

考虑不同破坏模式的二维混凝土本构模型

陆新征 江见鲸

(清华大学)

摘要 本文提出了一种可以考虑不同破坏模式的二维混凝土本构模型。该模型将混凝土按不同应力组合进行分区,按分区设定加卸载力学行为和非线性指标,可以较好地模拟混凝土在非比例加载情况下的力学行为。模型中除常见的固定裂缝模型(FCM)外,还可以选择使用转动裂缝模型(RCM),从而可以分析较复杂的混凝土开裂行为。本文还介绍了利用有限元软件MSC.MARC的二次开发功能将该模型嵌入MARC的方法。并用算例说明了本模型在解决一些复杂问题上的优势。

关键词 混凝土 本构关系 非线性有限元分析 二次开发

中图分类号: TU31 **文献标识码**: A

文章编号: 1000-131X(2003)11-0070-05

CONSTITUTIVE MODELS FOR CONCRETE WITH VARIOUS FAILURE TYPES

Lu Xinzhen Jiang Jianjing

(Tsinghua University)

Abstract

A constitutive model for concrete considered different failure modes is proposed in this paper. It is found that the failure modes of concrete can be divided into several zones according to the principal strain ratio. It is obvious that the loading or unloading behaviors and nonlinear indexes are assigned to various zones. It must be noticed that the behavior of concrete under disproportionate loading can be simulated well. Both fixed crack model and rotating crack model can be considered in the model for the complex fracture of concrete. It is also introduced to that the model is embedded into the software of MSC.MARC. An example is shown that the model is feasible for some complex problems.

Keywords: concrete, constitutive relationship, nonlinear finite element analysis, secondary development

1 引言

混凝土是一种拉压性能差异显著的材料,且在加载、卸载等不同应力路径下,同一应力水平也会有不同的应变量。针对混凝土这些特点,本文提出了一个综合的二维混凝土本构模型。该模型将混凝土在不同应力组合下的破坏模式进行分区,按分区设定其加卸载力学行为及非线性指标,从而可以较好地模拟混凝土在非比例加载情况下的力学行为。作者根据该本构模型编制了计算程序RCFER2002,并将其嵌入大型有限元程序MSC.MARC中,解决了一些现有有限元程序难以分析的混凝土复杂力学行为。

2 本构模型

2.1 强度准则

本模型使用的破坏准则是简化的李-过和

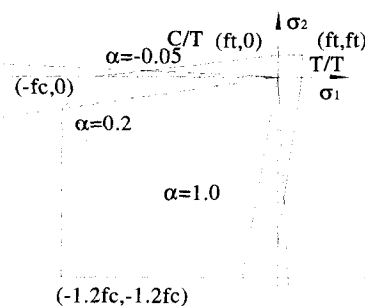


图1 二轴破坏准则

Fig.1 Biaxial failure criterion

收稿日期: 2003-05
国家自然科学基金资助项目(50278047)

Tasuji-Slate-Nilson 二轴破坏准则^[1], 其形状如图 1 所示, $\alpha = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ 。根据主应力 σ_1 和 σ_2 的大小, 将破坏曲面分成 5 个区, 如表 1 所示。这样, 将混凝土的二轴破坏准则分为 3 种破坏形式, 5 种应力组合分区, 使程序物理意义明确, 计算结果清晰。

表 1 破坏曲面分区
Table 1 Zoning of failure surface

分区	σ_1	σ_2	$\alpha = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$	破坏形态
1	<0	<0	>0.2	双压片状压坏
2	<0	<0	<0.2	单压柱状压坏
3	>0	<0	>-0.05	单压柱状压坏
4	>0	<0	<-0.05	拉坏
5	>0	>0		·拉坏

2.2 等效单轴应力应变关系

混凝土的等效受压应力应变关系的骨架线使用 Saenz 公式^[2]:

$$E_t = \frac{\left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right)^2 \right] E_0}{\left[1 + \left(\frac{E_0}{E_s} - 2 \right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right) + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \right)^2 \right]^2} \quad (1)$$

