

基于正交设计方法的塑性混凝土优化 配合比试验研究

胡瀚尹

(国能大渡河流域水电开发有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:笔者利用正交试验法进行塑性混凝土试验方案设计,并结合 SPSS 软件对试验结果进行变异数分析和 Duncan 多重比较,以此探讨了引气剂掺量、膨润土用量、水胶比三种因素对其性能评价指标的影响,找出满足各设计要求的最佳配合比。结果表明:对静力抗压弹模和抗压强度而言,因素的主次顺序是膨润土掺量、水胶比、引气剂掺量;膨润土用量、水胶比及引气剂掺量的提高对弹性有利,对抗压强度不利。对渗透系数来说,主次排序是水胶比、引气剂掺量、膨润土掺量;膨润土用量及水胶比的增加对抗渗性不利,引气剂掺量的增加对抗渗性有利。该方法找出引气剂掺量 0.02%、膨润土用量 60%、水胶比 0.95 的相对最佳配比,并通过了验证。

关键词:塑性混凝土;正交试验;变异数分析;Duncan 多重比较;相对最佳配合比

中图分类号:A715

文献标志码:A

文章编号:1001-2184(2024)02-0159-04

Experimental Study on Optimal Mix Proportion of Plastic Concrete Based on Orthogonal Design Method

HU Hanyin

(CHN Energy Dadu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041)

Abstract: In this paper, the orthogonal test method is used to design the plastic concrete test scheme, and the SPSS software is used to analyze the variance of the test results and Duncan's multiple comparison to explore the influence of the three factors of the air-entraining agent content, the amount of bentonite and the water-binder ratio on the performance, and to find the optimal mix ratio meeting the design requirements. The results show that for the static compression modulus and compressive strength, the order of priority of the factors is the amount of bentonite, the water-binder ratio, and the air entraining agent content; The increase of bentonite content, water-binder ratio and air-entraining agent content is beneficial to elasticity, but unfavorable to compressive strength. For the permeability coefficient, the order of priority of is the water-binder ratio, the air-entraining agent content and the bentonite content; The increase of the amount of bentonite and the water-binder ratio is unfavorable to the anti-permeability, while the increase of the amount of air-entraining agent is favorable to the anti-permeability. This method finds out the relative optimum ratio of 0.02% air-entraining agent, 60% bentonite and 0.95 water-binder ratio, and passes the verification.

Keywords: Plastic concrete; Orthogonal test; Analysis of variance; Duncan multiple comparison; Relative optimum mix ratio

0 引言

为确保工程安全,混凝土在应用中需事先完成配合比设计^[1]。塑性混凝土因为其与普通混凝土比,弹性模量低,极限变形可达 1%~5%,不易

形成裂缝且水泥用量少,减少了发热量并节约了成本,取材容易因而普遍应用于地下防渗工程中^[2-5],如防渗墙工程。防渗墙混凝土工作需同时满足弹性、强度和抗渗要求,其中各个控制指标之间的关系复杂,如强度和极限变形能力(弹性模

收稿日期:2023-06-12

量)常常表现为负相关^[6-12],即极限变形能力提高(弹性模量降低)时强度出现降低,因此给配合比设计带来了许多困难,不能通过直观的试验去找到最佳的配合比。

正交试验法解决优选问题的能力已得到各行各业的肯定^[13-14]。笔者在正交试验设计基础上,结合 SPSS 软件对试验结果进行变异数分析和 Duncan 多重比较^[15],以此探讨了引气剂掺量、膨润土用量、水胶比三因素对其性能控制指标的影响,综合各控制指标找出满足设计要求的最佳配合比。

1 试验

1.1 原材料

膨润土采用南阳市宏发膨润土总厂生产的钙基膨润土,水泥采用三峡牌 P. O42.5 的普通硅酸盐水泥;拌和水为饮用水;砂子为人工砂,中砂,细度 2.70;粗骨料采用二级配花岗岩碎石;外加剂采用湖北银和化工有限公司 AH-1 引气剂及金路通工程材料有限公司 JLT-1 高效减水剂—聚羧酸系。

