

文章编号:1005-0523(2019)04-0095-07

基于 CA 温度模型混凝土结构截面承载力研究

陈梦成, 刘 超

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:钢筋混凝土结构在火灾作用下,材料受到不同程度的损伤,导致构件的承载力、可靠度不断降低。研究高温下的钢筋混凝土结构截面承载力有利于规避风险。通过建立元胞自动机温度扩散模型,了解温度场的分布,分析材料的损伤。本文通过三面受火梁以及四面受火柱,研究受火后正截面与斜截面的剩余承载力。通过与有限元计算比较,证明本文运用的剩余承载力计算模型的准确性。

关键词:火灾;元胞自动机;截面;剩余承载力;有限元

中图分类号:U37.5

文献标志码:A

混凝土结构在建筑方面运用广泛,其耐久性研究成为重要学术领域。而结构抗火是 21 世纪研究的重要学科之一,对规避风险,保障生命财产具有重大意义。大量研究表明,建筑物遭受火灾高温作用时构件的承载力、耐久性都会受到不同程度的损伤,使整个建筑结构的安全性降低。文献[1]进行了圆钢管钢筋混凝土短柱的明火试验,对影响圆钢管钢筋混凝土轴压短柱火灾后剩余承载力的主要参数进行分析,运用 ABAQUS 建立了短柱温度场和高温后力学分析模型,并提出了短柱高温后剩余承载力的表达式。文献[2]基于分层法和等效截面缩减法,计算在火灾下钢筋混凝土结构的承载力,分层法是将截面的强度进行加权平均,再运用差分计算截面的强度折减系数,并引入可靠度理论,建立抗力模型和极限状态方程,考虑了火灾后结构抗力的衰减程度。文献[3]基于材料的高温本构关系以及虚梁法,建立了火灾后钢筋混凝土柱承载力计算模型,考虑轴力的二阶效应,编制了相应程序,针对不同的工况下,分析了方形柱的承载力,给出了火灾后钢筋混凝土柱的计算表达式。文献[4]进行了受火梁试验,利用有限元软件对受火梁温度场进行计算,分析截面弯矩曲率关系,计算出了受火连续梁弯矩及位移。文献[5]运用 ANSYS 软件,建立了箱梁在不同工况下的温度特征,基于强度损失的虚拟层截面等效原理以及高温材料本构关系,计算了混凝土的累计烧损深度以及材料损伤后强度。参考现在规范,研究了火灾下预应力混凝土箱梁荷载-位移曲线,分析了火灾高温下预应力混凝土箱梁的裂缝情况,且提出了正截面计算表达式。近年来,CA 模型逐渐应用于土木工程领域中的扩散研究。文献[6]建立了钢筋混凝土氯离子扩散 CA 模型,分析了氯离子扩散行为,并预测钢筋初始锈蚀时间,本文基于 CA 温度扩散模型,分别对拉区高温、压区高温两种受火工况进行承载力分析。

1 CA 温度场模拟

1.1 元胞自动机定义与组成

元胞自动机由元胞、元胞邻居、元胞空间、元胞状态、局部演化规则、初始条件和边界条件等组成,其相互关系如图 1 所示。

收稿日期:2018-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51468017)

作者简介:陈梦成(1962—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为工程结构材料耐久性,组合结构。

元胞是元胞自动机最基本的组成部分,通常以半径 r 确定邻居,在 r 范围内的元胞均可称为元胞邻居。二维邻居类型应用广泛且形式多样,常见的有3种:冯诺依曼型、摩尔型、扩展摩尔型,如图2所示,当然还有很多更复杂的邻居模型,一般来说,越复杂的邻居模式,越难确定其演化规则。

