

文章编号:1671-6833(2021)02-0043-06

CDP 模型参数计算及取值方法验证

李清富, 匡一航, 郭 威

(郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了将混凝土结构设计规范中的混凝土应力-应变曲线应用到 ABAQUS 混凝土塑性损伤模型中,对混凝土塑性损伤模型参数计算方法及损伤因子的取值范围进行了研究,以 1 根简支梁受弯试验为例,对混凝土应力-应变曲线截断处及损伤因子的取值进行标定。为了验证所提模型参数计算方法及取值的合理性和准确性,选取了 2 根简支梁和 1 片剪力墙进行有限元模拟,结果表明:梁的开裂荷载、极限荷载以及荷载-跨中挠度曲线的模拟结果与试验结果吻合性较好,满足工程精度要求,混凝土应力-应变曲线截断处及损伤因子的取值是准确可靠的。

关键词: ABAQUS; 混凝土塑性损伤模型; 模型参数; 损伤因子; 本构模型

中图分类号: TU313

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.06.002

0 引言

ABAQUS 软件在解决非线性问题上具有良好的适用性,其提供的混凝土损伤模型(CDP 模型)最早由 Lubliner 等^[1]提出, Lee 等^[2]引入刚度恢复的概念对 CDP 模型进行了改进。CDP 模型通过损伤因子实现加载中材料刚度的折减,考虑了在循环荷载作用下混凝土裂缝开展、裂缝闭合及刚度部分恢复的行为,基本规则包括:屈服准则、流动法则和滞回规则^[3-4]。CDP 模型可用于往复荷载作用下混凝土结构和组合结构的受力行为模拟,可以较准确地模拟钢筋混凝土梁-柱组合结构的冲剪效应,在抗震分析方面广泛应用^[5-7]。CDP 模型需要用户自己提供混凝土的单轴应力-应变关系和设置部分模型参数。Rama 等^[8]使用混凝土塑性损伤模型评估不同等级混凝土的断裂性能,研究了膨胀角和偏心率等参数的影响,进一步提高了分析的准确性。方自虎等^[9]通过对循环荷载作用下的混凝土构件进行模拟,分析了混凝土单轴应力-应变曲线对模拟结果的影响,推荐混凝土的受拉曲线取直线,其他部分使用规范中提供的公式。张劲等^[10]和刘巍等^[11]用各等级混凝土本构关系参数模拟结果与新旧规范中的混凝土

本构曲线进行对比,验证了 CDP 模型参数的准确性。然而关于混凝土的应力-应变曲线截断处和损伤因子的取值范围的研究较少,因此,本文基于 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[12]中提供的本构关系,结合简支梁的试验结果对混凝土的应力-应变曲线截断处和损伤因子的取值范围进行标定,并选取 3 组试件进行建模分析,通过与试验数据对比,验证模型参数取值方法的合理性和准确性。

1 CDP 模型参数的确定方法

1.1 混凝土应力-应变关系

CDP 模型中采用的是混凝土在单轴受力状态下的应力和非弹性应变,非弹性应变根据混凝土的单轴应力-应变曲线换算。最具代表性的混凝土本构关系有 3 种:GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[12]、欧洲规范^[13]和美国学者 Kent-Park 提出的应力-应变曲线方程^[14]。欧洲规范没有明确给出单轴拉伸应力-应变曲线。混凝土结构设计规范在公式中引入了损伤演化参数,比 Kent-Park 模型收敛性更好。因此,采用《混凝土结构设计规范》提供的混凝土本构关系确定 CDP 模型中的参数。如图 1 所示,规范中的单轴应力-

收稿日期:2020-08-20;修订日期:2020-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51679220);水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金项目(2018002)

作者简介:李清富(1966—),男,河南林州人,郑州大学教授,博士,主要从事工程结构研究,E-mail:lqflch@zhu.edu.cn。

应变曲线按下式确定。

$$\text{受拉情况: } \sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon; \quad (1)$$

$$\text{受压情况: } \sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon. \quad (2)$$

