多孔混凝土)水泥含量稍大, 不含或含有很少细集料, 透水能力和强度都较高。

大孔混凝土用于道路基层在国内并不多见, 而在国外已有不少应用, 如法国曾经在 1974 年和 1976 年修建了多孔混凝土路面结构。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。这种多孔混凝土排水基层在欧洲的一些国家广泛地用于硬路肩下。

## 1 组成设计

### 1.1 原材料性质

#### 1.1.1 水泥

普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥以及火山灰质硅酸盐水泥均可用于大孔混凝土中。但不能使用快硬水泥、早强水泥及已经受潮变质的水泥。由于从拌和到压实, 一般需要 2 h, 应优先选用终凝时间较长的水泥。本试验所用水泥为河南许昌产 ISO 32.5 平顶山普通硅酸盐水泥。有关技术指标见表 1。

表 1 水泥技术指标

检验项目	初凝时间 /min	终凝时间 /min	细度 /%	3 d 强度 /MPa		28 d 强度 /MPa	
				抗折	抗压	抗折	抗压
标准要求	不早于 45	不迟于 600	10.0	2.5	11.0	5.5	32.5
实测结果	218	340	3.8	4.5	31.8	7.1	50.7
单项结论	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格

#### 1.1.2 集料

集料应选用洁净、坚硬而耐久的碎石, 对其压碎值、含泥量及针片状含量应提出要求。本试验所用集料

收稿日期: 2002-06-25

作者简介: 郑木莲(1977-), 女, 山东蒙阴人, 长安大学博士生



为河南许昌本地石灰岩碎石, 其有关技术指标见表 2。

表 2 碎石技术指标

实验项目	表观相对密度	松方密度 /g · cm <sup>-3</sup>	含泥量 /%	针片状含量/%	压碎值 /%
标准要求	—	—	1	15	12
实测结果	2.70 × 10 <sup>3</sup>	1.5 × 10 <sup>3</sup>	0.91	8.88	6.28

1.2 集料级配

大孔混凝土和普通混凝土的级配设计, 在工程中的出发点不同。前者要求一定的空隙率以便能充分排水或透水, 同时也应具有一定的力学强度; 而后者则偏重力学强度, 空隙率应该尽可能小。

理想的大孔混凝土是粗集料受压后在排列中互相嵌挤又不互相干涉, 相互之间有一定的摩擦力, 形成排列紧密的多级空间骨架结构。根据泰波公式及国外的经验, 设计出四种级配如表 3 所示。

表 3 集料级配范围

筛径/mm	31.5	25.0	20.0	10.0	5.0	2.5
通过筛孔的百分率/%	级配 1	100	—	0		
	级配 2	100	—	87~ 76	0	
	级配 3		100	90~ 100	20~ 25	0
	级配 4		100	90~ 100	20~ 25	0~ 10

注: 级配 2 按照泰波公式  $p = 100(d/b)^n$ ,  $n = 0.3 \sim 0.6$  而得; 级配 3、4 均为 AASHTO No. 67 (威斯康星州) 级配调整结果。

1.3 配合比设计

1.3.1 设计标准

大孔混凝土的组成设计, 应同时满足空隙率、渗透性及强度三方面的要求。

(1) 空隙率。空隙率越高, 排水性能越好。为了迅速排除渗入路面结构内部的自由水, 必须充分保证大孔混凝土的多空隙性。根据排水性能要求和国外经验, 水泥稳定碎石的空隙率应为 15% ~ 25%, 本文中大孔混凝土的空隙率定在 20% ~ 30% 之间。

(2) 渗透系数。依据美国的经验, 排水基层透水材料的设计渗透系数  $k$  一般采用 0.18 ~ 0.36 cm/s。排水规范<sup>[7]</sup>建议透水材料的渗透系数不得小于 0.35 cm/s (300 m/d), 本文以此为准。

(3) 力学强度。排水基层作为路面结构的组成部分, 承受荷载作用, 因此应保证在排水能力的基础上满足混合料的强度或者模量要求。按照规范<sup>[8]</sup>要求, 参考水泥稳定土作为高速公路和一级公路基层时的强度要求, 大孔混凝土 7 d 抗压强度不低于 3 ~ 5 MPa。