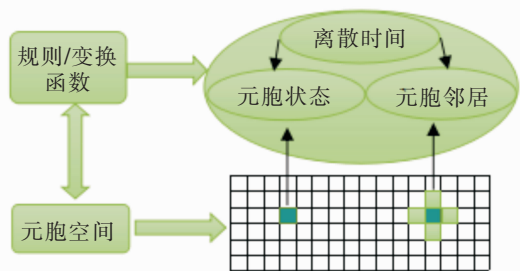


图1 元胞自动机组成示意

Fig.1 The composition of cellular automata

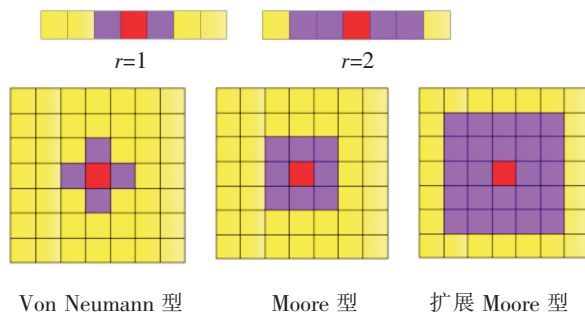


图2 一维和二维空间邻居类型

Fig.2 Types of 1-2-D spatial neighbors

根据中心元胞 i 时刻的状态及元胞邻居 j 在 t 时刻的状态确定 $t+1$ 时刻中心元胞状态,具体表现形式为

$$T_i^{t+1} = \phi(T_{i,1}^t, T_{i,2}^t, \dots, T_{i,j}^t, \dots, T_{i,n}^t) \tag{1}$$

式中: T_i^{t+1} 为中心元胞 i 在 $(t+1)$ 时刻的状态; T_i^t 为中心元胞 i 在 t 时刻的状态; $T_{i,j}^t$ 为中心元胞 i 周围的元胞邻居 j 在 t 时刻的状态; ϕ 为局部演化系数; n 为中心元胞 i 的元胞邻居个数。

1.2 CA 模拟温度场

高温空气先通过对流、热辐射作用至混凝土表面,再通过对热传导至混凝土内部。在微小升温时间段内,构件尺寸远大于骨料粒径,且在忽略钢筋影响的情况下,混凝土可视为均质各向同性材料^[7]。一个质量密度为 ρ 的微元体,忽略微元体内部自身发热,在已知微元体的热工性能下,根据能量守恒原理,建立二维热传导方程^[8]

$$\frac{\partial T(x,y)}{\partial t} = \frac{1}{c\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T(x,y)}{\partial y} \right) \right) \tag{2}$$

1.3 高温材料强度

钢筋和混凝土材料的高温力学性能是研究混凝土结构及构件力学性能的基础。不同类型的钢筋和混凝土在高温下其基本力学性能变化规律基本一致^[9],如表1所示,其中 $f_{y,T}$ 为温度 T °C下的钢筋抗拉强度; $f_{y,20}$ 为温度 20 °C下的钢筋抗拉强度; $f_{c,T}$ 为温度 T °C下的混凝土抗压强度; $f_{c,20}$ 为温度 20 °C下的混凝土抗压强度。

表1 材料的高温强度变化规律
Tab.1 Variation of materials strength at high temperatures

材料	类型	温度/°C													
		20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200	
钢筋 $f_{y,T}/f_{y,20}$	热轧	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.78	0.47	0.23	0.11	0.06	0.04	0.02	0.00	
	冷轧	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.67	0.40	0.23	0.11	0.08	0.05	0.03	0.00	
混凝土 $f_{c,T}/f_{c,20}$	硅质	1.00	1.00	1.00	0.95	0.85	0.60	0.45	0.30	0.15	0.08	0.04	0.01	0.00	
	钙质	1.00	1.00	0.97	0.91	0.85	0.74	0.60	0.43	0.27	0.15	0.06	0.02	0.00	

2 台阶模型

2.1 一台阶模型

Eurocode 规范^[10]对混凝土抗火等效截面的确定提供了一种简化的方法:混凝土区域温度低于 500 °C时,其高温抗压强度等于常温强度,而混凝土区域高于 500 °C时,该区域的强度为 0。在已知混凝土截面的温度

场,可以确定混凝土截面 500 °C 等温线,原截面就可以简化为一个与常温混凝土强度相等,面积较小的、折算的匀质截面。强度简化公式为

$$\frac{f_{c,T}}{f_{c,20}} = \begin{cases} 1 & 20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 500\text{ }^\circ\text{C} \\ 0 & 500\text{ }^\circ\text{C} < T \leq 1\ 200\text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 等效台阶模型

从混凝土材料的高温性能损伤可知,当混凝土温度大于 500 °C 时,其强度并没有完全丧失。一台阶模型没有考虑截面上温度大于 500 °C 混凝土的作用,导致由这种方法计算出的值偏于安全。充分考虑温度大于 500 °C 混凝土的作用,进一步可简化为二台阶模型,如图 3(a) 所示。当混凝土的温度低于 200 °C 或 300 °C 时,其强度与其常温强度相同;高于 200 °C 或 300 °C,且低于 800 °C 时混凝土的强度取常温强度的一半;当混凝土的温度高于 800 °C 时其强度为 0。当然也有梯形模型和三台阶模型,如图 3(b),图 3(c) 所示。

