

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.017

## 基于简化分析方法的混凝土高温爆裂数值模拟\*

张科, 黄海东

(重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074)

**摘要:**介绍了混凝土高温爆裂剥落理论及影响因素,结合国内外混凝土高温爆裂剥落研究成果提出一种简化分析方法,利用CAD-VBA二次开发生成混凝土细观几何模型,采用ADINA非线性分析软件建立热力耦合有限元模型,模拟高温下混凝土结构的爆裂剥落过程,并分析了混凝土高温爆裂剥落的主要影响因素。研究表明:(1)距离受火边界越近,爆裂损伤程度越高;(2)高温爆裂一般发生在距离受火边界0~5 cm范围内的水泥浆体上,混凝土结构(二维)发生爆裂剥落的面积占结构总面积的比例较小;(3)随着受火边界(面)数量、加热速率的增加,孔隙水蒸汽压力、混凝土强度等级、骨料热膨胀系数的增大,结构场外荷载的施加,混凝土结构发生爆裂剥落所需的时间减少;(4)受火边界(面)数量、结构场外荷载、混凝土强度等级对爆裂剥落的损伤程度影响较小,加热速率、孔隙水蒸汽压力及骨料热膨胀系数对爆裂剥落的损伤程度影响较大。

**关键词:**混凝土;热力耦合;高温爆裂;数值模拟

**中图分类号:** TU528.1 **文献标识码:** **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0268-11

## Numerical Simulation on High Temperature Cracking of Concrete based on Simplified Analysis Method

ZHANG Ke, HUANG Haidong

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Theory and influencing factors on high temperature spalling cracking of concrete were introduced. A simplified analysis method was proposed combining the research results of high temperature spalling and peeling of concrete at home and abroad. The secondary development based on CAD-VBA was used to generate the concrete meso-geometry model, and ADINA nonlinear analysis software was used to establish thermal coupling model. The bursting and spalling process of concrete structures under high temperature was simulated by the finite element model, and the main influencing factors on high temperature spalling and spalling of concrete were analyzed. The results show that: (1) The closer to the fire boundary, the higher the burst damage; (2) The high temperature burst generally occurs in the cement ingredient within the range of 0cm to 5cm to the boundary of the fire, and the concrete structure (two-dimensional) bursts and peels off. The proportion of the damage area to the total area of the structure is small; (3) With the increase of fire boundaries (faces), the heating rate, the pore water vapor pressure, the concrete strength grade, the thermal expansion coefficient of the aggregate and the application of boundary load, the time required for bursting and spalling of struc-

\* 收稿日期:2018-04-25;修回日期:2018-06-26

作者简介:张科(1993-),男,硕士研究生。主要从事桥梁抗火研究。Email:694813776@qq.com

tures reduces; (4) The number of fire boundaries (planes), external loads of the structure field, and the strength grade of concrete have little effect on the damage degree due to burst spalling. The heating rate, pore water vapor pressure, and the thermal expansion coefficient of aggregates have great influence on the damage degree of burst spalling.

**Keywords:** concrete; thermodynamic coupling; high temperature burst; numerical simulation

## 引言

火灾高温荷载作用下,混凝土结构内部将产生不均匀的温度场及热蒸汽,进而形成较大的温度应力和蒸汽压力,导致裂缝出现,最终可能引发受火面的爆裂剥落,从而影响到结构刚度及耐久性能。关于高温下混凝土的爆裂、剥落,迄今尚未达成公认的研究理论,原因在于影响高温下混凝土爆裂的因素十分复杂,其中涉及到多个物理场之间的耦合、材料高温下的化学热分解、水分运输、蒸汽压力及混凝土高温损伤本构等诸多因素,到目前为止,已有两种理论来解释爆裂剥落:蒸汽压力机理和温度梯度诱导的热应力机制。国内外学者对混凝土结构高温下的爆裂、剥落问题在理论和试验上都做了较为系统的研究,主要涉及到高温损伤本构、数学模型的建立及爆裂剥落影响因素的试验分析等多个方面。

Z. P. Bažant<sup>[1]</sup>指出,蒸汽压力只能触发火灾剥落的发生,热应力诱发的势能可能起主导作用; F. J. Ulm等<sup>[2-3]</sup>开发了一种化学模型来分析隧道中混凝土环的火灾剥落。他们使用塑性应变来评估混凝土的剥落深度,并表明火剥落是由受限制的热膨胀引起的压缩应力引起的; D. Gawin等<sup>[4]</sup>基于混合理论建立数值模型,考虑了加热混凝土的特征变形,即无载热应变(LFTS)和载荷引起的热应变(LITS,也称为“热蠕变”),以及混凝土的开裂、热化学降解和材料性质的相关变化,如渗透性和强度性能; J. Zhao等<sup>[5]</sup>基于多孔弹性理论,提出了一种各向异性的固定模糊裂纹模型,用于模拟高温高性能混凝土的剥落和开裂,在模型中,水泥浆体的渗透性和杨氏模量根据热分解分析估计为加热历史的函数,以数字方式建模混凝土中的蒸汽压力积聚和水分输送,推导了非线性力学分析与热应力和蒸汽压力的本构关系; C. E. Majorana等<sup>[6]</sup>提出了一种模拟混凝土剥落过程的新方法,基于完全非线性位移,应变理论,考虑高温下混凝土的应力-应变本构关

系、收缩、热蠕变、损坏等因素,将各种影响因素和完全非线性位移,应变理论相结合,能够在部分混凝土达到动态不稳定破坏时得到压力,热力和机械场之间的复杂相互作用,如高温下混凝土的剥落过程;李荣涛<sup>[7]</sup>基于 Mazars 损伤模型和三参数 Wilam-Warnke 弹塑性屈服准则,提出化学塑性-损伤耦合本构模型,该模型涉及到混凝土的高温塑性破坏及微裂缝的发展过程,体现了混凝土高温爆裂的强度及刚度的损失。