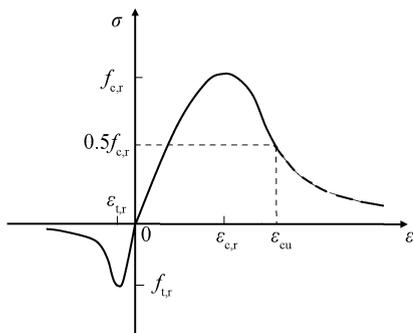


图1 GB 50010—2010 中混凝土单轴应力-应变曲线

Figure 1 Uniaxial stress-strain curve of concrete in GB 50010—2010

1.2 损伤因子计算

直接将规范提供的损伤演化参数应用到 CDP 模型中会导致计算不易收敛。Sidoroff^[15] 提出应力作用在有损材料上产生的弹性余能与作用在无损材料上形式相同,进行力学分析时只需将弹性模量改为有损状态时的弹性模量。Sidoroff 基于此假设提出的损伤因子计算方法如式(3)所示。经验证,这种方法适用于 CDP 模型损伤因子的计算。

$$d = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_0 \varepsilon}}. \quad (3)$$

式中: σ 和 ε 由式(1)和式(2)计算所得; E_0 为混凝土的初始弹性模量。

1.3 CDP 模型参数

CDP 模型中混凝土的破坏形式主要有 2 种,在拉伸屈服后软化导致开裂和在压缩屈服后先硬化再软化导致压碎破坏。屈服面函数主要包括拉伸等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}_t^{pl}$ 和压缩等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}_c^{pl}$ 。CDP 模型中输入的应变为非弹性应变,需保证与之对应的 $\bar{\varepsilon}_c^{pl}$ 和 $\bar{\varepsilon}_t^{pl}$ 大于 0 且随着损伤因子的增大而增大,为此选取 $0.5\varepsilon_{c,r}$ 到 $0.6\varepsilon_{t,r}$ 之间的应力-应变曲线段为弹性段。图 2 为 CDP 模型各项压应变之间的关系,受压非弹性应变可依下式计算:

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el}; \\ \varepsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0}; \\ \bar{\varepsilon}_c^{pl} = \bar{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_c^{in}$ 为受压非弹性应变; σ_c 和 ε_c 为 GB 50010—2010 中的压应力和压应变; ε_{0c}^{el} 为初始弹性模量对应的弹性压应变; $\bar{\varepsilon}_c^{pl}$ 为受压状态下的塑

性应变。

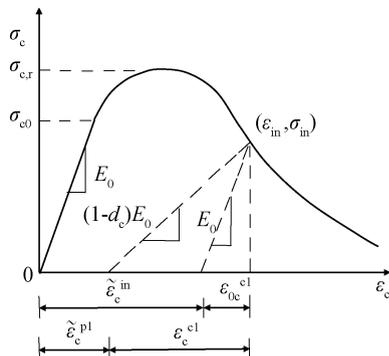


图2 混凝土塑性损伤模型受压应力-应变关系

Figure 2 Uniaxial compression stress-strain curve of CDP

图 3 为 CDP 模型各项拉应变之间的关系,受拉开裂应变可依下式计算:

$$\begin{cases} \bar{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el}; \\ \varepsilon_{0t}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_0}; \\ \bar{\varepsilon}_t^{pl} = \bar{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0}. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_t^{ck}$ 为受拉开裂应变; σ_t 和 ε_t 为 GB 50010—2010 中的拉应力和拉应变; ε_{0t}^{el} 为与初始弹性模量对应的弹性拉应变; $\bar{\varepsilon}_t^{pl}$ 为受拉状态下的塑性应变。

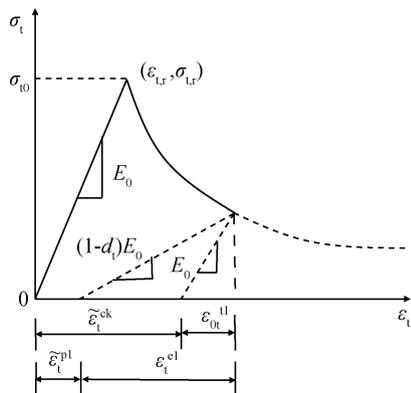


图3 混凝土塑性损伤模型受拉应力-应变关系

Figure 3 Uniaxial tensile stress-strain curve of CDP

对于普通混凝土,CDP 模型的其他参数的推荐值见表 1。膨胀角和偏心率是和屈服面流动法则相关的参数。 K 为混凝土屈服形态的影响参数。 f_{b0} 为混凝土双轴抗压强度, f_{c0} 为单轴抗压强度,两者的比值取规范推荐值。 μ 为 CDP 模型定义的黏性参数, μ 越大计算越容易收敛,越小计算精度越高,取 0.000 5 时可以同时满足精度和收敛性的要求。

