2024 年 8月

Aug. 2024

材料科学

# 大体积混凝土配合比优化设计在大型动载设备 基础中的应用研究

Optimization Design of Mass Concrete Mix Ratio Application of Mass Concrete Mix Ratio Optimization Design in the Foundation of Large-scale Dynamic Load Equipment

李 灿1,周殷弘2,余建国1,熊俊驰1,王 典3

(1. 中国空气动力研究与发展中心,四川 绵阳 621000; 2. 中国建筑第八工程局有限公司,上海 200120;3. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院,黑龙江 哈尔滨 150009)

摘 要:为研究大型动载设备基础混凝土裂缝控制,通过掺入粉煤灰和矿渣降低水化热,进行混凝土配合 比优化设计,根据力学性能、绝热温升试验及混凝土温度及应力试验,分析优选混凝土配合比的抗裂性能。结 果表明:优选混凝土配合比的内外温差基本小于25℃,满足规范要求,具有较好的抗裂性;浇筑仓块中心区域 上表面产生拉应力,其余区域产生压应力,应力均小于对应龄期混凝土强度,满足裂缝控制要求。

关键词:大体积混凝土;配合比;内外温差;温度应力;裂缝控制

中图分类号: TU528; TP183 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 04-0031-05 **DOI**: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.006

LI Can<sup>1</sup>, ZHOU Yinhong<sup>2</sup>, YU Jianguo<sup>1</sup>, XIONG Junchi<sup>1</sup>, WANG Dian<sup>3</sup>

(1. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

3. School of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150009, China) Abstract: In order to study the crack control of concrete foundation of large dynamic load equipment, fly ash and slag were added to reduce the heat of hydration, and the optimal design of concrete mix was carried out. According to the mechanical properties, adiabatic temperature rise test and the measured results of concrete temperature and stress, the crack resistance of the optimal concrete mix was analyzed. The results show that the temperature difference between inside and outside of the optimum concrete mix ratio is less than 25  $^{\circ}$ C, which meets the specification requirements and has good crack resistance. The tensile stress is generated on the upper surface of the central area of the cast silo block, and the compressive stress is generated in the remaining areas, and the stress is smaller than the strength of the corresponding age concrete, which meets the requirements of crack control.

Keywords: mass concrete; mix ratio; temperature difference between inside and outside; temperature stress; crack control

作者简介:李 灿(1995—),男,硕士,工程师,研究方向:混凝土结构研究。 通信作者:熊俊驰(1972—),男,本科,工程师,研究方向:混凝土结构研究。 收稿日期: 2022-12-28

## 38 卷

# 材料科学

# 0 引言

大体积混凝土因内部水泥水化热散失速度远慢 于其表面,内外的温度差导致产生温度应力,当混凝 土的抗拉强度低于温度应力时,会产生混凝土表面裂 缝,应力集中时裂缝会进一步发展,演变为深层裂缝, 甚至产生贯穿性裂缝破坏基础整体性<sup>[1]</sup>,大幅降低基 础上部结构使用安全性,属于重大的质量问题。

工程上通常采取循环冷却水管<sup>[2]</sup>、降低混凝土 入模温度<sup>[3]</sup>、降低胶凝材料水化热<sup>[4]</sup>和加强养护措 施<sup>[5]</sup>等方法来减轻大体积混凝土裂缝问题。国内外 学者通过掺入外加剂来提高混凝土抗裂性,Long 等<sup>[6]</sup>在桥塔型钢混凝土中加入不同比例收缩型和抗 裂型减粘剂来调整混凝土配合比,降低了混凝土的 开裂温度,提高了混凝土的抗裂性能;马良等<sup>[7]</sup>对 多种混凝土外加剂分别进行了配合比设计,结果表 明膨胀剂和减缩剂对混凝土的自收缩有显著抑制作 用,减小混凝土后期开裂性。也有学者加入非水泥 胶凝材料替换部分水泥来减少混凝土整体水化热, Darguennes 等<sup>[8]</sup>在混凝土中掺入矿渣,明显减缓了水 化热发展;Atis<sup>[9]</sup>在混凝土中掺入大量粉煤灰,研究 其温升规律,结果表明用粉煤灰替代部分水泥可降 低最大温升,提升了混凝土抗裂性。

