

· 施 工 ·



船闸施工期混凝土开裂风险分析*

李 华¹, 田 倩¹, 张永胜²

(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. 江苏省交通工程集团有限公司, 江苏镇江 212016)

摘要: 针对船闸闸首廊道、闸室墙等结构部位大体积、异形结构易开裂的问题, 依托九圩港二线船闸工程, 对混凝土早龄期热、力学和变形性能进行了系统测试。在此基础上, 模拟评估了温度场、应力场和开裂风险, 并与实际监测结果进行对比。结果表明, 廊道外侧长墙、闸室边墙混凝土开裂风险主要来自于表面与环境的温差、内外温差产生的温度梯度, 以及降温过程中底板老混凝土对边墙混凝土的约束。闸室墙早期表面开裂风险超过 1.0, 内部开裂风险在 23.5 d 后达到并超过 0.7; 廊道左侧长墙早期表面开裂风险达到 0.79, 内部开裂风险在 17 d 以后达到并超过 0.7。温度、开裂时间实测结果与计算结果基本吻合。

关键词: 船闸; 混凝土; 早期裂缝; 开裂风险

中图分类号: TU 528.36; U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0147-07

Cracking risk analysis of concrete during construction period for shiplock

LI Hua¹, TIAN Qian¹, ZHANG Yong-sheng²

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

2.Jiangsu Provincial Transportation Engineering Group Co., Ltd., Zhenjiang 212016, China)

Abstract: Relying on the Jiuweigang second-line shiplock engineering, the thermal, mechanical and deformation properties of early-age concrete were tested; on this basis, the temperature field, stress field and the cracking risk of sidewalls in lock chamber and lock head corridor were simulated, and compared with the actual monitoring data. The results show that the cracking risk of sidewall concrete in lock chamber and lock head corridor mainly comes from the temperature difference between the surface and the environment and between the inside and outside, and constraint from slab concrete. The cracking risk of surface concrete in chamber exceeds 1.0 in very early age, and cracking risk of center concrete exceeds 0.7 after 23.5 days; cracking risk of surface concrete in left side corridor is up to 0.79, and cracking risk of center concrete exceeds 0.7 after 17 days. The simulation results of temperature and cracking time agree with the monitoring results.

Keywords: ship lock; concrete; early-age crack; cracking risk

随着国民经济的高速发展以及全球贸易一体化进程的加快, 水路运输在整个交通运输网中的重要作用日益彰显, 船闸作为主要的通航建筑物,

在渠化河流和运河建设中起到了关键的作用^[1-2]。但船闸早期开裂渗漏现象严重影响正常使用和寿命^[3]。船闸混凝土一般属于大体积和薄壁异形结

收稿日期: 2016-03-03

*基金项目: 江苏省交通科技计划项目 (2015T30)

作者简介: 李华 (1987—), 女, 硕士, 工程师, 从事高性能混凝土及其裂缝控制技术研究。

构。从裂缝出现位置来看,船闸裂缝主要分为两类,一是船闸结构底板的中部,为与底板中线大致平行的长直裂缝;二是廊道侧墙和闸室墙侧墙,大多为竖向裂缝。从裂缝发生时间来看,裂缝一般发生在施工期间,由变形荷载为主引起的裂缝占到总裂缝数量的80%以上。因此,施工期内船闸的大体积和薄壁异形结构混凝土在约束条件下的开裂是船闸工程的较普遍问题。然而,目前船闸结构的抗裂性设计往往对施工期内混凝土材料本身性能的时变性考虑不足^[4-7],且早期混凝土性能参数大都仍借用硬化后混凝土的特征参数来计算,使得计算结果与试验结果差距较大,导致模拟评估结果与工程实际往往存在很大出入^[8-9]。进而制约了后续裂缝控制措施选择的合理性和有效性。

