



船闸混凝土抗裂性能试验研究及 开裂风险评估^{*}

潘利¹, 嵇旭红², 周泽聪¹, 王育江¹, 姚婷¹

(1. 江苏苏博特新材料股份有限公司, 高性能土木工程材料国家重点实验室, 江苏南京 211103;

2. 常州市港航事业发展中心, 江苏常州 210096)

摘要: 针对船闸大体积混凝土容易发生开裂的问题, 通过室内试验研究不同配合比混凝土的热力学及变形性能, 并基于多场耦合模型对廊道结构混凝土进行开裂风险评估计算。研究结果表明: 混入抗裂剂减小混凝土干燥收缩且自生体积变形初期产生较大膨胀, 显著提升混凝土体积稳定性和抗裂性能; 抗裂剂可降低船闸廊道结构混凝土最大开裂风险系数 40% 以上, 控制廊道混凝土各部位开裂风险在 0.7 以下, 大大降低了结构混凝土开裂风险。

关键词: 船闸; 大体积混凝土; 抗裂性能; 开裂风险评估

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0196-05

Crack resistance and cracking risk assessment of ship lock concrete

PAN Li¹, JI Xuhong², ZHOU Zecong¹, WANG Yujiang¹, YAO Ting¹

(1. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Jiangsu Sobute New Materials Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

2. Changzhou Port and Shipping Development Center, Changzhou 210096, China)

Abstract: Regarding the cracking problem of mass concrete of ship lock, the thermodynamic and deformation properties of concrete with different mix ratios are studied by laboratory tests. Based on multi-field coupling model, cracking risk calculation of corridor structure concrete has been carried out. The research results show that the addition of anti-cracking agent reduces the drying shrinkage and produces large expansion at the initial stage of autogenous volume deformation, which significantly improves the volume stability and anti-cracking performance of concrete. The anti-cracking agent can reduce the maximum cracking risk coefficient of the ship lock corridor structure concrete by more than 40%, and make the cracking risk of the corridor concrete below 0.7, which greatly reduces the risk of structural concrete cracking.

Keywords: ship lock; mass concrete; cracking resistance; cracking risk assessment

随着水运行业的快速发展, 我国多座大型船闸陆续建成并投入运行, 在船闸建设、运行、养护等方面积累了丰富的实践经验, 但船闸混凝土开裂、耐久性等问题也逐步显现。船闸结构形式相对复杂、截面尺寸多变, 混凝土内部水化温升、温度应

力以及应力集中现象较为突出, 已建成的船闸混凝土开裂问题普遍, 裂缝大多分布在廊道、闸室墙墙身及倒角、大体积混凝土底板侧表面等, 类型包括贯穿裂缝和表面裂缝, 宽度 0.1~0.5 mm、长度几厘米至数米不等^[1-4]。

收稿日期: 2022-07-27

*基金项目: 江苏省交通运输科技与成果转化项目 (WCSN-KY1)

作者简介: 潘利 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事水工混凝土技术研究工作。

大体积混凝土温度应力和开裂研究始于水利水电工程、港口建筑物等大体积混凝土结构, 以朱伯芳^[5]、王铁梦^[6]为代表的的研究人员提出了系统的温度应力及温度裂缝计算方法, 成为控制大体积混凝土裂缝的主要依据。但已有规范及研究采用的评估计算模型仍以经验拟合模型为主。近年来, 针对实际工程结构混凝土处于材料、环境变化和内外部约束等一系列复杂作用中, 以及上述过程存在湿、热、化学现象且两者或三者交互作用, 进而建立相关的数学模型分析此作用成为当前研究的最新趋势^[7-8]。

在船闸等水工大体积混凝土抗裂性提升方面已开展了大量研究工作。范洪浩等^[9]通过采取调整构造钢筋直径和间距、设置施工宽缝、调整冷却水管等措施, 取得了较好的控裂效果; 王超等^[10]从温控措施方面研究了水管冷却对船闸底板大体积混凝土的影响; 李华等^[11]研究了氧化镁膨胀剂对船闸施工期混凝土抗裂性的影响; 刘子睿^[12]从试验和数值模拟方面研究了玄武岩纤维对船闸输水廊道混凝土抗裂性能的影响。船闸工程中已采取了防裂措施, 如优化结构设计、抗裂混凝土配合比设计、控制混凝土入模温度、低温水拌合等^[13-14], 但仍难以避免裂缝产生, 造成后期维修成本高、效果差, 对结构的服役功能和耐久性造成负面影响, 并且当前技术措施并未在施工前对应用效果进行评估计算, 缺少对措施可行性的准确判断。针对目前船闸大体积混凝土开裂问题突出的现状, 本文开展船闸混凝土抗裂性相关试验及结构混凝土开裂风险评估计算等研究, 为解决船闸工程混凝土裂缝问题提供技术方法。

