



大体积混凝土配合比设计优化策略

余迪，刘志杰

(中交(苏州)城市开发建设有限公司，江苏 苏州 215100)

摘要：大体积混凝土结构的工程质量控制难度较大。在三亚凤凰岛国际邮轮港二期工程施工过程中，为了确保大体积混凝土结构质量满足设计要求，在大体积混凝土正式施工之前，通过模拟现场工况条件进行大体积混凝土试验块的生产、浇筑、养护，并对试验块的内部温度及应变变化规律进行监测，开展优化混凝土配合比设计的研究。通过两组不同混凝土配合比(水胶比分别为0.38、0.40)同条件下的对比试验得出更优的混凝土配合比。结果表明，水胶比为0.38的混凝土方块的核心区最高温度、最大温升、里表温差、最大降温速率均大于混凝土水胶比为0.40的混凝土方块，建议选择后者进行高温地区大体积混凝土施工。

关键词：高温环境；大体积混凝土；配合比设计优化；工况模拟

中图分类号：U 655

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)S2-0109-05

Optimization strategy of mass concrete mix proportion design

YU Di, LIU Zhi-jie

(CCCC(Suzhou) Urban Development and Construction Co., Ltd., Suzhou 215100, China)

Abstract: The engineering quality control of mass concrete structure is difficult. During the construction of Sanya Phoenix Island International Cruise Port phase II project, in order to ensure that the mass concrete structure quality meets the design requirements, before the formal construction of mass concrete, the production, pouring and curing of mass concrete test blocks are carried out by simulating the on-site working conditions, and the internal temperature and strain change laws of mass concrete test blocks are monitored. The optimization of concrete mix proportion design is studied. A better concrete mix proportion is obtained through two groups of comparative tests of different concrete mix proportions (water binder ratios are 0.38 and 0.40 respectively) under the same conditions. The results show that the maximum temperature, maximum temperature rise, internal and external temperature difference and maximum cooling rate of concrete block with water binder ratio of 0.38 are higher than those of concrete block with water binder ratio of 0.40. It is recommended to select water binder ratio of 0.40 for mass concrete construction in high temperature areas.

Keywords: high temperature environment; mass concrete; mix design optimization; working condition simulation

针对在大体积混凝土容易发生开裂的问题，结合实际工程开展研究。采用浇筑不同配合比条件下的混凝土试块，监测其温度及应变，获得各种混凝土配合比对大体积混凝土温度及应变的控制效果，通过对大体积混凝土配合比设计进行研究，提出混凝土配合比的优化策略。

1 工程概况

三亚凤凰岛国际邮轮港二期工程为水工结构类项目，位于三亚湾内已建成的凤凰岛一期工程西南侧，紧靠一期人工岛的水域开阔区域，见图1。工程主要施工内容是人工岛的陆域形成及码头建设，其主要结构形式为重力式沉箱，现浇L形

胸墙及预制方块，均属于大体积混凝土结构^[1]。

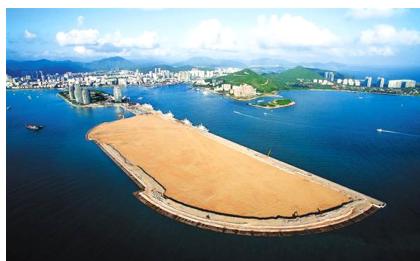


图 1 工程现场

施工区域年平均气温 25.0 ℃，其中 6 月份最高，为 28.5 ℃，12 月份最低，为 22.0 ℃。常规措施是否适用于三亚地区这种高温高湿地区的大体积混凝土施工，目前尚不清楚。因此，为了确保工程中大体积混凝土施工的质量，防止温度应力造成混凝土开裂现象的出现^[2]，拟从混凝土配合比优化施工控制策略的角度展开研究。基于长期在线监测系统，获取不同配合比施工条件下的混凝土内部温度及应变变化分布规律^[3]，通过试

