

# 钢筋混凝土受压构件高温性能的有限元分析

刘利先, 刘铮, 王海莹

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 用 ANSYS 软件对钢筋混凝土受压构件的高温受力性能进行有限元分析, 并与实测值进行对比. 分析结果表明, 轴心受压构件或小偏压构件理论分析值与实测值吻合较好, 表明 ANSYS 作为一个理想的有限元分析软件, 可以应用于结构高温受力分析.

**关键词:** 有限元分析; 耦合; 钢筋混凝土; ANSYS

**中图分类号:** TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2005)05-0069-04

## Finite Element Analysis of Compressed Reinforced Concrete Members

LIU Li-xian, LIU Zheng, WANG Hai-ying

(Faculty of Civil and Architecture Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

**Abstract:** The general computation program (ANSYS) is utilized to make finite element analysis on the mechanical behavior of compressed reinforced concrete members under high temperature. The calculation results are in good agreement with the results of the experimental ones, which shows that ANSYS is a reliable and efficient software for analyzing the mechanical behavior of structures under high temperature.

**Key words:** finite element analysis; coupling; reinforced concrete; ANSYS

### 1 耦合场基本理论

ANSYS 系统定义的耦合场分析是指考虑两个或多个工程物理场之间相互作用的分析, 如考虑温度场与应力场共同作用的热-应力分析等. 高温下钢筋混凝土构件受到温度场和应力场的共同作用, 且材料力学性能还随温度而发生改变, 构成了应力-应变-温度-时间的耦合本构关系, 因此须用耦合场的理论和方法来分析其受力性能.

根据所耦合物理场相互关系的不同, ANSYS 将耦合场分析方法分为顺序耦合和直接耦合两大类, 钢筋混凝土构件的高温受力性能的理论研究应采用顺序耦合方法. 在钢筋混凝土结构高温受力分析中, 温度变化将导致材料性能发生改变, 但截面应力场的变化对温度场影响很小, 可以认为外加荷载不影响截面温度场, 属于单向耦合问题.

ANSYS 程序使用物理环境的概念对荷载进行顺序耦合分析, 每一物理场对应于唯一的物理环境, 它是一个包含所有操作参数及其分析选项, 以及与之相对应的结构模型特征的一个文件.

### 2 计算单元类型的选取

ANSYS 系统提供的单元类型是针对具体的物理分析过程来设计的, 在多种物理场中进行顺序耦合从前一个物理场转向后一个物理场时, 需要将单元类型进行转换, 这种转换必须考虑单元类型的兼容性. 混凝土在热分析过程中适合采用 4 结点 6 面体单元 SOLID70, 在结构分析中则可采用 8 结点 4 面体单元 SOLID65; 钢筋在热分析过程中可采用二结点单元 LINK33, 而在结构分析中则采用 LINK8 单元, 这些单元类型相互兼容.

收稿日期: 2004-10-14. 基金项目: 云南省教育厅项目资助(项目编号: 2003Y246D).

第一作者简介: 刘利先(1971~), 女, 讲师. 主要研究方向: 钢筋混凝土结构抗火. E-mail: km200410@163.com

2.1 8 结点 4 边形混凝土单元 SOLID65 的性质

1) 本构关系. 分析的对象为小偏心受压构, 在承受荷载的过程中混凝土终处于一维应力状态, 因此可用单轴线弹性—线性硬化—断裂模型, 所需的参数仅为: 单轴受压屈服强度  $f_{cy}$ , 初始弹性模量  $E_c$ , 单轴受压破坏强度  $f_c$ , 极限压应变  $\epsilon_u$ .

$$\sigma = E\varepsilon \tag{1}$$

塑性阶段的线性硬化模型与混凝土实际的单轴曲线差异较大, 可以修改为非线性模型, ANSYS 支持多项式形式的硬化标准

$$\sigma = a_0 + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon_2 + a_3\varepsilon_3 \tag{2}$$

