

基于正交试验方法的装配式小型水工建筑物 混凝土配合比研究

刘建刚¹, 张礼华²

(1.常州市武进区水利局,江苏 武进 213100; 2.扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009)

摘 要:从小型装配式水工建筑物混凝土要求出发,在传统混凝土建筑材料基础上,加入粉煤灰、硅粉、耐碱玻璃纤维等外掺剂,利用正交试验方法,以粉煤灰、硅粉、耐碱玻璃纤维为试验因素、不同掺量为试验水平,构造 $L_9(3^4)$ 型正交表,寻求不同外掺剂配合比条件下混凝土 28 d 强度和容重,达到轻质高强的目的。由试验结果分析可知,上述外掺剂最优配合比为粉煤灰掺量 20%、硅粉 9%、耐碱玻璃纤维 1% 时,混凝土强度 30.5 MPa,容重 2 015 kg/m³; 并通过对比试验,确认结果达到设计要求。上述试验结果可为小型水工装配式建筑物实践提供借鉴。

关键词:混凝土;粉煤灰;硅粉;耐碱玻璃纤维;配合比

中图分类号: TV6;TV431

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)03-0167-03

1 问题的提出

小型装配式建筑物由于具有施工简、工期短、资金少等方面的优点,近年来在小型水利工程中得到越来越多的应用。但同时,由于小型水工建筑物面广量大,且一般地处偏远,交通不便,而采用传统混凝土预制构件存在笨重,运输、安装不便等问题,依然在一定程度上制约了小型装配式水工建筑物的推广。因此,如何寻找一种强度满足要求条件下,兼具质量较轻特性的混凝土预制构件材料,已成为下一步水利发展的紧迫问题之一。

正交试验方法由于具有“均衡搭配”和“综合可比性”的特点^[1],多年来得到了极为广泛的应用。材料方面,由于玻璃纤维混凝土具有强度高、韧性大、抗冲击性强等特点,在隧道、道路、房屋等领域得到较为广泛的应用,但目前针对该种材料混凝土的研究主要集中在抗拉、抗剪等力学性能等方面的研究^[2-8],尚少见到该建筑物应用于水工建筑物中,且同时满足轻质、高强的目的。现拟根据装配式小型水工建筑物的要求,结合常规混凝土外掺剂粉煤灰、硅粉,利用正交设计方法,开发出一种适宜配合比的玻璃纤维混凝土,与传统混凝土相比,满足轻质、高强的要求,以期小型装配式水工建筑物的发展和推广提

供助力。

2 试验设计

2.1 试验目的

一般情况下,小型水工建筑物混凝土强度达到 C25 即可满足使用要求,特殊情况下需达到 C30 以上。该项试验以 C25 为控制指标,在传统混凝土建筑材料的基础上,通过掺加适宜的耐碱玻璃纤维等外掺剂,使之与传统混凝土相比,在满足强度要求的前提下,容重降低 10% 以上,达到轻质高强的要求。

2.2 材料选取

该项试验选用材料除包括传统的混凝土材料外,主要有水泥、黄砂、石子等,还包括外掺剂粉煤灰、硅粉、耐碱玻璃纤维。

试验用水泥采用南京海螺水泥有限公司生产的海螺牌 P·042.5 级普通硅酸盐水泥,其比表面积 ≤ 300 ,总碱含量 ≤ 0.6 ,28 d 抗压强度 ≥ 42.5 。选用常州 II 级粉煤灰,其主要性能为 SiO₂ 含量 49.5%。硅粉购自常州航艇,其特性为 SiO₃ 含量 0.41%,CaO 含量 0.59%。耐碱玻璃纤维产自河南永兴,密度 2 700 g/cm³,长度 16 mm,抗拉强度 1 900 MPa。

对采用不同产地的产品,构成材料各项性能可能不完全一致。

2.3 配合比设计

为减少试验次数,规划采用正交试验方法,探寻不同外掺剂掺量对混凝土性能的影响。在前人研究的

收稿日期: 2020-09-23

基金项目: 江苏省水利科技项目(2019037)

