

文章编号:1671-6833(2021)05-0079-07

热力耦合途径下再生保温混凝土的细观力学性能

苗艳春¹, 张 玉^{1,2}, 雷 闯¹, 李明厚¹, 刘元珍¹, 李 珠¹

(1.太原理工大学 土木工程学院,山西 太原 030024;2.华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室,广州 广东 510640)

摘 要:结合再生保温混凝土(RATIC)的表征非均质特性,基于 Monte Carlo 方法,借助 MATLAB 软件生成了 RATIC 二维多边形随机骨料模型,并利用 ABAQUS 有限元分析软件对热力耦合途径下的 RATIC 进行了单轴受压损伤模拟。首先对不同温度下 RATIC 的热传导行为进行模拟分析,基于温度场模拟结果,利用混凝土塑性损伤本构模型分别探究 100、200、300、400、500、600、700、800 ℃ 下各细观组分的热膨胀系数、热传导率和比热容等热工参数以及泊松比、强度和弹性模量等力学参数的差异性对 RATIC 细观力学性能的影响,并进一步对比分析了模拟和试验条件下 RATIC 在不同受火温度下的单轴受压破坏形态。结果表明:当受火温度超过 400 ℃ 时,温度应力对 RATIC 强度产生了削弱作用,800 ℃ 时,试件内部产生了最大的温度应力 3.309 MPa;高温下单轴受压的 RATIC 试件损伤首先出现于界面过渡区,然后向砂浆基体发展,其主要集中于试件的自由端,且随着受火温度和加载时间的提高,损伤均呈现出逐渐加剧的趋势,细观损伤模型可以较好地模拟高温下 RATIC 的单轴受压力学性能和破坏形态。

关键词:再生保温混凝土;随机骨料模型;热力耦合;热传导;单轴受压;高温

中图分类号: TU528, O344 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2021.05.003

0 引言

混凝土需求量增加引起的骨料匮乏和不断增多的废旧混凝土给环境造成的巨大压力已成为制约混凝土在建筑行业应用的两大主要因素^[1]。而再生保温混凝土(RATIC)的出现为建筑行业的可持续发展提供了有效途径,由于玻化微珠的“气弹簧”作用,使其兼具良好的保温性能和力学性能。和普通混凝土一样,当 RATIC 应用于实际建筑工程结构中时,其同样面临着火灾和太阳暴晒等复杂的热力耦合环境。因此,有必要对热力耦合途径下 RATIC 的劣化性能进行研究,而数值混凝土^[2]的出现为 RATIC 的劣化性能研究提供了另一种可行性方案。

现阶段,国内外学者已经就多场耦合作用下混凝土的劣化行为开展了大量研究。Caggiano 等^[3]基于热力学和孔隙压力的界面本构规则,探究了高温下温度依赖性孔隙压力效应对混凝土损伤破坏的影响,研究表明:孔隙压力对混凝土强度

有较大的削弱作用,且其与温度呈现正相关关系;Nguyen 等^[4]采用背景网格化的细观模型,研究了热力耦合作用下导热系数的变化对混凝土性能的影响,结果表明:在热力耦合荷载作用下建立混凝土结构模型时需要考虑导热系数变化的影响;Jin 等^[5]基于混凝土力学性能的高温退化与应变率增强效应的共同作用,探究了高温作用下混凝土的动态压缩和劈裂拉伸破坏行为,并证明了细观模拟的可行性及准确性。

尽管国内外对高温下细观尺度的普通混凝土和一些轻骨料混凝土性能研究已取得了一定成果,但基于 RATIC 开展的相关性能研究仍处于空白,而 RATIC 由于其所用材料的新颖性,其高温下的细观力学性能与普通混凝土和其他轻骨料混凝土相比存在较大差异。为了探究 RATIC 的高温力学性能,本文从细观尺度出发,对模型中再生骨料中的旧砂浆部分进行了简化,忽略了旧砂浆与新水泥砂浆之间的差异对高温下 RATIC 细观力学性能的影响,将旧砂浆与再生骨料中的天然

收稿日期:2020-10-21;修订日期:2020-12-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808375);山西省教育厅高等学校科技创新项目;亚热带建筑科学重点实验室基金资助项目(2019ZB23)