本文依托在建的九圩港船闸二线工程,针对船闸闸首廊道、闸室墙等结构部位大体积、薄壁异形结构易开裂的难题,基于工程现场原材料和现场配合比,对混凝土早龄期热、力学和变形性能进行系统测试,在此基础上,采用“水化-温度-湿度-约束”多场耦合收缩开裂评估机制及模型,对闸室墙、闸首廊道等结构部位的温度场、应力场和开裂风险进行评估,并与实际监测结果进行对比分析以验证模拟计算的有效性,为工程后续针对性的抗裂措施的提出提供指导。

1 混凝土材料早期热、力学及变形性能测试

1.1 原材料及测试方法

九圩港二线船闸闸首廊道、闸室边墙部位C25混凝土所用原材料和基准配合比见表1。其中,水泥采用华新南通水泥有限公司生产的P.O.42.5水泥,粉煤灰采用华能南通电厂生产的Ⅱ级粉煤灰。减水剂采用南京瑞迪高新技术有限公司生产的HLC-Ⅸ型缓凝高效聚羧酸减水剂,细骨料采用赣江中粗河砂,细度模数2.4~2.9。混凝土水胶比0.44,胶材用量341 kg/m³,粉煤灰掺量10%,砂率39%。石子采用5~40 mm连续级配,其中5~

16 mm占20%、16~31.5 mm占60%、20~40 mm占20%。

表1 九圩港船闸C25闸室墙混凝土配合比

原材料	规格	用量/(kg/m ³)
水	地下水	150
水泥	P. O. 42.5	307
粉煤灰	Ⅱ级	34
减水剂	HLC-Ⅸ	2.728
细骨料	中粗砂	725
粗骨料	5~16 mm	226.8
	16~31.5 mm	680.4
	20~40 mm	226.8

基于表1所示基准混凝土配合比,结合多场耦合计算混凝土结构开裂风险所需的早期热、力学性能参数需求,参照JTJ 270—1998《水运工程混凝土试验规程》、SL 352—2006《水工混凝土试验规程》、GB/T 12959—2008《水泥水化热测定方法》,并采用混凝土绝热温升测试仪、早龄期非接触收缩测试系统等测试手段,对混凝土的早期热、力学及变形性能进行测试。

1.2 测试结果与分析

采用绝热温升测试仪测得的混凝土绝热温升曲线见图1。从图1可以看出,由于使用缓凝型减水剂,浆体在1 d以前均处于缓凝期,1 d后温度迅速升高,2 d后温升逐渐减缓,7 d后,温度基本稳定。较入模时相比,混凝土8 d绝热温升达到46.76℃。混凝土抗压强度测试结果见图2。从图2可以看出,混凝土3 d抗压强度达到28 d强度的64%,7 d抗压强度达到28 d强度的91%,并达到了100%配制强度。混凝土不同龄期下的劈裂抗拉强度和弹性模量测试结果见图3、4。从图3、4可以看出,劈拉强度在7 d龄期后发展变缓,符合一般混凝土的强度发展规律,弹性模量的发展也呈现出早期快、7 d后变缓的基本趋势。混凝土早期自生体积变形测试结果见图5,从图5可以看出,混凝土28 d自收缩达到116 με,而3 d前的自收缩发展较快,超过28 d整体自收缩的一半。