国内学者外关于混凝土结构高温爆裂剥落的研究大部分是提出一种独有的理论数学模型,或者在已有的模型基础上改进完善,主要包括完全耦合的化学塑性热机械模型、热弹性损伤模型、热化学降解及水分运输的混合理论模型、各向异性固定模糊裂纹模型、完全非线性位移应变理论模型、化学塑性应变硬化软化损伤模型等。上述各理论模型均已被国内外学者广泛接受,且有相关的试验依据,它们共同的特点是涉及到多学科的交叉应用、基于大量的数学方程式、求解过程十分复杂、借用高难度的计算机编程技术可得到合理的结果。作者认为,实际火灾工程中难以运用到这些复杂的数学模型,故可将上述影响爆裂剥落的某些复杂因素进行合理的简化处理,使混凝土结构高温爆裂剥落的数值分析更具适用性。

## 1 爆裂剥落简化分析方法

混凝土高温爆裂剥落是一种十分复杂的物理化学反应,涉及到化学、热、力、湿等多物理场耦合的传热传质,其中包括材料的高温热分解、水分状态变化、水分运输、热蠕变、机械效应、蒸汽压力、热应力及混凝土高温损伤本构等。若通过数值方法充分模拟出混凝土高温爆裂剥落的全过程,首先要具备相当高的计算机编程能力,目前还没有软件或程序能够合理模拟上述所有因素,同时也需掌握一定的化学、材料学、热力学及多物理场耦合等相关学科知识,才能通过计算机编程实现混凝土高温爆

裂剥落的数值模拟。本文将对上述种种因素实行合理范围内的简化处理,具体简化过程如下:

(1)不考虑材料(硬化水泥浆)的高温热分解。J. Zhao等<sup>[8]</sup>通过试验数据预测出混凝土表面温度在300和400℃下的最大分解度分别仅为7.25%和12.7%,且大量的试验数据统计,混凝土结构发生高温爆裂剥落的表面温度为400~600℃,同时热分解为复杂的化学反应,据此可忽略材料的高温热分解。

(2)不考虑水分运输及状态的转变。实际工程中,混凝土结构中的含水量一般都较低,故在建模时仅考虑由水产生的蒸汽压力,其状态转变和运输不予考虑。

(3)蒸汽压力由单元的热膨胀系数模拟。蒸汽压力是混凝土高温爆裂剥落的重要影响因素,建模时将水泥浆体的内部水分视为气相的蒸汽水,且蒸汽压力对应力和应变场具有与热膨胀系数相似的作用,J. Zhao等<sup>[5,9]</sup>通过数值模型计算,得出蒸汽压力的影响转化为等效热膨胀系数要比高性能混凝土的热膨胀系数低一个数量级。

(4)忽略高温热蠕变、机械效应的影响。此两类因素需通过复杂的混凝土高温损伤本构二次开发才能实现,本文不予考虑。

(5)热应力通过ADINA热力耦合功能实现。ADINA在非线性计算方面具有较高的处理能力,且能计算包括热力耦合在内的非线性问题,利用程序的直接耦合计算可以快速而合理的算出温度荷载产生的热应力。

(6)混凝土高温损伤本构模型采用ADINA自带的concrete材料。该材料可以实现高温下损伤程度及位置的模拟,并运用AUTOCAD-VBA二次开发功能随机生成混凝土粗细骨料和孔隙水,将混凝土模拟为由水泥浆体、粗细骨料、孔隙水三种材料组成的结构,其中水泥浆体采用concrete材料,粗细骨料和孔隙水模拟为弹性材料。

## 2 高温爆裂剥落数值模拟

大量的试验数据表明,混凝土高温爆裂一般发生在距离受火面0~5cm,为了能直观的描述爆裂剥落,将有限元模型简化为面积为100cm<sup>2</sup>的局部二维结构。

### 2.1 ADINA 混凝土材料本构模型

ADINA中提供了专门用于模拟混凝土结构分析的混凝土材料模型,它是基于增量式正交本构理论的混凝土材料模型,理论基础是非线性弹性理论和断裂力学理论。这种本构模型可以模拟混凝土材料最基本的材料属性,例如:当主应力达到最大允许值时,材料拉坏;在较高压力作用下压溃,材料压溃后具有应变软化的热性,直到极限应变,材料完全破坏。

典型的单轴应力—应变关系曲线为Saenz曲线,如图1所示。显示了3个应变阶段: $\epsilon \geq 0, 0 > \epsilon \geq \bar{\epsilon}_c$ 和 $\bar{\epsilon}_c > \epsilon \geq \bar{\epsilon}_u$ ,其中 $\bar{\epsilon}_c$ 是对应于最大应力 $\bar{\sigma}_c$ 时的应变, $\bar{\epsilon}_u$ 是对应于最终应力 $\bar{\sigma}_u$ 时的应变。

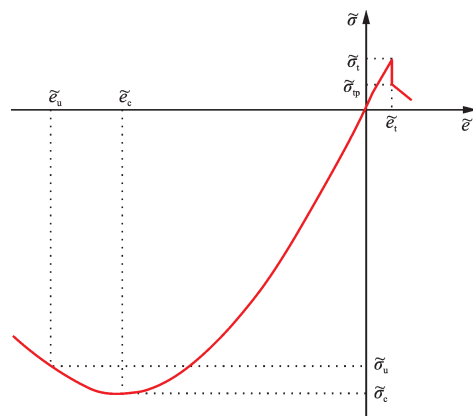


图1 混凝土单轴应力—应变关系

Fig. 1 Uniaxial stress-strain relationship of concrete

当 $\epsilon > 0$ 时,材料受拉,应力—应变关系是线性的,直到破坏应力 $\bar{\sigma}$ ,时材料拉坏,弹性模型为 $\bar{E}_0$ ,由式(1)确定:

$$\bar{\sigma} = \bar{E}_0 \epsilon \quad (1)$$

当 $\epsilon \leq 0$ 时,假设应力—应变如式(2)所示的关系:

$$\frac{\epsilon}{\bar{\sigma}_c} = \frac{\left(\frac{\bar{E}_0}{\bar{E}_s}\right) \left(\frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}_c}\right)}{1 + A \left(\frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}_c}\right) + B \left(\frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}_c}\right)^2 + C \left(\frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}_c}\right)^3} \quad (2)$$

因此:

$$\bar{E} = \frac{\bar{E}_0 \left[ 1 - B \left(\frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}_c}\right)^2 - 2C \left(\frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}_c}\right)^3 \right]}{\left[ 1 + A \left(\frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}_c}\right) + B \left(\frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}_c}\right)^2 + C \left(\frac{\epsilon}{\bar{\epsilon}_c}\right)^3 \right]^2} \quad (3)$$

