

文章编号:1671-6833(2012)05-0057-04

# 高性能轻集料混凝土力学性能和最佳配比研究

刘 丹

(上海核工程研究设计院,上海 200233)

**摘 要:**在查阅国内外高性能轻集料混凝土技术文献的基础上,对合理地选择页岩陶粒、普通硅酸盐水泥等5种主要成分,用PP纤维、聚合物乳液等4种性能提升剂作为高性能轻集料混凝土的原料,通过改变PP纤维等4种提升剂的配比,经试验分析获得了轻集料混凝土抗压强度的影响因素,并通过正交试验的方法,对这4种提升剂的配比进行了优化试验分析,最终得出这种高性能轻集料混凝土组成材料的最佳配比。

**关键词:**高性能轻集料;混凝土;正交试验;最佳配比

**中图分类号:** TU55+1.1

**文献标志码:** A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.05.013

## 0 引言

近年来,随着我国基础设施建设的快速发展,混凝土材料的用量在持续增加,巨大的碎石开采量对自然环境造成了严重的破坏.与此同时,粉煤灰(尤其劣质粉煤灰)的利用率较低,城市污泥和淤泥至今未得到妥善处置,造成环境污染.用轻集料替代天然碎石集料,不仅能使粉煤灰与淤泥得到有效的利用,而且对于节约资源、能源,保护环境,实现建材行业的可持续发展具有十分重要的意义<sup>[1]</sup>.加上一些高层、大跨度、柔性地基,海洋工程等领域对混凝土材料高强度的要求,高性能轻集料混凝土技术已成为近几年来新的研究热点.

在高性能集料方面国外起步较早.欧洲采用最多的集料是膨胀黏土,这种集料密度较小,轻量化较高,但是吸水率很大;日本主要采用珍珠岩、膨润土作为原料,其吸水性较小,多用于桥梁建设;美国多采用膨胀黏土和贝岩类轻集料,其强度较高<sup>[2]</sup>.我国在轻集料方面多采用地方资源(贝岩、膨胀珍珠岩)和工业废料(粉煤灰),这种轻集料具有很好的保温隔热性能和耐火特性,但是由于轻集料的表观密度小、吸水率大、孔隙率大,往往使新拌合的轻集料混凝土发生离析,大大降低了其工作性能及抗压强度和抗折强度.所以对轻集料混凝土力学性能的影响因素进行分析,合理地选择集料并选择添加适量的掺和料于拌合料对

提高混凝土整体性能具有主导性的作用<sup>[3]</sup>.作者将在试验的基础上对这一问题进行研究.

## 1 轻集料混凝土材料组成和作用

轻集料混凝土是由轻粗集料、轻砂(或普通砂)、水泥和水配制而成的混凝土,其干表观密度在 $1\,950\text{ kg/m}^3$ 以下,具有轻质高强、保温隔热、耐久抗震等特点.按其轻粗集料的种类可分为天然轻集料混凝土、工业废料轻集料混凝土和人造轻集料混凝土三大类.人工轻集料主要以黏土和页岩为主要原料并经加工烧制而成.

### 1.1 高性能轻集料混凝土材料组成

作者采用的高性能轻集料混凝土材料为:普通硅酸盐水泥、陶粒、粉煤灰、砂、引气剂、纤维素醚、EPS颗粒、PP纤维、VAE聚合物乳液和水.试验采用的水泥为长春亚泰水泥厂生产的鹿鼎牌硅酸盐水泥,强度等级52.5R;陶粒采用膨胀页岩陶粒;粉煤灰采用普通电厂的工业废料,砂采用级配合格的中砂,细度模数是4.75.

### 1.2 高性能轻集料混凝土组成材料的作用

硅酸盐水泥、陶粒、砂、粉煤灰和水是构成陶粒轻集料混凝土的成分,对该混凝土的力学性能起主要的作用<sup>[4]</sup>;而EPS颗粒是一种保温绝热材料,对该混凝土的热工性能起主要的作用;PP纤维、聚合物乳液、纤维素醚是陶粒轻集料混凝土的掺和料,对该混凝土形成优良的结构起重要的作用.其中EPS颗粒参数的选择对EPS超轻混凝土

收稿日期:2012-04-20;修订日期:2011-06-20

作者简介:刘丹(1961-),女,四川阆中市人,高级工程师,主要从事建筑工程设计研究.

