

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.03.014

吕杨, 张社荣, 于茂, 等. 基于 XFEM 的寒潮作用下水闸开裂性状分析[J]. 水利水运工程学报, 2015(3): 95-100. (LV Yang ZHANG She-rong, YU Mao, et al. Cracking behaviour analysis of sluices under the action of cold waves based on XFEM[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(3): 95-100.)

## 基于 XFEM 的寒潮作用下水闸开裂性状分析

吕 杨, 张社荣, 于 茂, 李宏璧

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 水闸普遍存在着可见和不可见的裂缝,带裂缝工作是水闸的常态,当受到寒潮的影响时,已有的细微裂缝会连通、扩展,甚至贯穿整个闸墩,严重影响结构的安全性和耐久性。扩展有限元法(XFEM)通过富集非连续位移模式,使得非连续位移场的表征独立于单元边界,可有效描述混凝土中的裂纹扩展。基于 XFEM 并结合热力耦合,研究了水闸在不同初始温度下,遭遇不同降温幅度及历时的寒潮作用时的渐进开裂破坏过程,并与某实际工程的开裂情况进行对比,数值模拟结果与现场情况基本吻合。研究表明,水闸遭遇寒潮时,靠近闸墩表面的温度与外界温度变化基本一致,靠近闸墩中心的温度变化较小,闸墩内外温差随着寒潮强度的增强而增大;闸墩混凝土的内表温差和约束是导致闸墩开裂的根本原因;裂缝分布在上下游墩头与底板相交的位置,随着寒潮强度的增强,裂缝与底板的夹角、长度及深度也随之增大,对水闸结构的不利影响也越大。因此,寒潮来临时应做好安全监测及混凝土防护工作,控制闸墩的温降以防止裂缝的开展。

**关键词:** 水闸; 混凝土开裂; 寒潮; 扩展有限元法(XFEM); 温降; 耐久性

**中图分类号:** TV313

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2015)03-0095-06

水闸是一种利用闸门挡水和泄水的低水头水工建筑物。在水闸施工运行的各个阶段,由于种种不利因素,如混凝土的温度变形、收缩变形以及基础的不均匀沉降等,都有可能使水闸产生开裂,因此闸墩中普遍存在可见和不可见的裂缝,带裂缝工作是水闸的常态。根据 Mehta 的混凝土耐久性模型,这些裂缝会成为荷载作用下的裂纹源<sup>[1]</sup>。工程统计资料表明,对于运行期的水闸结构来说,温度应力是引起开裂的重要原因之一,而寒潮这种短时间内的骤然温降,有可能会引起大体积混凝土开裂。对于带裂缝运行的水闸结构,当遇到寒潮时,闸墩表面或内部已有的细微裂缝可能会连通、扩展,甚至贯穿整个闸墩,从而对结构造成不利影响<sup>[2]</sup>。因此,研究带有初始裂缝的水闸在遭遇寒潮时的受力性态十分必要。引起水闸开裂的原因很多,不仅与混凝土材料本身有关,也与外界环境有关<sup>[3]</sup>。吉顺文对薄壁结构的温度裂缝进行了仿真计算,并提出了有关薄壁结构施工过程防开裂的具体措施和方法<sup>[4]</sup>;朱伯芳院士从混凝土温度的角度出发,通过对水工建筑物的施工过程和温度应力的仿真计算,提出研究解决水工混凝土裂缝的方法与技术<sup>[5]</sup>;田振华等对大体积混凝土在寒潮期的温度应力及表面保温措施进行了分析,并以某船坞底板为例进行了模拟<sup>[6]</sup>。总体来看,对于带初始裂缝的水闸结构在遭遇寒潮时的受力性态研究较少,需要进一步研究。

我国北方地区冬季寒潮频发,本文主要依托北方某地区挡潮闸工程。水闸建成后,在运行期下游挡潮侧墩头部位发现新发展的斜向裂缝,基于扩展有限元法对闸墩遭遇寒潮时的开裂性状进行分析。

### 1 计算基本原理

扩展有限元法(XFEM)是 Belytschko and Black 基于单位分解的思想对传统有限元法进行改进后首次提

收稿日期: 2014-10-08

基金项目: 国家创新研究群体科学基金资助项目(51321065);水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金资助项目