式中,

$$A = \frac{\bar{E}_0 + (p^3 - 2p^2)\frac{\bar{E}_0}{\bar{E}_s} - (2p^3 - 3p^2 + 1)}{(p^2 - 2p + 1)p};$$

$$B = \left(2\frac{\bar{E}_0}{\bar{E}_s} - 3\right) - 2A; \quad \bar{E}_s = \frac{\bar{\sigma}_c}{\bar{e}_c};$$

$$C = \left(2 - \frac{\bar{E}_0}{\bar{E}_s}\right) + A; \quad p = \frac{\bar{e}_u}{\bar{e}_c}; \quad \bar{E}_u = \frac{\bar{\sigma}_u}{\bar{e}_u}$$

值得注意的是,式(3)假设荷载是单调递增的,如果应力状态为卸载或加载到卸载的状态,应使用初始杨氏模量 $\bar{E}_0$ 。对于超过 $\bar{e}_u$ 的应变状态,假设应力线性减少到0,使用杨氏模量 $\bar{E}_u$ ,按式(4)定义:

$$\bar{E}_u = \frac{\bar{\sigma}_u - \bar{\sigma}_c}{\bar{e}_u - \bar{e}_c} \quad (4)$$

因此可以通过设定 $\bar{\sigma}_u$ 近似等于 $\bar{\sigma}_c$ 来模拟受约束的混凝土。

以上用到符号的含义如下(所有单轴性质都在上面加~号,左上标 $t$ 表示时间):

$\bar{E}$ 为时间 $t$ 的单轴切线杨氏模量; $\bar{E}_0$ 为单轴弹性模量; $\bar{E}_s$ 为达到相应的单轴最大应变的割线模量; $\bar{E}_u$ 为达到单轴最终应变的割线模量; $\bar{e}$ 为单轴应变; $\bar{e}_c$ 为相应于 $\bar{\sigma}_c$ 的单轴应变( $\bar{e}_c < 0$ ); $\bar{e}_u$ 为单轴极限压应变( $\bar{e}_u < 0$ ); $\bar{\sigma}$ 为单轴应力; $\bar{\sigma}_t$ 为单轴取舍点拉力( $\bar{\sigma}_t > 0$ ); $\bar{\sigma}_{tp}$ 为断裂后单轴取舍点拉力( $\bar{\sigma}_{tp} > 0$ ); $\bar{\sigma}_c$ 为最大单轴压应力( $\bar{\sigma}_c < 0$ ); $\bar{\sigma}_u$ 为单轴极限压应力( $\bar{\sigma}_u < 0$ )。

本文仅给出 concrete 材料的单轴应力—应变关系,其多轴应力—应变关系及压缩破坏准则见文献[18]。

## 2.2 基于 CAD-VBA 的几何模型

利用 AUTOCAD 自带的 VBA 宏命令建立混凝土二维骨料随机生成模型,方法简单,模型直观且精度较高,可将建立后的几何模型导入到 ADINA 程序中,再进行网格剖分及有限元分析,采用 VBA 的宏命令流通俗易懂,不需要编程者具备高深的计算机编程能力。本文将混凝土模拟为由水泥浆体、粗细骨料、孔隙水三种成分组成的非均质材料,其中粗细骨料和孔隙水都是均匀分布在混凝土结构内,实际工程中,混凝土结构中粗细骨料一般占总体积的 60%~80%,孔隙水的比例则较少,一般为总体积的 4%~7%,在建立几何模型时,骨料取 65% 总体积,骨料形状为圆形,通过颗粒级配分

布曲线<sup>[10]</sup>得到骨料的参考半径。孔隙水取 5% 总体积,其余部分为水泥浆体,几何模型如图 2~3 所示。

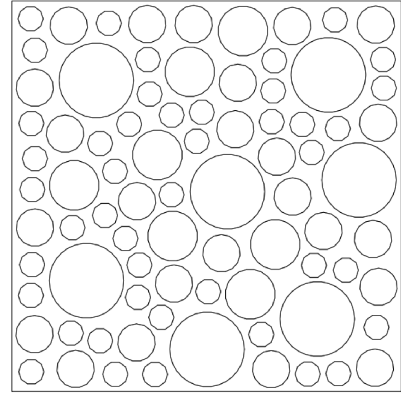


图2 CAD-VBA 骨料随机生成模型

Fig. 2 CAD-VBA random aggregate generation model

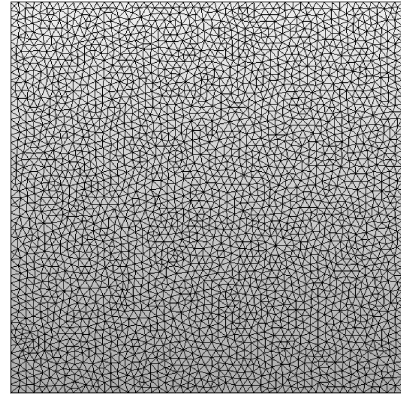


图3 有限元网格剖分后的几何模型

Fig. 3 Geometric mesh of finite element

## 2.3 基于 ADINA 的有限元模型

混凝土模拟为由水泥浆体、粗细骨料、孔隙水三种成分组成的非均质材料,虽然钢筋在热力耦合分析中对传热传质的影响较小,但是为了使结果更加接近工程实际情况,在进行有限元分析时考虑了钢筋(普通钢筋,HRB335)这一影响因素。

对于水泥浆体、粗细骨料、孔隙水三种材料的热力学参数的取值,作如下说明:

(1) 由于缺乏水泥浆体的试验数据,将混凝土性能参数近似处理为水泥浆体的热力学性能,并采用 concrete 材料模拟,本文选取 C40 混凝土为研究对象。

(2) 根据文献[11-12],骨料可视为弹性材料,即不考虑骨料高温下的损伤情况,其弹性模量为 45

GPa, 质量密度取  $2\ 620\ \text{kg/m}^3$ , 比热容取  $710\ \text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ , 热传导系数取  $2\ \text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ , 在温度作用下相对弹性模量首先从  $20\ ^\circ\text{C}$  时的 1 逐渐降低到  $200\ ^\circ\text{C}$  时的 0.967, 然后在  $400\ ^\circ\text{C}$  下继续快速降低至 0.77, 然后保持不变。在文献[13]的试验数据中, 由于并且没有观察到由骨料和水泥浆体之间的体积失配引起的裂纹, 故为了简化分析, 对于水泥浆体和骨料都使用相同的有效膨胀系数, 具体取值见表 1。