通信作者:张玉(1987—),女,山西灵石人,太原理工大学副教授,博士,主要从事再生混凝土及功能性混凝土方面研究,E-mail:zhangyu03@tyut.edu.cn。

万方数据

粗骨料看成一个整体^[6],提出了 RATIC 二维多边形随机骨料模型建模方法,并在此基础上借助有限元分析软件 ABAQUS,利用顺序热力耦合的方法对 RATIC 在温度场和应力场共同作用下的细观力学性能进行研究。

1 RATIC 二维细观模型的建立

从细观尺度上本文将 RATIC 看作是再生粗骨料(RCA)、水泥砂浆、玻化微珠(GHB)和界面过渡区(ITZ)的有机组成^[7](图1),其中 RCA 由天然骨料和旧砂浆基体组成。借助 MATLAB 软件,利用 Monte Carlo 方法在指定边界条件内对骨料进行投放。具体建模流程如下。

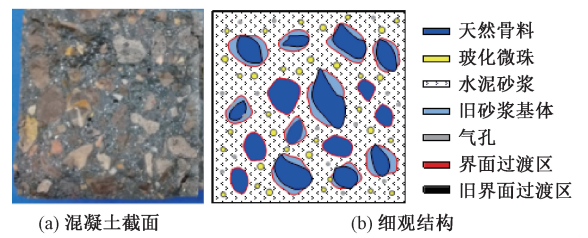


图1 再生保温混凝土截面和细观结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of RATIC section and meso-scale structure

1.1 骨料级配

本文为使 RATIC 密度和强度更好地接近实际情况,基于 Walaraven J.C.公式和富勒曲线确定了骨料的三维级配曲线,由此得到 RATIC 内部任意一点处骨料粒径 $D < D_0$ 的概率:

$$P_c(D < D_0) = p_k(1.065M^{0.5} - 0.053M^4 - 0.012M^5 - 0.045M^8 + 0.025M^{10})。$$
 (1)

式中: D_0 为筛孔直径; M 为筛孔直径与最大骨料粒径的比值; p_k 为骨料所占混凝土体积的百分比,RCA 取 0.7,GHB 取 0.15。

由于组成材料空间结构各组分的点、线、面和体之间存在着一种普遍规律^[8],即

$$p_p = p_L = p_A = p_V。$$
 (2)

式中: p_p 、 p_L 、 p_A 和 p_V 分别为各组成成分所占点数、线长、面积和体积的百分比。因此,截面内某一粒径的骨料个数为

$$N = P \frac{A}{A_1}。$$
 (3)

式中: A 和 A_1 分别为混凝土试件和骨料的截面积; P 为在混凝土试件截面内骨料出现的概率。

基于试验配合比,利用式(2)和式(3),便可得到每一级配中 RCA 和 GHB 的体积投放比例,

如表 1 所示。

表 1 再生粗骨料和玻化微珠累计投放比例

RCA		GHB	
粒径/mm	累计比例/%	粒径/mm	累计比例/%
20		2.0	
16	25	1.5	25
10	79	1.0	60
5	100	0.5	100

1.2 二维多边形随机骨料模型的生成

借助 MATLAB 软件,首先在基圆上确定粗骨料的粒径、颗粒数和位置,待凸多边形骨料投放完成后进行 GHB 的生成。生成 RATIC 二维多边形随机骨料模型的具体步骤如下。

(1)输入参数。试件尺寸、GHB 和 RCA 的面积占比、GHB 和 RCA 的颗粒级配(表1)。采用一级配原则,RCA 粒径介于 5~20 mm 之间,GHB 尺寸介于 0.5~2.0 mm 之间,ITZ 厚度为 0.05 mm。

(2)RCA 的投放。基于圆形基圆,根据圆心坐标和基圆半径,首先对骨料位置进行判断,使 RCA 落在指定区域中;在圆内随机生成 4~6 个极坐标作为 RCA 的顶点,两顶点距离的最大值即为骨料粒径,且极轴为 $0.5R \sim R$,以生成不同形状的粗骨料;利用 MATLAB 中 inpolygon 函数对 RCA 相交面积进行判断,如果相交面积为 0,则不干涉,否则干涉;储存不干涉的骨料信息,并计算其面积;判断累计投放面积和最大骨料面积占比的关系,如果满足,则对 RCA 进行投放。RCA 之间干涉判断图见图 2(a)。

