

[文章编号] 1003-4684(2019)01-0034-04

混凝土高温多场耦合损伤分析

张利然, 周金枝

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 将混凝土作为非饱和多孔隙材料,利用混凝土损伤方程考虑多场耦合,建立混凝土高温损伤耦合模型。依据该模型,在有限元软件 ANSYS 的平台上进行混凝土高温损伤多场耦合仿真分析,模拟细观孔隙处应力云图,探讨高温对高性能混凝土的力学性能影响。

[关键词] 高温; 混凝土; 多场耦合; 损伤; 有限元分析

[中图分类号] TU541

[文献标识码] A

目前,混凝土广泛用于核工业、大型建筑和隧道桥梁等工程中,在建筑物发生火灾或者本身处于高温工况时,在该条件下的混凝土的受力状况与性能已经成为十分值得考虑的问题。混凝土在高温条件下的力学性能国内外已经有诸多研究^[1],结果表明,混凝土的力学性能在高温下会劣化,表现为混凝土的力学强度降低、开裂和爆炸^[2]。外载和温—湿环境也能够导致混凝土材料的微观结构发生变化,从而改变混凝土材料的力学性能,因此研究混凝土在高温时性能是十分必要。

1 高温混凝土损伤模型

当混凝土的实际温度比设计的标准温度高时,需要考虑热传导、水蒸汽扩散、热对流、水化过程导致的热传递和毛孔内的失水过程,同时还要考虑由于压力和毛细孔的吸附力所引起的水的流动、所吸附的水量和空气的扩散^[3]。混凝土结构的设计应该考虑上述所有现象,因此可以将混凝土材料假设为非饱和和多孔隙材料,定义混凝土的损伤变量,应用相应的构造法和状态方程来建立混凝土结构的力学模型^[4]。

1.1 混凝土损伤方程

因混凝土是一种含有许多缺陷或孔隙的多相复合材料,具有初始损伤,随着外载和温度的增加,混凝土的损伤将进一步扩展。本文将采用各向同性损伤模型对其损伤扩展进行描述,用缺陷表面密度来表示与加热和材料力学性能退化有关的损伤变量

(φ),其定义为

$$\varphi = \frac{S - \tilde{S}}{S}$$

其中: S 是表面的总面积; \tilde{S} 为除掉微缺陷以后的纯面积。

1.2 温度—荷载损伤的耦合

对混凝土进行高温力学性能研究时,其损伤扩展可以分成两部分,一部分是纯温度损伤,只与水泥水化的物化反应中的放热有关。这个变化包括混凝土的失水过程、混凝土的热胀冷缩和所有可能引起孔隙扩展的过程。另一部分是纯荷载损伤,所有作用在混凝土上的应力(如外载和内部的孔隙压力)都可能导致其荷载损伤。假设这两部分损伤完全耦合,则混凝土损伤为

$$1 - \varphi = (1 - \varphi_0)(1 - \varphi_T)(1 - \varphi_M)$$

其中: φ_0 为初始损伤(初始孔隙); φ_T 为温度损伤; φ_M 为荷载损伤。

1.3 混凝土的应力—应变关系

$$\begin{aligned} \sigma &= (1 - \varphi_0)(1 - \varphi_T)(1 - \varphi_M)E^s/\epsilon^e = \\ &= (1 - \varphi_T)(1 - \varphi_M)E_0/\epsilon^e = \\ &= E/(\epsilon - \epsilon^p - \epsilon^T) \end{aligned}$$

其中: E^s, E_0, E 分别为混凝土、多孔介质和已损多孔介质的四阶弹性张量, ϵ^e 为弹性应变, ϵ^p 为塑性应变; ϵ^T 热膨胀应变。

根据文献[4],由于温度变化导致混凝土产生损伤的变量被定义为

[收稿日期] 2018-04-03

[第一作者] 张利然(1993-),男,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为有限元仿真

[通信作者] 周金枝(1964-),女,湖北武汉人,湖北工业大学教授,研究方向为材料和结构的强度计算与仿真分析

$$\varphi_T = 1 - \frac{E(T)}{E_0}$$

$E(T)$ 可以使用不同温度下单轴拉压试验获得。

设荷载损伤扩展为塑性应变 k_x 的幂形式, 则为

$$1 - \varphi_M^x = \exp(-c_x k_x)$$
$$\dot{k} = \sqrt{(2/3)\dot{\epsilon}^p : \dot{\epsilon}^p}$$