1 原材料与配合比

1.1 原材料

1) 水泥: P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 比表面积为 320 m²/kg, 7、28 d 抗压强度分别为 36.4、46.5 MPa, 采用 X 射线衍射分析(XRD)方法对水泥矿物组成定量分析, 其中包括 C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF, 含量分别为 49.0%、15.5%、5.2%、10.8%。

- 2) 煤灰: F 类 I 级粉煤灰, 比表面积为 450 m²/kg, 需水量比为 94%, 烧失量为 3.5%。
- 3) 矿粉: S95 矿粉, 比表面积为 420 m²/kg, 流动度比为 99%, 28 d 活性指数为 95.8%。
- 4) 砂: 天然河砂, 细度模数为 2.4。
- 5) 碎石: 5~25 mm 连续级配碎石, 表观密度为 2 680 kg/m³。
- 6) 减水剂: 聚羧酸高性能减水剂, 减水率为 24.5%。
- 7) 抗裂剂: HME 温度变形双重调控抗裂剂, 主要通过调节混凝土温度历程及补偿收缩作用来提高混凝土抗裂性能, 比表面积为 260 m²/kg。
- 8) 水: 生活用水。

1.2 混凝土配合比

试验中选取单掺粉煤灰、粉煤灰+矿粉、粉煤灰+抗裂剂几种胶凝材料体系的混凝土配合比, 见表 1。3 组配合比的胶凝材料用量均为 350 kg/m³, 其中 A₁ 组为单掺 30% 粉煤灰、A₂ 组为双掺 20% 粉煤灰+10% 矿粉、A₃ 组为双掺 20% 粉煤灰+10% 抗裂剂。

试验组	表 1 混凝土试验配合比 kg/m ³							
	水泥	粉煤灰	矿粉	抗裂剂	砂	碎石	水	减水剂
A ₁	245	105	0	0	718	1 172	157	3.5
A ₂	245	70	35	0	718	1 172	157	3.5
A ₃	245	70	0	35	718	1 172	157	3.5

2 试验结果及分析

2.1 胶凝材料水化热

胶凝材料水化热是大体积混凝土的重要性能指标之一, 放热量及放热速率直接关系到结构混凝土内部温升。试验采用等温量热法对表 1 中各组配合比的复合胶凝材料体系进行水化热测试, 测试仪器为美国 TA 公司生产的 TAM Air 热导式等温量热仪, 可精确测试胶凝材料水化过程中水化放热量、放热速率等关键参数。

复合胶凝材料体系水化热试验结果见图 1。由图 1a) 可知, 单掺粉煤灰(A₁) 试验组 3、7 d 水化热分别为 177.7、225.3 J/g; 双掺粉煤灰和矿粉(A₂) 时水化热增大, 7 d 水化热增加约 10%; 双

掺粉煤灰和抗裂剂(A_3)时水化热降低, 1 d 水化热占7 d 水化热比值23.8%, 较前两组更低, 说明抗裂剂可降低胶凝材料水化热, 尤其是早期水化放热量。由图1b)可知, 单掺粉煤灰时, 胶凝材料体系水化过程中最大放热速率为0.33 mW/g, 双掺粉煤灰和矿粉时最大放热速率增大约15%; 双掺粉煤灰和抗裂剂时最大放热速率为0.20 mW/g, 相比于单掺粉煤灰时降低约40%, 同时最大放热速率出现时间较单掺粉煤灰延迟约7 h。试验结果表明: 在矿物掺合料总掺量一定的情况下, 掺加矿粉增大胶凝材料水化热和放热速率, 不利于控制混凝土温度裂缝; 掺加抗裂剂降低胶凝材料水化放热量和放热速率, 延缓胶凝材料的早期水化, 降低混凝土早期放热量及升温速率, 提升了混凝土抗裂性能。

