

正交试验法在机场道面混凝土配合比中的应用

张国栋

(上海同济检测技术有限公司, 上海市 200441)

摘要: 随着民航基建的快速发展,对工程质量的要求也在不断提高,工程混凝土的质量控制变得尤为重要。以厦门新机场的抗弯拉强度为5.0 MPa的水泥混凝土道面配合比设计为例,结合道面混凝土的特点及所处地点环境的要求,在公路水泥混凝土面层配合比的基础上,参照民航机场道工程的相关规范及设计要求,利用正交试验法对机场道面混凝土配合比的材料用量进行确定,同时应用正交设计方法对试验数据进行直观、因素指标、交互作用及方差的分析,保证试验数据的准确性,从而得到满足道面混凝土和易性和抗弯拉强度要求的配合比,用于指导道面混凝土施工,并为相关工程提供参考。

关键词: 原材料;配合比;正交试验

中图分类号: U416.216

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0062-05

Application of Orthogonal Test Method in Mix Proportion of Airport Pavement Concrete

ZHANG Guodong

(Shanghai Tongji Testing Technology Co., Ltd., Shanghai 200441, China)

Abstract: With the rapid development of civil aviation infrastructure, the requirements for engineering quality are also constantly improving, and the quality control of engineering concrete has become particularly important. Taking the mix proportion design of cement concrete pavement with the bending tensile strength of 5.0 MPa in Xiamen New Airport as an example, combined with the characteristics of pavement concrete and the requirements of location environment, on the basis of the mix proportion of highway cement concrete pavement, referring the relevant specifications and design requirements of civil aviation airport pavement engineering, the material content of airport pavement concrete mix proportion is determined by using the orthogonal test method. At the same time, the orthogonal design method is applied to conduct the intuitive, factor index, interaction and variance analysis of the test data, which ensure the accuracy of the test data so as to obtain the mix proportion meeting the requirements of workability and flexural strength of pavement concrete, and can be used to guide the construction of pavement concrete and provide reference for the relative projects.

Keywords: raw materials; mix proportion; orthogonal test

0 引言

正交表又称为正交试验设计法,是一种有效的数学统计技术,可以有效地解决复杂的问题,其特性表现为:实施次数少、结果准确、操作容易、效率极高。通过实施一系列的实验,来探索出可能会改变结果的各个环节,从而达到最佳的生产效果。其中,每一个环节都可能会带来重要的影响,比如配方的成分、温度、湿度、光照等,而每一个环节的变化又会导致一系列的结果,从而形成一个复杂的多因素优

选过程。

目前,在公路面层混凝土配合比设计中,使用正交试验法和经验公式法(二级及二级以下公路),但采用经验公式法时,其计算砂率及水胶比不适用于机场道面混凝土设计,如采用普通混凝土的设计方法设计混凝土配合,只考虑3个水胶比及砂率,不能反映区间水胶比及砂率变化对混凝土的影响。在设计过程中根据实验设计所选用的因素和水平的数量,使用配合比的数量也在相应的增加,增加工作量的同时,也极易发生错误,以 $L_9(3^3)$ 正交表为例,正常情况下,要进行27次实验,而采用正交试验法只进行9次实验,也能很好地覆盖所需因素和水平。因此,机场道面混凝土设计中采用正交试验法能减

收稿日期: 2024-07-14

作者简介: 张国栋(1988—),男,本科,高级工程师,从事试验检测工作。

少上述弊端,也能对民航机场道面混凝土配合比提供设计思路。

遵循《公路水泥混凝土路面施工技术细则》(JTG/T F30—2014)的指导,在实施道路水泥混凝土配合比的工程设计时,必须遵守下列准则。

(1)在进行实际工程时,为了满足不同的需求,需要考虑多种不同的影响因子,包括水泥的使用量、拌合水用量、砂率或粗集料填充体积率 3 个因素。对于含有粉煤灰的混凝土,可考虑用水量、基准胶材总量、粉煤灰掺量、粗集料填充体积率 4 个因素。为了确保实验结果的准确性,建议每个因素至少选择 3 个不同水平,使用 $L_9(3^4)$ 正交表进行实验。

(2)通过直观和回归分析来评估正交试验的结果,其中回归分析的考量因素包括坍落度和抗折强度等参数。

根据以上两条准则,我们可以确定一个最佳的正交配合比^[1]。

根据《民用机场水泥混凝土面层施工技术规范》(MH 5006—2015)和相关设计标准,在不添加粉煤灰时,我们采用了三个因素:水灰比、水泥用量和砂率,并以 $L_9/3^3$ 的正交表格形式制定相应的实验方案^[2]。

