

DOI: 10.7511/jslx20230913003

混凝土塑性损伤模型参数计算方法研究

张田^{1,2}, 侯正猛^{1,2}, 李晓琴^{*3}, 陈前均^{1,2}, 张盛友^{1,4},
孙伟^{1,4}, 张跃⁵

(1. 云南省中-德蓝色矿山与特殊地下空间开发利用重点实验室, 昆明 650093; 2. 克劳斯塔尔工业大学 地下能源系统研究所, 克劳斯塔尔-采勒费尔德 38678; 3. 昆明理工大学 建筑工程学院, 昆明 650500; 4. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093; 5. 大连理工大学 建设工程学院, 大连 116024)

摘要: ABAQUS 中的混凝土塑性损伤 CDP (Concrete damaged plasticity) 模型的参数输入较多, 且标定和验证过程比较复杂, 模型参数的准确性直接影响数值模拟结果的可靠性。为提高数值模拟的效率和可靠性, 本文使用 MATLAB 代码开发了一个高效的 CDP 模型参数求解器, 该求解器包含了断裂能概念, 能够自动校对不同混凝土强度 f_{cu} 和有限元网格尺寸 l_{eq} 下的模型参数。通过两组基准模拟 (不同网格下的单轴拉伸模拟, 单轴循环拉伸和压缩模拟) 检验了求解器的可行性。最后, 将求解器应用于单调和循环加载下的钢筋混凝土 RC (Reinforced concrete) 构件数值模拟, 模拟结果与试验结果吻合较好, 验证了 CDP 模型参数求解器的准确性。该研究可为工程结构模拟提供有力支持。

关键词: 塑性损伤模型; CDP 模型参数求解器; 断裂能; 钢筋混凝土构件; 数值模拟; ABAQUS

中图分类号: TU375; O346.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2024)06-1130-08

1 引言

随着中国二次能源结构的优化, 西南地震区的混凝土结构工程日益增多, 结构抗震安全问题也更加突出^[1]。为确保工程结构的安全运营, 全面评估和优化设计其抗震性能至关重要。数值模拟作为研究工程结构复杂力学行为的重要手段, 工程结构的抗震设计和安全评估对数值模拟提出了新的要求。由于混凝土的强非线性特性, 需要采用功能全面的材料模型进行建模。ABAQUS 中的混凝土塑性损伤 CDP (Concrete damaged plasticity) 模型^[2]综合考虑了材料的刚度退化和不可逆变形, 能够较全面地模拟混凝土的非线性特性, 目前广泛应用于各类混凝土结构分析。然而, 由于 CDP 模型所需的模型参数较多, 并且参数标定和验证过程比较复杂, 这限制了该模型在工程结构分析中的使用效率。此外, 混凝土结构非线性行为的准确模拟取决于模型参数的正确定义^[3]。因此, 为提高工程结

构数值模拟的效率和可靠性, 有必要研究 CDP 模型的参数计算方法。

目前, 有很多关于 CDP 模型参数定义的研究, 如 Kmiecik 等^[4]综述了复杂应力状态下 CDP 模型的参数定义, 并讨论了混凝土的本构关系; Hafezoghori 等^[5]给出了不同强度下 CDP 模型的参数取值; Alfarah 等^[6]推导了新的混凝土单轴本构关系及其损伤计算方程; 方自虎等^[7,8]讨论了混凝土本构关系对模拟结果的影响, 并提出了适用于高强混凝土的损伤计算方程; Sümer 等^[9]根据试验结果拟合了新的损伤计算方程; Li 等^[10]研究了应力-应变截断和损伤参数取值对模拟结果的影响; Silva 等^[11]研究了 CDP 模型中不同塑性参数组合对模拟结果的影响; Syed^[12]对 CDP 模型中难以通过试验测量的模型参数进行了参数分析; Poliotti 等^[13]发展了与塑性、损伤和应力状态相关的剪胀演化模型。以上研究涵盖了混凝土本构关系、损伤计算方法以及塑性参数取值等方面, 但目前尚未全

收稿日期: 2023-09-13; 修改稿收到日期: 2023-10-24.

基金项目: 云南省“兴滇英才支持计划”高端外国专家专项资助。

作者简介: 李晓琴* (1983-), 女, 博士, 教授。(E-mail: Xiaoqin.Li@foxmail.com).

引用本文: 张田, 侯正猛, 李晓琴, 等. 混凝土塑性损伤模型参数计算方法研究[J]. 计算力学学报, 2024, 41(6): 1130-1137.

ZHANG Tian, HOU Zheng-meng, LI Xiao-qin, et al. Research on the calculation of model parameters for concrete plastic damage model in ABAQUS[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, 41(6): 1130-1137.