但是目前在对裂缝问题十分敏感的大型动载设备基础大体积混凝土工程中,通过双掺粉煤灰、矿渣及加入优质外加剂的混凝土配合比优化设计来控制混凝土裂缝十分少见。水泥在混凝土内产生大量的水化热,是导致内外温差及产生裂缝的主要原因<sup>[10]</sup>,为减小水化热,在保证强度条件下可减少水泥用量,同时掺入粉煤灰和矿渣粉,形成低水化热水泥。掺入粉煤灰,一方面可以减少水泥的用量,降低水化热;另一方面可以提高混凝土的密实性和抗裂性<sup>[11]</sup>,但需严格控制粉煤灰的掺量,保证混凝土力学性能不受较大影响。掺入矿渣粉可提高混凝土强度和耐热性,一定程度上减小水化热,有益于混凝土裂缝的控制<sup>[12]</sup>。

针对大型动载设备基础混凝土抗裂要求,通过 控制胶凝材料和外加剂比例来进行配合比优化设计, 分析不同混凝土配合比的力学性能和绝热温升,进 行配合比优选,并对混凝土内外温差及温度应力进 行监测,分析优选混凝土配合比的抗裂效果。

#### 1 工程概况

工程为某工业厂房大型动载设备基础,基础长 130 m,宽 21~35 m,筏板厚 8.65 m,基础总高 16.07 m,混凝土强度等级 C35,混凝土体积达 26000 m<sup>3</sup>,属典型的超大体积混凝土。该基础长期 承受较大的设备动荷载,基础一旦出现贯穿性有害 裂缝,对设备安全运行是一个重大隐患,严重影响 设备长期使用。基于工程难度及对裂缝控制的要求, 采用分仓法浇筑大体积混凝土,平面上分为4 段,厚 度方向上根据基础结构按 2~3.5 m 分层浇筑。

## 2 原材料

选用 P·O 42.5R 水泥,其主要性能指标见表 1; 选用 I级 F 类粉煤灰,其主要性能指标见表 2;选用 S95 级矿渣微粉,其主要性能指标见表 3;粗细骨料 主要性能指标见表 4;外加剂选用缓凝高效减水剂和 膨胀剂,主要性能指标见表 5~6。

表1 水泥主要性能指标 ble 1 Cement main performance ind

Table 1 Cement main performance index								
标准稠度	凝结时间/min		产合州	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		
用水量/%	初凝 结	冬凝	女正性	3 d	28 d	3 d	28 d	
28.2	236	339	合格	6.1	8.8	29.6	53.8	
表2 粉煤灰主要性能指标								
	Table 2	Main	perforn	nance ind	dex of fly	ash		
密度/ (g/cm <sup>3</sup> ) 细度/%				需水量比/% 烧			尧失量/%	
2.4		8.	6	94 3.4			3.4	
		表3 7	矿渣粉す	=要性能	指标			
スジッツ 追加工女 圧能指称 Table 3 Main performance index of slag powder								
/ $(g/cm^3)$	) / (m <sup>2</sup>	²/kg)	/	%	流动度L	Ľ/%	烧矢量/%	
2.87	412	2. 8	7	71	97		0.47	
Table 4 Main performance index of coarse and fine aggregate								
骨料种类	表观密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	, 空隙	率/%	压缩指标 /%	示 针片状 含量	、颗粒 /%	细度模数	
粗骨料	2.63	4	40	9.3	6.	4		
细骨料	2.64	4	43	13.9			2.8	
表5 缓凝型高效减水剂主要性能指标								
Table 5      The main performance index of retarded high								
efficiency water reducing agent								
密度/(g/c	em <sup>3</sup> ) 砼减	水率/9	76 水派 动	≧净浆流 度∕mm	含气量	<u>t</u> /%	含固量/%	
1.03	2	0.5		238	3.	8	19.5	

33

		表6 膨胀剂王要性能指标						
	Table 6	Main performance index of expander						
比表面积	凝结时	间/min	限制膨	;胀率/%	抗压强	度/MPa		
$/ (m^2/g)$	初凝	终凝	水中7 d	空气中 21 d	7 d	28 d		
28.2	160	265	0.037	- 0. 006	24.6	45.8		

#### 3 配合比优化设计及试验

采用双掺粉煤灰与矿渣粉技术适配混凝土,同 时掺入缓凝型高效外加剂,粉煤灰与矿渣粉的总掺 量不超过总胶材质量的40%,选取7组配合比进行 试配。按设计配合比配备混凝土材料并进行室内搅 拌,进行力学性能与绝热温升试验测定其性能指标, 优选出3组混凝土配合比,见表7。