1 工程概况

厦门新机场位于福建省厦门市翔安区境内,在厦门本岛以东海域、翔安区东南方向,北与泉州南安市相望,南与台湾省金门岛一衣带水,西与厦门本岛远眺,东与角屿岛相临。场址范围包括大小嶝岛之间的浅滩区以及大嶝岛周边的部分海域,同时涉及大嶝岛东部部分用地。距厦门本岛市中心直线距离约 25 km,距泉州约 44 km,距漳州约 72 km,距金门约 15 km。

北飞行区建设北一跑道长度 3 800 m,飞行区等级 4F;在北一跑道南侧建设 2 条与跑道等长的平行滑行道及局部建设第三平行滑行道与机坪相接,在北一跑道北侧建设 1 条与跑道等长的平行滑行道;同时配套建设快速出口滑行道、端联络道、旁通道、绕行滑行道等滑行道系统;北飞行区跑滑系统均按 4F 标准建设。南飞行区建设南一跑道长度 3 600 m

飞行区等级 4E;在南一跑道北侧建设 2 条与跑道长度相等的滑行道及局部建设第三条平行滑行道与机坪相接,南飞行区东、西两端联络道和旁通道按满足 747-8 机型运行要求建设,其他滑行道系统均按 4E 等级建设,在南一、北一跑道东西两端分别建设一组满足 747-8 机型运行的垂直联络道,同时配套建设近机位、远机位机坪、维修机坪、货机坪等设施。

2 试验设计

2.1 技术要求

(1)为了确保混凝土的强度、耐磨性、耐久性以及良好的工作性,应当严格按照设计规范进行配合比的设计。

(2)水泥混凝土面层以 28 d 抗折强度为标准。

(3)使用的水灰比必须符合规定,且必须保证其达到预期的强度。水泥混凝土水灰比应不大于 0.42,如果使用的是强度等级 42.5 的水泥,则水泥使用量 $\geq 330\text{ kg/m}^3$ 。如果使用强度等级 52.5 的水泥,则水泥使用量 $\geq 320\text{ kg/m}^3$ 。

(4)在混凝土混合料的稠度测试中,塌落度应低于 20 mm,而维勃稠度仪的控制时间应 $> 15\text{ s}$,以确保混凝土的质量。

(5)在混凝土中,粗集料的粒径应该分为三个级别,即(4.75 ~ 9.5 mm、9.5 ~ 19 mm、16 ~ 31.5 mm)。在选择合适的碎石或破碎卵石时,应该使用 2~3 个单独的粗集料,并根据最小松散孔隙率来确定各档碎石的配合比列。

(6)砂率按相关文件要求进行选取。

(7)在实际施工中,应根据设计要求,宜按设计强度 1.10 ~ 1.15 倍进行配制,并利用绝对体积法来测算粗集料和细集料的使用量,经试配,确定混凝土混合料的理论配合比^[3]。

(8)依据设计标准本工程道面面层水泥混凝土设计要求为:现浇水泥混凝土道面,设计 28 d 抗弯拉强度不低于 5.0 MPa。

2.2 试验原材料

(1)水泥:道路硅酸盐水泥(P·R7.5),其主要的性能参数如表 1 所列。

表 1 水泥基本性能指标

水泥	烧失量/%	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	初凝时间/ min	终凝时间/ min	标准稠度用水量	28 d 胶砂抗压强度/MPa	细度/%	铝酸三钙/%	铁铝酸四钙/%	耐磨性/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	氧化镁/%	28 d 干缩率/%	含碱量/%	氯离子含量/%
P·R7.5	1.2	330	258	292	25.7	8.3	1.1	2.0	16.0	1.256	0.36	0.034	0.36	0.05

(2)细集料:河砂,主要指标见表2。

表2 细集料基本性能指标

指标	氯离子含量/%	坚固性/%	表观密度/(kg·m ⁻³)	含泥量/%	泥块含量/%	级配分区
取值	0.004	3.0	2 641	1.5	0	Ⅱ区中砂

(3)粗集料:碎石为三级配,分别为4.75~9.5 mm、9.5~19 mm、16~31.5 mm,基本性能指标见表3。

表3 粗集料基本性能指标

指标	表观密度/(kg·m ⁻³)	坚固性/%	氯化物含量/%	洛杉矶磨耗损失/%	压碎值/%	针片状颗粒含量/%	含泥量/%
取值	2 640	4.0	0.001	0.12	14.3	3.8	0.1