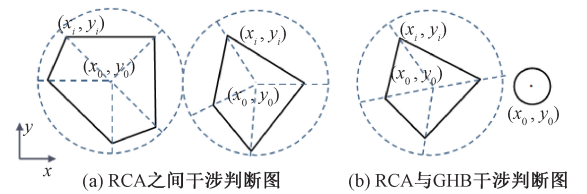


图 2 骨料干涉判断图

Figure 2 Interference judgment between aggregates

(3)GHB 的投放。为了提高投放效率和简化建模流程,将 GHB 简化为圆形,根据圆心坐标和粒径对其位置进行判断,使 GHB 落在指定区域中。对新生成的 GHB 和已经生成的粗骨料利用 MATLAB 中 inpolygon 函数进行干涉判断。如果不干涉,则对新生成的 GHB 和既有 GHB 进行干涉判断,如果两骨料圆心距离大于两半径之和,则 GHB 之间不干涉,否则干涉。如果不干涉,则对 GHB 的信息进行存储,计算 GHB 面积,判断其累

计投放面积和最大 GHB 面积占比的关系,如果满足,则对 GHB 进行投放。RCA 与 GHB 干涉判断图见图 2(b)。

按照此方法生成的 RATIC 细观模型骨料级配和投放率满足要求。生成试件尺寸为 100 mm×100 mm、RCA 投放率为 35% 和 GHB 投放率为 10% 的 RATIC 二维多边形随机骨料模型,如图 3 所示。具体建模流程图如图 4 所示。