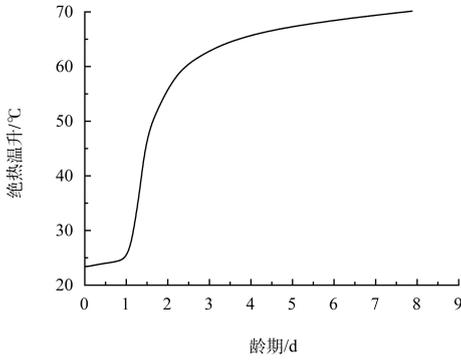


图1 混凝土绝热温升曲线

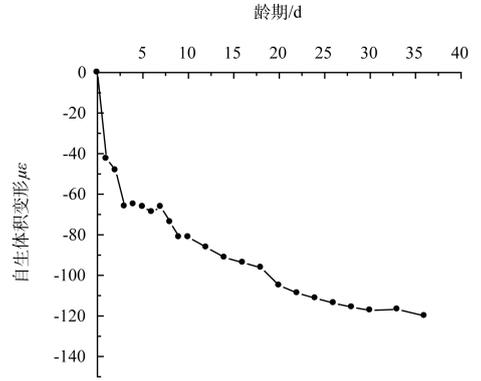


图5 混凝土早期自生体积变形

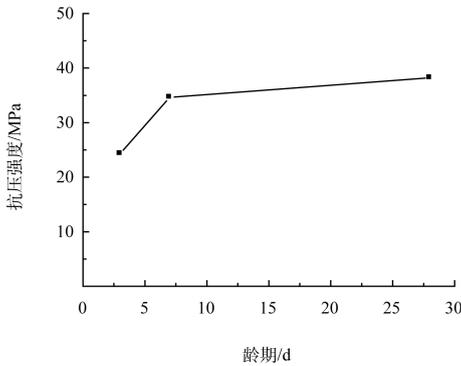


图2 混凝土早期抗压强度

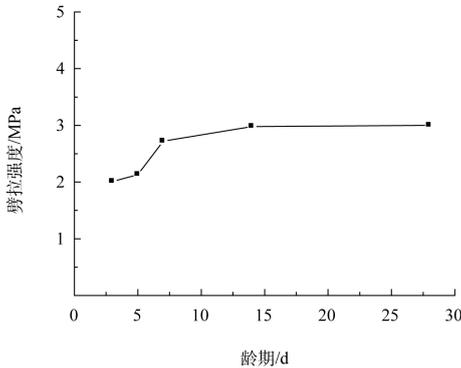


图3 混凝土早期劈裂抗拉强度

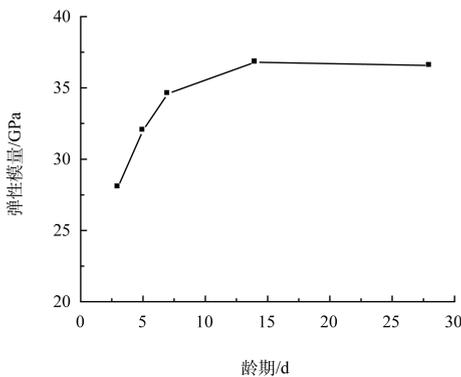


图4 混凝土早期弹性模量

2 施工期船闸结构混凝土温度、应力及开裂风险仿真计算分析

2.1 计算模型与特征点选取

混凝土产生体积变化的主要原因在于环境和混凝土内部温、湿度变化产生的内部应力,混凝土的表观变形是材料内部及表面温湿度变化状态的反映。考虑到浇筑成型的实际混凝土结构处于水化-温度-湿度-约束多场耦合作用环境,混凝土的体积变形具有湿-热-化学-力多因素耦合作用的本质,采用水泥基材料变形开裂的“水化-温度-湿度-约束”多场耦合评估机制和模型^[10],结合闸首廊道、闸室墙等不同部位具体结构尺寸和约束情况,对不同工况下结构在约束条件下由于温度和收缩变形产生的应力分布进行了模拟分析,并基于开裂风险的应力评估准则,对船闸闸首廊道、闸室墙及倒角等结构部位混凝土开裂风险进行评估。为进一步对开裂风险进行量化,本文用第一主拉应力与即时抗拉强度之比表示开裂风险,定义为:

$$\eta = \frac{\sigma_t(t)}{f_t(t)} \quad (1)$$

开裂风险评判准则如下:开裂风险 $\eta > 1$ 时, $\sigma_t(t) > f_t(t)$, 混凝土已经开裂;开裂风险 $\eta = 1$ 时, $\sigma_t(t) = f_t(t)$, 混凝土达到理论上的临界开裂状态;开裂风险 $0.7 \leq \eta < 1$ 时, $0.7f_t(t) \leq \sigma_t(t) < f_t(t)$, 考虑到混凝土早龄期性质的不确定性以及结构分析时的简化和近似,混凝土有较大可能开裂;开