表 1 水泥浆体热膨胀系数取值

Table 1 Values for thermal expansion coefficient of cement paste

温度/ ( $^\circ\text{C}$ )	热膨胀系数/ ( $10^{-6}\ \text{m}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )	温度/ ( $^\circ\text{C}$ )	热膨胀系数/ ( $10^{-6}\ \text{m}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )
20	5.6	500	11.3
100	6.8	600	12.8
200	7.6	700	13.6
300	8.9	800	14.4
400	10.2		

(3) 将孔隙水模拟为弹性材料, 直接当作高温下的蒸汽水处理, 蒸汽压力对应力和应变场具有与热膨胀相似的作用, 如果蒸汽压力的影响转化为等效膨胀, 等效膨胀系数要比混凝土(水泥浆体)低一个数量级, 随温度变化的具体取值见表 2, 由于孔隙水所占体积较少, 除热膨胀系数之外的热力学参数均和水泥浆体相同。

钢筋与水泥浆体的热力学参数, 本文仅给出其常温下的取值, 见表 3、4 不同高温下取值情况见文献[14-16]。

有限元分析前处理步骤如下:

(1) 分别给水泥浆体、粗细骨料、孔隙水、钢筋赋予相应的结构场和温度场材料属性, 其中水泥浆

表 2 孔隙水单元等效热膨胀系数取值

Table 2 Equivalent thermal expansion coefficient of pore water

温度/ ( $^\circ\text{C}$ )	等效热膨胀系数/ ( $10^{-7}\ \text{m}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )	温度/ ( $^\circ\text{C}$ )	等效热膨胀系数/ ( $10^{-7}\ \text{m}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ )
20	1	500	6
100	2	600	7
200	3	700	8
300	4	800	9
400	5		

表 3 常温下钢筋热力学参数

Table 3 Thermodynamic parameters of steel bars at room temperature

参数	取值
热传导系数/ $(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	49
比热容/ $(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	520
弹性模量/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$2.0\times 10^{11}$
泊松比	0.3
热膨胀系数/ $(\text{m}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	$1.14\times 10^{-5}$
应变硬化模量/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$7.96\times 10^9$
屈服应力/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$3.35\times 10^8$
屈服应变	0.001 675
极限拉应变	0.016 75
极限拉应力/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$4.55\times 10^8$

表 4 常温下水泥浆体热力学参数

Table 4 Thermodynamic parameters of cement paste at room temperature

参数	取值
热传导系数/ $(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	1.62
比热容/ $(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	881.5
弹性模量/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$3.25\times 10^{10}$
泊松比	0.2
热膨胀系数/ $(\text{m}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	$5.6\times 10^{-6}$
单轴抗拉标准值/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$2.4\times 10^6$
单轴抗压标准值/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$-2.68\times 10^7$
峰值压应变	-0.002 58
单轴极限压应变	-0.006 45
单轴极限压应力/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$	$-1.32\times 10^7$

体、粗细骨料、孔隙水均采用 2D Solid 单元, 该类型单元适用于热力耦合分析的多物理场计算, 钢筋采用 Truss 单元, 并定义为 Rebar 钢筋, 在由 ADINA 生成求解文件时将自动对钢筋划分网格, 并自动生成钢筋与其他三种材料之间的约束方程。

(2) 在图 4 的左边界上施加 Y 方向的平动约束即结构场边界条件, 右边界上施加包含热对流和热辐射的对流热荷载(单边界受火)即温度场边界条件, 包含热对流和热辐射的综合换热系数见表 5, 整个有限元模型初始温度设为  $20\ ^\circ\text{C}$ , 以国际标准升温曲线 ISO834 为升温方式, 升温时间取为 1 555 s, 即理论上受火边界所处的环境温度可达到  $820\ ^\circ\text{C}$ 。

(3) 热力耦合分析采用与时间相关的瞬态分析, 由于结构场的变化对温度场的变化无影响或影

表 5 综合换热系数

Table 5 Comprehensive heat transfer coefficient

温度/ (°C)	综合换热系数/ $/(W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1})$	温度/ (°C)	综合换热系数/ $/(W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1})$
20	1	500	23.3
60~200	11.6	600	34.9
300	14.7	700	46.5
400	17.4	800	64

响非常小,可以忽略不计,故采用 One-Way Coupling 的单向直接耦合。

(4)由于仅定义的 Y 方向的平动约束,可关闭其余 5 个多余的约束选项,非线性分析采用 Full Newton 计算方法,Displacement 收敛准则。

### 2.4 爆裂剥落热力耦合

有限元模型如图 4 所示,黑色网格部分为水泥浆体单元和孔隙水单元,黄色细线为钢筋单元,其余部分为粗细骨料单元,结构场边界条件和温度场边界条件分别施加于左右边界上,运行计算,得到模型温度、应力、应变、裂缝、损伤分布等情况。

当程序计算至  $t=344$  s 时,非线性分析无法收敛,当模型表面温度达到一定值时,即发生机械故障<sup>[17]</sup>,由此可推断  $t=344$  s 时钢筋混凝土模型发生高温爆裂剥落,结构失效。

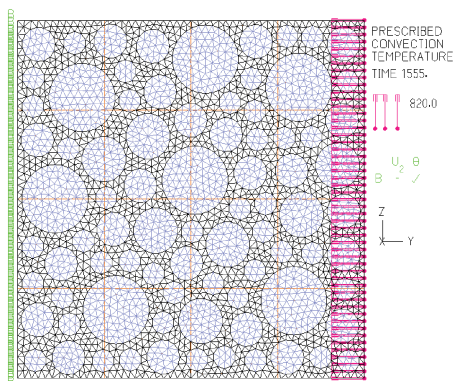
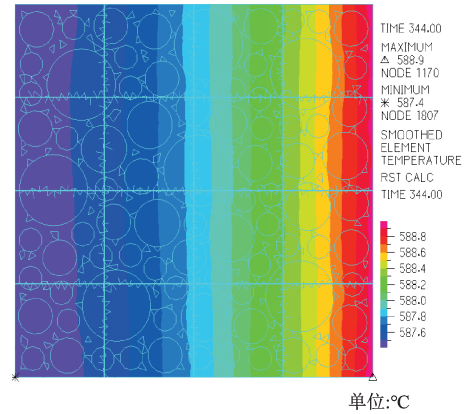