2 模型参数的标定

CDP 模型对于混凝土的极限拉压非弹性应

表 1 CDP 模型材料参数

Table 1 Material parameters of CDP

膨胀角 $\psi/(^\circ)$	偏心率	f_{t0}/f_{c0}	K	μ
30	0.1	1.16	0.666 7	0.000 5

变并未做出规定,为此需要对混凝土拉压应力的截断处进行标定。以文献[16]中的 1 根试验梁 STEEL-40S 为例,采用上述表达式计算相关参数进行模拟分析,同时对混凝土拉压应力的截断处进行初步的标定。

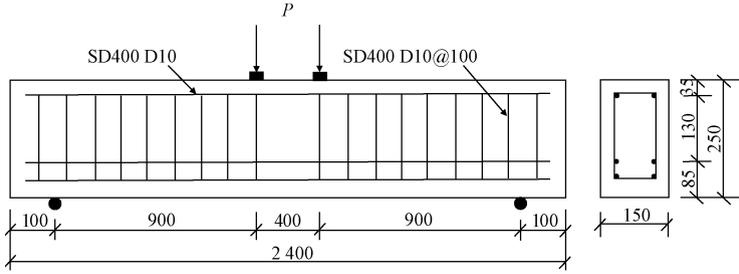


图 4 简支梁配筋详图 (mm)

Figure 4 Detailed view of the beam and specimen cross-section (mm)

表 2 钢筋的材料参数

Table 2 Material parameters of reinforcement

直径 d/mm	横截面积 A/mm^2	弹性模量 E/GPa	屈服强度 f_y/GPa	极限强度 f_u/MPa
9.5	71.3	173	446	577

表 3 混凝土受压参数

Table 3 Compressive parameters of concrete

x_c	压应力 σ_c	受压非弹性应变 $\tilde{\varepsilon}_c^{\text{in}}$	受压损伤因子 d_c
0.5	21.468 43	0.000 000	0.000 000
0.8	26.568 61	0.000 460	0.200 082
1.0	27.300 00	0.000 757	0.274 751
1.5	22.750 00	0.001 696	0.459 431
2.0	17.062 50	0.002 669	0.594 573
3.0	10.500 00	0.004 468	0.740 319
6.0	4.550 00	0.009 442	0.879 125
9.0	2.863 64	0.014 285	0.921 703
15.0	1.636 69	0.023 905	0.954 150
20.0	1.204 77	0.031 903	0.965 932

注: $x_c = \varepsilon_c/\varepsilon_{c,r}$, ε_c 为混凝土的实际压应变, $\varepsilon_{c,r}$ 为与单轴抗压强度 $\sigma_{c,r}$ 相应的混凝土峰值压应变。

根据简支梁 STEEL-40S 的几何尺寸、加载方式和约束位置建立模型,混凝土的材料属性采用表 3、表 4 中的参数,钢筋的本构模型采用双斜线模型。混凝土单元类别为 C3D8 实体单元,钢筋单元类别为 T3D2 桁架单元,单元尺寸均为 50 mm。加载点和支座处通过设置钢垫片避免应力集中的现象,采用位移控制加载提高计算的收敛性。

2.1 试验梁及计算模型

简支梁 STEEL-40S 的截面尺寸、加载方式和配筋见图 4,受压筋、受拉筋和箍筋均采用 SD400 D10 钢筋,其材料参数见表 2。浇筑混凝土时预留立方体伴随试块,试块抗压强度平均值 $f_{cm} = 40.9 \text{ MPa}$,换算后可得立方体抗压强度标准值 $f_{ck} = 27.3 \text{ MPa}$ 。CDP 模型参数计算时采用立方体抗压强度标准值,计算得到损伤因子及相关参数见表 3、表 4。

