

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221941

基于宏—细观模型的石漫滩水库重力坝开裂机理研究

赵 婷¹, 焦延涛², 张亚坤¹, 侯黎黎¹

(1. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004; 2. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450045)

摘要: 为了弄清石漫滩水库混凝土重力坝坝体运行期裂缝形成机理, 采用 APDL 语言中的 ESEL 命令并配合局部坐标系的旋转来完成随机骨料的投放方法, 构建了石漫滩大坝^{#9}非溢流坝段的三维宏—细观有限元模型, 通过模拟计算, 分析了运行期大坝的裂缝成因。结果表明, 该方法可快速生成三维球形及多面体形骨料, 大大提高了骨料的生成效率; 采用宏—细观模型计算的结果与大坝的实际裂纹分布情况更为符合, 周期性的冬季快速降温及夏季快速升温对运行期混凝土坝开裂的影响不容忽视。

关键词: 混凝土重力坝; 宏—细观有限元模型; 温度裂缝; APDL 命令流

中图分类号: TV642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0065-04

1 工程概况

石漫滩水库位于河南省舞钢市境内的淮河上游洪河支流滚河上, 原水库因遭遇“75·8”特大洪水漫坝溃决失事。水库复建于1993年9月, 1997年12月主体工程完工, 水库枢纽工程由拦河坝、溢洪道、取水底孔、发电站等建筑物组成, 水库总库容 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 是一座以工业供水、防洪为主, 结合灌溉、旅游、养殖等综合利用的大(II)型水利工程。拦河坝为全断面碾压混凝土重力坝, 最大坝高40.5 m, 坝顶高程112.50 m, 坝顶长645 m, 共分22个坝段, 坝段长度16.0~42.0 m不等; ^{#1}~^{#9}坝段为右岸非溢流坝段, 长320.0 m, ^{#10}~^{#16}坝段为溢流坝段, 长132.0 m, ^{#17}~^{#22}坝段为左岸非溢流坝段, 长193.0 m, 其中^{#19}坝段为底孔坝段, 长18.0 m^[1]。石漫滩水库复建投入运行以来, 大坝坝体出现较多裂缝, 尤其是坝体上部可观察到多条垂直坝轴线分布的贯通裂缝, 且具有较好的规律性, 上游面(水位108.20 m以上)发现竖向裂缝45条, 坝顶面顺水

流向裂缝39条, 坝下游面竖向裂缝77条, 且坝顶裂缝大多与上、下游竖向裂缝位置对应, 这些坝体裂缝多产生于蓄水后的运行期^[1]。大坝的^{#9}非溢流坝段存在2条贯穿上游面、坝顶和下游面的贯通性裂缝, ^{#9}非溢流坝段的剖面简图及材料分区情况, 见图1。为了弄清石漫滩水库混凝土重力坝坝体运行期裂缝形成的机理, 本文采用 APDL 语言中的 ESEL 命令并配合局部坐标系的旋转来完成随机骨料的投放方法, 构建了石漫滩

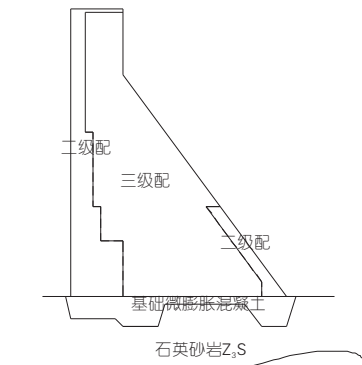


图1 ^{#9}非溢流坝段剖面简图及材料分区图

Fig. 1 Section sketch and material zoning map of No. 9 non overflow dam section

收稿日期: 2022-09-17, 修回日期: 2022-10-19

基金项目: 国家级职业教育教师教学创新团队课题研究项目(ZH2021040101); 河南省2023年水利科技攻关项目计划(GG202337); 河南省高等教育教学改革研究与实践重大项目(2021SJGLX643); 开封市重点研发项目(22ZDYF007); 2020年开封市科技发展计划(科技攻关2001021); 2022年度河南省高等学校重点科研项目计划(22B570001); 开封市黄河流域生态保护和高质量发展创新专项计划(2019018); 2020年度黄河水利职业技术学院青年骨干教师培养计划(2020HYGG01)

作者简介: 赵婷(1977-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为水利水电建筑工程, E-mail: zhaot@163.com

