

高温作用下混凝土力学性能及本构方程

李博

新疆伊犁河流域开发建设管理局

DOI:10.12238/hwr.v4i12.3481

[摘要] 混凝土是一种多相复合材料,影响其力学性能的因素较多,从而导致高温后各项性能指标的变化也较为复杂。如何及时发现混凝土由于环境作用下导致其力学性能变化的安全问题,提高混凝土耐久性,对其力学性能变化规律进行预测,是当今工程界普遍关注的问题。本文在国内外混凝土抗火研究成果的基础上,对混凝土材料的高温力学性能进行了理论研究,以经典损伤理论模型为基础,结合混凝土宏观高温力学特性,构建了一个统一方程来描述混凝土在高温时的受压损伤全过程。方程简单,能很好的应用于混凝土本构关系的研究中。

[关键词] 混凝土; 高温; 力学性能; 单轴压缩; 本构方程

中图分类号: TM247+.1 文献标识码: A

Mechanical Properties and Constitutive Equation of Concrete Under High Temperature

Bo Li

Xinjiang Yili River Basin Development and Construction Administration

[Abstract] Concrete is a kind of multiphase mixture material and its mechanical properties can be effected by many factors, which make the behavior of concrete after-high temperature more complex than one at room temperature. It is the common concern in engineering circles to detect concrete security problems of long-term performance led by environmental factors, to improve the durability of concrete, and to predict the long-term performance. According to the results about fire resistance of concrete obtained by the scholars at home and abroad, the theoretical research on the mechanical behavior of concrete at high temperature is carried out. At the same time, according to the mechanical behaviors of high-temperature concrete, based on classic damage theory and a unified equation was put forward to describe the whole process of high-temperature concrete's stress-strain relations under uniaxial compression. The equation was simple, so it could be widely used.

[Key words] concrete; high-temperature; mechanical property; uniaxial compression; constitutive equation

混凝土作为一种主要的结构工程材料,由于其技术和经济上的优点,在工程领域中得到愈来愈广泛的应用。现代的民用建筑,商用建筑和军用建筑大多都是以钢筋混凝土为主要材料。而近年来,随着国民经济和现代化建设的发展,高层建筑不断涌现,房屋密度加大,加之大量新型材料广泛应用于建筑业,以及燃气、电器的普遍使用,大大增加了建筑物发生火灾的可能性,人们预测和控制火灾的压力越来越大。混凝土材料在高温环境下,与普通混凝土相比,其力学性能呈现极大的不同^[1]:随着温度的升高,混凝土的各项强度指标,包括抗压、抗弯、抗拉强度以及弹性模量等都呈衰减趋势;应力应变全曲

线随着混凝土温度的升高,曲线渐趋扁平,峰点明显下降和右移。

因此研究混凝土在高温条件下的力学性能,为深入开展新型混凝土结构抗高温(火灾)性能及其损伤评估的研究奠定基础,是很有必要的。

在高温条件下影响混凝土力学性能的因素很多,力学性能繁杂,所以要了解混凝土的真实性能还需要建立在很多的试验研究的基础之上。因此推进高温试验技术研究,提高试验效率和精确度,并通过试验了解静态和动态下混凝土高温时力学性能,建立混凝土高温时的本构关系以减少因火灾造成的经济损失迫在眉睫。

1 混凝土高温后的性能特点

由于混凝土是一种热惰性材料,混凝土的强度等级、骨料类型、配合比和升温速度等都对其高温强度有一定的影响,具有如下特点^[2]:

1.1 内部不均匀温度场。混凝土的热传导系数很小,结构受火后表面温度迅速升高,而截面内部的温度增长缓慢,形成了很不均匀的温度场,表层的温度变化梯度更大。而且,温度场随着火灾时间的延续而不断变化。决定构件温度场的主要因素是火灾的温度-时间过程,以及构件的形状,尺寸和混凝土材料的热工性能等;而结构的内力状态,变形和细微裂缝等对其温度场的影响很小。反之,结构的温度场对结构的内力,变形和承

承载力等产生很大的影响和变化。所以,对结构的温度场分析可以独立于,也必须先于结构的内力和变形分析。

1.2材料性能的严重恶化。高温下,混凝土的强度值和弹性模量值锐减,变形猛增。混凝土还相继出现开裂,酥松和边角崩裂等外观损伤现象,且随温度的升高而渐趋严重。这是混凝土结构和构件的高温承载力与耐火极限严重下降的主要原因。

