

受火(高温)后混凝土的随机损伤本构关系

余江滔¹, 夏敏^{1,2}, 陆洲导¹

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 苏州科技学院 土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要: 结合受火(高温)后混凝土的损伤形态和破坏特征, 研究了基于损伤随机演化下受火(高温)后混凝土受拉和受压损伤发展的随机演化规律. 引入弹簧损伤单元模型, 考虑混凝土初始损伤、受火损伤及裂缝闭合下损伤愈合等因子, 利用 Weibull 分布函数进行推演, 建立了受火后混凝土单轴抗拉、单轴抗压的随机损伤本构关系模型. 通过计算结果与试验数据的对比验证, 从理论结果而非试验数据的拟合上解释了受火(影响)后混凝土应力-应变的四大特点, 证实了运用随机损伤本构关系反映受火后混凝土破坏机理的可行性.

关键词: 受火后混凝土; 本构关系; 随机损伤; 裂缝闭合; Weibull 分布

中图分类号: TU 352.5

文献标识码: A

Stochastic Damage Constitutive Law for Fire-damaged Concrete

YU Jiangtao¹, XIA Min^{1,2}, LU Zhoudao¹

(1. Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: Based on the damage configuration and failure feature of fire-damaged concrete, this paper presents studies of the stochastic evolution law of fire-damaged concrete (FDC) under uniaxial tension and uniaxial compression. The stochastic damage constitutive relationship models of FDC under uniaxial tension and uniaxial compression are established with the Weibull distribution and spring damage element model by considering the damage factors such as the initial damage of concrete, the damage caused by elevated temperature and the damage healing under crack closure. Through the proposed method, four mechanical features of FDC are explained by theoretical derivation rather than test data fitting. The theoretical derivation results are compared with test data and the proposed method proves feasible in

explaining the failure mechanism of FDC.

Key words: fire-damaged concrete; constitutive law; stochastic damage; crack closure; Weibull distribution

混凝土受火(高温)影响实际上是一个化学、物理多重作用的过程. 化学反应中, 水泥胶体主要表现为脱水反应, 而粗骨料在高温下会发生石英石的转化和石灰岩脱碳等反应^[1-2]. 物理变化体现为: 自由应变、瞬态热应变、短期高温徐变、受力变形 4 种变化^[3]等. 高温中, 骨料发生膨胀变形, 而水泥胶体则因为脱水等原因出现收缩现象, 但由于粗骨料的膨胀, 造成了变形不协调. 因此高温中, 混凝土的粗骨料与胶体之间会产生大量裂缝^[4].

高温冷却后, 粗骨料的自由膨胀得到恢复, 而水泥胶体的脱水无法恢复, 界面处的裂缝增大为间隙. 试验证明, 随着曾经温度的增加, 混凝土孔隙率呈明显增加的趋势^[5].

通过试验(图 1), 研究者发现受火(高温)后混凝土三大力学指标有如下明显的特征^[5]:

(1) 受火后混凝土的抗压强度、抗拉强度、弹性模量等随着受火温度增加而明显下降, 且降幅并不相同. 降幅由大到小排列分别为弹性模量、抗拉强度、抗压强度. 这一现象与常温下混凝土劈拉和抗压强度的相关变化正好相反.

(2) 高温作用后, 混凝土峰值压应变较常温大, 而且随着温度的升高, 峰值压应变有明显增大趋势.

(3) 与高温中混凝土的抗压强度相比, 高温后混凝土强度明显偏低(尤其在 400 °C 以下). 同常温抗压强度相比, 不超过 300 °C 高温中混凝土抗压强度甚至有增加的现象. 高温后的试验证明混凝土强度随着最高温度的升高而单调下降.

收稿日期: 2009-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(51008235); 高等学校博士学科点专项科研基金(200802471089)

第一作者: 余江滔(1975—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为结构抗火与加固. E-mail: Yujiangtao@tongji.edu.cn

通过试验,其他研究者也观察到类似的现象^[6-7],但现象发生原因缺乏理论上的解释。

除上述3个特点外,试验中笔者观察到高温影响后混凝土抗压变形中上升段的应力强化现象^[5],如图1所示。实际上,其他研究者也观察到常温下混凝土或岩石抗压曲线上上升段的强化行为^[8],称之为压密现象,如图2(图中纵坐标 p 表示正应力)。原因应该是混凝土胶体与粗骨料之间的缝隙被压实造成。压密现象属于混凝土的初期受力行为,对峰值应力和应变影响不大,故一直不受人们的重视。但高温下混凝土发生了诸多物理、化学变化,如微裂缝增加、孔隙比增大以及胶体脱水反应等,这些变化使得混凝土在受力过程中压密现象十分明显。实际上,压密现象成为笔者解释受火(高温)的混凝土力学性能的关键之一。

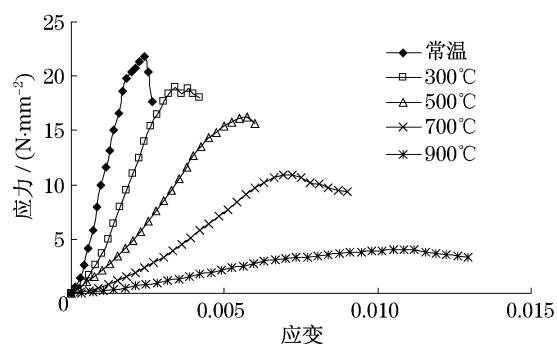


图1 不同温度下混凝土抗压应力-应变曲线(试验值)
Fig.1 Compressive stress-strain curve of concrete subjected to different temperatures (test data)