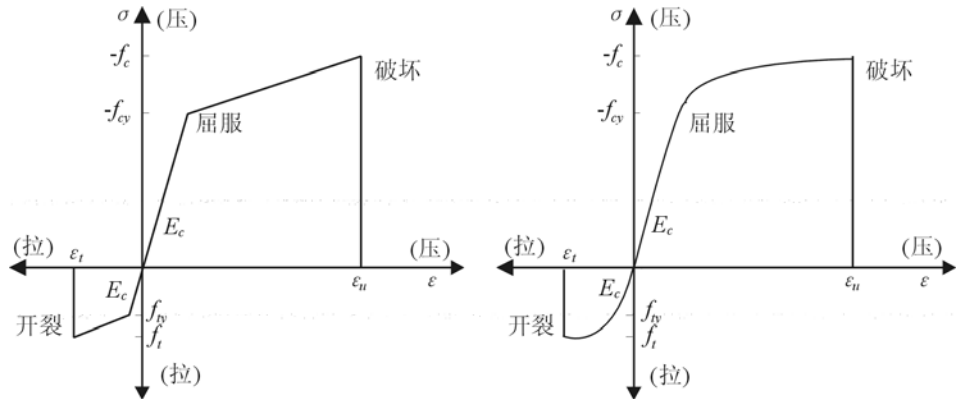
应力应变曲线关系函数式在屈服点和破坏点应分别满足函数连续和一阶微分连续的条件, 因此

$$\sigma = f_{cy} \text{ 时, } \begin{cases} \varepsilon = \frac{f_{cy}}{E_c} \\ \sigma = f_{cy} \end{cases} \quad \begin{cases} \varepsilon = \frac{f_{cy}}{E_c} \\ \sigma' = E_c \end{cases} \tag{3}$$

$$\sigma = f_c \text{ 时, } \begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_u \\ \sigma = f_c \end{cases} \quad \begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_u \\ \sigma' = 0 \end{cases} \tag{4}$$

式(3), (4) 代入式(2) 中, 即可确定参数  $a_0, a_1, a_2$  和  $a_3$  的取值并可绘出常温下单轴  $\sigma - \varepsilon$  关系曲线(图1).

2) 高温时和降温后的线弹性—硬化塑性—断裂(压碎)模型. 混凝土在高温作用下的材料性能不仅与高温温度、高温持续时间有关, 且不同的升温—加载(应力)途径又有相异的



(a)线弹性—线性硬化塑性—断裂 (b)线弹性—非线性硬化塑性—断裂

图1 常温下单轴  $\sigma - \varepsilon$  关系

Fig.1  $\sigma - \varepsilon$  Single axis relationship at room temperature

的材料变形和强度值<sup>[1]</sup>, 构成了材料的  $\sigma - \varepsilon - T - t$  四者的耦合本构关系, 增大了对高温结构分析的难度.

论文的研究对象均先加温后加载, 混凝土高温性能曲线采用文献[2] 的结论; 混凝土在降温后的材性采用文献[3] 的结论; 降温后混凝土初始弹模取值与高温时相同; 混凝土在升温1 h 并恒温2 h 后的材性相关参数目前尚无资料给出其具体取值, 仍采用升温1 h 测得的试验结果, 即这两种工况的混凝土采用相同的本构关系.

高温时和降温后的单轴应力—应变曲线形式与常温时相同<sup>[1]</sup>, 只需将参数改成与温度相关即可. 两种温度工况下线弹性—硬化塑性—断裂模型各参数与温度的关系式分别列表1 所示.