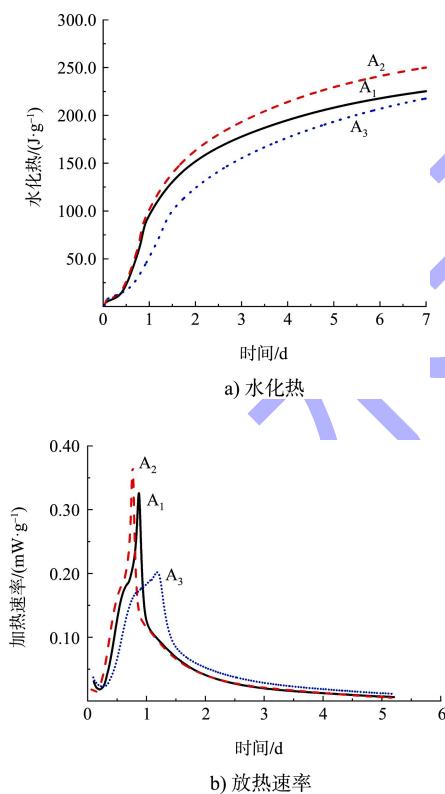


图1 复合胶凝材料体系水化热

2.2 混凝土力学性能

混凝土力学性能以抗压强度和劈拉强度表征, 试验方法参照SL 352—2020《水工混凝土试验规程》, 试件尺寸为150 mm×150 mm×150 mm, 每个龄期以3个试件为1组, 试验结果见表2。A₂组混凝

土试件抗压强度和劈拉强度均高于同龄期A₁组, 28 d 抗压强度提高9.5%; 相比于A₁组, A₃组7 d 抗压强度和抗拉强度降低10%~15%, 28 d 以后强度基本相同。试验结果表明: 相比于单掺粉煤灰, 双掺粉煤灰和矿粉填加的混凝土强度有所提升; 双掺粉煤灰和抗裂剂填加的混凝土早期强度降低, 后期强度基本无负面影响。

表2 混凝土力学性能试验结果

试验组	抗压强度/MPa			劈拉强度/MPa		
	7 d	28 d	56 d	7 d	28 d	56 d
A ₁	30.1	36.8	40.5	2.73	4.25	4.51
A ₂	33.2	40.3	44.6	2.82	4.39	4.67
A ₃	25.6	34.7	41.4	2.38	4.08	4.45

2.3 混凝土变形性能

干燥收缩主要测定硬化混凝土在无外荷载和恒温条件下, 由于干、湿引起的轴向长度变形, 以比较不同混凝土的干缩和湿胀性能。对表2中3组配合比混凝土进行干燥收缩试验, 依据GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行, 结果见图2。3组配合比的混凝土干燥收缩变形趋势基本相同, 早期收缩较大、后期逐渐趋于平稳; A₂组较A₁组干燥收缩增大, 28 d 收缩变形值增大约11%; A₃组较A₁组干燥收缩减小, 28 d 收缩变形值减小约20%。试验结果表明: 掺加矿粉增加了混凝土干燥收缩, 而抗裂剂则降低了混凝土干燥收缩。因为抗裂剂中含有改性膨胀组分, 需水量少、养护湿度要求低, 在相对干燥的环境中仍能参与水化反应, 产生有效膨胀变形, 对混凝土中后期的干燥收缩具有较好的补偿效果。

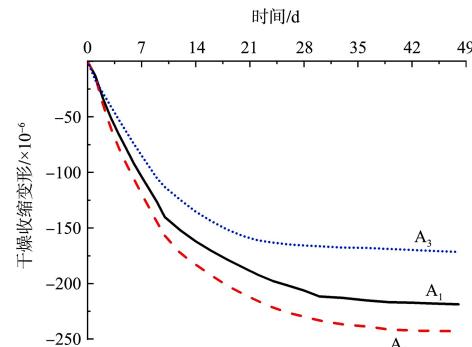


图2 混凝土干燥收缩变形

自生体积变形也是评价混凝土抗裂性能的一项重要指标, 可表征混凝土早龄期自收缩的发展趋势^[15], 对表2中3组不同配合比的船闸混凝土进行自生体积变形试验, 结果见图3。A₁和A₂组混凝土试件自生体积变形始终为收缩, 早期收缩变形速率较大, 后期变形减小, 掺入矿粉后增大了混凝土收缩变形; 掺加抗裂剂的A₃组混凝土试件则始终为膨胀变形, 特别是早期产生了较大的体积膨胀, 7 d 变形值为 104.5×10^{-6} , 28 d 变形值为 94.5×10^{-6} , 相比于单掺粉煤灰产生膨胀变形为 233.6×10^{-6} 。因为抗裂剂中钙类膨胀组分早期产生较大的膨胀效能, 完全消除混凝土的早期自收缩, 因此早期即为膨胀变形。掺加膨胀剂的混凝土28 d 后体积变形基本趋于稳定, 即长期体积稳定性较好。试验结果表明: 矿粉增大了混凝土收缩变形, 增加了结构混凝土产生收缩裂缝的风险, 掺入抗裂剂后具有良好的补偿收缩作用, 有利于减小混凝土收缩、提升混凝土抗裂性能。因此, 对于开裂风险较高的船闸大体积混凝土结构, 应尽量减少矿粉用量, 适量掺加抗裂剂。

