

基于密实骨架的面板混凝土配合比优化

郭德龙, 闫玲

(中国水利水电第五工程局有限公司 中心试验室, 四川 成都 610066)

摘要: 面板混凝土抗裂一直是水电行业关注的重点, 许多学者对其养护措施、膨胀剂以及抗裂纤维进行了大量、系统的研究。笔者阐述了新疆阿尔塔什水利枢纽工程现场材料通过致密正填配合比试验获得混凝土密实骨架; 按粗骨料、细骨料和粉煤灰逐级优化和填充用以寻求混凝土最小孔隙率以及最低水泥浆体用量, 进而提高面板混凝土体积稳定性以及降低温度裂缝风险的过程。

关键词: 密实骨架; 面板混凝土; 配合比; 阿尔塔什水利枢纽工程

中图分类号: TV7; TV43; TV544; TV641

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)01-0061-04

Optimization of Face Concrete Mix Ratio Based on Dense Skeleton

GUO Delong, YAN Ling

(Central Laboratory, Sinohydro Bureau 5 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610066)

Abstract: The crack resistance of faced concrete has always been the focus of the hydropower industry. Many scholars have carried out a lot of systematic research on curing measures, expansion agents and anti-cracking fibers. This paper explains how to obtain a dense concrete skeleton through dense forward filling ratio test of the on-site materials of Xinjiang Altash Water Conservancy Project; the process of gradually optimizing and filling coarse aggregate, fine aggregate and fly ash to find the minimum porosity of concrete and the lowest amount of cement slurry, so as to improve the volume stability of face concrete and reduce the risk of temperature cracks.

Keywords: Dense skeleton; Faced concrete; Mix ratio; Altash Water Conservancy Project

1 概述

新疆阿尔塔什水利枢纽工程为叶尔羌河干流山区下游河段的控制性工程, 因其在设计、施工等方面面临诸多技术难点、具有三高一深的特点(高坝、高边坡、高地震烈度、深厚覆盖层), 被业内专家称为“新疆的三峡工程”。该水利枢纽工程挡水坝为混凝土面板砂砾石堆石坝, 坝顶宽度为 12 m, 坝长 795 m, 面板混凝土浇筑量为 12 1349 m³, 混凝土设计强度等级为 C30、抗渗标号为 W12、抗冻标号为 F300。面板顶部的厚度为 0.40 m, 面板底部的厚度为 0.96 m。与普通水工大体积混凝土不同, 该面板混凝土为典型薄型长条板状结构, 其长、宽、厚三向尺寸相差悬殊, 所产生裂缝的几率比普通水工大体积混凝土更大。笔者结合工程材料, 采用配合比试验寻找最小空隙率以及各种材料的最佳填充率, 旨在优化最低水泥浆富余、对面板配比进行优化以保证面板混凝土具有良好

的经济性、体积稳定性和抗裂性, 并对这一过程进行了阐述。

2 混凝土配合比选用的原材料

(1) 水泥: 采用叶城天山水泥厂生产的 P. O42.5 水泥进行试验。其物理性能检测稠度为 25.6%、比表面积为 355 m²/kg、凝结时间为初凝 205 min, 终凝 281 min, 3 d 抗折强度为 5.7 MPa、28 d 抗折强度为 7.0 MPa、3 d 抗压强度为 20.4 MPa、28 d 抗压强度为 45.6 MPa。化学成分检测结果为: SO₃ 为 2.4%, MgO 为 1.6%, Cl⁻ 为 0.05%, 碱含量结果为 0.97%。所有检测结果均满足《通用硅酸盐水泥标准要求》GB 175-2007。

(2) 粉煤灰: 采用喀什华电粉煤灰厂生产的 I 级粉煤灰进行检测, 其物理性能检测细度为 9.9%, 需水量比为 94%, 含水量为 0.2%。其化学性能检测结果为: 烧失量为 4.2%, 氯离子为 0.006%, 碱含量为 1.72%, 三氧化硫为 0.8%; 其游离氧化钙为 0.8%。所有检测结果均满足《水工混凝土

