

建立在应变空间上的混凝土四参数破坏准则

韦 未, 李同春, 姚纬明

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 提出了建立在应变空间上的混凝土四参数破坏准则, 从而消除了 Hooke 定律假设和平面应力假设对有限元分析计算的影响. 结合损伤模型, 通过算例计算并与应力空间其他准则相比较, 验证了该准则的合理性和可行性. 该准则的特点是形式简单, 不仅能正确反映混凝土单轴应力状态下的强度, 而且能很好地反映多轴应力状态下混凝土的强度.

关键词 混凝土 应变空间 四参数破坏准则 损伤模型

中图分类号 :TU528.1

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2004)05-0027-03

混凝土破坏准则一直是混凝土非线性分析的重要内容之一, 对于在多轴应力下的破坏准则, 各国学者已先后提出不下 20 种^[1~3]. 20 世纪 70 年代以来, 世界各国学者提出过众多的混凝土强度理论, 并得到广泛的应用. 但在已有破坏准则中, 绝大多数是在应力空间描述的. 在有限元分析中, 应力是通过应变转化而得到的, 从应变转化到应力的过程中, 包含了诸如平面应力假设和 Hooke 定律等基本假设, 而这些假设并不总能反映混凝土的特性. 为此, 有学者提出不带假设的直接建立在应变空间的混凝土破坏准则.

建立在应变空间上的混凝土破坏准则最早是由 20 世纪五六十年代的 Drucker^[4] 和 Il'yushin^[5] 提出. 到目前为止, 已经有很多建立在应变空间上的混凝土破坏准则^[6~8]. 最近, Pekau 等^[9] 在应变空间中推导了完整的塑性本构关系、初始破坏准则、加载条件、最终破坏准则. 在国内, 大连理工大学的宋玉普等^[10] 建立了相应于不同阶段的应变空间混凝土的破坏准则, 但在损伤本构模型中的应用很不方便. 张承柱等^[11] 在应变空间构造了 Drucker-Prager 型的屈服函数, 而该屈服函数主要用于判断岩土类材料的破坏. 陈进等^[12] 提出的基于应变空间的开裂准则, 通过求出各个主轴的等效单轴应变, 认为达到极限应变则混凝土开裂, 但在求解等效单轴应变时, 引进了 Hooke 定律假设和平面应力或平面应变的假定, 这显然违背了直接由应变计算得到破坏准则的初衷. 而本文建立在应变空间的四参数破坏准则形式比较简单, 其最大的特点是: 不仅能正确反映单轴

拉、压应力状态下混凝土的强度, 也可以反映多轴应力状态下混凝土的强度, 同时和损伤模型结合后还能方便地反映混凝土的软化特性.

1 建立在应变空间上的四参数破坏准则

本文参考 1979 年 Hsieh-Ting-Chen 四参数准则, 提出了一种新的建立在应变空间上的四参数破坏准则:

$$F(I_1', J_2', \epsilon_0) =$$

$$A(J_2'/\epsilon_0) + B\sqrt{J_2'} + C\epsilon_1 + DI_1' - \epsilon_0 = 0 \quad (1)$$

式中: I_1' 为应变张量第一不变量, $I_1' = \epsilon_{ii}$ ($i = 1, 2, 3$); J_2' 为应变偏量第二不变量, $J_2' = e_{ij}e_{ij}/2$ ($i, j = 1, 2, 3$); ϵ_1 为最大主应变, $\epsilon_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{J_2'} \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{1}{3}I_1'$, $\theta = \frac{1}{3} \arcsin\left(-\frac{3\sqrt{3}J_3'}{2\sqrt{J_2'}^3}\right)$, $|\theta| \leq 60^\circ$, 这里 J_3' 为应变偏量第三不变量, $J_3' = e_{ij}e_{jk}e_{ki}/3$ ($i, j, k = 1, 2, 3$).