通讯作者: 张亚坤(1983-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型复合材料及其结构性能, E-mail: yakunzhang@126.com

大坝^{#9}非溢流坝段的三维宏—细观有限元模型,通过模型计算,分析了运行期大坝的裂缝成因,获得了一些有益的结论,可供借鉴。

2 基于 APDL 语言的细观建模方法

运用 APDL 语言中的 ESEL 命令并配合局部坐标系的旋转来生成三维随机骨料模型时,具体命令流为:

```
* do,i,1,num
local,11,2,agv(i,1),agv(i,2),agv(i,3)
nselect,s,loc,x,0,agv(i,4),0.1
esln,s,1
mpchg,2,all
allsel,all
csdele,all
* enddo
```

则采用此方法生成的混凝土三维随机骨料模型见图 2。由图 2 可看出,采用本文方法生成的混凝土随机骨料模型,基本符合混凝土凸多面体骨料的几何特征,且骨料的生成仅需 5 min 左右即可完成,极大地提高了骨料的投放效率。

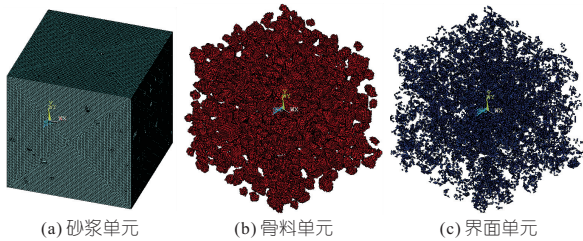


图 2 随机骨料模型中砂浆、骨料及界面单元网格图

Fig. 2 Mesh diagram of mortar, aggregate, and interface units in random aggregates

3 三维宏—细观有限元模型的构建

3.1 模型构建

采用细观力学方法建立混凝土材料的有限元模型时,需尽可能真实地反映骨料的大小及形态。对三级配混凝土的骨料,其最大粒径通常为 80 mm,最小粒径为 5 mm。如此以来,在进行模型网格划分时,单元的最大尺寸仅能设置为 5 mm。对于一个长 42 m、高 40 m 左右的坝段实体,其剖分网格后将产生数千万个单元,这对计算机的计算能力将是一个巨大的考验。为此,本文将坝体离散为大小与结构尺寸相对较小的单元(厘米量级),将粒径较小的骨料颗粒视为砂浆基质。考虑到贯穿性裂纹主要产生于^{#9}坝段坝体的上部,因

此为进一步减小计算规模,对基础微膨胀混凝土及基岩,计算时假定两者均为均质材料,用宏观模型进行模拟。这种在材料损伤断裂域用细观力学方法建模,在非损伤断裂域用宏观力学方法建模的方法,被称为多尺度宏—细观模型^[2-5]。采用宏—细观方法建模后,模型的细观部分,网格尺寸设置为 50 mm,模型宏观部分,网格尺寸设置为 8 m;剖分后单元总数 150 414 个,节点总数 162 486 个。

模型网格剖分完成后,按照本文提出的方法进行骨料的投放。对二级配混凝土材料,计算得所需投放骨料个数为 1 507 颗,三级配混凝土所需投放骨料个数为 2 198 颗^[5]。坝体细观混凝土骨料单元及界面单元有限元网格图见图 3,宏—细观尺度大坝整体有限元模型见图 4。模型的计算坐标系如图 4 中坐标系所示,其中 x 轴为顺河向, y 轴为竖直向, z 轴为沿坝轴线向。

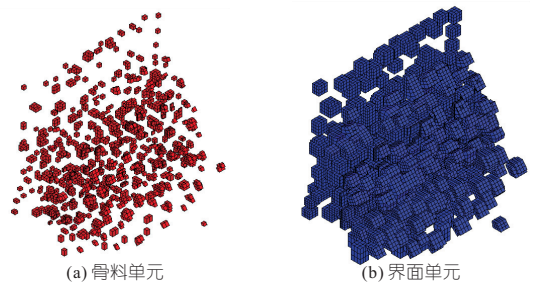


图 3 坝体混凝土骨料单元及界面单元有限元网格图

Fig. 3 Finite element mesh diagram of dam concrete aggregate element and interface element

