

# 低塑性多孔水泥混凝土基层配合比设计

杨群<sup>1</sup>, 温学钧<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092)

**摘要:** 针对城市道路排水基层水泥混凝土施工的特殊要求, 掺加粉煤灰、高效减水剂等配制具有高流动性的多孔水泥混凝土. 提出低塑性多孔水泥混凝土的设计强度标准和建议级配, 并对室内试件的成型方法进行探讨. 在多孔水泥混凝土的组成设计中考虑了粉煤灰掺量、高效减水剂掺量和水灰比等多个因素, 通过室内试验, 分析了这些因素对多孔水泥混凝土坍落度、孔隙率和强度的影响规律. 在此基础上, 根据建议的配合比设计标准, 提出低塑性多孔水泥混凝土的组成.

**关键词:** 道路基层; 低塑性; 坍落度; 多孔混凝土; 配合比  
**中图分类号:** U 416.217 **文献标识码:** A

## Mixture Design of Plastic Porous Cement Concrete for Urban Highway Base

YANG Qun<sup>1</sup>, WEN Xuejun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;  
2. Institute of Municipal Design and Research in Shanghai, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Low-plastic porous cement concrete, a high-fluid porous cement concrete, is developed for special requirements of base construction in urban highway. The paper presents the strength standard of design and suggested gradation for the low-plastic porous cement concrete, and also a discussion of the molding method of sample in the laboratory. When designing the low-plastic porous cement concrete, many factors should be considered such as fly ash addition, efficient water reducing agent addition and water-cement ratio and so on. An analysis is made of the effect of these factors on the slump, void and strength of low-plastic porous cement concrete. Based on the research, the component of low-plastic porous cement concrete is proposed.

**Key words:** highway base; low-plastic; slump; porous cement concrete; mixing proportion

普通的多孔混凝土非常干硬, 几乎没有坍落度. 施工中一般需要摊铺机来摊铺, 须采用大吨位的振动压路机振动碾压成型, 以达到施工中拌合和摊铺的质量要求. 对于路面基层下敷设有地下管线的城市道路, 大吨位的振动压路机的使用常常受到限制, 此时就需要降低混合料的塑性级别, 提高流动性, 以便能够以商品混凝土的方式拌合运输, 降低摊铺难度. 根据这个需要设计的多孔水泥混凝土, 即为低塑性混凝土<sup>[1-2]</sup>. 它不需要通过大功率振动压路机就可以进行压实, 从而更好地满足城市道路的建设要求.

## 1 配合比设计要素

### 1.1 强度标准

多孔混凝土作为沥青路面的路面基层时, 均以弯拉强度作为其设计指标. 但弯拉强度试件成型比较麻烦, 相对而言抗压强度试验则操作简单. 大量试验结果已表明, 混凝土弯拉强度与抗压强度之间存在良好的相关关系, 根据已有的试验数据, 抗压强度和试件的抗折强度之比均在 7.0~10.0. 选择典型的沥青路面结构和结构模量参数, 假定设计交通量为 5 000 万次标准轴载, 则经过计算可得其疲劳抗折强度不超过 0.5 MPa, 以 10 倍计算, 抗压强度不超过 5 MPa. 参考国内外有关基层的抗压强度标准, 可以将多孔水泥混凝土的抗压强度标准定为 5 MPa. 该数值要高于目前高等级公路基层的强度要求.

### 1.2 坍落度标准

混凝土根据其坍落度的不同进行塑性分类, 坍落度小于 10 mm, 为特干硬和很干稠混凝土; 坍落度介于 10~40 mm, 为干稠混凝土; 坍落度介于 50~90

mm,为低塑性混凝土;坍落度介于100~1500 mm,为塑性混凝土.过大的坍落度极易造成集料和水泥的分离,难以形成均匀、稳定的板体.结合商品混凝土对坍落度的要求,采用坍落度控制指标在50~90 mm之间,即要求多孔混凝土为低塑性<sup>[3]</sup>.

### 1.3 孔隙率标准

排水规范建议排水材料的渗透系数不得小于 $0.35 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,才能保证水的排除顺畅.为了使得水泥混凝土能够顺利排水,根据研究,其孔隙率在15%~25%可以满足要求.

### 1.4 成型方法的确定

采用振动方法成型可以模拟现场实际插捣的成型状态,应优先采用.对于低塑性多孔混凝土,由于掺加了粉煤灰和高效减水剂,水泥浆体处于流动状态<sup>[4-6]</sup>.当采用振动方法成型时,则水泥浆体由于振动作用会流入底层,使得试件的强度降低.如果其厚度控制在一定范围,则分层不会对排水层的排水能力造成影响.同时由于下层的密实作用,可以阻止水分下渗.室内确定采用振动台成型方法,振动时间30 s,同时表面配重5 kg.