表1 两种温度工况下各参数的取值

Tab.1 Different parameters values at the two temperatures

参数	高温时		降温后	
	线性硬化	非线性硬化	线性硬化	非线性硬化
$f'_c/f_c$	$1/(1 + 2.4(T - 20)^6 \times 10^{-17})$		$1/(1 + 2.212(T - 20)^{3.27} \times 10^{-9})$	
$\varepsilon'_u/\varepsilon_p$	$(1 + (0.09 + 0.046(T - 20)/100) \times (T - 20)/100)$		$(0.963 + 1.581 \times 10^{-3}T + 1.305 \times 10^{-5}T^2)$	
$E'_c/E_c$	$0.83 - 0.0011T$			

注: 高温时公式均取自文献[4], 降温后取自文献[3].

3) 破坏准则. 混凝土处

于一维应力状态, 即破坏包络面退化为应力轴上的一个破坏点, 初始屈服包络面退化为应力轴上的一个屈服点, 当混凝土应力达到屈服强度时即认为进入塑性发展阶段, 当应力达到破坏强度时压坏. 单轴屈服强度和破坏强度在前面“线弹性—硬化塑性—断裂”本构关系中已经定义, 故不需另确立其破坏准则.

2.2 LINK8 单元的性质

LINK8 单元的常温本构关系为经典的理想线弹性—塑性—断裂模型, 其单轴应力应变曲线需要3 个

参数: 屈服强度  $f_y$ , 弹性模量  $E$  和极限应变  $\epsilon_u$ .

高温时本构关系与常温相似, 其屈服强度( $f_y^T$ ) 极限均应变( $\epsilon_u^T$ ) 取为温度相关的函数, 表达式为

$$\frac{f_y^T}{f_y} = 0.91 / (1 + 3.6(T - 20)^6 \times 10^{-17}) \tag{5}$$

$$\epsilon_u^T = 0.192 - 0.00029 \times (T - 20) \quad 200^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C}$$

$$\epsilon_u^T = 0.023 \quad 600^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \tag{6}$$

### 3 模型网格划分

由于构件几何形状简单, 钢筋分布均匀, 混凝土单元的形状选为立方体, 沿构件边长方向等长度划分网格, 当混凝土网格划分完成后, 以混凝土单元的交 (SOLID65 单元的棱边) 为其轴线的钢筋 LINK8 单元的网格即被确定: 其轴线上单元网格与相邻的混凝土单元网格一致, LINK8 单元的结点与混凝土单元的结点重合.

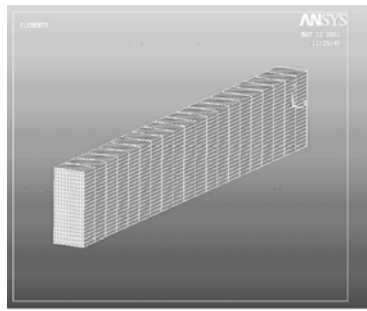


图2 柱混凝土网格(20×10×20)

Fig.2 Column concrete grid

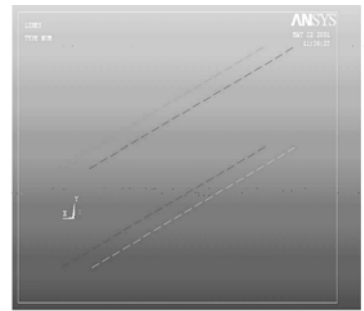


图3 钢筋网格(4×20)

Fig.3 Reinforcing steel bar grid

### 4 有限元分析结果

有限元分析的算例为 3 种温度工况的轴心受压柱  $H_0, L_0$  和  $P_0$ , 以及初始偏心距  $e_0 = 0.2 h$  的压弯柱  $H_2, L_2$  和  $P_2$ . H 表示试件升温至  $800^\circ\text{C}$ , 恒温 10 min 后加载; P 表示试件升温至  $800^\circ\text{C}$ , 恒温 2 h 后加载; L 表示试件升温至  $800^\circ\text{C}$ , 恒温 10 min 后自然冷却到常温再加载.