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

由图 5~图 9 可得出以下结论:

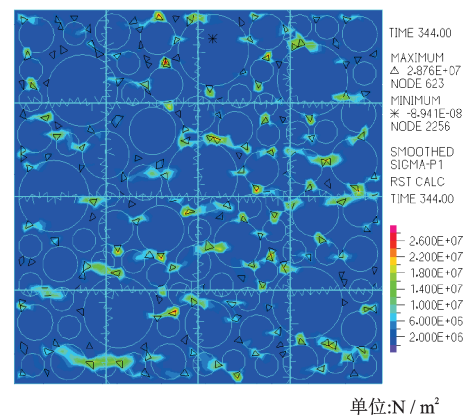
(1)当模型受火边界温度接近  $590^\circ C$  时,非线性分析不收敛,高温爆裂剥落致使结构失效,此时整个模型的单元温度均接近  $590^\circ C$ ,与国际标准升温曲线 ISO-834 基本相符,证明了本文材料热工性能参数选取的合理性。



单位:°C

图 5 温度云图/(°C)

Fig. 5 Temperature distribution



单位:N/m²

图 6 第一主应力云图(N/m²)

Fig. 6 The first principal stress distribution

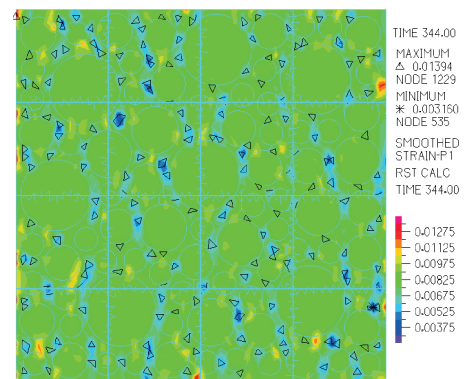


图 7 第一主应变云图

Fig. 7 The first main strain distribution

(2)裂缝数量为黄色的区域大致分布于距离受火边界  $0\sim 5$  cm 处的水泥浆体上,与试验结果<sup>[5]</sup>基本相符,试验结果的裂缝损伤如图 9 所示;第一主应变值均明显大于模型其它区域,第一主应力值为  $6\sim 10$  MPa,略高于众多试验实测值  $4\sim 6$  MPa。

(3)裂缝数量为黄色的区域约占模型总面积的

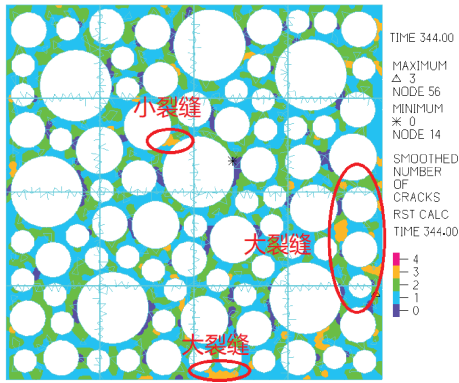


图8 裂缝数量分布云图  
Fig. 8 Distribution of cracks

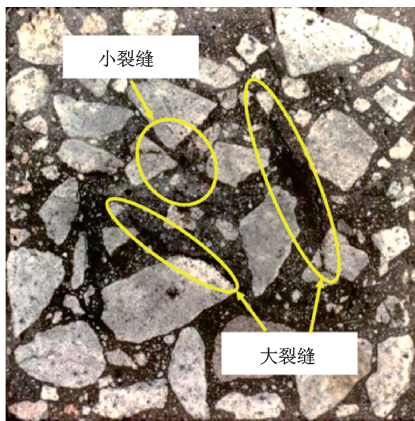


图9 裂缝损伤  
Fig. 9 Crack damage

1.5%左右,其中结构约束边界上的损伤(高应变值)主要是边界条件的影响,不作爆裂剥落现象考虑,故混凝土结构(二维)发生爆裂剥落的面积占结构总面积的比例较小。

图9所示的试验结果与图8模拟结果存在误差,其原因如下:

(1)水泥浆体热力学材料参数的选取与试验混凝土结构存在一定差异,且其单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模型均小于试验混凝土结构;

(2)骨料形状均简单的考虑为圆形骨料,试验混凝土结构为符合工程实际的不规则多边形骨料;

(3)受热边界数量为单边界,试验混凝土结构的受热边界数量为全边界受热(六个面),故试验结果的裂缝损伤区域位于试件的中心位置。

### 3 爆裂剥落影响因素分析

国内外学者通过大量的试验分析得出下列因素是影响混凝土高温爆裂剥落的主要原因:加热速

率和加热方式、截面尺寸和部分形状、水分含量、蒸汽压力即孔隙水压力、渗透性、混凝土强度、压应力和约束、聚集体(骨料)类型、热应力、聚丙烯纤维等。具体分析如下:

(1)加热速率和加热方式主要通过调整升温曲线即火灾升温模式,增加结构受火面数量来影响爆裂剥落,本文将仅分析加热方式。

(2)高温爆裂剥落一般位于受火面0~5 cm位置处,故截面尺寸和部分形状的影响不予考虑。

(3)实际混凝土结构工程中水分含量普遍较低,且变化范围不大,故仅考虑对爆裂剥落有显著影响的高温蒸汽压力,即不再按照前文取孔隙水的等效热膨胀系数比混凝土低一个数量级,而是通过单独改变孔隙水的等效热膨胀系数来分析对爆裂剥落的影响。

(4)目前ADINA软件无法在热力耦合分析中定义渗透率,同时高强度的混凝土其渗透率低,爆裂剥落概率高,故渗透率可以通过改变混凝土强度等级来体现。

(5)压应力和约束主要通过施加外荷载、结构场边界条件来增加混凝土构件剥落的敏感性,通过前文的分析,结构场边界条件引起的高温损伤不作爆裂剥落考虑,故着重分析外荷载对爆裂剥落的影响。

(6)聚集体(骨料)类型不同,对应的热膨胀系数也随之不一样,试验证明含有低热膨胀骨料的混凝土发生热应力爆裂性剥落的可能性较小,热应力主要通过材料的高温热膨胀来表现,在进行热力耦合分析时,考虑将骨料和水泥浆体使用相同的有效膨胀系数,本文将分析其对爆裂剥落的影响。