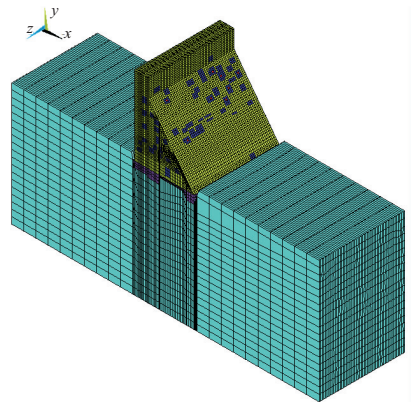


图 4 宏—细观尺度^{#9}非溢流坝段整体有限元网格图
Fig. 4 Overall finite element mesh diagram of No. 9 non-overflow dam section at macro-mesoscale

3.2 边界条件和计算工况

石漫滩大坝运行 10 多年后,坝身出现了较多裂缝,此时混凝土水化过程已基本完成,坝体温度场已趋于稳定,因此本文计算温度场时,温度场边界条件假定为上游坝面温度取相应高程的库水温度;下游坝面的温度取气温加上太阳辐射温升;横缝内温度根据观测资料给定;建基面 15 m 以下

基础温度不随水温、气温变化而变化,取恒定值(观测均值)。

温度场计算完成,计算温度应力时,基岩上下游边界面上约束 x 向位移分量;基岩沿坝轴方向两侧边界面上约束 z 向位移分量;在模型底部边界面节点 6 个位移分量中,只约束 3 个线位移分量,其余分量为自由;考虑横缝作用,坝段两端边界上的节点无约束。

从现场安全检查成果和监测资料分析来看,大坝坝基无明显的不均匀沉降产生,而坝体裂缝与气温变化关系密切。因此,推测坝体沿水流向垂直坝轴线的裂缝应主要由温度改变引起。据此,本文考虑温升和温降两种工况,计算分析坝体的损伤情况。根据工程区气象条件,石漫滩大坝坝址区在 2002 年 12 月份曾经历一次寒潮期,日降温幅度达到 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1];而在 2011 年 6 月曾经历极端高温天气,最高气温达到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,日升温幅度达到 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气温的骤升、骤降通常会对混凝土坝的温度场产生较大的影响,另外监测资料也表明石漫滩水库运行水位常年维持在 $105\sim 107\text{ m}$ (正常蓄水位)。为此,本文选择“正常蓄水+温度骤降”和“正常蓄水+温度骤升”两种工况进行计算。温降及温升历时均按实际情况选取,其中温降工况选取 2002 年 12 月的一次寒潮期所对应的气温边界条件进行降温温度场的计算,本次寒潮期,坝址区气温在 4 天内由 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降为 $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此温降历时选为 4 天;温升工况选取 2011 年 6 月的一次快速升温过程所对应的气温边界条件进行升温温度场的计算,本次快速升温期,坝址区气温在 3 天内由 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此温升历时选为 3 天。由于本文主要研究变温对坝体开裂的影响,因此单独考虑坝体的温度作用,不考虑水压力及坝体自重等机械荷载的作用。本文“温降”荷载指坝体在一次寒潮历程中形成的坝体准稳定温度场与年平均气温边界条件下稳定温度场之差产生的温度荷载;“温升”荷载指坝体在快速升温过程中形成的坝体准稳定温度场与年平均气温边界条件下的稳定温度场之差产生的温度荷载。

根据计算工况,采用 ANSYS 软件的热—结构耦合分析模块进行温度场计算及后续的开裂模拟,温度场计算时单元类型选用 SOLID70 单元,而应力及开裂模拟时则采用具有模拟混凝土材料开裂、压碎、塑性变形及蠕变的能力的 SOLID65 单元,两种单元联合使用。

3.3 计算参数

由于贯穿性裂纹主要产生于[#]9 坝段坝体的

上部,因此当采用多尺度宏—细观模型方法进行计算分析时,其中细观尺度模型主要用于模拟上部混凝土的开裂,而下部宏观尺度的基础微膨胀混凝土及基岩有限元模型则不考虑材料的开裂。上部细观混凝土有限元模型中,混凝土的各相材料,包括砂浆、骨料及界面均采用 Willam-Warnke 五参数模型来模拟材料的破坏,而下部基础微膨胀混凝土及基岩均假定为线弹性材料,不破坏。本文主要考虑温度荷载对坝体开裂的影响,围压较小,因此采用 Willam-Warnke 五参数模型时,对于 f_{bc} 、 f_1 及 f_2 的值,分别取 $f_{bc} = 1.2f_c$ 、 $f_1 = 1.45f_c$ 、 $f_2 = 1.725f_c$ (f_{bc} 为等压双轴抗压强度; f_1 为静水压力作用下的双轴抗压强度; f_2 为静水压力下的单轴抗压强度; f_c 为单轴抗压强度),即仅需确定参数 f_c 、 f_t (单轴抗拉强度)的取值,则根据设计及施工资料^[1],并参考文献[6-8]拟定材料参数见表 1、2。