作者简介: 吕 杨(1990—),女,天津人,硕士研究生,主要从事水工结构分析研究。E-mail: chloelv\_tju@163.com

通信作者: 张社荣(E-mail: tjuzsr@126.com)

出的,该方法主要集中于裂纹存在时裂纹两端位移场的近似描述上,它采用 Heaviside 函数将裂纹两侧非连续位移场联系在一起。XFEM 可以模拟裂纹以任意路径方式进行扩展,同时可以使裂纹穿越网格单元,减少了一般裂纹计算中重新划分网格的过程,降低了计算成本<sup>[7]</sup>。本文采用 XFEM 对水闸遭遇寒潮中的裂纹扩展进行了数值模拟。

扩展有限元法中,通过附加函数加强常规有限元逼近模拟裂纹的扩展。扩展有限元的位移逼近可用下式<sup>[8]</sup>表示:

$$u = \sum_{i \in I} u_i N_i + \sum_{j \in J} b_j N_j H(X) + \sum_{k \in k_1} N_k \left( \sum_{l=1}^4 C_k^l F_l^1(x) \right) + \sum_{k \in k_2} N_k \left( \sum_{l=1}^4 C_k^l F_l^2(x) \right) \quad (1)$$

式中:等号右端第 1 项可用于模型中所有节点,和常规有限元一样;右端第 2,3,4 项为 XFEM 特有的,称为加强项,用来描述裂纹的存在,第 2 项只对形函数被裂纹内部切开的单元节点有效,第 3,4 项只对形函数被裂纹尖端切开的单元节点有效; $I$  为所有节点的集合,即右端第 1 项; $J$  为裂纹完全贯穿单元节点的集合(图 1 中“□”表示的节点),即右端第 2 项; $k_1$  和  $k_2$  分别为第 1 个裂尖(裂纹两端)和第 2 个裂尖(影响域被裂纹嵌入)所在单元节点的集合(图 1 中的“△”表示的节点),即右端第 3 项和第 4 项; $N_i$  为节点  $i$  的形函数; $u_i$  为节点  $i$  位移向量的连续部分; $b_j$  为节点  $i$  与阶跃函数相关的节点加强自由度;

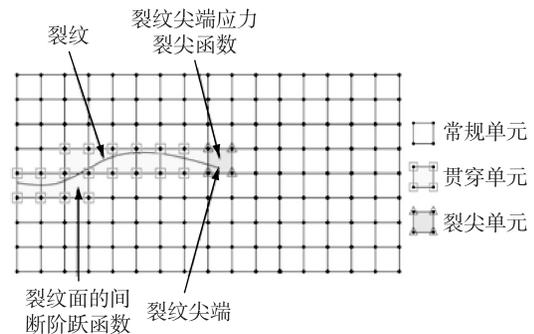


图 1 XFEM 富集模式

Fig. 1 XFEM richment pattern

$C_k^1$  和  $C_k^2$  分别为 2 个裂尖处于弹性渐进裂尖函数有关的节点加强自由度; $H(x)$  为沿裂纹面的间断阶跃函数,表达式见式(2); $F_l^1(x)$ ,  $F_l^2(x)$  ( $l=1, \dots, 4$ ) 为裂纹尖端应力裂尖函数,见式(3)<sup>[9]</sup>。

$$H(x, y) = \begin{cases} 1, & (x - x^*) \cdot n \geq 0 \\ -1, & (x - x^*) \cdot n < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x$  为高斯积分点; $x^*$  为最靠近裂纹尖端的点; $n$  为裂纹在  $x^*$  的单位外法线矢量。

$$\{F_j(r, \theta)\}_{j=1}^4 = \left[ \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \quad \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2} \quad \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \sin \theta \quad \sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2} \cos \theta \right] \quad (3)$$