(4)水:拌合水,基本性能指标见表4。

表4 拌合水基本性能指标 单位:mg/L

指标	pH值	Cl ⁻ 含量	SO ₄ ²⁻ 含量	碱含量	可溶物含量	不溶物含量
取值	6.7	23	48	27	72	43

(5)减水剂:AJF-5聚羧酸缓凝减水剂,其掺入量为2.0%,基本性能指标见表5。

表5 减水剂基本性能指标 单位:%

指标	减水率	泌水率比	含气量	28 d抗压强度比	28 d弯拉强度比	收缩率比
取值	12	36	1.7	118	111	106

2.3 混凝土配合比设计(正交试验设计)

2.3.1 确定混凝土配制强度

本次混凝土配合比弯拉设计强度为5.0 MPa,根据《民用机场水泥混凝土面层施工技术规范》(MH 5006—2015)第4.1.9条规定:“试验室配合比宜按水泥混凝土设计强度的1.10~1.15倍进行配制”,本次试验按水泥混凝土设计强度的1.15倍进行配制。

$$f_{cu,0}=1.15f_{cu,k}=1.15\times 5=5.75\text{ (MPa)}$$

式中: $f_{cu,k}$ 为混凝土抗折强度设计值5.0 MPa

2.3.2 因素及水平选定

(1)水灰比(因素A)

《民用机场水泥混凝土面层施工技术规范》(MH 5006—2015)中第4.1.6条规定,混凝土的水灰(胶)比应符合表6当中的规定。

表6 水泥混凝土最大水灰比

部位	跑道、滑行道、机坪及道面	防吹坪、路面
无抗冻要求的最大水灰(胶)比	0.44	0.46
有抗冻要求的最大水灰(胶)比	0.42	0.44

考虑招标文件、设计文件规定,混凝土水灰比应不大于0.42,因此本次试验水灰比选用0.38、0.40、0.42三个水平。

(2)水泥用量(因素B)

采用水泥为P·R7.5道路硅酸盐水泥,其28 d抗压强度标准要求大于等于42.5 MPa,实测抗压强度为52.7 MPa,其余指标见表1。水泥用量选用330、335、340 kg/m³三个水平。

(3)砂率(因素C)

招标文件建议砂率为32%,故本次试验砂率选用28%、30%、32%三个水平。

(4)粗集料的组成比例

本次试验选用4.75~9.5 mm、9.5~19 mm、16~31.5 mm三档碎石原材,根据检测结果当碎石中4.75~9.5 mm:9.5~19 mm:16~31.5 mm=10:35:55时混合料松堆孔隙率最小,且合成级配满足标准规范要求。

(5)外加剂用量

外加剂推荐使用掺量为2.0%,本次试配所用的掺量为2.0%。

2.3.3 确定基本方案

正交试验是一种有效的试验方法,利用不多的试验次数就能得出满意的结果的优选方案^[4],本方案中使用水胶比、砂率及水泥用量作为实验因素,根据其关系采用了9种不同的试验配合比,并在试验室内进行试拌,使用维勃稠度和7、28 d抗折强度试验,7、28 d试件都分别成型5组,以减少由于误差和数据变异带来的影响。将5组的最高和最低值剔除,取其余3组的数据平均值,并利用这些数据进行正交分析,以获得更加准确的结果(见表7、表8)。

表7 因素水平表

序号	水胶比	水泥用量/kg	砂率/%
	A	B	C
1	0.38	330	28
2	0.40	335	30
3	0.42	340	32

粗、细集料用量应用体积法进行计算。

分别计算出相同水灰比、相同砂率、相同水泥用量下各3组的28 d弯拉强度及维勃稠度的均值,并计算其极差,反映出各种指标对混凝土强度的影响程度^[5](见表9)。

根据表绘制出试验参数关系图。

经极差R分析表明,A为8和0.50,B为5和0.32,C为1和0.04,可得出水灰比是决定维勃稠度和抗折强度的主要因素,而水泥用量则是维勃稠度和抗折强度次要因素,砂率对维勃稠度和抗折强度影响不明显。