验数据，评价各个配合比的优劣，以此得出高温地区大体积混凝土浇筑施工过程中的最优配合比。

2 方案设计

2.1 工况模拟及配合比设计

选取 2 块边长为 2.5 m、厚度为 1.3 m 的大体积混凝土方块为监测对象，通过实时在线监测系统，针对不同配合比的混凝土方块，监测其内部温度及应变状态^[4]，获取不同配合比下混凝土内部的温度及应变变化分布规律，以检验配合比对应变的控制效果。

根据拟研究的大体积混凝土温度应力控制策略，设计 2 种原型监测试验工况，分别为：混凝土配合比调整施工（Block1）、正常施工（Block2），其中 Block2 混凝土配合比水胶比为 0.40，Block1 混凝土配合比水胶比为 0.38，采用的配合比见表 1。2 种试块同时浇筑，浇筑 1 d 后拆模。

表 1 混凝土配合比设计及试验结果

配合比类型	强度等级	水胶比	配合比/(kg·m ⁻³)				石子粒径/mm	坍落度/mm	抗压强度/MPa			
			P·O 42.5 水泥	粉煤灰	砂	水			7 d	28 d		
正常施工	C35	0.40	330	83	762	1 010	165	6.2	12~30	165	35.2	44.2
调整施工	C35	0.38	347	87	753	998	165	6.5	12~30	135	42.7	48.6

注：混凝土品牌为海岛昌江。

2.2 温度监测点布置

根据 GB 50496—2018《大体积混凝土施工规范》^[5]规定，沿混凝土浇筑体厚度方向，必须布置外面、底面和中间温度测点，混凝土浇筑体的外表温度，宜为混凝土外表面以内 50 mm 处的温度，混凝土浇筑体底面的温度，宜为混凝土浇筑底面上 50 mm 处的温度；同时，大体积混凝土浇筑体内监测点的布置，应真实反映出混凝土浇筑体内最高温升、里表温差、降温速率及环境温度。按照上述规定，每个混凝土块在距顶面 50 mm、距底面 50 mm 及块体中间位置 3 层分别设置温度及应变测点^[6]，每块共设置 16 个测点，每个测点各布置 1 支温度传感器和 1 支应变传感器，测点布置见图 2^[7]。

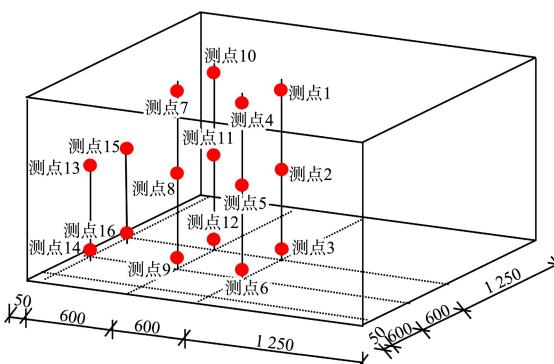


图 2 测点布置（单位：mm）

为了方便统计，对各个温度监测点进行编号。其中，测点的命名方式为：方块号-横轴号-纵轴号-由底部向上的编号-参数标识号，如 B1-3-B-2-t 表示 Block1-横轴号 3-纵轴号 B-由底部往上数第 2 点-温度，B1-3-B-2-s 表示 Block1-横轴号 3-纵轴号 B-由底部往上数第 2 点-应变。

同时, 为了测量环境温度, 在混凝土浇筑现场附件设置混凝土温度监测点, 光纤光栅温度传感器安装在百叶箱内。

3 基于监测数据的混凝土配合比优化对比分析

为了进行混凝土配合比优化设计, 获取适用于高温地区大体积混凝土施工的最优配合比, 可有效控制温度应力, 防止大体积混凝土开裂。因此, 本工程设计实施了两种配合比的混凝土方块温度场及应变的监测试验, 两种配合比见表 1, 这些混凝土均在正常条件下施工^[8]。