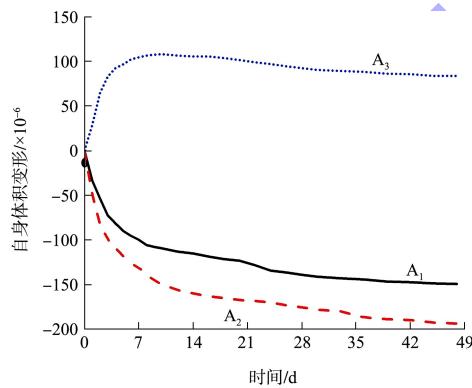


图3 混凝土自生体积变形

3 廊道结构混凝土开裂风险评估

在实体结构中, 混凝土往往处于水化、温度、湿度、约束多场耦合作用的环境下, 体积变形具有多因素耦合作用的本质^[16]。通过建立“水化-温度-湿度-约束”多场耦合条件下混凝土收缩变形模型, 对廊道混凝土结构进行仿真计算, 分析评估抗裂剂对船闸廊道大体积混凝土开裂风险的影响。廊道模型见图4, 选取廊道边墙结构中心和

表面2个特征点。混凝土早期力学、热学、变形等模型参数根据前期试验数据选定, 其中混凝土强度等级为C25、入模温度25℃、绝热温升42℃、28 d 抗拉强度2.5 MPa、28 d 弹性模量值30 GPa。混凝土比热容、导热系数、表面散热系数按规范相关规定选取。

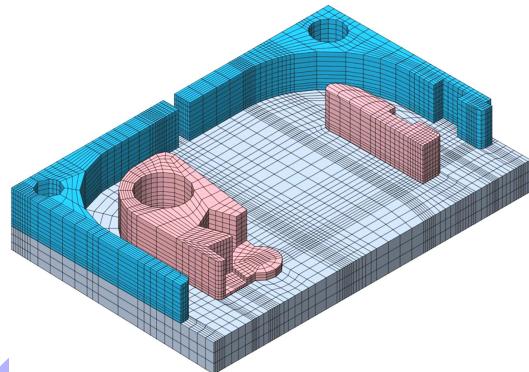


图4 廊道实体模型及网格划分

通过模型对廊道混凝土温度场、应力场进行计算, 基于应力准则评估廊道混凝土开裂风险, 其系数以混凝土第一主拉应力与即时抗拉强度之比表示, 计算公式为:

$$\eta = \sigma_t / f_t \quad (1)$$

式中: σ_t 、 f_t 为 t 时刻混凝土最大拉应力及即时抗拉强度。 $\eta \geq 1$ 时混凝土已经开裂, $0.7 \leq \eta < 1$ 时混凝土有较大可能开裂, $\eta < 0.7$ 时混凝土基本不开裂^[17-18]。

廊道结构混凝土温度历程及开裂风险计算结果见图5, 对比单掺粉煤灰的基准(FA)和掺加抗裂剂(FA+HME)两种混凝土的工况。由图5a)可知, 廊道混凝土中心最高温升约为33.1℃, 最大里表温差约为25℃; 由图5b)可知, 当采用单掺粉煤灰的基准混凝土时, 廊道混凝土中心开裂风险系数大于1.0, 基本已开裂; 表面最大开裂风险系数小于1.0, 但仍大于0.7, 较大可能开裂; 当采用掺加抗裂剂的抗裂混凝土时, 廊道中心和表面开裂风险系数均在0.7以下, 基本不开裂, 中心最大开裂风险系数降低约40%。结果表明: 抗裂剂能够大大降低廊道混凝土的开裂风险, 实现混凝土减少裂缝甚至不开裂的目标。