### 1.5 级配的确定

集料公称最大粒径的选用应综合考虑材料强度、渗透性能、结构层厚度、施工工艺等因素.目前,国内对于排水基层混合料中集料公称最大粒径的取值主要为26.5 mm和19.0 mm,针对现场施工来说,集料的最大粒径越粗,离析也就越大;因此,集料公称最大粒径可以采用19.0 mm.参照现有研究项目经验和规定的要求并作适当的调整,集料级配选用如表1所示的级配范围.

表1 水泥排水基层混合料级配范围

方孔筛/mm	26.5	19.0	16.0	13.2
通过量/%	100	80~95	60~80	40~60
方孔筛/mm	9.5	4.75	2.36	0.075
通过量/%	20~35	0~10	0~5	0~2

## 2 技术指标变化规律

### 2.1 考虑的因素水平

研究了粉煤灰的掺量、水灰比和高效减水剂对塑性多孔水泥混凝土坍落度以及其他指标的影响规律,从中寻求各设计变量的合理范围.设计了如表2

所示的几种组合,每种组合做了3个平行试件,取其平均值.粉煤灰的掺量考虑了0,5%,10%,15%,20%;水灰质量比(以下简称水灰比)考虑了0.60,0.50,0.45,0.42,0.40;高效减水剂考虑了2%,3%.

### 2.2 试验结果

坍落度试验结果如表2所示.

表2 坍落度试验结果  
Tab.2 Test results of slump

编号	粉煤灰/%	水灰比	高效减水剂/%	坍落度/cm
1	20	0.50	2	17.0
2	20	0.60	2	17.9
3	20	0.40	2	8.3
4	15	0.50	2	16.3
5	10	0.42	2	11.8
6	15	0.45	2	14.8
7	10	0.45	3	15.2
8	5	0.41	2	6.8

根据表2的测试结果,选择了2种集灰比(集料和水泥的质量比)和3种接近的水灰比进行孔隙率和强度的测试,孔隙率和强度的测试结果如表3所示.

表3 孔隙率和抗压强度试验结果  
Tab.3 Test results of void and strength

编号	集灰比	粉煤灰掺量/%	水灰比	减水剂掺量/%	孔隙率/%	抗压强度/MPa
1	85:15	5	0.43	1.5	23.3	6.04
2	85:15	5	0.41	1.5	21.5	8.86
3	85:15	5	0.39	1.5	20.0	7.93
4	85:15	0	0.41	1.5	21.1	4.89
5	85:15	5	0.41	1.5	20.4	7.28
6	85:15	10	0.41	1.5	20.1	5.86
7	90:10	10	0.39	1.5	22.1	6.52
8	90:10	10	0.41	1.5	21.8	5.18
9	90:10	10	0.43	1.5	22.6	5.71
10	90:10	5	0.39	2.0	21.6	5.13
11	90:10	5	0.41	2.0	21.8	5.23

### 2.3 坍落度结果分析

从表2中可初步分析各个因素对多孔水泥混凝土坍落度的影响规律,归纳为以下几点.

#### 2.3.1 水灰比的影响

从编号为1,2和3的试验结果可以看出,随着水灰比的增加,起初坍落度有较大幅度的增加;但当水灰比增加到0.5时,再增加水灰比坍落度虽然有所增加,但增加的幅度降低.这说明,水灰比对多孔水泥混凝土坍落度的影响很大,必须重点考虑.同时水灰比在较高水平对坍落度影响降低的原因,是因为当用水量增加到一定程度以后,此时集料的骨架

结构在发挥作用,限制了混凝土的坍落度进一步增长的趋势.

### 2.3.2 粉煤灰用量的影响

比较表中编号为3,5,8的试验结果可以看出,虽然粉煤灰用量的增加可以增加多孔水泥混凝土的坍落度值,但其影响并不显著;与水灰比相比,少量的水灰比变化就可以导致坍落度的增加.如编号3粉煤灰用量20%,但水灰比只有0.40,此时的坍落度值为8.3 cm;而编号5粉煤灰用量只有10%,但水灰比取值为0.42,此时的坍落度达到11.8 cm.因此,粉煤灰虽然可以改善多孔水泥混凝土的坍落度,但对于这种骨架嵌挤结构的混凝土,其改善坍落度的作用并不明显.