1.3应力-应变-温度-时间的耦合作用效应。分析一般结构的常温性能时,只需有材料的应力-应变关系即可。但是,高温结构的温度值和持续时间对于材料的强度和变形值有很大影响。而且,不同的升温加载途径又有各异的材料变形和强度值,构成了混凝土材料的应力-应变-温度-时间四者的耦合效应^[3],必须建立相应的高温-力学本构关系,才能准确地分析结构的高温性能。

1.4构件截面应力和结构内力的重分布。构件截面的不均匀温度场必然产生不等的温度变形和截面应力重分布。超静定结构的高温区部分因为温度变形受到支座和节点的约束,以及相邻的非高温构件的约束,必然产生激烈的内力(弯矩,剪力,轴力)重分布;而且随着温度的变化和时间的延续,会形成一个连续的内力重分布过程,最终出现与常温结构不同的破坏机构和形态,影响高温极限承载力^[4]。

文献中指出^[5]随着火烧所达到的最高温度的提高,自然冷却后的混凝土强度逐渐下降,其抗压强度与混凝土内部结构的物理化学变化有关。常温下C-S-H凝胶结构完整、密实,Ca(OH)₂结晶得非常整齐完整。在200℃以内,主要是混凝土内自由水的蒸发,这对整个结构外貌没有大的影响。400℃以后,C-S-H凝胶体开始脱水分解,此时排出的主要是层间水和化学结合水,Ca(OH)₂也少量分解,使得原本结晶完整的片层结构破坏,强度显著下降,裂缝产生。当温度超过400℃以后,Ca(OH)₂大量分解,生成游离氧化钙,冷却后又与水结合生成Ca(OH)₂,导致体积膨胀,裂缝增多,此时混凝土内部结构

松散,再加上灭火时浇水骤冷,致使混凝土内部结构进一步破坏,强度持续下降。当温度达到1000℃时,混凝土水泥浆体中已没有水泥的水化物,结构破碎^[6,7]。

文献^[6]中通过试验及理论分析,得出以下结论:(1)混凝土抗压强度在300℃内变化不大,400℃以后持续下降;抗拉强度随温度的升高而下降,400℃后下降剧烈。(2)高温作用后,混凝土抗压强度和抗拉强度的下降规律不同,抗拉强度损失高于抗压强度。随着温度的升高,抗压强度比减小,在400℃~700℃间达到最小,故常温下拉压比的关系不再适合于高温情形。(3)冷却方式对混凝土的强度有很大的影响,浇水冷却比自然冷却混凝土强度有所降低。

2 高温下单轴压缩本构关系介绍

不同温度下混凝土的应力应变关系是高温下混凝土最重要的力学性能之一^[8],它使我们能更清楚的认识混凝土的高温性能,并为我们做防火设计和火灾损伤鉴定奠定理论基础。但由于混凝土材料组成太复杂,各地的材料存在差异,同时制作工艺过程中的人为影响因素等都使混凝土的力学性能存在差异,所以混凝土的应力应变曲线形式也各部相同,没有统一的方程。高温下混凝土的力学性能在原本多样性的基础上,又增加了温度的影响,这也使得混凝土的应力应变关系变得更加复杂。

混凝土的抗压力学性能随温度的变化已经有一些学者涉足,但是总体来说,高温后的研究居多,高温下的力学性能偏少。为了描述混凝土的这一力学过程,不少学者也提出了自己的本构关系。

T. T. Lie^[9]认为 450℃以内,混凝土棱柱体强度几乎没有下降,他给出的应力-应变曲线方程为:

$$\sigma = f_c^T \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_p^T - \varepsilon}{\varepsilon_p^T} \right)^2 \right] \quad \varepsilon \leq \varepsilon_p^T \quad (2-1)$$

$$\sigma = f_c^T \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_p^T - \varepsilon}{3\varepsilon_p^T} \right)^2 \right] \quad \varepsilon \leq \varepsilon_p^T \quad (2-2)$$

式中:

$$f_c^T = f_c \quad T \leq 450^\circ\text{C} \quad (2-3)$$

$$f_c^T = f_c [2.011 - 2.353 \left(\frac{T-20}{1000} \right)^3] \quad T > 450 \quad (2-4)$$

$$\varepsilon_p^T = 0.0025 + (6T + 0.04T^2) \times 10^{-6} \quad (2-5)$$

我国也有一些学者都提出自己的应力应变方程,其中以清华大学过镇海^[10]等提出的应力应变方程为代表。他基于高温下混凝土的力学性能试验数据为基础,提出一般高温时混凝土的应力-应变曲线和常温时的应力-应变曲线可采用同一方程形式,并给出不同温度下混凝土的应力应变关系方程。