经过 73 d 连续监测, 获取了混凝土方块从浇筑到养护完成整个过程的温度变化及应变变化数据, 其中数据采集频率采用 1 Hz, 足以实现整个过程中各种细微状态的数据采集, 最终采集 627 万个数据, 对分析混凝土的温度及应变状态十分有效。

通过数据滤波、去噪、平滑等数据处理, 获取两种不同配合比混凝土的温度及应变变化曲线, 同时监测整个混凝土固化过程的环境温度^[9], 其中环境温度变化曲线见图 3, 混凝土水胶比为 0.40 和 0.38 的混凝土块的核心区温度见图 4。

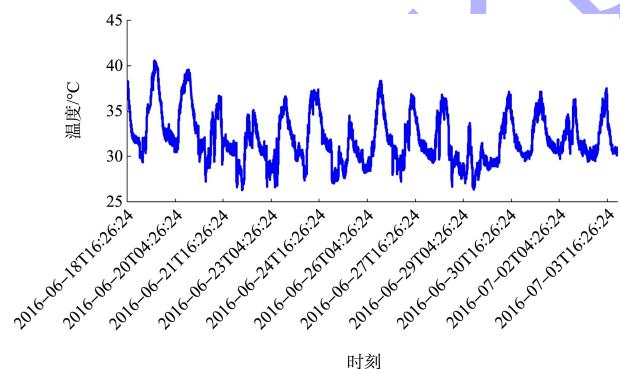
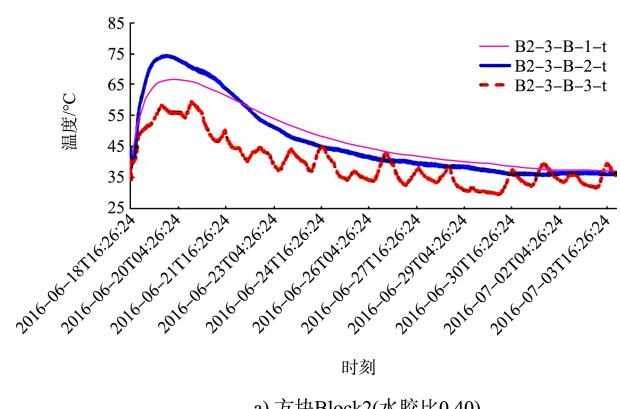
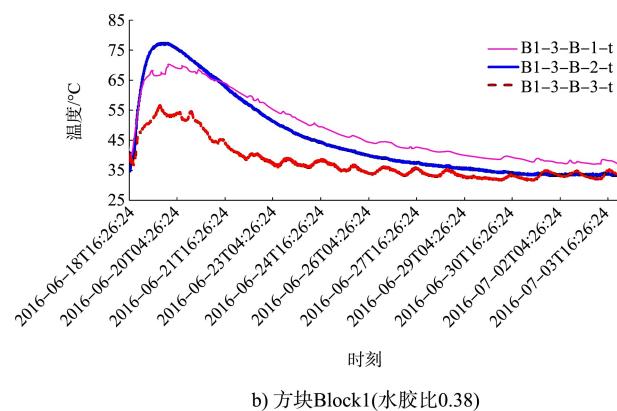


图 3 混凝土固化过程中环境温度变化曲线



a) 方块 Block2(水胶比 0.40)



b) 方块 Block1(水胶比 0.38)

图 4 核心区位置的温度变化曲线

为了对比分析两种配合比在控制混凝土温度场的优劣, 从混凝土固化过程中的最大温升、里表温差、表面与大气温差等方面进行对比^[10], 分析两种配合比在上述指标上的差异, 以判定优劣。其中, 最大温升是指混凝土浇筑体在入模温度基础上的最大温升值, 最大不宜超过 50 °C; 里表温差是指混凝土浇筑块体(不含混凝土收缩的当量温度)的混凝土核心区与表面的温差, 最大不宜超过 25 °C; 降温速率是指混凝土浇筑块体核心区在达到温度最大值后 1 d 的温度降低值, 最大不宜超过 2 °C/d; 表面与环境温差是指混凝土浇筑体表面与大气温差的温差, 最大不宜超过 20 °C。