这里 E_t 为切线模量, ε 为等效单向应变, ε_f 为等效单向峰值压应变。 E_0 为初始弹性模量, E_s 为峰值点割线弹性模量。

卸载刚度 $E_u = \gamma \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} < E_0$, σ_i, ε_i 为此时的等效单向压应力, 等效单向压应变。 γ 为系数, 我们通过数值试验建议取 2.0~3.5。

受拉应力应变关系采用江见鲸^[2]建议公式

$$\sigma = f_t e^{-a_1(\varepsilon - \varepsilon_{cr})} \quad (2)$$

f_t 为混凝土抗压强度, ε_{cr} 为混凝土开裂应变, a_1 为系数, 与混凝土的断裂能相关。江见鲸^[3]建议, $a_1 = \left(\frac{f_t}{G_f} \right) l_c$, 这里 G_f 为混凝土断裂能, l_c 为试件特征

尺寸。在不知道 G_f 的情况下, 根据我们数值试验的结果, a_1 可以取 3000~50000 之间, 一般建议用 $a_1 = 4000$ 试算。

2.3 裂缝模型和裂面剪力传递系数

在本文的混凝土模型中, 有两种弥散裂缝模型可供选择, 即固定裂缝模型(Fixed Crack Model (FCM))和转动裂缝模型(Rotating Crack Model (RCM))^[4]。在 FCM 中, 假设裂缝一旦出现, 其方向不会随主应力变化而变化。由于 FCM 可以较好的克服网格倾斜(Mesh bias)带来的影响^[5], 因此我们推荐在分析受拉开裂为主的问题中, FCM 比较合适。但是, 由于 FCM 可能会过高估计裂面剪力传递能力^[6], 因此, 当主应力方向变化较大, 裂面剪力很大的时候会带来较大误差。因此, 对于这些问题, 我们推荐使用 RCM 模型。在 RCM 模型中, 裂缝方向始终和主拉应变方向垂直, 可以降低裂面的剪力锁死问题(Shear Locking)^[6], 比较适合于主应力方向变化较大的问题。

当裂缝方向的 $\sigma_{nm} < 0$ 时, 我们认为此时裂缝受压闭合。

开裂混凝土的折算剪切模量 $G' = \beta G$ ^[7], 在本文的混凝土模型中, 裂面剪力传递系数 β 取值为:

$$\beta = (\beta_0 - \beta_1) e^{-a_2(\varepsilon - \varepsilon_{cr})} + \beta_1 \quad (3)$$

这里 β_0, β_1 分别为混凝土刚刚开裂和裂缝充分发展时的剪力传递系数。 a_2 为常数, 反映 β 降低的速度。该关系具有比较好的通用性, 如取 $\beta_0 = \beta_1$, 则 β 为一定值, 即为常用的固定剪力传递系数模型。根据我们数值试验的结果: 这种模型, 对于混凝土剪力墙, 推荐取固定剪力传递系数为 0.125; 对于混凝土深梁, 取 0.25。一般梁板结构取为 0.5。如果取 $\beta_0 = 0.4, \beta_1 = 0, a_2 = 800$, 则与 AL-Manaidi^[7]建议的裂面剪力传递系数变化关系相接近, 裂面剪力传递系数将随裂缝开展宽度增加而降低。

2.4 加卸载关系

当材料处于破坏曲面以内时, 程序使用应力空间来定义加卸载关系。在破坏曲面以外, 则用应变空间来定义加载和卸载。在本混凝土模型中, 共使用了 6 个非线性指标 $Ev\nu_1 \sim Ev\nu_6$, 其各自含义见表 2。定义

Ev_{max_i} 表示各非线性指标曾经达到的最大值, 如

$Ev_{v_i} \leq Ev_{max_i}$, 则处于卸载或卸载后再加载阶段,

$Ev_{v_i} > Ev_{max_i}$, 则处于沿骨架线加载阶段。

表 2 非线性指标
Table 2 Nonlinear indexes

非线性指标	Ev_{v_1}	Ev_{v_2}	Ev_{v_3}	Ev_{v_4}	Ev_{v_5}	Ev_{v_6}
含义	双压破坏非线性指标	单压破坏非线性指标	未出现破坏时的非线性指标	有一条裂缝时, 对应该裂缝的非线性指标	有两条裂缝时, 对第一条裂缝的非线性指标	有两条裂缝时, 对第二条裂缝的非线性指标