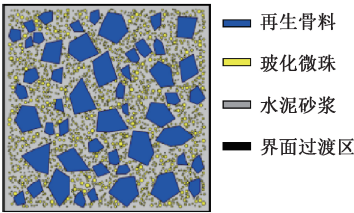


图 3 再生保温混凝土二维多边形随机骨料模型
Figure 3 2-D polygonal random aggregate model of RATIC

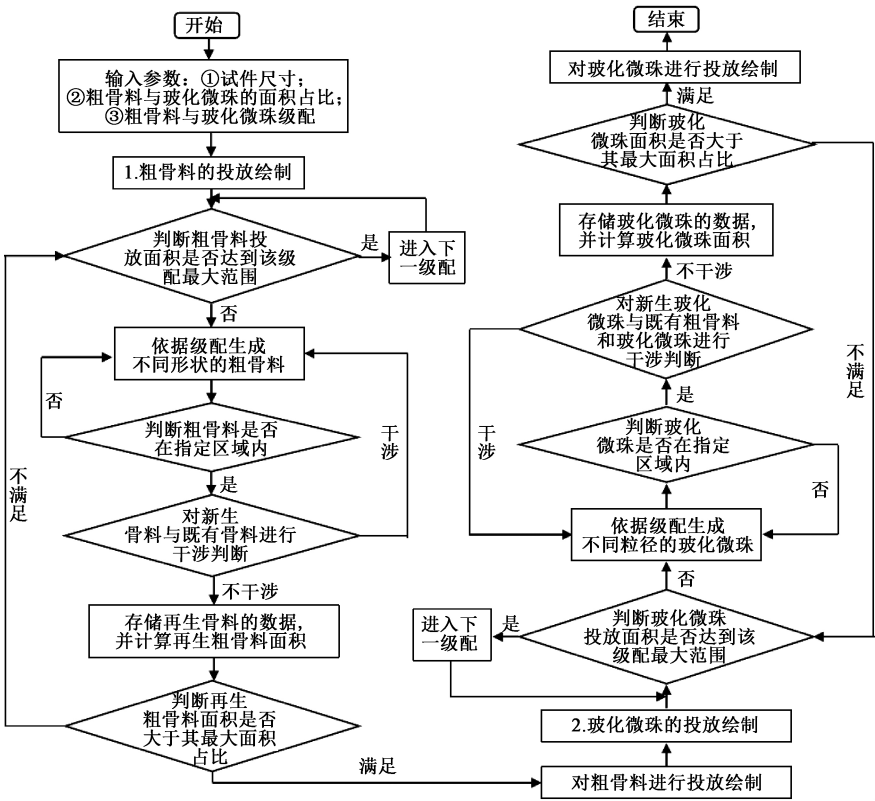


图 4 RATIC 二维多边形细观模型算法实现图

Figure 4 Algorithm flow chart of RATIC 2-D polygonal random aggregate model

2 RATIC 热力耦合模型的建立

2.1 热工理论及边界条件和网格划分

2.1.1 热工理论

非均质各向同性体热传导方程为

$$c\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k \frac{\partial u}{\partial z}\right) + Q(x,y,z,t).$$
 (4)

其中, $Q(x,y,z,t)$ 为物体内部有热源时单位体积在单位时间内产生的热量,令 $a^2 = k/c\rho$, 则有

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + q(x,y,z,t).$$
 (5)

其中, $q(x,y,z,t) = Q(x,y,z,t)/c\rho$, 于是,不考虑内部热源的三维热传导方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right).$$
 (6)

2.1.2 温度边界条件

RATIC 温度场模拟初始条件和边界条件如下:

(1)初始条件:
$$u(x,y,z,t)|_{t=0} = \varphi(x,y,z).$$
 (7)

(2)边界条件:
采用 Dirichlet 和 Robin 边界条件,具体如下。
Dirichlet 边界条件(指定边界温度)为
$$u(x,y,z,t)|_{\Gamma} = g(x,y,z,t).$$
 (8)

Robin 边界条件(指定对流换热条件)为
$$k \frac{\partial u}{\partial n} = h(u_t - u_s).$$
 (9)

式中: u_s 、 u_t 和 h 分别为物体表面温度、周围流体

温度和换热系数。

2.1.3 力学边界条件和网格划分

高温下 RATIC 单轴受压细观模拟力学边界条件、荷载施加方式和网格划分设置如下:限制试件底部的所有自由度,其左右两端为自由边界,在试件顶部施加荷载(图 5);网格类型为三角形和四边形结合的网格单元,网格大小为 0.5 mm。

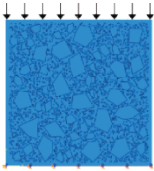


图 5 细观模拟力学边界条件和加载方式
Figure 5 Mechanical boundary conditions and loading methods of meso-scale simulation

2.2 计算模型及参数设置

2.2.1 升温曲线

本文采用式(10)所示的 ISO834 标准火灾模拟升温曲线,分别对受火温度为 100、200、300、400、500、600、700 和 800 ℃ 的二维 RATIC 细观模型施加破坏荷载,以模拟在不同火灾温度下, RATIC 达到极限承载力时的损伤演化情况。

$$T = T_0 + 345lg(8t + 1)。$$
 (10)

式中: T_0 表示初始环境温度,取 $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.2.2 热工参数

由于温度的变化对 GHB 的热膨胀系数、导热系数和比热容以及其余各组分的热膨胀系数有较小影响,为简化计算,取其常温下参数进行模拟,不同温度下 RATIC 各细观组分的热工参数利用假定数据及文献[9-10]的表达式计算:

$$K_{m,T}/K_0 = 1.026 - 0.013 R + 0.040 43R^2;$$
 (11)

$$K_{a,T} = \frac{770}{0.72(350 + t)} + 0.7;$$
 (12)

$$c_{m,T} = 790 + 0.9T;$$
 (13)

$$c_{a,T} = 625(1 + T)^{0.075};$$
 (14)

$$\rho_T/\rho_0 = \begin{cases} -0.000\ 056T + 1.000\ 112, & 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}; \\ -0.000\ 342T + 1.031\ 152, & 100\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 300\text{ }^{\circ}\text{C}; \\ -0.000\ 230T + 1.011\ 713, & 300\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 800\text{ }^{\circ}\text{C}. \end{cases}$$
 (15)