上升段:

$$y = 2.2x - 1.4x^2 + 0.2x^3 \quad x \leq 1 \quad (2-6)$$

下降段:

$$y = \frac{x}{0.8(x-1)^2 + x} \quad x \geq 1 \quad (2-7)$$

式中:

$$X = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p^T}, \quad Y = \frac{\sigma}{f_c^T} \quad (2-8)$$

f_c^T ——温度T时混凝土的棱柱体抗压强度和峰值应变,由下式求出:

$$f_c^T = \frac{f_c}{1 + 2.4(T-20)^6 \times 10^{-17}} \quad (2-9)$$

$$\varepsilon_p^T = (1 + 0.0015T + 5 \times 10^6 T^2) \varepsilon_p \quad (2-10)$$

该方程将应力应变曲线分成上升段和下降段分别进行描述。结果表明该模型能够很好地反应混凝土应力应变关系,现为我国混凝土设计规范采用。

3 本构方程

根据经典损伤理论,热力学势 Φ 是所有状态变量的凸函数^[11]。考虑损伤因子D和内变量q(D, q分别表征损伤和塑性的发展),并不计温度的影响时,由不可逆热力学可知

$$\Phi = \Phi(\varepsilon, D, q) \quad (3-1)$$

而混凝土的应变可以 ε 分解为两部分,即 $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$ (3-2)

式中 ε_e 为弹性应变, ε_p 为塑性应变。根据Lemaitre-Chabche损伤理论,可将 Φ 写成两部分之和^[12],即

$$\Phi = \Phi_e(\varepsilon_e, D) + \Phi_p(\varepsilon_p, q) \quad (3-3)$$

式中 Φ_e 为弹性部分, Φ_p 为由塑性应

变引起的不可逆部分。根据内变量定义, 内变量 q, D 之间应是相互独立的, 即在 Lemaitre-Chabche 损伤理论中损伤只表现在弹性项 Φ_e 上, 而认为 Φ_p 与 D 无关。无损伤材料的弹性自由能 Φ_e 可以由下式求得

$$\Phi_e(\epsilon_e) = 1/2\rho \cdot E_g \cdot \epsilon_e \quad (3-4)$$

ρ 为质量密度, E_g 为任意一点的割线模量。本文引入损伤参数 $D_{Eg} = 1 - \text{峰值割线模量}$ 。则损伤材料的自由能 Φ_e 可以写成:

$$\Phi_e(\epsilon_e) = 1/2\rho \epsilon_e E_{fg} \epsilon_e (1 - D_{Eg}) \quad (3-5)$$

于是根据热力学控制方程得^[13]:

$$\sigma = \rho \frac{\partial \Phi_e}{\partial \epsilon_e} (1 - D_{Eg}) E_{fg} \epsilon_e \quad (3-6)$$

由于混凝土是脆性材料, 其塑性应变一般都较小, 因而忽略塑性部分, 认为, 则该模型的基本形式为:

$$\sigma = (1 - D_{Eg}) E_{fg} \epsilon_e \quad (3-7)$$

4 损伤的演化规律

采用弹性应变描述混凝土损伤演化, 其概率密度服从 Weibull 分布, 即

$$\frac{dD_{Eg}}{d\epsilon_e} \psi(\epsilon_e) = \frac{n}{\alpha} (\epsilon_e - \gamma)^{n-1} \exp\left(-\frac{(\epsilon_e - \gamma)^n}{\alpha}\right) \quad (4-1)$$

式中 α, n, γ 分别为尺度参数、形状参数和位置参数, 这里位置参数 γ 相当于损伤门槛, 对于是否存在门槛值还存在争议, 因此本文认为材料的 $\gamma = 0$, 则有:

$$D_{Eg} = \int \psi(\epsilon_e) d\epsilon_e = -\exp\left(-\frac{\epsilon_e^n}{\alpha}\right) \quad (4-2)$$

根据(4-1), 定出积分上下限, 根据峰值应变点 ϵ_f 对应的损伤为 $D_{Eg} = 0$, 则有

$$\ln(1 - D_{Eg}) \Big|_0^{D_{Eg}} = -\frac{1}{\alpha} (\epsilon_e)^n \Big|_{\epsilon_f}^{\epsilon_e} \quad (4-3)$$

简化(4-3)可以得到

$$D_{Eg} = 1 - \exp\left(\frac{\epsilon_f^n - \epsilon_e^n}{\alpha}\right) \quad (4-4)$$