表 4 混凝土受拉参数

Table 4 Tensile parameters of concrete

x_t	拉应力 σ_t	受拉开裂应变 $\tilde{\varepsilon}_t^{\text{ck}}/10^{-5}$	受拉损伤因子 d_t
0.6	1.712 712	0.000 000	0.000 000
0.8	2.187 247	1.662 011	0.104 482
1.0	2.410 000	3.074 615	0.159 226
2.0	1.260 460	17.101 661	0.570 048
3.0	0.809 976	28.977 767	0.718 586
6.0	0.423 590	61.636 645	0.856 098
10.0	0.278 854	104.041 989	0.909 560
20.0	0.164 949	209.292 464	0.950 815
40.0	0.099 964	419.292 418	0.972 925

注: $x_t = \varepsilon_t/\varepsilon_{t,r}$, ε_t 为混凝土的实际拉应变, $\varepsilon_{t,r}$ 为与单轴抗拉强度 $\sigma_{t,r}$ 相应的混凝土峰值拉应变。

2.2 数值计算结果及分析

对 x_c 的最大值 $x_{c,\text{max}}$ 和 x_t 的最大值 $x_{t,\text{max}}$ 取不同的值,研究混凝土拉压应力-应变曲线截断处取值和损伤因子取值对计算结果的影响。当 $x_{c,\text{max}}$ 和 $x_{t,\text{max}}$ 取值小于 3 时,有限元模型的荷载-跨中挠度曲线与试验值差异较大,对 $x_{c,\text{max}}$ 分别取 3、6、9、15、20,对 $x_{t,\text{max}}$ 分别取 3、6、10、20、40 建立有限元模型进行分析。简支梁 STEEL-40S 开裂荷载的试验值为 13.28 kN,极限荷载的试验值为 56.91 kN,达到极限荷载时的挠度为 40.51 mm。图 5 和表 5 为 $x_{c,\text{max}}$ 和 $x_{t,\text{max}}$ 9 种取值组合的荷载-跨中挠度曲线的计算结果与简支梁试验数据的对比。当 $x_{c,\text{max}} = 20$, $x_{t,\text{max}} = 3$ 时,极限荷载的理论值为

60.69 kN,达到极限荷载时的挠度为 14.20 mm,不能反映试验真实情况。当 $x_{l,max} = 40, x_{c,max} = 3$ 时,开裂荷载的理论值与真实值相差 3.26 kN,在跨中挠度 100 mm 以内荷载-跨中挠度曲线没有出现下降段。当 $x_{l,max} = 40$ 时,5 组模拟所得的荷载-跨中挠度曲线在弹性范围内可以较好地反映真实

情况,开裂荷载的计算值均为 16.54 kN,与真实值接近。当 $x_{l,max} = 40, x_{c,max} = 20$ 时,受拉损伤因子和受压损伤因子的取值均大于 0.95,开裂荷载、极限荷载以及极限荷载对应的跨中挠度的理论值与试验值的相对误差均小于 5%,吻合性较好,曲线趋势可以反映试验真实情况。