式中: $R = T/100$; $c_{m,T}$ 、 $K_{m,T}$ 分别为高温下界面过渡区和砂浆的比热容和导热系数; K_0 为常温下砂浆的导热系数; $c_{a,T}$ 、 $K_{a,T}$ 分别为高温下 RCA 的比热容和导热系数; ρ_T 和 ρ_0 分别为高温和常温下细观组分的密度。常温下 RATIC 各细观组分热工参

数设置见表 2。

表 2 常温下 RATIC 各细观组分热工参数(20 ℃)
Table 2 Thermal parameters of meso-scale constituents of RATIC at room temperature (20 ℃)

细观组分	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	导热系数 $K/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	比热容 $c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热膨胀系数 $\alpha/10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
RCA	2 450	3.1	798 ^[10]	70
砂浆	2 000	1.9 ^[11]	813 ^[9]	1
ITZ	2 200	0.89	906 ^[5]	1
GHB	140	0.032	1 050	7

2.2.3 力学参数设置

文献[12]表明,RATIC 受火后的抗压强度、弹性模量和抗拉强度均随着温度的升高大体上呈现下降趋势。本文采用文献[12]中 RCA 取代率为 50%时,RATIC 抗压强度、抗拉强度和弹性模量在高温下与常温下的比值随温度变化的关系式对高温下 RATIC 的各项力学参数进行计算。

$$f_{c,T}/f_c = 0.946 + 0.237 R - 0.087\ 1R^2 + 0.005\ 52R^3, \quad 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C}。$$
 (16)

$$f_{t,T}/f_t = \begin{cases} 1 - 0.003\ 528(T - 20), & 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}; \\ 0.416\ 8 + 0.301\ 8R, & 100\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}; \\ 1.877\ 3 - 0.509R + 0.043\ 8R^2 + 0.001\ 056R^3, & 200\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 800\text{ }^{\circ}\text{C}。 \end{cases}$$
 (17)

$$E_{c,T}/E_c = 1.010\ 9 - 0.036\ 76R - 0.042\ 13R^2 + 0.003\ 999R^3, \quad 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C}。$$
 (18)

式中: $R = T/100$; $f_{t,T}$ 、 $f_{c,T}$ 、 $E_{c,T}$ 和 f_t 、 f_c 、 E_c 分别为高温下和常温下 RATIC 的抗拉强度、抗压强度、弹性模量。常温下 RATIC 各细观组成成分的力学参数设置见表 3。

表 3 常温下 RATIC 各细观组分力学参数(20 ℃)
Table 3 Mechanical parameters of meso-scale constituents of RATIC at room temperature (20 ℃)

细观组分	抗压强度 $f_c/(\text{MPa})$	抗拉强度 $f_t/(\text{MPa})$	弹性模量 $E_c/(\text{MPa})$	泊松比
RCA	100.5		32 000	0.15
砂浆	40 ^[5]	4.0 ^[5]	25 000 ^[5]	0.20
ITZ	32.5 ^[5]	3.25 ^[5]	30 000 ^[5]	0.30
GHB	0.209		85 000	0.23

2.2.4 塑性损伤本构模型

本文利用 Lubliner 等^[13]提出的混凝土塑性损伤本构模型计算得到 RATIC 在不同温度下最大损伤因子为 1.0 时的塑性损伤参数。对不同受

火温度下的 RATIC 施加破坏荷载,利用 ITZ 和砂浆基体与混凝土力学行为相似的特性,给砂浆基体及 ITZ 添加 RATIC 塑性损伤参数^[14],采用耦合温度场和应力场的塑性损伤本构模型来描述 RATIC 不同加载时间的细观力学性能。

3 模拟结果与分析

3.1 温度场模拟结果

图 6 为模拟条件下 RATIC 试件在不同温度下的温度场和温度应力分布。同高温条件下 RATIC 试件的温度场和温度应力分布的试验结果类似,温度较高的区域温度应力也相应较大,试件温度由外向内呈现出逐渐降低的趋势;随着受火温度的提高,其温度和温度应力均逐渐上升并向内传递,400 ℃ 时温度应力为 1.386 MPa,试件外围产生少量微裂纹,其已对试件强度产生一定