裂风险 $\eta < 0.7$ 时, $\sigma_t(t) < 0.7f_t(t)$, 混凝土开裂可能性较低。

闸室边墙仿真计算以单节墙(长 20.0 m)为研究对象, 根据工程结构对称性, 仿真计算建模取 1/2 结构, 选取的特征点在底节倒角部位(图 6), 典型截面选取中部纵截面。闸首廊道仿真计算以下闸首半侧为研究对象, 由于半侧廊道结构不具有对称性, 仿真计算建模取整体半侧廊道结构, 廊道部位特征点及典型截面选取见图 7。

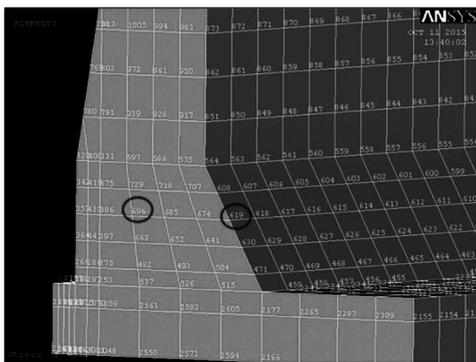


图 6 闸室边墙有限元模型及特征点位置

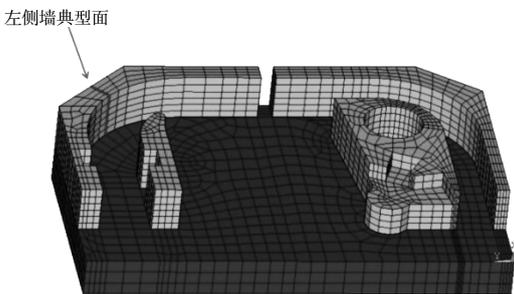


图 7 闸首廊道典型特征点及截面位置

2.2 仿真计算基本资料

基于 1.2 节对混凝土早期热、力学性能的测试与分析, 确定与水化、散热、应力发展、约束等相关的模型参数, 为闸室边墙、闸首廊道等结构混凝土开裂风险的理论评估提供参数来源。

九圩港二线船闸土建工程位于江苏省南通市港闸区天生港镇。据天气网公布的南通多年气温观测资料统计, 该地区多年各月平均气温值和平均风速见表 2。将所列各月份平均气温进行拟合, 拟合公式为

$$T_m = 15.32 + 11.94 \cos[3.14(t_m - 7.32)/6] \quad (2)$$

式中: t_m 为折算月份。计算过程中所用到的其他参数见表 3。

表 2 南通基本气候情况

月份	平均温度/℃	平均风速/(m/s)
1月	3.1	3.0
2月	4.2	3.1
3月	8.0	3.3
4月	14.0	3.3
5月	19.4	3.2
6月	23.4	3.0
7月	27.2	3.0
8月	27.0	3.0
9月	22.8	2.7
10月	17.6	2.6
11月	11.6	2.8
12月	5.6	2.8

注: 据 30 a 资料统计。

表 3 其它参数

名称	取值
混凝土密度	2 365 kg/m ³
地基土体密度	2 000 kg/m ³
混凝土比热	0.9 kJ/(kg·K)
混凝土导热系数	8.6 kJ/(m·h·K)
混凝土热膨胀系数	1×10 ⁻⁵
地基土体比热	0.907 kJ/(kg·K)
地基土体导热系数	8.6 kJ/(m·h·K)
钢模板散热系数(风速=2.8 m/s)	61.6 kJ/(m ² ·K·h)
两层土工布散热系数	28 kJ/(m ² ·h·K)