面讨论 CDP 模型的参数计算、标定和验证方法。同时,有关 CDP 模型参数的高效计算方法的报道也较少。

因此,本文通过总结 CDP 模型的模型参数和相应的计算方程,同时利用 MATLAB 代码开发了 CDP 模型参数求解器。通过两组基准模拟验证了求解器的可行性,并进一步将求解器应用于钢筋混凝土 RC(Reinforced concrete)构件模拟,以验证其工程应用的可靠性。

2 CDP 模型参数概述

ABAQUS 中的 CDP 模型^[2]参数主要包括 2

个弹性参数、5 个塑性参数、4 个描述拉伸行为的模型参数和 4 个描述压缩行为的模型参数,列入表 1。其中,基本常量中的断裂能(G_F, G_c)是混凝土的基本材料参数,而单元特征长度 l_{eq} 则代表有限元建模中的网格属性,与单元尺寸、单元类型、积分点以及开裂模式相关。

3 计算方程

3.1 弹性参数与基本常量

混凝土弹性模量参考 CEB-FIP(2010)^[14]规范

$$E_0 = (0.8 + 0.2 \frac{f_{cm}}{88}) E_{ci} \quad (1)$$

表 1 CDP 模型参数

Tab. 1 CDP model parameters

弹性参数		基本常量		
弹性模型 E_0 式(1) ^[14]	泊松比 ν 0.14~0.26 ^[14]	开裂断裂能 G_F 式(3) ^[14]	压溃断裂能 G_c 式(4) ^[15]	单元特征长度 l_{eq} $l_{eq} = \sqrt{2A}, l_{eq} = \sqrt[3]{V}$
塑性参数				
膨胀角 Ψ 30°~40° ^[16]	偏心率 e 0.1 ^[2]	应力比 f_{b0}/f_{c0} 1.16 ^[2]	不变应力 K_c 2/3 ^[2]	粘性参数 ν 0~0.0075 ^[16]
拉伸行为控制参数				
拉伸应力 σ_t 式(10~12)	开裂应变 ϵ_{ck} 式(20)	拉伸损伤 d_t 式(18)	压缩刚度恢复参数 w_c 单调加载 $w_c = 1$ 循环加载 ^[17]	
压缩行为控制参数				
压缩应力 σ_c 式(14~17)	非弹性应变 ϵ_{in} 式(20)	压缩损伤 d_c 式(18)	拉伸刚度恢复参数 w_t 单调或循环加载 $w_t = 0$	

$$E_{ci} = 21.5 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{1/3} \quad (2)$$

式中 E_0 表示初始无损弹性模量, E_{ci} 表示初始切割模量。

CEB-FIP(2010)^[14]指出,泊松比在 0.14~0.26 之间,采用 0.2 可满足精度要求。

CDP 模型是局部损伤模型,混凝土的软化行为需要采用断裂能(G_F, G_c)描述。开裂断裂能 G_F ^[14]和压溃断裂能 G_c ^[15]计算方程为

$$G_F = 0.073 (f_{cm})^{0.18} \quad (3)$$

$$G_c = \left(\frac{f_{cm}}{f_{tm}}\right)^2 G_F \quad (4)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (5)$$

$$f_{tm} = 0.3016 f_{cu}^{2/3} \quad (6)$$

式中 f_{cm}, f_{tm} 和 f_{ck} 分别为圆柱体抗压强度平均值,抗拉强度平均值和抗压强度标准值。其中 $f_{cu} = f_{cu}/1.226, f_{cu}$ 为立方体抗压强度。

单元特征长度 l_{eq} 表示有限元建模中的网格尺寸属性,对应于本构关系中的裂缝带宽度概念。对于平面单点积分单元, $l_{eq} = \sqrt{2A}, A$ 为单元面积,

对实体缩减积分单元, $l_{eq} = \sqrt[3]{V}, V$ 为单元体积。

3.2 塑性参数相关方程

塑性参数分别与 CDP 模型的塑性流动函数、屈服函数和粘塑性正则化相关^[2]。

CDP 模型采用非关联流动假定,其中塑性势函数 G 采用 Drucker-Prager 双曲线函数描述。

$$G = \sqrt{(e\sigma_{t0} \tan \Psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \Psi \quad (7)$$

式中 Ψ 为高围压条件下 p - q 面上的膨胀角; e 为偏心率,表示该函数接近渐近线的速率。

CDP 模型的屈服函数 F 采用有效应力表述,屈服面的演化与 ϵ_c^{pl} 和 ϵ_t^{pl} 两个变量相关。

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha \bar{p} + \beta(\epsilon_c^{pl}) \langle \dot{\bar{\sigma}}_{\max} \rangle - \gamma \langle -\dot{\bar{\sigma}}_{\max} \rangle) - \bar{\sigma}_c(\epsilon_c^{pl}) = 0 \quad (8)$$

式(8)中,各参数的计算公式为

$$\alpha = \frac{(f_{b0}/f_{c0}) - 1}{2(f_{b0}/f_{c0}) - 1} \quad (0 \leq \alpha \leq 0.5)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\epsilon_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\epsilon_t^{pl})} (1-\alpha) - (1+\alpha) \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{3(1-K_c)}{2K_c - 1}$$

式中 $\bar{\sigma}_{\max}$ 为最大有效主应力, f_{b0}/f_{c0} 为双轴与单轴受压初始屈服应力的比值, K_c 为不变应力比, 控制着屈服面在偏平面上的投影形状, $\bar{\sigma}_c(\epsilon_c^{pl})$ 和 $\bar{\sigma}_t(\epsilon_t^{pl})$ 分别表示受压和受拉有效粘聚应力。

由于混凝土具有软化和刚度退化行为, 其数值分析存在收敛困难问题。为此, CDP 模型在本构方程中引入了粘塑性正则化来提高模型在软化段的收敛速度, 该参数对模拟结果的影响可参考文献[16]。