表7优洗混凝土配比表

		Tab	ole 7 C	Optimum	concrete	e ratio	/ (]	$kg/m^3$ )
编号	水泥	矿渣粉	粉煤灰	: 砂	碎石	水	减水剂	膨胀剂
SAP1	210	60	100	802	1030	170	8	12
SAP2	250	50	80	788	1020	170	7.7	10
SAP3	250	80	50	788	1020	170	7.1	8

3.1 力学性能

对优选配合比混凝土进行室内抗压试验,见表 8。根据经验公式<sup>[13]</sup>可将试验测得的抗压强度指标转 化为相应龄期抗拉强度预测值,抗拉强度预测值见 表9。

表8 优选配合比抗压强度试验测试值 Table 8 Optimal mix ratio compressive strength test value

优选组		抗压强	度/MPa	
	R3	R7	R28	R60
SAP1	18.55	26.51	29.37	39.05
SAP2	20.58	27.09	38.49	40.38
SAP3	21.61	29.88	39.17	39.66

表9 优选配合比混凝土抗拉强度预测值 Table 9 Tensile strength prediction value of optimum mix ratio concrete

or optimum mix ruto concrete						
优选组 -	抗拉强度/MPa					
	$f_t 3$	$f_t 7$	$f_t 28$	$f_t 60$		
SAP1	1.61	2.04	2.19	2.65		
SAP2	1.73	2.07	2.62	2.71		
SAP3	1.78	2.21	2.65	2.67		

# 3.2 绝热温升

绝热温升值是大体积混凝土最重要的热学性能 参数之一,在力学性能试验的基础上优选 SAP2 与 SAP3 进行绝热温升试验,两组试验 14 d 绝热温升曲 线如图1所示。

两组配合比温升曲线变化趋势一致,在绝热温 升试验第2~3d两组试验的升温速率较大,3d后温 材料科学

升速率明显减慢,7d后绝热温升曲线基本趋于稳定 平缓。SAP2 和 SAP3 两组混凝土配合比最大温升值 分别可近似取 42.92 ℃和 44.31 ℃。



Fig. 1 Curve of measured adiabatic temperature rise

根据表7 混凝土配合比, 后经力学热学试验和计 算,得到优选混凝土配合比的力学性能参数,最终 选择 SAP2 为该工程混凝土配合比。

# 4 内外温差及温度应力分析

工程的温度及应力监测平面布置如图2所示,沿 基础厚度方向布置5个温度监测点和2个应力监测 点,其中温度监测点布置:A点距离上表面 0.1 m, E 点距离底部 0.05 m, B~D 点均匀布置;应力监测 点仅在 A 点、C 点布置,并垂直布置两个方向(图 3)。



图 2 温度监测点平面布置图 Fig. 2 Layout of temperature monitoring points



图 3 应力监测示意图 Fig. 3 Schematic diagram of of stress monitoring

4.1 内外温差分析

连续测温 10 d, 测点温度变化趋势图如图 4 所

# 材料科学

示。分析图中曲线,各点温度变化趋势一致,温度 随时间增长先增加后减小,于50h左右达到最高值; 混凝土表面温度远低于其余各点,原因为其散温速 度快,从而与内部产生内外温差。如图4(f)所示, 各点的内外温差随时间的变化趋势最大内外温差为 28 ℃,当监测到超过25 ℃时,立即增加养护措施 (如增加棉垫等),迅速将内外温差降低至25℃以

内,通过曲线图可以发现,内外温差超过25℃时, 其后曲线陡降。

分析温度实测结果,内外温差基本保持在25℃ 以下,遇有超过的情况通过施工养护措施能够及时 降低,满足国家规范<sup>[15]</sup>要求,说明优选混凝土配合 比应用于该工程具有较好的抗裂性。

80



80

(f) 内外温差与时间关系曲线图

实测温度及温差曲线图 图 4



#### 4.2 应力分析

应力监测采用应变传感器,通过弹性模量换算 成应力,弹性模量根据经验公式<sup>[14]</sup>计算:

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_c}} \tag{1}$$

式中:  $f_e$  为抗压强度, MPa;  $E_e$  为弹性模量, MPa。

采用 SAP2 配合比对应龄期的抗压强度计算混凝 土弹性模量。选取具有代表性的仓块中心(8号点) 和边缘(10号点),其应力随时间变化趋势图如图5 所示。仓块中心区域:上层(A点)混凝土初始产 生拉应力(正值为拉、负值为压),50h左右达到最 大拉应力, 随后拉应力逐渐降低并转为压应力, 达 到最大拉应力的时间及随时间发展趋势与同一测点