2.3 闸室边墙底节混凝土温度场、应力场及开裂风险分析

根据拟定施工安排, 工程于 11 月中旬在已浇筑 1 个多月的底板上开始浇筑闸室边墙底节, 边墙浇筑采用移动的钢滑模, 拆模时间为浇筑完毕后的第 5 d; 设定混凝土外仅设置钢模, 拆模前后均不采用其他保温措施; 取浇筑时的入模温度比当时的环境温度高 2℃。

2.3.1 温度场和应力场分析

闸室边墙倒角部位高程中部内外特征点温度时程曲线见图 8。表面特征点散热较快, 最高温度出现的龄期早且较低, 在龄期 1.5 d 达到最高温度 44.31℃; 内部中心附近特征点散热较慢, 最高温度出现的龄期稍晚, 在龄期 2.25 d 达到最高温度 56.78℃, 温升超过 40℃; 内外温差在 4.25 d 达

到最大, 为 17.34 ℃。内部特征点达到温峰时的典型截面温度云图见图 9。从图 9 可以看出, 倒角中部以上至下部墙身的半高程, 中心温度均达到甚至超过 57 ℃, 温度较高, 与表面温差较大。同时, 在墙体表层温度变化剧烈, 形成较大温度梯度。

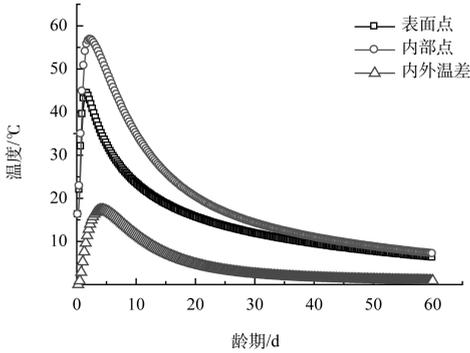


图 8 闸室边墙倒角部位特征点温度时程曲线

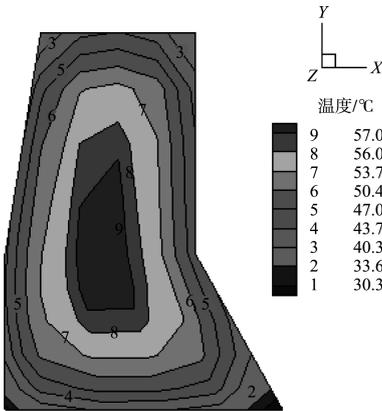


图 9 2.25 d 内部特征点达最大温度时的截面温度云图

边墙倒角部位高程中部特征点应力时程曲线见图 10, 从图 10 可以看出, 表面特征点在早期随着时间的推延, 拉应力迅速增加, 在 1.25~2 d 达到或接近最大拉应力, 超过即时抗拉强度的 70%, 之后拉应力水平逐渐减弱; 内部特征点在浇筑后的第 5 d 左右由压应力转变为拉应力, 25 d 以后拉应力达到并超过 2.12 MPa, 超过即时抗拉强度的 70%。表面特征点达最大应力时的典型截面应力云图见图 11a)。从图 11a) 可以看出, 整个倒角部位及下部墙身的半高程的外表面均处于拉应力状态, 且拉应力超过即时抗拉强度的 70%, 这部分区域存在较大的开裂风险。60 d 内部特征点达最大应力时的典型截面应力云图见图 11b)。从图 11b) 可以看出, 由于内外温差及底板的约束, 内部最