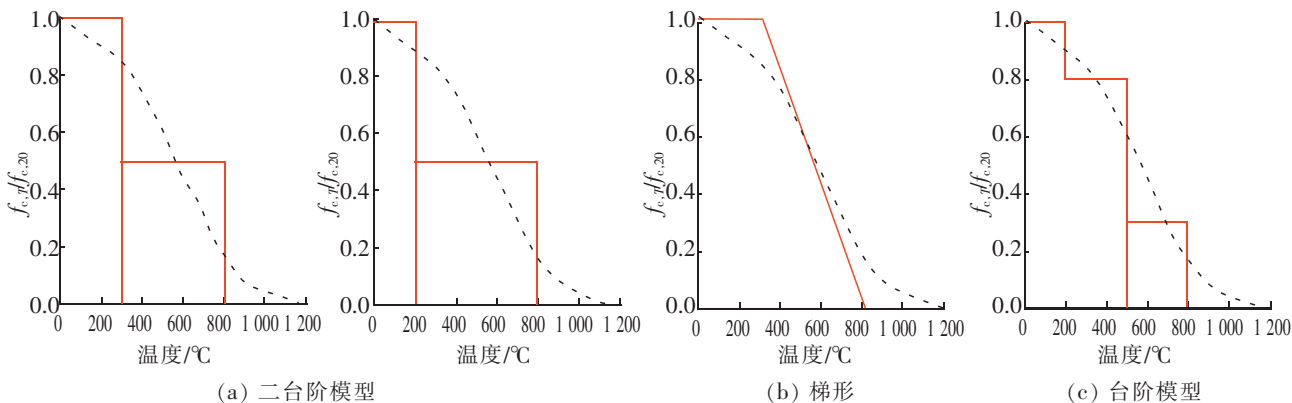


图 3 台阶等效模型
Fig.3 Equivalent model

3 截面承载力计算

3.1 基本假定

- 1) 平截面假定。即假定截面应变非线性分布,符合平面变形条件。
- 2) 计算截面温度场时,一般不考虑截面上钢筋的作用,忽略截面应力和裂缝状况的影响,截面上钢筋的温度值取其所在位置的混凝土温度。
- 3) 忽略混凝土的高温抗拉作用,钢筋和混凝土之间不产生相对滑移。

3.2 截面形式

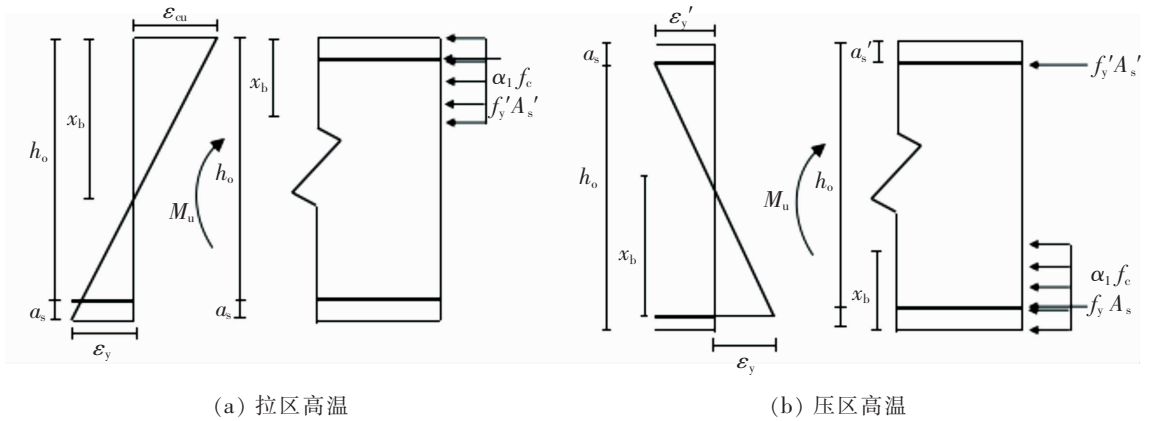
由于受火工况的不同,导致混凝土结构截面温度场的分布以及截面承载力不同,针对拉压区的温度,受火截面工况可分为拉区高温与压区高温,如图 4 所示。在拉区高温中:忽略受拉区混凝土作用,混凝土结构截面承载力主要取决于受拉区钢筋剩余强度;在压区高温中,混凝土结构截面承载力主要取决于混凝土剩余强度。由钢筋混凝土梁的正截面承载力可知,界限受压区高度是指受拉构件的纵向受拉钢筋达到屈服的同时受压区混凝土边缘纤维也恰好达到极限压应变。即可得到相对界限受压区高度 ζ_b 表达式

$$\zeta_b = \frac{\beta \varepsilon_{cu}^T}{\varepsilon_{cu}^T + \varepsilon_y^T} \quad (4)$$