1.2 设计要求

参考规范,塑性混凝土的设计要求见表 1,另外扩散度范围为 34~40 cm,入孔坍落度范围为 18~22 cm,坍落度在 1 h 内不能低于 15 cm,初凝不低于 6 h,终凝不超过 24 h。混凝土的密度不宜小于 2 100 kg/m³。为保证上述流动性要求,水胶比范围宜为 0.8~1.3,砂率宜大于 45%,水泥掺量不宜小于 80 kg/m³,膨润土用量应大于 40 kg/m³,其中两者总掺量宜大于 160 kg/m³。塑性混凝土级配不得超过二级配,其中二级配骨料的中石用量占粗骨料比应小于 50%,粗细骨料总用量范围 1 300~1 600 kg/m³。

该试验参数通过上述规范范围初步估计,并由试验最终确定混凝土的用水量为 270 kg/m³,砂率为 65%,粗细骨料总量 1 560 kg/m³,减水剂用量 1.4%,引气剂掺量 0~0.02%,水胶比变化区间 0.85~0.95,膨润土用量区间 40%~60%。

表 1 塑性混凝土的设计要求

指标	28 d 抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa	渗透系数 / (cm · s ⁻¹)
设计要求	≥ 2.0 MPa	≤ 2 000	≤ 1 × 10 ⁻⁶

1.3 控制指标的试验方法

塑性混凝土静力抗压弹性模量试验、抗压强度试验和渗透系数试验参考规范^[16]试验规程,其中静力抗压弹性模量试验采用尺寸为 15 cm × 15 cm × 30 cm 的棱柱体试块,计算公式按式(1),抗压强度试验试件尺寸为 15 cm 的立方体试块,0.08 MPa/s 的速率加载,渗透系数试验采用尺寸为下底 d 为 18.5 cm,上底 d 为 17.5 cm,高 15 cm 的截头圆锥体试件。另外试件的拌和、坍落度及扩散度试验、凝结时间试验、成型、养护均依据上述试验规程进行,且混凝土的坍落度、扩散度及凝结时间均满足设计要求。

$$E_c = \frac{F_2 - F_1}{A} \times \frac{L}{\Delta L} \quad (1)$$

式中: E_c 为静力抗压弹性模量,MPa; F_2 为 40% 的极限破坏荷载, N; F_1 为 20% 的极限破坏荷载, N; ΔL 为应力从 20% 增加到 40% 破坏应力时的试件变形值, mm; L 为测量变形的标距, mm; A 试件承压面积, mm²。

1.4 正交试验设计

针对塑性混凝土,其配合比设计的关键是保证抗渗性和极限变形大,并且强度需能保证安全运行。该试验探讨了引气剂掺量、膨润土用量、水胶比三因素对其性能控制指标的综合影响,找出符合要求的最佳配合比。因素设计 3 个水平,若全部完成,要做 27 种方案,在实际中不可能这样找最佳配合比。正交试验法利用其“均匀性”“可推导性”及“可比性”,可通过少量试验推导出最佳配比。因素水平见表 2,正交试验表选用 $L_9(3^4)$,试验方案和试验结果见表 3。

表 2 因素水平表

水平	因素		
	A 水胶比	B 膨润土掺量 / %	C 引气剂掺量 / %
1	0.85	40	0
2	0.90	50	0.01
3	0.95	60	0.02

2 试验结果及分析

表 4 为正交试验结果变异数分析,表 5 为各因素对指标影响的 Duncan 多重比较表。从表 4 的均方(平均偏差平方和)和表 5 子集可以看出:对抗压强度而言,抗压强度越大越好,因素的主次顺序是膨润土用量(B)、水胶比(A)、引气剂用量