式中:  $(r, \theta)$  是以裂纹尖端为原点的极坐标。

## 2 计算模型及计算参数

水闸计算模型见图 2(a), 闸墩高 6.8 m, 长 29.0 m。闸墩墩头现场开裂情况见图 2(b)。

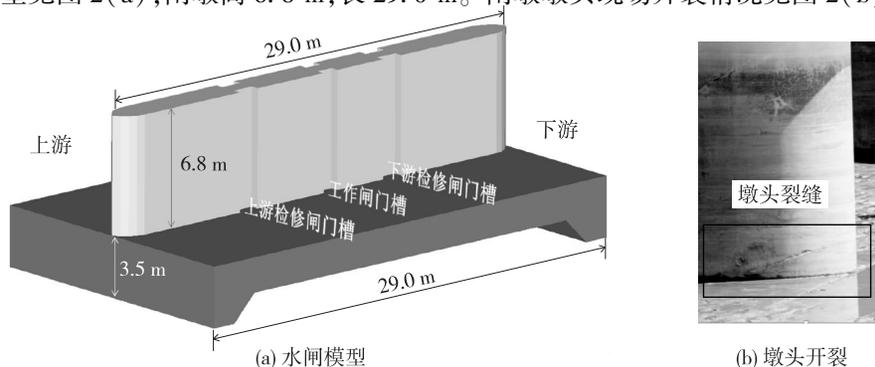


图 2 水闸模型及现场开裂

Fig. 2 A model for a sluice and cracks on a sluice

### 2.1 边界条件

当建筑物厚度小于 30 m 时, 内部温度将受外界温度周期性变化的影响, 也随时间周期性变化, 这种温度称为准稳定温度。假设水闸初始计算时已达到准稳定温度场<sup>[10]</sup>。本文计算中, 将闸墩及底板初始温度设置为不同的数值进行对比。

根据温度场基本理论, 运行期水闸挡水时, 闸门前的墩体与水接触, 闸门后的墩体则与空气接触, 因此闸墩与空气接触的部位向空气散热, 为第三类边界条件; 闸墩与水接触部位, 为第一类边界条件, 温度与水温相同; 地基边界采用第二类绝热边界条件<sup>[11]</sup>。

### 2.2 混凝土力学及热学参数

根据设计资料, 水闸不同区域材料参数见表 1。

表 1 计算参数

Tab. 1 Calculation parameters for a sluice

混凝土	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	导热系数/ (kJ · (m · h · ℃) <sup>-1</sup> )	比热/ (kJ · (kg · ℃) <sup>-1</sup> )	热膨胀系数/ 10 <sup>-5</sup>	表面放热系 数/(kJ · (m <sup>2</sup> · h · ℃) <sup>-1</sup> )	最大主拉应 力/MPa	断裂能密度/ (N · m <sup>-1</sup> )
闸墩混凝土	28	0.167	2 400	10	0.89	0.7	67.6	1.78	150
板混凝土	28	0.167	2 400	10	0.89	0.7	67.6	-	-

### 2.3 计算荷载

计算过程中考虑的荷载包括闸墩及闸墩上部结构的自重, 水压力(按正常蓄水工况, 上游水深 2.0 m, 下游挡潮水深 3.44 m 计算)以及水闸运行期的寒潮温度荷载。

相关气象资料表明, 闸址区寒潮可能出现时段为 10 月至翌年 4 月, 根据闸址附近测站的气温资料, 选取实测的不同降温幅度以及历时的 4 个寒潮进行对比计算, 见表 2。

表 2 寒潮降温型态

Tab. 2 Drop in temperature caused by cold waves

序号	初始温度	24 h 温度	48 h 温度	72 h 温度	96 h 温度	温降幅度
寒潮 1	-2.7	-5.2	-7.7	-	-	5
寒潮 2	-2.6	-7.7	-12.7	-	-	10
寒潮 3	0.8	-8.4	-10.6	-14.2	-	15
寒潮 4	6.5	-5.6	-10.3	-12.5	-14.6	21.1

## 3 计算结果与分析

### 3.1 温度场分析

计算模型底板高程 -1.0 m, 取距离底板高 0.8 m 处截面上的特征点进行分析, 温度场典型截面特征点分布见图 3; 不同寒潮作用下特征点温度场分析见图 4。由图 4 可见, 寒潮初期, 处于稳定温度场的闸墩内外初始温度与环境温度基本一致; 随着寒潮发展, 靠近闸墩表面的特征点温度变化较大, 并与外界温度基本一致; 靠近闸墩中心的特征点温度变化较小, 闸墩内外特征点最大温差出现在降温幅度最大的寒潮 4 中, 达到了 20.6℃。