这里 $x=t, c$ 为指材料的拉压, c_x 为材料参数, 它是通过应力—应变曲线确定。

2 温度—应力耦合有限元分析

2.1 孔隙随机分布的计算

为了更形象地模拟混凝土细观损伤破坏的演化过程, 可以将混凝土结构有限元模型处理成为带缺陷的有限元模型, 微缺陷随机分布在材料中, 结构的破坏应该是从损伤和微缺陷处逐渐演化的。由于微缺陷形状许多种, 为了方便计算和有限元仿真, 把微缺陷等效为一定直径球体的孔隙随机分布在有限元模型中。通过 φ_0 初始损伤^[5] (初始孔隙) 确定孔隙参数。其随机分布方法如下所示:

- 1) 设定 φ_0 为初始损伤 (初始孔隙), 孔隙半径与孔隙投放的空间范围。
- 2) 通过 ANSYS 自带数据库建立孔隙三维坐标与半径, 并利用初始孔隙系数和半径得出空隙投放数量。
- 3) 调用 ANSYS 中的 APDL 语言, 通过随机函数生成孔隙的三维坐标、半径。
- 4) 孔隙需要随即且不干涉分布, 方法是: 依次生成孔隙中心坐标, 并对比每个孔隙中心坐标之间的距离与每两个孔隙半径的关系, 大于即可完成小于重新生成坐标对比, 直到孔隙随机且不干涉。
- 5) 孔隙坐标生成后, 利用随机函数产生的半径数值生成球型孔隙 (图 1)。

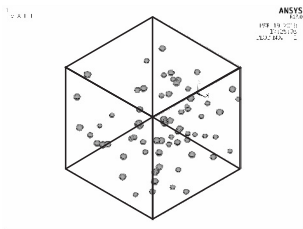


图 1 三维孔隙随机分布示意图

2.2 温度应力的计算

物体温度的改变会导致形变, 由于物体中各组分受到力的约束不能自由变化, 产生温度应力。通过 ANSYS 的温度场计算方式, 设定导热系数、混凝土密度、比热容、交换系数求出温度场 φ 。把温度改变产生的线应变视为物体的初始应变, 则它的三

维表达式为

$$\epsilon^T = \beta_g (\varphi - \varphi_0) [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

式中: φ_0 为初始温度场; β_g 为材料热膨胀系数; φ 为材料在瞬态或稳态时的温度场。

结合具体的温度实验测出非线性弹性模量与文中应力—应变关系算出应力。

2.3 温度—应力耦合方式

耦合场主要用于研究两种不同场相互之间的作用关系, 在此利用此方法分析温度—应力两种物理场的相互关系, 其中耦合分析有两种方法: 直接耦合方法及顺序耦合方法^[6]。通过上文提出的温度—载荷损伤方程与应力—应变关系, 其中包括热传导分析和温度应力分析两个过程^[7]。因此, 采用顺序耦合的方式进行高温下混凝土的损伤计算。

顺序耦合的耦合矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} [K_{11}(\{X_1\}, \{X_2\})] & [0] \\ [0] & [K_{22}(\{X_1\}, \{X_2\})] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{X_1\} \\ \{X_2\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_1(\{X_1\}, \{X_2\})\} \\ \{F_2(\{X_1\}, \{X_2\})\} \end{Bmatrix}$$

上述矩阵运算中, 顺序耦合关系不影响非对角矩阵, 计算 $[K_{11}]$ 与 $\{F_1\}$ 对于 $\{X_2\}$ 关系以及 $[K_{22}]$ 与 $\{F_2\}$ 对于 $\{X_1\}$ 的关系。上式中 $(\{X_1\}, \{X_2\})$ 表示场的自由度。