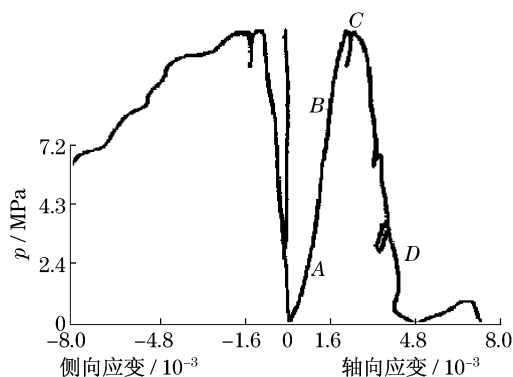


图2 混凝土单轴抗压下轴、侧向应力-应变曲线^[8]
Fig.2 Stress-strain curve of concrete under axial load at ambient temperature^[8]

1 受火后混凝土随机损伤的分析原则

笔者认为,对于高温影响后混凝土和力学性能采用唯象学的方法只能从现象上进行描述,对试验

数据进行简单的公式拟合,不能从本质上反映混凝土损伤的真实原因。采用混凝土随机损伤的原理则可能从破坏机理的角度来解释受火损伤的混凝土力学特征。

国内外已有许多学者^[9-13]提出了混凝土随机损伤的概念,从损伤力学研究的基点出发,建立了常温下混凝土破坏机理分析的细观随机损伤力学模型,从这一角度反映混凝土的本构关系。常温下,混凝土损伤机理的分析原则有3点:①连续介质原则:认为在混凝土试件(构件)有足够尺寸的条件下,可以视为均匀和连续的介质,并采用连续介质的力学模型进行分析。②损伤的随机性原则:可采用两参数Weibull分布来模拟混凝土在荷载作用下的损伤的随机变化^[13]。③细观分析原则:从细观的层面上结合统计学的方法对混凝土中裂缝的开展进行分析。

混凝土在受高温作用后,温度对混凝土的断裂参数和损伤因子造成了影响。基于此,笔者认为受高温损伤还有如下特点:①受火(高温)后混凝土不可避免地存在损伤,试件在荷载作用下的变形只是在反映初始损伤基础之上的应力-应变关系;②混凝土受压的上升阶段会经历非线性压密,其结果为混凝土的弹性模量增大,一定程度上愈合了已有的损伤;③混凝土破坏过程实际上是一个损伤的累加过程。

基于以上原则,笔者试图利用随机Weibull分布,在参考李杰等^[10-12]的弹簧损伤单元模型的基础上,对该模型进行适当地改造(尤其是受压模型),考虑混凝土受火损伤及裂缝闭合这2个方面的因素,得出受火后混凝土单轴抗拉、受压的本构关系模型。

2 受火后混凝土单轴抗拉随机损伤本构关系

基于受火后混凝土损伤机理的分析和受火后混凝土应力-应变曲线的特征,引入如下假定:①混凝土单轴抗拉模型可视为由一系列串联的损伤单元组成,而一个损伤单元是由两端位移约束、相互平行、等间距分布的多个弹脆性弹簧并联构成,如图3,图中 σ_{1t} 为作用于混凝土截面上的拉应力, h_n 为单个损伤单元的长度, n 为损伤单元的总个数, H_{spc} 为混凝土试块的平行于轴向力方向的长度, N 为单个损伤单元所承受的拉力, X_n 为相邻弹簧的间距, S_n 为单个弹簧的面积。假设各个损伤单元只有一个损伤破坏面,在单元的特征高度内,材料在宏观抗拉破坏

过程中损伤具有连续性. ②混凝土的理想弹性模量 E_{deal} 的假设. 理想弹性模量可视为混凝土内没有微裂缝和孔洞的理想状态, 此时受拉损伤变量 D_t 为零. 加载之前, 常温和曾经高温的混凝土都会有初始损伤, 初始损伤性质视为各相同性, 并服从空间的均匀分布. ③宏观裂缝出现前, 在荷载作用下, 弹簧单元逐渐出现受力损伤, 损伤的位置仍服从空间的均匀分布, 而出现的概率则服从自变量为拉应变的两参数 Weibull 分布. 宏观裂缝出现后, 损伤集中于主裂面, 损伤定义为受力损伤 $D_{3t}(T, \epsilon_t)$, 是一个同混凝土曾经温度和应变有关的变量, 同时与混凝土的受力状态有密切关系. 其中, T 为混凝土曾经受火的最高温度, ϵ_t 为损伤单元的拉应变. ④混凝土的损伤由初始损伤及受力损伤构成. 其中, 初始损伤又可以按照物理和化学变化分成如下 2 种: 一是不同材料的温度变形不协调造成了混凝土孔隙和裂缝的进一步发展(物理变化), 损伤定义为 $D_{1t}(T)$, 是一个同温度相关的变量, 在计算中体现为弹性并联单元总数的减少; 二是温度超过 300°C 后, 混凝土的多种组分会在高温下分解(化学变化), 造成强度的进一步降低, 损伤定义为 $D_{2t}(T)$, 是一个同温度相关的变量, 在计算中体现为弹簧单元刚度的退化. 故损伤总量可以表示为如下形式: $D(T, \epsilon_t) = 1 - [1 - D_{1t}(T)][1 - D_{2t}(T)][1 - D_{3t}(T, \epsilon_t)]$.