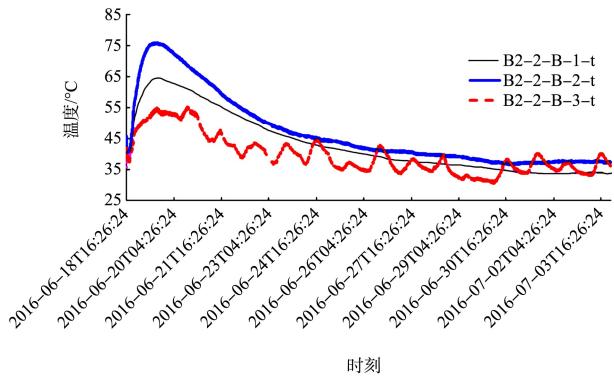
通过数据处理, 得到两种不同混凝土配合比方块(Block1 和 Block2)的最大温升、里表温差、表面与大气温差的相关数据, 见表 2。可以看出, 混凝土水胶比为 0.38 的混凝土方块(Block1)的核心区最高温度、最大温升、里表温差、最大降温速率均大于混凝土水胶比为 0.40 的混凝土方块(Block2)。因此, 可以判断水胶比为 0.40 的混凝土配合比更利于大体积混凝土浇筑过程中的温度场控制, 应选择水胶比为 0.40 的混凝土进行高温地区大体积混凝土施工。

尽管表面与环境温差数据得出相反的结果, 但是该指标是与环境温度相关的参数, 而非仅与混凝土本身相关, 且属于《大体积混凝土施工规范》3.0.4 条中所列示指标的最后一条, 因此, 给出上述结论是合理、可行的。

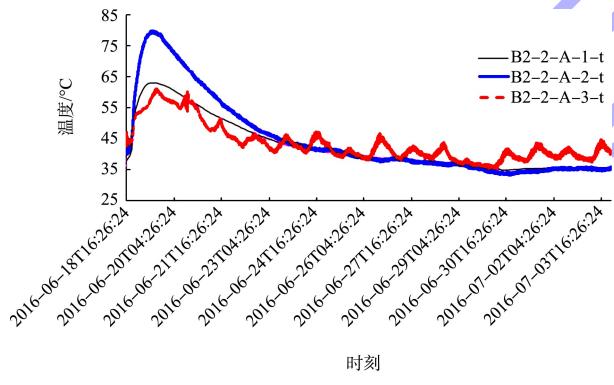
表 2 不同混凝土配合比温度场参数对比

方块编号	入模温度/℃	最高温度/℃	最大温升/℃	表面温度/℃	里表温差/℃	最大值后 1 d 温度/℃	最大降温速率/(℃·d⁻¹)	环境温度/℃	表面与环境温差/℃
Block1	37.8	77.4	39.6	56.5	20.8	71.8	5.6	39.3	17.2
Block2	39.1	74.4	35.3	57.0	17.4	70.1	4.3	33.4	23.6
规定	-	-	不宜大于 50	-	不宜大于 25	-	不宜大于 2	-	不宜大于 20