大拉应力出现在距底板 1/3~1/4 高程处以及倒角与底板的接触部位。

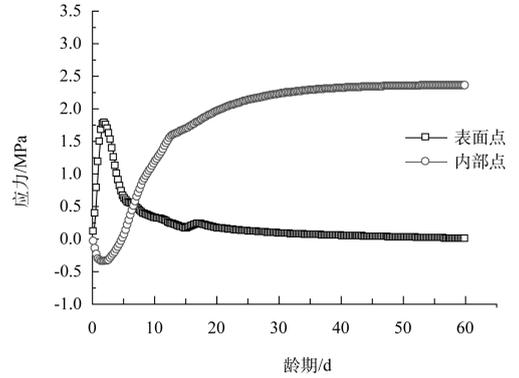
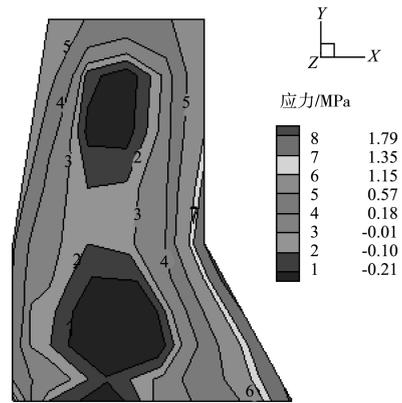
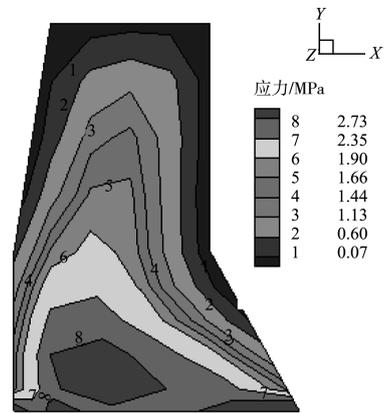


图 10 闸室边墙倒角部位特征点应力时程曲线



a) 2 d(表面点达最大应力)



b) 60 d(内部点达最大应力)

图 11 典型截面应力云图

2.3.2 开裂风险分析

边墙倒角部位高程中部特征点开裂风险随时间变化的曲线见图 12, 从图 12 可以看出, 由于混凝土表面早期散热快, 温降速率大, 表面应力迅速上升, 而此时混凝土抗拉强度还处于较低的水平, 使得表面点开裂风险迅速增加, 超过 0.7, 甚

至达到1, 因而早期极易产生“由表及里”型裂缝; 由于结构尺寸长、厚度大, 内部水化热不易散出致使结构内外温差较大, 加上底板对倒角的约束作用, 导致内部后期拉应力超过抗拉强度的70%, 在23.5 d左右开裂风险达到并超过0.7, 因而后期极有可能会从倒角中间向上、下两端启裂, 形成“枣核”型裂缝, 甚至有可能发展成深层甚至“由里及表”型裂缝。综上分析可知, 闸室墙底节混凝土早期表面开裂风险和后期内部开裂风险均较大, 因此, 需要采取有效的温控措施, 以防止闸室墙底节混凝土结构早期表面裂缝和后期内部裂缝的发生与发展。

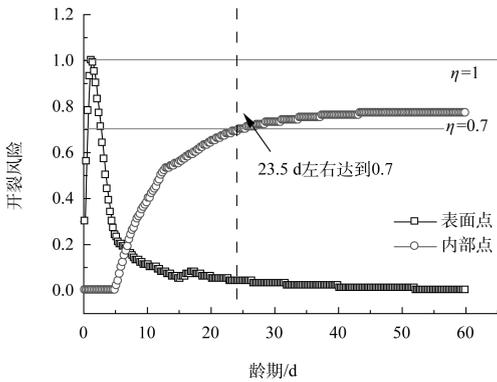


图 12 闸室边墙倒角部位特征点开裂风险随时间变化的曲线

2.4 闸首廊道外侧长墙混凝土温度场、应力场及开裂风险分析

根据拟定施工安排, 工程于11月中旬在已浇筑1个多月的底板上开始浇筑廊道侧边长墙, 廊道浇筑采用支撑钢模, 并取拆模时间为浇筑完毕后的第5 d, 取浇筑时的入模温度比当时的环境温度高2℃。廊道左侧长墙拐角处表面特征点和内部特征点的温度和应力时程曲线分别见图13、14。从图13可以看出, 表面特征点在龄期1.75 d达到最高温度38.57℃; 内部特征点在龄期2.50 d达到最高温度50.55℃; 内外温差在3.75 d达到最大, 为14.38℃。从图14可以看出, 表面特征点在早期随着时间的推延, 拉应力迅速增加, 在1.25~2.25 d达到并超过即时抗拉强度的70%, 之后拉应力水平逐渐减弱; 内部特征点在浇筑后