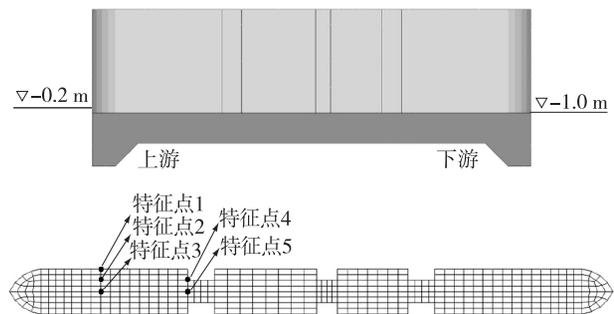


图 3 温度场典型截面与典型点分布

Fig. 3 Distribution of typical section and nodes of temperature field

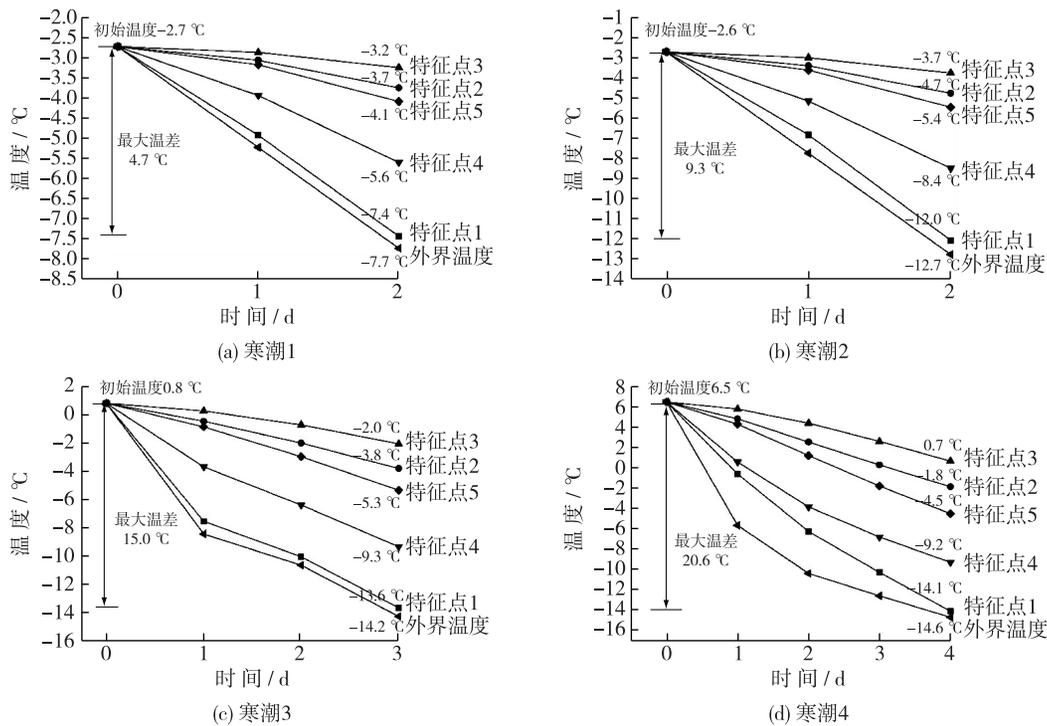


图4 不同寒潮时的温度场分布

Fig. 4 Temperature field distribution under different cold waves

### 3.2 闸墩开裂分析

基于扩展有限元理论,计算中采用最大拉应力准则并假定扩展过程中裂纹尖端位于单元边界上,进而得到闸墩在寒潮作用下的开裂模式,表3汇总了闸墩在不同寒潮作用下的裂缝形态,闸墩主要在上下游墩头出现了裂缝。通过与现场照片进行对比,数值模拟得出的最终破坏形态与实际情况基本一致。可见,在不考虑保温措施情况下,当闸墩遭遇寒潮时,随着寒潮强度增大,闸墩上裂缝的角度、长度及深度均逐渐增大。裂缝贯穿的可能性也逐渐增大。这是由于外界气温急剧下降,引起表面温度骤然降低,内表温差迅速增大,导致表面拉应力增大。考虑底板对闸墩的约束作用以及使用荷载等不利条件,因而在闸墩与底板连接处容易产生开裂<sup>[12]</sup>。同时,闸墩混凝土中普遍存在着可见和不可见的细微裂缝,因此遭遇寒潮时,细微的裂缝更容易连通、扩展,逐步向纵深发展,而其他一些如干缩、冻胀、腐蚀等不利因素也会进一步加剧裂缝的发展,使裂缝存在着发展成贯穿裂缝的可能性。通过对比数值模拟结果与水闸现场的开裂照片,结果基本吻合,但由于现场裂缝表面没有防护措施,裂缝常年与海水接触,因而裂缝宽度已达到了肉眼可见的程度。