收稿日期: 2023-10-16

掺用粉煤灰技术规范》DL/T 5055—2007 I 级粉煤灰标准要求。

(3)细骨料:采用该水利枢纽工程现场 C3 料场天然骨料破碎的人工骨料,其物理性能检测表观密度为 $2\ 710\text{ kg/m}^3$,堆积密度为 $1\ 620\text{ kg/m}^3$,吸水率为 1.1% ,细度模数为 2.66 ,石粉含量为 7.8% ,云母含量为 0.1% 。化学性能检测其坚固性为 6.0% ,硫化物及硫酸盐含量为 0.39% ,轻物质含量为 0.20% ,氯离子含量为 0.02% 。所有检测结果均满足《水工混凝土施工规范》SL 677—2014 要求。

(4)粗骨料:采用该水利枢纽工程现场 C3 料场天然骨料破碎混合掺配的人工骨料,其骨料粒径分别为 $5\sim 20\text{ mm}$ 和 $20\sim 40\text{ mm}$,物理性能检测粒径 $5\sim 20\text{ mm}$ 的表观密度为 $2\ 720\text{ kg/m}^3$,粒径 $20\sim 40\text{ mm}$ 的表观密度为 $2\ 730\text{ kg/m}^3$;粒径 $5\sim 20\text{ mm}$ 的堆积密度为 $1\ 580\text{ kg/m}^3$;粒径 $20\sim 40\text{ mm}$ 的堆积密度为 $1\ 590\text{ kg/m}^3$;粒径 $5\sim 20\text{ mm}$ 的吸水率为 0.50% ,粒径 $20\sim 40\text{ mm}$ 的吸水率为 0.42% ;粒径 $5\sim 20\text{ mm}$ 的针片状为 5% ,粒径 $20\sim 40\text{ mm}$ 的针片状为 3% ;压碎指标为 6.9 ;粒径 $5\sim 20\text{ mm}$ 的含泥量为 0.4% ,粒径 $20\sim 40\text{ mm}$ 的含泥量为 0.3% ;粒径 $5\sim 20\text{ mm}$ 的软弱颗粒含量为 2% ,粒径 $20\sim 40\text{ mm}$ 的软弱颗粒含量为 2% 。化学性能检测结果为:粒径 $5\sim 20\text{ mm}$ 的坚固性为 2.0% ,粒径 $20\sim 40\text{ mm}$ 的坚固性为 1.2% ;粒径 $5\sim 20\text{ mm}$ 的硫化物及硫酸盐含量为 0.24% ,粒径 $20\sim 40\text{ mm}$ 的硫化物及硫酸盐含量为 0.27% ;氯离子含量为 0.002% 。所有检测结果均满足《水工混凝土施工规范》SL 677—2014 要求。

(5)减水剂:采用石家庄市长安育才建材有限公司生产的 GK—3000 磷酸基改性聚羧酸减水剂,混凝土外加剂按《混凝土外加剂高性能减水剂(缓凝型)技术指标》GB 8076—2008 进行检测,其性能检测得到的混凝土外加剂减水率为 32.4% ,含气量为 2.5% ,泌水率比为 65% ,凝结时间差为 $+125\text{ min}$, 7 d 抗压强度比为 153 , 28 d 抗压强度比为 143 , 28 d 收缩率比为 60 , 1 h 坍落度经时变化为 25 mm ,碱含量为 3.1% ,氯离子含量为 0.06% 。所有检测结果均满足《混凝土外加剂高性能减水剂(缓凝型)技术指标》GB 8076—2008 要求。