表 8 $L_9/3^3$ 正交配合比试验结果

因素试验号及水平	A	B	C	试验结果		
	水灰比	水泥/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	砂率/%	VC/S	7 d 抗折强度/MPa	28 d 抗折强度/MPa
A1-B1-C1	0.38	330	28	23	5.92	6.58
A1-B2-C2	0.38	335	30	25	6.04	6.65
A1-B3-C3	0.38	340	32	28	6.13	6.82
A2-B1-C2	0.40	330	30	19	5.75	6.26
A2-B2-C3	0.40	335	32	22	5.81	6.34
A2-B3-C1	0.40	340	28	25	5.83	6.63
A3-B1-C3	0.42	330	32	14	5.49	6.03
A3-B2-C1	0.42	335	28	18	5.55	6.12
A3-B3-C2	0.42	340	30	19	5.61	6.38

表 9 各项指标变化对混凝土弯拉强度及维勃稠度的影响

参数		水灰比	水泥/kg	砂率/%
VC 各水平结果 总和	K1	76	56	66
	K2	66	65	63
	K3	51	72	64
VC 各水平结果 均值	K1	25	19	22
	K2	22	22	21
	K3	17	24	21
VC 平均值极差	R	8.00	5.00	1.00
28 d 抗折强度各 水平结果总和	K1	20.05	18.87	19.33
	K2	19.23	19.11	19.29
	K3	18.53	19.83	19.19
28 d 抗折强度各 水平结果均值	K1	6.68	6.29	6.44
	K2	6.41	6.37	6.43
	K3	6.18	6.61	6.40
28 d 抗折强度平 均值极差	R	0.50	0.32	0.04

经过对各因素水平相对应试验结果的平均值 K 的分析,维勃稠度的最佳选择是 A2-B2-C2,即水灰比 0.40,砂率 30%,水泥用量为 335 kg;28 d 抗折强度组合是最佳选择是 A1-B3-C2,即水灰比为 0.38,砂率为 30%,水泥用量为 340 kg 见图 1 至图 5。

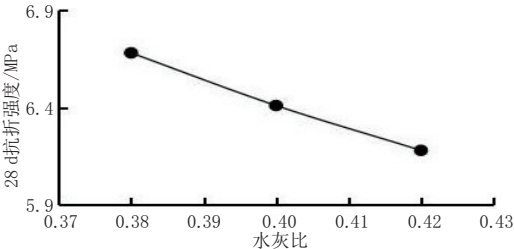


图 1 水灰比与 28 d 抗折强度关系图

3 配合比的确定

根据正交试验结果,选取试验号为 A1-B1-C1、A1-B2-C2、A1-B3-C3、A2-B1-C2、A2-B2-C3、A2-B3-C1 的配合比作为为目标配合比,根据试配结果,A1-B1-C1、A1-B2-C2、A1-B3-C3、A2-B3-C1 的配合

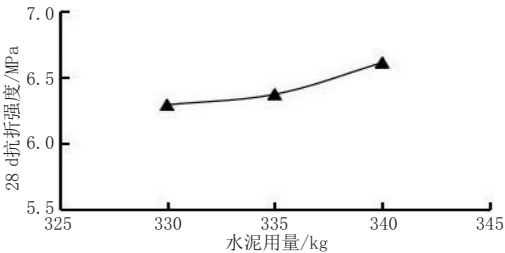


图 2 水泥用量与 28 d 抗折强度关系图

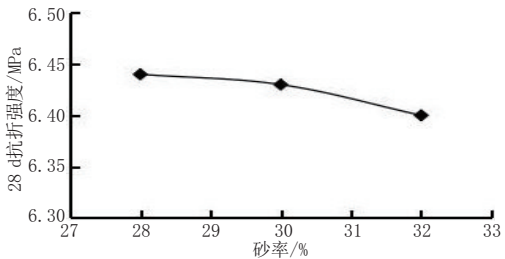


图 3 砂率与 28 d 抗折强度关系图

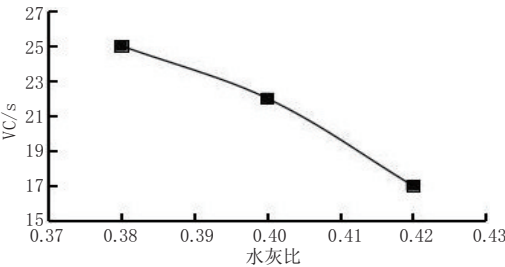


图 4 水灰比与维勃稠度关系图

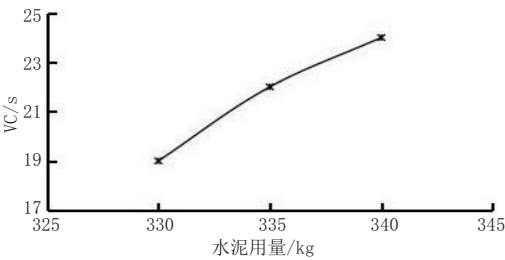


图 5 水泥用量与维勃稠度关系图

比,虽强度满足设计要求,但维勃稠度过大,施工性能不佳;对于 A2-B1-C2、A2-B2-C3 两组配比,在满足设计强度的前提下,选用水化热低、经济性较高的配合比,即选定试验号 A2-B1-C2 的配合比为理论配