的结构和性能有重大的影响;如 EPS 颗粒掺量是决定 EPS 超轻混凝土容重、热工性能最为重要的参数,EPS 颗粒的粒径和级配是决定该混凝土孔隙结构,即该混凝土是否密实的重要因素<sup>[5]</sup>。

## 2 高性能轻集料混凝土力学性能试验研究

### 2.1 试模选定与制备

抗压设备采用 YE—2008D 型压力试验机;内部结构分析采用 KYKY2008B 扫描电子显微镜;抗压强度采用 100 mm × 100 mm × 100 mm 的试件,一组试件为 3 块,成型后 24 h 脱模,标准养护至 28 d 龄期时取出。

### 2.2 试验配比确定

本课题在查阅相关陶粒轻集料混凝土资料的基础上,同时为满足设计要求,确定以下几种原料的配比为:水泥:粉煤灰:陶粒:砂 = 150:20:50:20,水灰比为 0.5,而 EPS 颗粒掺量分别取 1% ~ 4% 来确定其最佳值,其他掺和料掺量则作为因素的水平变量。

### 2.3 试验流程

陶粒轻集料混凝土的试验流程是以陶粒、砂作为骨料,水泥和粉煤灰作胶凝材料,加入少量掺和料,经搅拌、浇注成型及 28 d 的标准养护。用压力试验机测试试件的抗压强度并绘制相关曲线。

#### 2.3.1 EPS 颗粒对混凝土强度的影响

本次试验以 EPS 颗粒为变量,它的掺入量分别为水泥质量的 1%、1.5%、2%、2.5%、3%、4%。其它原料的配比为水泥:陶粒:粉煤灰:砂 = 150:50:20:20 水灰比为 0.5,为使陶粒、EPS 颗粒能够更好地与水泥颗粒粘附,保证物料能均匀混合,加入聚合物乳液为水泥质量的 5%,经过 28 d 标准养护。本次试验陶粒轻集料混凝土的 28 d 抗压强度与 EPS 掺量关系由图 1 给出。由图 1 可以看出,混凝土强度随着 EPS 含量的增加而降低,当含量达到 4% 时,混凝土强度为 0,这是由于 EPS 密度低,表面亲油性好,使得它与其他材料不易融合。接下来的试验,选择曲线转折点 EPS 含量 1.5% (在 1.5% 处抗压强度为 30,可满足高性能轻集料混凝土对强度的要求)来探求其他因素对混凝土强度的影响。

#### 2.3.2 聚合物乳液对混凝土强度的影响

本次试验以聚合物乳液为变量,它的掺入量分别为水泥质量的 1%、2%、5%、7%、10%、15%。EPS 掺量为 1.5%,其它配比与 EPS 试验相

同,经过 28 d 标准养护。本次试验陶粒轻集料混凝土的 28 d 抗压强度与聚合物乳液掺量关系如图 2 所示。由图 2 可以看出,当聚合物含量超过 2% 以后,混凝土强度随着聚合物乳液浓度增加而降低,这是因为聚合物乳液会在轻骨料与水泥浆体之间的过渡区干燥成膜,改善了有机-无机物之间的界面,使二者的界面结合更加致密、牢固。但是当聚合物乳液的掺量超过一定值时,干燥膜加厚,面积扩大切断了水泥水化产物的连续性,而干燥膜的强度小于水泥水化产物的强度。

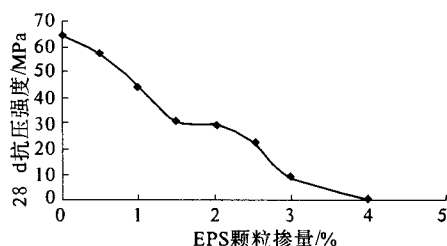


图 1 EPS 颗粒掺量与陶粒轻集料混凝土 28 d 抗压强度关系图

Fig.1 EPS particle content is with the ceramic grain of lightweight aggregate concrete compressive strength of 28 days relationship chart

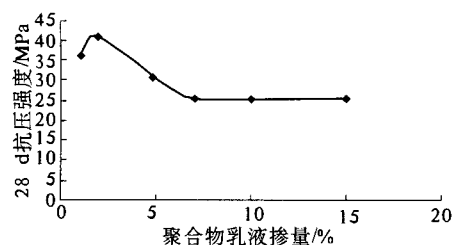


图 2 聚合物乳液掺量与陶粒轻集料混凝土 28 d 抗压强度关系图

Fig.2 Polymer emulsion mixed quantity with the ceramic grain of lightweight aggregate concrete compressive strength of 28 days relationship chart