表 1 多尺度宏—细观模型细观部分材料参数
Tab. 1 Material parameters of meso part of multi-scale macro meso model

材料参数	符号	单位	材料		
			砂浆	骨料	界面
密度	ρ	kg/m^3	2 151	2 700	2 360
弹性模量	E	GPa	21	60	20
泊松比	ν	—	0.220	0.167	0.210
导热系数	λ	$\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^{\circ}\text{C})$	121	242	184
比热	c	$\text{kJ}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	0.940	0.770	0.910
线膨胀系数	α	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	10	7	13
单轴抗拉强度	f_t	MPa	1.660	10.000	1.020
单轴抗压强度	f_c	MPa	18.170	80.000	10.200

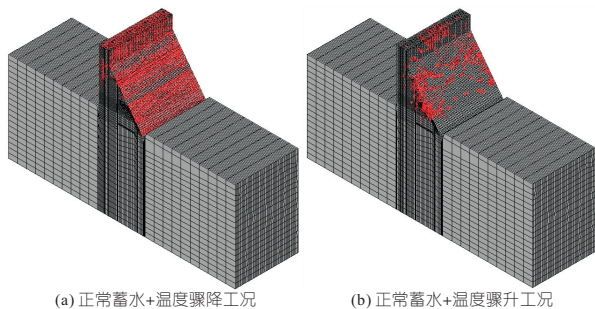
表 2 多尺度宏—细观模型宏观部分材料参数
Tab. 2 Material parameters of macro part of multi-scale macro meso model

材料参数	符号	单位	材料	
			基岩	微膨胀混凝土
密度	ρ	kg/m^3	2 540	2 400
弹性模量	E	GPa	13	25.5
泊松比	ν	—	0.23	0.167
导热系数	λ	$\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{d}\cdot^{\circ}\text{C})$	164.88	187.92
比热	c	$\text{kJ}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$	0.77	0.87
线膨胀系数	α	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	8	9

4 计算结果与分析

在“正常蓄水+温度骤降”及“正常蓄水+温度骤升”工况下,由宏—细观模型计算的大坝裂纹分布情况,见图 5。

由图 5(a)可看出,在“正常蓄水+温度骤降”工况,在坝体上下游表面均产生了较多的裂纹,这符合温度骤降时混凝土坝表面裂纹分布的一般规律。坝址区气温骤降时,坝体表面混凝土温度迅



(a) 正常蓄水+温度骤降工况 (b) 正常蓄水+温度骤升工况

图 5 两种不同工况下大坝裂纹分布云图

Fig. 5 Cloud diagram of dam crack distribution under two different working conditions

速降低,表面混凝土遇冷产生收缩变形,而内部混凝土温度改变缓慢,体积变化不大,表面混凝土的收缩变形受到内部混凝土的约束作用,从而使得坝体表面产生较大的拉应力,进而导致混凝土的砂浆、骨料及界面三相材料发生屈服破坏。

由图 5(b)可看出,在“正常蓄水+温度骤升”工况,温度骤升引起的裂纹,在坝体上下游表面均呈零星分布状态,这是因为坝址区气温骤然升高时,坝体表面混凝土温度迅速升高,表面混凝土遇热产生膨胀变形,而内部混凝土温度改变缓慢,体积变化不大,表面混凝土的膨胀变形受到内部混凝土的约束作用,从而在混凝土的薄弱区,即砂浆相和界面相产生一定的拉应力;另外,由于混凝土骨料的热胀系数相对砂浆和界面小,在表面混凝土的砂浆相和界面相产生较大膨胀变形时,而骨料相的膨胀变形相对较小,从而也会对表面混凝土的砂浆和界面产生一定的约束作用,进而在砂浆相和界面相产生一定的拉应力。因此,在内部混凝土和表面混凝土骨料相的共同约束作用下,温度骤升工况,大坝表面混凝土裂纹主要分布在砂浆和界面区,呈条带状分布状态。