作者简介: 刘建刚(1972—),男,大专,工程师,从事农业水利工程规划与管理工作。

基础上,确定此次试验粉煤灰掺量分别为10%、20%、30%,硅粉掺量分别设定为3%、6%、9%,玻璃纤维掺量分别设定为1%、2%、3%。由此,构造 $L_9(3^4)$ 型正交表,其因素及水平见表1所列。

表1 因素与水平一览表

水平	因素		
	粉煤灰(A)	硅粉(B)	耐碱玻璃纤维(C)
1	10%	3%	1%
2	20%	6%	2%
3	30%	9%	3%

根据上述因素和水平,可构造正交试验设计,见表2列(1)~列(4)。

表2 正交表设计一览表

试验方案	粉煤灰(A)	硅粉(B)	耐碱玻璃纤维(C)	容重/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	强度/MPa
列(1)	列(2)	列(3)	列(4)	列(5)	列(6)
$A_1B_1C_1$	1(10%)	1(3%)	1(1%)	28.0	2 180
$A_1B_2C_2$	1(10%)	2(6%)	2(2%)	26.6	2 110
$A_1B_3C_3$	1(10%)	3(9%)	3(3%)	27.8	2 010
$A_2B_1C_2$	2(20%)	1(3%)	2(2%)	28.2	2 000
$A_2B_2C_3$	2(20%)	2(6%)	3(3%)	25.9	1 930
$A_2B_3C_1$	2(20%)	3(9%)	1(1%)	30.5	2 015
$A_3B_1C_3$	3(30%)	1(3%)	3(3%)	26.1	1 780
$A_3B_2C_1$	3(30%)	2(6%)	1(1%)	27.5	1 900
$A_3B_3C_2$	3(30%)	3(9%)	2(2%)	27.9	1 850

根据上述正交表,制作混凝土试块,试块规格 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,每组试验制作三块,总计27块,在恒温恒氧养护室中养护至28 d龄期,测取每一试块容重后,再进行破坏荷载试验,试验室中取每一组试块的平均值作为该配合比条件下的试块容重和强度。

同时,试验室中按水泥:砂:碎石:水=1:1.48:3.63:0.44的比例,制备普通混凝土,在同样条件下养护,以作对比分析。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

对实验室试制的每一组试块测算容重,并采用破坏荷载试验确定其强度,容重和强度平均结果见表2列(5)~列(6)。由结果可知,每一组试块强度均能满足C25强度要求。

3.2 结果分析

3.2.1 极差分析

3.2.1.1 极差分析

进行极差分析的主要目的是:由于粉煤灰、硅

粉、耐碱玻璃纤维均对混凝土强度和容重产生影响,通过极差分析,找出影响上述指标的主要因素和次要因素;同时,分析粉煤灰、硅粉、耐碱玻璃纤维处于什么水平时,使混凝土达到轻质高强的目的。极差分析见表3所列。