式中: ε_y^T 为受拉钢筋屈服应变; ε_{cu}^T 为等效截面压区外边缘混凝土的极限压应变,常温下混凝土极限应变 $\varepsilon_{cu} = 3.3 \times 10^{-3}$;

$$\varepsilon_{cu}^T = \varepsilon_{cu} \times (1 + 5(T/1\ 000)^{1.7}) \quad (5)$$

当混凝土强度等级不超过 C50 时, β 为 0.8;当混凝土强度等级为 C80 时, β 为 0.74,其它按线性内插法确定。



(a) 拉区高温

(b) 压区高温

图 4 高温截面形式

Fig.4 High temperature section

3.3 等效计算模型

以三面受火为例，根据选择的台阶模型，如 300~800 °C 台阶模型，先确定截面温度场 300, 800 °C 等温线；当温度大于 300 °C，保留全部面积，当温度大于 300 °C 且小于 800 °C，等效长度不变，等效宽度取截面宽度一半；温度大于 800 °C 时，截面面积忽略不计，如图 5 所示，当受压区高度 $x \leq h_3$ ，按一类 T 型截面计算承载力；当受压区高度 $h_3 \leq x$ ，按二类 T 型截面计算承载力。若截面为四面受火工况，可等效为矩形截面。等效后的截面承载力计算方式与常温下一致。

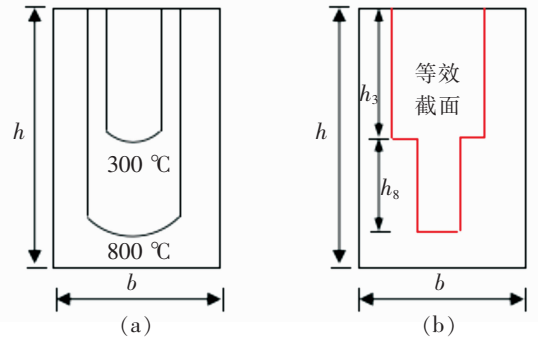


图 5 等效计算模型

Fig.5 Equivalent computing model

4 数值分析算例

4.1 算例一

三面受火下钢筋混凝土简支梁，其截面尺寸为 $b \times h = 250 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ，混凝土强度等级为 C30，轴心抗压强度 $f_c = 14.3 \text{ MPa}$ ，钢筋为 HRB400，钢筋屈服强度 $f_y = 360 \text{ MPa}$ ， $a_s = a_s' = 40 \text{ mm}$ ，箍筋等级为 HRB335，强度 $f_{yv} = 300 \text{ MPa}$ ， $A_{yv} = 100.6 \text{ mm}^2$ ，如图 6 所示。

针对该工况，拟采用文献[9]建议的材料热工性能参数，选取尺寸 $\Delta x = 5 \text{ mm}$ ，时间步长 $\Delta t = 0.07 \text{ min}$ 的元胞自动机建立，热辐射系数 $b = 0.5\sigma_n$ ，其中史蒂芬-波尔兹曼常数 $\sigma_n = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ，热对流换热系数 $h = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。考虑工况的对称性，仅计算钢筋 Bar1, Bar2, Bar3 的温度，如表 2 所示。

基于 CA 模型下的温度场，计算常温以及升温 30, 60, 90, 120, 180 min 下的截面承载力，其弯矩相对值如表 3 所示。表中还给出了 ABAQUS