3.3 拉伸本构方程

混凝土的单轴拉伸行为采用指数型应力-开裂位移关系^[17]描述, 即

$$\sigma_t = f_{tm} e^{-c\omega} \quad (10)$$

$$c = \begin{cases} 2.1357 f_{cu}^{0.5272} & (f_{cu} \leq 50 \text{ MPa}) \\ 2.5015 f_{cu}^{0.5068} & (f_{cu} > 50 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (11)$$

式中 σ_t 为拉伸应力, ω 和 ω_0 分别为开裂位移和最大开裂位移 ($\omega_0 = 5G_F/f_{tm}$), c 为软化参数, 本文对其进行等价转换, 采用 f_{ck} 来表征软化参数:

$$c = 2.6378 f_{ck}^{0.5197} \quad (12)$$

根据裂缝带理论^[18], 可认为开裂应变 ϵ_t^{ck} 均匀地分布在单个单元内。因此, 可采用式(13)将式(10)转化为拉伸应力-应变关系为

$$\epsilon_t = f_{tm}/E_0 + \tau\omega/l_{eq} \quad (13)$$

3.4 压缩本构方程

混凝土的单轴压缩本构关系采用三段式描述, 即线弹性段(式14)、强化段(式15)^[14]和软化段(式16-17)^[19]。

$$\sigma_{c1} = E_0 \epsilon_c \quad (14)$$

$$\sigma_{c2} = \frac{E_{ci} \frac{\epsilon_c}{f_{cm}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cm}} \right)^2}{1 + \left(E_{ci} \frac{\epsilon_{cm}}{f_{cm}} - 2 \right) \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cm}}} f_{cm} \quad (15)$$

$$\sigma_{c3} = \left(\frac{2 + \gamma_c f_{cm} \epsilon_{cm}}{2 f_{cm}} - \gamma_c \epsilon_c + \frac{\epsilon_c^2 \gamma_c}{2 \epsilon_{cm}} \right)^{-1} \quad (16)$$

$$\gamma_c = \frac{\pi^2 f_{cm} \epsilon_{cm}}{2 \left[\frac{G_c}{l_{eq}} - 0.5 f_{cm} \left(\epsilon_{cm} (1-b) + b \frac{f_{cm}}{E_0} \right) \right]^2} \quad (17)$$

式中 σ_c 为压缩应力, ϵ_c 为压缩应变, ϵ_{cm} 为峰值应力对应的应变, l_{eq} 为单元特征长度, b 为等效塑性应变与非弹性应变之比, 初始取值为 0.9^[6]。

3.5 损伤演化方程

不同损伤演化方程的演化规律评述可参考文献[17]。本文采用新发展的损伤模型^[20]计算损伤参数有

$$\begin{cases} d_t = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_t}{E_0(\epsilon_t - \beta_t \epsilon_{ck})}} \\ d_c = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_c}{E_0(\epsilon_c - \beta_c \epsilon_{in})}} \end{cases} \quad (18)$$

式中 ϵ_{ck} 和 ϵ_{in} 分别为开裂应变和非弹性应变, β_t 和 β_c 分别表示等效拉伸和压缩应变因子, 其中 $0 < \beta_t, \beta_c < 1$ 。

损伤参数中的 ω_c 和 ω_t 取值与荷载工况有关, 对于单调加载, 由于很少发生裂缝张开闭合现象, 故两参数取默认值 ($\omega_c = 1, \omega_t = 0$)。而对于循环加载, 可采用 ω_c 计算方法^[17], 该方法需要根据拉伸损伤水平 d_t 进行模型简化处理。

3.6 弹性极限应力

CDP 模型的单轴应力定义需要从弹性极限应力点开始。本文以拉伸峰值应力作为拉伸弹性极限应力 σ_{t0} , 压缩弹性极限应力 σ_{c0} 采用式(19)^[21]计算。

$$\sigma_{c0} = (1 - e^{-0.0125 f_{cm}}) f_{ck} \quad (19)$$

此外, ϵ_{ck} 和 ϵ_{in} 根据公式(20)计算, 拉伸和压缩等效塑性应变 (ϵ_t^{pl} 和 ϵ_c^{pl}) 根据式(21)计算。

$$\epsilon_{in} = \epsilon_c - \sigma_c/E_0; \epsilon_{ck} = \epsilon_t - \sigma_t/E_0 \quad (20)$$

$$\epsilon_t^{pl} = \epsilon_t^{ck} - \frac{d_t \sigma_t}{1 - d_t E_0}; \epsilon_c^{pl} = \epsilon_c^{in} - \frac{d_c \sigma_c}{1 - d_c E_0} \quad (21)$$

4 参数计算方法实现

4.1 CDP 模型参数求解器开发

为提高 CDP 模型的使用效率, 本文采用 MATLAB 代码集成上述计算方程, 以开发一个高效的 CDP 模型参数求解器。如图 1 所示, 该求解器只需输入立方体抗压强度 f_{cu} 和单元特征长度 l_{eq} , 程序能够自动计算和生成 CDP 模型所需的输入参数, 然后传递给 ABAQUS 有限元模型的材料定义模块, 从而提高了数值建模的效率。初始输入变量 $b = 0.9$ 是试验近似结果^[6]。为了确保在本构计算过程中参数计算逻辑的一致性, 本文引入了 $\nabla b \leq 1\% b_1$ 判别条件, 通过迭代计算来修正初始参数 b 。此外, 求解器包含了断裂能 (G_F, G_c), 能够有效地考虑网格变化对模型输出参数的影响。