除上述分析的监测点位外，也相应获取了 2.2 节布置测点的温度场及应变变化曲线，典型的温度变化曲线见图 5，典型的应变变化曲线见图 6。

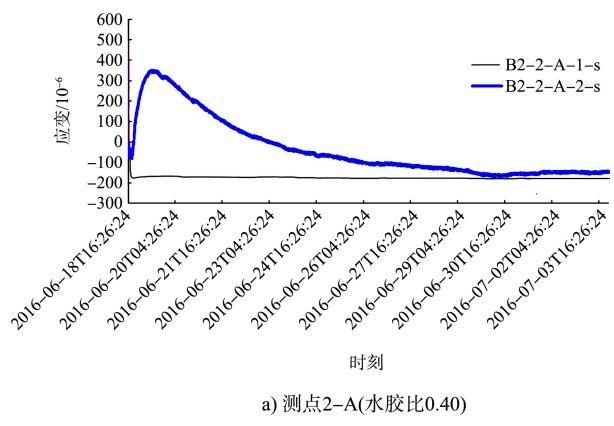


a) 测点2-B(水胶比0.40)

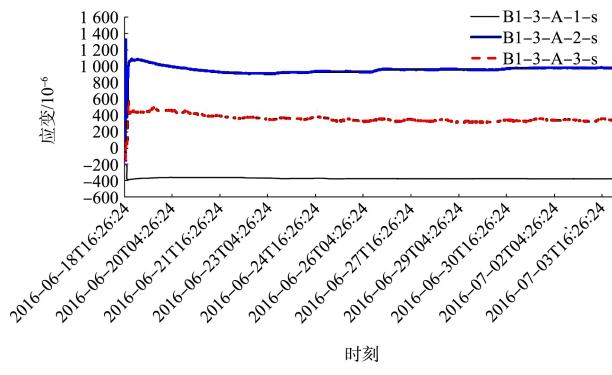


b) 测点2-A(水胶比0.40)

图 5 典型的温度变化曲线



a) 测点2-A(水胶比0.40)



b) 测点2-A(水胶比0.38)

图 6 典型的应变变化曲线

为了从应变变化的角度分析两种配合比在控制混凝土应变方面的优劣，现从混凝土固化过程中混凝土核心区的应变分布状态进行对比分析，分析两种配合比下的混凝土核心区应变状态的差异，以判定两种配合比的优劣。

通过长期监测及数据处理，获取了两种不同混凝土配合比方块 (Block1 和 Block2) 的核心区应变状态，见图 7。其中，图中的应变方向拉为正，压为负。通过对比可知，混凝土浇筑振捣时对应变传感器有明显的影响。在排除混凝土浇筑振捣过程引起的应变突变后，2 个混凝土方块的核心区应变均随着混凝土固化放热过程逐步增大，当水化热释放完毕后，应变逐步降低，降低到一定程度后应变趋于稳定。并且，布置于方块底面 1 点受到混凝土的重力荷载，产生压应变^[11]，但应变受水化热的影响稍小，两者的应变时程曲线在整个混凝土固化过程中基本趋于直线。混凝土方块上表面测点 3 的应变曲线，Block1 和 Block2 趋势相反，主要原因是由于内部固结造成 Block2 中测点 3 的局部收缩。