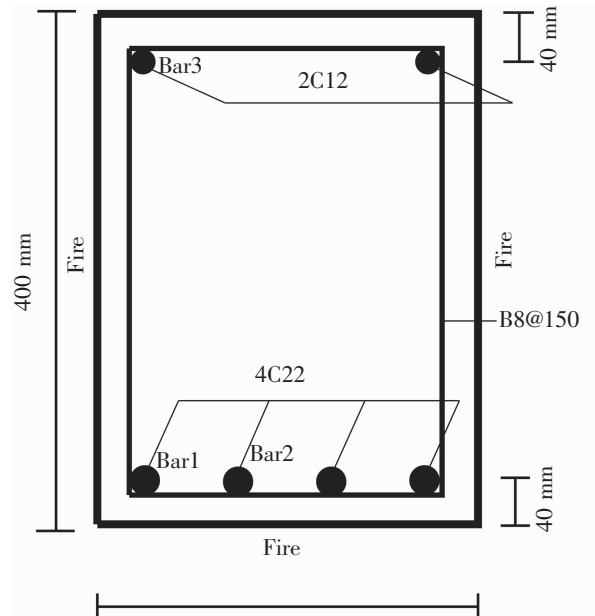


图 6 三面受火梁截面尺寸、配筋

Fig.6 Section size and reinforcement of fire beam on three sides

表 2 钢筋温度
Tab.2 The temperature of reinforcement

钢筋名称	升温时间/min							℃
	0	30	60	90	120	150	180	
Bar1	20	503	672	773	820	864	910	
Bar2	20	366	550	637	710	796	832	
Bar3	20	311	439	550	630	683	711	

表 3 正截面弯矩承载力
Tab.3 Bending moment bearing capacity of normal section

参数	升温时间/min							kN
	0	30	60	90	120	150	180	
二台阶	1.00	0.901 2	0.519 0	0.323 4	0.223 7	0.166 8	0.134 9	
ABAQUS	1.00	0.895 8	0.458 2	0.2522	0.170 3	0.081 5	0.063 6	

计算值,两者吻合较好,证明了二台阶模型的准确性,有效性。

剪跨比是影响斜截面承载力的重要因素,当混凝土结构受集中荷载时,在计算高温下斜截面承载力,可考虑剪跨比的影响。长度为 3 m 的简支梁,截面尺寸以及配筋信息如图 6 所示。分别考虑简支梁跨中是否受集中力作用,计算两种荷载效应下的斜截面承载力,计算结果如表 4,表 5 所示。表中还给出 ABAQUS 的计算值,两者吻合较好。

表 4 集中荷载下斜截面剪力承载力
Tab.4 Shear bearing capacity of inclined section under concentrated load

参数	升温时间/min							kN
	0	30	60	90	120	150	180	
二台阶	1.00	0.87	0.50	0.39	0.36	0.32	0.26	
ABAQUS	1.00	0.85	0.49	0.39	0.35	0.30	0.25	

表 5 均布荷载下斜截面剪力承载力
Tab.5 Shear bearing capacity of inclined section under uniform loading

参数	升温时间/min							kN
	0	30	60	90	120	150	180	
二台阶	1.00	0.92	0.48	0.40	0.36	0.3	0.25	
ABAQUS	1.00	0.90	0.0.45	0.36	0.30	0.27	0.22	

从表中可以看出,受火时间在 30 min 内,正截面承载力与斜截面承载力变化不大,在 30~60 min 内正截面承载力与斜截面承载力均显著下降,降至约常温下的 50%;60 min 之后,承载力下降幅度较缓。随着受火时间的增加,高温下抗弯承载力的降低幅度大于抗剪承载力的降低幅度。

4.2 算例二

某一钢筋混凝土简支梁,截面尺寸 $b=300\text{ mm}$, $h=600\text{ mm}$,混凝土强度等级为 C30,轴心抗压强度 $f_c=14.3\text{ MPa}$, $a_s=35\text{ mm}$,钢筋为 HRB335,钢筋屈服强度 $f_y=300\text{ MPa}$,如图 7 所示。

拟采用文献[9]建议的材料热工性能参数,热辐射系数 $b=0.3\sigma_n$,其中 $\sigma_n=5.67\times 10^{-8}\text{ W/m}^2\text{K}^4$,热对流换热系数 $h=25\text{ W/m}^2\text{K}$ 。选取尺寸 $\Delta x=13.3\text{ mm}$,时间步长 $\Delta t=0.5\text{ min}$ 的元胞自动机,分别考虑拉区高温、压区高温下的截面承载力,基于 CA 温度扩散模型,计算正截面承载力,如表 6 所示。

在单筋矩形截面中,压区高温与拉区高温正截面弯矩承载力变化趋势大致相同,但在压区高温工况中正截面的剩余承载力大于拉区高温工况中正截面剩余承载力,这是因为在拉区高温工况中,主要由受拉钢筋承担弯矩,其温度越高,强度折减愈多。