1.3.2 设计原则

根据材料的性能及设计要求, 在确保混凝土渗

透性及强度的前提下, 以采用最小水泥用量为原则, 进行配合比设计。大孔混凝土单位体积的质量应为 1 m<sup>3</sup> 紧密状态的集料质量和单方水泥用量及水泥水化水质量之和。

1.3.3 设计步骤

(1) 确定集料用量。每 m<sup>3</sup> 大孔混凝土的集料用量取为: 每 m<sup>3</sup> 紧密状态的碎石质量 × 0.98 折减系数<sup>[9]</sup>。

(2) 确定水泥用量。用水量一定的情况下, 大孔混凝土的强度随水泥含量的增加而增长。试验过程中在水灰比一定 (如  $W/C = 0.45$ ) 的情况下, 变动水泥用量 ( $C/G$  为 1/8, 1/8.5, 1/9.0, 1/9.5, 1/10) 成型试件, 养护后测定其毛体积密度、空隙率及 7 d 抗压强度, 根据强度及经济性要求确定最佳水泥用量。

(3) 确定水灰比。大孔混凝土存在一个最佳用水量, 若用水量太小, 水泥浆不能很好包裹集料; 用水量过大, 水泥浆过于稀薄而沉积于底部, 也不能很好包裹集料, 影响混凝土的整体强度及均匀性。试验过程中在水泥用量一定 ( $C/G = 1/9$ ) 的情况下, 变动水灰比 ( $W/C$  为 0.39、0.42、0.45、0.48、0.51) 成型试件, 养护后测定其空隙率、渗透系数及 7 d 抗压强度, 确定最佳水灰比。

1.3.4 试验结果

大孔混凝土因缺少细集料包裹水泥浆, 振动成型时水泥浆容易下沉, 从而导致水泥浆分布不均, 强度离散性大, 在试验过程中采用插捣法成型试件, 强度离散性较小。

根据配比试验, 水泥用量为 150 ~ 210 kg/m<sup>3</sup> (灰集比为 1/8 ~ 1/10), 水灰比为 0.39 ~ 0.51 时, 表 3 中 4 种级配对应的混凝土均满足设计要求。本文根据试验结果, 提出表 4 中的四种配合比。

表 4 级配 1~4 配合比表

级配	配合比/kg·m <sup>-3</sup>			水灰比	灰集比
	石子	水泥	水		
级配 1	1 568.0	174.2	69.7	0.42	1 9
级配 2	1 597.4	177.5	74.6		
级配 3	1 651.3	183.5	82.6	0.45	
级配 4	1 661.1	184.6	77.5		

注: 集料级配取为表 3 中级配的中值。

2 性能研究

2.1 渗透性

衡量大孔混凝土渗透性常用的指标为空隙率和渗透系数, 此外也可用竖向渗流速度表征其竖向渗

透性。由于其空隙率一般都在 25% 以上,而且渗透系数也比较大,常用的测定方法不能适用于大孔混凝土,因此必须有较为准确地测定这些指标的方法。

(1) 空隙率。大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,为此,试验中采用多种方法尝试,最终确定采用“胶带密贴蜡封法”测定试件的全空隙率及有效空隙率。

(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,由于流量太小而难于准确测定,常采用变水头法试验,其适合测试渗透系数  $k < 1 \times 10^{-3}$  cm/s 的材料。一般大孔混凝土的渗透系数不小于 0.35 cm/s,应采用常水头法试验来测定。

目前关于大孔混凝土渗透系数的测定,中国还没有制定统一的试验方法。本文对于渗透系数,并没有研制新的仪器,而是采用文献[10]推导的渗透系数与空隙率的如下关系式求取渗透系数

$$k = 0.20n_0 - 2.76 \quad (R^2 = 0.86) \quad (1)$$

$$k = 0.12n_e - 0.73 \quad (R^2 = 0.94) \quad (2)$$

式中:  $n_0$  及  $n_e$  分别为试件的全空隙率及有效空隙率。

比较式(1)、式(2)的相关系数,可以看出渗透系数与有效空隙率的相关性较好,因此采用式(2)推求渗透系数。

(3) 竖向渗流速度。由于水在渗入路面基层过程中的渗流是竖向的,同时路面结构内部排水系统的集水沟中水的渗流也是竖向的,当这种竖向渗流达到稳定状态时,其运动要素基本上不随时间变化,因而可认定是恒定渗流。水的竖向渗流可用如下规律表示