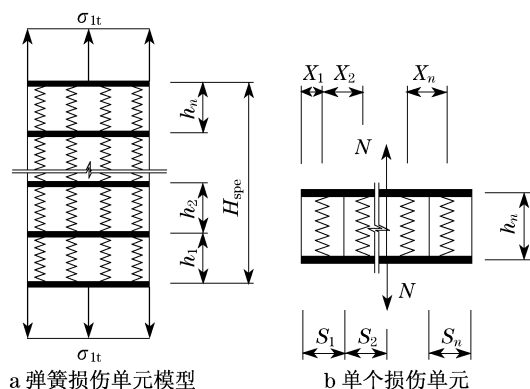


图 3 混凝土单轴抗拉的弹簧损伤单元模型

Fig. 3 Spring elements of fire-damage concrete under axial tensile load

2.1 损伤单元的随机损伤分析

图 3 所示每个损伤单元中的单个弹簧代表该损伤单元中混凝土的微单元体, 弹簧的破坏表示微损伤(裂缝)的产生. 不同的损伤单元通过串联的方式组成单轴抗拉试件. 混凝土的损伤在模型中表现为单个弹簧的断裂, 断裂后弹簧退出工作, 物理意义表现为该处出现混凝土微裂缝.

对于上述损伤单元, 由弹簧断裂引起损伤而导致裂缝生成的面积 $S_\omega(\epsilon_t)$ 为

$$S_\omega(\epsilon_t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m H[\epsilon_t - \epsilon_{\text{scr},t}(T, i, j)] S_{i,j} \quad (1)$$

式中: n, m 为损伤单元中单个弹簧的数量; $S_{i,j}$ 为单个弹簧的面积; H 为 Heaviside 函数; $\epsilon_{\text{scr},t}(T, i, j)$ 为损伤单元中单个弹簧在 T 时的极限拉应变, 是服从某一分布的独立随机变量(服从两参数 Weibull 分布), H 表示如下:

$$H[\epsilon_t - \epsilon_{\text{scr},t}(T, i, j)] = \begin{cases} 0 & \epsilon_t \leq \epsilon_{\text{scr},t}(T, i, j) \\ 1 & \epsilon_t > \epsilon_{\text{scr},t}(T, i, j) \end{cases} \quad (2)$$

当损伤单元体在整个加载过程中处于拟静力状态时, 单元的宏观外力与弹簧单元的合力平衡. 此外, 假定受相同温度 T 影响, 相同浇筑、养护条件下的混凝土损伤单元内弹簧刚度 $E_t(T)$ 度相等, 即

$$E_t(T) = E_t(T)_{i,j} = E_{\text{ideal}}[1 - D_{1t}(T)] \cdot$$

$$[1 - D_{2t}(T)], i \in (1, n), j \in (1, m) \quad (3)$$

$$N_T(\epsilon_t) = \sigma(T, \epsilon_t)[S - S_\omega(\epsilon_t)] = E_t(T)_{i,j} \epsilon_t \cdot$$

$$\left\{ S - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m H[\epsilon_t - \epsilon_{\text{scr},t}(T, i, j)] S_{i,j} \right\} \quad (4)$$

式中: $E_t(T)_{i,j}$ 为单个弹簧单元对应的弹性模量; E_{ideal} 为理想状态下无初始损伤的混凝土弹性模量; $D_{1t}(T), D_{2t}(T)$ 分别为受热温度为 T 的混凝土在无荷载的初始情况下的 2 种损伤变量, 它们只与温度 T 有关, 而与受力状况无关; $N_T(\epsilon_t)$ 为试块中损伤单元的合力(拉力); $\sigma(T, \epsilon_t)$ 为弹簧单元的拉应力; S 为弹簧单元对应的试块的总面积.

则混凝土抗拉损伤单元的名义应力 $\sigma(T, \epsilon_t)$ 为

$$\sigma(T, \epsilon_t) =$$

$$\frac{E_t(T)_{i,j} \epsilon_t \left\{ S - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m H[\epsilon_t - \epsilon_{\text{scr},t}(T, i, j)] S_{i,j} \right\}}{S} =$$

$$E_t(T)_{i,j} \epsilon_t [1 - D_{3t}(T, \epsilon_t)] \quad (5)$$

在整个试块范围内的损伤变量 $D_{3t}(T, \epsilon_t)$ 的表达式如下:

$$D_{3t}(T, \epsilon_t) = S_\omega(\epsilon_t)/S \quad (6)$$

当损伤弹簧单元划分得足够细, 单个弹簧单元所对应的面积足够小 ($S_i/S \rightarrow 0$) 时, 损伤变量 $D_{3t}(T, \epsilon_t)$ 可表达为连续变量

$$D_{3t}(T, \epsilon_t) = \frac{S_\omega(\epsilon_t)}{S} =$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m H[\epsilon_t - \epsilon_{scr,t}(T, i, j)] S_{i,j}}{S} = \frac{\int_0^L \int_0^B H[\epsilon_t - \epsilon_{scr,t}(T, x, y)] dy dx}{S} \quad (7)$$

式中: B, L 为抗拉平面的宽度和长度, 可视为常数; x, y 为对应抗拉平面 B, L 的平面坐标。

对于 Heaviside 函数 $H[\epsilon_t - \epsilon_{scr}(T, i, j)]$, 在各个相应的 (T, x, y) 上采用两参数 Weibull 分布来模拟断裂的可能, 即 $\epsilon_t - \epsilon_{scr}(T, x) > 0$ 的概率

$$D_{3t}(T, \epsilon_t) = \int_0^{\epsilon_t} \left[\frac{n(T)}{a(T)} \epsilon_t^{n(T)-1} \exp\left(-\frac{\epsilon_t}{a(T)}\right) \right] d\epsilon \quad (8)$$