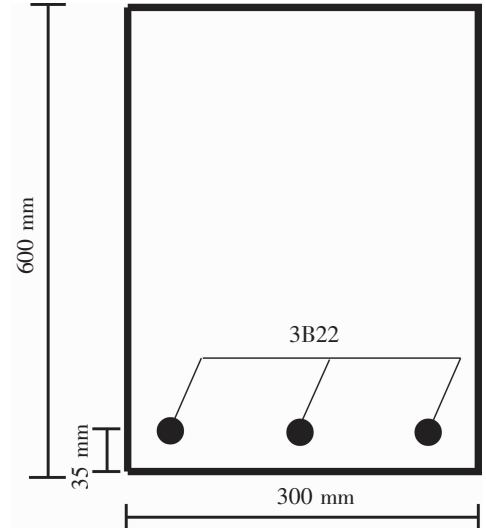


图 7 梁截面尺寸、配筋

Fig.7 Beam section size and reinforcement

表 6 正截面弯矩承载力

Tab.6 Bending moment bearing capacity of normal section

kN

M_u^T/M_u		升温时间/min						
		0	30	60	90	120	150	180
压区高温	二台阶	1.00	1.00	0.95	0.83	0.78	0.70	0.63
	ABAQUS	1.00	0.98	0.93	0.8	0.73	0.66	0.60
拉区高温	二台阶	1.00	0.97	0.73	0.56	0.38	0.25	0.18
	ABAQUS	1.00	0.92	0.70	0.52	0.36	0.23	0.16

5 结论

1) 基于 CA 温度扩散模型,运用二台阶法可计算钢筋混凝土截面承载力,通过与 ABAQUS 计算值对比,符合精度要求;

2) 在三面受火工况下,矩形钢筋混凝土截面可以等效为梯形,可根据规范准确计算其正截面承载力以及斜截面承载力;

3) 在单筋矩形截面中,压区高温与拉区高温正截面弯矩承载力变化趋势相一致,但拉区高温截面由于钢筋承受弯矩且损伤较大,其剩余承载力折减较大。

参考文献:

- [1] 张玉琢,吕学涛,王微微. 钢管钢筋混凝土短柱火灾后剩余承载力试验与有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报,2015,35(6): 792-798
- [2] 苏云磊. 火灾后钢筋混凝土构件的安全性能分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2012.

- [3] 徐玉野,王全风. 火灾后钢筋混凝土柱的剩余承载力研究[J]. 工程力学,2010,27(2):84-89.
- [4] 陆洲导,柴继锋,余江滔. 火灾后钢筋混凝土连续梁力学性能的计算分析[J]. 同济大学学报,2015,43(1):16-26.
- [5] 程海鲲. 火灾下预应力混凝土箱梁承载能力研究[D]. 西安:长安大学,2016.
- [6] 陈梦成,袁素叶. 钢筋混凝土氯离子扩散与寿命预测 CA 模型研究[J]. 铁道学报,2017,39(10):142-148.
- [7] 李昀晖. 钢筋混凝土梁高温极限承载力计算及抗火设计方法研究[D]. 长沙:中南大学,2007.
- [8] 王豹. 地震次生火灾作用下震损钢筋混凝土梁高温性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
- [9] SCHAUMANN P,KODUR V,BAHR O. Fire behaviour of hollow structural section steel columns filled with high strength concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research,2009,65(8):1794-1802.
- [10] LANGE D,DEVANEY S,USMANI A. An application of the PEER performance based earthquake engineering framework to structures in fire[J]. Engineering Structures,2014,66(4):100-115.

Research on Bearing Capacity of Concrete Structure Based on CA Temperature Model

Chen Mengcheng, Liu Chao

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Under fire, the concrete structure is damaged in different degrees, which makes the bearing capacity of the component decrease continuously. It is beneficial to avoid the risk to study the bearing capacity of the reinforced concrete structure at high temperature. A cellular automaton temperature diffusion model was established to explore the distribution of temperature field and analyze the damage of materials. In this paper, the residual bearing capacity of normal section and oblique section after the fire were analyzed through the study of three sides of fire beams and four sides of fire columns. By comparing with the finite element calculation, it is proved that the calculation model of residual bearing capacity proposed in this paper is accurate.

Key words: fire; cellular automata; section; residual bearing capacity; finite element