$$Q = AV$$

式中:  $Q$  为竖向渗流流量;  $A$  为渗水断面面积;  $V$  为过水断面平均竖向渗流速度。

本研究应用测试规程<sup>[11]</sup>中测定沥青路面渗水试验的路面渗水仪,稍作改进用来测定大孔混凝土的竖向渗流速度。

对级配 1~4 大孔混凝土的空隙率、渗透系数及竖向渗流速度测试结果见表 5。

## 2.2 强度

### 2.2.1 组成结构

混合料的组成结构根据集料的级配一般有三种

类型,即骨架空隙结构、悬浮密实结构及骨架密实结构。大孔混凝土属于骨架空隙结构。这种结构采用开级配,粗集料较多,靠彼此之间较大的内摩阻力形成强度,细集料较少或没有,不足以填充空隙,从而形成较大的空隙率。

### 2.2.2 抗压强度

按照表 4 所示级配,用插捣法成型试件,测得其 7 d 抗压强度如表 5 所示。

表 5 级配 1~4 试验测试结果

编号	毛体积密度 /kg·m <sup>-3</sup>	干密度 /kg·m <sup>-3</sup>	空隙率/%		渗透系数 /cm·s <sup>-1</sup>	竖向渗流速度 /cm·s <sup>-1</sup>	7 d 抗压强度 /MPa
			全空隙率 $n_0$	有效空隙率 $n_e$			
级配 1	1843.0	1849.8	32.4	32.0	3.11	28.46	4.44
级配 2	1895.2	1860.5	32.2	31.7	3.07	22.52	5.86
级配 3	1988.1	1970.2	29.5	28.0	2.63	18.49	6.10
级配 4	1971.1	1942.3	28.5	26.0	2.39	15.38	7.75

根据表 5,做出级配 1~4 不同配比与 7 d 抗压强度及有效空隙率关系曲线如图 1 所示,抗压强度与有效空隙率的关系曲线如图 2。

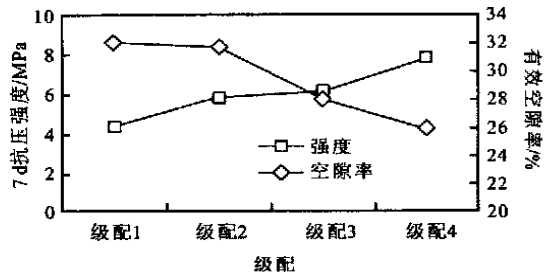


图 1 级配组成与抗压强度及有效空隙率的关系

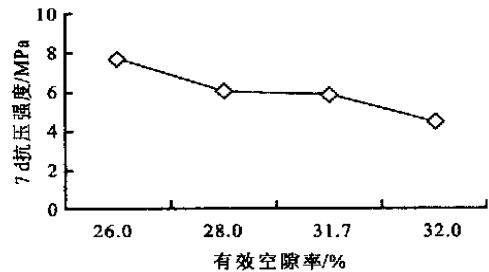


图 2 抗压强度与有效空隙率的关系

从表 5、图 1 及图 2 可以看出,级配 1~4 四种大孔混凝土的 7 d 抗压强度在 4~8 MPa 之间,均达到规范要求;有效空隙率均大于 26%,渗透系数均大于 2.39 cm/s,而竖向渗流速度大于 15 cm/s,可见其渗透性能良好;随着有效空隙率的增大,抗压强度逐渐减小,说明强度与空隙率之间是互为消长的关系。因此,大孔混凝土设计过程中处理好强度与透水性之间的关系是至关重要的。

为研究大孔混凝土强度随时间的增长关系, 对表 4 所示的级配和级配 2、3 两种配比, 分别制作三组试件, 标准养护 7 d、28 d 和 90 d, 测得其抗压强度增长如表 6 所示。

表 6 抗压强度随龄期增长规律

级配	7 d		28 d		90 d	
	强度 /MPa	增长率 /%	强度 /MPa	增长率 /%	强度 /MPa	增长率 /%
级配 2	5.86	70	8.38	100	9.47	113
级配 3	6.10	62	9.78	100	10.39	106