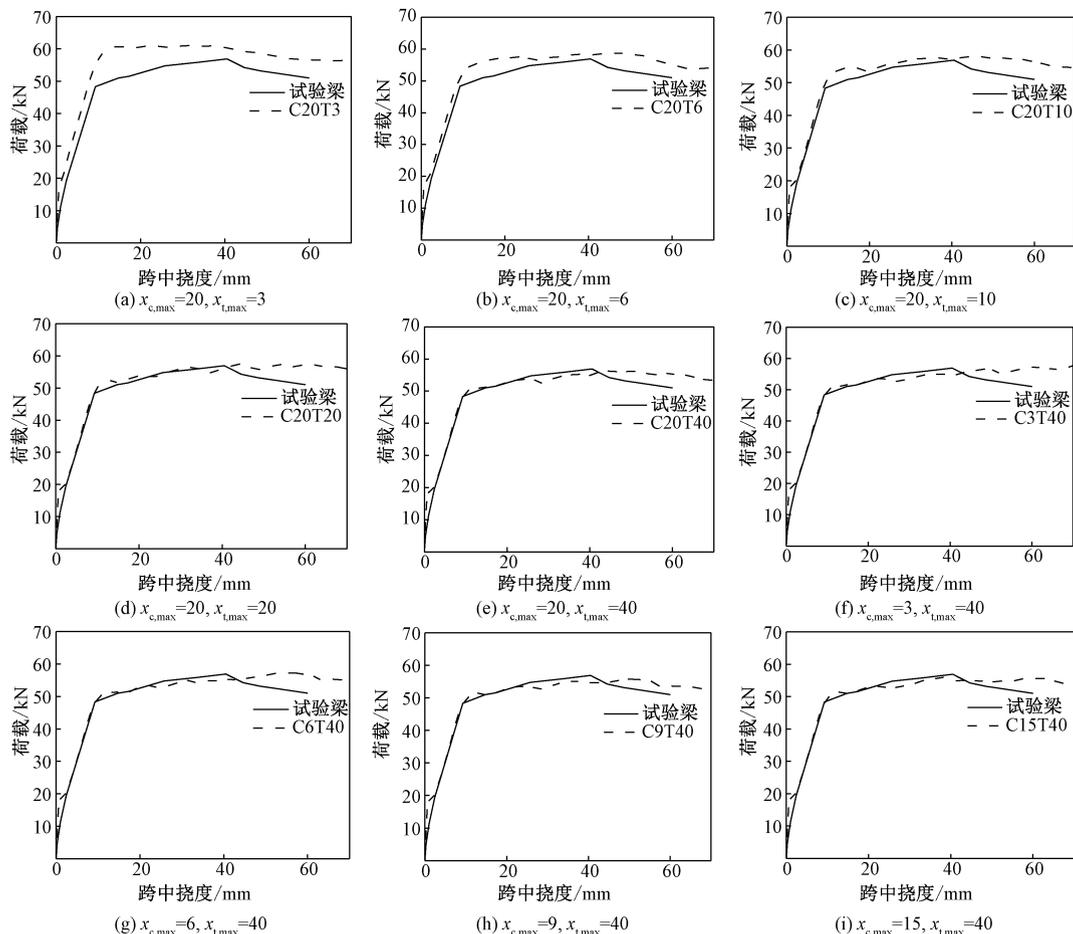


图 5 不同截断值荷载-跨中挠度曲线

Figure 5 Load-span deflection curves at different cutoffs

3 CDP 模型在结构分析中的应用

在初步验证混凝土的应力-应变曲线截断处取值的基础上,以文献[16-18]中的试验梁 STEEL-60S、试验梁 PKJ1 和剪力墙 CW-1 为例建立有限元模型,以本文推荐的值和表达式计算模型参数,受拉受压损伤因子取值大于 0.95,混凝土的应力-应变曲线截断处也与之对应。将模型计算所得的荷载-位移曲线和试验值比较,进一步检验 CDP 模型参数取值和计算方法。

试验梁 STEEL-60S 的有限元模型如图 6(a) 所示,底部混凝土的受拉损伤因子达到预先设定的最大值,出现了严重的受拉破坏,分配梁加载点附近的混凝土受压损伤因子达到预先设定的最大

表 5 开裂荷载和极限荷载理论值

Table 5 The first crack moment and the experimental and analysis values of the maximum moment

$x_{c,max}$	$x_{l,max}$	开裂荷载 P_{cr}/kN	极限荷载 P_u/kN
20	3	18.92	60.69
20	6	17.96	58.74
20	10	17.64	58.05
20	20	17.34	57.45
20	40	16.54	56.37
3	40	16.54	—
6	40	16.54	57.41
9	40	16.54	55.74
15	40	16.54	55.99