3 算例

由于实验条件有限, 不能进行混凝土高温实验, 论文引用文献[8]中提供的实验作为算例, 进行混凝土高温损伤多场耦合仿真分析。

3.1 混凝土高温实验简介

1) 实验试样

文献中实验试块是 100 mm × 100 mm × 200 mm 45 个, 成分是: 52.5 R 普通硅酸盐水泥; S95 级矿渣微粉; 900 级硅粉; 细度模数为 2.7 的中砂。混凝土配合比如表 1 所示。

表 1 混凝土配合比			kg/m ³
水泥	406	矿渣微粉	116
硅粉	58	石子	1115
砂	655	水	136
减水剂	14.5		

2) 实验方法

将试块放入电炉内加热, 设定 4 个温度分别为 200 ℃、400 ℃、600 ℃和 800 ℃, 加热 1 h, 另外一个在室温 20 ℃下, 每组 9 件试块。高温后, 在 MTS815.02 混凝土试验机上以 10⁻⁵/s 应变率的单轴受压试验。试块初始温度、气温均为 20 ℃, 材料

的热膨胀系数 $\beta_{\text{g}} = 1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 导热率 $\lambda = 1.67 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 密度 $\rho_0 = 2590 \text{ kg}/\text{m}^3$, 比热容 $C = 970 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 热交换系数 $\alpha_c = 18 \text{ W}/\text{m}^2$, 材料常数 $\nu = 0.25$, 初始损伤 $\varphi_0 = 0.1$, 孔隙直径为 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 。实验对每个试块进行编号, 如 S-200 表示经历 200°C 后的混凝土。

3) 实验结果

试块在应变率 $10^{-5}/\text{s}$ 下的峰值应力残余受压强度 f_c^T , 对应的受压应变峰值应变 ϵ_c^T , 弹性模量 $E(T)$, 损伤变量 φ 。混凝土高温实验结果如表 2 所示。

表 2 受压试验结果

试块编号	f_c^T/MPa	ϵ_c^T	$E(T)/\text{GPa}$	φ
S-20	68.76	0.00219	30.53	0.10
S-200	61.72	0.00240	28.56	0.253
S-400	55.25	0.00306	20.94	0.452
S-600	24.97	0.00554	6.26	0.836
S-800	12.47	0.00824	1.88	0.951

3.2 混凝土高温损伤多场耦合仿真分析

依据实验参数, 在 ANSYS 中用前文所提供的温度-载荷耦合关系与三维损伤模型进行损伤模拟。根据对称性取混凝土试块的 1/2 建立混凝土三维随机损伤试块, 通过上文孔隙随机分布的计算方法, 把微缺陷等同于球形孔隙随机分布在材料中, 并采用具有温度和位移自由度的耦合单元 Solid273, 网格划分采用 Tet 形式。为了保证模拟精度, 缺陷孔隙周围采用控制单元个数方式, 分为 8 个单元, 过度因子为 2, 如图 2 所示。

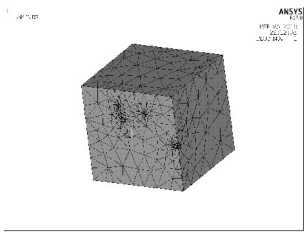


图 2 三维有限元网格划分

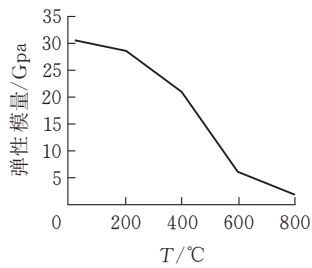


图 3 温度-弹性模量曲线

按实验中加热方式设定 200°C 、 400°C 、 600°C 和 800°C 求出温度与应力耦合。实验中单轴受压实验, 应变可以直接转化成位移率 $10^{-5} \text{ m}/\text{s}$ 进行加

载。同时使用参考实验得出的温度与弹性模量的非线性关系参数(图 3), 通过直接耦合的耦合矩阵方程模拟出孔隙处损伤应力云图与整体的应变云图。通过孔隙处应力云图分析细观裂纹扩展趋势。以及对比有限元模型与参考实验, 证明该有限元模型基本模拟多孔隙混凝土材料在各种温度场下的损伤。