对于温度骤升工况,大坝上游裂纹的分布具体见图 6。由图 6 可看出,在温度骤升工况,由宏一细观模型计算的大坝上游坝面裂纹呈两条明显的带状分布。而石漫滩大坝^{#9}坝段存在 2 条贯穿上游面、坝顶和下游面且垂直于坝轴线的贯通性裂纹,从此结果看,由宏一细观模型计算的裂纹分布情况较为接近石漫滩大坝实际的裂纹分布情况。

综上所述,在大坝坝基无明显的不均匀沉降存在的情况下,石漫滩大坝^{#9}非溢流坝段在蓄水运行后产生 2 条贯通性裂纹的成因主要是由于大坝经历急速升温后,在坝体上游面的混凝土薄弱区形成 2 条表面裂纹,而在冬季大坝经历急速降温后,已经形成的表面裂纹在温度应力作用下继续扩展,并与其他区域存在的表面裂纹汇合,形成

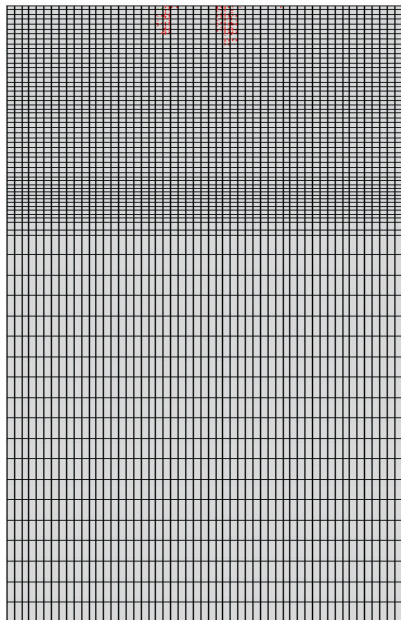


图 6 温度骤升工况大坝上游面裂纹分布云图

Fig. 6 Cloud diagram of dam upstream face crack distribution

连通上下游坝面及坝顶的表面裂纹,而在坝体经历下次急速升温或急速降温历程后,表面裂纹向坝体内部发展,并使坝体内部产生一定程度的损伤。而根据气象资料^[9],石漫滩大坝坝址区虽属于温带季风气候区,但冬季气温急速降低,夏季气温急速升高天气时常发生。因此,石漫滩大坝蓄水运行后,可能在经历了多次的急速降温及急速升温历程后,坝体表面裂纹逐渐向内部发展,坝体内部的损伤逐步积累,当损伤积累到一定程度后,最终形成了贯通性的裂纹。

5 结论

a. 运用本文提出的骨料投放方法,能快速生成三维随机骨料,大大提高了随机骨料的投放效率,可完成大型混凝土结构三维细观模型的建模需求。

b. 采用宏一细观有限元模型计算的石漫滩大坝^{#9}非溢流坝段的裂纹分布情况,较为符合大坝裂纹分布的实际,为更精确地模拟大体积混凝土温度裂缝的扩展提供了一种新思路。

c. 对石漫滩大坝^{#9}非溢流坝段的计算结果表明,除了冬季气温骤降会引起坝体混凝土产生裂纹外,夏季气温的骤升也会造成坝体混凝土的薄弱区产生裂纹,夏季气温的快速升高对运行期混凝土坝开裂的影响不容忽视。周期性的冬季快速降温及夏季快速升温可能是引起运行期石漫滩混凝土重力坝产生贯通性裂纹的主要原因,在今后大坝运行过程中,需对大坝采取表面永久保温措施,而在夏季高温季节可对坝面采取流水降温措施。

(4): 477-490.

- [5] WU X, GUO S, YIN J, et al. On the event-based extreme precipitation across China: Time distribution patterns, trends, and return levels [J]. *Journal of hydrology*, 2018, 562: 305-317.
- [6] 胡睿, 王双银, 王鹏飞. 基于聚类分析的短历时暴雨雨型研究[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(4): 8-10.
- [7] 蔡奇霖, 涂金良, 王兆礼, 等. 东湖水库强风暴雨遭遇联合分布及其对坝顶高程设计的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(1): 117-123, 129.