### 2.3.3 高效减水剂的影响

比较编号6和编号7的数据可以看出,编号6的粉煤灰用量15%、减水剂用量2%,其坍落度14.8 mm小于编号7粉煤灰用量10%、减水剂用量3%时的坍落度15.2 cm,但相差并不大.因此,1%的减水剂的用量其影响要稍微大于5%的粉煤灰的掺量,其对坍落度的影响还是比较显著的.

## 2.4 孔隙率

混合料孔隙是指混合料总体积去除固体骨架体积后的剩余体积,此剩余体积占混合料总体积的百分比即为混合料的孔隙率.试验结果如表3所示.

### 2.4.1 集灰比

比较表3中编号6和编号8的数据,在其他配比相同的情况下,集灰比为85:15时,孔隙率为20.1%;而集灰比为90:10时,孔隙率为21.8%.同样比较编号3和编号10,集灰比为85:15时,孔隙率为20.0%;集灰比为90:10时,孔隙率为21.6%.因此,随着集灰比的增加,即多孔混凝土中集料的比例增加以后,孔隙率也同样增大.这类似于在混凝土中含有较少细料的情况.

### 2.4.2 水灰比

将编号1,2,3的数据绘成图1.从图1可以看出,随着水灰比的增加,孔隙率也在增加,并且两者基本呈现线性关系.

### 2.4.3 粉煤灰掺量

将编号4,5,6的数据绘成图2.从图2可以看出,随着粉煤灰掺量的增加,孔隙率逐步减小.

从孔隙率试验结果可看出,级配确定以后,孔隙率的变化已经不大.结合以往的研究,对多孔水泥混凝土的孔隙率影响程度的大小依次为:级配、集灰比、水灰比和粉煤灰掺量.

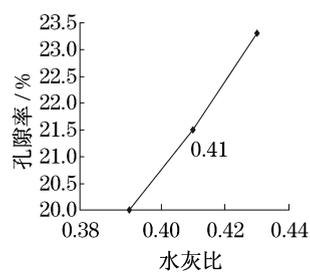


图1 水灰比和孔隙率的关系

Fig.1 Relationship of water-cement ratio and void

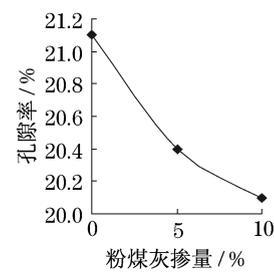


图2 粉煤灰掺量和孔隙率的关系

Fig.2 Relationship of fly ash addition and void

## 2.5 强度

强度的测试结果见表3.可以看出,7 d 无侧限抗压强度与集灰比、粉煤灰掺量以及水灰比等都有密切的关系,并且不同的变量之间是互相影响的,呈现出复杂的规律.

### 2.5.1 集灰比的影响

将编号1—6的结果与编号7—11的7 d 抗压强度的数据进行简单比较可以看出,集灰比越大,也就是水泥用量越少,其强度就越低.集灰比为85:15的多孔水泥混凝土其7 d 抗压强度的平均值为6.81 MPa,而集灰比为90:10的多孔水泥混凝土其7 d 抗压强度的平均值为5.55 MPa.

### 2.5.2 粉煤灰掺量的影响

将编号4,5,6的不同粉煤灰掺量和强度的数据绘成图3.可以看出,随着粉煤灰掺量的增加,抗压强度开始是增加的,但是当粉煤灰掺量超过5%以后,抗压强度将逐步降低.所以,为了保证多孔水泥混凝土的强度满足要求,需要控制粉煤灰的掺量,不宜过多.

### 2.5.3 水灰比的影响

将编号1,2,3的不同水灰比与抗压强度的数据绘成图4.从图中可以看出,随着水灰比的增加,抗压强度也在提高;但当水灰比超过0.41后,随着水灰比的增加,抗压强度逐渐降低.因此,存在一个最佳的水灰比含量,使得强度等级最高,在设计中应小心确定水灰比的含量.当然寻找最佳水灰比的重点不是追求最大强度,而是追求良好的施工和易性和良好的裹附性.

## 2.6 强度与孔隙率的关系分析

图5是强度和孔隙率的关系.从图中的趋势线可以看出,随着孔隙率的增加,强度具有逐渐降低的趋势.当然由于其他多种因素的影响,两者间的关系

离散性较大.