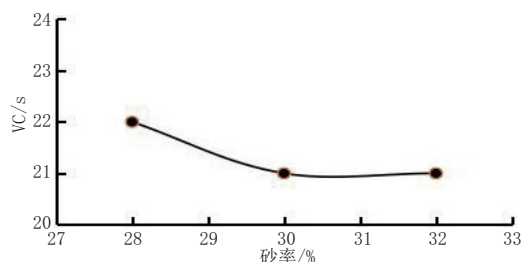


图6 砂率与维勃稠度关系图

合比(水灰比 0.40, 砂率 30%, 水泥用量为 330 kg), 应用体积法计算粗、细集料用量, 并验证容重, 同时对混凝土耐磨性及 28 d 龄期氯离子扩散系数进行试验, 结果分别为 0.480 kg/m^2 、 $2.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

4 结 论

通过上述描述, 正交试验可用少量试验次数得到满足要求的配合比, 减少分散性, 具有很强的代表性, 也可减轻实验人员的工作量, 同时设计正交方案时, 对其他的水灰比、砂率、水泥用量也进行了试验, 并取得了试验结果, 在混凝土施工过程中出现异常水灰比、砂率、水泥用量的情况时也有着相关的参考作用和指导意义, 保证混凝土的和易性和抗弯拉强度, 减少混凝土质量缺陷的产生。最终推荐配合比见表 10。

5 结 语

影响混凝土面板质量的因素有很多, 如原材料、

表 10 推荐配合比表

单位: kg/m^3

材料名称	水泥	砂	碎石	水	外加剂
材料用量	330	597	1 393	132	6.60
配合比	1	1.81	4.22	0.40	0.02

施工养护等方面, 为保证质量, 给出部分如下建议:

一是如果现场所用原材料级配有波动时应对应施工配比进行微调, 当级配波动较大时应对应配合比进行验证;

二是每日施工前, 应准确测定砂、石含水率, 应由工地试验室根据砂、石含水率变化情况, 调整施工配合比, 原材料应做好标识, 禁止混堆;

三是考虑拌合站距离施工现场较远、厦门当地气温和施工现场风力等因素, 道面混凝土运输过程中应做好覆盖等措施减少水分蒸发, 严禁施工过程中随意改动配合比参数。

参考文献:

- [1] JTG/T F30—2014, 公路水泥混凝土路面施工技术细则[S].
- [2] MH 5006—2015, 民用机场水泥混凝土面层施工技术规范[S].
- [3] 谢永亮. 对机场道面水泥混凝土施工中性能要求的研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2016(12): 2646-2647.
- [4] 廖永根. 公路路面高性能混凝土在滑模摊铺施工中的应用[J]. 路基工程, 2005(4): 49-51.
- [5] 吴瑾, 陈徐东, 彭泽坤, 等. 基于灰色关联分析的废水混凝土强度影响因素预测与评估[J]. 新型建筑材料, 2023(2): 1-6.

(上接第 61 页)

- [2] 张爱花, 牛肖. 软土地基重力式挡墙技术对策研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(8): 34-35.
- [3] 李代锋, 刘克文, 陈安等. 特殊软土边坡支挡方案研究[J]. 中国水运(下半月), 2023, 23(3): 118-120.
- [4] 刘长伟. 关于边坡工程支护形式的选择[J]. 四川建材, 2017, 43(12): 96-97.
- [5] 刘长伟, 彭荟茹. 悬臂式挡墙在高速拼宽路基中的应用及分析[J]. 山西建筑, 2023, 49(11): 123-126.

- [6] 谢清泉, 刘昌清, 王卉等. 悬臂式挡土墙土压力计算方法对比研究[J]. 路基工程, 2020(5): 110-114; 125.
- [7] 张晓莹. 扶壁式挡土结构受力分析及其设计计算[J]. 山西建筑, 2006(19): 69-70.
- [8] JTG D30—2015, 公路路基设计规范[S].
- [9] JGJ 79—2012, 建筑地基处理技术规范[S].
- [10] 韩雷. 凸榫对悬臂式挡土墙安全性的影响分析[J]. 广东土木与建, 2022, 29(9): 17-20.