#### 4.1 弹性分析

图 4 为  $e_0 = 0$  时沿轴向施加  $F = 10 \text{ kN}$  的荷载时跨中截面沿几何形心轴上的应力分布曲线, 由于荷载

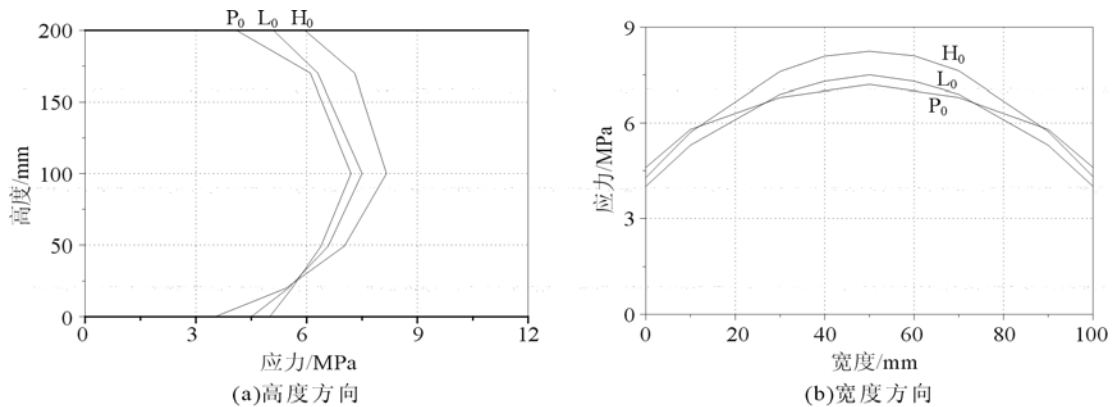


图4 轴心受压柱形心轴上应力分布曲线

Fig.4 Stress distribution curve of axially compressed columns

值较小, 可假设混凝土仍处于弹性阶段, 截面应变的分布规律仍满足平截面假定, 但截面混凝土在非均匀温度作用下呈现出非均匀的材料场, 截面的变形中心偏离几何形心, 故高温时的应变分布与常温下的轴心加载构件的等应变不同, 呈梯形状. 应变沿高度方向分布为上小下大, 故上半段应力至上而下先逐渐增大, 由于截面上端处于非受火面, 温度较低, 而底面直接受热温度较高, 故下半段应力沿高度方向逐渐减小, 与应变正好相反. 截面上相同高度处应变大小相同而温度分布为中间低端面高, 故应力分布为中间大两端小, 形状呈开口向下的抛物线. 因为所受荷载大小相同, 故不同温度工况下截面应力分布的差异不大, 高度方向应力曲线割线斜率的大小顺序为: 高温时, 降温后, 恒温 2 h 后.

图 5 为初始偏心距  $e_0 = 0.2 h$  (作用于未受火一侧), 荷载  $F = 10 \text{ kN}$  时跨中截面沿几何形心轴的应力

分布曲线,仍假设混凝土处于弹性阶段,截面应变的分布规律仍满足平截面假定,经分析可知,截面的几何中心靠近0.2h,故沿高度方向梯形应变分布为上大下小,应力沿高度方向从上到下逐渐减小,上下端应力差大于轴压柱.截面上相同高度处应力分布仍为中间大两端小的开口向下的抛物线.高度方向应力曲线割线斜率的大小顺序为:高温时,降温后,恒温2h后.