处的实测温度随时间趋势(8号点)一致,最大拉应 力1.63 MPa,小于 SAP2 配合比对应龄期抗拉强度 1.73 MPa (龄期3d);中层 (C点) 混凝土始终产 生压应力,最大压应力6.8 MPa,远小于对应龄期混 凝土抗压强度。仓块边缘10号点区域:因与仓块中 心区域约束条件不同,上层(A点)和中层(C点) 均产生压应力,最大压应力8.45 MPa,远小于对应 龄期混凝土抗压强度,其中,上层(A点)南北向 测点在后期产生了拉应力,最大拉应力1.33 MPa, 小于对应龄期抗拉强度 2.07 MPa(龄期 7 d)。

分析温度应力实测结果,各测点的温度应力均 小于混凝土强度,不会因混凝土力学性能产生裂缝, 具有较好的抗裂性。

80

R 占

点

点

250

10

250

# 材料科学



# 5 结论

在混凝土中掺入粉煤灰和矿渣,进行大体积混凝土配合比优化设计,综合考虑力学性能和绝热温 升试验结果,优选出一组混凝土配合比,并实测混 凝土温度,得到以下结论:

(1)混凝土温度随时间增长先增大后减小,于 50h左右达到温峰,内外温差基本保持在25℃以下(存在个别超25℃情况,通过增强养护措施可及时降低温差),温差满足规范要求,利于混凝土裂缝控制。

(2)仓块中心区域上层混凝土产生拉应力,中 层混凝土产生压应力,仓块边缘区域混凝土均产生 压应力,温度应力均远小于对应龄期混凝土强度, 满足裂缝控制要求。

实测温差和应力分析结果表明文中针对大型动 载设备基础优选的混凝土配合比有较好的抗裂性能, 对大体积混凝土裂缝控制有较好的参考意义。

#### 参考文献

- [1] 刘拼,郭城瑶,秦哲焕,等.大体积混凝土足尺模型裂缝控制应用研究 [J]. 粉煤灰综合利用,2023,37 (3):66-71.
- [2] 许后磊,舒德伟,唐季,等.大体积混凝土人仓温度控制及水 管冷却优化技术研究 [J].水利水电技术(中英文),2024, 55 (增刊1):144-150.
- [3] 杨玫, 郭兵文, 金省华, 等. 人模温度对框架桥温度场及应力 场的影响 [J]. 南阳理工学院学报, 2020, 12 (2): 75-81.
- [4] 孙建恒,陈若好,袁敬.大体积铁尾矿粉混凝土水化热试验研究及数值模拟[J].山东农业大学学报(自然科学版),2023, 54 (3):440-446.
- [5] JU- Hyung Ha, YOUN- Su Jung, YUN- Gu Cho. Thermal crack control in mass concrete structure using an automated curing system
  [J]. Automation in Construction, 2014, 45 (4): 16-24.
- [6] LONG Y, LIU A, DONG J, et al. Pylon concrete crack resistant techniques for main navigation channel bridge of maanshan changjiang river rail- cum- road bridge [J]. Bridge Construction, 2023 (3): 8-15.
- [7] 马良,杨进超,杨萍,等. 混凝土抗裂材料应用研究 [J]. 化
  学建材,2008 (3): 43-45.
- [8] DARQUENNES A, ESPION B, STAQUET S. How to assess the hydration of slag cement concretes? [J]. Construction and Building Materials, 2013 (40): 1012-1020.
- [9] ATIS C D. Heat evolution of high-volume fly ash concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32 (5): 751-756.
- [10] 包天鹏. 水泥与大体积混凝土水化热的放热规律对比分析 [J]. 交通世界, 2021 (23): 29-32.
- [11] 郭东锋. 粉煤灰掺量对机制砂混凝土耐久性能影响研究 [J].
  粉煤灰综合利用, 2021, 35 (4): 111-115.
- [12] 唐力军,刘卫东,陈凯伦. 超细活性粉煤灰对碱激发矿渣体系的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用,2022,38 (4):92-97.
- [13] 何渐渐,张延赫.粉煤灰混凝土轴心抗拉强度与立方体抗压强度关系的试验研究[J].工业建筑,2017,47(4):130-133.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,混凝土结构设计规范:GB 50010—2010 (2015 年版) [S].北京:中国建筑工业出版社, 2015.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部,大体积混凝土施工标准: GB 50496—2018 [S].北京:中国建筑工业出版社,2018.