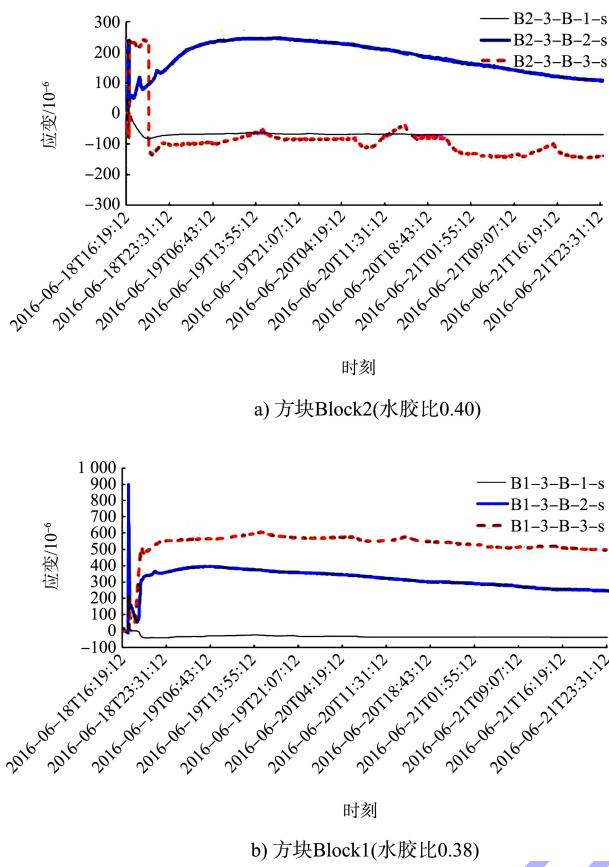


图 7 核心区的应变变化曲线

从总体上看, Block2 的核心区因水化热造成的拉应变最大值为 248×10^{-6} , 而 Block1 的应变最大值为 395×10^{-6} , 由此可知, 混凝土水胶比为 0.38 的混凝土方块 (Block1) 的核心区由水化热造成的拉应变大于混凝土水胶比为 0.40 的混凝土方块 (Block2), 因此, 可以判断水胶比为 0.40 的混凝土配合比更利于大体积混凝土浇筑过程中的温度场控制, 应选择水胶比为 0.40 的混凝土进行高温地区大体积混凝土施工, 这与基于温度场数据分析得出的结论一致。

4 结论

1) 基于结构健康监测的设计理念, 针对配合比优化施工策略下的混凝土方块温度场及应变的监测, 设计高温地区大体积混凝土温度及应变长期在线监测系统, 布置相应测点, 选择光纤光栅温度传感器和光纤光栅应变传感器。监测系统使用 1Hz 的采样频率获取了完整精确的温度及应变

变化数据, 较 2.5 h 间隔的采样频率监测数据更加完整, 避免了温度及应变最大值的丢点, 造成数据不准确。

2) 基于两种配合比 (水胶比分别为 0.40 和 0.38) 的混凝土方块固化过程中的温度及应变数据, 通过对比分析可知, 水胶比为 0.38 的混凝土方块的核心区最高温度、最大温升、里表温差、最大降温速率均大于混凝土水胶比为 0.40 的混凝土方块, 这一现象在应变的数据对比分析中也得到了印证。因此, 建议选择水胶比为 0.40 的混凝土进行高温地区大体积混凝土施工。

参考文献:

- [1] 宋俊强.三亚凤凰岛国际邮轮港二期工程施工组织设计[R].天津:中交天津航道局有限公司, 2015.
- [2] 叶琳昌, 沈义.大体积混凝土施工[M].北京:中国建筑工业出版社, 1987.
- [3] 刘红彪.高温地区大体积混凝土温度控制及配合比优化研究报告[R].天津:交通运输部天津水运工程科学研究所, 2016.
- [4] 范奎.大体积混凝土水化温度场仿真计算与实测技术研究[D].杭州:浙江大学, 2005.
- [5] 中冶建筑研究总院有限公司, 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司.大体积混凝土施工规范: GB 50496—2018[J].北京:中国建筑工业出版社, 2018.
- [6] 王振波.混凝土温度损伤模型研究[D].南京:河海大学, 2001.
- [7] 钟登华, 朱慧蓉, 郑家祥.溪洛渡施工总布置三维动态可视化图形仿真研究[J].中国工程科学, 2003, 5(11): 65-70, 91.
- [8] 谢培忠.小湾水电站高拱坝施工技术研究[J].水力发电, 2001(8): 76-77.
- [9] 张涛, 黄达海, 王清湘, 等.沙牌碾压混凝土拱坝温度徐变应力仿真计算[J].水利学报, 2000(4): 1-7.
- [10] 陈应波, 李秀才, 张雄.大体积混凝土浇筑温度场的仿真分析[J].华中科技大学学报(城市科学版), 2004, 21(2): 37-39.
- [11] 朱伯芳.混凝土的弹性模量、徐变度与应力松弛系数[J].水利学报, 1985(9): 54-61.