表 3 试验方案和试验结果

试验方案	水胶比	膨润土掺量 /%	引气剂掺量 /%	误差	抗压强度 /MPa	静力抗压弹模 /MPa	渗透系数 $10^{-7}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	弹强比
	1	2	3	4				
1	1(0.85)	1(40)	1(0)	1	6.4	3 200	0.27	500.0
2	1	2(50)	2(0.01)	2	5.6	2 385	0.14	425.9
3	1	3(60)	3(0.02)	3	4.5	1 650	0.05	366.7
4	2(0.90)	1	2	3	5.6	2 620	0.32	467.9
5	2	2	3	1	4.8	1 850	0.24	385.4
6	2	3	1	2	4.3	1 770	0.49	411.6
7	3(0.95)	1	3	2	5.1	2 150	0.50	421.6
8	3	2	1	3	4.8	2 035	0.77	424.0
9	3	3	2	1	3.7	1 250	0.63	337.8

(C);膨润土用量及水胶比对其有高度显著影响,引气剂掺量有显著影响;膨润土用量、水胶比及引气剂用量的增长对抗压强度不利。

对静力抗压弹模而言,越小越好,因素的主次顺序是膨润土用量(B)、水胶比(A)、引气剂掺量(C);三个因素对其都有高度显著影响;膨润土用量、水胶比及引气剂用量的增长对弹性能力有利。

对渗透系数而言,越小抗渗性越好,因素的主次顺序是水胶比(A)、引气剂用量(C)、膨润土用量(B);水胶比及引气剂用量对其高度显著,膨润土用量有显著作用;膨润土用量及水胶比的增长对抗渗性不利,引气剂用量的增加对抗渗性有利。

由试验结果可以看出,设计的试验方案抗渗性都满足设计要求,为综合设计要求找出最佳配合比。以弹强比作为塑性混凝土性能评选指标,在满足各个设计要求的情况下,弹强比越低其性能越优;由表 5 可以看出,水胶比越大,膨润土掺量越多,引气剂掺量越多,弹强比越大。因此得到该试验环境下的最佳配合比为:引气剂用量 0.02%、水胶比 0.95、膨润土用量 60%。

对选取的相对最佳配合比做室内验证试验,得出其 28 d 静力抗压弹模为 1 050 MPa,渗透系数为 $0.53 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$,抗压强度为 3.5 MPa,满足表 1 设计要求,其弹强比为 300。

表 4 正交试验结果变异数分析表

考核指标	方差来源	偏差平方和	自由度	均方	F 比	临界值	显著性
抗压强度	水胶比	1.429	2	0.714	643	$F_{0.01}(2,2)=99$	**
	膨润土量	3.562	2	1.781	1 603		**
	引气剂量	0.202	2	0.101	91		*
	误差	0.002	2	0.001			
静力抗压弹模	水胶比	542 006	2	271 003	97 561	$F_{0.05}(2,2)=19$ $F_{0.10}(2,2)=9$	**
	膨润土量	1 815 556	2	907 778	326 800		**
	引气剂量	307 172	2	153 586	55 291		**
	误差	4.127	2	2.778			
渗透系数	水胶比	0.349	2	0.175	15 721	$F_{0.01}(2,2)=99$	**
	膨润土量	0.001	2	0.000 5	52		*
	引气剂量	0.092	2	0.046	4 156		**
	误差	$2.222e^{-5}$	2	$1.111e^{-5}$			

注:“**”因素变化对指标有高度显著影响;“*”显著;“(*)”在 0.1 水平下显著;“—”不显著

3 结 语

塑性混凝土作为一种柔性材料,应用于地下

防渗处理工程,既要有能适应地基和周围土层变形沉降的应变弹性,又要保证基本的强度和抗渗

表5 各因素对指标影响的Duncan多重比较表(N=4)