的前5 d龄期应力接近于0, 之后拉应力逐渐增大, 并于17 d以后达到并超过2.12 MPa, 超过即时抗拉强度的70%。内外特征点开裂风险随时间变化的曲线见图15, 从图15可以看出, 由于混凝土表面早期散热快, 温降速率大, 表面应力迅速上升, 而此时混凝土抗拉强度还处于较低的水平, 使得表面点开裂风险迅速增加超过0.7, 因而早期极易产生“由表及里”型裂缝; 由于廊道拐角处厚度较大, 内部水化热不易散出致使结构内外温差较大, 加上底板的约束作用, 导致内部17 d以后拉应力超过抗拉强度的70%, 开裂风险超过0.7, 因而后期极有可能会从拐角处中间向上、下两端启裂, 形成“枣核”型裂缝。综上分析可知, 闸首廊道外侧长墙早期表面点开裂风险超过0.7, 因而早期易产生“由表及里”型裂缝; 后期中部开裂风险超过0.7, 因而后期极有可能会从中部产生裂缝, 甚至有可能发展成深层甚至“由里及表”型裂缝。因此, 需采取相应措施, 以抑制廊道外侧长墙混凝土早期表面裂缝和后期内部裂缝的发生与发展。

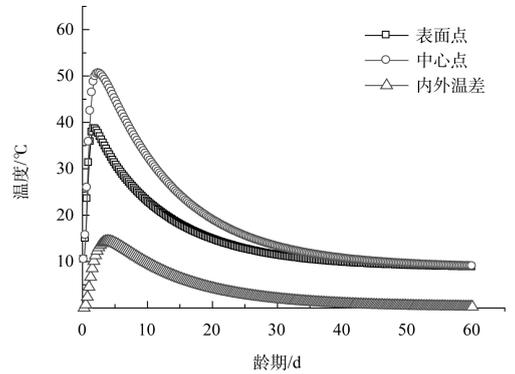


图 13 廊道左侧长墙拐角处特征点温度时程曲线

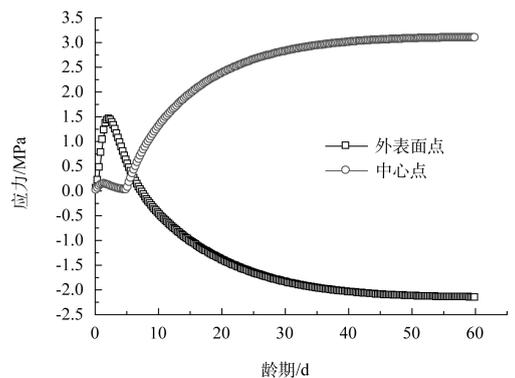


图 14 廊道左侧长墙拐角处特征点应力时程曲线

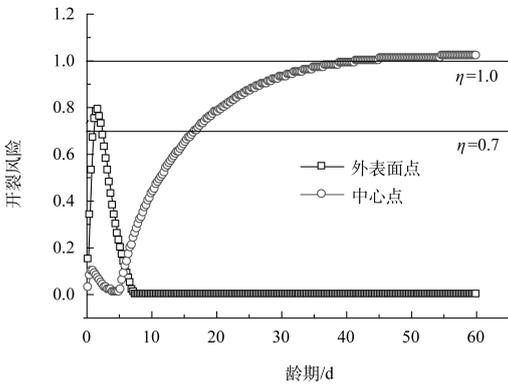


图 15 廊道左侧长墙拐角处内外特征点开裂风险随时间变化的曲线

2.5 理论分析结果与实际监测结果的对比