各非线性指标的具体定义为:

$$Ev_{v_1} = \frac{\varepsilon_2^*}{\varepsilon_c} \quad (4)$$

这里 ε_2^* 为消除泊松比影响后的主压应变。 ε_c 为混凝土峰值压应变。

$$Ev_{v_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_c} \quad (5)$$

这里 ε_2 为混凝土主压应变。

Ev_{v_3} 根据应力组合分区不同而有所不同, 如图 2 所示。

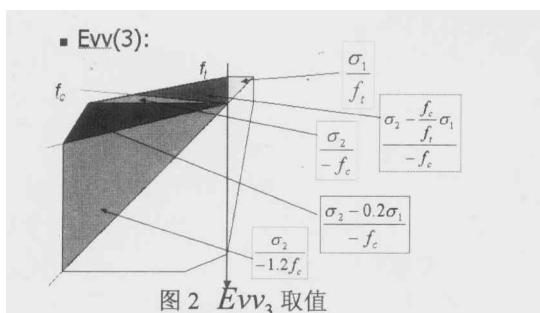


图 2 Ev_{v_3} 取值

$$\begin{cases} Ev_{v_4} = \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon_{cr}} & (6) \\ Ev_{v_5} = \frac{\varepsilon_1^*}{\varepsilon_{cr}} & (7) \\ Ev_{v_6} = \frac{\varepsilon_2^*}{\varepsilon_{cr}} & (8) \end{cases}$$

这里 ε_i^* 为消除泊松比影响后的主拉应变, ε_{cr} 为混凝土开裂应变。

在应力空间计算时, 加卸载的判别是对屈服面求偏导 $\frac{\partial F}{\partial \sigma}$, 如 $\frac{\partial F}{\partial \sigma} d\sigma > 0$, 则为加载, $\frac{\partial F}{\partial \sigma} d\sigma < 0$, 则为卸载。而在有限元位移法中每次迭代只能得到 $d\varepsilon$, $d\sigma = Dd\varepsilon$, D 为本构矩阵。 D 矩阵的取值又依赖于加卸载的判断, 因此 D 矩阵和 $d\sigma$ 相互依赖, 需要迭代判别。在文献[7]中建议反复迭代直至预测加卸载状态和实际加卸载状态完全一致。但是我们通过数值试验发现这种方法很可能因为加卸载状态的反复摆动而使得计算效率很低。同时我们发现经过一次迭代修正后其加卸载状况和实际情况一般已经很接近了。因此在程序中, 对加卸载状态的迭代修正都取为 1 次。

3 RCFER2002 和 MARC 的衔接

由 MSC 公司开发的有限元软件 MARC 具有强大的非线性分析能力, 完整的单元库和便捷的前后处理系统, 在科研和生产领域内都有很多成功应用。而其提供的用户子程序^[8] (user subroutine) 功能允许用户根据需要编制相应的子程序模块, 编译后嵌入 MARC 中, 实现某些特殊功能, 更是给用户的科研和二次开发带来了很大的方便。通过将该混凝土本构模型嵌入 MARC, 取代 MARC 中的混凝土材料模型。同时利用 MARC 强大的前后处理能力和出色的非线性求解模块, 可以用于解决一些复杂的混凝土结构问题。

3.1 本构子程序

在 MARC 的 user subroutine 中, 提供了多种添加材料本构模型的子程序。经过比较, 我们认为, 其中的超弹性 (hyperelastic) 本构子程序 HYPLEA 稳定性和接口都较好, 比较适合用来和 RCFER2002 相衔接, 该子程序的接口为:

SUBROUTINE HYPELA (D, G, E, DE, S, TEMP,

DTEMP, NGENS, N, NN, KC, MATS, NDI, NSHEAR)

D(NGENS, NGENS)为材料的切线刚度阵。G(NGENS)为温度引起的应力增量。E(NGENS)为此时的应变。DE(NGENS)为应变增量。S(NGENS)为此时的应力。TEMP 为此时的温度。DTEMP 为温度增量。NGENS 为应力分量的数量, 对于平面应力问题 NGENS=3, 对于空间问题 NGENS=6。N 为单元号。NN 为积分点号。KC 为材料层号(对于多层材料)。MATS 为材料编号。NDI 为正应力分量数量。NSHEAR 为剪应力分量数量。