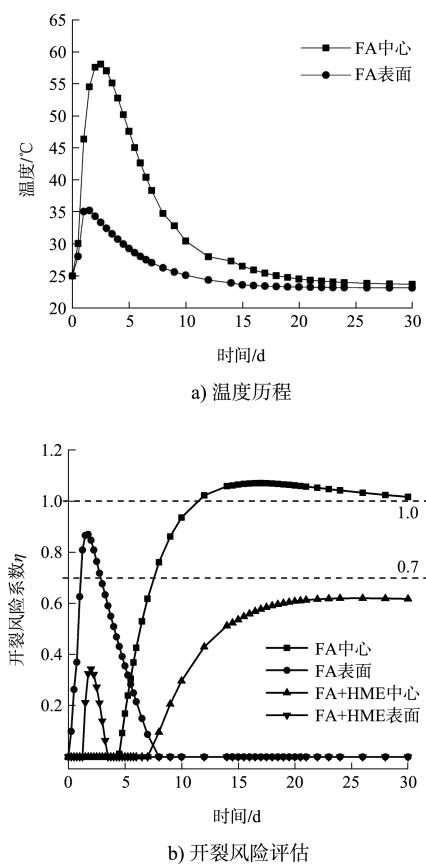


图 5 廊道混凝土温度历程及开裂风险评估

4 结论

1) 在船闸混凝土中掺加抗裂剂, 可延缓水泥水化、降低早期水化热及放热速率, 有利于降低船闸混凝土早期放热量及升温速率, 减少温度裂缝。

2) 相比于单掺粉煤灰, 双掺粉煤灰和矿粉后船闸混凝土抗压及劈拉强度有所提升, 但增大了混凝土的收缩变形, 抗裂剂取代矿粉后, 混凝土早期强度略有降低, 28 d 后强度基本无不利影响, 同时降低了混凝土干燥收缩和自生体积收缩变形, 抗裂剂的补偿收缩作用有利于提升船闸混凝土体积稳定性及抗裂性能。

3) 廊道混凝土开裂风险评估计算表明, 单掺粉煤灰时廊道结构混凝土开裂风险大于 1.0, 开裂风险较高; 使用抗裂剂后廊道结构混凝土最大开裂风险系数降低 40% 以上, 大大减小了混凝土开裂风险, 实现混凝土基本不开裂的目标, 对类似工程具有借鉴意义。

参考文献:

- 涂伟成, 刘松, 张明雷. 船闸大体积混凝土温度及裂缝控制技术[J]. 水运工程, 2015(6): 197-202.
- 何广全. 船闸工程大体积混凝土施工裂缝控制关键技术[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(6): 62-64.
- 鲍颖杰. 新坝船闸输水廊道混凝土裂缝防治措施[J]. 水运工程, 2007(7): 85-88.
- 沈波, 邹新祥, 周效国. 船闸施工中的混凝土质量通病防治[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(5): 114-117, 134.
- 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社. 1999.
- 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社. 2018.
- LUZIO G D, CUSATIS G. Hygro-thermo-chemical modeling of high performance concrete. I: Theory[J]. Cement and concrete composites, 2009, 31(5): 301-308.
- LI H, LIU J P, Wang Y J, et al. Deformation and cracking modeling for early-age sidewall concrete based on the multi-field coupling mechanism [J]. Construction and building materials, 2015(88): 84-93.
- 范洪浩, 邓春林, 余春辉, 等. 小溪滩船闸混凝土结构裂缝控制技术[J]. 水运工程, 2017(2): 110-114.
- 王超, 韩时琳, 罗鹏, 等. 船闸底板大体积混凝土水管冷却效果影响因素分析[J]. 水利水电技术, 2014, 45(1): 111-117, 121.
- 李华, 田倩, 赵海涛. 氧化镁膨胀剂对船闸施工期混凝土开裂风险的影响[J]. 水运工程, 2018(1): 152-159.
- 刘子睿. 船闸输水廊道混凝土抗裂性能研究[D]. 重庆交通大学, 2020.
- 孔繁龙. 船闸混凝土结构裂缝防治综合技术[J]. 水运工程, 2013(3): 158-163, 194.
- 马超. 颖上船闸混凝土温控防裂施工技术研究[D]. 合肥工业大学, 2008.
- 潘利, 徐文, 王育江, 等. 导流洞二次衬砌混凝土抗裂性提升技术研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 92-98.
- 李华, 田倩, 张永胜. 船闸施工期混凝土开裂风险分析[J]. 水运工程, 2016(7): 147-153, 157.
- 刘加平, 田倩. 现代混凝土早期变形与收缩裂缝控制[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- 江苏省建筑科学研究院有限公司. 江苏省高性能混凝土应用技术规程: DB32/T 3696—2019[S]. 江苏: 江苏凤凰科学出版社, 2019.

(本文编辑 赵娟)