3.2.1 细观孔隙损伤分析 在有限元模拟试块中随机选取一个孔隙, 分析 200°C 、 400°C 、 600°C 和 800°C 温度下一次位移载荷之后的第一主应力。

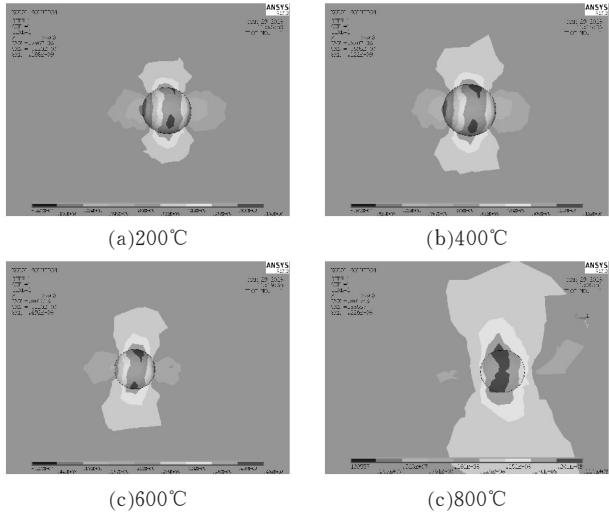


图 4 三维孔隙处应力云图

对图 4 三维孔隙处的应力云图分析可知, 在一次位移载荷下 200°C 时所选孔隙处混凝土的强度未明显降低, 应力集中在孔隙的两端, 裂纹扩展趋势是向孔隙两端。而在 800°C 由于试块的抗压强度降低, 应力集中区域变大, 孔隙处裂纹扩展加剧。由此可得混凝土中孔隙损伤区域的应力云图, 可以模拟混凝土细观结构的破坏趋势, 应力集中区域。

3.2.2 宏观损伤分析与实验对比 实际材料中内部会出现不连续的裂纹与损伤, 导致应力分布具有随机性。由于参考实验是宏观模型, 不能直接测出细观孔隙的应力应变。为了验证模型的正确性, 通过对比模拟结果与实验中所设计 200°C 、 400°C 、 600°C 和 800°C 的应变值。图 5 为模拟加热后的中心截面应变云图。

通过 x, y, z 矢量分解得出在对应受压处的最大应变, 模拟最大应变为 ϵ_{cm}^T 并与实验中数据对比(表 3)。

表 3 计算结果与实验结果

温度	f_c^T/MPa	ϵ_c^T	ϵ_{cm}^T	误差
200	61.72	0.00233	0.00216	-0.00017
400	55.25	0.00306	0.00456	0.00150
600	24.97	0.00554	0.00696	0.00142
800	12.47	0.00824	0.00936	0.00112

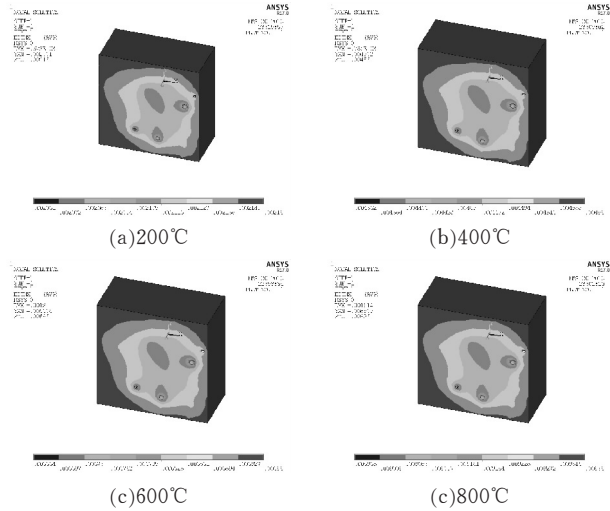


图 5 温度应变云图

通过对比模型计算结果和试验结果,相同温度条件下,应变最大误差为 0.0015,在 400 ℃ 时出现,温度在 800 ℃ 时误差仅为 0.00112,且均在 10^{-3} 数量级(在 200 ℃ 时温度对混凝土的强度几乎没有影响),随着温度的升高模拟与实验的误差变小。证明有限元能模拟不同温度下多孔隙混凝土材料的力学性能。同时有限元模型可以生成不同温度下试块的应力—应变曲线(图 6)。图表温度越高曲线中前半段的斜率变小,最高点同时变小。