同时,闸墩混凝土中普遍存在着可见和不可见的细微裂缝,因此遭遇寒潮时,细微的裂缝更容易连通、扩展,逐步向纵深发展,而其他一些如干缩、冻胀、腐蚀等不利因素也会进一步加剧裂缝的发展,使裂缝存在着发展成贯穿裂缝的可能性。通过对比数值模拟结果与水闸现场的开裂照片,结果基本吻合,但由于现场裂缝表面没有防护措施,裂缝常年与海水接触,因而裂缝宽度已达到了肉眼可见的程度。

## 4 结 语

本文基于XFEM,采用热力顺序耦合的方法,研究了水闸在遭遇寒潮时的开裂行为,主要得到以下结论:

(1) 当水闸遭遇寒潮时,闸墩表面温度骤降,表面拉应力增大,由于底板对闸墩有约束作用,闸墩与底板相连部位容易产生开裂,因而闸墩混凝土的内表温差和约束是导致闸墩开裂的根本原因。

表3 裂缝形态汇总

Tab. 3 Summary of cracks' performance

寒潮类型	位置	角度/°	长度/m	深度/m	发展形态
寒潮2	上游墩头	26.57	0.76	0.43	由上向下发展
	下游墩头	26.57	0.77	0.43	由上向下发展
寒潮3	上游墩头	28.61	0.77	1.26	由上向下发展
	下游墩头	27.94	0.78	1.25	由上向下发展
寒潮4	上游墩头	30.84	0.81	1.33	由上向下发展
	下游墩头	29.32	0.80	1.31	由上向下发展