由于混凝土的抗拉强度比抗压强度要小很多, 为此, 本文中的 ϵ_0 取为当材料达到压缩强度极限 f_c 时的应变, $\epsilon_0 = C_t f_c / E = f_t / E$ (其中 f_t 为材料抗拉强度, f_c 为材料的抗压强度, C_t 为材料的黏聚力系数, E 为材料的弹性模量). 而在文献[10]中的 ϵ_0 取的是单轴压缩时极限应力点的等效应变值. 文献[10]已从试验的角度证明了以曲线拟合得出极限强度破坏面的正确性, 笔者则将在以下的算例中证明本文提出的四参数准则的合理性和正确性.

A, B, C, D 4 个参数可以由 4 组强度试验数据

来确定. 由于试件材料的差别, 并且由于试验方法和试验设备的不同, 对于多轴应力的试验结果离散性较大, 为了能和文献[13]中的各种破坏准则进行比较, 需要采取文献[13]中的统一的特征强度值来计算各式中的参数, 即:

单轴拉伸:

$$\epsilon_1 = 0.1 \frac{f_c}{E}, \epsilon_2 = -\mu \frac{0.1 f_c}{E}, \epsilon_3 = -\mu \frac{0.1 f_c}{E} \tag{2}$$

单轴压缩:

$$\epsilon_1 = -\frac{f_c}{E}, \epsilon_2 = \mu \frac{f_c}{E}, \epsilon_3 = \mu \frac{f_c}{E} \tag{3}$$

双轴等压:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu \\ -\mu & 1 & -\mu \\ -\mu & -\mu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -1.28 f_c \\ -1.28 f_c \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{4}$$

三轴压缩:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu \\ -\mu & 1 & -\mu \\ -\mu & -\mu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{2.7}{\sqrt{2}} f_c - 4 f_c \\ \frac{2.7}{\sqrt{2}} f_c - 4 f_c \\ -2.7 \sqrt{2} f_c - 4 f_c \end{Bmatrix} \tag{5}$$

2 算 例

本文对 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的立方体试件进行了有限元分析计算, 各材料参数分别为: 弹性模量 $E = 30\,000\text{ MPa}$ 抗压强度 $f_c = 30\text{ MPa}$; $C_t = 0.1$ 泊松比 $\mu = 0.167$. 由以上数据求得的四参数分别为: $A = 1.3019574 \times 10^{-2}$, $B = 0.1175510$, $C = 0.7510884$, $D = 0.2459413$.

本文采用文献[14]中的损伤本构模型以及混凝土单向受拉的应力应变曲线, 利用等效单轴应力应变关系求应力的方法, 计算出各种应力组合下的峰值强度. 单轴应力状态下的应力应变曲线如图 1、图 2 所示. 图 3~7 分别为双轴应力状态下的强度包络图及三轴应力状态下的拉压子午线.

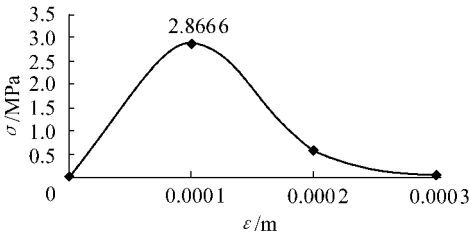


图 1 单轴拉伸应力应变曲线

从图 1、图 2 可知, 在单轴应力状态下, 本文提出的破坏准则计算所得的单轴抗拉强度 $f_t = 0.095\,05 f_c$, 单轴抗压强度 $f_c = 1.0 f_c$, 显然是比较合理的.