考察指标	水胶比	子集	膨润土用量 /%	子集	引气剂量 /%	子集
抗压强度	0.95(3)	4.533 3	60(3)	4.166 7	0.02(3)	4.800 0
	0.90(2)	4.900 0	50(4)	5.066 7	0.01(2)	4.966 7
	0.85(1)	5.500 0	40(2)	5.700 0	0(1)	5.166 7
静力抗压弹模	0.95	1811.666 7	60	1556.666 7	0.02	1 883.333 3
	0.90	2080.000 0	50	2 090.000 0	0.01	2 085.000 0
	0.85	2411.666 7	40	2656.666 7	0	2 335.000 0
渗透系数	0.85	0.153 3	40	0.363 3	0.02	0.263 3
	0.90	0.350 0	50	0.383 3	0.01	0.363 3
	0.95	0.633 3	60	0.390 0	0	0.510 0
弹强比	0.95	394.466 7	60	372.033 3	0.02	391.233 3
	0.90	421.633 3	50	411.766 7	0.01	410.533 3
	0.85	430.866 7	40	463.166 7	0	445.200 0

能力;根据规范初步估计并确定试验方案范围,在试验方案范围内依据正交试验法和变异数分析探讨了引气剂掺量、膨润土用量、水胶比三个因素对其性能控制指标的影响,鉴于各个方案都满足抗渗要求,以弹强比最小为综合选优指标,得到满足各个设计要求的相对最佳配合比。

经过室内试验验证这种方法准确可靠,可以解决各行各业多因素作用下的优化设计。另外,该方法步骤清晰且简捷易行,不需要编程,在实际应用中,给设计师带来了便利。

参考文献:

[1] 《水工混凝土施工规范》,DL/T 5144-2015[S].
 [2] 水电水利工程混凝土防渗墙施工规范,DL/T 5199-2004 [S].
 [3] 李家正.水工混凝土材料研究进展综述[J].长江科学院院报,2022,39(5):1-9.
 [4] 王莹子.塑性混凝土防渗墙的试验研究[D].南昌:南昌大学,2005.
 [5] Stress-strain behavior of plastic concrete using monotonic triaxial compression tests[J]. Y. Pashang Pisheh;S. M. Mir Mohammad Hosseini. Journal of Central South University, 2012(4):1125-1131.
 [6] 林天乐,陈振光,张春英,等.相同和易性和强度条件下天然砂和机制砂混凝土配合比研究[J/OL].混凝土与水泥制品:1-6[2023-05-04].

[7] 杜建,孙宁宇.不同因素交互作用下塑性混凝土性能的优化研究[J].黑龙江水利科技,2021,49(9):17-20.
 [8] 王立波,赵军.再生混凝土配合比优化设计[J].混凝土与水泥制品,2021(6):99-102.
 [9] 张岩,杜应吉,张文剑.水胶比对塑性混凝土主要性能影响的试验研究[J].混凝土,2020(1):15-18.
 [10] 高玉琴,郭博文,宋力,刘忠.塑性混凝土单轴受压性能尺寸效应的试验研究[J].人民黄河,2022,44(11):110-113+126.
 [11] 吴为健,吴海军.塑性混凝土防渗墙渗透系数影响因素分析[J].建材世界,2022,43(3):43-46.
 [12] 王四巍,李小超,李杨,等.膨润土及水泥用量对塑性混凝土变形及破坏特征的影响[J].硅酸盐学报,2014(1):33-37.
 [13] 张淑云,周杰,张政,等.基于正交试验的机制砂自密实轻骨料混凝土配合比设计[J].混凝土与水泥制品,2021(12):84-88+93.
 [14] 何为,薛卫东,唐斌.优化试验设计方法及数据分析[M].北京:化学工业出版社,2012.
 [15] 王颀.试验设计与SPSS应用[M].北京:化学工业出版社,2007.
 [16] 水工塑性混凝土试验规程,DL/T 5303-2013[S].

作者简介:

胡瀚尹(1989-),女,四川广安人,工程师,学士,从事水电站库坝安全监测与监控、水工技术监督管理等工作。

(编辑:吴永红)