式中: $n(T)$ 为 Weibull 模量, 它是确定 Weibull 分布密度函数形状的参数; $a(T)$ 为尺度参数, 其大小反映曲线在横向收缩的情况。

将式(8)代入式(5), 得到不同温度后混凝土单轴抗拉的应力-应变本构关系

$$\sigma(T, \epsilon_t) = E_t(T) \epsilon_t [1 - D_{3t}(T, \epsilon_t)] = E_{ideal} [1 - D_{1t}(T)] [1 - D_{2t}(T)] \epsilon_t \cdot \exp\left[-\left(\frac{\epsilon_t}{a(T)}\right)^{n(T)}\right] \quad (9)$$

2.2 受火后混凝土抗拉随机损伤的计算

在混凝土加载的应力-应变上升期, 各个损伤可视为在抗拉平面内均匀发展. 这个阶段混凝土的应力和应变有如下的边界条件和初始条件:

$$\begin{cases} \text{条件 1: } \epsilon_t = 0, & \sigma_t = 0 \\ \text{条件 2: } \epsilon_t = 0, & \frac{d\sigma}{d\epsilon} = E_t(T) \\ \text{条件 3: } \epsilon_t = \epsilon_{peak}, & \sigma_t = \sigma_{peak} \\ \text{条件 4: } \epsilon_t = \epsilon_{peak}, & \frac{d\sigma}{d\epsilon} = 0 \end{cases}$$

式中: σ_t 为混凝土拉应力; ϵ_{peak} 为峰值拉力对应的拉应变; σ_{peak} 为峰值拉应力. 利用以上条件, 推导可得到 Weibull 分布的 2 个参数 $n(T)$ 和 $a(T)$

$$n(T) = \frac{1}{\ln\left[\frac{E_t(T) \epsilon_{peak}}{\sigma_{peak}(T)}\right]} \quad (10)$$

$$a(T) = \epsilon_{peak} \left\{ \ln\left[\frac{E_t(T) \epsilon_{peak}}{\sigma_{peak}(T)}\right] \right\}^{-\ln\left[\frac{E_t(T) \epsilon_{peak}}{\sigma_{peak}(T)}\right]} \quad (11)$$

将式(10)和式(11)代入式(9), 得到不同温度后混凝土单轴抗拉的应力-应变本构关系

$$\sigma(T, \epsilon_t) = E_t(T) \exp\left[-\left(\frac{\epsilon_t}{a(T)}\right)^{n(T)}\right] \epsilon_t =$$

$$E_t(T) \exp\left[\frac{1}{\ln\left[\frac{E_t(T) \epsilon_{peak}}{\sigma_{peak}(T)}\right]} \ln(E_t(T) \epsilon_{peak} / \sigma_{peak}(T)) \right] \left[\frac{1}{\ln\left[\frac{E_t(T) \epsilon_{peak}}{\sigma_{peak}(T)}\right]} \right]^{-1} \epsilon_t \quad (12)$$

3 受火后混凝土单轴抗压随机损伤本构关系

相比受拉而言, 混凝土受压破坏的状态要复杂得多, 但从损伤发生的机理来说, 受压破坏过程材料破坏主要由拉应力引起, 与单纯的抗拉破坏之间有很多相似之处. 常温下混凝土抗拉、受压的随机损伤模型已有成熟的研究成果^[11-12]. 高温影响混凝土的受压损伤发展尚无研究成果可查. 在此, 笔者基于高温后混凝土单轴抗拉随机损伤的结果直接进行单轴抗压的本构关系的推演.

在抗拉损伤模型的基础上, 再引入如下 3 条假定:

(1) 模型中混凝土微裂缝形状为扁平的钱币状^[14]. 对于任一确定的裂缝开口位移 (crack mouth opening displacement) 值 d_{cmo} , 裂缝可看作一个直径为 D 、高为 d_{cmo} 的扁平圆柱体, 如图 4 所示, $D = d_{cmo} / \beta$, β 为裂缝的形状系数, 取常数.

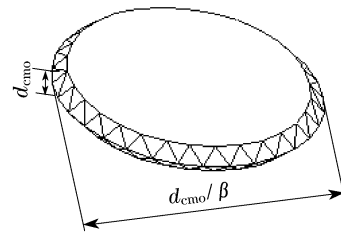


图4 微裂缝的假定形状

Fig.4 The assumed shape of micro-crack

(2) 混凝土的裂缝开口位移 d_{cmo} 服从 Weibull 分布. 混凝土断裂力学的研究中, 大量研究者成功地应用 Weibull 分布来模拟裂缝的断裂过程^[15-16], Weibull 理论证明适用于描述裂缝的特性. 笔者采用 Weibull 分布来描述混凝土 d_{cmo} 的概率密度, 在不同受火温度下, d_{cmo} 均服从 Weibull 分布, 温度造成的区别在 Weibull 的双参数中表现. 分布函数如下:

$$f(T, c) = \frac{n(T)}{a(T)} \left[\frac{c}{a(T)} \right]^{n(T)-1} \exp\left\{-\left[\frac{c}{a(T)}\right]^{n(T)}\right\} \quad c \in [0, C_{max}] \quad (13)$$

式中: c 为 d_{cmo} 的闭合程度; $n(T)$, $a(T)$ 分别为 Weibull 分布参数; C_{max} 为一个足够大的裂缝位移, 超过 C_{max} 的概率非常小, 可以认为 C_{max} 是受火后混凝土裂缝的上限, 对 C_{max} 超越的情况在计算中可忽略.