#### 2.3.3 PP 纤维对混凝土强度的影响

本次试验以 PP 纤维为变量,它的掺入量分别为水泥质量的 1‰、1.5‰、2‰、3‰、4‰。其它原料的配比与聚合物乳液试验相同,经过 28 d 标准养护。本次试验陶粒轻集料混凝土的 28 d 抗压强度与 PP 纤维掺量关系如图 3 所示。由图 3 可以看出,当其均掺量为 3‰ 时,抗压强度为最大值,当 PP 纤维掺量超过 3‰ 后,抗压强度有所下降。

#### 2.3.4 纤维素醚对混凝土强度影响

本次试验以纤维素醚为变量,它的掺入量分别为水泥质量的 3‰、5‰、7‰、9‰、15‰。其它原料的配比与聚合物乳液实验相同,经过 28 d 标准

养护. 本次试验陶粒轻集料混凝土的 28 d 抗压强度与纤维素醚掺量关系如图 4 所示. 由图 4 可以看出, 当纤维素醚掺量超过 9‰ 后, 抗压强度有所下降, 这是因为纤维素醚是一种水溶性高分子材料, 在保持一定的流动状态下, 它的保水性可使水泥充分水化, 因而增加了混凝土的强度; 当掺量超过一定值时, 纤维素醚对陶粒轻集料混凝土的增稠作用占了主导因素, 增加了该混凝土的水灰比, 从而使其抗压强度开始下降.

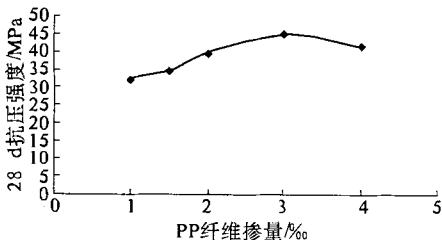


图 3 PP 纤维掺量与陶粒轻集料混凝土 28 d 抗压强度关系图

Fig. 3 PP fiber contents with the ceramic grain of lightweight aggregate concrete compressive strength of 28 days relationship chart

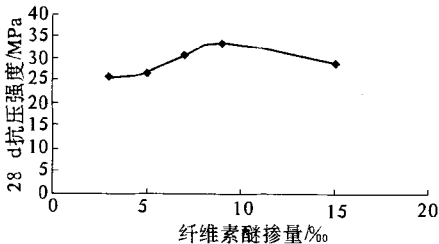


图 4 纤维素醚掺量与陶粒轻集料混凝土 28 d 抗压强度关系图

Fig. 4 Cellulose ether mixed quantity with the ceramic grain of lightweight aggregate concrete compressive strength of 28 days relationship chart

2.3.5 引气剂对混凝土强度影响

本次试验以引气剂为变量, 它的掺入量分别为水泥质量的 2‰、5‰、10‰、15‰、20‰. 其它原料的配比与聚合物乳液试验相同, 经过 28 d 标准养护. 本次试验陶粒轻集料混凝土的 28 d 抗压强度与引气剂掺量关系如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 当其均掺量为 10‰ 时, 抗压强度为最大值, 当掺量超过 10‰ 后强度开始下降. 引气剂可在陶粒轻集料混凝土中引入均匀封闭的小气泡, 微小气泡起到类似滚珠的润滑作用, 能提高混凝土的流动性, 同时使其孔径分布发生变化, 大孔明显减少. 引气剂将增加水泥浆基体的孔隙率, 而使混凝土的总体孔隙率基本不变, 轻集料混凝土的力学性能和耐久性能得以提高. 但是当掺量超过一定

值时, 引气剂会引入过量气泡, 当气泡含量过高或粒径过大时, 会导致混凝土内部大气泡增多, 孔隙率增大, 孔洞增多, 结构疏松, 从而使强度降低.

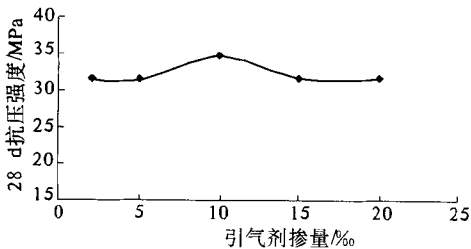


图 5 引气剂掺量与陶粒轻集料混凝土 28 d 抗压强度关系图

Fig. 5 Air-entraining agent content is with the ceramic grain of lightweight aggregate concrete compressive strength of 28 days relationship chart

3 正交试验分析

正交设计试验的目的是为了减少试验次数来分析聚合物乳液、PP 纤维、纤维素醚、引气剂的掺量对陶粒轻集料混凝土力学性能的影响, 因此把聚合物乳液、PP 纤维、纤维素醚、引气剂定为 4 个因素. 按照前期的试验确定配比为: 水泥: 陶粒: 粉煤灰: 砂 = 150: 50: 20: 20, 水灰比为 0.5, 比对试验要求确定 EPS 颗粒掺量为 1.5‰. 本实验用  $L_9(3^4)$  正交表设计, 各因素水平确定如下表 1.