表3 极差分析表

序号	试验方案	粉煤灰(A)	硅粉(B)	耐碱玻璃纤维(C)	强度/MPa	容重/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	$A_1B_1C_1$	1(10%)	1(3%)	1(1%)	28.0	2 180
2	$A_1B_2C_2$	1(10%)	2(6%)	2(2%)	26.6	2 110
3	$A_1B_3C_3$	1(10%)	3(9%)	3(3%)	27.8	2 010
4	$A_2B_1C_2$	2(20%)	1(3%)	2(2%)	28.2	2 000
5	$A_2B_2C_3$	2(20%)	2(6%)	3(3%)	25.9	1 930
6	$A_2B_3C_1$	2(20%)	3(9%)	1(1%)	30.5	2 015
7	$A_3B_1C_3$	3(30%)	1(3%)	3(3%)	26.1	1 780
8	$A_3B_2C_1$	3(30%)	2(6%)	1(1%)	27.5	1 900
9	$A_3B_3C_2$	3(30%)	3(9%)	2(2%)	27.9	1 850
强度	K_1	82.4	82.3	86	$\Sigma=248.5$	
	K_2	84.6	80	82.7		
	K_3	81.5	86.2	79.8		
	K_1^*	27.5	27.4	28.7		
	K_2^*	28.2	26.7	27.6		
	K_3^*	27.2	28.7	26.6		
	R	1.0	1.3	2.1		
	K_1	6 300	5 960	6 095		
	K_2	5 945	5 940	5 960		
容重	K_3	5 530	5 875	5 720	$\Sigma=17 775$	
	K_1^*	2 100	1 987	2 032		
	K_2^*	1 982	1 980	1 987		
	K_3^*	1 843	1 958	1 907		
	R	257	28	125		

根据极差分析结果,试件强度-因素变化、试件容重-因素变化趋势见图1、图2所示。

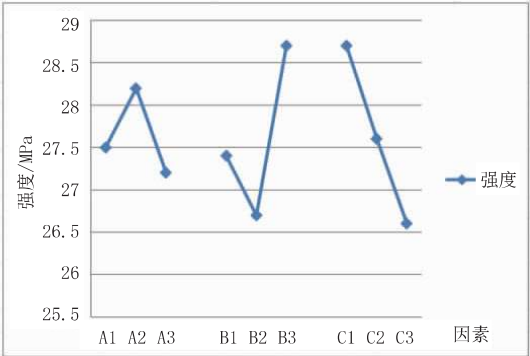


图1 试件强度-因素趋势图

对试件强度-因素和试件容重-因素关系曲线进行分析可知:

(1)随着A因素(粉煤灰)掺量的不断加大,混凝土强度呈现先增加后减小的现象,强度由水平1

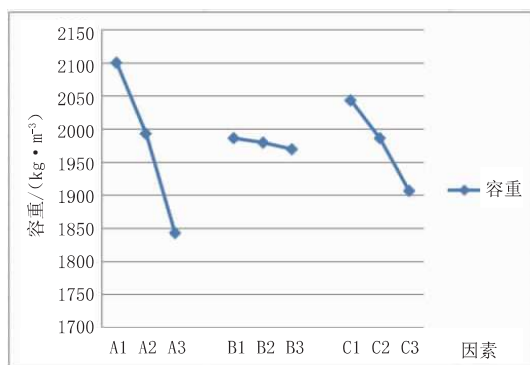


图2 试件容重-因素趋势图

(10%)提升至水平2(20%)时,相应强度提升2.5%,掺量进一步提升至水平3(30%)时,相应强度降低3.5%;但同时,其容重则随掺量的不断提升呈现不断降低的趋势,当掺量由水平1(10%)经水平2(20%)提升至水平3(30%)时,容重分别降低6.0%、7.0%。由于粉煤灰是用来代替水泥的,粉煤灰掺量的不断增大,对保证混凝土强度不利。

(2)随着B因素(硅粉)掺量的不断加大,混凝土试件强度呈现先减小后增加的趋势,当掺量由水平1(3%)经水平2(6%)提升至水平3(9%)时,强度先降低2.6%、再提升7.5%;而容重则呈现不断降低的趋势,当掺量由水平1(3%)经水平2(6%)至水平3(9%)时,容重分别降低7%、22%。说明随硅粉掺量的不断加大,对强度的增加是有利的,且不低于2%。

(3)随着C因素(耐碱玻璃纤维)掺量的不断增大,强度和容重均随之减少,当掺量由水平1(3%)经水平2(6%)至水平3(9%)时,强度分别降低1.1%、1.0%;而容重则分别降低2.2%、4.0%。

3.2.1.2 成果

综合上述极差分析成果,易知:

(1)对强度影响的主次次序是:C>B>A;对容重影响的主次次序是:A>C>B。

(2)对强度而言,最优组合为A₂B₃C₁(要求试块强度越高越好);对容重而言,最优组合为A₃B₃C₃(要求试块容重越低越好)。

3.2.2 最优配合比确定

以综合平衡法确定最优配合比。

根据极差分析成果,最优强度组合和最优容重组合并不一致,因此,尚需对极差结果进一步分析,以找出最优配合比,根据各因素影响主次次序,采用综合平衡法确定最优配合比。

以A(粉煤灰)因素为例,判断过程如下:由极差分析表易知,A因素对容重影响最大,而对强度影响

最小。对强度而言,随着掺量的增加,强度呈现先增加、再减少的现象,因此,A₂方案为最优选择。而对于容重而言,呈现掺量越大容重越低的现象,因此,A₃为最优选择。为便于比较A₂、A₃对优选结果的影响,分别以A₂、A₃为基准,在权重1:1,即强度、容重同等重要条件下,判断A因素不同掺量时相对变化幅度,以此确定A因素最优掺量,见表4所列。

表4 A因素不同掺量相对变化幅度一览表

基准	相对变化 / %		综合结果
	强度(有利因素)	容重(不利因素)	
A ₂	-3.5	7.5	4.0
A ₃	3.7	-8.1	-4.4

注:上表中,正值表示有利,负值表示不利。

由表4分析可知,以A₂为基准,掺量A₃相对于A₂,试件强度减少3.5%(不利),容重减少7.5%(有利);以A₃为基准,掺量A₂相对于A₃,强度增加3.7%(有利),但容重增加达8.1%(不利)。因此,综合上述分析,A因素宜选择A₂。

同理,可确定B因素(硅粉)、C因素(耐碱玻璃纤维)最优选择分别为B₃、C₁,则此试验最优配合比为A₂B₃C₁。

根据上述最优配合比,其最优试验刚好为第6号试验,即粉煤灰掺量20%、硅粉掺量9%、耐碱玻璃纤维掺量1%时,可取得较好的强度和容重,其试验结果为:强度30.5 MPa,容重2 015 kg/cm³。其与普通混凝土(水泥:砂:碎石:水=1:1.48:3.63:0.44)性能比较结果见表5所列。

表5 与普通混凝土性能比较表

项目	优选混凝土	普通混凝土	提升 / %	是否满足试验要求
强度 / MPa	30.5	26.5	+15.1	满足
容重 / (kg·m ⁻³)	2 015	2 380	-15.3	满足

由表5可知,与传统C25混凝土相比,通过上述优选比例添加粉煤灰、硅粉、耐碱玻璃纤维等,可使混凝土强度提升15.1%,容重减少15.3%,达到轻质高强的目的。

4 结 语

(1)在传统混凝土建筑材料基础上,通过正交试验方法,确定粉煤灰、硅粉、耐碱玻璃纤维等外掺剂的优化配合比,在保证混凝土抗压强度的同时,能够有效降低混凝土容重,从而为装配式水工建筑物的

(下转第178页)

渐减小。当掺加干法炉渣时,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度高于掺加湿法炉渣的水泥稳定炉渣碎石的强度;

(3)炉渣集料的吸水率会显著影响水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率,而炉渣集料的表观相对密度和压碎值对水泥稳定炉渣碎石的最佳含水率无明显影响;

(4)基于相关性分析,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度与炉渣集料的表观相对密度、吸水率和烧失量呈正相关关系,水泥稳定炉渣碎石的无侧限抗压强度与炉渣集料的压碎值呈负相关关系。

参考文献:

- [1] 刘栋,李立寒,崔华杰.炉渣集料对沥青混合料性能影响的试验研究[J].建筑材料学报,2015,18(2):307-311.
- [2] 张明杰.固废粉料及其沥青胶浆的性能评价[D].上海:同济大学,2017.
- [3] 张磊,孙琪琛,刘宁,等.中国城市生活垃圾焚烧处理分析[J].环境与发展,2018,30(6):32-33,36.
- [4] Pasetto M, Baldo N. Laboratory investigation on foamed bitumen

bound mixtures made with steel bottom ash, foundry sand, bottom ash and reclaimed asphalt pavement [J]. Road Materials&Pavement Design. 2012, 13(4): 691-712.