(2)随着寒潮的发展,靠近闸墩表面的温度与外界温度变化基本一致,而靠近闸墩中心的温度变化较小,闸墩内外温差随着寒潮强度的增强而增大。

(3)通过扩展有限元法(XFEM),可较准确地模拟不同强度寒潮作用下水闸的渐进开裂破坏过程,经计算得到的闸墩开裂位置、开裂角度和开裂状态与实际工程情况相符。

(4)寒潮来临时应做好安全监测及混凝土防护工作,控制闸墩底部的温降以防止裂缝开展。

## 参 考 文 献:

- [1] 谢石. 澧南闸裂缝成因及加固方案优化研究[D]. 南京:河海大学,2006. (XIE Shi. Study on the cause of Linan sluice crack and the optimization of reinforcement schemes[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [2] 袁明道,肖明,杨光华. 长沙拱坝裂缝状况及寒潮影响的数值分析[J]. 水力发电学报,2012,31(3):175-187. (YUAN Ming-dao, XIAO Ming, YANG Guang-hua. Crack state of Changsha arch dam and analysis of the effects of cold wave[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(3): 175-187. (in Chinese))
- [3] 韦华,陈迅捷,魏治文,等. 大型水闸挡土墙典型裂缝成因分析及防治措施[J]. 水利水运工程学报,2013(1):47-53. (WEI Hua, CHEN Xun-jie, WEI Zhi-wen, et al. Cause analysis of typical crack on a sluice retaining wall and its prevention measures[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(1): 47-53. (in Chinese))
- [4] 吉顺文,朱岳明,蒋一鸣. 平原地区水工混凝土裂缝成因与防裂研究[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2009,31(4):37-39. (JI Shun-wen, ZHU Yue-ming, JIANG Yi-ming. A study of causes of hydraulic concrete cracking and its prevention measures in plain area[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2009, 31(4): 37-39. (in Chinese))
- [5] 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,1999:306-331. (ZHU Bo-fang. Thermal stress and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999: 306-331. (in Chinese))
- [6] 田振华,郑东健,姚远,等. 大体积混凝土寒潮期温度应力及表面保温分析[J]. 水电能源科学,2011,29(5):93-95. (TIAN Zhen-hua, ZHENG Dong-jian, YAO Yuan, et al. Surface thermal stress and insulation of the dock foundation mass concrete during the period of cold wave[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(5): 93-95. (in Chinese))
- [7] 冯德成,田林,曹鹏. 基于扩展有限元方法的路基不均匀沉降纵向裂缝分析[J]. 工程力学,2011,28(5):149-154. (FENG De-cheng, TIAN Lin, CAO Peng. Study on longitudinal cracking during settlement of soil based on XFEM[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 149-154. (in Chinese))
- [8] 张东宇. 辽宁蓼窝水库溢流坝段闸墩裂缝力学成因分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012. (ZHANG Dong-yu. Mechanical reason analysis for crack on spillway pier of overflow dam in Shenwo reservoir, Liaoning Province[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese))
- [9] 张社荣,王高辉,孙博,等. 基于扩展有限元法重力坝强震潜在失效模式分析[J]. 水利学报,2012,43(12):1431-1439. (ZHANG She-rong, WANG Gao-hui, SUN Bo, et al. Seismic potential failure mode analysis of concrete gravity dam based on extended finite element method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(12): 1431-1439. (in Chinese))
- [10] 李朝. 放水河渡槽温度裂缝的分析和防治[D]. 长沙:国防科学技术大学,2009. (LI Zhao. Analysis and control of temperature cracks of Fangshuihe aqueduct[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese))
- [11] 冯晓波,夏富洲,王长德,等. 南水北调中线大型渡槽运行期温度场的计算[J]. 武汉大学学报:工学版,2007,40(2):25-28. (FENG Xiao-bo, XIA Fu-zhou, WANG Chang-de, et al. Calculation of temperature field of large-scale concrete aqueduct during operation period[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(2): 25-28. (in Chinese))
- [12] 陆四雄,张廷辉. 刘老涧三线船闸上闸首裂缝研究[J]. 水利科技与经济,2007,13(12):942-945. (LU Si-xiong, ZHANG Ting-hui. The research of cracks on lock head in Liulaojian No. 3 lock[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2007, 13(12): 942-945. (in Chinese))

## Cracking behaviour analysis of sluices under the action of cold waves based on XFEM

LV Yang, ZHANG She-rong, YU Mao, LI Hong-bi

(*State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

**Abstract:** Both visible and invisible cracks are common in the sluices. As a result, it is normal for a sluice with cracks under operatin conditions. When affected by the cold waves, the microscopic cracks in the sluice that already exist would connect, extend, and even run through the sluices, which would seriously affect the safety and durability of the sluices. An extended finite element method (XFEM) can make the characterization of discontinuous displacement field independent of the cell boundaries by enriching discontinuous displacement mode on the influence domain of the related nodes. Based on the extended finite element (XFEM) and a heat-mechanical coupling method, the authors of this article have made studies of sluice's gradual cracking failure process under different initial temperatures, different temperature drop ranges and durations of the cold waves. Compared with the actual cracking situation in a practical work, that the numerical computation agrees well with the real cracking situation. The analysis results indicate that when the sluice is affected by the cold waves, the temperature near its surface is approximate with the change of environment temperature; on the contrary, in the center section of the sluice there is no great changes in temperature. The gate pier's inside and outside temperature difference increases with the increases in the cold waves. The basic reason of cracking in the sluices is the combination of the inside temperature differences with their constraints. The cracks appear at the place where the gate pier links the floor, and with the augmentation of the cold waves, the angle, the length and the depth between the crack and the bottom also increase, which would be much more unfavorable to the gate pier. Therefore, it is necessary to make a good job of safety monitoring and protection for the gate pier to control cracks in the piers caused by temperature drop before the cold waves' coming.

**Key words:** sluice; concrete cracking; cold waves; an extended finite element method (XFEM); drop in temperature; concrete durability