(3) 平行于受荷面的裂缝呈层状分布. 将混凝土试块沿长、宽、高方向划分成许多微小的单元, 每个单元对应一个多弹簧的损伤单元, 单个裂缝的中心点位置离散到单元的中心处, 当单元划分得足够小时, 这种假定是可以接受的.

3.1 受火后混凝土随机裂缝闭合模型

受压损伤子单元可视为模拟密实混凝土的弹簧单元(图 5a)和模拟有裂缝间隙的弹簧单元(图 5b) 2 种. 图中, ν 为混凝土无损状态下的 Poisson 比, 其对应的初始切线模量为 E_{ideal} ; ϵ_{1C} 为损伤单元压应变; ϵ_{crack} 为有裂缝单元对应 ϵ_{1C} 的正交向压应变. 多个这样的弹簧单元串、并联, 形成了如图 6 所示的抗压损伤单元. 对于图 5a 的子单元形式, 文献[10-12]已经有充分的论述. 对于 5b 单元, 笔者假定其中裂缝的长宽相等, l_i 为温度 T 下单元长度, w_i 为温度 T 下单元的宽度; 初始损伤程度不同, 在模型中表现为部分弹簧同位移约束的脱离, 即开口位移 $c_i(T)$; $h_1(T)$ 为未脱离弹簧单元高度, $h_2(T)$ 为脱离弹簧单元的高度; H_c 为混凝土试块的平行于轴向力的裂缝总高; N_{lay} 为裂缝的等效层数. 因此, 裂缝子单元的公式表达如下:

$$\begin{cases} l_i = c_i(T) / \beta \\ w_i = c_i(T) / \beta \\ h_2(T) = H_c / N_{\text{lay}} \end{cases} \quad (14)$$

单个弹簧单元面积为 $S_i = c_i^2(T) / \beta^2$, 高度为 $h_{\text{eq}}(T)$. 单个弹簧单元间的并联可模拟单位高度上受荷面的应力和应变关系. 弹簧单元是由两端位移约束的弹簧构成.

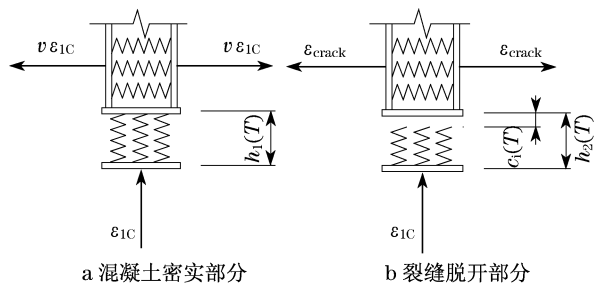


图 5 受火后混凝土随机裂缝闭合单元

Fig.5 Crack-closing element of fire-damaged concrete

由于采用裂缝闭合原理, 必须对弹簧模型进行巨大的改变, 对混凝土试块不能采用通常意义上的划分.

高度方向上单元划分可采用等距, 垂直于轴向力方向上单元的长和宽则是同裂缝开口位移相关的, 也就是说它们也符合参数为 $n(T)$ 和 $a(T)$ 的 Weibull 分布.

3.2 受火后混凝土单轴抗压随机损伤模型

混凝土微裂缝产生的可能部位有 2 种: 混凝土密实处或者裂缝已闭合的部位. 如图 6 所示, 密实或闭合单元在受压过程中会产生横向应变, 并伴随微损伤(裂缝)的产生. 图中, σ_{1C} 为轴向正应力; $h_{\text{eq}}(T)$ 为受压损伤单元平行于压力方向长度. 下面分别进行 2 种情况的公式推导.

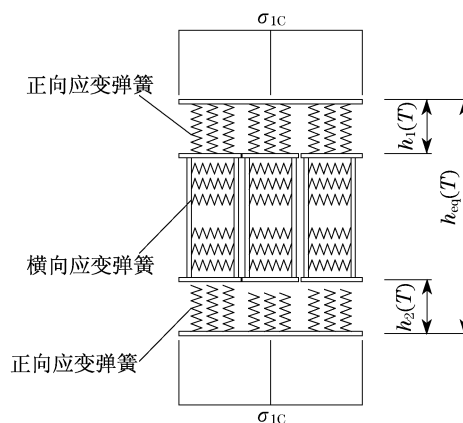


图 6 受火后混凝土单轴抗压的损伤弹簧模型

Fig.6 Spring element of fire-damaged concrete under compressive load

3.2.1 损伤单元中混凝土密实部分

混凝土密实部分模型如图 5a 所示, 正向压应变 ϵ_{1C} 将产生横向变形 $\nu\epsilon_{1C}$, 依据文献[12], 常温下混凝土单轴抗压的随机损伤本构关系 $\sigma_{1C} = E_c \epsilon_{1C} [1 - 2\alpha\nu D_c(\nu\epsilon_{1C})]$, 式中 E_c 为损伤单元的残余弹性模量, α 为垂直于轴压力方向的影响系数, D_c 为轴压力下的损伤因子. 由于笔者考虑温度与轴压力的共同影响, 表示为 $D_{3C}(T, \epsilon_{1C})$.