对应上述内外特征点的闸室墙底节混凝土温度监测结果见图 16。监测结果表明,倒角及上部墙身混凝土内部最高温度接近 55℃,最大温升达 37℃,内外温差达 18℃;至温度稳定期,中部混凝土的温降接近 45℃,表层混凝土温降也达到 30~35℃,最终温度均低于浇筑时的入模温度。温度实测结果与理论计算结果的对比见图 17,除受气温波动影响导致表层测点 1~3 d 测试值与模拟计算值差别较大外,测试值与理论计算值基本吻合。内外特征点变形监测结果见图 18。从图 18 可以看出,如此大的温降使得混凝土在降温阶段产生较大的收缩变形,而在浇筑后约 22.5 d,4 个测点同时出现应变突变点,表明此时从倒角到墙身均形成了从中心到表层的贯穿性裂缝。对比监测到的开裂时间(22.5 d)与理论计算较大开裂风险的时刻(23.5 d,图 12),发现开裂时间监测结果与预测结果基本吻合。温度和变形的实际监测结果验证了模拟计算的结果准确可靠。

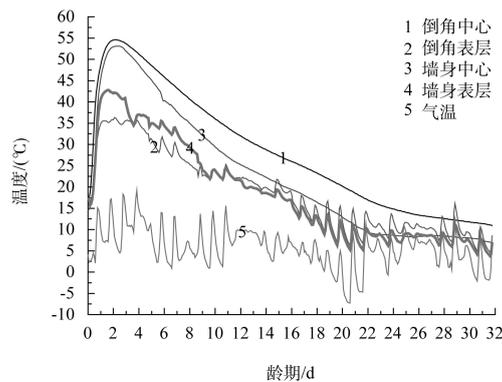


图 16 基准段闸室墙温度监测结果

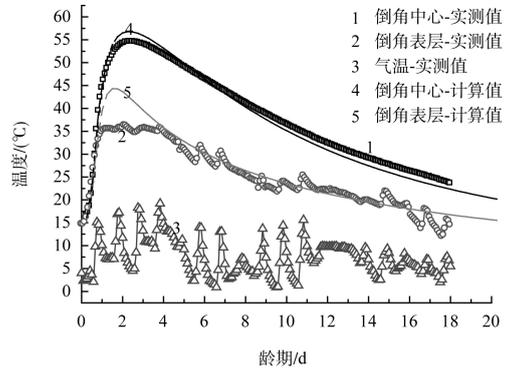


图 17 温度实测结果与计算结果的对比

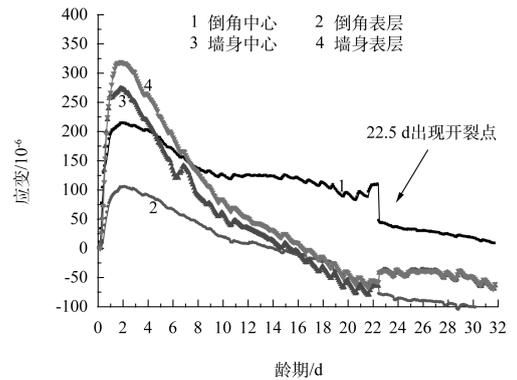


图 18 基准段闸室墙变形监测结果(以终凝为起点)

3 结论

1) 闸首廊道、闸室边墙均属于大体积结构,混凝土开裂风险主要来自于表面散热快和内外温差大产生的温度梯度,以及降温过程中底板老混凝土对边墙结构混凝土约束造成的上下变形不协调。

2) 闸室边墙底节倒角部位、闸首廊道外侧长墙拐角部位早期易产生“由表及里”型裂缝,后期极有可能会从倒角中间向上、下两端启裂,形成“枣核”型裂缝,甚至有可能发展成深层甚至“由里及表”型裂缝。因此,需采取相应温控措施,以抑制闸室边墙、闸首廊道外侧长墙混凝土早期表面裂缝和后期内部裂缝的发生与发展。

3) 基准段闸室墙倒角部位温度、变形实测结果与计算结果基本吻合,验证了模拟计算的结果准确可靠。
(下转第 157 页)