CDP 模型参数求解器的代码实现流程为, (1) 读取初始输入参数, 并为变量赋值; (2) 集成式(1~6, 19)计算基本常量; (3) 集成式(10~17)计算混凝土本构关系; (4) 集成式(18)计算混凝土损伤参数; (5) 集成式(20, 21)计算拉伸和压缩等效塑性应变、非弹性应变和开裂应变; (6) 执行判别式条件 $\nabla b \leq 1\% b_1$, 修正初始输入参数 b ; (7) 输出模型参数, 并

以 Material.inp 文件名保存至 ABAQUS 计算模型的主函数路径下以供调用。

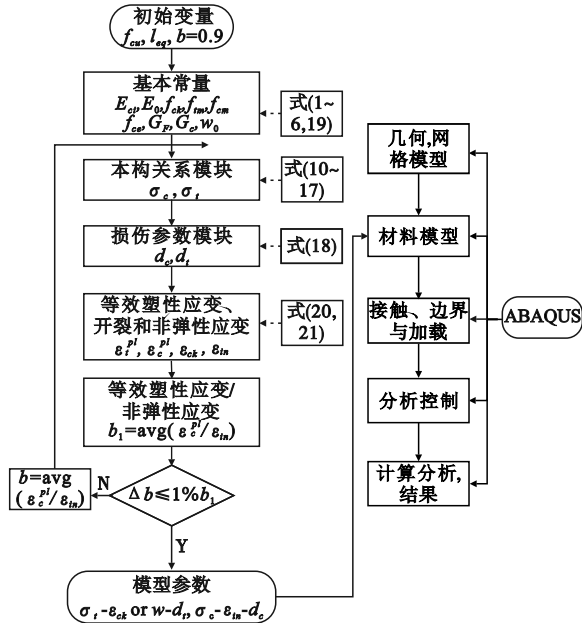


图1 CDP模型参数求解器程序设计流程图
Fig. 1 Programming flow diagram for CDP parameter solver

4.2 基准模拟与验证

4.2.1 不同网格的单轴拉伸模拟

为验证 CDP 模型参数求解器的模拟结果的网格收敛性,本文以边长为 150 mm 的立方体作为测试对象,并分别采用 25 mm, 50 mm 和 150 mm 的网格尺寸划分单元(图 2)。采用 C3D8R 单元进行模拟,模型底部施加 Y 方向的铰约束,模型顶部两垂直边施加滑动约束以防止模型的平移或旋转,顶部施加 0.34 mm 的向上拉伸位移。测试对象的立方体抗压强度 f_{cu} 为 30 MPa,相应的基本常数列入表 2。

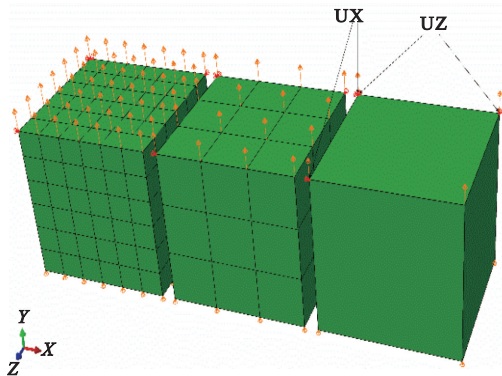


图2 单轴拉伸测试模型
Fig. 2 Test models for uniaxial tension loading

表2 混凝土基本常量

Tab. 2 Concrete material properties

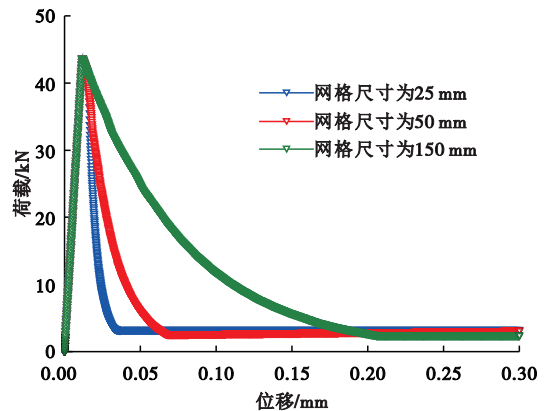
E_0/MPa	f_{ck}/MPa	f_{tm}/MPa	$G_F(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$G_c(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$
24789	24.5	1.95	0.130	20.390

图 3 给出了不同网格模型的模拟结果。对于

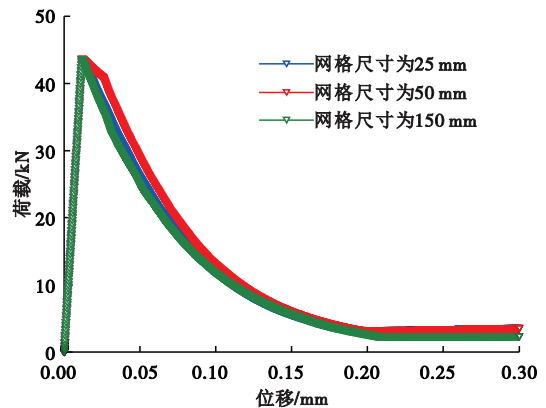
不考虑断裂能和单元特征长度的情况(图 3(a)),也就是采用相同的应力-应变关系来模拟不同网格的有限元模型时,可以观察到随着网格的细化,分析结果的软化段下降速率增加。然而,当采用考虑单元特征长度的 CDP 模型参数求解器进行模拟时(图 3(b)),不同网格模型的分析结果非常吻合。经过验证,图 3(b)中的断裂能耗散值与输入值(表 2)的误差小于 3%。这些结果表明,基于 CDP 模型参数求解器的模拟结果与网格尺寸无关,满足网格收敛性要求。