- [5] Ogunro VO, Inyand HI, Hooper F, et.al. Gradation control of bottom ash aggregate in superpave bituminous mixes[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(6):604-613.
- [6] 李伟雄,张肖宁.水泥稳定碎石集料级配变异对无侧限抗压强度的影响[J].中外公路.2011,31(1):213-216.
- [7] 杨昆.生活垃圾焚烧炉渣在沥青混合料中的应用研究[D].上海:同济大学,2016.
- [8] 范晓平,邢介明,童琳,等.生活垃圾焚烧灰渣的物理化学特性[J].环境卫生工程,2009,19(3):4-6
- [9] 章骅,何晶晶,邵立明,等.生活垃圾焚烧炉渣再生集料利用[C]//首届全国再生混凝土研究与应用学术交流会议论文集.上海:同济大学,2008:151-156.
- [10] 王璵晨.生活垃圾焚烧炉渣性质特点及在沥青混合料中的应用现状[J].石油沥青,2017,31(3):54-59,72.
- [11] 刘栋,李立寒,崔华杰.水泥稳定炉渣碎石基层路用性能[J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(3):405-409,415.
- [12] 李伟雄,张肖宁.水泥稳定碎石集料级配变异对无侧限抗压强度的影响[J].中外公路.2011,31(1):213-216.
- [13] JTG E20—2005,公路工程集料试验规程[S].
- [14] JTG E51—2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].

(上接第169页)

实施提供了保障。

(2)在试验中,采用指定产地的产品材料,水泥采用的是南京海螺水泥有限公司生产的海螺牌P·042.5级普通硅酸盐水泥,粉煤灰选用常州Ⅱ级粉煤灰,硅粉购自常州航艇,耐碱玻璃纤维产自河南永兴,由于不同产地产品,其性质并不一定相同,甚至差异很大,因而具体推广应用时,应在试验的基础上,进一步调整适宜的配合比。

(3)优选结果假定混凝土试块的强度、容重对试验结果的影响重要性比值为1:1,如改变两者的重要性比值,则相应结果可能随之改变。

(4)通过综合平衡法确定最优配合比,其最优结果刚好为6号试验,但往往大量工程试验中最优配合比并不一定刚好位于已发生试验中。此时,尚需根据所分析的最优配合比结果重新试验,并与已知试

验结果进行比对,进一步判断优化结果的合理性。

参考文献:

- [1] 高彦彦编.正交及回归试验设计方法[M].北京:冶金工业出版社,1988.
- [2] 种迅,王子杨,蒋庆,等.玻璃纤维复材筋拉结预制混凝土夹芯墙板平面外抗弯性能研究[J].工业建筑,2017,47(7):40-46.
- [3] 李耀,隋杰英,赵晗竹.耐碱玻璃纤维混凝土梁抗剪性能试验研究[J].青岛理工大学学报,2019,40(5):37-43.
- [4] 王晖.耐碱玻璃纤维混凝土力学性能试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- [5] 赵文辉,苏谦,李婷,等.玻璃纤维增强泡沫轻质混凝土力学性能的试验研究[J].工业建筑,2017,47(9):110-114+80.
- [6] 陈猛,白帅,张海鹏,等.混杂纤维混凝土抗压和抗拉性能试验研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(10):113-117.
- [7] 沈武,杨鼎宜,骆静静,等.耐碱玻璃纤维混凝土的长期力学性能研究[J].混凝土,2017(6):102-106.
- [8] 肖红玉.水保工程中玻璃纤维对再生混凝土性能的影响研究[J].广东水利水电,2019(11):71-74.