(6)引气剂:采用石家庄市长安育才建材有限

公司生产的 GK—9A 引气剂,混凝土外加剂按《混凝土外加剂高性能减水剂(缓凝型)技术指标》GB 8076—2008 进行检测,其性能检测得到的混凝土引气剂减水率为 8.6% ,含气量为 5.2% ,泌水率比为 52 ,凝结时间差:初凝为 $+50\text{ min}$,终凝为 55 min ; 3 d 抗压强度比为 112 , 7 d 抗压强度比为 104 , 28 d 抗压强度比为 98 , 28 d 收缩率比为 75% , 1 h 含气量经时变化为 -0.6% ,相对耐久性为 95% ,碱含量为 4.2% 、氯离子含量为 0.15% 。所有检测结果均满足《混凝土外加剂引气剂标准》GB 8076—2008 要求。

3 研究采用的配合比试验方法

混凝土配合比所用的骨料、粉煤灰搭配的紧密堆积密度和混凝土拌和物和易性测试以及空隙率计算方法均按照《水工混凝土试验规程》SL 352—2020 进行。

文中所述所有试件均采用标准养护,试件成型后的温度为室内 $20\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$,静置 24 h ,然后拆模放入标准养护室,待其 3 d , 7 d 和 28 d 龄期达到后取出进行混凝土性能测试。对混凝土性能的测试均采用《水工混凝土试验规程》SL 352—2020 进行。混凝土性能包括:抗压强度、劈拉强度及自由体积变形。

对混凝土抗裂性能进行了评定。其早期抗裂采用《混凝土结构耐久性设计与施工指南》CCES01—2004 中的平板法进行。

4 试验结果与分析

4.1 粗骨料空隙率优化

将粒径为 $5\sim 20\text{ mm}$ 和粒径 $20\sim 40\text{ mm}$ 的粗骨料按图 1 进行搭配,测试其堆积密度以寻找最低空隙率的搭配比例。石子的搭配与空隙率关系见图 1。

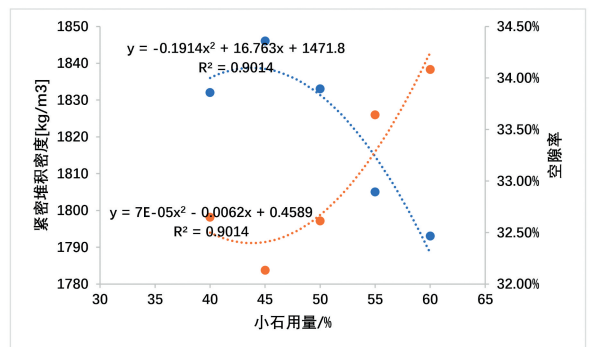


图 1 石子的搭配与空隙率关系图

对测试数据进行二次函数模拟(图 1, 拟合度为 0.9), 然后对函数进行一次求导, 确定导数为 0 的极值点。由此可得: 粒径为 5~20 mm 骨料的用量为 44% 时, 粗骨料空隙率最低为 32.1%。

4.2 细骨料、粉煤灰填充优化

将细骨料与粗骨料进行搭配并测试其紧密堆积密度。研究选定砂率为 33%~42% 进行测试, 所取得的数据为 39%。

对图 1 进行二次函数拟合(拟合度为 0.94) 后得到二次函数, 对该函数求导, 寻找导数为 0 的极值点得到砂率为 39% 时其粗细骨料搭配具有最紧密的堆积密度。在此基础上, 添加 2.5%~4.5% (粉煤灰重量/(粉煤灰重量+粗细骨料)) 的粉煤灰, 测试粉煤灰和粗细骨料搭配的最紧密堆积密度可以得到拟合函数网络。砂率与紧密堆积关系见图 2。