从表 6 可以看出, 大孔混凝土的强度增长比普通混凝土小, 7 d 强度达到 28 d 强度的 60% ~ 70%。

2.2.3 劈裂强度与抗折强度

根据表 4 所示配比, 分别制作级配 1~ 4 大孔混凝土立方体劈裂试件, 以及小梁抗折强度与弹性模量试件, 标准养护 28 d, 测得其结果如表 7 所示。

表 7 劈裂强度及抗折强度结果

级配	劈裂强度 /MPa	抗折强度 /MPa	断块抗压强度 /MPa	抗折弹性模量 /10 <sup>4</sup> MPa	压折比
级配 1	0.79	1.90	6.01	14.0	3.16
级配 2	0.96	2.05	7.11	14.7	3.47
级配 3	1.10	2.13	8.11	16.5	3.81
级配 4	1.39	2.55	9.26	16.4	3.63

从表 7 看出, 四种配比大孔混凝土的劈裂强度、抗折强度及抗折弹性模量依次增大。此外, 大孔混凝土的压折比在 3~ 4 之间, 较普通混凝土的 7~ 10 为小, 即大孔混凝土相对于抗压强度有较高的抗折性能。

2.3 收缩性

2.3.1 温度收缩

大孔混凝土是由组成其空间骨架结构的原材料和其间的胶结物(固相)、存在于固相层面与空隙中的水和水溶液(液相)及存在于空隙中的空气(气相)这三相组成的。因此, 大孔混凝土的外观胀缩性是其基本体的固、液、气相的不同温度收缩性的综合效应。由于气相大部分与大气贯通, 在综合效应中影响较小, 可以忽略。所以大孔混凝土的胀缩性需从固相胀缩及液相胀缩等方面进行研究。

由于大孔混凝土所用集料为石灰岩碎石, 其收缩性较小。虽然胶结物相对来说具有较大的收缩性( $20 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6} (^\circ\text{C}^{-1})$ ), 但因大孔混凝土水泥用量较小, 所以收缩不大。此外, 存在于大孔混凝土材料内部大空隙、毛细孔、胶凝孔中的水, 通过“扩张作用”和“冰冻作用”对其热胀缩性产生极大的影响。但是, 大

孔混凝土孔径较大, 毛细水对其影响不大, 且进入其中的水分能够较快地排出路面结构内部, 所以液相胀缩对大孔混凝土温度收缩产生的影响也不会太大。

通过温度收缩机理的分析, 作为基层材料, 大孔混凝土比半刚性基层材料具有较小的温度收缩性。

2.3.2 干燥收缩

干燥收缩是大孔混凝土材料因内部含水量的减小引起的体积收缩现象。干燥收缩的基本原理是由于水的蒸发而产生的“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。

本文采用试验规程<sup>[12]</sup>中混凝土干缩试验规定, 干缩室内控制温度为  $20 \pm 2$ , 相对湿度为  $60 \pm 5\%$ 。试验结果见表 8。

表 8 大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 <sup>-3</sup>	干缩率/ $10^{-4}$					
			3 d	7 d	14 d	28 d	60 d	90 d
0 <sup>#</sup>	6.6	160	0.250	0.997	1.496	1.745	2.24	—
1 <sup>#</sup>	8.3	180	0.499	1.250	1.750	2.500	2.75	2.64
2 <sup>#</sup>	9.8	168	0.550	1.280	1.820	2.630	2.86	3.00

试验结果表明, 大孔混凝土的收缩量在 14 d 左右已经完成 50%, 28 d 之内完成大部分收缩量, 90 d 后收缩量基本稳定。由此可见, 早期养护对大孔混凝土非常重要。大孔混凝土空隙率大, 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。

与半刚性基层材料的干缩系数<sup>[13]</sup>相比, 大孔混凝土的干燥收缩小得多, 所以其抗裂性能好。

2.4 抗冻性

中国现行规范中关于抗冻性的试验主要有快冻法和慢冻法两种, 鉴于试验条件的关系, 本文采用文献[14]中的慢冻法并稍加改进。试件采用边长为 150 mm 的立方体, 每种配比做三组。