影响,800 ℃ 时,温度应力达到最大值 3.309 MPa,裂纹也逐渐发展并向内传递;同时,通过分析发现温度应力主要集中于 GHB 上,这可能归因于其较高的热膨胀系数,但实际上这种现象对 RATIC 损伤的演化影响较小。此外,不同温度下 RATIC 试件内部的温度场和应力场分布并不规则,这主要是由于 RCA 与 GHB 在混凝土内部分布的随机性以及 RATIC 各细观组分的热工参数存在较大差异所致,最终导致 RATIC 内部各组分力学性能的差异性。

3.2 高温下 RATIC 单轴压缩损伤破坏形态

图 7 显示了 RATIC 试件在不同温度和加载时间下的单轴受压损伤分布情况和试验最终破坏形态^[12]。分析表明:损伤首先出现于界面过渡区,然后逐渐向砂浆基体发展;在同一受火温度下,随着加载的进行,RATIC 试件的损伤情况逐

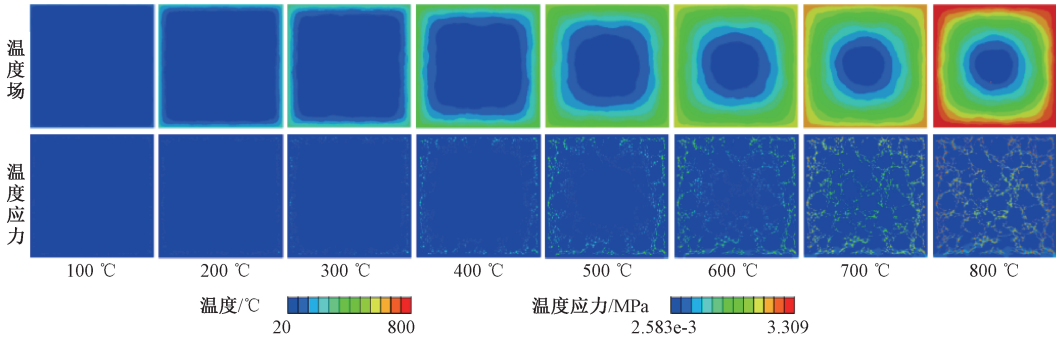


图 6 RATIC 试件在不同受火温度下的温度场和温度应力分布

Figure 6 Temperature field and temperature stress distribution of RATIC specimens at different fire temperature

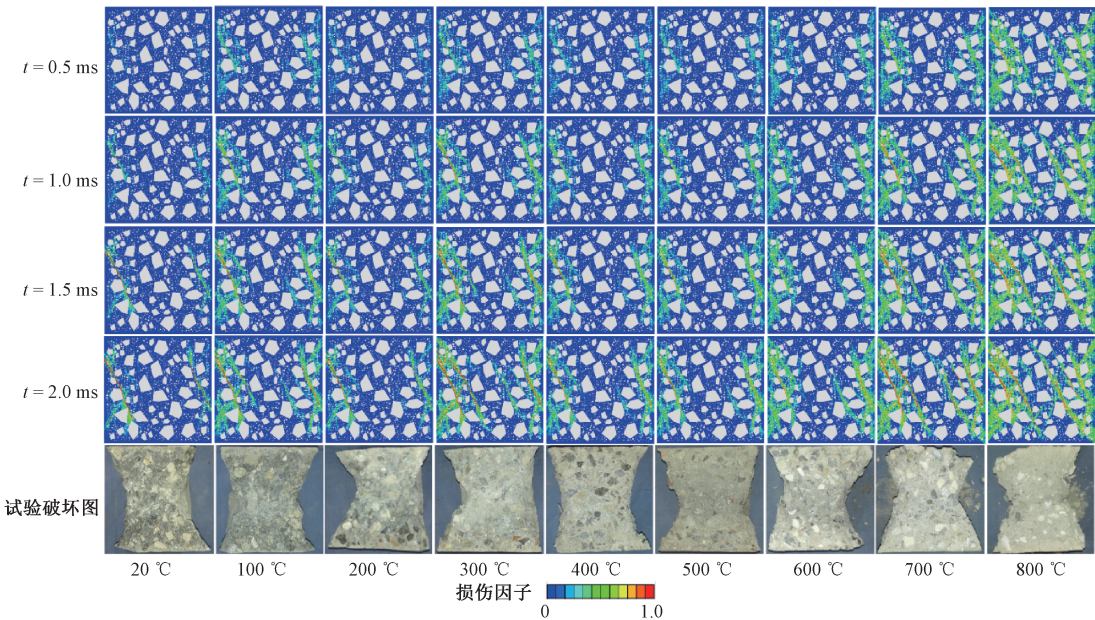


图 7 不同温度和加载时间下 RATIC 单轴受压损伤分布和试验最终破坏形态

Figure 7 Damage patterns and test failure patterns of RATIC under uniaxial compression at different temperatures and loading times