$$D_{3C}(T, \epsilon_{1C}) = 1 - 2\alpha\nu \int_0^{\epsilon_{1C}} \frac{n(T)}{a(T)} \cdot \left(\frac{\epsilon_{1C}}{a(T)} \right)^{n(T)-1} \exp \left\{ - \left[\frac{\epsilon_{1C}}{a(T)} \right]^{n(T)} \right\} d\epsilon = 1 - \eta \exp \left[- \left(\frac{\nu\epsilon_{1C}}{a(T)} \right)^{n(T)} \right] \quad (15)$$

式中: $\eta = 2\alpha\nu^2$. 则受火后损伤单元中混凝土密实部分的受压应力-应变关系可如下表示:

$$\begin{aligned} \sigma_{1C} &= E_c(T) \epsilon_{1C} [1 - D_3(T, \epsilon_{1C})] = \\ E_c(T) \epsilon_{1C} \eta \exp \left[- \left(\frac{\nu\epsilon_{1C}}{a(T)} \right)^{n(T)} \right] &= \\ E_c(T) \epsilon_{1C} \eta / \exp \left[\frac{\nu\epsilon_{1C}}{a(T)} \right]^{n(T)} & \end{aligned} \quad (16)$$

式中, $E_c(T)$ 为损伤单元中弹簧在温度 T 下的残余弹性模量, 表示混凝土受压状态下的弹性模量。

3.2.2 损伤单元中弹簧脱开部分(即有裂缝部分)

裂缝脱开部分模型如图 5 b 所示, 轴向压缩产生的应变 ϵ_{1C} 产生的横向应变用 Heaviside 函数表示

$$\epsilon_{\text{crack}} = H(\epsilon_{1C}) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \epsilon_{1C} \leq c_i(T)/h_2(T) \\ v[\epsilon_{1C} - c_i(T)/h_2(T)] & c_i(T)/h_2(T) \leq \epsilon_{1C} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $c_i(T)$ 为裂缝的开口位移, 任一单元的 $c_i(T)$ 服从两参数 Weibull 分布的函数; $h_2(T)$ 为损伤单元中脱开部分的高度. 经推导^[5], 可得受火后损伤单元中有裂缝部分的受压应力-应变关系为

$$\sigma(T, \epsilon_{1C}) = E_c(T) \epsilon_{1C} \cdot \int_0^{\epsilon_{1C}} \frac{n(T)}{a(T)} \left[\frac{h_2(T)x}{a(T)} \right]^{n(T)-1} \exp \left\{ - \left[\frac{h_2(T)x}{a(T)} \right]^{n(T)} \right\} \cdot \frac{h_2(T)x^2}{s\beta^2} \exp \left\{ - \left[\frac{v\epsilon_{1C} - vx}{a(T)} \right]^{n(T)} \right\} h_2(T) dx \quad (18)$$

比较遗憾的是, 式(18)尚未找到解析解, 在实际应用中须进行数值运算。

3.3 受火后混凝土受压随机损伤的计算

3.3.1 初始条件的建立

由于笔者旨在探讨受火后混凝土的损伤机理(尤其是受压). 正如前文指出, 混凝土单轴受压破坏在很大程度上是由于内部材料变形不协调产生的拉力造成的. 为了体现这一特点, 式(15)~(18)已经将包含受拉破坏概率的横向变形弹簧引入抗压模型中. 为了验证这一模型的正确性, 下文中将混凝土抗拉过程中体现出的力学特性和受火后混凝土的孔隙率作为计算抗压应力-应变曲线的初始条件, 希望通过材料的抗拉特性体现出受火后混凝土受压曲线的种种特征. 计算的初始条件包括: ①不同受火温度后混凝土的峰值拉应力; ②不同受火温度后混凝土的峰值拉应变; ③不同受火温度后混凝土的孔隙率; ④裂缝形状系数; ⑤混凝土试块尺寸; ⑥混凝土抗拉初始切线弹性模量。

以上条件中不包含任何与混凝土受压有关的试验数据, 但通过推导的受压应力-应变的公式可以反映出常温和高温影响后混凝土的种种力学特征。

3.3.2 初始损伤的确定

与高温后混凝土抗拉的初始损伤确定方法类似, 受火后混凝土的初始损伤为

$$D_{1C}(T) = \frac{A_{eq}(T)}{L_c W_c} = \frac{\left(\frac{P(T) L_c H_c W_c \beta^2}{3} \right)^{\frac{2}{3}}}{L_c W_c \beta^2} \quad (19)$$

$$D_{2C}(T) =$$

$$\begin{cases} 0.00044(T-100) & 100^\circ\text{C} \leq T \leq 300^\circ\text{C} \\ 0.912 - 0.00145(T-300) & 300^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $A_{eq}(T)$ 为受火后混凝土试块的等效面积; L_c 为混凝土试块的长度; W_c 为混凝土试块的宽度; H_c 为混凝土试块的高度; $P(T)$ 为受火后混凝土的孔隙率。

利用抗拉模型的计算结果来计算混凝土高温后的初始损伤

$$[1 - D_{1C}(T)][1 - D_{2C}(T)] = \frac{E_c(T)}{E_{\text{ideal}}} \quad (21)$$

将式(19)和式(20)代入式(21), 可得理想弹性模量 E_{ideal} 的表示式

$$E_{\text{ideal}} = E_c(20) / \{ [1 - D_{1C}(T)][1 - D_{2C}(T)] \} = \frac{E_c(20) / (1 - \left(\frac{P(20) L_c H_c W_c \beta^2}{3} \right)^{\frac{2}{3}})}{L_c W_c \beta^2} \quad (22)$$