4.2.2 单轴循环拉伸和循环压缩模拟

为验证 CDP 模型参数求解器在模拟混凝土卸载刚度退化行为方面的准确性,本文进行了基于 150 mm 立方体单元的单轴压缩循环和单轴拉伸循环模拟。如图 4 所示,对 1375 面施加垂直于该面的链杆约束,并对 26 面施加垂直于 1265 面的链杆约束,同时对 24 边施加垂直于 2431 面的链杆约束,对 2486 面施加法向循环位移。单轴压缩和拉伸循环模拟用的材料基本常数分别列入表 2 和表 3。



(a) 不考虑断裂能和单元特征长度的模拟结果



(b) 采用CDP模型参数求解器的模拟结果

图3 不同网格模型的模拟结果对比

Fig. 3 Comparison of simulation results for cubic models with varying mesh sizes

单轴循环模拟结果与试验结果的对比如图 5

所示。可以看出,模拟结果的卸载曲线与试验结果高度吻合,这表明采用的损伤模型能够准确描述混凝土在循环加载和卸载过程中的材料刚度退化行为,也验证了 CDP 模型参数求解器输出参数的合理性。

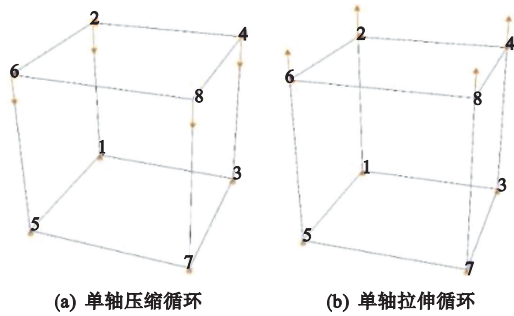
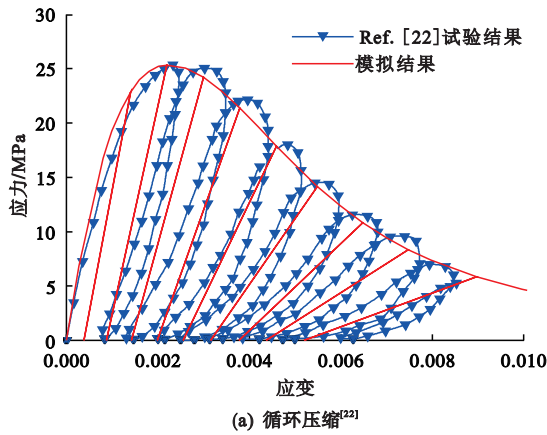


图 4 单元模型与边界条件

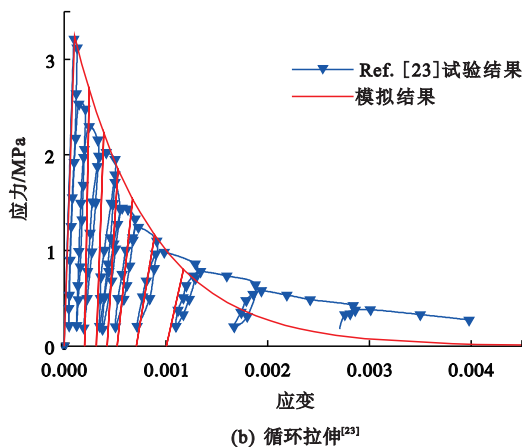
表 3 混凝土基本常量

Tab. 3 Concrete material properties

$E_0 /$ MPa	$f_{ck} /$ MPa	$f_{tm} /$ MPa	G_F ($N \cdot mm^{-1}$)	G_c ($N \cdot mm^{-1}$)
31191	43.2	3.24	0.144	25.581



(a) 循环压缩^[22]



(b) 循环拉伸^[23]

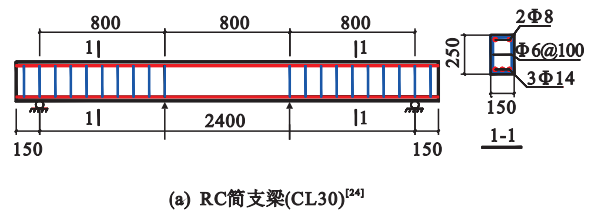
图 5 单轴循环模拟与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of simulation with the cyclic test results