由于该子程序是针对超弹性材料的, 即材料的状态和应力历史无关, 这和混凝土的实际情况有较大差距。为了解决这个问题, 我们利用 Fortran 90 语言提供的 module 功能, 在内存中申请一个模块, 用来存放混凝土材料的应力历史, 从而可以有效解决这个问题。

具体做法是:

在用户程序中添加以下语句:

```
module Varies
  type(typ_Concrete) :: Concrete (NElem, NIntPoint)
end module
```

其中 typ_Concrete 为混凝土材料和应力历史参数的数据结构。NElem 为混凝土单元数, NIntPoint 为每个单元的高斯积分点数。这样就实现了在内存中开辟数据存储空间的功能。

只要在 MARC 的本构子程序 HYPLEA 开头添加以下语句:

use Varies

就可以实现对 Varies 模块的访问。

3.2 后处理子程序

利用 MARC user subroutine 中的 POSTV 子程序, 可以很方便的进行绘制开裂应变、应力状态等后处理操作。由于混凝土的各项应力历史参数都已经存放在 Varies 模块中, 因此只要在 POSTV 子程序中引用该模块, 并把相应的变量赋予相应的后处理参数, 就可以十分方便的使用 MARC 强大的后处理功能。

4 算例

图 3、图 4 为 RCFER2002 嵌入 MARC 后得到的在单向往复受压和往复拉压作用下的应力应变关系。与文献[3]中给出的试验结果吻合良好。可见本模型可以较好反映混凝土在往复荷载作用下的力学行为。

纤维增强材料 (FRP) 布与混凝土之间的粘结锚固

性能一直是混凝土有限元分析的一个难点。如果使用 MARC 自带的混凝土模型, 由于其使用固定裂缝 (FCM) 模型, 且剪力传递系数为一常数, 很难模拟出纤维布剥离的效果。其它一些有限元软件如 ANSYS 等也难以实现对剥离的模拟^[10]。而在 RCFER2002 中, 由于使用了转动裂缝模型 (RCM), 加上程序中比较复杂的裂面行为模型, 使得计算结果和试验结果^[9] (试件 PG1-11 和 PG1-12) 吻合良好。并且利用 MARC 强大的非线性分析功能, 得到整个纤维布剥离的全过程。有限元模型如图 5 所示, 计算结果对比如图 6 所示, 最终裂缝和变形分布如图 7 所示。