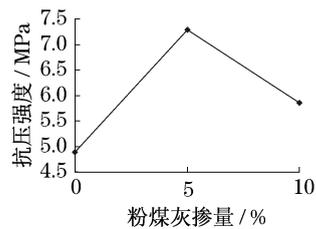


图3 粉煤灰对抗压强度的影响  
Fig.3 Effect of fly ash on the compressed strength

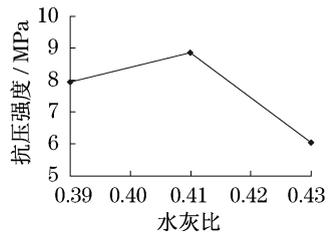


图4 水灰比与抗压强度的关系  
Fig.4 Relationship of water-cement ratio and strength

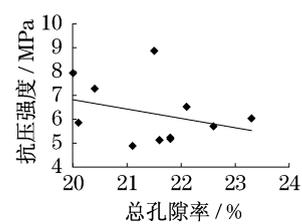


图5 孔隙率和强度的关系  
Fig.5 Relationship of void and strength

## 2.7 推荐的材料组成

根据上面的试验分析,推荐 1 m<sup>3</sup> 的低塑性多孔混凝土的材料组成:碎石 1 845 kg,水泥 195 kg,粉煤灰 14 kg,水 86 kg,高效减水剂 4.2 kg.其中,水灰比建议为 0.41,碎石量为 90%,粉煤灰替代 5% 水泥,代用率 1.4.

## 3 低塑性多孔混凝土的疲劳性能

采用频率 5 Hz 的正弦波进行加载,在 MTS 810 上进行三分点疲劳试验,选择了 3 个应力水平,测试结果见表 4.

表 4 疲劳测试结果  
Tab.4 Results of fatigue tests

应力水平	疲劳作用次数/次
0.85	109
0.75	2 391
0.65	55 983

采用数据回归后的疲劳方程如下:

$$\lg S = 0.022 1 - 0.044 1 \lg N \quad (1)$$

式中:  $S$  为应力水平;  $N$  为疲劳作用次数.

根据已有的研究,一般的水泥稳定粒料的疲劳方程为

$$\lg S = 0.119 5 - 0.065 8 \lg N \quad (2)$$

对比方程(1)和(2)可看出,多孔混凝土的疲劳方程系数较小,说明对应力比较敏感,在路面较低的应力水平下,其疲劳寿命可以超过一般的水泥稳定粒料基层,可以满足路面的使用要求.

## 4 结论

(1) 塑性多孔混凝土可以采用静压法或者较小振动频率的振动压实,在室内建议采用振动台方式

进行试件成型.

(2) 通过室内试验,发现 1% 的减水剂的用量其影响要稍微大于 5% 的粉煤灰的掺量,其对坍落度的影响比较显著.水灰比对坍落度的影响最为显著.

(3) 对多孔混凝土孔隙率影响程度从大到小依次为:级配、集灰比、水灰比和粉煤灰掺量.

(4) 多孔混凝土在于解决好强度和和易性之间的矛盾,必须在混合料各组成之间寻求一种平衡.

## 参考文献:

- [1] 李志强,何威,刘新爱,等.商品混凝土路面面层施工工艺[J].建筑技术开发,2005(4):57.  
LI Zhiqiang, HE Wei, LIU Xin'ai. Commercial concrete pavement construction [J]. Building Technology and Development, 2005 (4): 57.
- [2] 张春雷,冯圣清.上海地区普通商品混凝土配制中的若干问题[J].建筑材料学报,2006(6):337.  
ZHANG Chunlei, FENG Shengqing. Some aspects about the production of the common commercial concrete in Shanghai district [J]. Journal of Building Materials, 2006 (6): 337.
- [3] 郭飞鸿,王军.混凝土高性能化技术在商品混凝土应用中存在的问题及对策[J].商品混凝土,2004(1):30.  
GUO Feihong, WANG Jun. The issues and countermeasures of high performance concrete on the commercial concrete application [J]. Commercial Concrete, 2004 (1): 30.
- [4] 周新良.超细粉煤灰在高性能混凝土中的应用[J].粉煤灰综合利用,2003(4):25.  
ZHOU Xinliang. The application of super fine fly-ash in high performance concrete [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2003 (4): 25.
- [5] 蔡路,陈太林,陈磊,等.高效减水剂作用机理研究综述[J].上海建材,2005(6):21.  
CAI Lu, CHEN Tailin, CHEN Lei, et al. Review of superplasticizer mechanism [J]. Shanghai Building Materials, 2005 (6): 21.
- [6] 王川,杨长辉.矿渣和粉煤灰对混凝土塑性收缩裂缝的影响[J].混凝土,2002(11):45.  
WANG Chuan, YANG Changhui. Effects of blastfurnace slag and fly ash on plastic shrinkage cracking of concrete [J]. Concrete, 2002 (11): 45.