将(4-4)代入式(3-6), 有

$$\sigma = \exp\left(\frac{\epsilon_f^n - \epsilon_e^n}{\alpha}\right) E_{fg} \epsilon_e \quad (4-5)$$

式(4-5)为本文的损伤本构模型形

式。本文采用一个统一的方程描述混凝土压缩全过程的应力应变关系和损伤发展规律, 建立了的损伤本构模型的形式简单。

5 参数的确定

该本构模型中的参数 α 值可以根据单峰值条件^[14]

$$\begin{cases} \sigma_f = (1 - D_{Eg}) E_0 \epsilon_f \\ \frac{d\sigma}{d\epsilon} \Big|_{\epsilon = \epsilon_f} = 0 \end{cases}$$

$$\text{得到: } \alpha = n \epsilon_f^n \quad (5-1)$$

代(5-1)到(4-5), 模型将简化为:

$$\sigma = \exp\left(\frac{\epsilon_f^n - \epsilon_e^n}{n \epsilon_f^n}\right) \cdot \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} \cdot \epsilon_e \quad (5-2)$$

式(5-2)为本文给出的混凝土本构模型的最终表达式。该模型没有采用分段式描述混凝土的上升段和下降段, 而用一个方程描述混凝土压缩过程中的步的验证。

6 结论

研究混凝土材料高温力学特性对我国建筑业的蓬勃发展有很重要的意义。本文在国内外混凝土抗火研究成果的基础上, 对混凝土材料的高温力学性能进行了理论研究, 以经典损伤理论模型为基础, 结合混凝土宏观高温力学特性, 构建了一个统一方程来描述混凝土在高温时的受压损伤全过程。方程简单, 能很好的应用于混凝土本构关系的研究中。

在高温力学性能上, 尽管已经有不少学者进行了研究, 但是对于混凝土这样的多相材料来说, 其离散性大, 个人试验结果差异大, 适合工程应用的高精度高温本构模型很少, 对其高温下力学性能的认识也还很不成熟。高温下混凝土动态试验技术研究也还存在一些缺陷, 如何精确的加工混凝土试件; 如何实现快速加热混凝土的精确控制; 在试验中, 如何使混凝土试件更好的满足一维假定, 并提供一种非常方便的计算分析方式等, 这些都需要进一步的发展和更多学者的投入。只有在充分认清混凝土在各种条件下的力学性能后, 才能更加广泛的应用这种已经利用广泛的建筑材料。

[参考文献]

[1]李卫, 过镇海. 高温下混凝土的强度和变性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 1993(13):8-16.

[2]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.

[3]南建林, 过镇海, 时旭东. 混凝土的温度-应力耦合本构关系[J]. 清华大学学报, 1997(6):39-53.

[4]曹蓓蓓, 梁志刚. 温条件下混凝土结构与性能的变化[J]. 国外建材技, 2004, 25(6):17-21.

[5]时旭东, 过镇海. 不同混凝土保护层厚度钢筋混凝土梁的耐火性能[J]. 工业建筑, 1996(9):12-14.

[6]徐志胜. 高温作用后混凝土强度试验研究[J]. 混凝土, 2000(2):44-45.

[7]徐志胜, 朱玛. 高温作用后混凝土强度与变形试验研究[J]. 长沙铁道学院学报, 2000(2):13-16.

[8]陈丽红. 不同温度作用后混凝土强度变化规律的研究[J]. 四川建筑科学研究, 2007(5):118-121.

[9]T.T.Lie. A Procedure to Calculate Fire Resistance of Structural Members, International Seminar of Three Decades of Structural Fire Safety, 22/23, February 1983, pp.139-153.

[10]李卫, 过镇海. 高温下混凝土的强度和变形性能的实验研究[D]. 北京清华大学土木工程系, 1994:3.

[11]陈惠发, A.F. 萨里普. 混凝土和土的本构方程[M]. 中国建筑工业出版社, 2004.

[12]贾艳东, 田傲霜, 张斌等. 不同时间高温后混凝土性能的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006(6):864-866.

[13]陈磊, 李彬, 滕桃居等. 混凝土高温力学性能分析[J]. 混凝土, 2003(7):26-28.

[14]逢靖华, 陆洲导, 袁廷朋. 混凝土高温试验及高温后抗压残余强度研究[J]. 四川建筑科学研究, 2007(6):71-78.

作者简介:

李博(1988--), 男, 汉族, 湖南邵阳人, 本科, 新疆伊犁河流域开发建设管理局, 工程师, 从事工作: 水利工程建设管理。