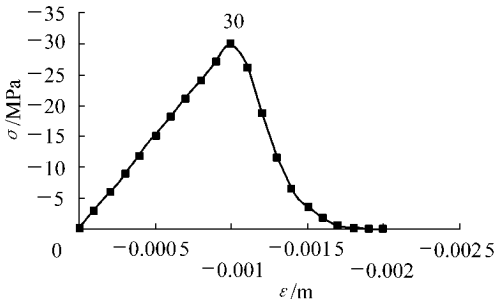


图 2 单轴压缩应力应变曲线

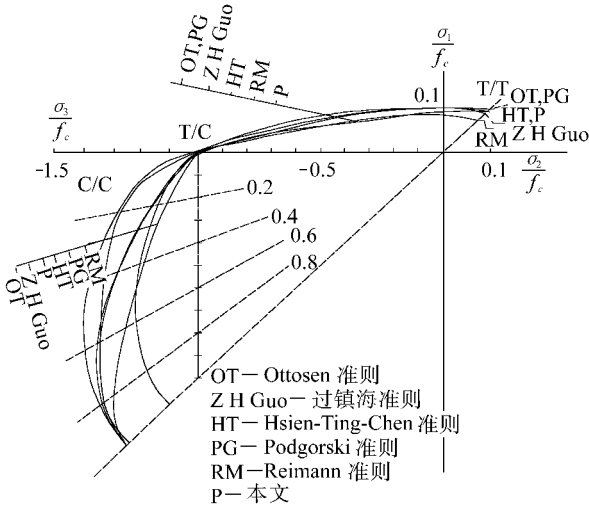


图 3 双轴应力状态下各破坏准则的比较

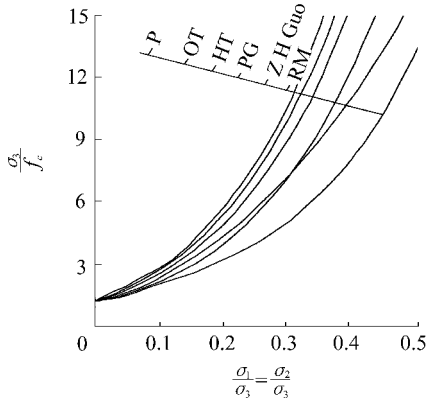


图 4 三轴受压状态下拉子午线的比较

从双轴应力状态的破坏包络线(图 3)的比较, 以及三轴受压(图 4、图 5)和三轴拉压的子午线(图 6、图 7)的比较, 可知本文提出的准则与应力空间的其他破坏准则具有很好的一致性, 能反映混凝土多轴应力状态下的强度.

3 结 论

本文提出了建立在应变空间的四参数破坏准则, 并结合损伤本构模型, 利用等效单轴应力应变关

土单轴拉压应力状态下的强度,而且能很好地反映多轴应力状态下的强度,因此在理论上是可行的.

参考文献：

- [1] Bangsh M Y H. Concrete and concrete structures numerical modeling and application [M]. London :Elsecier Applied Science,1989.1 ~ 220.
- [2] 董哲仁. 混凝土非线性有限元原理与应用 [M]. 北京 :铁道出版社,1993.1 ~ 345.
- [3] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析 [M]. 西安 :陕西科学技术出版社,1994.1 ~ 4.
- [4] Drucker D C. Some implications of work hardening and ideal plasticity [J]. Q Appl Math,1950,7(4) :411 ~ 418.
- [5] Il'yushin A A. On the postulate of plasticity [J]. Prikl Mat Mech,1961,25(3) :503 ~ 503.
- [6] Yoder P J,Iwan W D. On the formulation of strain-space plasticity with multiple loading surfaces [J]. J Appl Mech Trans, ASME,1981, 48(4) :773 ~ 778.
- [7] Casey J,Naghdi P M. On the nonequivalence of the stress-space and strain-space formulations of plasticity [J]. J Appl Mech Trans, ASME, 1983,50(2) :350 ~ 354.
- [8] Han D J, Chen W F. Strain-space plasticity formulation for hardening-softening materials with elastoplastic coupling [J]. Int J Solids Strut, 1986,22(8) :935 ~ 950.
- [9] Pekau O A, Zhang Z X, Liu G T. Constitutive model for concrete in strain space [J]. J Eng Mech, 1992, 118(9) :1907 ~ 1927.
- [10] 宋玉普,赵国藩. 应变空间混凝土的破坏准则 [J]. 大连理工大学学报,1991,31(4) :455 ~ 461.
- [11] 张承柱,刘信声. 应变空间表述的混凝土弹塑性耦合本构模型 [J]. 清华大学学报(自然科学版),1996,36(3) :59 ~ 64.
- [12] 陈进,黄薇,段云岭. 孔口结构混凝土的开裂准则 [J]. 长江科学院院报,2001,18(3) :17 ~ 20.
- [13] 清华大学抗震抗爆工程研究室. 混凝土力学性能的试验研究 [M]. 北京 :清华大学出版社,1996.1 ~ 267.
- [14] Faouzi G, Rene T. Nonlinear behavior of concrete dams using damage mechanics [J]. J Eng Mech, 1995,121(4) :513 ~ 527.