由于篇幅有限,仅给出各影响因素下的典型裂缝数量分布云图,并以表格的形式列出各影响因素下结构的失效时间、模型最高温度、爆裂剥落处第一主应力及应变、剥落损伤面积(估算)等情况。

#### 3.1 受火边界数量

分别研究模型在两边界受火、三边界受火、四边界受火条件下的温度、应力、应变、裂缝损伤等情况,模型其他条件保持不变,计算结果见表6,三受火边界下的裂缝数量分布云图如图10所示。

随着受火边界(面)数量的增加,混凝土结构发生爆裂剥落所需的时间减少,对应的受火边界(面)温度、爆裂应力及损伤程度降低,但减少幅度均不明显。最大应变出现在三边界受火的条件下,由于受火时间相对较少,四边界受火下的模型应变和损

表 6 受火边界数量对爆裂剥落的影响

Table 6 Effect of fire boundary on burst flaking

受火边界数量	爆裂时间/s	最高温度/(°C)	爆裂处应力/MPa	爆裂处应变	损伤面积/%
1	344	589	6~10	0.013 94	1.5
2	231	533	5~8.3	0.014 77	1.0
3	147	464	4~6.6	0.018 30	0.5
4	111	430	3.6~6	0.007 68	0.2

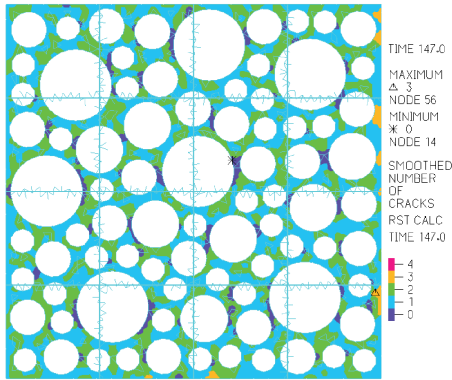


图 10 裂缝数量分布云图(三受火边界)

Fig. 10 Distribution of cracks (fire on three borders)

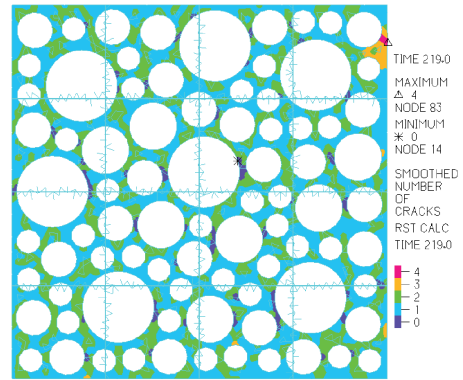


图 11 裂缝数量分布云图(组合 2 孔隙水等效热膨胀系数)  
Fig. 11 Distribution of cracks (combination 2 pore water equivalent thermal expansion coefficient)

伤程度均相对较低。由此可见,受火边界(面)数量对爆裂剥落的损伤影响程度较小。

### 3.2 孔隙水等效热膨胀系数

在表 2 的基础上,分别升高一个、两个、三个数量级,即各温度下的热膨胀系数为  $1 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$ 、 $1 \times 10^{-5} \sim 9 \times 10^{-5}$ 、 $1 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-4}$  (温度每上升  $100^\circ\text{C}$ ,数值增大一倍),模型其他条件保持不变。为了便于分析,将各组等效热膨胀系数从小至大分别命名为组合 1(表 1)、组合 2、组合 3、组合 4,分别对各组合下的有限元模型进行热力耦合分析,计算结果见表 7,组合 2 下的裂缝数量分布云图如图 11 所示。

随着孔隙水热膨胀系数的增大,模型剥落失效时间减少,最高温度也随之降低,当等效膨胀系数

表 7 孔隙水等效热膨胀系数对爆裂剥落的影响

Table 7 Effect of pore water equivalent thermal expansion coefficient on burst peeling

热膨胀系数	爆裂时间/s	最高温度/(°C)	爆裂处应力/MPa	爆裂处应变	损伤面积/%
组合 1	344	589	6~10	0.013 94	1.5
组合 2	219	525	8.3~11	0.137 50	1.0
组合 3	161	474	3~5	0.054 59	20
组合 4	13	100	2~3.3	0.018 78	15

取组合 2 时,爆裂应力及应变均成倍数增加,而剥落损伤面积仅为受火边界上的一小部。实际工程中组合 4 对应的情况比较罕见,不作分析。组合 3 下的剥落损伤面积高达约 20%,这说明在热应力这一影响因素不变的前提下,蒸汽压力是导致混凝土结构高温爆裂损伤的主要原因。由此推断:孔隙水蒸汽压力的增大将增加混凝土结构高温爆裂的敏感性。

### 3.3 混凝土强度等级

在爆裂剥落方面,低等级混凝土优于高等级混凝土。由于其高强度,低渗透性和良好的耐久性,在室温下被归类为“高性能”的混凝土实际上是高温下的“低性能”混凝土,因为其高敏感性而容易发生爆裂。本文将水泥浆体的热力学性能视为混凝土来处理,下面依次分析 C50、C60、C70、C80 强度等级下的混凝土爆裂剥落情况,即仅调整前处理中水泥浆体单元的高温力学性能,模型其他条件保持不变,分别对不同强度等级下的有限元模型进行热力耦合分析,计算结果见表 8, C50 下的裂缝数量分布云图如图 12 所示。

混凝土强度等级越高,模型越容易剥落失效(C80 除外),C50 对应的应变为各强度等级下的最

表 8 混凝土强度等级对爆裂剥落的影响

Table 8 Effect of concrete strength on burst peeling

强度等级	爆裂时间/s	最高温度/(°C)	爆裂处应力/MPa	爆裂处应变	损伤面积/%
C40	344	589	6~10	0.013 9	1.5%
C50	276	554	4.8~8	0.051 1	2.5%
C60	173	486	4.5~7.5	0.009 2	0.5%
C70	148	462	4~6.8	0.008 3	0.5%
C80	200	512	4.2~7.5	0.009 5	0.5%