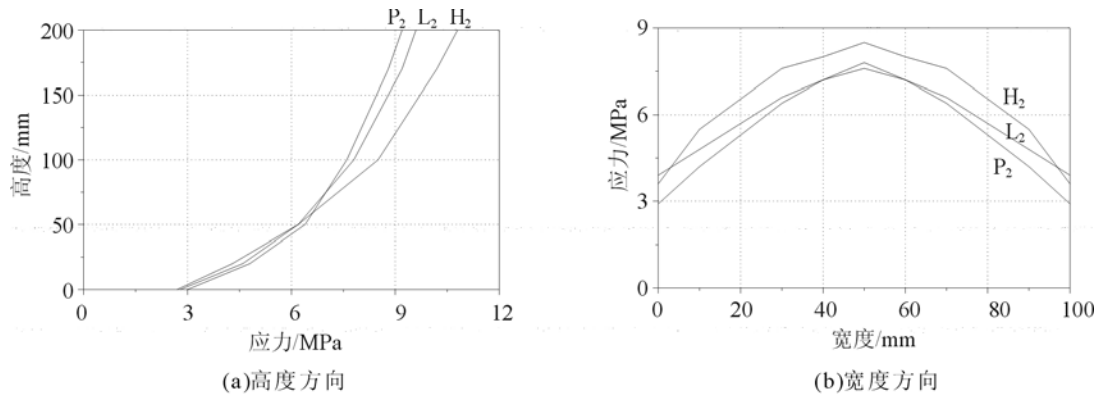


图5 偏心受压 $e_0=0.2h$ 应力分布曲线

Fig.5 Stress distribution curve of eccentrically compressed columns

#### 4.2 荷载—挠度曲线

图6~7为轴心受压柱和偏心受压柱的荷载—挠度曲线,其中实线为计算曲线,虚线为实测曲线.由于计算时采用的混凝土本构关系为弹性—硬化塑性—断裂模型,混凝土应力达到强度时即发生破坏,故构件荷载—挠度曲线只能得到上升段,无下降段.由图观察可知,实线和虚线的变化规律相同,相差不大,表明理论计算值和实测结果符合相当好.各状态下的曲线有一相同规律,即破坏点处的荷载计算值均大于实测值,而挠度的计算值则小于实测值.