表 1 因素水平表				
Tab. 1 Factors level table				
‰				
水平	因素			
	乳液	PP 纤维	纤维素醚	引气剂
1	2	0.5	3	5
2	5	1	5	10
3	7	1.5	7	15

本试验以 28 d 抗压强度为考核指标, 由正交设计结果及极差分析表 2 知, PP 纤维用量的极差最大, 即这个因素对该混凝土强度的影响要比其它因素都大. 其次是纤维素醚的用量, 极差最小的是聚合物乳液的用量. 实现最大抗压强度值 27.36 MPa 的组合为 A1B2C2D1, 即乳液 (2‰)、PP 纤维 (1‰)、纤维素醚 (5‰)、引气剂 (5‰), 但考虑聚合物乳液对混凝土的和易性以及改善集料上浮与界面间的结合有很大影响; PP 纤维能有效增强材料介质连续性, 可稍微增大这两者的掺量. 所以最佳的配比为聚合物乳液、PP 纤维、纤维素醚、引气剂用量分别是水泥质量的 5‰、1.5‰、5‰、5‰.

表 2  $L_9(3^4)$  试验方案与极差的计算结果

Tab.2 Then $L_9(3^4)$ test plan and very bad results					
试验号	1(A) 聚合物乳液	2(B) PP 纤维	3(C) 纤维素醚	4(D) 引气剂	28 d 抗压强度/MPa
1	1	1	3	2	21.93
2	2	1	1	1	22.98
3	3	1	2	3	22.57
4	1	2	2	1	27.86
5	2	2	3	3	25.06
6	3	2	1	2	25.45
7	1	3	1	3	24.70
8	2	3	2	2	25.64
9	3	3	3	1	24.37
$k_1$	75.99	67.48	73.13	74.17	
$k_2$	73.68	77.87	75.57	73.02	
$k_3$	72.39	74.71	71.06	72.33	
$k_1$ 平均	24.67	22.49	24.37	24.90	
$k_2$ 平均	24.56	25.96	25.19	24.34	
$k_3$ 平均	24.13	24.90	23.79	24.11	
R 平均	0.54	3.47	1.40	0.79	

4 结论

(1)作者在查阅国内外高性能轻集料混凝土技术文献的基础上,对合理的选择页岩陶粒、硝酸盐水泥等 5 种主要成分,用 PP 纤维、聚合物胶乳

等 4 种性能提升剂作为高性能轻集料混凝土的原料,通过改变这 4 种提升剂的配比,经试验分析获得了轻集料混凝土抗压强度的影响因素.

(2)通过正交试验方法,对这 4 种提升剂的配比进行了优化试验分析.

最终得出,28 d 抗压强度值为 27.36 MPa 的高性能轻集料混凝土组成材料中,提升剂掺和料掺量的最佳配比为:聚合物乳液、PP 纤维、纤维素醚、引气剂用量分别是水泥质量的 5%、1.5‰、5‰、5‰.

参考文献:

[1] 周杰,安风华,凌天清. 轻集料混凝土的研究与应用现状分析[J]. 山西建筑,2006(13):137-138.

[2] DUCMAN V, MLADENOVIC A, SUPUT J S. Light-weight aggregate based on waste glass and its alkalisia reactivity[J]. Cement and Concrete Research ,2002, 14(2):116-121.

[3] 张勇.不同纤维对轻骨料混凝土韧性性能的研究[J]. 混凝土,2002(5):30-32.

[4] WEH J, CHRISTIAN M, STEPHEN B. “Glascrete” 2 Concrete with glass aggregate[J]. Acl Materials Journal, 2000,97(2):208-213.

[5] 姜德民,杜明军,潘大林,等. 提高 EPS 轻骨料混凝土强度的研究[J]. 建筑技术,2009,40(1):27-29.

Study on Mechanical Properties and Optimal Ratio of High-performance Lightweight Aggregate Concrete

LIU Dan

(Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute,Shanghai 200233,China)

**Abstract:** Based on consulting high performance at home and abroad and lightweight aggregate concrete technical literature, and on the basis of reasonable selection shale taoli, ordinary Portland cement comprising five kinds of main ingredients, PP fiber, polymer emulsion four performance improved agent as a high performance of lightweight aggregate concrete material, through PP fiber change four ascension agent ratio, test obtained in the analysis of lightweight aggregate the influencing factors of compressive strength.

**Key words:** high performance of lightweight aggregate; concrete; orthogonal test; optimal proportion