将试件在 28 d 龄期时进行冻融试验。试验前 4 d 将冻融试件从养护地点取出进行外观检查, 随后放入 15~ 20 水中浸泡, 冻融试件浸泡 4 d 后进行冻融试验, 对比试件保留在标准养护室内, 直到完成冻融循环后, 与抗冻试件同时试压。冻融循环试验是在 - 15~ - 20 的冰箱中冻结 4 h, 然后取出试件, 置于 15~ 20 的水槽中进行融化, 时间不少于 4h, 融化完毕即为该次冻融循环结束, 取出试件放入冰箱进行下一次循环试验。本研究采用的冻融循环次数为 25 次。

经过冻融循环后,耐冻系数为

$$K_r = f_2 / f_1$$

式中:  $f_1$  为未经冻融循环的饱水试件的抗压强度(MPa);  $f_2$  为冻融循环后饱水试件的抗压强度(MPa)。

试验结果如表 9 所示。

表 9 大孔混凝土抗冻性能试验结果

抗冻指标	冻融循环前 $f_1$ /MPa	冻融循环后 $f_2$ /MPa	耐冻系数 $K_r$ /%
DK1	6.12	4.51	73.7
DK2	7.23	5.75	79.5

从表 9 可以看出,两组大孔混凝土的耐冻系数均达到 70% 以上,抗冻性能良好。

### 3 结 语

(1) 大孔混凝土用作排水基层材料,既要保证其渗透性,又要有一定的力学强度,因此较之普通混凝土有不同的配合比设计方法。

(2) 大孔混凝土较之水泥稳定和沥青稳定集料类透水材料有更高的强度及透水能力。

(3) 大孔混凝土有较小的收缩性及良好的抗冻性,因此比常用的半刚性基层材料有更好的路用性能。

### 参考文献:

- [1] Ridgeway H H. Synthesis of highway practice 96: pavement subsurface drainage system [R]. TRB,

National Research Council, Washington D. C. Nov., 1982

- [2] 林玉清 联邦德国公路排水设施规范选编[J]. 国外公路, 1990, (1): 48—52
- [3] 王煜德 有效的排水系统能延长路面寿命[J]. 国外公路, 1991, 11(4): 40—43
- [4] 钱国超 路面结构排水系统设计[J]. 国外公路, 1992, 12(1): 42—50
- [5] Hansen E C. Et field effects of water pumping beneath concrete pavement slabs [J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 1991, 117(6): 679—696
- [6] 查旭东 欧洲水泥砼路面综述[J]. 国外公路, 1999, 19(3): 16—22
- [7] (JTJ 018-97) 公路排水设计规范[S]. 1997
- [8] (JTJ 034-2000) 公路路面基层施工技术规范[S]. 2000
- [9] 中国建筑科学研究院, 混凝土研究所 混凝土实用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987
- [10] 张鹏飞 路面内部排水系统的设计与研究[D]. 上海: 同济大学, 1999
- [11] (JTJ 059-95) 公路路基路面现场测试规程[S]. 1995
- [12] (JTJ 053-94) 公路工程水泥混凝土试验规程[S]. 1994
- [13] 沙庆林 高等级道路半刚性路面[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993
- [14] (GBJ82-85) 普通混凝土长期性和耐久性能试验方法[S]. 1985

[责任编辑 孙守增]

## 上海一批重大交通项目年内建成

2003 年 2 月 8 日, 我国第一条双管双层越江隧道——上海复兴东路越江隧道完成浦东方向铺设, 开始向浦西延伸, 与建设中的大连路隧道、外环隧道形成“三龙”竞渡浦江的壮观场面, 这预示着今年上海交通建设又将是一个丰收年。

2003 年上海一批功能性、枢纽型、网络化重大交通基础设施工程将陆续竣工, 其中, 磁悬浮示范工程、轨道交通一号线延伸工程、轨道交通五号线将投入试运营, 全市交通五号线将投入试运营, 全市交通运行线路将达到 125 km。同时, 续建和新开工高速公路 257 km。新建的外环隧道、大连路隧道、卢浦大桥将正式通车。另外, 还将建成沪闵路高架二期、大连路拓宽等一批重大交通项目。