值,与试验梁的破坏现象基本吻合。图 6(b) 为荷载-位移曲线试验值与计算值的对比,两者趋势基

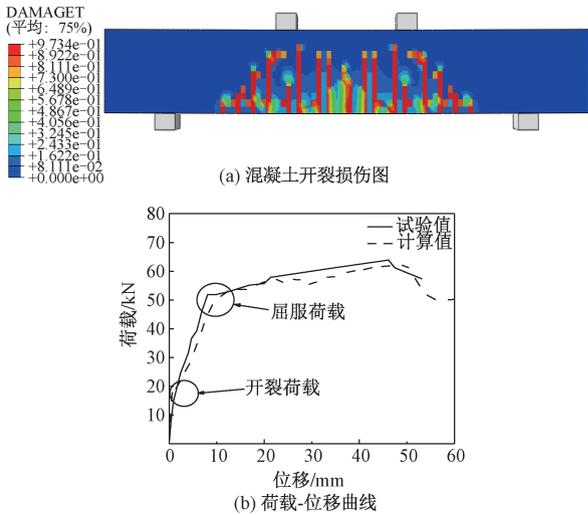


图 6 试验梁 STEEL-60S 有限元模型及数值对比分析
 Figure 6 Test beam STEEL-60S finite element model and numerical comparison analysis

本一致;开裂荷载的计算值为 19.82 kN,与试验值相差 2.37 kN;极限荷载的计算值为 62.21 kN,与试验值相差 1.68 kN。

如图 7 所示,试验梁 PKJ1 的有限元模型从底部出现垂直裂缝,随后斜裂缝自两端向加载点迅速发展,最终因为加载点附近的混凝土压碎而破坏,与试验梁发生剪压破坏的实际情况相符。开裂荷载的试验值为 29 kN,计算值为 31.22 kN,试验值比计算值低 7.1%。极限荷载的试验值为 140 kN,计算值为 137.58 kN,试验值比计算值高 1.7%。有限元模型计算所得的荷载-位移曲线在弹性阶段、屈服阶段、破坏阶段与试验数据吻合。

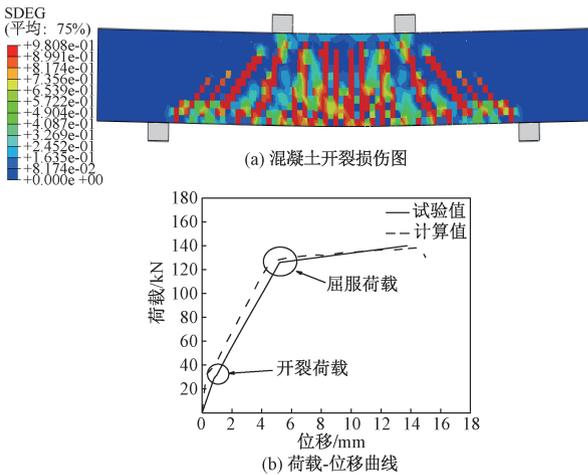


图 7 试验梁 PKJ1 有限元模型及数值对比分析
 Figure 7 Test beam PKJ1 finite element model and numerical comparison analysis

剪力墙 CW-1 的有限元模型的混凝土开裂损伤如图 8(a) 所示,在往复水平力的作用下,有限元模型出现从下至上、由墙外向墙内发展的水平

裂缝,随着荷载循环次数的增加,水平裂缝向下发展成为斜裂缝,与试验现象完全吻合。有限元模型的水平力-位移曲线与试验值的对比如图 8(b) 所示,有限元模型达到峰值荷载后,水平力不再增加,而顶点的水平位移随着循环次数的增加逐渐变大;计算所得的滞回曲线饱满,趋势与试验曲线一致;正反向屈服荷载的平均值为 320.1 kN,比试验值低 3.9%;正反向峰值荷载平均值为 414.9 kN,比试验值高 4.3%。

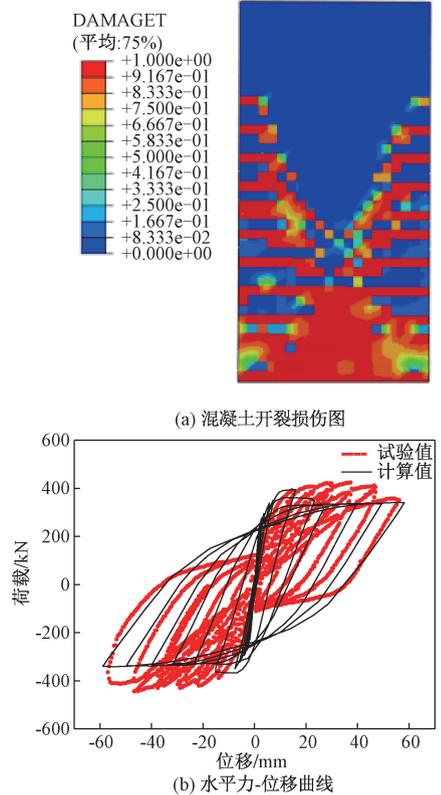


图 8 剪力墙 CW-1 有限元模型及数值对比分析
 Figure 8 Shear wall CW-1 finite element model and numerical comparison analysis