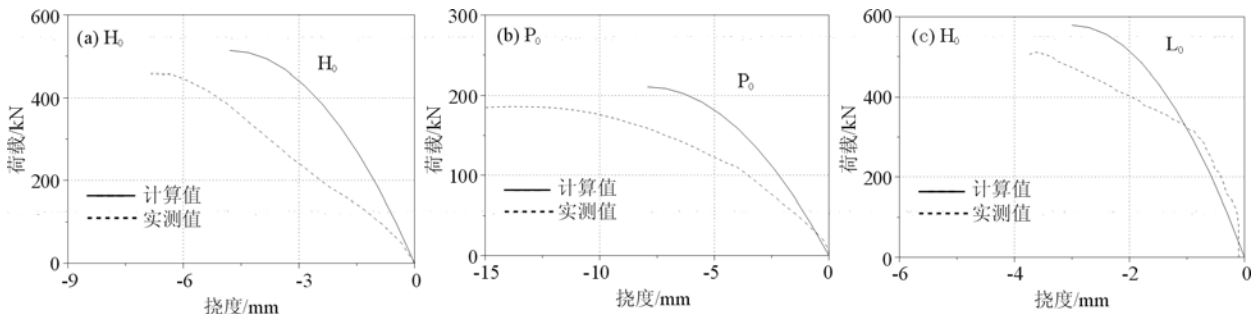


图6 轴压柱荷载挠度关系曲线

Fig.6 Load-flexibility relationship curve of axially compressed columns

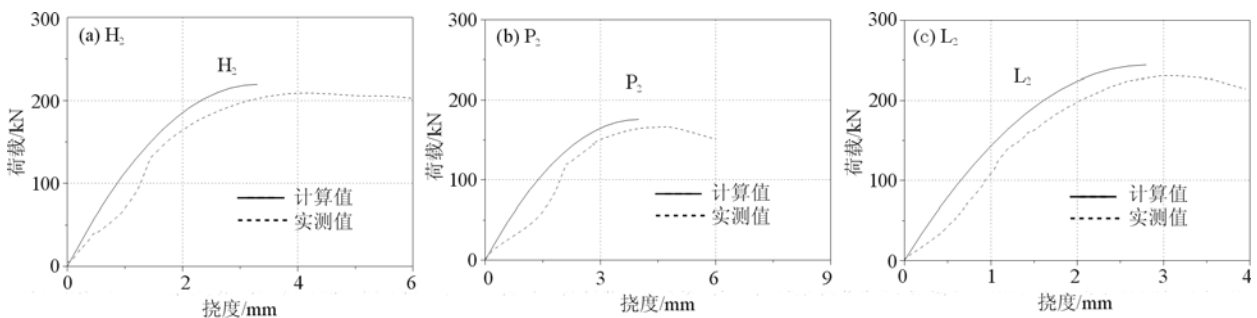


图7 偏心柱 $e_0=0.2h$ 荷载—挠度关系曲线

Fig.7 Load-flexibility relationship curve of eccentrically compressed columns

用而沉降;另外,在非稳定渗流的作用下,下伏尾矿砂粗颗粒间的空隙被上覆尾矿砂中的微细颗粒所充填,这将不利于下伏尾矿砂土的重力固结作用的发挥。

#### 4 结束语

上游法尾矿堆积坝,堆积尾矿砂土除在其上覆堆积重力作用下密实而固结沉降外,由于其排放尾矿液的独特工艺,使得在干滩面和泥滩面表层的尾矿砂土体中形成非稳定渗流,从而使尾矿砂土处于非饱和、饱和频繁交替环境之中,并使尾矿砂土产生淋滤固结作用。每次向干滩面排放尾矿液时,尾矿液淋滤干滩面和泥滩面表层的尾矿砂土,使其浸润至饱和,尾矿砂土颗粒间的毛细吸力逐渐消失,尾矿砂土体膨胀回弹,浸润完全饱和后,尾矿砂土体膨胀回弹结束,饱和区内已形成渗流,在渗透力作用下粗颗粒接触面间的部分微细颗粒被渗流挟走进空隙中。当停止排放尾矿液后,被饱和的尾矿砂土由饱和逐渐过渡到非饱和状态,尾矿砂土颗粒间的毛细吸力逐渐恢复,在毛细吸力及其自重的共同作用下粗颗粒更加进一步靠近些,从而使尾矿砂土更密实而固结。

上游法尾矿堆积坝,一般均存在淋滤固结作用,并对尾矿堆积坝的稳定性是有益的。

#### 参考文献:

- [1] 曹净. 攀钢马家田尾矿堆积环境及其特性研究[J]. 中国矿业, 2003,12(6):4~7.
- [2] 孔丽丽,陈守义. 武山尾矿坝无纺土工织物滤层化学淤堵问题初探[J]. 岩土工程学报, 1999,21(4):444~449.
- [3] 曹净,龚宪伟,李鸿翔,等. 攀钢马家田尾矿化学固结机理初探[J]. 桂林工学院学报, 2000,20(2):147~150.
- [4] 郝建英,雍岐龙,赵希英,等. 无机胶粘岩土的抗渗性能研究[J]. 昆明理工大学学报,2004,29(1):93~96.

(上接第77页)

#### 5 结论

研究计算了轴心受压柱和小偏心柱两种情况,不考虑钢筋和混凝土之间的粘结作用. 利用 ANSYS 处理大偏压柱的有限元计算问题还需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及计算[M]. 北京:清华大学出版社, 2003. 336~354.
- [2] 李卫,过镇海. 高温下混凝土的强度和变形性能试验研究[J]. 建筑结构学 1993,14(1):8~16.
- [3] 刘利先. 增大截面法加固高温损伤钢筋混凝土柱受力性能的试验研究:[硕士学位论文][D]. 北京:清华大学,2002. 14~18.
- [4] 吕彤光. 高温下钢筋的强度及变形试验研究:[硕士学位论文][D]. 北京:清华大学,1996. 20~22.