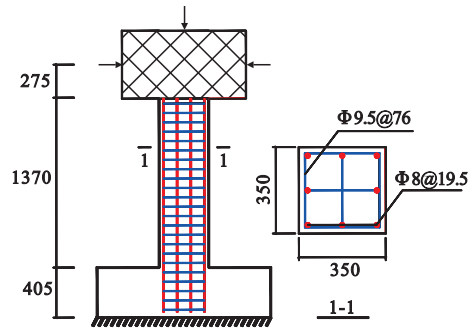
5 构件数值模拟应用

5.1 有限元模型描述

为进一步验证 CDP 模型参数求解器的可靠性,本文对单调荷载下的 RC 简支梁(CL30)^[24]和循环加载下的 RC 柱(BG-3)^[25]进行了数值模拟。构件的几何尺寸、钢筋布置信息和加载条件(图中的箭头表示加载方向和位置)如图 6 所示,材料参数列入表 4 和表 5。有限元建模采用分离式建模方法,即分别使用桁架单元(T3D2)和实体缩减积分单元(C3D8R)来模拟钢筋和混凝土,同时采用 Embedded 技术将钢筋单元嵌入混凝土单元中。



(a) RC 简支梁(CL30)^[24]



(b) RC 柱(BG3)^[25]

图 6 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 6 Details of test RC members(unit: mm)

表 4 模型材料性能参数定义

Tab. 4 Material property definitions for FE modelling

构件	材料	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	屈服应变/ 10^{-6}
CL30 ^[24]	混凝土	32.7	-	-
	Φ14	200	365.9	1829.5
	Φ8	210	352.1	1676.7
BG3 ^[25]	混凝土	-	-	-
	Φ19.5	200	455.6	2278
	Φ9.5	200	570	2850

表 5 混凝土模拟参数

Tab. 5 Parameters for concrete modelling

构件	$f_{ck} /$ MPa	$f_{tm} /$ MPa	$G_F /$ $N \cdot mm^{-1}$	$G_c /$ $N \cdot mm^{-1}$	$l_{eq} /$ mm
CL30 ^[24]	24.5	1.95	0.130	20.390	50
BG3 ^[25]	34.0	2.65	0.138	22.726	50

本文模拟不侧重于界面的破坏细节,因此采用间接方法来考虑钢筋与混凝土之间的界面滑移特性。即通过修正钢筋的本构模型来间接模拟界面滑移特性,已有研究^[27]证明了这种建模方法的可行性。本文采用曲哲^[26]开发的修正钢筋模型(图7)来模拟钢筋的行为,该模型定义参数包括弹性模量 E_s 、屈服强度 f_y 和硬化刚度系数 α 。其中 E_s 和 f_y 的取值列入表4, α 采用0.01。由于单调加载情况下的界面滑移对结构的宏观性能影响较小^[15],因此仅在循环加载模拟中采用修正钢筋模型,而在单调加载模拟中使用弹塑性二折线模型模拟钢筋行为。

在RC筒支梁模型中,两端采用铰约束,并在模型的三分点位置施加位移荷载,加载制度如图8(a)所示。对于RC柱模型,底端施加固定约束,柱的顶端施加竖向荷载和水平循环位移荷载,加载过程采用力-位移混合加载方式,如图8(b)所示。混凝土和钢筋单元的网格尺寸均为50 mm,保护层厚度设定为25 mm。有限元模型同时考虑了几何非线性和材料非线性,并采用自动增量 Newton-

Raphson 迭代法来求解非线性问题。

5.2 模拟与试验对比

图9给出了数值模拟结果与试验结果的对比。对于RC筒支梁,其屈服荷载和极限荷载分别为85 kN和102 kN,相应的位移为10.02 mm和33.4 mm。在相同的加载位移下,数值模拟结果分别为85.2 kN和98.6 kN,与试验结果的误差在0.24%到3.33%之间。试验和模拟的能量耗散分别为2727.9 kN·mm和2756.4 kN·mm,误差为1.04%。对于RC框架柱,在加载位移为33 mm,

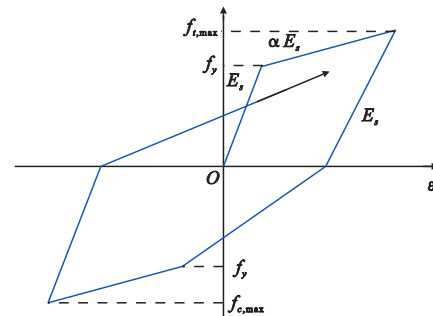
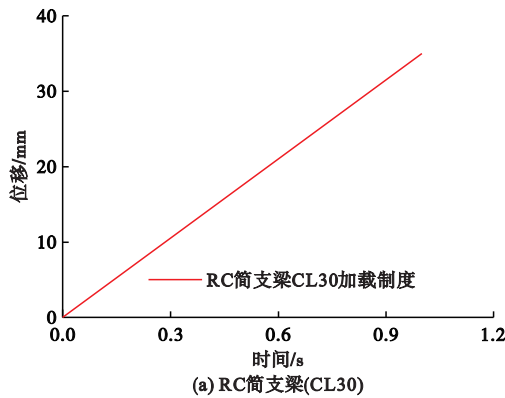
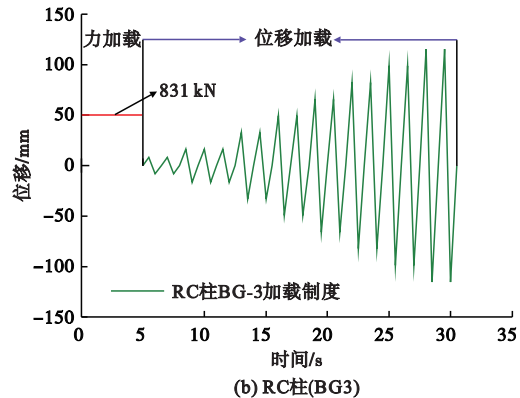