4 结论

(1) 根据本文推荐的损伤因子计算式,将规范提供的混凝土应力-应变曲线应用到 CDP 模型,得到的模型参数是准确可靠的,可用于混凝土构件的开裂验算和承载力分析。

(2) 当受拉受压损伤因子取值大于 0.95,混凝土的应力-应变曲线截断处也与之对应时,开裂荷载和极限荷载有限元分析的结果与试验值相对误差较小。

(3) CDP 模型没有考虑钢筋和混凝土之间存在的黏结滑移现象,有限元模型的计算结果与试验结果存在差异,但结果可以满足工程精度要求。

参考文献:

- [1] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. *International journal of solids and structures*, 1989, 25(3): 299-326.
- [2] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. *Journal of engineering mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.
- [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.
- [4] 李杰, 吴建营. 混凝土弹塑性损伤本构模型研究 I: 基本公式[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(9): 14-20.
- [5] GENIKOMSOU A S, POLAK M A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS [J]. *Engineering structures*, 2015, 98: 38-48.
- [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] 李斌, 方宏远, 王复明. 脱空排水管道高聚物修复前后力学特性分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2019, 40(1): 62-66.
- [8] RAMA J R J S, CHAUHAN D C D R, SIVAKUMAR M S M V, et al. Fracture properties of concrete using damaged plasticity model-A parametric study [J]. *Structural engineering and mechanics*, 2017, 64(1): 59-69.
- [9] 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(增刊 2): 559-561.
- [10] 张劲, 王庆扬, 胡守营, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. *建筑结构*, 2008, 38(8): 127-130.
- [11] 刘巍, 徐明, 陈忠范. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J]. *工业建筑*, 2014, 44(增刊 1): 167-171.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [13] Eurocode 2: design of concrete structures-part 1-1: general rules and rules for buildings[S]. Brussels: European committee for standardization, 2004.
- [14] SCOTT B D. Stress-strain behavior of concrete by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. *ACI Journal*, 1982, 79(1): 13-27.
- [15] SIDOROFF F. Description of anisotropic damage application to elasticity[M]. Berlin: Springer, 1981: 237-244.
- [16] SUN Z Y, YANG Y, QIN W H, et al. Experimental study on flexural behavior of concrete beams reinforced by steel-fiber reinforced polymer composite bars [J]. *Journal of reinforced plastics and composites*, 2012, 31(24): 1737-1745.
- [17] 李承昌, 耿会涛, 李清富, 等. 不锈钢筋混凝土梁试验研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2017, 13(1): 15-18.
- [18] 张锡治, 韩鹏, 李义龙, 等. 带现浇暗柱齿槽式预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(8): 88-94.

CDP Model Parameters Calculation and Value Method Verification

LI Qingfu, KUANG Yihang, GUO Wei

(School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To apply the concrete stress-strain curve in the concrete structure design code to the ABAQUS concrete plastic damage model, the calculation method of the concrete plastic damage model parameter and the value range of the damage factor were studied, taking a simple supported beam bending test as an example, the truncation of the stress-strain curve of concrete and the value of the damage factor were calibrated. In order to verify the rationality and accuracy of the calculation method of the model parameters and the values in this paper, three sets of specimens including 2 simply supported beams and 1 shear wall were selected for finite element simulation. The results showed that the simulation results and tests of the beam cracking load, ultimate load, load-span deflection curve and shear wall horizontal force-displacement curve were in good agreement and could meet the requirements of engineering accuracy. The truncation of the stress-strain curve of concrete and the value of the damage factor were accurate and reliable.

Key words: ABAQUS; concrete damaged plasticity model; model parameters; damage factor; constitutive model