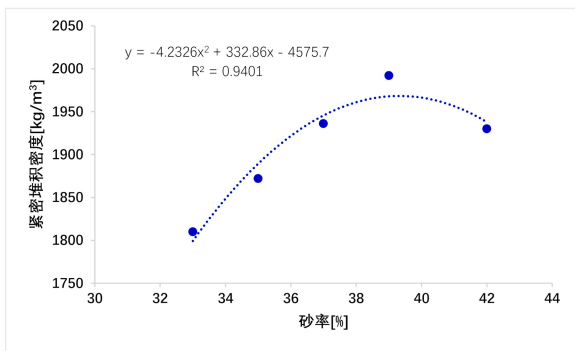


图 2 砂率与紧密堆积关系示意图

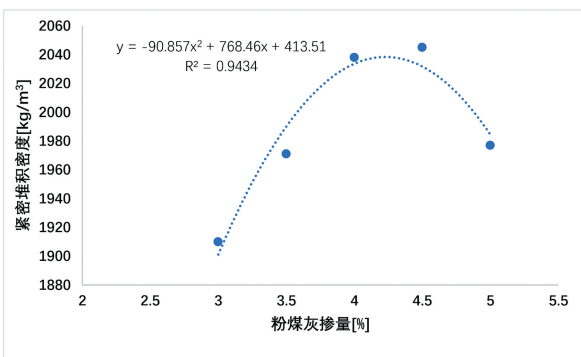


图 3 粉煤灰搭配骨料的紧密堆积密度关系图

同理, 对图 2 中的抛物线函数进行了一阶求导, 并令其为 0, 找到极值为粉煤灰用量的 4.2%, 达到最大堆积密度 2 038 kg/m³。

4.3 浆体体积的确定

混凝土中的浆体需要填充骨料中的空隙并提供富余浆体以保证施工混凝土的和易性, 但因其

水泥浆用量过高, 在施工过程中得到优化后其体积稳定性和经济性均会下降, 因此, 需要找到在保证施工现场混凝土和易性良好的前提下的最低水泥浆用量。但是, 混凝土致密正填配合比设计中的浆体富余系数均是基于流态混凝土^[4-5] 的, 其不适用于面板混凝土。因此, 此次研究优化采用试配法用以筛选最低水泥浆体体积用量。浆体体积试验配合比见表 1。

笔者对以上试配进行了强度和工作性测试, 取得的数据见表 2。不同水泥浆体的工作性和强度情况见表 2。

表 1 浆体体积试验配合比表 / (kg · m⁻³)

编号	水	水泥	粉煤灰	细骨料	粗骨料粒径 5~20 mm	粗骨料粒径 20~40 mm
1	120	235	86	764	526	669
2	123	243	85	760	523	666
3	126	249	85	757	521	663
4	129	255	84	753	518	660

注: 减水剂掺量为 1%, 引气剂掺量为 0.08%。掺量均为胶凝材料的质量百分比; 骨料均为饱和面干。

表 2 不同水泥浆体的工作性和强度表

编号	坍落度 /mm	抗压强度 /MPa	
		7 d	28 d
1	65	31.5	38.5
2	75	31.2	38.9
3	85	31.6	39.1
4	85	31.2	38.1

由表 2 可以看出: 不同水泥浆体的体积对混凝土强度的影响不大, 但其对坍落度有一定影响。随着浆体体积的增加, 坍落度从 65 mm 增加到 85 mm, 其用水量为 126 kg 时与 129 kg 时的和易性相同, 强度相近, 故该工程最终选择的用水量为 126 kg/m³、水泥为 249 kg/m³、粉煤灰为 85 kg/m³ (编号 3) 作为推荐配合比。

5 实际工程应用效果

在该水利枢纽工程施工过程中, 笔者对面板混凝土优化前后的配合比进行了抗裂性与经济性对比, 并将优化后的配合比在实体施工过程中进行了应用。混凝土配合比优化前后的胶材用量及力学性能见表 3。

优化前后的配合比在力学性能上未出现明显的变化, 均满足强度等级 C30 的要求。优化后的配合比能够节约水泥 14 kg/m³, 粉煤灰 4 kg/m³, 每 m³ 共计节约约 8 元。

笔者采用平板法对混凝土抗裂性能进行了对比。

混凝土配合比优化前后的抗裂性能对比见表4。从表4可以看出:虽然混凝土抗裂等级在其优化前后不加入纤维与抗裂防水剂的前提下均属于Ⅱ级,但其开裂时间延长了118 min,开裂面积下降了61%,单位开裂面积下降了50%,总体而言