图 6 表明弹性模量与温度的变化成负相关,高温导致混凝土材料的内部损伤加剧,抗压强度降低。

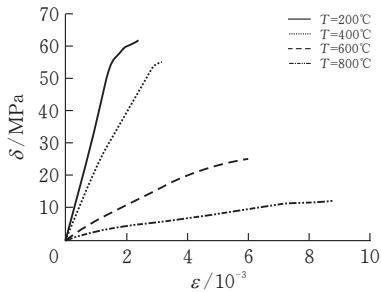


图 6 混凝土不同温度下的应力—应变曲线

3.2.3 混凝土损伤方程 参考实验采用的应变率加载方式,载荷损伤值 φ_M^x 等于 $\varphi_M^c = 1 - \exp(-c_k c_c)$,温度损伤值 φ_T 等于 $\varphi_T = 1 - E(T)/E_0$ 。通过上文所提出混凝土损伤方程,参考实验数据拟合与有限元模拟结果对比,温度影响下的 \tilde{S}_T 除掉微裂纹以后的纯面积与温度之间的关系

$$\frac{\tilde{S}_T}{S} = \frac{1}{10.45 - 0.20T^{0.5} - 166.97T^{0.5}} + 1$$

式中: S 为表面的总面积; \tilde{S}_T 为除掉微裂纹以后的纯面积。

4 结论

1)基于混凝土损伤方程建立多孔隙三维模型,

考虑温度场影响,建立了描述不同温度条件下混凝土材料力学性质的热—力耦合有限元模型。使用 ANSYS 软件建模,将有限元模拟与实验数据相对比,表明本文模型能够预测结果,并参考实验数据,拟合损伤面积与温度的方程。

2)由温度应力—应变曲线得出,200 ℃ 混凝土强度几乎不怎么变化,在 400 ℃ 后混凝土强度随温度增加而下降,800 ℃ 时混凝土强度仅为室温时的 1/6。从有限元应力云图可知此时损伤处应力超过混凝土的强度有裂纹扩展的趋势。参考实验中此时试块表面裂纹连续分布,从裂缝中可看见砂浆等混凝土组份,其细观结构已经损坏。

3)考虑了损伤的有限元模型更加真实地反映了材料的特性,但处理起来更加复杂,只能运用于小型结构试件或大型工程结构的局部。在实际工程中,从细观角度建立的有限元模型,可以较为准确地模拟结构的破坏趋势,应力集中区域。结合实验结果综合分析,设计出安全可靠的耐高温结构。

[参 考 文 献]

[1] 姬李娜. 预置裂缝对混凝土热量传输规律影响的试验研究与有限元分析[D]. 青岛:青岛理工大,2015.

[2] 葛培. 岩盐层中核废料处置库温度、变形与应力场分析[D]. 天津:河北工业大学,2011.

[3] Gawin, D, Schreder, B. A, Thermo-hydro-mechanical analysis of partially saturated porous materials[J]. Engineering Computations, 1996,13(7): 113-143.

[4] Nechnech, W.Meftah,F.Reynouard, J.M, An elastoplastic damage model for plain concrete subjected to high temperature[J]. Engineering Structure, 2001,24: 597-611.

[5] 荣明达,郭志勇,吴学前. 蒙特卡罗法生成二维三维随机骨料模型的 ANSYS 实现[J]. 建设机械技术与管理,2017,30(11):71-73.

[6] 胡娟,伍贤智,石峻峰,等.厦漳大桥(南汉)锚拉板焊接残余应力有限元分析[J].交通科技,2013(4):21-24.

[7] 金绍武. 基于 BIM 的超大体积锚碇温度应力场研究[D].武汉:湖北工业大学,2017.

[8] 李志卫,肖建庄,谢青海. 高温后高强混凝土受压动态损伤[J]. 工程力学,2017,34(2):78-84.

(下转第 68 页)