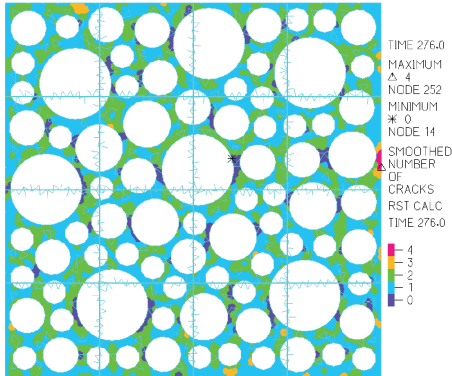


图 12 裂缝数量分布云图(C50)  
Fig. 12 Distribution of cracks(C50)

大值,其对结构造成的损伤程度也相对较大,C60、C70、C80三者情况无明显差别,区别在于C80高强度混凝土其结构失效时间大于C60与C70,原因在于模型无法模拟其高强度对应的低渗透性,导致受火失效时间反而增大。由此可知:一般情况下,混凝土强度等级越高,其爆裂剥落敏感度越大。

### 3.4 结构场外力荷载

在图 3 有限元模型的受火边界上依次额外施加 30、50、70、160、200 kN/m 的均布荷载(压力荷载),模型其他条件保持不变,计算结果见表 9,70 kN/m 下的裂缝数量分布云图如图 13 所示。

额外的施加均布荷载仅对混凝土结构爆裂失

表 9 外力均布荷载对爆裂剥落的影响

Table 9 Effect of uniform load on burst cracking

荷载大小	爆裂时间/s	最高温度/(°C)	爆裂处应力/MPa	爆裂处应变	损伤面积/%
0	344	589	6~10	0.013 9	1.5
30	309	571	6~10	0.078 4	1.5
50	197	506	4.8~8	0.010 3	1.2
70	173	486	4.5~7.5	0.015 5	1.5
160	160	473	4~6.6	0.008 9	0.2
200	144	458	4~6.6	0.008 3	0.5

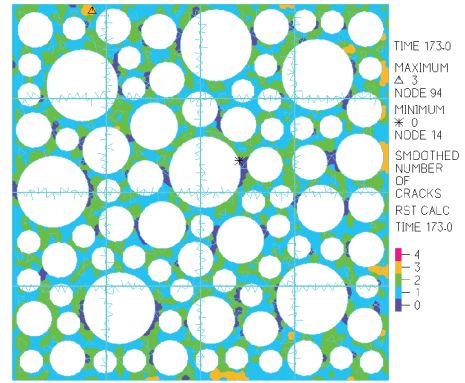


图 13 裂缝数量分布云图(70 kN/m)  
Fig. 13 Distribution of cracks(70 kN/m)

效时间有显著的影响,即承受的均布荷载越大,越容易导致高温爆裂的发生,而剥落损伤程度无明显变化。实际火灾工程中,混凝土结构往往同时受到火荷载、汽车荷载、人群荷载等众多外力的影响,故车流量较多、人流集中的混凝土结构发生火灾时,靠近火源的部位将短时间内出现爆裂剥落现象。

### 3.5 骨料热膨胀系数

水泥浆和骨料使用相同的热膨胀系数,在表 1 的基础上,将各温度下的热膨胀系数依次调整为  $5 \times 10^{-7} \sim 13 \times 10^{-7}$ 、 $1 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$ 、 $1 \times 10^{-5} \sim 9 \times 10^{-5}$ (温度每上升 100 °C,数值增大一倍),模型其他条件保持不变,数值从小到大分别为组合 1、组合 2、组合 3(表 1)、组合 4。分别对各组合下的有限元模型进行热力耦合分析,计算结果见表 10,组合 2 下的裂缝数量分布云图如图 14 所示。

表 10 骨料热膨胀系数对爆裂剥落的影响

Table 10 Effect of Thermal expansion coefficient of aggregate on burst cracking

热膨胀系数	爆裂时间/s	最高温度/(°C)	爆裂处应力/MPa	爆裂处应变	损伤面积/%
组合 1	453	632	5~8.3	0.001 0	0.5
组合 2	424	624	8.3~11.6	0.008 4	1.0
组合 3	344	589	6~10	0.013 9	1.5
组合 4	27	200	4.5~7.5	0.033 1	30

含低膨胀系数骨料的混凝土结构其爆裂敏感度相对较低,对应的高温损伤程度也相对较小,若混凝土结构中骨料的热膨胀系数比较大,例如组合 4 的  $1 \times 10^{-5} \sim 9 \times 10^{-5}$ ,则很容易在火灾发生时的短时间内导致爆裂剥落的出现,且损伤程度较大。故

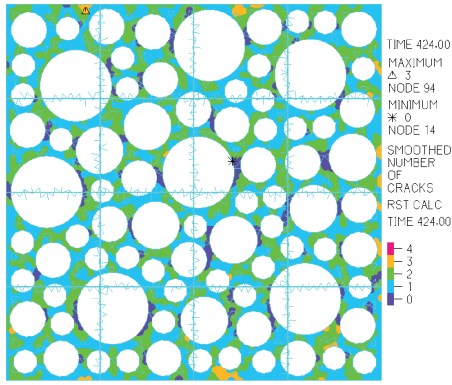


图14 裂缝数量分布云图(组合2骨料热膨胀系数)

Fig. 14 Distribution of cracks(combination 2 thermal expansion coefficient of aggregate)

实际混凝土结构工程中,在保证符合规范的前提下,建议选用热膨胀系数相对较低的骨料。

## 4 结论

基于混凝土高温爆裂的简化方法,采用ADINA有限元软件对 $100\text{ cm}^2$ 的钢筋混凝土模型进行高温爆裂剥落的热力耦合分析,主要研究了其高温下的温度、应力、应变、剥落损伤等情况,并分析了各种因素对高温爆裂剥落的影响,包括受火边界(面)数量、孔隙水等效热膨胀系数(蒸汽压力)、混凝土强度等级、外力荷载、骨料热膨胀系数,可为研究混凝土结构火灾提供参考,主要结论有:

(1)距离受火边界越近,爆裂损伤程度越高。

(2)高温爆裂一般发生在距离受火边界 $0\sim 5\text{ cm}$ 的水泥浆体上,混凝土结构(二维)发生爆裂剥落的面积占结构总面积的比例较小。

(3)随着受火边界(面)数量、加热速率的增加,孔隙水蒸汽压力、混凝土强度等级、骨料热膨胀系数的增大,结构场外荷载的施加,混凝土结构发生爆裂剥落所需的时间减少。

(4)受火边界(面)数量、结构场外荷载、混凝土强度等级对爆裂剥落的损伤程度影响较小,加热速率、孔隙水蒸汽压力及骨料热膨胀系数对爆裂剥落的损伤程度影响较大。

但本文的简化方法也存在一定局限:

(1)未能考虑骨料与水泥浆体之间的接触及粘结方式,其中涉及到较为复杂的热力学边界条件,有待进一步分析研究。

(2)水泥浆体与混凝土的热力学性能存在一定差异,其热力学性能参数的选取直接影响到模拟计

算结果,往后应开展相关试验,以得到符合实际混凝土结构的热力学参数数值。

(3)由于爆裂剥落损伤是随机分布在距离受火边界 $0\sim 5\text{ cm}$ ,故无法给出受火边界距离与爆裂损伤程度的定量关系。

(4)ADINA软件最多仅能模拟两场耦合作用,故未能考虑湿度场的影响作用,而是简单的将孔隙压力等效为孔隙热膨胀系数,往后可采用多场(三场及以上)耦合软件将湿扩散系数考虑进去。

## 参考文献:

- [1] Bažant Z P. Analysis of pore pressure, thermal stress and fracture in rapidly heated concrete[C]//NIST International Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete Gaithersburg, USA: MD, 1997: 155-164.
- [2] Ulm F J, Coussy O, Bažant Z P. The 'Chunnel' fire I: chemoplastic softening in rapidly heated concrete[J]. Engineering Mechanical, 1999, 125(3):272-282.
- [3] Ulm F J, Acker P, Levy M. The 'Chunnel' fire II: analysis of concrete damage [J]. Engineering Mechanical, 1999, 125(3):283-289.
- [4] Gawin D, Pesavento F. An overview of modeling cement based materials at elevated temperatures with mechanics of multiphase porous media[J]. Fire Technology, 2012, 48:753-793.
- [5] Zhao J, Zheng J J. Spalling and cracking modelling of high performance concrete exposed to elevated temperatures [J]. Magazine of Concrete Research, 2017, 69 (24):1 276-1 287.
- [6] Majorana C E, Salomoni V A, Mazzucco G. An approach for modelling concrete spalling in finite strains [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2010, 80:1 694-1 712.
- [7] 李荣涛. 高温下混凝土中化学热湿力学耦合过程的数值模拟及破坏分析[D].大连:大连理工大学, 2007. Li R T. Numerical simulation and destruction analysis of chemical heat and moisture coupling in concrete under high temperature [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [8] Zhao J, Zheng J J, Peng G F. Prediction of thermal decomposition of hardened cement paste [J]. Mater Civil Engineering, 2012, 24(5):592-598.
- [9] Zhao J, Zheng J J. A meso-level investigation into the explosive spalling mechanism of high performance concrete under fire exposure [J]. Cement and Concrete Re-

search, 2014, 65:64-75.

- [10] Wittmann F H, Roelfstra P E, Sadouki H. Simulation and analysis of composite structures [J]. Materials Science Engineering, 1984, 68:239-248.
- [11] Bazant Z P, Kaplan M F. Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models [M]. England: Longman Group Ltd, 1996.
- [12] Wan Z J, Zhao Y S, Dong F K. Experimental study on mechanical characteristics of granite under high temperatures and triaxial stresses [J]. Rock Mechanical, 2008, 27(1):72-77.
- [13] Peng G F. Evaluation of fire damage to high performance concrete [D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2000.
- [14] 侯 炜. 预应力混凝土箱梁结构抗火性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.  
Hou W. Study on the fire resistance of prestressed concrete box girder [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [15] 李世安. 火灾过程预应力混凝土梁桥力学性能分析及

灾后评价方法 [D]. 西安: 长安大学, 2012.

- Li Sh A. Mechanical performance analysis and post-disaster assessment method of prestressed concrete girder bridges in fire process [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [16] 王翠娟. 火灾模式下多梁式混凝土 T 型梁桥结构性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.  
Wang C J. Research on structural performance of multi-beam concrete t-beam bridge in fire mode [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [17] Rot J G. Computational modeling of concrete fracture [D]. Netherlands: The Netherlands Delft University of Technology, 1988.
- [18] 崔春义. ADINA 在土木工程中的应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
Cui Ch Y. Application of ADINA in civil engineering [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)

(上接第 173 页)

- [17] 徐 恒, 王贻明, 吴爱祥, 等. 基于尖点突变理论的充填体采空区安全顶板厚度计算模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 579-586.  
Xu H, Wang Y M, Wu A X, et al. A computational model of safe thickness of roof under filling body based on cusp catastrophe theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 579-586. (in Chinese)
- [18] 赵延林, 吴启红, 王卫军, 等. 基于突变理论的采空区重叠顶板稳定性强度折减法及应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1 424-1 434.  
Zhao Y L, Wu Q H, Wang W J, et al. Strength reduction method to study stability of goaf overlapping roof based on catastrophe theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1 424-1 434. (in Chinese)
- [19] 赵明华, 张 锐, 胡柏学, 等. 岩溶区桩端下伏溶洞顶板稳定性分析研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26(9): 13-16.  
Zhao M H, Zhang R, Hu B X. Analysis of stability of

cave roof under pile tip in karst area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(9): 13-16. (in Chinese)

- [20] 赵明华, 曹文贵, 何鹏祥, 等. 岩溶及采空区桥梁桩基桩端岩层安全厚度研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 64-68.  
Zhao M H, Cao W G, He P X, et al. Study on safe thickness of rock mass at end of bridge foundations pile in karst and worked-out mine area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 64-68. (in Chinese)
- [21] 潘 岳, 耿厚才. “折断式”顶板大面积冒落的尖点突变模型 [J]. 有色金属, 1989, 41(4): 19-26.  
Pan Y, Geng H C. Cusp catastrophe model of large area caving of broken roof [J]. Nonferrous Metals, 1989, 41(4): 19-26. (in Chinese)
- [22] 赵明华, 雷 勇, 张 锐. 岩溶区桩基冲切破坏模式及安全厚度研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 524-530.  
Zhao M H, Lei Y, Zhang R. Study of punching failure mode and safe thickness of pile foundation in karst region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 524-530. (in Chinese)