万方数据

渐加剧,损伤的分布情况大体和试件破坏模式相同,损伤也主要分布于试件的自由端;随着受火温度的提高,RATIC 试件在不同加载时间下损伤分布情况均大体上呈现出加剧的趋势,且其最终损伤分布情况与试件在高温试验条件下的最终破坏形态类似。

3.3 高温下 RATIC 应力-应变关系

同高温试验条件下 RATIC 单轴受压应力-应变关系类似。如图 8 所示,模拟条件下 RATIC 试件的峰值应变与温度变化大体上呈正相关关系,当受火温度为 800 ℃ 时,RATIC 有最大的应变值,而试件峰值应力随着温度的上升表现为先增大后减小的趋势,当温度为 100 ℃ 时,峰值应力达到最大值,当受火温度大于 400 ℃ 时,试件峰值应力低于常温下所对应的值,这主要是因为温度应力的产生导致 RATIC 试件表面和内部产生了较多裂纹,导致其强度发生了弱化。

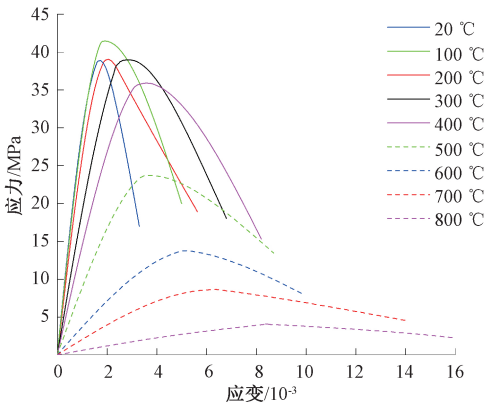


图 8 高温下 RATIC 单轴受压应力-应变关系
Figure 8 Stress-strain curve of RATIC specimens under uniaxial compression at elevated temperature

4 结论

本文借助 MATLAB 软件,基于 Monte Carlo 方法,生成了 RATIC 二维多边形细观模型,并基于混凝土塑性损伤本构模型,利用 ABAQUS 有限元分析软件对热力耦合途径下的细观尺度 RATIC 进行了仿真模拟,对比分析了模拟和试验条件下 RATIC 在不同受火温度下的单轴受压破坏形态和破坏过程,结论如下:

(1)同高温条件下 RATIC 试件的温度场和温度应力分布的试验结果类似,模拟条件下,试件温度分布也由外向内逐渐降低;随着环境温度的升高,其温度和温度应力均逐渐上升并向内传递,当受火温度为 800 ℃ 时,试件内部产生的最大温度应力为 3.309 MPa。

(2)高温下单轴受压的 RATIC 试件损伤首先出现于 ITZ,然后逐渐向砂浆基体发展;在同一受火温度下,随着加载的进行,试件损伤情况逐渐加剧,其主要分布于试件的自由端;随着受火温度的提高,RATIC 试件在不同加载时间下损伤分布情况均大体上呈现出加剧的趋势,且其最终损伤分布情况与试验试件在高温条件下的最终破坏形态类似。

(3)RATIC 试件的峰值应变与温度变化呈正相关关系,当受火温度为 800 ℃ 时,RATIC 有最大的应变值;而其峰值应力随着温度的上升表现为先增大后减小的趋势,当受火温度为 100 ℃ 时,峰值应力达到最大值;此外,当温度大于 400 ℃ 时,峰值应力低于常温下所对应的值,表明温度应力对 RATIC 的强度有一定弱化作用。

参考文献:

[1] BRAVO M, DE BRITO J, PONTES J, et al. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants [J]. Construction and building materials, 2015, 77: 357-369.