3.3.3 混凝土受压破坏 Weibull 分布参数的确定

损伤单元中弹簧脱开部分的 Weibull 分布参数 $n(T)$, $a(T)$ 的确定是混凝土损伤后应力-应变关系计算的关键. 笔者从已有的试验数据出发, 根据混凝土自身的特性以及 Weibull 分布所独具的特点来完成对该两参数的试算。

为了得到准确的 $n(T)$, $a(T)$ 值, 必须在多个地方采取多次试算, 计算量非常繁重; 加之式(18)中积分已无法通过解析法求解. 因此, 要完成式(16)和式(18)的计算必须借助计算机进行数值运算。

4 受火后混凝土随机损伤本构关系的试验验证

根据上述所采用的算法, 笔者采用 MATLAB 编程(程序名 FUSCF)进行运算, 并将程序计算结果与试验数据进行对比, 对笔者提出的受火后混凝土单轴抗拉和受压的随机损伤本构关系表达式进行验证。

采用初始条件, 包括不同受火温度后混凝土的峰值拉应力、拉应变值等均采用试验实测值. 通过计算得到: ①受不同温度影响后混凝土的单轴抗拉、受压的应力-应变曲线如图 7 所示; ②受火后混凝土极限抗压强度的降幅与其他研究者的对比如表 1 所示; ③受高温影响的混凝土弹性模量、抗压强度、抗

拉强度的降幅如图 8 所示. 通过对计算结果的观察可知:①受高温影响后混凝土单轴抗拉、受压应力-应变曲线的计算结果与实测曲线比较吻合. 均反映了随着温度升高,强度呈下降的趋势,通过表 1 可知,其降幅与各研究者的结论近似;②受高温影响后混凝土峰值压应变随着温度升高有明显增大的趋

势,这与试验结果是一致的;③从降幅来看,弹性模量大于抗拉强度,抗拉强度又大于抗压强度,这一结果与试验结果一致;④图 7b 所示的抗压强度反映了挤密的应力化过程,这一结果与试验结果一致. 通过对比可知,本文的数值计算方法是可信的.

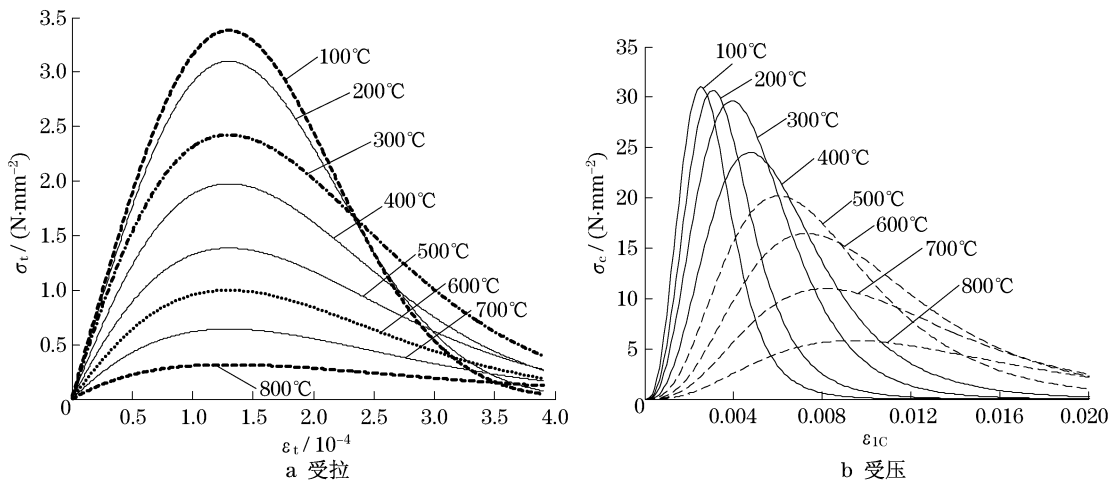


图 7 受火后混凝土单轴应力-应变曲线计算结果
Fig.7 Calculated stress-strain curve of fire-damaged concrete under axial load

表 1 受火后混凝土极限抗压强度计算结果与试验数据对比

Tab.1 Comparison between concrete's calculated compressive strength and test data									
曾经受火温度/℃	本文试验抗压强度	上海建科院试验结果	大连理工试验结果	四川建科院试验结果	清华大学试验结果	青岛建工结果 1	青岛建工结果 2	B. M. Luccioni	笔者计算抗压强度
100	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.000
200	0.95		0.95						0.972
300	0.90	0.82	0.89	0.76	0.94	0.94	0.98	0.72	0.905
400	0.76								0.769
500	0.63	0.60	0.70	0.50	0.64	0.63	0.64	0.59	0.630
600	0.55		0.57		0.30				0.505
700	0.47	0.50		0.28	0.20	0.15	0.13	0.42	0.332
800	0.20	0.25		0.17	0.13				0.172

注:表中计算抗压强度的初始条件没有采用任何同抗压强度有关的试验数据,计算结果并不是对试验结果的拟合. 试验抗压强度只有 100,300,500,700 ℃ 对应的是试验值,对应于 200,400,600,800 ℃ 的数值是为方便比较而进行的内插值.