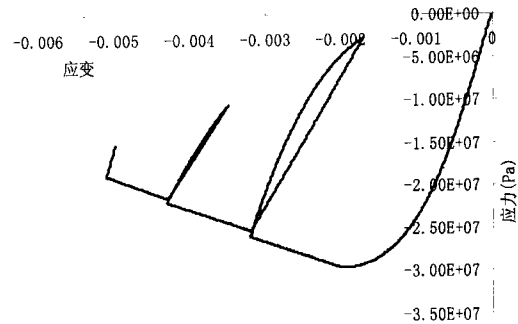


图 3 单向往复受压

Fig.3 Uniaxial cycle compression

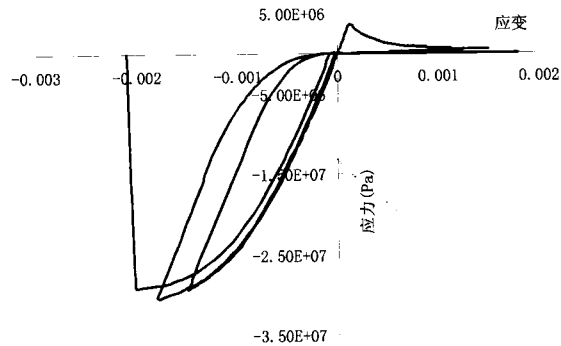


图 4 单向往复拉压

Fig.4 Uniaxial cycle tension-compression

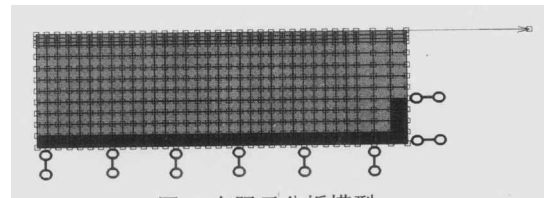


图 5 有限元分析模型

Fig.5 Model for FEM

5 结 论

本文提出了一种可以考虑不同破坏模式的混凝土二维本构模型，并将该模型嵌入 MSC.MARC，可以分析某些特殊应力条件下的混凝土构件，尤其是那些主应力方向变化显著或包含加卸载行为的混凝土问题，计算结果要优于一些现有有限元软件中混凝土本构模型的计算结果。

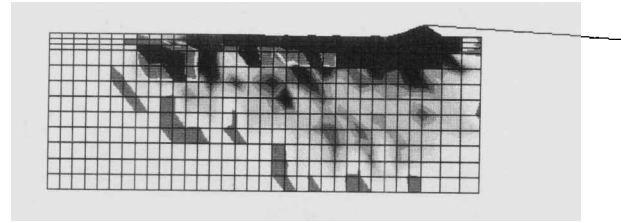


图 7 变形和裂缝分布

Fig.7 Distribution of deformation and crack

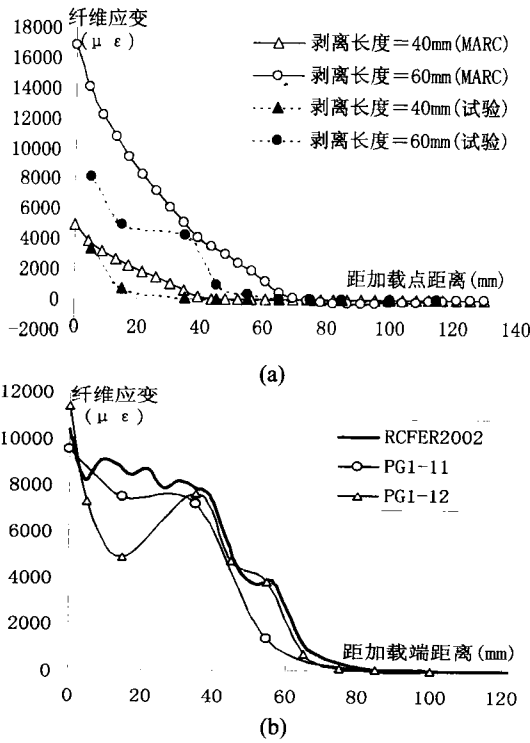


图 6 纤维应力分布试验与计算结果对比

(a: MARC 自带混凝土模型; b: RCFER2002)

Fig.6 Comparison of stress distribution in fiber between tested and computed results

参 考 文 献

- [1] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [2] 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, 1984, 12-13
- [3] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993, 234
- [4] Z. P. Bazant, Concrete fracture models: testing and practice[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, Vol.69, 165-205
- [5] Y. J. Li, Th. Zimmerman. Numerical evaluation of rotating crack model[J]. Computers and Structures, 1998, Vol.69, 487-497
- [6] Classification of smeared crack models based on material and structural properties[J]. Int. J. Solid Structures, 1998. Vol. 35 No.12, 1289-1308
- [7] 吕西林, 金国芳, 吴晓涵. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997, 173
- [8] MSC.Marc User's Manual, Volume D (User Subroutines and Special Routines), MSC. Software Corporation, 2001
- [9] 谭壮. GFRP 布加固混凝土梁受力性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学硕士学位论文, 2002
- [10] 陆新征, 严吉洁, 韦韩等. FRP 布-混凝土界面有限元分析技术难点讨论[C]. 全国土木工程研究生学术论坛论文集 (已投稿), 2003

陆新征 清华大学土木工程系博士研究生。主要从事结构有限元分析和数值仿真研究工作。通讯地址：100084 北京清华大学土木工程系。电话：62795364，电子邮件：luxinzheng@263.net

江见鲸 清华大学土木工程系教授，博士生导师，主要从事非线性结构分析，防灾，计算机仿真研究工作。通讯地址：100084 北京清华大学土木工程系。电话：62795364，电子邮件：jiang-ji@tsinghua.edu.cn