- [8] JAKOB Z, PHILIPPE N, OLIVIA M, et al. Evaluating the dependence structure of compound precipitation and wind speed extremes[J]. *Earth system dynamics discussions*, 2021, 12(1):1-23.
- [9] 刘微, 邵广文, 吕多智, 等. 黄河中游流域极端降水与气温的关系[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(4): 5-9.
- [10] BACK L E, BRETHERTON C S. The relationship between wind speed and precipitation in the Pacific ITCZ[J]. *Journal of climate*, 2005, 18(20): 4317-4328.

Characteristics of Extreme Precipitation Events Taking into Account Pre and Post Precipitation and Their Response to Wind Speed

QIAN Shu-ni^{1,2}

(1. Guangzhou Water Planning Survey and Design Institute Co., LTD., Guangzhou 510641, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Analyzing the spatial and temporal characteristics of extreme precipitation and the response of wind speed before and after extreme precipitation are of great significance for extreme precipitation characterization, improving the understanding of the relationship between extreme precipitation and wind speed, as well as managing water-related disasters. This study defined event-based extreme precipitation by considering preceding and succeeding precipitation, and classified precipitation patterns into three types, i. e. early peak, later peak and bimodal types according to the locations of precipitation peak, after which the spatiotemporal distributions of extreme precipitation and its relationship with wind speed were analyzed. The results show that single-peak of extreme precipitation occurs more often than bimodal one, and the amount increases from northwest to southeast, with significant upward trend of extreme precipitation detected; Extreme daily precipitation threshold increases with higher wind speed over the southeast and northeast, contrary to the southwest; Moreover, wind speed tends to show anomalies before and after extreme daily precipitation, and it decreases when extreme daily precipitation occurs over the southwest; However, over other regions, it increases before extreme daily precipitation and decreases after then, reaching the peak at the extreme daily precipitation day.

Key words: preceding and succeeding period; extreme precipitation; spatiotemporal distribution; wind speed; response

(上接第 68 页)

参考文献:

- [1] 袁自立, 马福恒, 焦延涛. 石漫滩碾压混凝土重力坝温度效应分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(5): 61-64, 69.
- [2] 唐欣薇, 周元德, 张楚汉. 基于细观损伤力学模型的混凝土坝抗震分析[J]. *水力发电学报*, 2013, 32(2): 195-200, 251.
- [3] BAANT Z P, OH B H. Crack band theory for fracture of concrete[J]. *Materials and structures*, 1983, 16(3): 155-177.
- [4] RODRIGUES E A, MANZOLI O L, JR L. 3D concurrent multiscale model for crack propagation in concrete[J]. *Computer methods in applied mechan-*

- ics and engineering*, 2020, 361: 112813.
- [5] 卿龙邦, 喻渴来, 徐东强. 基于扩展有限元法的混凝土重力坝宏观断裂数值分析[J]. *水力发电学报*, 2017, 36(6): 94-102.
- [6] WU T, WRIGGERS P. Multiscale diffusion-thermal-mechanical cohesive zone model for concrete [J]. *Computational mechanics*, 2015, 55(5): 999-1016.
- [7] 李孔龙. 再生混凝土抗压强度尺寸效应细观数值模拟与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [8] 兰晓芳. 基于扩展有限元的钢纤维混凝土断裂破坏数值研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [9] 马福恒, 沈振中, 袁自立. 河南省石漫滩水库大坝原型观测资料分析报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2012.

Study on Cracking Mechanism of Gravity Dam Based on Macro-Micro Model

ZHAO Ting¹, JIAO Yan-tao², ZHANG Ya-kun¹, HOU Li-li¹

(1. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China; 2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In order to understand the mechanism of crack formation in the RCC gravity dam body during operation, this paper takes the Shimantan reservoir dam as the research object, adopts a method of using the ESEL command in APDL language and the rotation of local coordinate system to complete the random aggregate delivery, and constructs a three-dimensional macro-micro finite element model of the No. 9 non-overflow dam section of the Shimantan dam. The simulation results of aggregate placement show that the method can quickly generate three-dimensional spherical and polyhedral aggregates, greatly improving the efficiency of aggregate generation. The results calculated by the macro-micro model are more consistent with the actual crack distribution of the dam, and the impact of the rapid rise in summer temperature and rapid drop in winter temperature on the cracking of concrete dams during operation cannot be ignored.

Key words: concrete gravity dam; macro-micro finite element model; temperature cracks; APDL commands flow