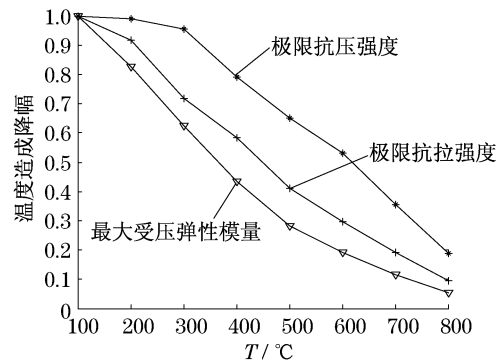


图 8 高温后混凝土计算弹性模量和抗拉、抗压强度降幅
Fig.8 Degradation ratio of elasticity modulus compressive and tensile strength

5 结语

受火(高温)后混凝土体现出完全不同于常温混凝土的四大力学特征^[17],但一直缺乏理论的研究成果对其损伤机理进行解释. 笔者结合受火(高温)后混凝土的损伤形态和破坏特征研究了受火(高温)后混凝土抗拉和受压损伤发展的随机演化规律. 引入弹簧损伤单元模型,考虑混凝土初始损伤、受火损伤及裂缝闭合下损伤愈合等因素,利用 Weibull 分布函数进行推演,建立了受火后混凝土单轴抗拉、单轴抗压的随机损伤本构关系模型. 通过计算结果与试验

数据的对比验证,从理论结果而非试验数据的拟合上解释了受火(影响)后混凝土应力-应变的四大特点,证实了随机损伤本构关系反映受火后混凝土破坏机理的可行性。

参考文献:

- [1] 王孔藩,许清风,刘挺林.混凝土结构火灾损伤及可靠性分析方法的研究报告[R].上海:上海建筑科学研究院,2003.
WANG Kongfan, XU Qingfeng, LIU Tinglin. The study report of fire damage and the Reliability Analysis on the concrete structure[R]. Shanghai: Shanghai Research Institute of Building Sciences, 2003.
- [2] 吕天启,赵国藩,林志伸,等.高温后静置混凝土的微观分析[J].建筑材料学报,2003,6(2):135.
LV Tianqi, ZHAO Guofan, LIN Zhishen, et al. Microscopic analysis of long standing concrete after high temperature[J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(2): 135.
- [3] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土的高温性能及其计算[M].北京:清华大学出版社,2003.
GUO Zhenghai, SHI Xudong. The performance and relative calculation of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [4] 董毓利.混凝土结构的火安全设计[M].北京:科学出版社,2001.
DONG Yuli. The fire safety design of concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [5] 余江滔.火灾后混凝土构件损伤评估的试验及理论研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2007.
YU Jiangtao. Experimental and theoretical research on damage assessment of reinforced concrete member after fire [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2007.
- [6] 王孔藩,许清风,刘挺林.高温下及高温冷却后混凝土力学性能的试验研究[J].施工技术,2005,34(8):1.
WANG Kongfan, XU Qingfeng, LIU Tinglin. Experimental research on mechanics performance of concrete after high temperature and cooled down from high temperature [J]. Construction Technology, 2005, 34(8): 1.
- [7] 陈舜田.建筑物火灾及灾后安全评估法[M].台北:科技图书股份有限公司,2000.
CHEN Shuntian. The fire damage and safety appraisal of structure [M]. Taipei: Co Ltd of Scientific and Technical Book, 2000.
- [8] 谢和平.岩石混凝土损伤力学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1990.
XIE Heping. Damage mechanic of stone and concrete [M]. Xuzhou: Press of China University of Mining, 1990.
- [9] Kandarpa S, Kirkner D J, Spencer B F. Stochastic damage model for brittle materiel subjected to monotonic loading [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 126(8): 788.
- [10] LI Jie, REN Xiaodan. Stochastic damage model for concrete based on energy equivalent strain [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46 (11 - 12): 2407.
- [11] 李杰,张其云.混凝土随机损伤本构关系[J].同济大学学报:自然科学版,2001,29(10):1135.
LI Jie, ZHANG Qiyun. Study of stochastic damage constitutive relationship for concrete material [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(10): 1135.
- [12] 李杰,卢朝辉,张其云.混凝土随机损伤本构关系——单轴抗压分析[J].同济大学学报:自然科学版,2003,31(5):505.
LI Jie, LU Zhaohui, ZHANG Qiyun. Study on stochastic damage constitutive law for concrete material subjected to uniaxial compressive stress [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(5): 505.
- [13] 吴政,张承娟.单向荷载作用下岩石损伤模型及其力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,1996,15(1):55.
WU Zheng, ZHANG Chenjuan. Investigation of rock damage model and its mechanical behavior [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(1): 55.
- [14] Krajcinovic D, Silva G. Statistic aspects of the continuous damage theory [J]. International Journal of Solids & Structures, 1982, 18(17): 551.
- [15] 徐世烺,赵国藩.混凝土断裂力学研究[M].大连:大连理工大学出版社,1991.
XU Shilang, ZHAO Guofan. Study on the fracture properties of concrete [M]. Dalian: Press of Dalian University of Technology, 1991.
- [16] 徐世烺,赵艳华,吴智敏,等.楔入劈拉法研究混凝土断裂能[J].水力发电学报,2003,4:15.
XU Shilang, ZHAO Yanhua, WU Zhimin, et al. The experimental study on the fracture energy of concrete using wedge splitting specimens [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003, 4: 15.
- [17] 过镇海.混凝土的强度和变形:试验基础和本构关系[M].北京:清华大学出版社,1997.
GUO Zhenghai. The deformation and strength of concrete: test base and constitutive relationship [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.