图7 修正钢筋模型^[26]

Fig. 7 Modified reinforcement constitutive relationship^[26]



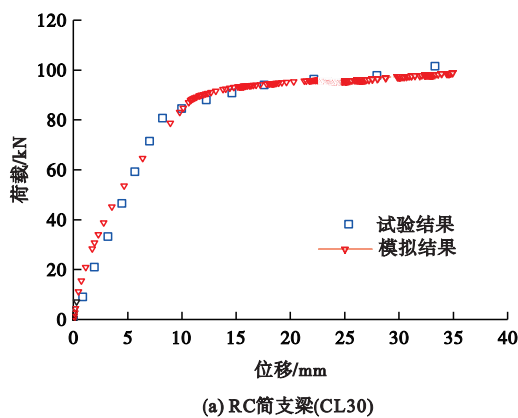
(a) RC筒支梁(CL30)



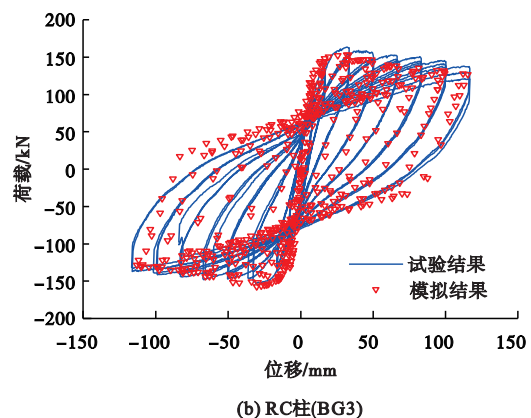
(b) RC柱(BG3)

图8 模型加载制度

Fig. 8 Loading system of FE models



(a) RC筒支梁(CL30)



(b) RC柱(BG3)

图9 荷载-位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of the load-displacement curve

50 mm 和 66 mm 时, 试验分别得到承载力为 164.7 kN, 157.8 kN 和 153.3 kN, 而数值模拟结果分别为 165.7 kN, 156.9 kN 和 145.7 kN, 模拟与试验的误差在 -0.61% 到 4.96% 之间。试验和模拟的能量耗散分别为 31428.9 kN·mm 和 31966.4 kN·mm, 误差为 1.7%。这些结果表明, 基于 CDP 模型参数求解器的输出参数能够准确地模拟 RC 构件在不同加载工况下的荷载-位移响应。

6 结 论

为提高工程结构数值模拟的效率和可靠性, 本文利用 MATLAB 代码开发一个高效的 CDP 模型参数求解器, 该求解器包括了断裂能概念, 能够自动校对不同混凝土强度 f_{cu} 和有限元网格尺寸 l_{eq} 下的模型参数。两组基准模拟验证了基于求解器的模拟结果满足网格收敛性要求, 同时能够较好地模拟混凝土在循环荷载下的刚度退化特性。与试验结果对比, 单调和循环荷载下的 RC 构件模拟结果误差分别在 4.96% 和 1.7% 以内, 进一步验证了求解器的准确性和有限元模型的可靠性。因此, 本文的模型参数计算方法及其求解器可用于工程结构模拟。

参考文献(References):

- [1] 刘 智, 赵兰浩, 吴晓彬, 等. 循环荷载下考虑滞回效应的混凝土损伤模型[J]. 工程科学与技术, 2020, **52**(4): 117-123. (LIU Zhi, ZHAO Lan-hao, WU Xiao-bin, et al. Damage model of concrete considering hysteretic effect under cyclic loading[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, **52**(4): 117-123. (in Chinese))
- [2] Systèmes D. *Abaqus Analysis User's Manual*[M]. 2007.
- [3] 聂建国, 王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, **30**(4): 59-67, 82. (NIE Jian-guo, WANG Yu-hang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, **30**(4): 59-67, 82. (in Chinese))
- [4] Kmiecik P, Kamiński M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2011, **11**(3): 623-636.
- [5] Hafezolzghorani M, Hejazi F, Vaghei R, et al. Simplified damage plasticity model for concrete[J]. *Structural Engineering International*, 2017, **27**(1): 68-78.
- [6] Alfarah B, López-Almansa F, Oller S. New methodology for calculating damage variables evolution in Plastic Damage Model for RC structures[J]. *Engineering Structures*, 2017, **132**: 70-86.
- [7] 方自虎, 周海俊, 赖少颖, 等. ABAQUS 混凝土应力-应变关系选择[J]. 建筑结构, 2013, **43**(S2): 559-561. (FANG Zi-hu, ZHOU Hai-jun, LAI Shao-ying, et al. Choose of ABAQUS concrete stress-strain curve [J]. *Building Structure*, 2013, **43**(S2): 559-561. (in Chinese))
- [8] 方自虎, 周海俊, 赖少颖, 等. ABAQUS 混凝土损伤参数计算方法[J]. 建筑结构, 2014, **44**(S1): 719-721. (FANG Zi-hu, ZHOU Hai-jun, LAI Shao-ying, et al. Method of calculating concrete damage parameter by ABAQUS [J]. *Building Structure*, 2014, **44**(S1): 719-721. (in Chinese))
- [9] Sümer Y, Aktaş M. Defining parameters for concrete damage plasticity model[J]. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 2015, **1**(3): 149-155.
- [10] Li Q F, Guo W, Kuang Y H. Parameter calculation and verification of concrete plastic damage model of ABAQUS[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, **794**(1): 012036.
- [11] Silva L M E, Christoforo A L, Carvalho R C. Calibration of concrete damaged plasticity model parameters for shear walls[J]. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 2021, **26**(1): e12944.
- [12] Syed S, Gupta A. Seismic fragility of RC shear walls in nuclear power plant Part 1: Characterization of uncertainty in concrete constitutive model[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2015, **295**: 576-586.
- [13] Poliotti M, Bairán J M. A new concrete plastic-damage model with an evolutive dilatancy parameter [J]. *Engineering Structures*, 2019, **189**: 541-549.
- [14] FIP C. Model Code for Concrete Structures 2010[S]. Ernst & Sohn, 2013.
- [15] Li X Q, Zhang T, Ding Z D, et al. Numerical analysis of normal concrete lining strengthening methods under different damage levels[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2021, **17**(12): 1597-1611.
- [16] 张 田. 典型混凝土模型在单调和循环荷载下数值模拟应用研究[D]. 昆明理工大学, 2020. (ZHANG Tian. Study on Numerical simulation application of typical concrete model under monotonic and cyclic loads[D]. Kunming University of Science and Technology, 2020. (in Chinese))
- [17] 李晓琴, 张 田. 循环荷载下混凝土开裂-闭合行为计算方法研究[J]. 振动与冲击, 2021, **40**(9): 254-263. (LI Xiao-qin, ZHANG Tian. Calculation method of cracking-closing behaviour of concrete under cyclic

- loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, **40**(9):254-263. (in Chinese))
- [18] Bažant Z P, Oh B H. Crack band theory for fracture of concrete[J]. *Matériaux et construction*, 1983, **16**(3): 155-177.
- [19] Krätzig W B, Pölling R. An elasto-plastic damage model for reinforced concrete with minimum number of material parameters[J]. *Computers & Structures*, 2004, **82**(15-16):1201-1215.
- [20] Zhang T, Hou Z M, Chen Q J, et al. A novel damage model integrated into the elastoplastic constitutive model and numerical simulations of reinforced concrete structures under cyclic loading[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, **84**:108670.
- [21] Wosatko A, Genikomsou A, Pamin J, et al. Examination of two regularized damage-plasticity models for concrete with regard to crack closing[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, **194**:190-211.
- [22] Sinha B P, Gerstle K H, Tulin L G. Stress-strain relations for concrete under cyclic loading[J]. *ACI Journal Proceedings*, 1964, **61**(2):195-212.
- [23] Reinhardt H W, Cornelissen H A W, Hordijk D A. Tensile tests and failure analysis of concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1986, **112**(11): 2462-2477.
- [24] 王文炜, 赵国藩, 黄承远, 等. 碳纤维布加固已承受荷载的钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究及抗弯承载力计算[J]. *工程力学*, 2004, **21**(4):172-178. (WANG Wen-wei, ZHAO Guo-fan, HUANG Cheng-kui, et al. An experimental study of strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using CFRP sheets [J]. *Engineering Mechanics*, 2004, **21**(4): 172-178. (in Chinese))
- [25] Saatcioglu M, Grira M. Confinement of reinforced concrete columns with welded reinforced grids[J]. *ACI Structural Journal*, 1999, **96**(1):29-39.
- [26] Qu Z. Predicting nonlinear response of an RC bridge pier subject to shake table motions[A]. Proceedings of 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering[C]. 2012.
- [27] Feng D C, Wu G, Lu Y. Finite element modelling approach for precast reinforced concrete beam-to-column connections under cyclic loading[J]. *Engineering Structures*, 2018, **174**:49-66.

Research on the calculation of model parameters for concrete plastic damage model in ABAQUS

ZHANG Tian^{1,2}, HOU Zheng-meng^{1,2}, LI Xiao-qin^{*3}, CHEN Qian-jun^{1,2},
ZHANG Sheng-you^{1,4}, SUN Wei^{1,4}, ZHANG Yue⁵

(1. Yunnan Key Laboratory of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space, Kunming 650093, China; 2. Institute of Subsurface Energy Systems, Clausthal University of Technology, Clausthal-Zellerfeld 38678, Germany; 3. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 4. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 5. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The use of the concrete damaged plasticity (CDP) model in ABAQUS is relatively complex, which involves more input parameters and their relevant calibration process as well as its validation. Also, the reliability of numerical simulation results directly relies on the accuracy of the model parameters. Therefore, to improve the efficiency and reliability of numerical simulation results, an efficient CDP model parameter solver was developed based on the MATLAB code. The developed solver that incorporates the concept of fracture energy can automatically adjust to the need of model parameters with varying strengths of concrete (f_{cu}) and different mesh sizes (l_{eq}) in finite element modelling. Its feasibility was then validated through two sets of benchmark simulations, including the uniaxial tension modelling with diverse mesh sizes as well as the uniaxial cyclic modelling both for tension and compression. The developed solver was further applied to simulate the reinforced concrete (RC) components under both monotonic and cyclic loading conditions, and the obtained results were in good agreement with test results thereby affirming the accuracy of the CDP model parameter solver. The research can provide strong support for the numerical simulation of engineering structures.

Key words: damaged plasticity model; CDP model parameter solver; fracture energy; RC component; numerical simulations; ABAQUS