表3 混凝土配合比优化前后的胶材用量及力学性能表

配合比	水 /kg	水泥 /kg	粉煤灰 /kg	抗压强度 /MPa		劈拉强度 /MPa	
				7 d	28 d	7 d	28 d
优化前	130	263	87	31.2	39.2	2.65	3.31
优化后	126	249	83	31.6	39.1	2.62	3.28

表4 混凝土配合比优化前后的抗裂性能对比表

配合比	开裂时间 /min	开裂面积 /(mm ² ·条 ⁻¹)	单位面积裂缝数目 /(条·mm ⁻²)	单位开裂面积 /(mm ² ·m ⁻²)	抗裂性等级
原配合比	368	6.2	15.3	92.4	Ⅱ
优化配比	486	2.4	12.2	45.3	Ⅱ

表5 配合比优化前后干缩测试结果表

配比	干缩 (×10 ⁻⁶)			
	3 d	7 d	14 d	28 d
优化前	60	144	225	348
优化后	50	122	198	304

6 结语

笔者应用致密正填配比试验对面板混凝土配合比进行了优化,并在该水利枢纽工程面板工程中进行了应用,对其在力学性能、抗裂性能与收缩性能方面进行了对比,取得了以下结论:

(1)通过致密正填试验优化后的混凝土抗压、劈拉强度与原配合比并无明显差别,混凝土7~28 d强度增长率与基准配合比相当;

(2)配合比优化后能够节约水泥14 kg/m³,粉煤灰4 kg/m³,每m³节约约8元,具有良好的经济性;

(3)配合比优化后的混凝土早期抗裂性得以

(上接第53页)

工程成本、通风效果和维护难度等因素,做出合理的决策。

参考文献:

- [1] 孙宏莉,张文涛,周阳.小断面长距离引水隧洞施工通风技术[J].内江科技,2012,33(3):112-123.
- [2] 李振.小断面长距离水工隧洞通风技术研究[J].安防科技,2020,20(23):1.
- [3] 李云,郑道明.中、小断面长距离隧洞开挖通风技术研究

配合比优化提高了混凝土抗裂性能。笔者根据《大体积混凝土施工标准》GB 50496—2018附录B对配合比优化前后进行了绝热温升验算,优化后的配合比降低了绝热温升3℃,意味着面板混凝土(线性膨胀率10⁻⁵/℃)降低收缩为30×10⁻⁶。并对配合比优化前后进行了干缩测试,测试结果见表5。

提高,开裂面积下降了61%,单位开裂面积下降了50%;

(4)配合比优化后其绝热温升降低了3℃,混凝土28 d干缩降低了44×10⁻⁶。

参考文献:

- [1] 水工混凝土施工规范,SL 677-2014[S].
- [2] 吴伟,刘昭洋,叶子,等.降黏型减水剂对混凝土流变性的影响[J].四川建材2017,43(11):16-18.
- [3] 混凝土外加剂,GB 896-2008[S].
- [4] 刘军,王玲玲,王东山,等.混凝土矿质混合料致密配比设计模式分析[J].哈尔滨工业大学学报,2004,36(3):356-358.
- [5] 彭予柱,黄兆龙.混凝土致密堆积模式及不同密度骨材的混凝土工程性质[J].北京科技大学学报,2010,32(3):366-369.

作者简介:

郭德龙(1987-),男,甘肃庆阳人,工程师,从事水利水电工程试验检测工作;

闫玲(1990-),女,四川成都人,工程师,从事水利水电工程试验检测工作。(编辑:李燕辉)

[J].四川水力发电,2016,35(增刊2):18-21.

- [4] 张体权.小断面长距离水工隧洞通风技术探讨[J].建筑工程技术与设计,2016,4(11):427-428.
- [5] 张昕.水利水电工程小断面隧洞施工管理应急措施[J].电力系统装备,2018,17(7):239,241.

作者简介:

黄礼维(1988-),男,四川资阳人,科研设计咨询公司部门副主任,副高级工程师,从事建设工程质量与安全管理工作。

(编辑:李燕辉)