(收稿日期 2003-11-17 编辑 骆超)

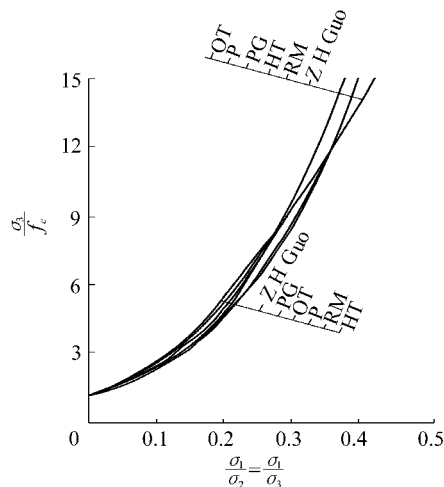


图 5 三轴受压状态下压子午线的比较

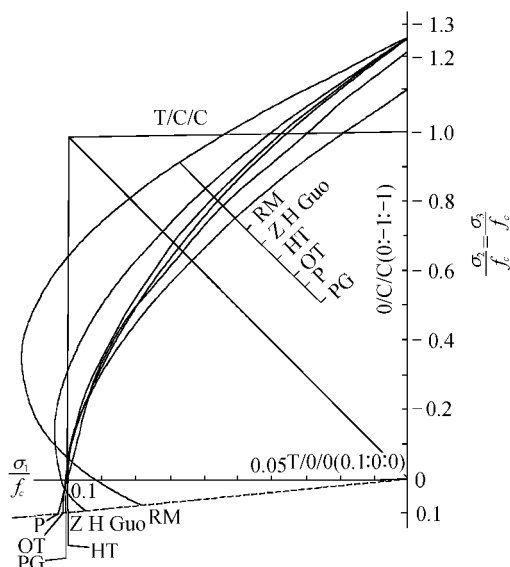


图 6 三轴拉压状态下拉子午线的比较

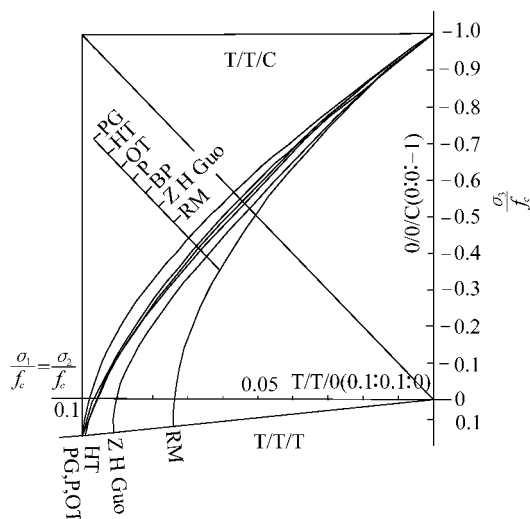


图 7 三轴拉压状态下压子午线的比较

系求应力的方法,不仅可以模拟混凝土受力的全过程,并且经计算可知,该破坏准则与应力空间已有的破坏准则具有很好的一致性,不仅能正确反映混凝土