[2] 王毋庸. 简述混凝土的细观分析计算模型 [J]. 建筑科技与管理, 2011(7): 26-26, 30.

[3] CAGGIANO A, SCHICCHI D S, ETSE G, et al. Meso-scale response of concrete under high temperature based on coupled thermo-mechanical and pore-pressure interface modeling [J]. Engineering failure analysis, 2018, 85: 167-188.

[4] NGUYEN T D, PHAM D T, VU M N. Thermo-mechanically-induced thermal conductivity change and its effect on the behaviour of concrete [J]. Construction and building materials, 2019, 198: 98-105.

[5] JIN L, HAO H M, ZHANG R B, et al. Determination of the effect of elevated temperatures on dynamic compressive properties of heterogeneous concrete: a meso-scale numerical study [J]. Construction and building materials, 2018, 188: 685-694.

[6] 田盼盼, 邱洪兴, 于江, 等. 基于 3 种细观层次再生混凝土骨料模型的对比分析 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, 55(6): 821-827.

[7] 刘光廷, 王宗敏. 用随机骨料模型数值模拟混凝土材料的断裂 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(1): 84-89.

[8] PELLISSIER G E, PURDY S M. Stereology and quantitative metallography [M]. Easton, USA: ASTM International, 1972.

[9] VOSTEEN H D, SCHELLSCHMIDT R. Influence of

temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock [J]. Physics and chemistry of the earth, parts A/B/C, 2003, 28(9/10/11) : 499-509.

[10] CERNÁ R, MAD ĚRA J, POD ĚBRADSKÁ J, et al. The effect of compressive stress on thermal and hygric properties of Portland cement mortar in wide temperature and moisture ranges [J]. Cement and concrete research, 2000, 30(8) : 1267-1276.

[11] JIN L, ZHANG R B, DU X L. Characterisation of temperature-dependent heat conduction in heterogeneous concrete [J]. Magazine of concrete research, 2018, 70 (7) : 325-339.

[12] 季海峰. 高温作用后再生保温混凝土力学性能研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.

[13] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International journal of solids and structures, 1989, 25(3) : 299-326.

[14] DU X L, JIN L, MA G W. Numerical simulation of dynamic tensile-failure of concrete at meso-scale [J]. International journal of impact engineering, 2014, 66: 5-17.

Meso-scale Response of Recycled Aggregate Thermal Insulation Concrete Based on Coupled Thermo-mechanical Modeling

MIAO Yanchun¹, ZHANG Yu^{1,2}, LEI Chuang¹, LI Minghou¹, LIU Yuanzhen¹, LI Zhu¹

(1.College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2.State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on the meso-scale heterogeneity of recycled aggregate thermal insulation concrete (RATIC), MATLAB software was used to generate a 2-D polygonal random aggregate model of RATIC by Monte Carlo method, and then the finite element analysis software ABAQUS was used to simulate the uniaxial compression mechanical properties of meso-scale RATIC based on coupled thermo-mechanical modeling. Firstly, the heat conduction behavior of RATIC at different temperatures was simulated. According to the simulation results, the effects of meso-scale constituents at different temperatures (100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 and 800 ℃), such as the thermal parameters (conductivity, specific heat and thermal expansion coefficient) and the mechanical parameters (strength, elastic model and Poisson's ratio), on the meso-scale RATIC mechanical properties were explored. Furthermore, a comparative analysis was conducted to study the uniaxial compression failure modes at different fire temperatures of RATIC under simulated and experimental conditions. The results show that the temperature stress weakens the strength of RATIC when the temperature exceeds 400 ℃. And at 800 ℃, there is a maximum temperature stress of 3.309 MPa generated inside the specimen. The high temperature damage of RATIC specimens under uniaxial compression first appears in the interfacial transition zone, and then develops to the mortar. It is mainly concentrated on the free end of the specimen, and with the increase of the fire temperature and loading time, the damage shows a gradual increase trend. The results indicate that the meso-scale model can be well used to simulate the uniaxial compression mechanical properties and failure patterns of RATIC at high temperature.

Key words: RATIC; random aggregate model; coupled thermo-mechanical; heat conduction; uniaxial compression; high temperature